



David Chmiel, B.Sc.

**Ingenieurgeologische Untersuchungen der Stabilität eines
Felsturmes bei Förk**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science

Masterstudium Erdwissenschaften - Ingenieurgeologie

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. B.A. M.Sc. Ph.D. Daniel Scott Kieffer

Institut für Angewandte Geowissenschaften

Technische Universität Graz

Graz, März 2017

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Gleichheitsgrundsatz

Aus Gründen der Lesbarkeit wurde in dieser Arbeit darauf verzichtet, geschlechtsspezifische Formulierungen zu verwenden. Jedoch möchte ich ausdrücklich festhalten, dass die bei Personen verwendeten maskulinen Formen für beide Geschlechter zu verstehen sind.

Danksagung

Die Erarbeitung dieser Masterarbeit wurde durch die geduldige und äußerst hilfreiche Betreuung von Herr Prof. Dr. D. S. Kieffer möglich, wofür ich mich hiermit sehr herzlich bedanke.

Einen besonderen Dank möchte ich Herrn A. Buyer vom Institut für Felsmechanik und Tunnelbau ausdrücken, welcher als betreuender Assistent die Erarbeitung vieler Ziele dieser Arbeit erst möglich machte. Die große Mühe und der hohe Zeitaufwand, welche er dabei investierte, um mich bei meiner Arbeit zu unterstützen, verdient große Anerkennung und zeugt von der großen Hilfsbereitschaft, welche Herr Buyer Studierenden an der TU Graz entgegenbringt.

Sehr danken möchte ich auch Herrn Mag. F. Goldschmidt vom Landesgeologischen Amt Kärnten für das Möglichwerden dieser Arbeit und die tatkräftige Unterstützung, welche ich aufgrund seines Einsatzes im Laufe meiner Arbeit erhalten habe.

Die Hilfe und Gastfreundschaft, welche mir die Bewohner der Gemeinde Nötsch im Gailtal entgegenbrachten, beeindruckte mich zutiefst. Dabei möchte ich insbesondere Herrn G. Pipp und Frau A. Pipp danken, die sich als ortskundige Personen die Zeit nahmen, unsere Gruppe zum Felsturm zu führen und uns mit großer Begeisterung die natürlichen und morphologischen Gegebenheiten am Dobratsch erläuterten. Die Befliegung mit dem Helikopter wurde durch Herrn G. Pipp, Herr Mag. F. Goldschmidt sowie Herrn Schausberger von der Kärntner Polizei möglich, wofür ich diesen Personen sehr dankbar bin. Auch der Familie Staudacher möchte ich für die herzliche Gastfreundschaft und die Verköstigung von Kärntner Spezialitäten einen großen Dank aussprechen. Herr R. Staudacher unterstützte mich zudem bei meinen Kartierarbeiten.

Weiterhin bedanke ich mich bei den wissenschaftlichen Mitarbeitern Herrn A. Kluckner, Herr M. Henzinger, Herr M. Lagger und weiteren Studierenden vom Institut für Felsmechanik und Tunnelbau sowie vom Institut für Angewandte Geowissenschaften. Ohne deren technische, fachliche und mentale Unterstützung hätte ich diese Arbeit wohl nicht anfertigen können.

Ebenso möchte ich mich bei Frau C. Freudenthaler-Pascher von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik bedanken, die mir Daten über seismische Bodenbeschleunigungen am Dobratsch zur Verfügung stellte.

Ganz besonders hervorzuheben ist die Unterstützung meiner Familie, sowie von Freunden, die ich während meiner Studienzeit und insbesondere beim Anfertigen dieser Arbeit erhalten habe. Diesen Menschen gilt ein großer Dank, da diese mir auch in schwierigen Phasen stets zu Motivation und Kraft für die Bewältigung meiner Aufgaben verhalfen.

Abstract

There is a massive limestone rock tower with a size of approximately 100*60*30 m standing close to the village Förlk in the community Nötsch im Gailtal. Due to its high exposure and critical joint intersections in the foot area, the stability is investigated in this thesis with state of the art remote sensing techniques and a pseudo-static stability analysis. There have been recurrent earthquakes at the Dobratsch in the past. Hence, the seismic influence on the global rock tower stability will be analysed in particular and discussed. An actually dynamic acting seismic acceleration is to be substituted by a horizontal pseudo-static force in this thesis. The required geometrical and mechanical parameters are determined by on sight and digital joint mapping, as much as possible. The shear parameters φ (friction angle) and c (cohesion) will be assumed. As a result of the pseudo-static analysis, a relationship between φ , c , the seismic acceleration and a factor of safety can be determined. Three downward slope oriented joint sets are determined in a georeferenced 3D surface model which is created by the digital mapping software ShapeMetriX^{3D}. The point cloud of the 3D surface model is also used for both calculating the volumes of the whole rock tower and of distinctive sections. The global rock tower volume is around 180000 m³. In case of failure it is assumed that the rock tower will not collapse en bloc but would be disintegrated into four distinctive sections. The size and shape of the distinctive sections is determined by means of clearly visible joint intersections.

Kurzfassung

In unmittelbarer Nähe der Ortschaft Förk in der Gemeinde Nötsch im Gailtal befindet sich ein etwa 100*60*30 m mächtiger Felsturm aus Wettersteinkalk. Aufgrund seiner Exponiertheit und dem Vorhandensein kritischer Trennflächenverschneidungen im Fußbereich wird in dieser Arbeit die Standsicherheit des Felsturmes mit gängigen Fernerkundungsmethoden und einer pseudo-statischen Analyse untersucht. Im Gebiet des Dobratsch traten in der Vergangenheit wiederkehrend Erdbeben auf. Deshalb wird insbesondere der seismische Einfluss auf die Standsicherheit des Felsturmes analysiert und diskutiert. Eine eigentlich dynamisch wirkende seismische Beschleunigung wird in dieser Arbeit durch eine pseudostatische horizontale Kraft ersetzt. Die notwendigen geometrischen und mechanischen Parameter werden, soweit wie möglich, aus einer im Gelände und digital durchgeführten Trennflächenkartierung bestimmt. Die Scherparameter φ (Reibungswinkel) und c (Kohäsion) werden angenommen. Resultierend kann durch die pseudo-statische Analyse ein Zusammenhang zwischen φ , c , der horizontalen seismischen Beschleunigung sowie einem Sicherheitsfaktor bestimmt werden. Drei hangabwärts orientierte Trennflächenscharen werden in einem georeferenzierten 3D-Oberflächenmodell bestimmt, welches mit dem Computerprogramm ShapeMetriX^{3D} erstellt wird. Die Punktwolke des 3D-Oberflächenmodells wird zudem für die Berechnung der Volumina des gesamten Felsturmes sowie markanter Teilblöcke verwendet. Das Volumen des Felsturmes beträgt in etwa 180000 m³. Im Falle eines Versagens ist anzunehmen, dass der gesamte Block in vier Teilblöcke fragmentiert werden könnte. Die Form und die Größe der Teilblöcke wird anhand von deutlich sichtbaren Trennflächenverschneidungen bestimmt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Ziele der Arbeit.....	2
1.3	Geographischer Überblick.....	3
1.4	Geologischer Überblick	6
1.4.1	Tektonik	6
1.4.2	Geologische Verhältnisse.....	7
1.4.3	Felsturm	8
2	Wissenschaftliche Grundlagen	10
2.1	Kinematik von Massenbewegungen in Festgesteinen	10
2.1.1	Fallen, Stürzen	11
2.1.2	Kippen.....	11
2.1.3	Gleiten.....	12
2.1.4	Fließen	12
2.1.5	Driften	12
2.2	Auslöser von Massenbewegungen.....	12
2.2.1	Erdbeben (Dynamische Belastungen)	13
2.2.2	Veränderungen der hydrogeologischen Gegebenheiten.....	14
2.2.3	Temperatureffekte	14
2.2.4	Topographie	15
2.2.5	Kinematische Freiheit.....	15
3	Methodik	16
3.1	Geländearbeit	16
3.1.1	Trennflächenkartierung und Beschreibung der geologischen Verhältnisse vor Ort.....	16
3.1.2	Fotogrammetrische Aufnahme der Felswand	16
3.2	Digitale Trennflächenkartierung mit ShapeMetriX ^{3D}	17
3.3	Ermittlung der Blockvolumina	18
3.4	Bestimmung der kinematischen Situation.....	20
3.5	Pseudo-Statistische Stabilitätsanalyse.....	21

4 Ergebnisse	25
4.1 Trennflächenkartierung	25
4.2 Blockvolumina	28
4.2.1 Gesamtvolumen	28
4.2.2 Volumina der Teilblöcke	29
4.3 Stabilitätsuntersuchungen	30
4.3.1 Bestimmung der kinematischen Situation	30
4.3.2 Ergebnisse der pseudo-statischen Analyse	31
5 Diskussion	35
5.1 Interpretation der Ergebnisse der TF-Kartierung	35
5.2 Diskussion der Berechnung der Blockvolumina	37
5.3 Diskussion der pseudo-statischen Analyse	38
5.3.1 Fallbeispiel	40
6 Ausblick	43
Literatur	44
Anhang A	46
Anhang B	48
Anhang C	53

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Geographische Übersicht des Projektgebietes.	3
Abbildung 1.2: Projektgebiet, Felsturm = rot umrahmte Fläche. Modifizierte Satellitenaufnahme aus Google Earth, 18.05.2016.	4
Abbildung 1.3: Höhenprofil von Förk bis zum Fuße des Felsturmes.	4
Abbildung 1.4: Blick von SW' auf die Vorderseite des Felsturmes.	5
Abbildung 1.5: Blick von S' auf die Seite des Felsturmes.	5
Abbildung 1.6: Tektonische Übersichtskarte der Villacher Alpe, verändert nach [4].	6
Abbildung 1.7: Schematisches Profil durch den Dobratsch, in etwa auf der Höhe von Bleiberg.	8
Abbildung 1.8: Ausschnitt aus der geologischen Karte der Republik Österreich 1:50000, Blatt 200 Arnoldstein.	9
Abbildung 2.1: Einteilung von Förk in der Erdbebengefährdungskarte von Kärnten (ZAMG). ..	14
Abbildung 3.1: 3D-Oberflächenmodell. Nord = Grüner Pfeil, Osten = Roter Pfeil. Blick auf die Felswand von SW'. Maßstab 1:3500.	18
Abbildung 3.2: Punktwolke des Projektgebietes, welche aus dem fotogrammetrischen Bildmaterial erzeugt wurde.	19
Abbildung 3.3: Vereinfachtes Modell eines abgleitenden Blocks aus einer Felsböschung. Modifiziert nach [13].	21
Abbildung 3.4: Kräfteverhältnisse am Felsturm (schwarz umrahmt). Als Versagenskinematik wird das Gleiten des Felsturmes auf der potentiellen Gleitfläche (dicke schwarze Linie) angenommen.	24
Abbildung 4.1: Winkeltreue Lagenkugelprojektion der unteren Hemisphäre. Darstellung der Polpunkte aller händisch und digital kartierten Trennflächen im Projektgebiet als Häufigkeitsverteilung (<i>Contourplot</i>).	25
Abbildung 4.2: Skizzierung des Trennflächensystems am Fuße des Felsturmes.	27
Abbildung 4.3: Zugeschnittene Punktwolke, Ansicht von der Seite.	28
Abbildung 4.4: Darstellung der Punktwolke aus Abbildung 4.3 als konvexer Volumenkörper. ..	29

Abbildung 4.5: Graphische Darstellung der berechneten Teilblöcke.	30
Abbildung 4.6: Darstellung von φ gegen c bei den SF 1, 1.5, 2 und 3.	31
Abbildung 4.7: Graphische Darstellung von k_y gegen SF zwischen 1 und 3 in Abhängigkeit von den gewählten Wertepaaren φ und c	32
Abbildung 4.8: k_y als Funktion von φ und c . Die SF sind in den jeweiligen Farben dargestellt.	33
Abbildung 4.9: Darstellung von k_y als Funktion von φ und c für die SF 1.5 (blau), 2 (rot) und 3 (grün).	34
Abbildung 4.10: c in Abhängigkeit von A . Von der errechneten Fläche $A = 3300 \text{ m}^2$ werden schrittweise kleinere Werte angenommen.	34
Abbildung 5.1: Darstellung einiger wichtiger mit ShapeMetriX® (3GSM) kartierten Trennflächen am Felsturm und den jeweiligen Orientierungen (Fallrichtung/Fallwinkel)...	36
Abbildung 5.2: Darstellung der Abhängigkeit von k_y zu den ermittelten SF. Die Begrenzung des roten Gefährdungsbalkens ist mit $k_y = 0,13 \text{ %g}$ festgelegt.	38
Abbildung 5.3: Einfluss von φ und c auf die Standsicherheit gegenüber einem seismischen Ereignis.	39
Abbildung 5.4: k_y in Abhängigkeit von $\varphi = 30^\circ$, $\varphi = 47^\circ$ und c . Die SF sind durch orange ($\varphi = 47^\circ$) und blaue Ziffern ($\varphi = 30^\circ$) gekennzeichnet.	41
Abbildung 5.5: k_y in Abhängigkeit von SF für $\varphi = 47^\circ$ und $\varphi = 30^\circ$. $k_y = 0,13\text{ %g}$ ist die obere Grenze des Gefährdungsbalkens.	41

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Geographische Koordinaten des Projektgebietes. BMN = Bundesmeldenetz.	3
Tabelle 2.1: Klassifikation von Massenbewegungen in Festgesteinen, modifiziert nach [9].	10
Tabelle 2.2: Geschwindigkeitsklassen von Massenbewegungen in Festgesteinen, modifiziert nach [9].	11
Tabelle 2.3: Daten bedeutender historischer Erdbeben am Dobratsch (ZAMG). 6 = Leichte Gebäudeschäden, 7 = Gebäudeschäden, 8 = Schwere Gebäudeschäden, EMS = Europäische Makroseismische Skala (1998).	13
Tabelle 3.1: Klassifikation der Trennflächenbeschreibung nach ÖNORM EN ISO 14689-1 (2003).	16
Tabelle 3.2: Koordinaten der Ground Control Points (GCP). Darstellung als UTM-Koordinaten (WGS84). E = Ostwert, N = Nordwert, H = Höhe.	17
Tabelle 4.1: Legende zu Abbildung 4.1. Darstellung der Bedeutung der Farbbereiche in Abbildung 4.1.	26
Tabelle 4.2: Nötige Parameter für die pseudo-statische Analyse. m = Masse des Felsturmes, A = Gleitfläche, θ = Böschungswinkel, W = Gewichtskraft.	31
Tabelle 4.3: Ein Auszug berechneter Werte für k_y mit den zugehörigen Werten für φ und c.	32
Tabelle 6.1: Messergebnisse der händischen Trennflächenkartierung nach ÖNORM EN ISO 14689-1. Die dazugehörigen Erläuterungen sind Tabelle 3.1 zu entnehmen.	46
Tabelle 6.2: Matlabcodes für die Berechnung der Blockvolumina.	48
Tabelle 6.3: Berechnete Werte für k_y zu den Annahmen für φ und den daraus errechneten Werten für c.	53

Abkürzungen

N = Norden

S = Süden

E = Osten

W = Westen

N' = nördlich

NE' = nordöstlich

NW' = nordwestlich

E' = östlich

S' = südlich

SE' = südöstlich

SW' = südwestlich

W' = westlich

BMN = Bundesmeldenetz

DGM = Digitales Geländemodell

TF = Trennfläche/n

ZAMG = Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

m.ü.NN = meter über Normal Null

SF = Sicherheitsfaktor/en []

EMS = Europäische Makroseismische Skala (1998)

ROI = Region Of Interest

N = Normalkraft [N]

W = Gewichtskraft [N]

F_H = Horizontal wirkende statische Kraft [N]

k_y = Gesamtbeschleunigungskoeffizient/en [%g]

m = Masse des Felsturmes [kg]

c = Kohäsion [Pa]

φ = Reibungswinkel [°]

σ_{eff} = effektive Normalspannung [Pa]

τ = Scherspannung [Pa]

c' = effektive Kohäsion [Pa]

φ' = effektiver Reibungswinkel [°]

A = Gleitfläche [m²]

Symbole und Einheiten

[N] = Newton

[Pa] = Pascal

[%g] = Prozent der Erdbeschleunigung (9,81 m/s²)

[] = keine Einheit

[°] = Grad

[rad] = radiant

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Förk ist ein Ortsteil der Gemeinde Nötsch im Gailtal und befindet sich etwa 20 km SW' von Villach. Förk liegt an der Südseite des Dobratsch, an welcher immer wieder Berg- und Felssturzereignisse stattfinden. Im Winter des Jahres 1348 ereignete sich der bis dato verheerendste Bergsturz in dieser Region [1]. Der durch ein Erdbeben im benachbarten Friaul induzierte Bergsturz verschüttete große Teile des Gailtales und führte zu einem anschließenden Rückstau der Gail [1]. Das jüngste Ereignis ereignete sich am 16. Jänner 2015. Unterhalb einer Aussichtsplattform stürzten an der Villacher Alpenstraße 6000 m³ Gestein in die Tiefe [2]. In etwa 2 km Entfernung und oberhalb des Ortsteiles Förk befindet sich ein Felsturm, an welchem durch das Geologische Landesamt Kärnten im Jahr 2005 kritische Trennflächenverschneidungen und Spannungskonzentrationen im Turmfuß festgestellt wurden. Im Laufe dieser Arbeit soll mit einer pseudo-statischen Analyse untersucht werden, ob ein erneutes Erdbeben in dieser Region ein Versagen des Felsturmes bewirken könnte. Im Versagensfall ist davon auszugehen, dass der Felsturm nicht en bloc, sondern disintegriert in die Tiefe stürzen würde. Die Dimensionen des Gesamtblocks sowie einzelner Teilblöcke sollen in dieser Arbeit ermittelt werden.

1.2 Ziele der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine Stabilitätsanalyse des Felsturmes durchzuführen.

Folgende Fragestellungen sollen mit dieser Arbeit beantwortet werden:

- Wie sind die geologisch-/geotechnischen Verhältnisse im Projektgebiet?
- Wie ist die Anordnung der Trennflächen am Felsturm? Gibt es kritische Trennflächenverschneidungen?
- Wie groß sind die Volumina des gesamten Felsturmes sowie einzelner Teilblöcke?
- Ist die Standsicherheit des Felsturmes durch einen Sicherheitsfaktor quantifizierbar?

Die Erarbeitung der Ziele wird durch die Zusammenarbeit mit Herr Mag. Franz Goldschmidt vom Landesgeologischen Amt Kärnten und Bewohnern der Gemeinde Nötsch im Gailtal ermöglicht.

1.3 Geographischer Überblick

Förk ist ein Ortsteil der Gemeinde Nötsch im Gailtal im politischen Bezirk Villach-Land in Kärnten und befindet sich etwa 25 Straßenkilometer W' von Villach. Der zu untersuchende Felsturm befindet sich ca. 1,9 km NE' und topographisch oberhalb von Förk. Die geographischen Koordinaten des Projektgebietes sind in Tabelle 1.1 ersichtlich. Der Felsturm befindet sich SE' des Ganges und oberhalb eines Geröllfeldes, welches lokal Politza genannt wird (siehe Abbildung 1.1 und Abbildung 1.2). In Abbildung 1.2 ist im linken oberen Bildrand eine vergrößerte Aufnahme des Felsturmes dargestellt. Der Höhenunterschied zwischen Förk und dem Fuße des Felsturmes beträgt 630 m (Abbildung 1.3).

Tabelle 1.1: Geographische Koordinaten des Projektgebietes. BMN = Bundesmeldenetz.

Geogr. Koordinaten	Förk	Felsturm
BMN-Koordinaten	Rechtswert: 473447,6 Hochwert: 160938,5	Rechtswert: 474887,3 Hochwert: 162150,8
Höhe [m.ü.NN]	620	1250

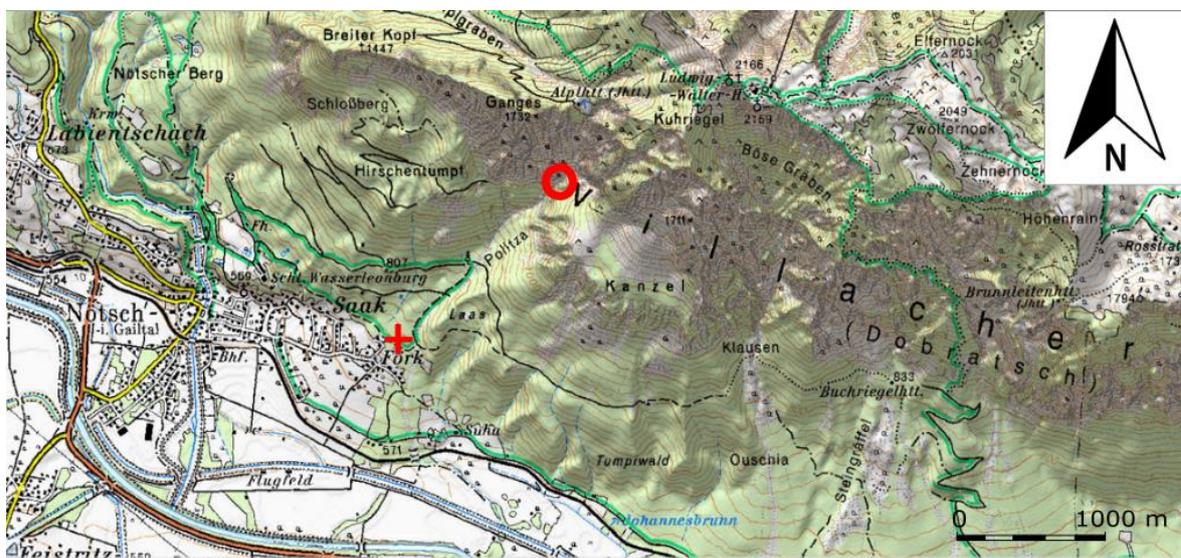


Abbildung 1.1: Geographische Übersicht des Projektgebietes. Die Lage von Förk ist mit einem roten Kreuz, die Lage des Felsturmes ist mit einem roten Kreis markiert. Modifiziert nach KAGIS, 18.05.2016.

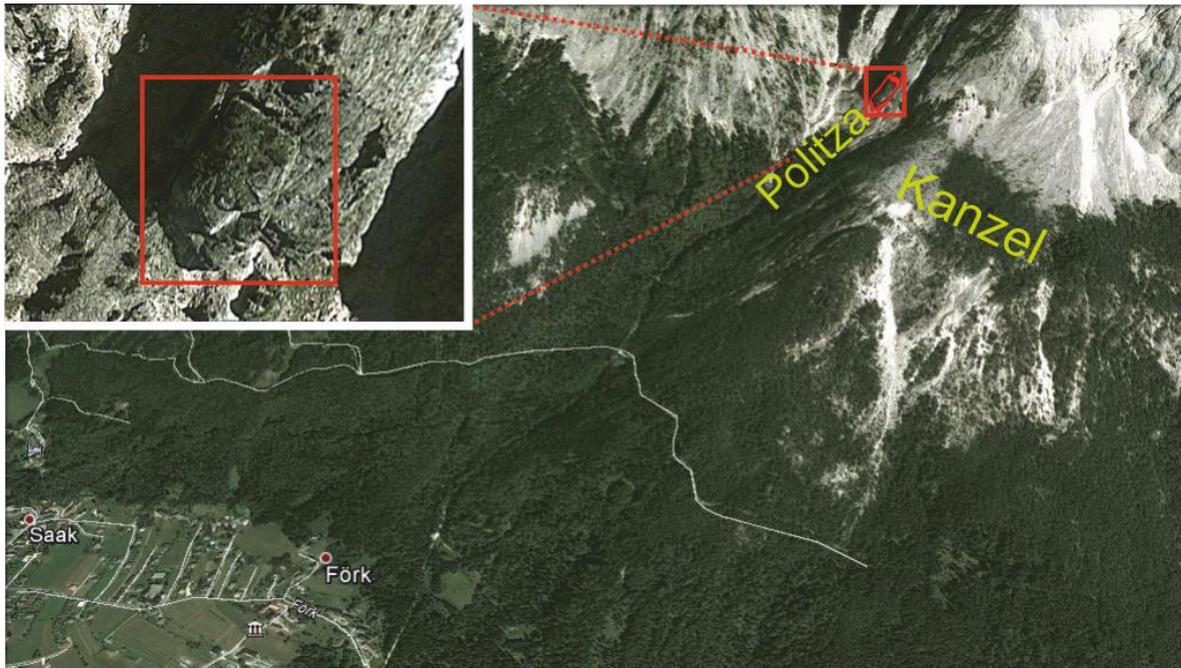


Abbildung 1.2: Projektgebiet, Felsturm = rot umrahmte Fläche. Modifizierte Satellitenaufnahme aus Google Earth, 18.05.2016. Eine vergrößerte Darstellung des Felsturmes befindet sich im linken oberen Bildrand.

In Abbildung 1.3 ist ein Höhenprofil für die Strecke von Förk bis zum Fuße des Felsturmes dargestellt. Die durchschnittliche Geländeneigung auf dieser Strecke beträgt 30,5 %. Im oberen Bereich ist die Neigung größer. Allgemein betrachtet, wird das Gefälle talwärts geringer. Die maximale Geländeneigung ist 65 % am Anfang der Politza. Bei 1,42 km (Abbildung 1.3) flacht das Gelände kurzweilig ab (8 %) und wird anschließend wieder steiler mit Neigungen zwischen 15 % und 20 %. Wenige Meter vor der Ortschaft Förk wird das Gelände erneut flacher (7%) (Abbildung 1.3). In Abbildung 1.4 und Abbildung 1.5 sind Fotos des Felsturmes aus unterschiedlichen Perspektiven zu sehen. Die Maße des Felsturmes sind in einer Vorabschätzung etwa 100*60*30 m [3].

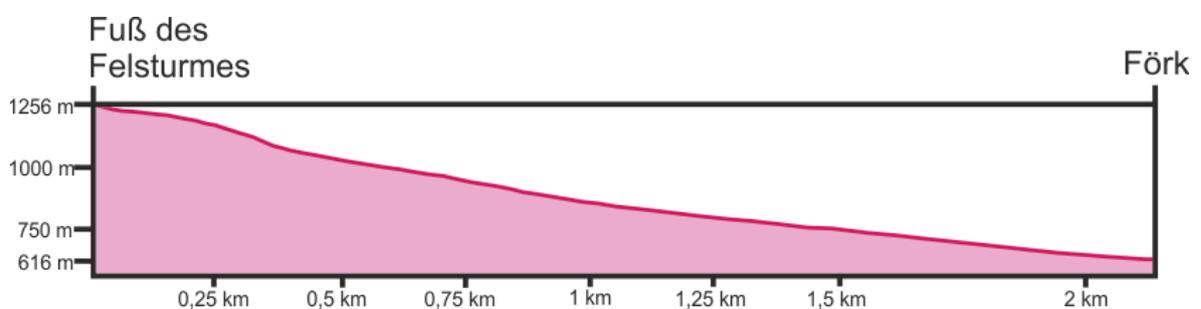


Abbildung 1.3: Höhenprofil von Förk bis zum Fuße des Felsturmes. Modifiziert nach Google Earth.



Abbildung 1.4: Blick von SW' auf die Vorderseite des Felsturmes. (Foto: David Chmiel)



Abbildung 1.5: Blick von S' auf die Seite des Felsturmes. Die Kluft zwischen dem Felsturm und dem umliegenden Gebirge ist vollständig geöffnet und ist durchschnittlich etwa 10 m breit. (Foto: David Chmiel)

1.4 Geologischer Überblick

Im Vorfeld ist zu erwähnen, dass die Begriffe „Villacher Alpe“ sowie „Dobratsch“ in vorliegender Arbeit wie in [4] und [5] als Synonyma verwendet werden.

1.4.1 Tektonik

In Abbildung 1.6 ist eine tektonische Übersichtskarte der Region um den Dobratsch dargestellt. Die Villacher Alpe schließt E' an die Gailtaler Alpen an, ist aber tektonisch und faziell ein Ausläufer der Nordkarawanken [4]. Tektonische Begrenzungen der Villacher Alpe sind im Norden der Bleiberger Bruch, im Süden die Periadriatische Naht (Gailtal-Linie) und im Nordosten die Möll-Drautal-Linie [6]. Nach [6] ist die Trias des Dobratsch in zwei Schollen übereinander geschoben. Die Liegendscholle ist als Rupa-Einheit und die Hangendscholle als Roßtrattenschuppe bezeichnet. Der gesamte Block der Villacher Alpe wurde von SE nach NW auf die Trias des Bleiberger Erzberges aufgeschoben [4]. Die Villacher Alpe ist morphologisch von Westen nach Osten abgestuft [4]. Diese Abstufung führt zu N-S verlaufenden Querbrüchen, welche Versetzungsbeträge von 100°m bis 150°m haben können [6, 7].

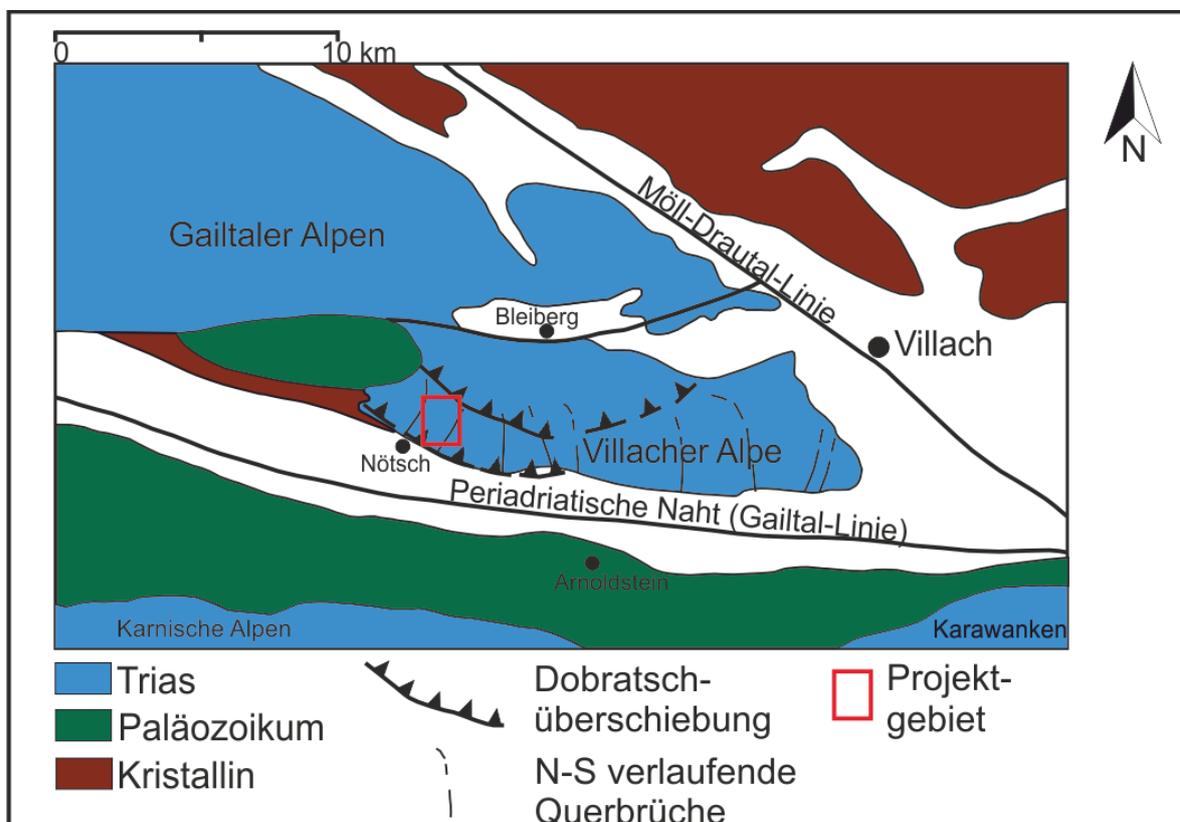


Abbildung 1.6: Tektonische Übersichtskarte der Villacher Alpe, verändert nach [4].

1.4.2 Geologische Verhältnisse

Die Basis des Dobratsch besteht aus dem Gailtalkristallin und dem darauf liegenden Nötscher Karbon [4]. Der Dobratsch selbst ist aus einer permotriassischen Schichtfolge aufgebaut [4]. Diese Schichtfolge besteht vom Liegenden zum Hangenden aus Permoskythsandstein, den Werfener Schichten, dem Alpinen Muschelkalk, den Mitteltriassischen Buntkalcken und Vulkaniten und dem Wettersteinkalk (Abbildung 1.7) [6]. Der Felsturm besteht aus massivem, gering zerklüftetem Wettersteinkalk und wird von den Vulkaniten und Buntkalcken unterlagert (Abbildung 1.7). Die lithologischen Eigenschaften des Wettersteinkalkes sowie der Buntkalcke und Vulkanite werden im Folgenden aus bestehender Literatur zusammengefasst:

1.4.2.1 *Mitteltriassische Buntkalke und Vulkanite*

In der Liegendscholle dieser Gesteinsfazies befinden sich fossilreiche Buntkalke, welche Bankmächtigkeiten von 10 cm bis 20 cm aufweisen. Die Bankoberfläche der Kalke kann wellig und knollig erscheinen. Die Kalke sind im Liegenden der Formation grau und treten mit zunehmender Mächtigkeit vermehrt rot oder grün auf. In der Liegendscholle treten zudem Agglomerate auf, welche in Tuffe übergehen. Diese Ablagerungen können eine Mächtigkeit bis zu 100 m haben. [4, 6]

Die Hangendscholle der mitteltriassischen Gesteinsformationen ist durch ausschließlich graue Kalke und grüne Tuffe gekennzeichnet. Einzelne Tufflagen weisen Mächtigkeiten zwischen wenigen cm und 1,5 m auf. [4]

1.4.2.2 *Wettersteinkalk*

Der Wettersteinkalk weist im Dobratschgebiet eine Gesamtmächtigkeit von etwa 1300 m auf und stellt damit den Hauptfelsbildner in diesem Gebiet dar. Beim Wettersteinkalk ist zwischen einer Riff- und einer Lagunenfazies zu unterscheiden. Die Rifffazies erscheint massiv und beinhaltet Riffknospen und Riffschutt. Die Lagunenfazies besteht aus gebankten Kalcken, welche entweder mikritisch bis arenitisch oder auch stromatolithisch sein können. [4]

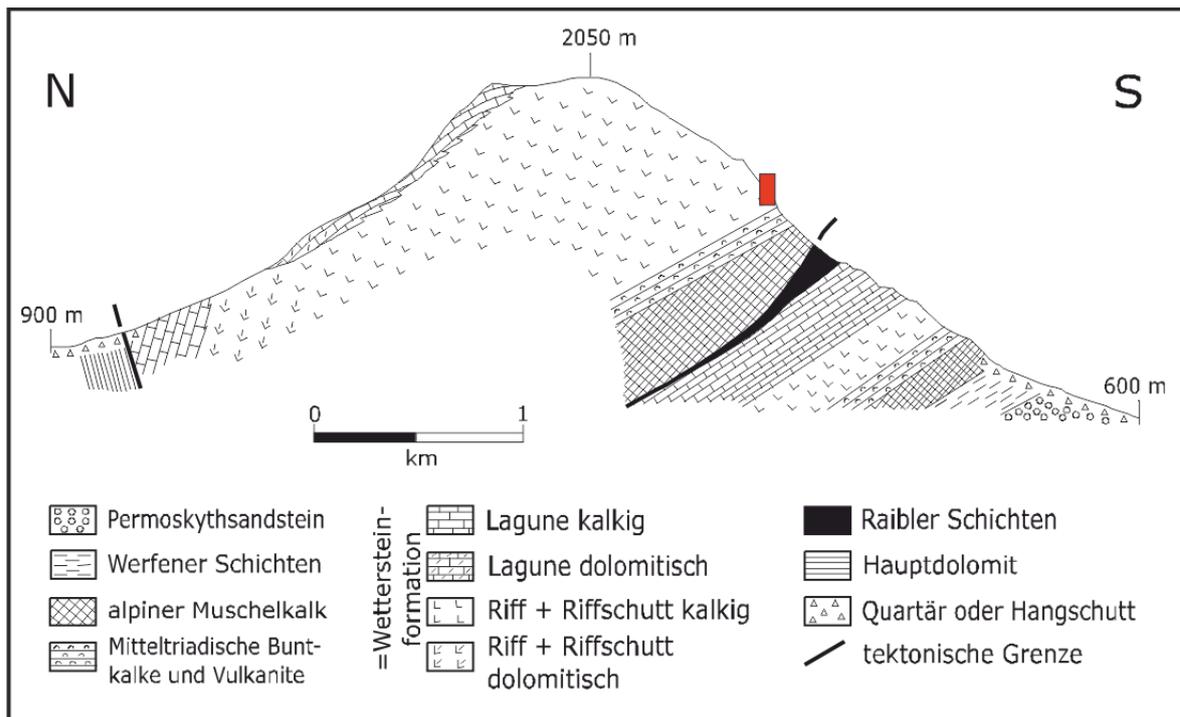


Abbildung 1.7: Schematisches Profil durch den Dobratsch, in etwa auf der Höhe von Bleiberg. Die ungefähre Lage des Felsturmes ist mit einem roten Rechteck dargestellt. Gesamte Abbildung modifiziert nach [6].

1.4.3 Felsturm

Der zu untersuchende Felsturm besteht aus massigem Wettersteinkalk und ist somit der Rifffazies zugeordnet (siehe Kapitel 1.4.2). Das Kalkgestein wird in einer Höhe von etwa 1200 m. ü. NN. von den vulkanischen Gesteinen unterlagert. Die Bildung von Felstürmen wie diesem ist auf die Bildung hangparalleler Klüfte zurückzuführen [4]. Mögliche Ursachen der Entstehung hangparalleler Klüfte am Dobratsch sind nach [5]:

- Zurückbleiben von übersteilten Hängen nach Abschmelzen der Gletscher aus der Würmeiszeit. Aufgrund gravitativer Kräfte sowie dem elastischen Verhalten von Gesteinen bilden sich hangparallele Klüfte [8].
- Beschleunigung der Bildung hangparalleler Klüfte aufgrund von chemischer und physikalischer Verwitterung. Temperaturschwankungen und Verkarstung sind am Dobratsch die bedeutendsten Verwitterungsprozesse. [4]

Nach [4] ist es wahrscheinlich, dass zusätzlich die tektonische Aktivität entlang der E-W verlaufenden Gailtallinie die Ausbildung der hangparallelen Klüfte mit beeinflusst. Die Gailtallinie ist Teil der periadriatischen Naht, welche die Süd- von den Ostalpen trennt (Abbildung 1.6). Im Projektgebiet verläuft zudem eine N-S gerichtete Störung, welche den Taleinschnitt in der Politza bildet. Der Verlauf der vulkanischen Gesteine wird an dieser Störung unterbrochen (Abbildung 1.8).

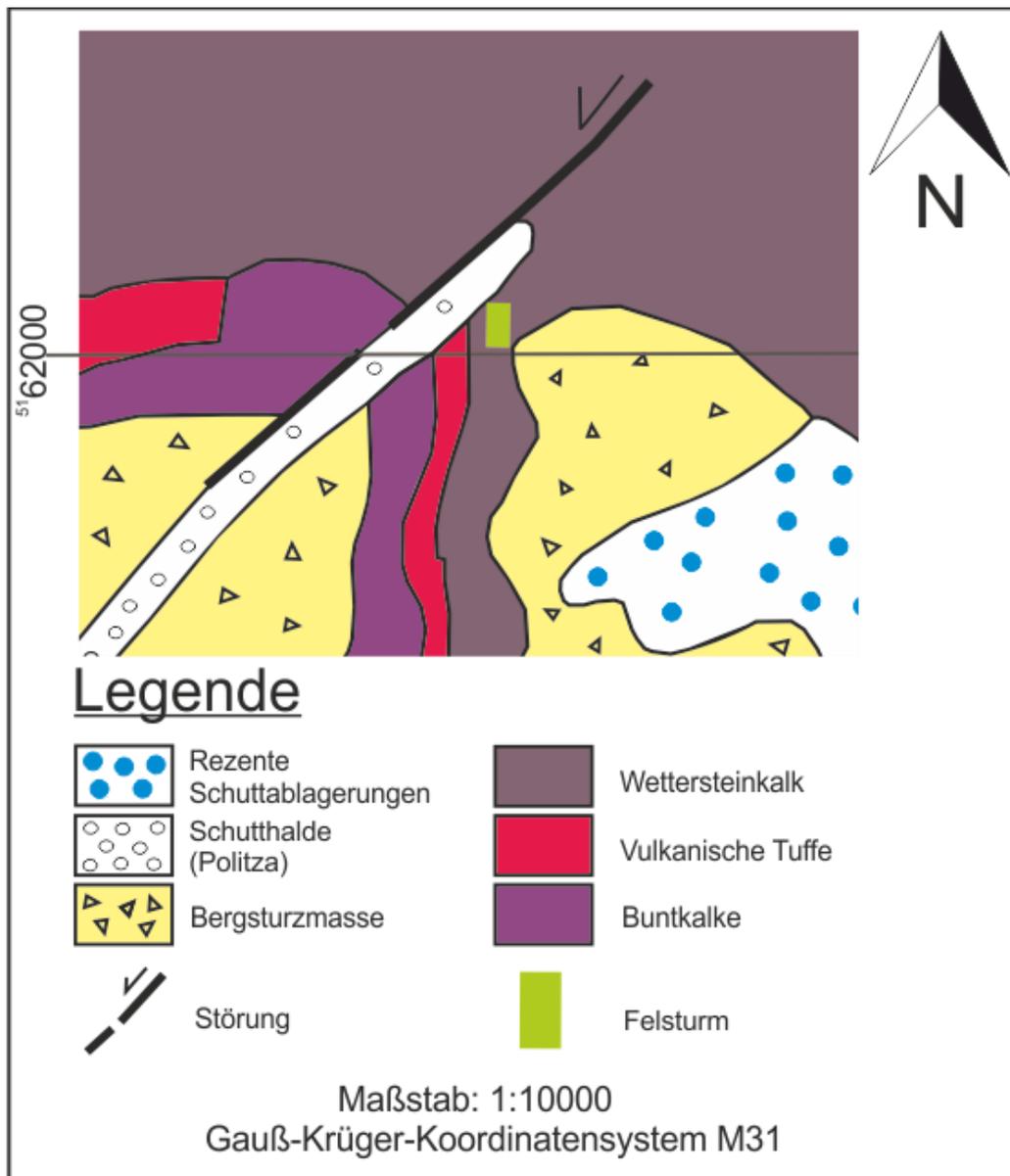


Abbildung 1.8: Ausschnitt aus der geologischen Karte der Republik Österreich 1:50000, Blatt 200 Arnoldstein.

2 Wissenschaftliche Grundlagen

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Arten von Massenbewegungen in Festgesteinen sowie deren potentielle Auslöser thematisiert.

2.1 Kinematik von Massenbewegungen in Festgesteinen

In Tabelle 2.1 sind verschiedene Bewegungsmechanismen in Festgesteinen dargestellt, welche beim Versagen einer Felsböschung auftreten können. Die Klassifikation ist an [9] angelehnt. Kombinationen aus zwei oder mehreren Versagensmechanismen sind möglich und werden als komplexe Formen der Bewegung bezeichnet.

Tabelle 2.1: Klassifikation von Massenbewegungen in Festgesteinen, modifiziert nach [9].

Die englischen Bezeichnungen sind aufgrund der größeren Verbreitung kursiv in Klammern dazugeschrieben.

Art der Bewegung		Festgestein
Fallende Bewegungen		Felssturz (= <i>Rock Fall</i>)
Kippende Bewegungen		Felskippen (= <i>Rock Topple</i>)
Rutschende Bewegungen	Rotationsförmig	Felsrutschen (= <i>Rock Slide</i>)
	Translationsförmig	
Laterale Spreizungen		Felsspreizen (= <i>Rock Spread</i>)
Fließende Bewegungen		Felsfließen (= <i>Rock Flow</i>)
Komplexe Bewegungen		Kombinationen

Zudem können Massenbewegungen nach ihrer Geschwindigkeit klassifiziert werden. Die Bewegungen können extrem langsam ($5 \cdot 10^{-7}$ mm/s) bis extrem rasch (5 m/s) erfolgen (siehe Tabelle 2.2). Je höher die Bewegungsgeschwindigkeit, desto größer ist tendenziell das Zerstörungspotential der Massenbewegung. [9]

Tabelle 2.2: Geschwindigkeitsklassen von Massenbewegungen in Festgesteinen, modifiziert nach [9]. Grau markiert sind die Geschwindigkeitsklassen, welche bei Massenbewegungen in Festgesteinen möglich sind.

Klasse	Beschreibung	Geschwindigkeit	Kinematik (Art der Bewegung)				
			Fallen	Kippen	Gleiten	Fließen	Driften
7	extrem rasch						
		5×10^3 mm/s					
6	sehr rasch						
		5×10^1 mm/s					
5	rasch						
		5×10^{-1} mm/s					
4	mäßig						
		5×10^{-3} mm/s					
3	langsam						
		5×10^{-5} mm/s					
2	sehr langsam						
		5×10^{-7} mm/s					
1	extrem langsam						

Die jeweiligen Bewegungsarten in Felsböschungen (siehe Tabelle 2.1) werden im Folgenden erläutert:

2.1.1 Fallen, Stürzen

Lösen sich Festgesteine von einer Böschung, so können sich diese stürzend oder fallend hangabwärts bewegen. Die Bewegung erfolgt frei fallend, springend oder rollend, mit hoher bis sehr hoher Geschwindigkeit. Fallende oder stürzende Massenbewegungen sind beispielsweise Bergstürze, Felsstürze, Stein- und Blockschläge. Unter Stein- oder Blockschlag versteht man einzelne Steine oder Blöcke, welche weitestgehend isoliert hangabwärts stürzen. Löst sich eine zusammenhängende Gesteinsmasse stürzend aus dem Gesteinsverband, so ist das ein Felssturz. [9]

Der Begriff Bergsturz wird für Massenbewegungen benutzt, bei welchen die Sturzmasse größer als 1 Mio m³ ist oder das Ablagerungsgebiet größer ist als 0,1 km² [10].

2.1.2 Kippen

Kippende Bewegungsmechanismen treten in Gesteinen mit einem steil stehenden Trennflächensystem auf, deren Streichen parallel oder nahezu parallel zum Hang ist [9]. Typisch dafür sind Metamorphite oder Sedimentgesteine mit engständiger und vertikal zu der Hangoberfläche einfallenden Schieferung oder Schichtung [11]. Ein Gesteinspaket kippt, wenn die Bewegung über einen Rotationspunkt erfolgt und der Massenschwerpunkt

des Gesteinspaketes oberhalb der Rotationsachse liegt [9].

2.1.3 Gleiten

Gleitbewegungen in Festgesteinen finden entlang von Bewegungsflächen oder -zonen statt, welche entweder rotations- oder translationsförmig sein können. Bei einer Rotationsgleitung bewegt sich die Felsmasse auf einer konkaven Bewegungszone. Bei einer Translationsgleitung erfolgt die Bewegung auf einer planaren Bewegungszone. Spezialfälle von translationalen Gleitungen sind beispielsweise das Abgleiten eines Felskeils auf zwei planaren Flächen (*wedge sliding*) oder das Abgleiten eines einzelnen Blocks (*block sliding*) auf einer planaren Bewegungszone. [9]

2.1.4 Fließen

Eine fließende Bewegung kann auch in Festgesteinen auftreten. Die Bewegungsgeschwindigkeiten sind dabei sehr gering (siehe Tabelle 2.1). Nach [9] gibt es drei Möglichkeiten für das Zustandekommen von Fließbewegungen in Festgesteinen:

- Geringe Bewegungsbeträge entlang vieler einzelner, nicht verbundener Scherflächen.
- Faltung, Biegung oder Wölbung im Gesteinspaket.
- Das Materialverhalten des Gesteins ist viskos.

2.1.5 Driften

Driften ist eine langsame Art der Bewegung, welche bei Überlagerung kohärenter Gesteinsmassen auf weicheren unterliegenden Gesteinen zustande kommt. Teile des kompakten Gesteins, welche auf der weicheren Unterlage driften, können durch die Bildung steil stehender Zugrisse und Spalten herausbrechen [9]. Es entstehen einzelne Blöcke oder turmartige Strukturen, welche in die weichere Unterlage einsinken können [12].

Versagensmechanismen können in Festgesteinen sehr komplex und speziell sein. Die hier erläuterten Bewegungsarten sind als Grundtypen der Versagensmechanismen in Felsböschungen zu verstehen. Welche Kinematik bei einem Versagen des Felsturmes zu erwarten ist, soll im weiteren Verlauf dieser Arbeit bestimmt werden.

2.2 Auslöser von Massenbewegungen

Nach dem Bergsturzereignis von 1348 wurden große Teile der Südflanke des Dobratsch freigelegt, an welcher es seitdem immer wieder zu Felsstürzen in verschiedenen Ausmaßen kommt. An verschiedenen Lokationen bildeten sich durch geologische Prozesse Felstürme

wie oberhalb von Förk [4]. Nach einem Gespräch mit Herrn Pipp, einem Bergführer und Bewohner aus Nötsch im Gailtal, ist der Felsturm seit 70 Jahren und womöglich noch länger, morphologisch unverändert. Ist überhaupt mit einem Versagen des Felsturmes zu rechnen? Welche Prozesse wären in der Lage, eine Massenbewegung auszulösen?

2.2.1 Erdbeben (Dynamische Belastungen)

Seismische Kräfte können ein bedeutender Auslöser für Hangbewegungen sein [13]. Förk befindet sich in der Erdbebenzone 3 (siehe Abbildung 2.1). Die horizontale Bemessungsbeschleunigung für Förk beträgt nach ÖNORM EN 1998-1 (2009) $0,9 \text{ m/s}^2$ [14]. Dieser Wert beträgt 70 % der maximal zu erwartenden horizontalen Bodenbeschleunigung ($PGA = \text{Peak Ground Acceleration}$) in dieser Region, welche dementsprechend $1,3 \text{ m/s}^2$ beträgt [14]. Die horizontale Bemessungsbeschleunigung ist ein bedeutender Richtwert für Gebäude, denn sie ist die Beschleunigung, welche mit 90 %-iger Wahrscheinlichkeit innerhalb von 50 Jahren nicht überschritten wird [14]. Dies entspricht einer mittleren Wiederholungsperiode von 475 Jahren [14]. Stärkere Erdbeben gab es am Dobratsch in der Vergangenheit immer wieder (Tabelle 2.3). Die Epizentren dieser Erdbeben lagen nie in Kärnten selbst, sondern im benachbarten Friaul oder in Slowenien. Das stärkste aufgezeichnete Erdbeben in der Region ist aus dem Jahre 1348 mit einer Magnitude von 8 nach der EMS oder 6,8 nach der Richter-Skala [15]. Eine Magnitude von 7 entspricht einer seismischen Bodenbeschleunigung von 1 m/s^2 (0,1 %g), eine Magnitude von 6 entspricht einer Bodenbeschleunigung von $0,5 \text{ m/s}^2$ (0,05 %g) [16]. Das Beben aus dem Jahre 1348 hatte somit eine horizontale Bodenbeschleunigung von etwa 0,09 %g. Die maximal zu erwartende Bodenbeschleunigung von $1,3 \text{ m/s}^2$ ist höher als die Bodenbeschleunigung des Bebens von 1348.

Tabelle 2.3: Daten bedeutender historischer Erdbeben am Dobratsch (ZAMG).

6 = Leichte Gebäudeschäden, 7 = Gebäudeschäden,

8 = Schwere Gebäudeschäden, EMS = Europäische Makroseismische Skala (1998).

Epizentrum	Geogr. Koordinaten	Magnitude (EMS)	Datum
Friaul	46.40°/13.40°E	8	25.01.1348
Gemona (Friaul)	46.25°N/13.22°E	7	06.05.1976
Venezzone (Friaul)	46.30°N/13.20°E	6-7	15.09.1976
Bovec (Slowenien)	46.31°N/13.61°E	6	12.07.2004

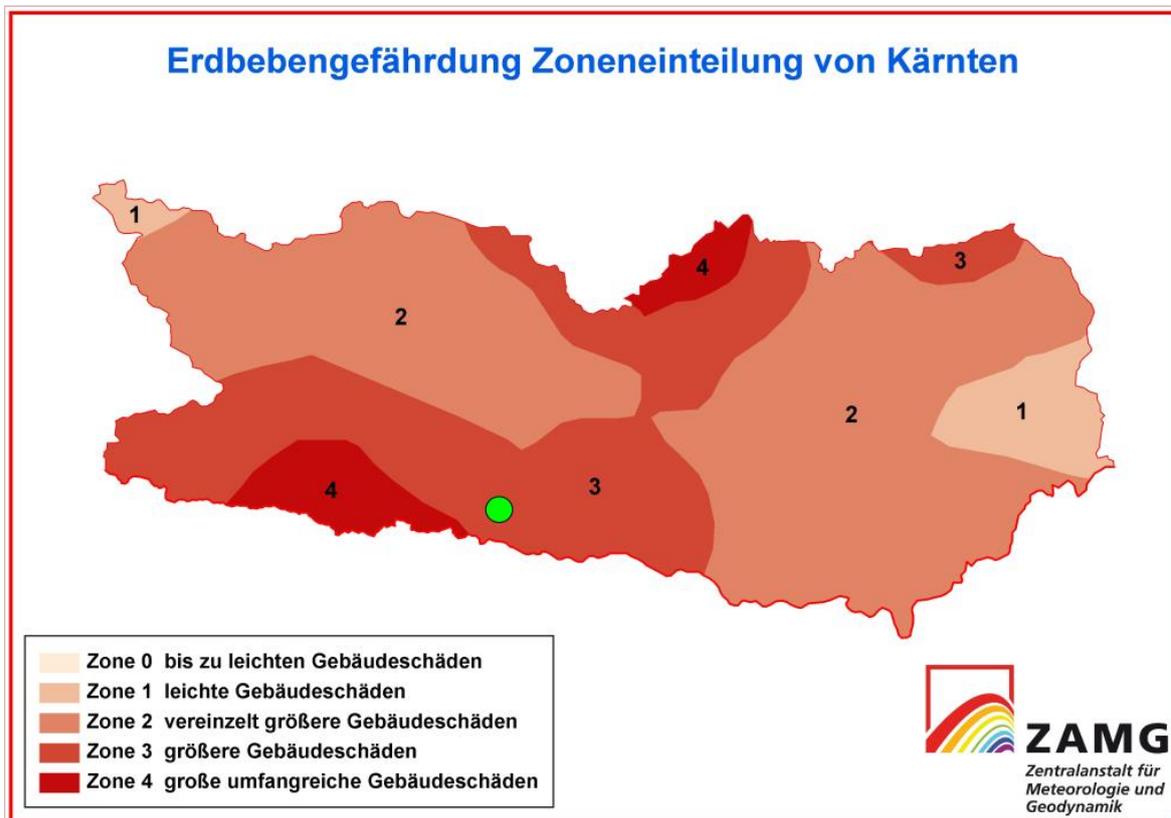


Abbildung 2.1: Einteilung von Fölk in der Erdbebengefährdungskarte von Kärnten (ZAMG). Die Lage von Fölk ist als grüner Punkt dargestellt (nicht maßstabsgetreu).

2.2.2 Veränderungen der hydrogeologischen Gegebenheiten

Hohe Wassermengen, welche beispielsweise durch Starkregenereignisse oder rasch erfolgende Schneeschmelzen bereitgestellt werden, können Auslöser für einen Felssturz sein [9]. Zusätzliches Wasser, welches sich entlang von Klüften oder in den Porenräumen von Festgesteinen befindet, erhöht den Porenwasserdruck im System. Ein erhöhter Porenwasserdruck führt zu geringeren effektiven Normalspannungen (σ_{eff}), was wiederum die Scherfestigkeit (τ) im Gestein herabsetzt (siehe Gleichung 2.1). Nimmt man das Mohr-Coulomb-Bruchkriterium an, kann ein Bruchversagen die Folge von abnehmender Scherfestigkeit sein. [8]

$$\tau = c' + \sigma_{eff} * \tan \varphi' \quad (2.1)$$

2.2.3 Temperatureffekte

An der Südseite des Dobratsch können große Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht, beziehungsweise zwischen Winter und Sommer auftreten [4]. Temperaturunterschiede an der Gesteinsoberfläche führen zu Ausdehnungen und Schrumpfungen in Gesteinen, wodurch das Überschreiten einer kritischen Zugspannung zu

Brüchen im Gestein führen kann [17].

2.2.4 Topographie

Der Felsturm befindet sich in einer exponierten Position. Bei einem eventuellen Versagen des Felsturmes wäre der potentielle Energiezustand der Massenbewegung als sehr hoch einzuschätzen.

2.2.5 Kinematische Freiheit

Das Trennflächengefüge am Felsturm ist mitentscheidend für dessen Stabilität. Die Anordnung der Trennflächen entscheidet, ob der Felsturm eine hangabwärts gerichtete kinematische Freiheit erfährt oder nicht [12].

Da von einem Erdbeben das größte Schadenspotential angenommen wird, liegt der Fokus in dieser Arbeit auf dem Einfluss seismischer Kräfte auf die Standsicherheit des Felsturmes.

3 Methodik

3.1 Geländearbeit

Im Gelände wurden eine Trennflächenkartierung sowie eine fotogrammetrische Aufnahme der Felswand durchgeführt.

3.1.1 Trennflächenkartierung und Beschreibung der geologischen Verhältnisse vor Ort

Die Beschreibung der Trennflächen erfolgte nach ÖNORM EN ISO 14689-1 (2003). Die Parameter, nach welchen die Trennflächen beschrieben werden, sind in Tabelle 3.1 ersichtlich. Zudem wurden, wenn begehbar, die Orientierung und die Spurlängen der Trennflächen bestimmt.

Tabelle 3.1: Klassifikation der Trennflächenbeschreibung nach ÖNORM EN ISO 14689-1 (2003).

Typ	Persistenz	Termination	Rauigkeit	Welligkeit	Alteration
Kluft; Schichtung; Schieferung; Harnisch; Störung	P = Persistent; I = Inpersistent	I = Endung im intakten Fels; A = Ende an einer anderen TF; O = nicht sichtbares Ende der TF	3 = Sehr rau; 2 = Rau; 1.5 = Leicht rau; 1 = Glatt und poliert	3 = Verzahnt; 2.5 = Gestuft; 2 = Große Welligkeit; 1.5 = Kleine bis mittelgroße Welligkeit; 1 = Flach	0.75,1,2 = Keine Füllung und Wandkontakt; 4-8 = Sand- Silt- oder Kalzitfüllung; 6-10 = kompaktierte Tonminerale; 8-12 = weiche Tonminerale; 12-20 = quellende Tonminerale

Es wurde eine Aufnahme der geologisch-geotechnischen Verhältnisse vor Ort durchgeführt. Wie in Kapitel 1.3 erläutert wurde, wird der Felsturm von vulkanischen Gesteinen unterlagert. Die Grenze zwischen dem Kalkgestein sowie den unterlagernden vulkanischen Gesteinen konnte im Gelände mit Hilfe einer Höhenschichtenkarte und einem Barometer abgeschätzt werden. Die TF-Abstände wurden im Gelände abgeschätzt und nach ÖNORM EN ISO 14689-1 (2003) klassifiziert.

3.1.2 Fotogrammetrische Aufnahme der Felswand

Am 27.07.2016 wurde ein Helikopterflug durchgeführt um fotogrammetrische Aufnahmen

aus verschiedenen Entfernungen und Perspektiven von der Felswand zu machen. Die durchschnittliche Entfernung zwischen der Felswand und dem Helikopter betrug 136,36 m, die maximale Entfernung 567,82 m und die minimale Distanz war 30,16 m. Ermöglicht wurde der Flug durch das Geologische Amt des Landes Kärnten sowie dem Bundesministerium für Inneres. Die Befliegung erfolgte durch Herrn Schausberger von der Kärntner Polizeiflugstaffel. Insgesamt wurden 1360 Fotos gemacht. Die verwendete Fotokamera ist eine kalibrierte Canon Eos 70 D. Die verwendeten Objektive der Firma Tamron haben Brennweiten von 70 bis 200 mm und 17 bis 50 mm. Vor der Befliegung wurden in unmittelbarer Nähe des Felsturmes zwei Messtargets zur Skalierung und Normierung, sowie vier Ground Control Points aufgebaut. Die Ground Control Points sind Referenzpunkte und deren Positionen wurden im Vorfeld der Befliegung mit einem Hand-GPS (Garmin Oregon 450t) vermessen (Tabelle 3.2).

Tabelle 3.2: Koordinaten der Ground Control Points (GCP). Darstellung als UTM-Koordinaten (WGS84). E = Ostwert, N = Nordwert, H = Höhe.

GCP 1	GCP 2	GCP 3	GCP 4
E 397101	E 397063	E 397092	E 397172
N 5161490	N 5161442	N 5161396	N 5161343
H 1287 m.ü.NN	H 1253 m.ü.NN	H 1222 m.ü.NN	H 1249 m.ü.NN

3.2 Digitale Trennflächenkartierung mit ShapeMetriX^{3D}

Aus den fotogrammetrischen Aufnahmen der Felswand wurde mit dem Softwaretool Multifoto in ShapeMetriX^{3D} (3GSM GmbH) ein georeferenziertes, dreidimensionales Oberflächenmodell erstellt, welches für diese Arbeit zur Verfügung gestellt wurde (siehe Abbildung 3.1). Aufgrund der Modellgröße musste die Punktdichte des Modells reduziert werden. Das erstellte Modell weist eine Gesamtpunktzahl von 466317 Punkten auf. Der durchschnittliche Abstand zwischen den Punkten (*mean point spacing*) beträgt $0,26 \pm 0,22$ m. Die digitale Kartierung der Trennflächen erfolgte in ShapeMetriX^{3D} mit JMX-Analyst. Das Modell wurde mithilfe der Ground Control Points georeferenziert und mithilfe der Referenztargets skaliert. Für die Skalierung wird der Abstand von 2,35 m zwischen den Zielscheiben der Referenztargets verwendet. Mit dem Tool Referencer werden anschließend den Ground Control Points die im Gelände eingemessenen Koordinaten zugeordnet. Die im Gelände erfassten GPS-Koordinaten wurden in UTM-Koordinaten umgerechnet (www.deine-berge.de). Bei der Digitalkartierung wurden Trennflächenspuren auf der Felswand digitalisiert. Das Programm ermittelt eine lokale Ebene durch die gekennzeichneten Punkte und berechnet daraufhin die Orientierung der

Fläche (Streich - und Fallwert) [18]. Mit dem Werkzeug Auto Cluster gruppiert das Programm Trennflächenscharen mit ähnlicher Orientierung, welche anschließend gemeinsam mit den händisch eingemessenen TF in einer Schmidt'schen Netz-Projektion veranschaulicht werden [18]. Der Abstand zwischen den jeweiligen TF einer Schar (*spacing*) wird durch ShapeMetrix^{3D} nach der Durchführung des Werkzeuges Auto Cluster ermittelt.

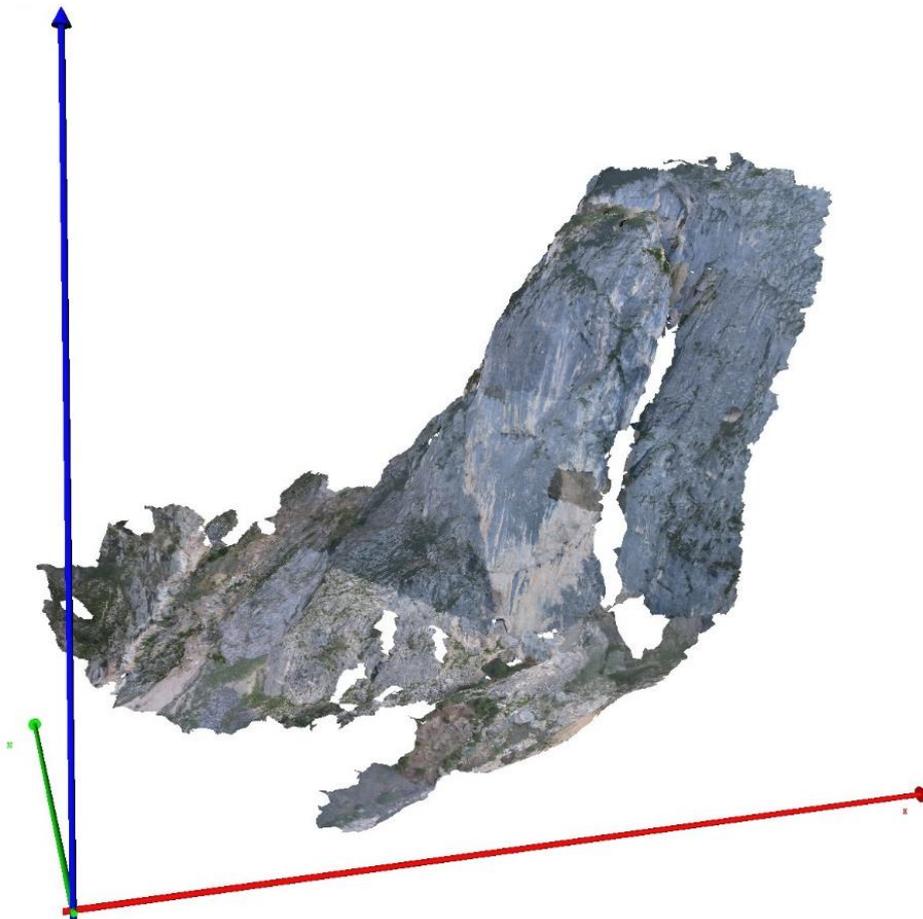


Abbildung 3.1: 3D-Oberflächenmodell. Nord = Grüner Pfeil, Osten = Roter Pfeil. Blick auf die Felswand von SW'. Maßstab 1:3500.

3.3 Ermittlung der Blockvolumina

Die Punktwolke aus den fotogrammetrischen Aufnahmen wurde verwendet um das Gesamtvolumen des Felsturmes sowie die Volumina von Teilblöcken zu bestimmen, welche durch die Anordnung von Trennflächen bestimmt werden. Die Berechnungen erfolgten mit Matlab 16b®. Die vollständigen Matlab-Codes befinden sich im Anhang in Tabelle 6.2. Die Punktwolke des Projektgebietes ist in Abbildung 3.2 zu sehen.

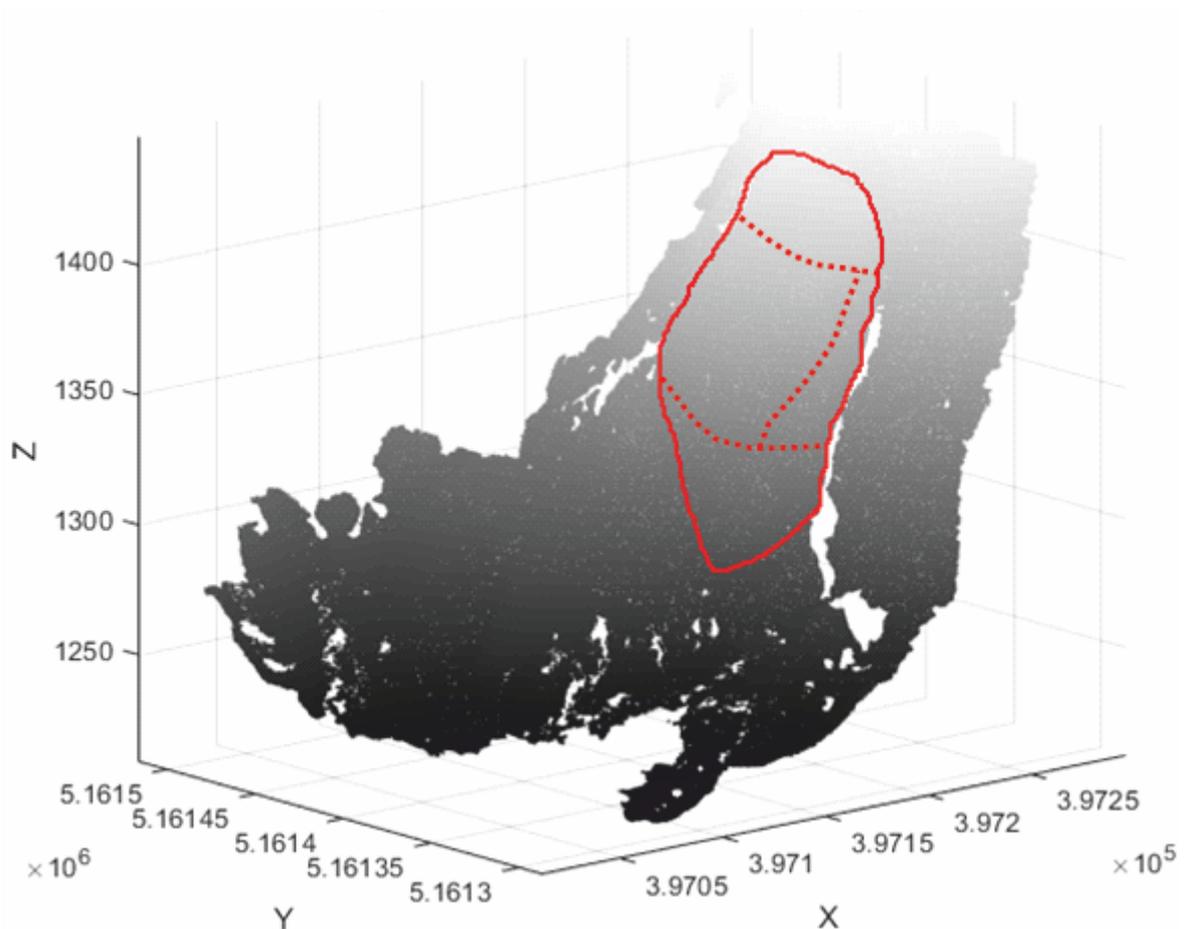


Abbildung 3.2: Punktwolke des Projektgebietes, welche aus dem fotogrammetrischen Bildmaterial erzeugt wurde. Der Felsturm ist rot umrahmt, die Unterteilung in die Teilblöcke ist in gestrichelten Linien dargestellt.

Für die Berechnung von Blockvolumina wird die Punktwolke so zugeschnitten, dass nur die Koordinatenwerte des Gesamtblocks oder bestimmter Teilblöcke erhalten bleiben. Aus den verbleibenden Punkten wird anschließend ein konvexer Volumenkörper erzeugt, dessen Volumen berechnet wird. Der Vorgang des Zuschneidens einer Punktwolke erfolgt in mehreren Schritten:

Ein Schritt beinhaltet jeweils die Definition einer ROI und eine anschließende Transformation, welche das Drehen der Punktwolke in eine gewünschte Ausrichtung bewirkt. Die Punktwolke wird auf die ROI reduziert. Aufgrund der Drehung der Punktwolke in dem definierten Achsendiagramm kann erneut ein Ausschnitt der Punktwolke abgeschnitten werden. Die Transformation erfolgt je nach Definition der Transformationsmatrix (A) um die x-, y- oder z-Achse des Koordinatensystems in Abhängigkeit von dem Winkel α [rad] (siehe Gleichungen 3.1, 3.2, 3.3).

$$\text{Drehung um die x-Achse: } \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 \\ 0 & -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\text{Drehung um die y-Achse: } \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & 0 & -\sin(\alpha) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\text{Drehung um die z-Achse: } \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 & 0 \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Die ROI wird über die Bestimmung von Minimal- und Maximalwerten auf einer Koordinatenachse definiert. Möchte man die Punktwolke beispielsweise entlang der x- und der y-Achse zuschneiden, definiert man ein x_{low} und ein x_{up} , ein y_{low} sowie ein y_{up} . Für die z-Achse kann in diesem Beispiel dann die Begrenzung *-inf* und *inf* angegeben werden. Die Transformation einer Punktwolke erfolgt über die Befehle $tform = affine3D(A)$ und $ptCloudOut = pctransform(PCROI_tform)$. Nach dem Zuschneiden der Punktwolke kann das Volumen berechnet werden. Dafür wird ein konvexer Körper definiert, dessen Form und Größe durch die Punkte der Punktwolke definiert ist. Zunächst wird der Wertebereich definiert, in welchem der konvexe Körper erzeugt werden soll. Mit dem Befehl $[K, V] = convhull(ptCloudOut)$ werden daraufhin das Volumen der konvexen Hülle, sowie die Indizes der polygonalen Eckpunkte berechnet. Die gleiche Vorgehensweise wird benutzt um die Volumina der Teilblöcke zu bestimmen.

3.4 Bestimmung der kinematischen Situation

Es wird die kinematische Situation analysiert, in welcher sich der Felsturm derzeit befindet. Vorwegnehmend muss gesagt werden, dass aufgrund von Beobachtungen im Gelände und nach Rücksprache mit den Betreuern dieser Arbeit ein Gleiten des Felsturmes auf einer nahezu planaren Trennfläche im Versagensfall angenommen wird. Der Felsturm weist nur im Fußbereich Verspannungen mit dem umliegenden Gebirge auf. Die Kluft, welche sich auf der Rückseite des Felsturmes befindet, ist durchgehend geöffnet und im oberen Bereich ca. 10 m breit (Abbildung 1.5). Im basalen Bereich des Felsturmes ist eine markante Trennfläche erkennbar, welche eine \pm planare Form aufweist und als Gleitfläche fungieren

könnte. Zudem ist der Felsturm aufgrund seiner Exposition zu den Seiten begrenzt. Der Felsturm kann demnach als ein abgegrenzter potentieller Gleitblock angesehen werden. Nach [13] lässt sich unter Betrachtung von Winkelverhältnissen überprüfen ob Trennflächenverscheidungen in einer Felsböschung eine Translationsgleitung eines Blocks bewirken können. Die Kriterien sind wie folgt:

1. Fallrichtung der Böschungsfläche = $\pm 20^\circ$ Fallrichtung der Gleitfläche
2. Fallwinkel der Böschungsfläche < Fallwinkel der Gleitfläche
3. Fallwinkel Böschungsfläche > Reibungswinkel der Gleitfläche

In Abbildung 3.3 sind die relevanten Winkel nach [13] veranschaulicht. Die vereinfachte Darstellung aus Abbildung 3.3 wird auf die Situation des Felsturmes übertragen (Abbildung 3.4). Sämtliche Neigungswerte wurden mit Hilfe des digitalen Oberflächenmodells bestimmt.

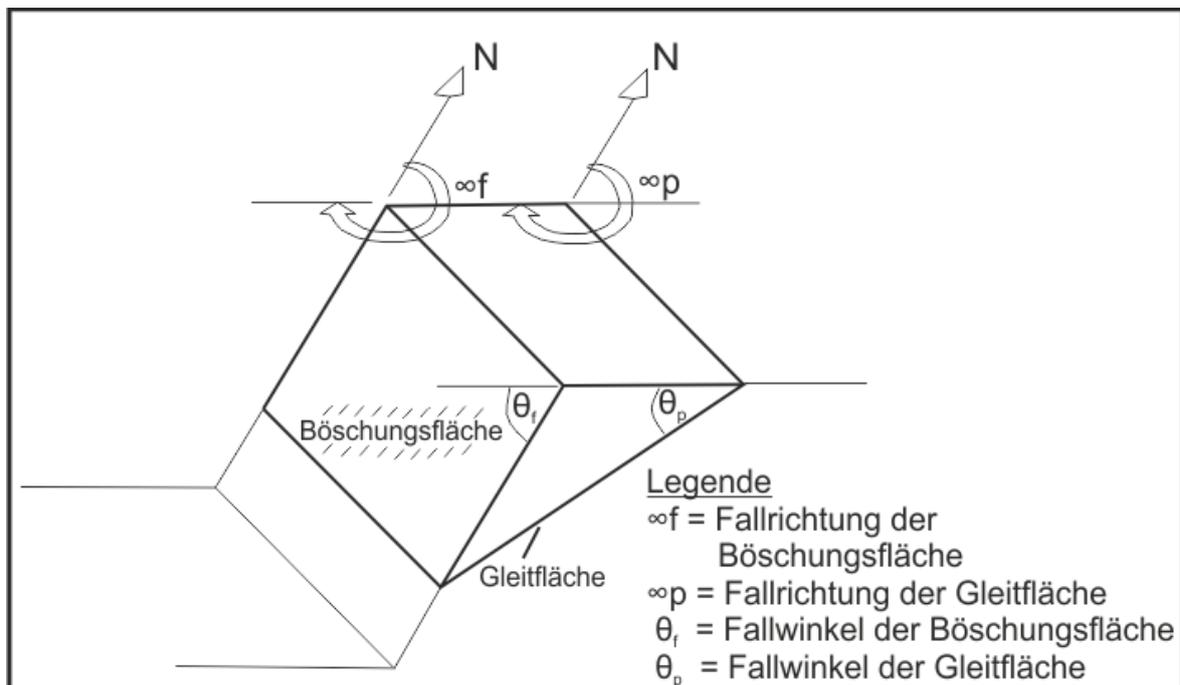


Abbildung 3.3: Vereinfachtes Modell eines abgleitenden Blocks aus einer Felsböschung. Modifiziert nach [13].

3.5 Pseudo-Statistische Stabilitätsanalyse

Es wird eine pseudo-statische Analyse durchgeführt, welche die Ermittlung von Grenzgleichgewichten zum Ziel hat. Eine Massenbewegung steht im sogenannten Grenzgleichgewicht, wenn die rückhaltenden Kräfte den treibenden Kräften gleichen. Der Sicherheitsfaktor (SF) für eine solche Massenbewegung ist 1 (labil). Ein SF ist allgemein betrachtet das Verhältnis zwischen den rückhaltenden und den treibenden Kräften einer

Massenbewegung (siehe Gleichung 3.4) [12].

$$SF = \frac{\sum \text{Rückhaltende Kräfte}}{\sum \text{Treibende Kräfte}} \quad (3.4)$$

Übersteigen die treibenden Kräfte der Massenbewegung die rückhaltenden Kräfte, so führt dies zu einem Versagen (instabiler Zustand). Ist der Sicherheitsfaktor größer als der Wert 1, so ist von einem stabilen Zustand auszugehen. Je höher der Sicherheitsfaktor, desto höher ist die Standsicherheit einer Böschung zu bewerten [12]. In der Praxis wird zumeist ein SF angestrebt, welcher deutlich höher ist als 1 [19]. Unter der Annahme einer basalen, planaren Gleitfläche wirken auf den Gesamtblock die Normalkraft (N), die Gewichtskraft (W) und eine horizontal wirkende pseudostatische Kraft (F_H , Gleichung 3.5) [20]. F_H berechnet sich aus dem Gesamtbeschleunigungskoeffizienten (k_y) und der Masse des Felsturmes (m), welche anhand dem Gesamtvolumen des Felsturmes berechnet wird (Kapitel 4.2.1). Im pseudo-statischen Ansatz wird eine seismische dynamische Bewegung anhand von F_H dargestellt [20]. Zusätzlich am Kontakt von Felsturm und Gleitfläche wirkende Parameter sind die Kohäsion (c), der Reibungswinkel (φ) und die Fläche der Gleitfläche (A). Die Gleitfläche wird idealisiert als Rechteck angenommen und errechnet sich aus der Länge und Breite der Ausbisslinien der potentiellen Gleitfläche, welche an der Süd- und Rückseite der Felsböschung an der Oberfläche ausbeissen. Die wirkenden Kräfte und Parameter sind in Abbildung 3.4 graphisch veranschaulicht.

$$F_H = k_y * m \quad (3.5)$$

Die x-Achse verläuft in Abbildung 3.4 parallel zur Gleitfläche. Die y-Achse ist senkrecht zum Verlauf der Gleitfläche definiert. Da als Ausgangsbedingung angenommen wird, dass sich der Felsturm in einem Grenzgleichgewicht ($SF = 1$) befindet, kann die Summe der in x- und in y-Richtung wirkenden Kräfte gleich Null gesetzt werden (Gleichung 3.6, 3.7). Die Normalkraft kann somit nach anderen Parametern aufgelöst (Gleichung 3.8) und in Gleichung 3.6 eingesetzt werden. Dies ergibt Gleichung 3.9.

$$\sum F_x = 0; W * \sin(\theta) + k_y * m * \cos(\theta) - c * A - N * \tan(\varphi) = 0 \quad (3.6)$$

$$\sum F_y = 0; N + k_y * m * \sin(\theta) - W * \cos(\theta) = 0 \quad (3.7)$$

$$N = W * \cos(\theta) - k_y * m * \sin(\theta) \quad (3.8)$$

$$W * \sin(\theta) + k_y * m * \cos(\theta) - c * A - N * \tan(\varphi) = 0 \quad (3.9)$$

Im ersten Schritt der Berechnungen wird k_y gleich Null gesetzt (Gleichung 3.10). Somit wird ein seismischer Einfluss zunächst nicht berücksichtigt. Es werden anschließend fiktive Werte zwischen 0° und 90° für φ angenommen und die zugehörigen Werte für c berechnet, welche die Bedingung des Grenzgleichgewichtes erfüllen (Gleichung 3.11).

$$W(\sin(\theta) - \cos(\theta) * \tan(\varphi)) - c * A = 0 \quad (3.10)$$

$$c = \frac{W(\sin(\theta) - \cos(\theta) * \tan(\varphi))}{A} \quad (3.11)$$

Darauffolgend werden analog zu Gleichung 3.11, Werte für c für bestimmte Annahmen von φ berechnet, welche diesmal höhere SF als 1 erfüllen sollen (Gleichung 3.12).

$$c = \frac{SF * W(\sin(\theta) - \cos(\theta) * \tan(\varphi))}{A} \quad (3.12)$$

Bei der Berechnung der φ - c -Wertepaare ist besonders wichtig, welche Kohäsion bei einem Reibungswinkel von 0° und andersherum, welcher Reibungswinkel bei einer Kohäsion von 0 Pa für einen bestimmten SF auftritt. Anschließend wird der Einfluss einer seismischen Kraft auf das System untersucht. Es soll bestimmt werden, welche seismische Beschleunigung in Form von k_y ausreichend ist um den Felsturm von einem Zustand mit einem bestimmtem SF in ein Grenzgleichgewicht zu bringen. Die Berechnung von k_y erfolgt mit Gleichung 3.13.

$$k_y = \frac{W(\cos(\theta) * \tan(\varphi) - \sin(\theta)) + c * A}{W(\cos(\theta) + \sin(\theta) * \tan(\varphi))} \quad (3.13)$$

Es wird anschließend dargestellt, wie sich k_y verhält, wenn der SF erhöht wird. Zudem wird dargestellt, wie die Parameter φ , c und k_y bei Gültigkeit eines bestimmten SF im Zusammenhang stehen. In den Berechnungen wird jeweils angenommen, dass ein durchgehender Kontakt zwischen dem Felsturm und der Gleitfläche besteht. In den folgenden Berechnungen wird auch analysiert, inwieweit sich eine verringerte Gleitfläche auf die Stabilität auswirkt (Gleichung 3.14).

$$A = \frac{SF * W(\sin(\theta) - \cos(\theta) * \tan(\varphi))}{c} \quad (3.14)$$

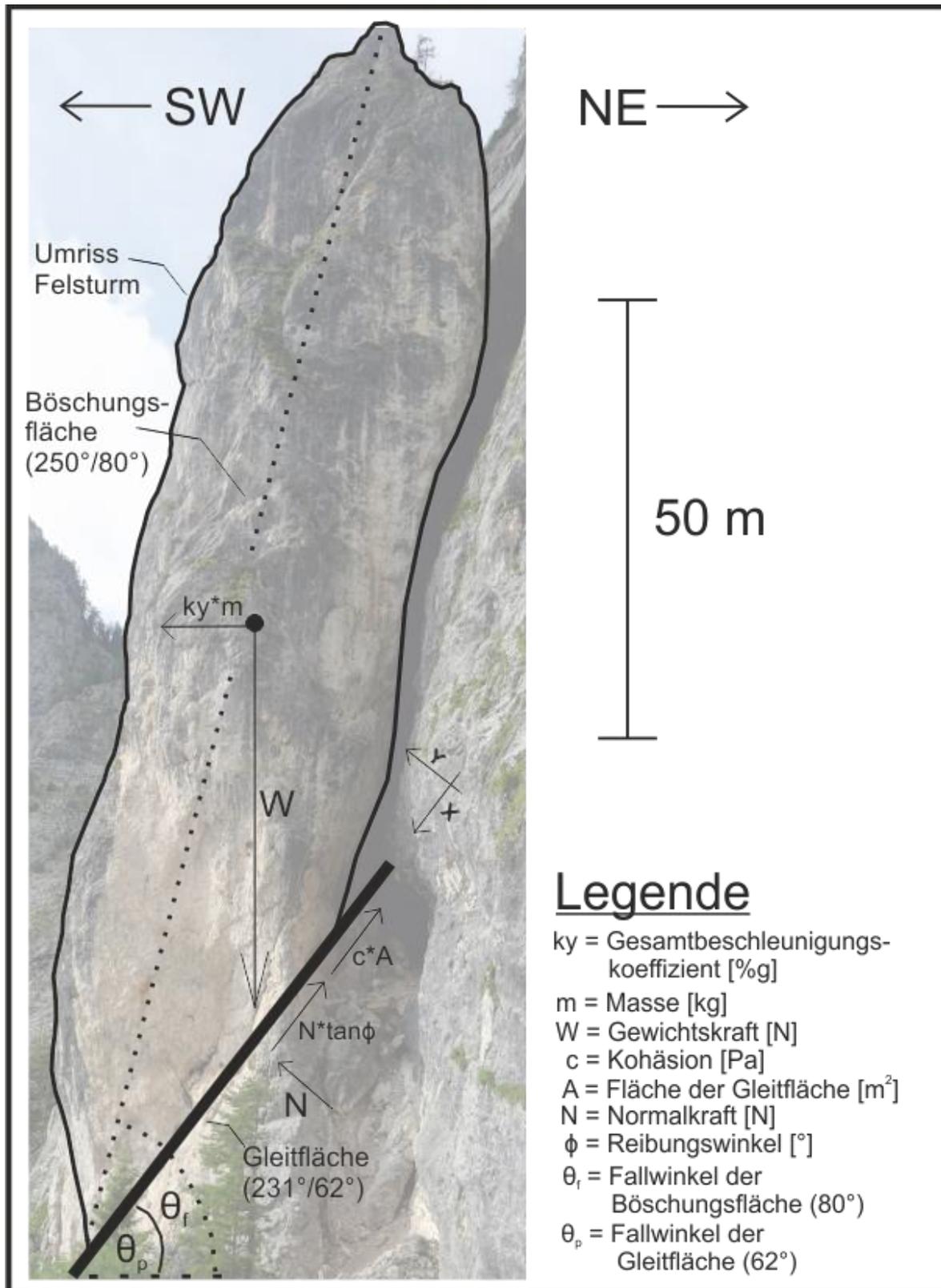


Abbildung 3.4: Kräfteverhältnisse am Felsturm (schwarz umrahmt). Als Versagenskinematik wird das Gleiten des Felsturmes auf der potentiellen Gleitfläche (dicke schwarze Linie) angenommen.

4 Ergebnisse

4.1 Trennflächenkartierung

Es wurden händisch und digital insgesamt 126 Trennflächen am Felsturm und dem umgebenden Gebirge kartiert. Resümierend können drei Trennflächenscharen voneinander unterschieden werden. In Abbildung 4.1 sind die Polpunkte der Trennflächen (TF) der drei TF-Scharen in einem Dichteverteilungsdiagramm (Schmidt'sches Netz, untere Hemisphäre) dargestellt. Drei Messwerte wurden aufgrund ihrer deutlich unterschiedlichen Orientierung bezüglich den TF-Scharen keiner Schar zugeordnet (Abbildung 4.1). Die Schwerpunkte der Orientierungen (Fallrichtung/Fallwinkel) der drei TF-Scharen sind wie folgt:

1. TF-Schar 1 (blau): 239/72.5 (106 Messwerte)
2. TF-Schar 2 (grün): 116.5/75.5 (6 Messwerte)
3. TF-Schar 3 (orange): 359.5/76 (14 Messwerte)

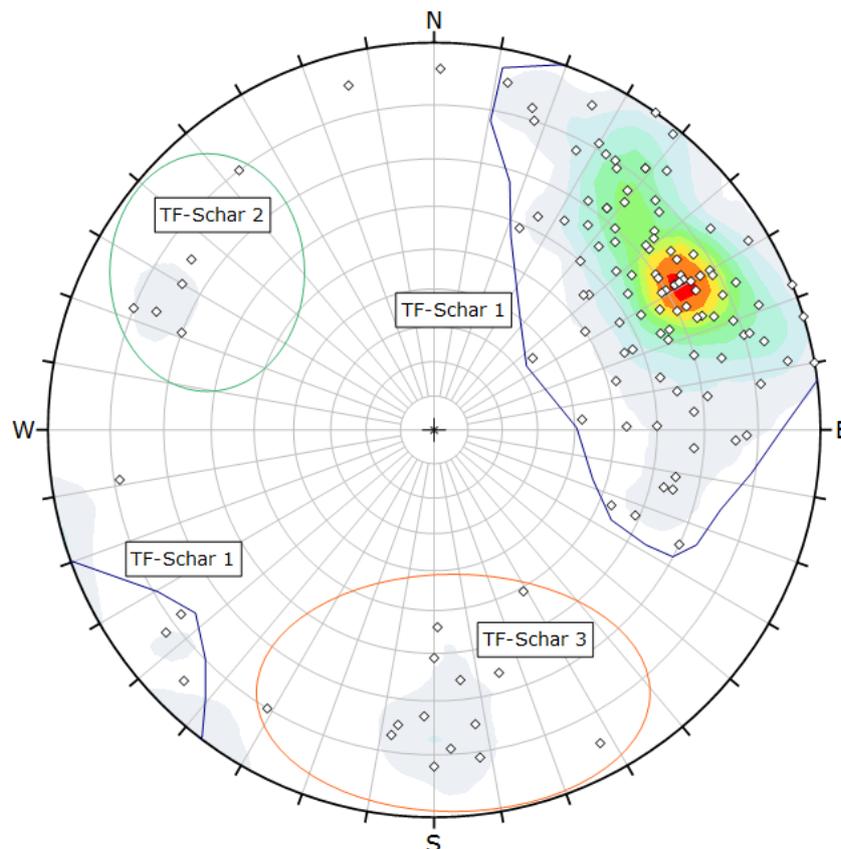


Abbildung 4.1: Winkeltreue Lagenkugelprojektion der unteren Hemisphäre. Darstellung der Polpunkte aller händisch und digital kartierten Trennflächen im Projektgebiet als Häufigkeitsverteilung (*Contourplot*).

Tabelle 4.1: Legende zu Abbildung 4.1. Darstellung der Bedeutung der Farbbereiche in Abbildung 4.1.

Farbe	Dichtekonzentrationen
	0,00 – 3,40
	3,40 – 6,80
	6,80 – 10,20
	10,20 – 13,60
	13,60 – 17,00
	17,00 – 20,40
	20,40 – 23,80
	23,80 – 27,20
	27,20 – 30,60
	30,60 – 34,00
Maximale prozentuale Punktdichte in bestimmtem Farbbereich	33,25 %
Art der statistischen Verteilung	Fisher-Verteilung
Art der Darstellung	Polpunktdarstellung
Anzahl der Messwerte	126
Hemisphäre	Untere Hemisphäre
Art der Projektion	Winkeltreu

Der große Teil der Trennflächen fällt in Richtung SW, also hangabwärts, ein (TF-Schar 1). Der Fallwinkel aller Trennflächen ist im Durchschnitt 72°. Abbildung 4.2 zeigt eine Geländeskizze des Trennflächensystems am Felsturm. Die Trennflächen, welche im Gelände kartiert wurden, sind dabei mit Ziffern versehen (Abbildung 4.2). Die einzelnen Eigenschaften der Trennflächen am Turmfuß sind im Anhang A in Tabelle 6.1 aufgeführt. Die im Gelände gemessenen Trennflächen weisen eine geringe Rauigkeit und eine kleine bis mittelgroße Welligkeit auf. Als Einzelfall weist die Kluft Nr. 4 (siehe Abbildung 4.2) eine glatte und flache Oberfläche auf. Bei geringer bis gar keiner Öffnungsweite der Klüfte ist keine Kluftfüllung vorzufinden. Die Klüfte 4, 8 und 9 (siehe Abbildung 4.2) haben dagegen eine Öffnungsweite bis zu 42 cm und sind mit Sand und Silt gefüllt. Die gemessenen Trennflächen verlaufen persistent (durchgängig) durch das Gestein. Da die meisten TF keine Öffnung aufweisen, ist nicht einzuschätzen, wie der Verlauf der TF im Inneren des Gebirges verläuft. Es ist jedoch möglich, dass die TF nicht komplett durchgängig sind und Felsbrücken vorhanden sind. Die TF am Turmfuß enden oder beginnen im Intaktgestein oder die Kluftenden sind verdeckt von Blockschutt. Die TF-Abstände sind bei der TF-Schar 1 (Abbildung 4.1) zwischen 5 m und 15 m, bei TF-Schar 2 und 3 zwischen 15 m und 25 m. Die Abstände zwischen den TF am Turmfuß sind teilweise geringer und können

geringer als 5 m sein (Abbildung 4.2). Aus der Digitalkartierung mit ShapeMetriX^{3D} ergeben sich TF-Abstände von durchschnittlich 10 m für die TF-Schar 1, 20 m für die TF-Schar 2 und 15 m für die TF-Schar 3.

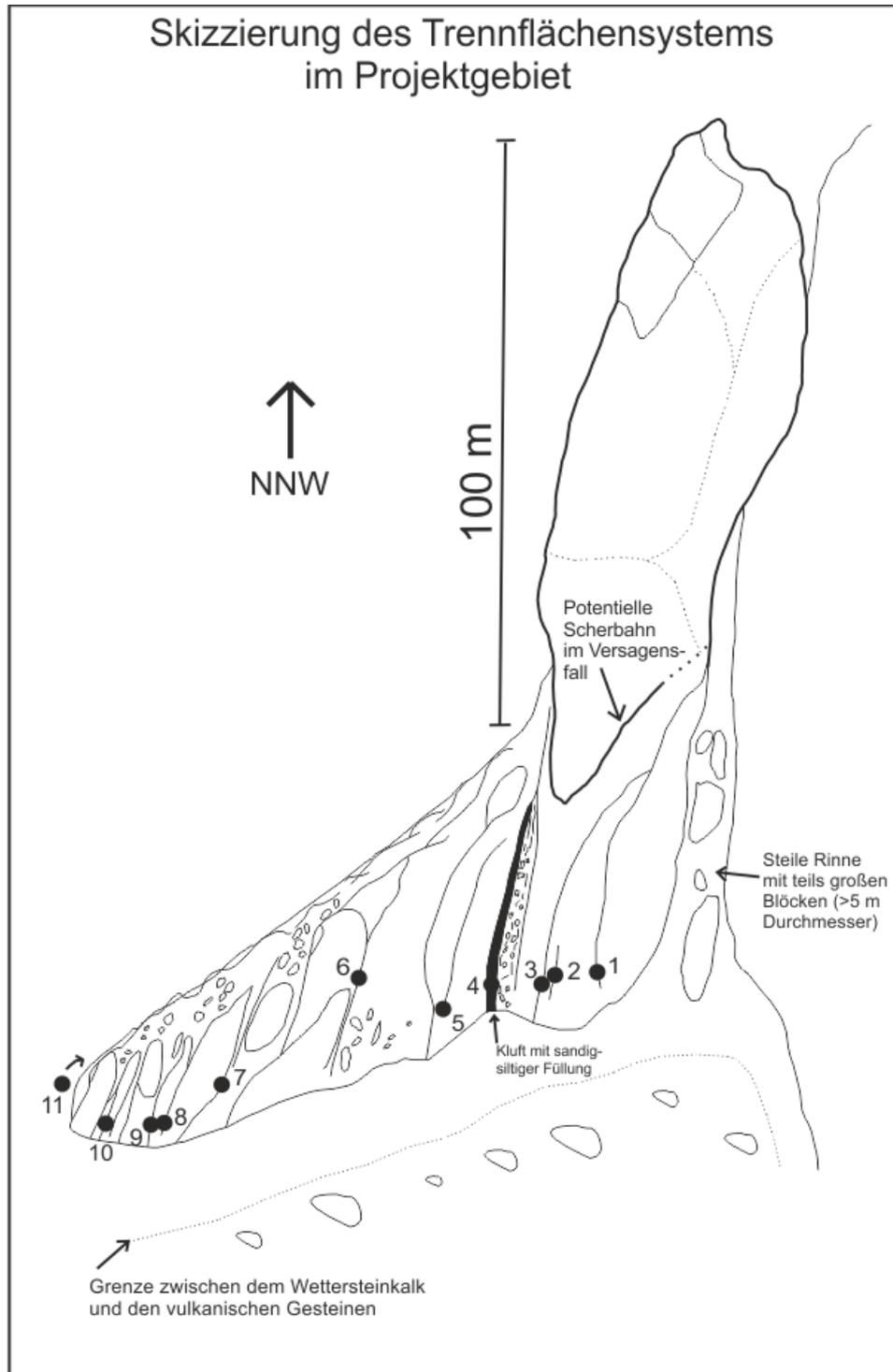


Abbildung 4.2: Skizzierung des Trennflächensystems am Fuße des Felsturmes. Die Ziffern 1-11 zeigen die Stellen, an welchen die TF händisch kartiert wurden. Die gestrichelten Linien zeigen einen vermuteten Verlauf von TF an.

4.2 Blockvolumina

4.2.1 Gesamtvolumen

Die zugeschnittene Punktwolke, aus welcher das Gesamtvolumen berechnet wird, ist in Abbildung 4.3 dargestellt.

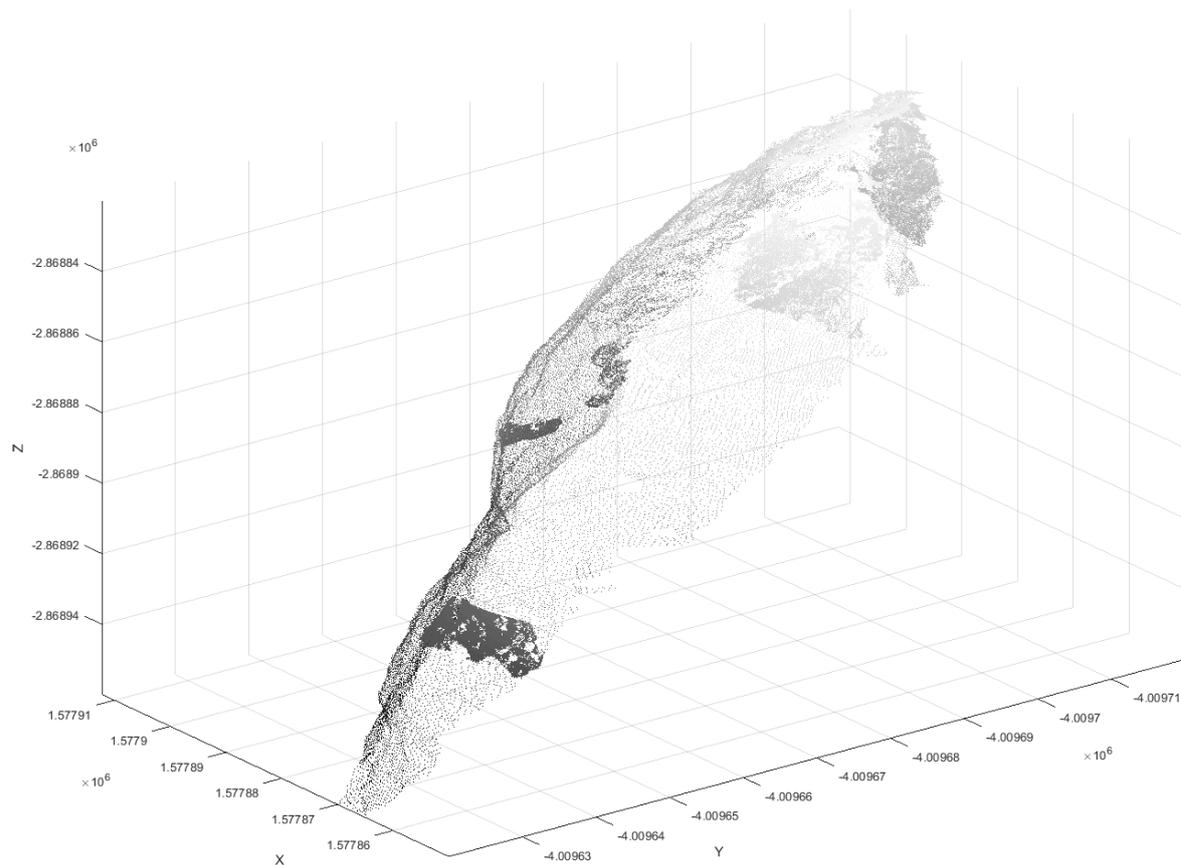


Abbildung 4.3: Zugeschnittene Punktwolke, Ansicht von der Seite.

In Abbildung 4.4 wird die zugeschnittene Punktwolke als ein konvexer Körper dargestellt. Das Volumen dieses Körpers, beläuft sich auf **186720 m³**. Dieses Volumen wird in weiteren Berechnungen als Gesamtvolumen des Felsturmes verwendet.

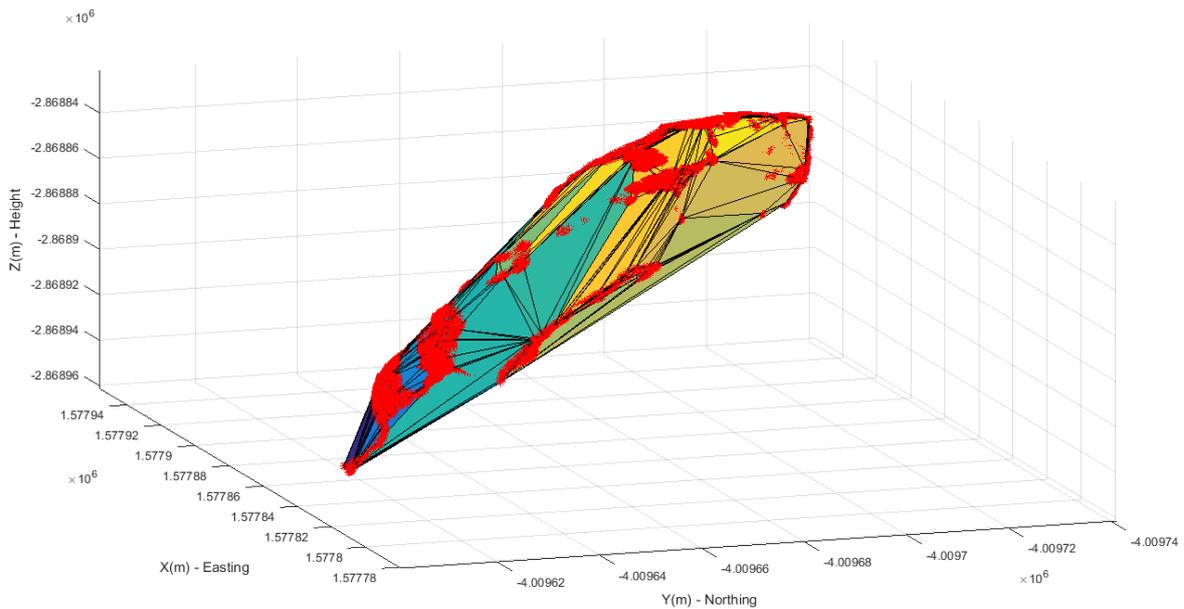


Abbildung 4.4: Darstellung der Punktwolke aus Abbildung 4.3 als konvexer Volumenkörper. Der Körper wird durch die rot dargestellten Punkte aufgespannt. Der Kopfbereich des Körpers ist gelb, der Fußbereich in bläulichen Farben dargestellt.

4.2.2 Volumina der Teilblöcke

Aus Beobachtungen des Felsturmes im Gelände und im 3D-Modell wurde der Felsturm aufgrund dem Verlauf der TF in vier Teilblöcke unterteilt. Die mit Matlab erstellten Volumenkörper sind in Abbildung 4.5 dargestellt. Zum Vergleich ist in Abbildung 4.5 die Punktwolke hinterlegt. Aufgrund unterschiedlicher Perspektiven auf die Teilblöcke ist teilweise keine vollständige Überlappung der Blöcke mit der hinterlegten Punktwolke möglich (Abbildung 4.5). Das Volumen des unteren Teilblocks ist **18874 m³**, des mittleren Teilblocks **23798 m³**, des seitlichen Teilblocks **30462 m³** und des oberen Teilblocks **46277 m³** (Abbildung 4.5). Zusammen addiert ergeben die Volumina der Teilblöcke 119411 m³, also deutlich weniger als das berechnete Volumen des Gesamtblocks. Es ist von Mindestgrößen der Teilblöcke auszugehen, welche hier berechnet wurden. Die Erläuterungen dazu werden in Kapitel 5.2 aufgeführt.

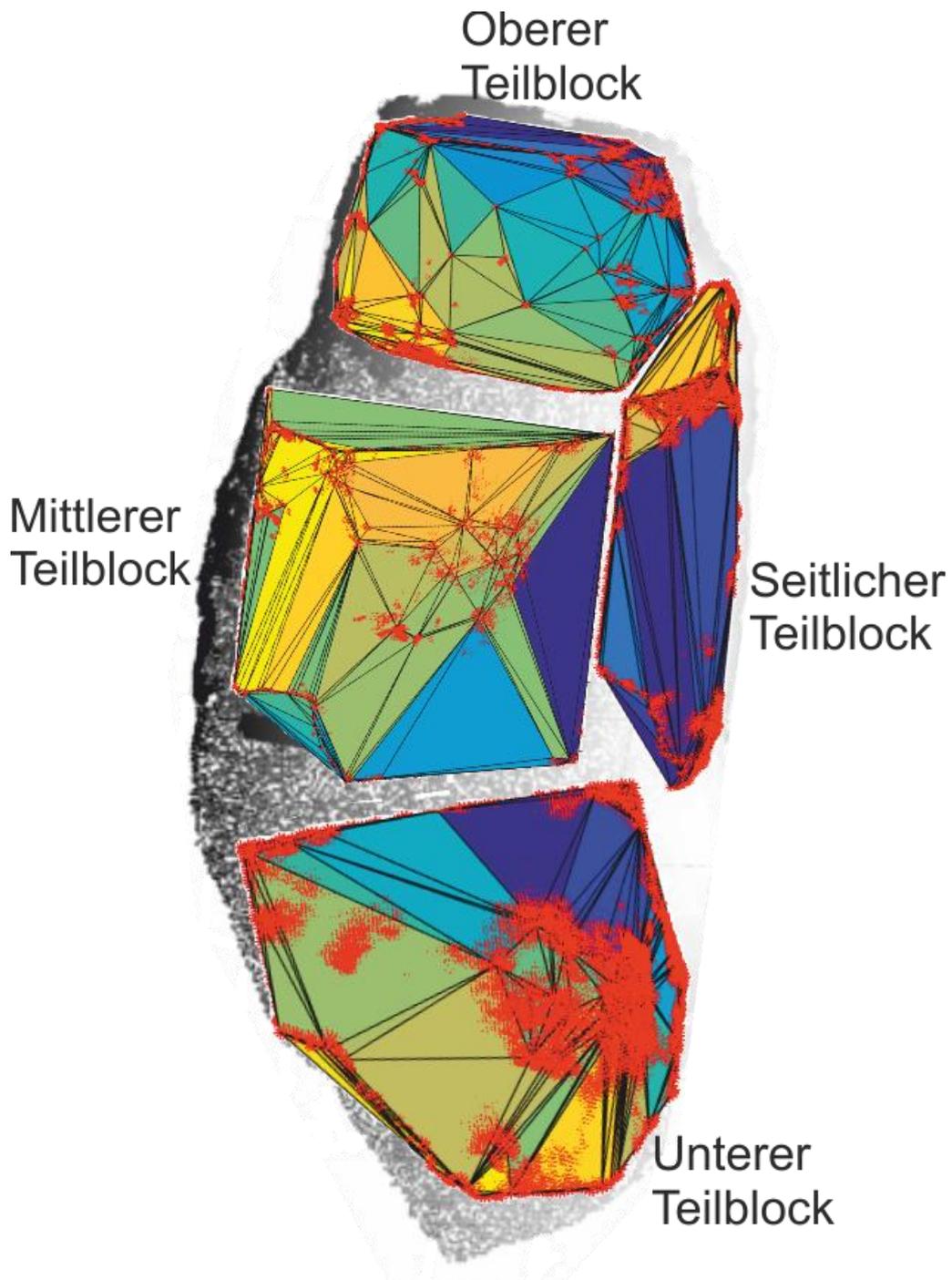


Abbildung 4.5: Graphische Darstellung der berechneten Teilblöcke. Zum Vergleich ist in der Graphik die Punktwolke des Felsturmes hinterlegt.

4.3 Stabilitätsuntersuchungen

4.3.1 Bestimmung der kinematischen Situation

Die potentielle Gleitfläche beißt an der Oberfläche der Felsturmböschung aus. Die Orientierung der Gleitfläche ist $231^{\circ}/62^{\circ}$ und der Böschungsfäche $236^{\circ}/81^{\circ}$. Weiterhin ist

das Streichen der Gleitfläche $\pm 20^\circ$ dem Streichen der Böschungsfläche. Dieser Zusammenhang macht nach [13] ein planares Gleiten des Felsturmes auf der potentiellen Gleitfläche möglich.

4.3.2 Ergebnisse der pseudo-statischen Analyse

Für die Analyse bekannte Parameter sind das in Kapitel 4.2.1 errechnete Gesamtvolumen des Felsturmes (V) mit 186720 m^3 , der Einfallwinkel der Gleitfläche (θ) mit 62° und die Fläche der Gleitfläche (A), welche sich aus einer Breite von 55 m und einer Länge von 60 m errechnet. Die Gewichtskraft W , welche der Felsturm auf die Gleitfläche ausübt, errechnet sich aus der Masse (m) und der Erdbeschleunigung (g).

Tabelle 4.2: Nötige Parameter für die pseudo-statische Analyse. m = Masse des Felsturmes, A = Gleitfläche, θ = Böschungswinkel, W = Gewichtskraft.

m [kg]	A [m ²]	θ [°]	W [MN]
$504,14 \cdot 10^6$	3300	62	4945,65

Für φ wurden Werte zwischen 0° und 90° gewählt. Dazu wurden die zugehörigen Werte für c berechnet, welche einen bestimmten SF erfüllen. Das Verhältnis zwischen φ und c ist in Abbildung 4.6 dargestellt. Wird c erhöht, muss φ verringert werden, damit ein bestimmter SF erhalten bleibt (Abbildung 4.6).

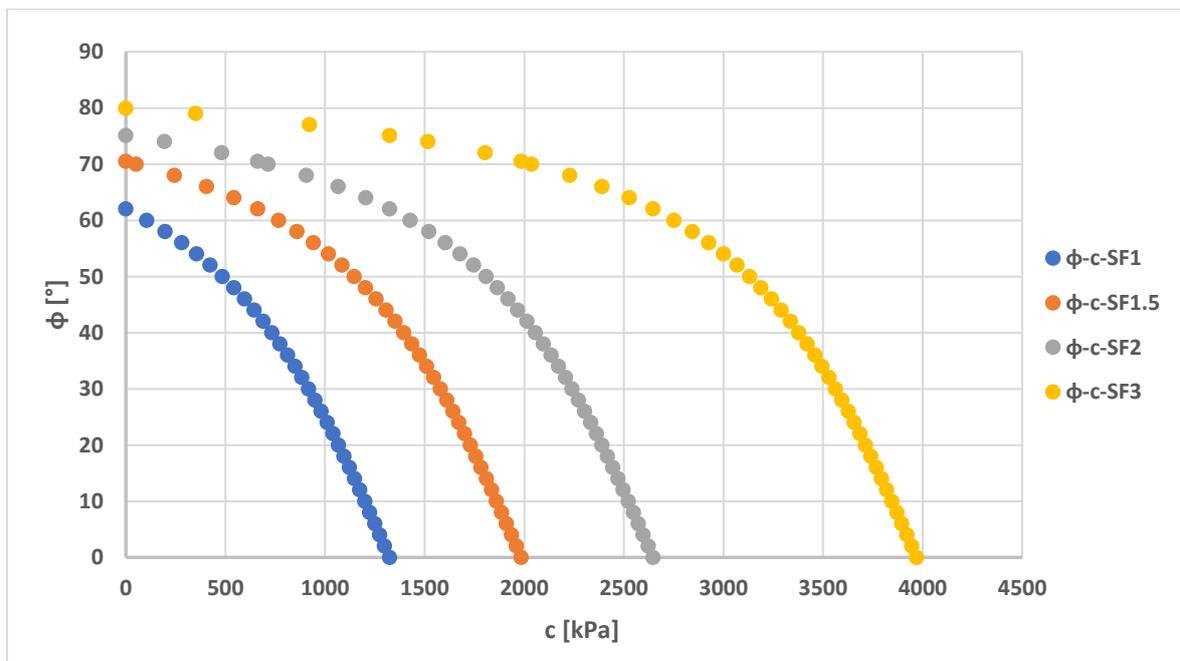


Abbildung 4.6: Darstellung von φ gegen c bei den SF 1, 1.5, 2 und 3.

Anschließend wird der seismische Gesamtbeschleunigungskoeffizient k_y einberechnet. Ein

Auszug berechneter Werte für k_y ist in Tabelle 4.3 aufgelistet. Die vollständigen Daten sind in Anhang C in Tabelle 6.3 hinterlegt.

Tabelle 4.3: Ein Auszug berechneter Werte für k_y mit den zugehörigen Werten für φ und c .

Annahmen φ [°]	c [MPa] SF 1	c [MPa] SF SF 1.5	c [kPa] SF 2	k_y [%g] SF 1	k_y [%g] SF 1.5	k_y [%g] SF 2
75.112			0			0.24
70.4819		0	0.66163		0.15	0.3
62	0	0.66163	1.32326	0	0.21	0.41
50	0.48475	1.14638	1.80801	0	0.29	0.58
25	0.99517	1.6568	2.31843	0	0.5	1
0	1.32326	1.98489	2.64652	0	0.94	1.88

In Abbildung 4.7 wird dargestellt, welche seismischen Beschleunigungen in Form von k_y notwendig sind, um den Felsturm in ein Grenzgleichgewicht zu bringen. Je höher der SF, in Abhängigkeit von φ und c , desto höher ist k_y . Für einen SF von 1 hat k_y immer den Wert 0, da der SF von 1 bereits das Grenzgleichgewicht darstellt (Abbildung 4.7). Bei einem SF von 1 würde eine zusätzlich aufgebrachte Kraft sofort ein Versagen bewirken. Abbildung 4.7 zeigt zudem die Auswirkungen der Materialparameter φ und c auf die Stabilität des Felsturmes. Die violette Kurve in Abbildung 4.7 hat einen deutlich steileren Verlauf als die blaue Kurve, an welcher alle Punkte die Eigenschaft $\varphi = 0^\circ$ aufweisen. In Kapitel 5.3 wird der Einfluss von φ und c auf die Standsicherheit des Felsturmes genau diskutiert.

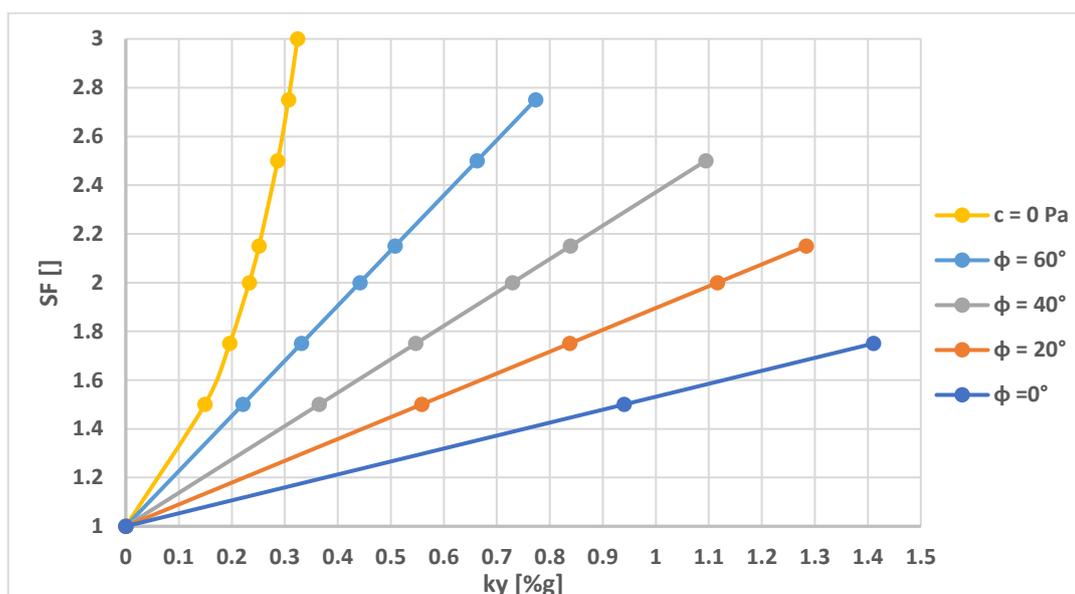


Abbildung 4.7: Graphische Darstellung von k_y gegen SF zwischen 1 und 3 in Abhängigkeit von den gewählten Wertepaaren φ und c .

In Abbildung 4.8 ist k_y als Funktion von φ , c und dem jeweiligen SF dargestellt. Wenn die Scherparameter c und φ bekannt sind, kann nun bei gegebener horizontaler seismischer Bodenbeschleunigung abgelesen werden, ob der Felsturm bei einem Erdbeben stabil wäre oder nicht. Der Anstieg von k_y mit der Annahme höherer Sicherheitsfaktoren ist von den Parametern φ und c abhängig. Dieses Verhältnis wird in Abbildung 4.9 dargestellt. Der Gesamtbeschleunigungskoeffizient k_y wird bei einem bestimmten SF größer, je kleiner φ bei gleichzeitigem Anstieg von c wird (Abbildung 4.9).

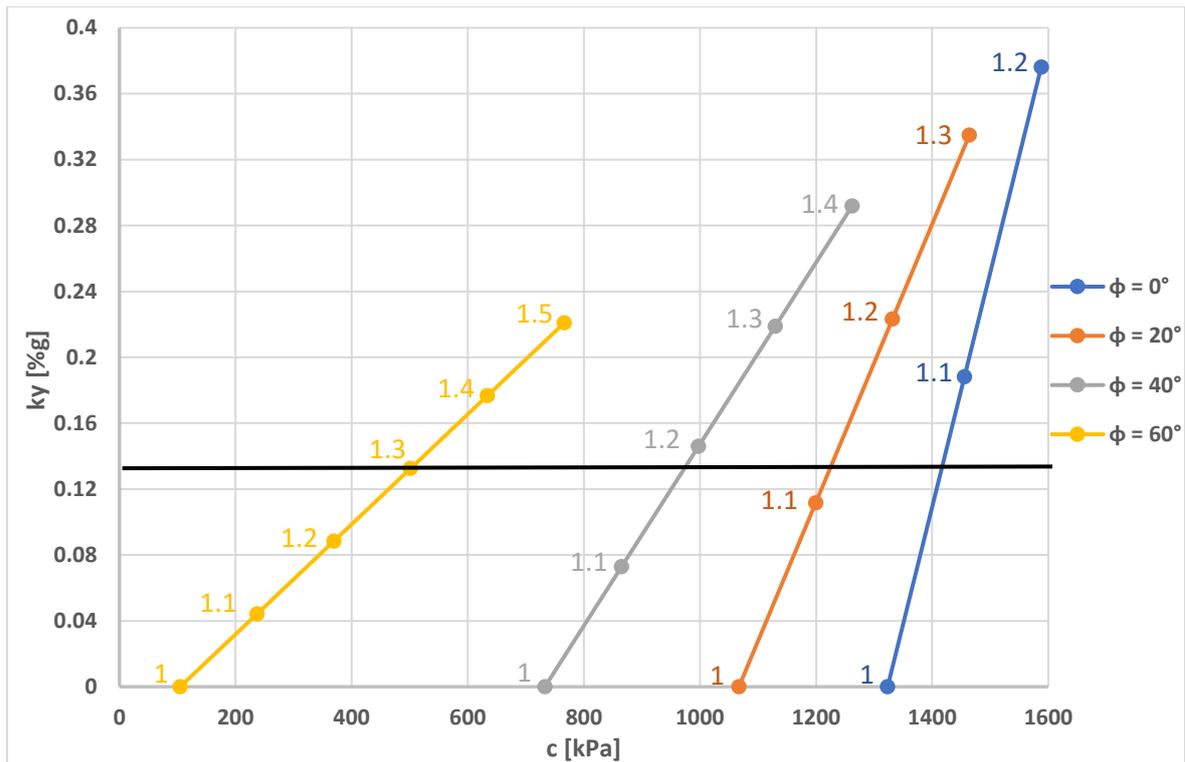


Abbildung 4.8: k_y als Funktion von φ und c . Die SF sind in den jeweiligen Farben dargestellt. Die durchgezogene schwarze Linie markiert $k_y = 0,13$ %g.

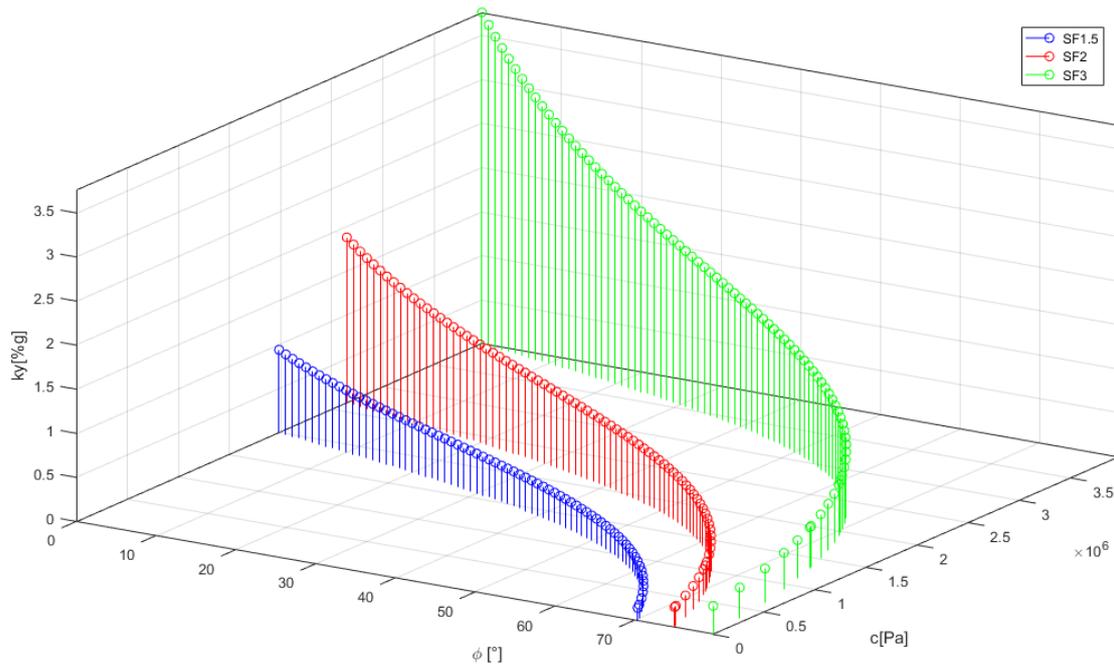


Abbildung 4.9: Darstellung von k_y als Funktion von ϕ und c für die SF 1.5 (blau), 2 (rot) und 3 (grün).

In Abbildung 4.10 wird die Veränderung der Kohäsion dargestellt, wenn kein durchgehender Kontakt zwischen der Felsturmunterseite und der Gleitfläche vorhanden ist. Die Kohäsion c muss größer werden, wenn der gleiche SF erhalten bleiben soll und die Fläche A kleiner wird. Die Kurven gehen gegen den Wert $A = 0 \text{ m}^2$, der Wert Null wird nicht erreicht.

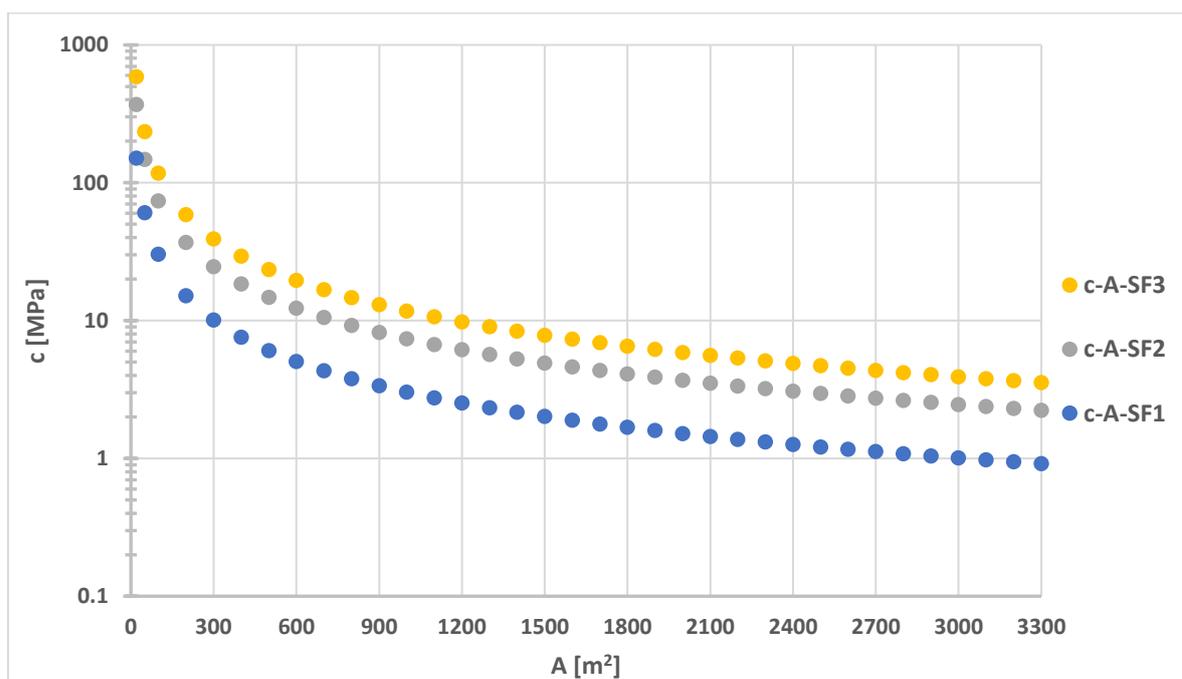


Abbildung 4.10: c in Abhängigkeit von A . Von der errechneten Fläche $A = 3300 \text{ m}^2$ werden schrittweise kleinere Werte angenommen. Logarithmische Darstellung der y-Achse.

5 Diskussion

5.1 Interpretation der Ergebnisse der TF-Kartierung

Ein großer Teil der im Arbeitsgebiet kartierten TF (106) weist ein NW-SE verlaufendes Streichen auf. Die übrigen kartierten TF (20) streichen N-S oder NE-SW. Die N-S verlaufenden TF sind vermutlich auf die Abstufung des Dobratsch von W nach E zurückzuführen. In [5] wird beschrieben, dass es am Dobratsch mehrere NE-SW streichende Störungen gibt. Bewegungen an diesen Störungen könnten die Ursache für das Vorhandensein von ebenso NE-SW verlaufenden Klüften am Felsturm sein. Die Orientierungen der NW-SE streichenden TF sind vermutlich auf Bewegungen entlang der SW-NE verlaufenden Störung zurückzuführen, welche den Taleinschnitt der Politza bildet (Abbildung 1.8). Unweit und E' der potentiellen Gleitfläche befindet sich eine steil verlaufende TF mit der Orientierung $240^{\circ}/70^{\circ}$ (Abbildung 5.1). Die TF endet im unteren Bereich im Intaktgestein und mündet im oberen Bereich in die offene Kluft auf der Rückseite des Felsturmes. Der Abstand dieser TF mit der potentiellen Gleitfläche beträgt 10 bis 20 m (Abbildung 5.1). Die beiden TF sind augenscheinlich nicht miteinander verbunden. Würde es jedoch zu einer Verbindung der beiden TF kommen, wäre eine durchgehende Gleitfläche vorhanden, welche ein Abgleiten des Felsturmes ermöglichen würde (vgl. Kapitel 4.3.2, Abbildung 4.10). Außer durch ein Erdbeben könnte eine Verbindung der beiden Trennflächen über längere Zeiträume beispielsweise durch Verwitterungsprozesse ermöglicht werden. Verwitterungsprozesse könnten durch den Einfluss von Wasser und der Temperatur, sowie anhaltenden Spannungskonzentrationen im Turmfuß beschleunigt werden. Nach [5] kann die Monatsmitteltemperatur am Dobratsch innerhalb eines Monats um bis zu 10° Celsius schwanken. Eine Temperaturniedrigung würde eine Volumenverringerng und eine Temperaturerhöhung eine Volumenvergrößerung bewirken [5]. Temperaturbedingte Spannungen im Gestein könnten zur Bildung oder Erweiterung von TF führen. In der E' der potentiellen Gleitfläche liegenden TF (Abbildung 5.1) kann sich Wasser sammeln, welches chemische und physikalische Verwitterungsprozesse beschleunigt. Die Termination der beiden kritischen TF ist entscheidend, ob das Wasser sich in der TF sammelt oder abfließt. Die potentielle Gleitfläche beißt in der Böschung des Felsturmes aus, sodass das Wasser dort an der Oberfläche abfließen kann. Die Termination der E' liegenden TF ist nicht einsehbar. Es wäre möglich, dass abfließendes Wasser in der E' liegenden TF bis in die weichen unterlagernden vulkanischen Gesteine infiltriert. Nach [4] bewegen sich Felstürme wie dieser mit wenigen Millimetern pro Jahr hangabwärts. Die Bewegung erfolgt auf den vulkanischen Gesteinen [4]. Es kann

angenommen, dass die Bewegungsraten sich verändern würden, falls der Wasserhaushalt in den vulkanischen Gesteinen ansteigt, da dadurch der Porenwasserdruck ansteigen und sich somit der Scherwiderstand an den Korngrenzen verringern würde. Vermutlich existieren jedoch entlang der potentiellen Gleitfläche immer noch Felsbrücken, welche einen größeren Zusammenhalt des Gebirges bewirken als es von Betrachtungen von außen den Anschein hat. In diesem Fall wirken nicht nur die Reibung, sondern auch die Kohäsion des Intaktgesteins stabilisierend auf den Felsturm. Zudem ist anzunehmen, dass sich die Gleitfläche nicht bis komplett in den nördlichen Teil durchzieht, sondern dort noch Verspannungen mit dem unterlagernden Gebirge existieren.

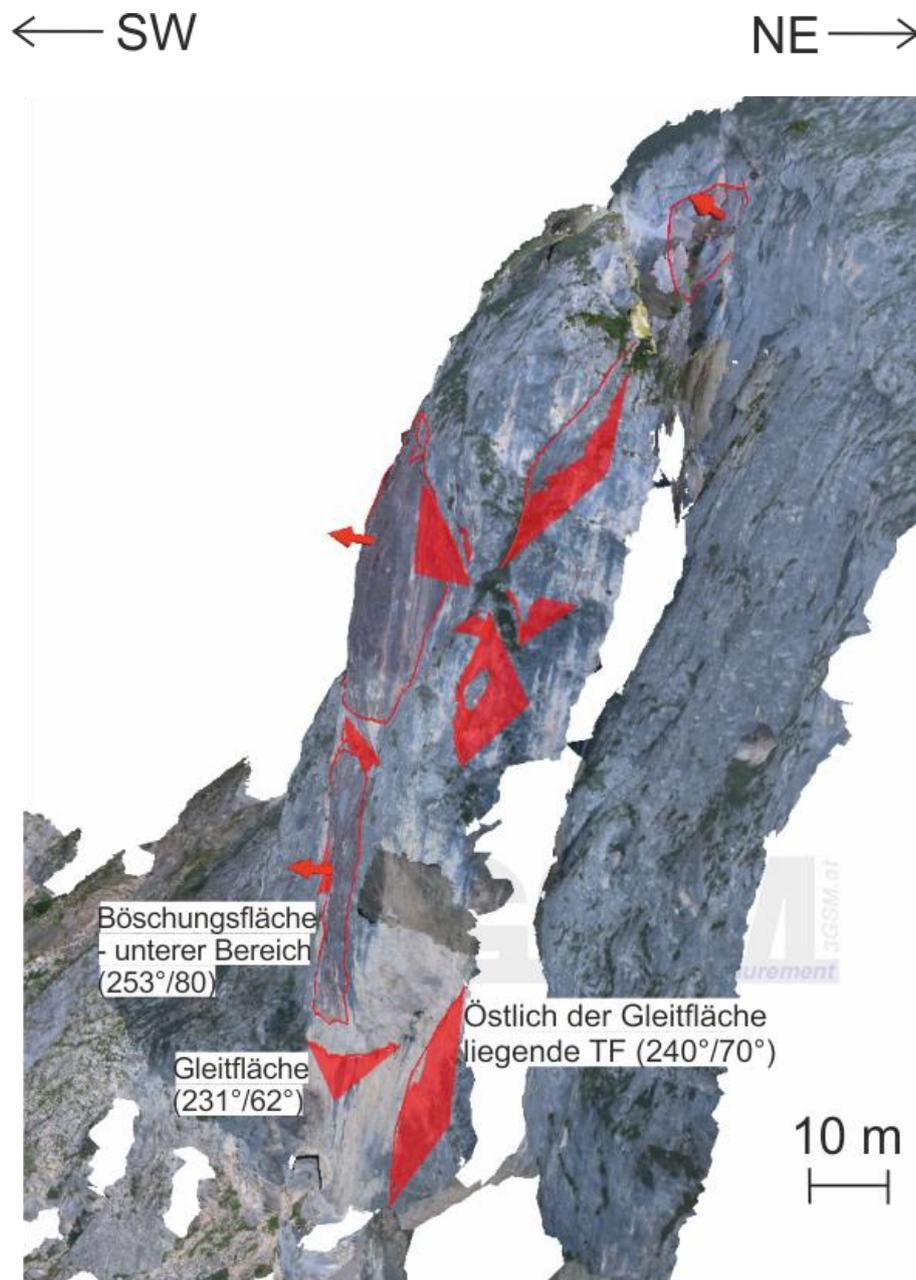


Abbildung 5.1: Darstellung einiger wichtiger mit ShapeMetriX® (3GSM) kartierten Trennflächen am Felsturm und den jeweiligen Orientierungen (Fallrichtung/Fallwinkel).

5.2 Diskussion der Berechnung der Blockvolumina

Eine beliebige Punktwolke lässt sich mit der hier angewandten Methode zuschneiden sowie das Volumen dieses Zuschnittes berechnen. Das berechnete Gesamtvolumen des Felsturmes beträgt 186720 m^3 . Dieser Wert entspricht annähernd genau dem vorabgeschätzten Volumen (180000 m^3). Die fotogrammetrischen Aufnahmen des Felsturmes waren nur von der Vorderseite möglich, sodass die Bereiche auf der Rückseite der Felswand nicht vollständig erfasst wurden. Bei der Erstellung des Volumenkörpers in Matlab® stellen die Punkte der Punktwolke die äußeren Begrenzungspunkte dar. Zwischen mindestens drei Punkten einer Punktwolke kann eine Fläche trianguliert werden. Da auf der Rückseite des Felsturmes nur wenige Aufnahmepunkte vorhanden sind, wird hier eine Ebene über eine große Fläche aufgespannt. Aus diesem Grund ist die natürliche Form des Felsturmes höchstwahrscheinlich etwas anders als die Form des errechneten Volumenkörpers. Es konnte im Zuge der Erarbeitung keine einfache Methode gefunden werden, um Punkte der Punktwolke hinzuzufügen. Würde man dies machen, könnte man die Form des Volumenkörpers auf der Rückseite modifizieren. Es können zwar die Koordinatenwerte der einzelnen Punkte im Format .xlsx exportiert und bearbeitet werden, jedoch kann keine ausreichend genaue Zuweisung von neuen Koordinatenwerten erfolgen, da die Bestimmung von Koordinatenwerten im leeren Raum schwer möglich ist. Das errechnete Gesamtvolumen des Felsturmes muss daher immer noch als Annahme betrachtet und müsste gegebenenfalls auf einen höheren Wert korrigiert werden.

Bei der Berechnung der Teilblockvolumina wird die Ungenauigkeit der Berechnungsmethode deutlicher. Die Summe der einzelnen Teilblockvolumina ergibt 119411 m^3 . Dies entspricht in etwa 67000 m^3 weniger als das errechnete Gesamtvolumen von 186720 m^3 . Die natürlichen Blöcke weisen höhere Volumina auf als die berechneten Teilblöcke. Die errechneten Volumina der Teilblöcke müssen demnach als Mindestwerte betrachtet werden. Wird ein konvexer Volumenkörper eines Teilblocks erstellt, so sind weniger formgebende Punkte der Punktwolke vorhanden als bei der Errechnung des Gesamtblocks. Somit fällt die Form der konvexen Volumenkörper der Teilblöcke deutlich abgeflachter aus als es den natürlichen Gegebenheiten entspricht. Würde der Felsturm versagen, wäre es möglich, dass dieser in die vier Teilblöcke fragmentiert wird. Dass diese Teilblöcke im Laufe des Sturzprozesses noch weiter zerkleinert werden, wäre ebenso anzunehmen, da die Teilblöcke von weiteren Schwachstellen durchsetzt sind. In einer weiteren Abschlussarbeit [21] werden mittlere Sturzblockgrößen im näheren Umkreis des Felsturmes kartiert, sowie eine Sturzblockweitenmodellierung durchgeführt. Auf diese Ergebnisse müsste zurückgeführt werden, um ausfindig zu machen, wie groß die Sturzblöcke älterer Felsstürze in dem Gebiet sind. Zudem könnten durch die Lokalisierung

der einzelnen Sturzblöcke die Reichweiten älterer Felsstürze bestimmt werden.

5.3 Diskussion der pseudo-statischen Analyse

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus Kapitel 4.3.2 interpretiert. Aufgrund dessen können Annahmen für die Gefährdungssituation des Felsturmes durchgeführt werden. In Abbildung 5.2 ist anhand eines roten Gefährdungsbalkens dargestellt, bei welchen angenommenen Materialparametern ein Versagen des Felsturmes möglich ist. Die maximal mögliche Erdbebenbeschleunigung von 0,13 %g ist in Abbildung 5.2 als obere Grenze des Gefährdungsbalkens definiert. Würde der Felsturm an der potentiellen Gleitfläche Materialparameter aufweisen, welche innerhalb des roten Balkens zuzuordnen sind, so wäre mit einem Versagen des Felsturmes bei einem Erdbeben zu rechnen.

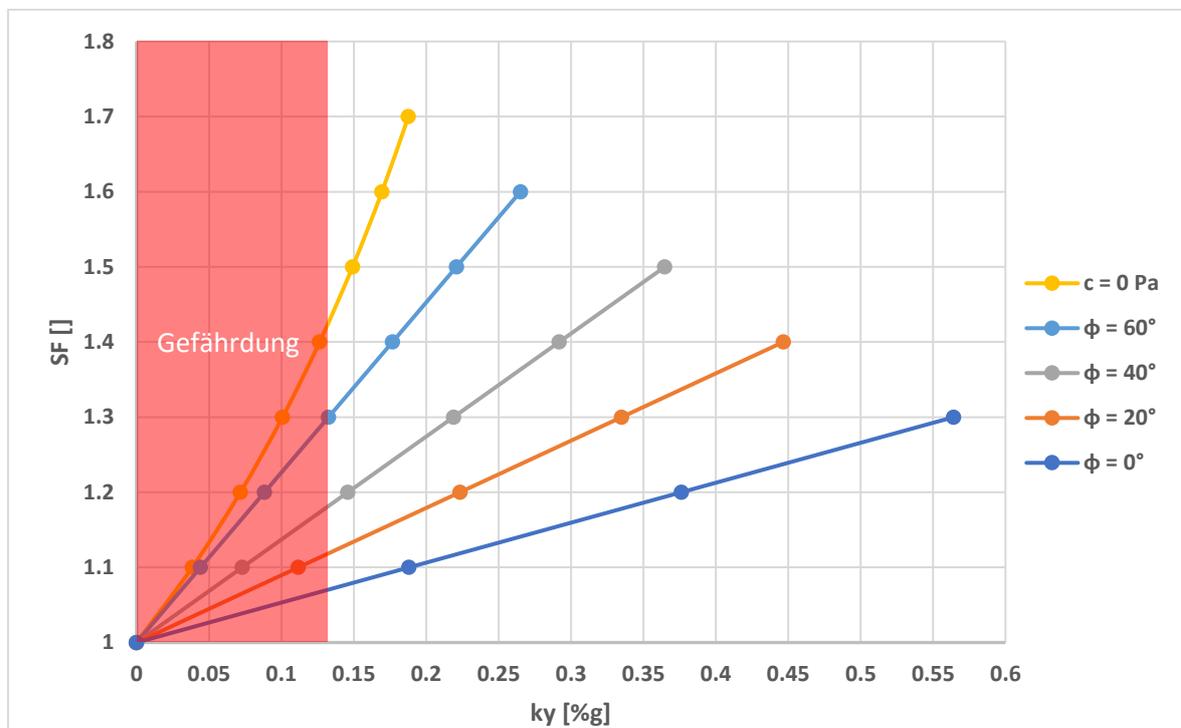


Abbildung 5.2: Darstellung der Abhängigkeit von k_y zu den ermittelten SF. Die Begrenzung des roten Gefährdungsbalkens ist mit $k_y = 0,13$ %g festgelegt.

Auffallend bei Abbildung 5.2 sind die unterschiedlichen Einflüsse von ϕ und c auf die Stabilität des Felsturmes. Die Erklärung dieses Zusammenhanges erfolgt mit Abbildung 5.3: Man nimmt beispielsweise die maximale Beschleunigung von 0,13 %g an und markiert die Schnittpunkte mit den verschiedenfarbigen Kurven. Die Schnittpunkte sind mit Sternen verdeutlicht. Am Schnittpunkt mit der blauen Linie ist $\phi = 0^\circ$ und der SF ist 1,08. Der Wert für c lässt sich mit Gleichung 3.11 ausrechnen und beträgt 1,429 MPa. Nimmt man weiterführend den Schnittpunkt von 0,13 %g mit der grünen Kurve, beträgt der SF 1,19. Der

Reibungswinkel ϕ ist für alle Punkte auf der grünen Kurve 40° . Man berechnet den zugehörigen Wert für c , welcher $0,984 \text{ MPa}$ beträgt. Die violette Kurve ist für alle Punkte definiert, bei welchen gilt: $c = 0 \text{ Pa}$. Die violette Kurve schneidet $0,13 \text{ \%g}$ bei einem SF von $1,42$. Der zugehörige Reibungswinkel ist $69,47^\circ$. Folgt man weiter dem Verlauf der violetten Kurve, so ist bei etwa $0,15 \text{ \%g}$ der SF von $1,5$ erreicht. Dass würde bedeuten, dass eine Erdbebenbeschleunigung von $0,15 \text{ \%g}$ ausreichend wäre, um ein Versagen des Felsturmes zu bewirken, wenn keine Kohäsion auf der Gleitfläche und ein Reibungswinkel von $69,47^\circ$ angenommen wird. Unter nicht seismischen Bedingungen betrüge der SF $1,5$. Nimmt man jedoch beispielsweise an, dass der Reibungswinkel 40° beträgt, ist eine seismische Beschleunigung von $0,15 \text{ \%g}$ gerade ausreichend um einen Block zum Versagen zu bringen, dessen SF unter nicht seismischen Bedingungen einen SF von $1,2$ ist.

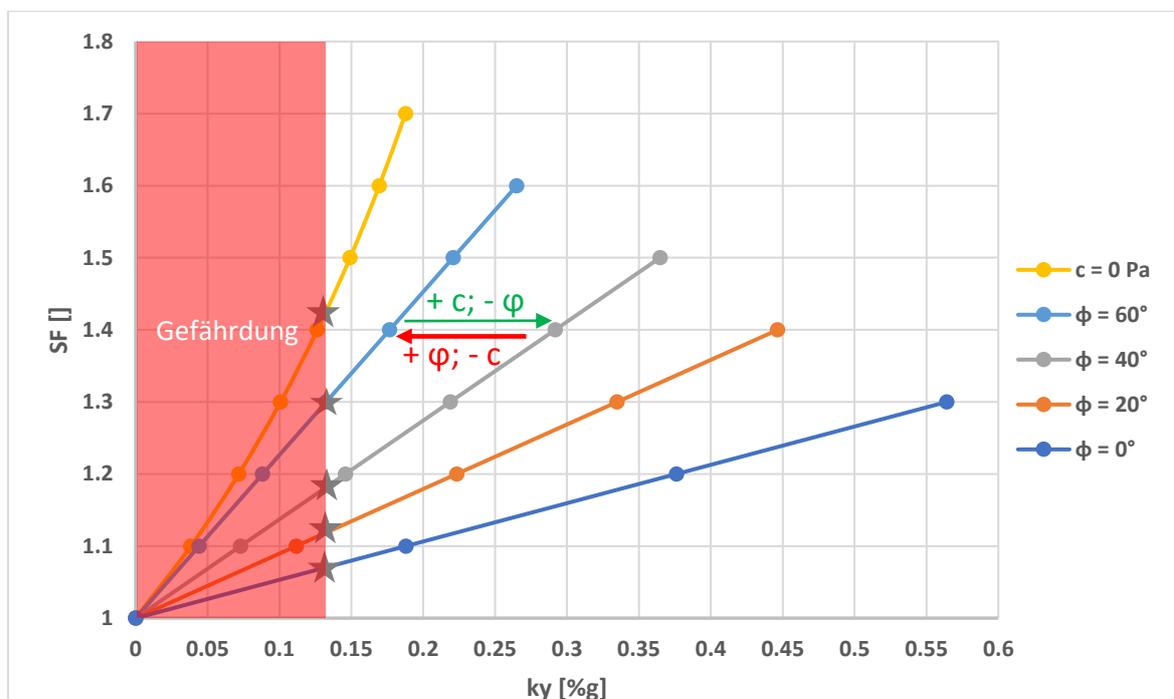


Abbildung 5.3: Einfluss von ϕ und c auf die Standsicherheit gegenüber einem seismischen Ereignis. Eine Verschlechterung der Rahmenbedingungen bei einem seismischen Ereignis ist durch einen roten Pfeil, eine Verbesserung durch einen grünen Pfeil dargestellt.

Je geringer die Kohäsion bei gleichbleibendem SF ist, desto eher würde der Felsturm bei einem Erdbeben versagen. Für die Standsicherheit des Felsturmes bei einem seismischen Ereignis wäre somit nicht nur der SF allein entscheidend, sondern auch, aus welchen Werten der Parameter c und ϕ sich der SF ergibt. Bei gleichbleibendem SF wäre eine höhere Kohäsion und ein geringer Wert für ϕ besser als umgekehrt. Beispielsweise würde bei einem SF von $1,3$, ein Reibungswinkel von 0° und eine Kohäsion von $1,72 \text{ MPa}$, eine

bessere Standfestigkeit des Felsturmes gegenüber einem seismischen Ereignis bedeuten als ein Reibungswinkel von 20° und eine niedrigere Kohäsion von 1,12 MPa (Abbildung 5.3).

Im Labor können die Gesteinsparameter φ und c beispielsweise mit dem Triaxialversuch ermittelt werden [12]. Bei der Trennflächenkartierung im Gelände fiel auf, dass die Trennflächen zum Großteil keine Kluffüllungen aufwiesen. Es wird angenommen, dass eine Lockergesteinsfüllung zwischen zwei Kluffkörpern die Kohäsion reduziert, da dies einen geringeren Kontakt zwischen zwei Kluffkörpern bedeuten würde. Aus Beobachtungen im Gelände und durch die Betrachtung von Fotos kann auch davon ausgegangen werden, dass sich an der potentiellen Gleitfläche keine nennenswerten Kluffüllungen befinden. Nach [12] ergeben Laborversuche auf Gesteinstrennflächen ohne Kluffüllungen zumeist Werte zwischen 30° und 35° für φ . Die Werte für die Kohäsion schwanken stark zwischen 0 bis 100 MPa [12].

5.3.1 Fallbeispiel

In [5] wurde Druck- und Zugversuche an Gesteinsproben des Dobratsch-Wettersteinkalks durchgeführt. Durch Auftragen der Spannungsverläufe bei verschiedenen Versuchen im Mohr'schen Spannungsdiagramm wurde ein kritischer Reibungswinkel von 47° analysiert [5]. In den Druckversuchen in [5] wiesen alle Probenkörper einen Reibungswinkel kleiner als $\varphi = 47^\circ$ auf, jedoch kein Probenkörper einen größeren Reibungswinkel. Im Folgenden werden als Fallbeispiel die Werte $\varphi = 47^\circ$ und $\varphi = 30^\circ$ als mögliche Reibungswinkel des Dobratsch-Wettersteinkalkes angenommen. Bei welchen Annahmen der Materialparameter wäre mit einem Versagen des Felsturmes zu rechnen, wenn eine horizontale Erdbebenbeschleunigung von 0,13 %g auftritt?

Die Antwort auf diese Frage wird anhand von Abbildung 5.4 und Abbildung 5.5 erläutert: Der rote Gefährdungsbalken zeigt in beiden Abbildungen den Bereich ungünstiger Materialparameter gegenüber einem seismischen Ereignis am Dobratsch an. Betrachtet man beispielsweise den Verlauf der blauen Kurve ($\varphi = 30^\circ$) in Abbildung 5.4, so müsste die Kohäsion an der potentiellen Gleitfläche größer als $c = 1100$ kPa sein, damit der Felsturm auch noch bei maximal zu erwartender seismischer Beschleunigung stabil bleibt. Nimmt man an, dass die Kohäsion $c = 47^\circ$ Grad beträgt (orange Kurve), so müsste die Kohäsion größer als $c = 850$ kPa, damit der Felsturm bei einem seismischen Ereignis in jedem Fall stabil bleibt. Die Schnittpunkte der Kurven mit der oberen Grenze des Gefährdungsbalkens sind mit Sternen gekennzeichnet.

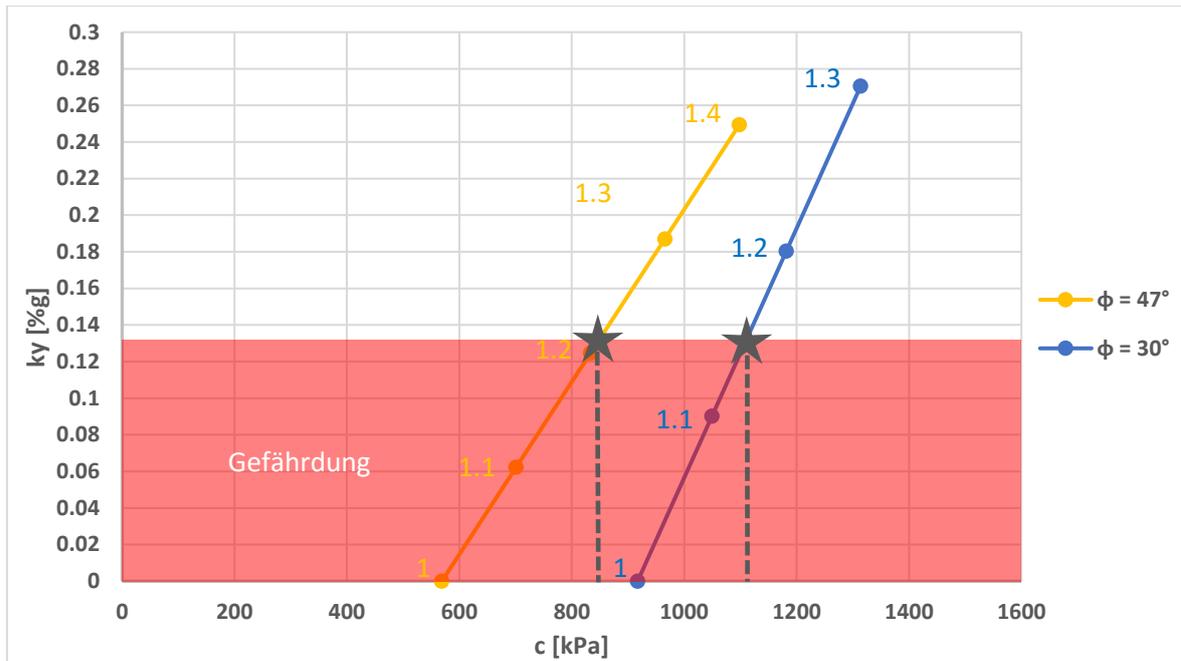


Abbildung 5.4: k_y in Abhängigkeit von $\phi = 30^\circ$, $\phi = 47^\circ$ und c . Die SF sind durch orange ($\phi = 47^\circ$) und blaue Ziffern ($\phi = 30^\circ$) gekennzeichnet.

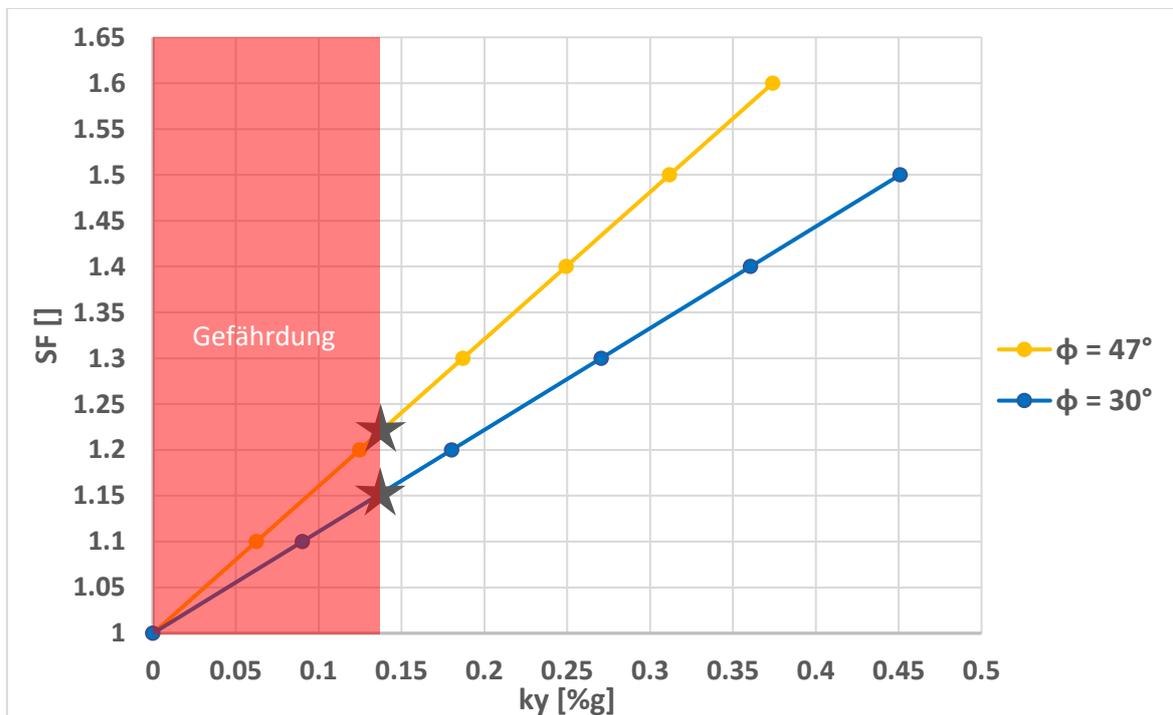


Abbildung 5.5: k_y in Abhängigkeit von SF für $\phi = 47^\circ$ und $\phi = 30^\circ$. $k_y = 0,13\%$ ist die obere Grenze des Gefährdungsbalkens.

Die Darstellungsweise ist bei Abbildung 5.5 eine andere als bei Abbildung 5.4. Die Aussage beider Abbildungen ist jedoch gleich. Bei 0,13 %g wäre der SF in etwa 1,2 bei $\phi = 47^\circ$ und

1,15 bei $\varphi = 30^\circ$. Dies entspricht einer Kohäsion von 833,4 kPa bei $\varphi = 47^\circ$ und 111,55 kPa bei $\varphi = 30^\circ$. Diese Werte sind in etwa die Werte, die auch mit Abbildung 5.4 bestimmt wurden. Dies wären in diesem Fallbeispiel Mindestwerte für die Kohäsion, welche an der potentiellen Gleitfläche wirken müssten, damit der Felsturm im Falle eines Erdbebens in Förk mit maximal zu erwartender Intensität stabil sein würde. Werte für die Kohäsion und den Reibungswinkel müssten labortechnisch untersucht werden. Der Wert von c würde auch von der Fläche abhängig sein, welche am Kontakt von dem Felsturm und der Gleitfläche wirksam ist (Abbildung 4.10). Bei geringerer Kontaktfläche zwischen der potentiellen Gleitfläche und dem Felsturm müsste die Kohäsion größer sein, damit ein SF erhalten bleibt. Eine höhere Kohäsion würde bei geringer werdender Kontaktfläche eher punktuell und nicht über die gesamte Fläche wirken. Das Vorhandensein von Felsbrücken, welche eine Verbindung zwischen den Klüftkörpern an der potentiellen Gleitfläche bedeutet, könnte eine höhere Kohäsion an der TF bewirken.

6 Ausblick

Abschließend lässt sich anmerken, dass in dieser Arbeit kein Sicherheitsfaktor bestimmt wurde, welcher eine quantitative Einschätzung der Einsturzgefährdung des Felsturmes eindeutig ermöglicht. Anhand dieser Arbeit können jedoch bei dem Wissen der Scherparameter φ und c , Aussagen über die Standsicherheit des Felsturmes bei einem möglichen Erdbeben getroffen werden. Aus Abbildung 4.8 kann abgelesen werden, ob der Felsturm bei einem möglichen Erdbeben versagen könnte oder nicht. Die Scherparameter φ und c müssten in weiteren Schritten in Triaxial- bzw. direkten Scherversuchen bestimmt werden. Dies könnte sich jedoch als schwierig erweisen, da die Probennahme aufgrund der Morphologie im Projektgebiet nur bedingt möglich ist. Ein Sicherheitsfaktor könnte dann unter Annahme der maximal möglichen seismischen Bodenbeschleunigung für den Ort Förk bestimmt werden. Mit dieser Arbeit wurde zudem gezeigt, dass es mit Hilfe fotogrammetrischer Methoden möglich ist, eine georeferenzierte Punktwolke einer steilen Felswand im alpinen Gelände zu erzeugen. Die Punktwolke kann für die digitale Trennflächenkartierung, sowie die Berechnung von Blockvolumina verwendet werden, wobei auf die Schwierigkeiten bei letzterer Methode zu achten ist. Bei zukünftigen Arbeiten könnten für die Erstellung georeferenzierter Punktwolken an steilen Felswänden vermehrt unbemannte Drohnen (UAV) zum Einsatz kommen. Kleiner werdende Drohnen, welche dennoch hochauflösende Bildaufnahmen von einer Felswand machen, könnten in Zukunft in einem Rucksack oder einer kleinen Tasche auch in schwierig begehbares, alpines Gelände gebracht werden. Mit dem Einsatz einer leicht zu transportierenden Drohne könnten Kosten und Arbeitsstunden im Vergleich zu der Durchführung eines Helikopterflugs eingespart werden.

Für das Verständnis der Ausbildung von Felstürmen am Dobratsch wäre es sinnvoll, relative Bewegungsmessungen zwischen dem Felsturm und dem umliegenden Gebirge durchzuführen. Dadurch könnte bestimmt werden, ob mögliche Zunahmen der Bewegungsgeschwindigkeiten beispielsweise von klimatischen Faktoren abhängig sind. Ein Monitoring des Felsturmes wäre daher ratsam. Für die Absicherung der Ortschaft Förk wären Bewegungsmessungen jedoch keine Präventionsmaßnahme. Kommt es zu der Ausbildung einer durchgehenden Gleitfläche, so würde der Felsturm abrupt versagen und in die Tiefe stürzen. Eine dauerhafte Problemlösung wäre eine kontrollierte Sprengung des Felsturmes. Aufgrund der vermutlich hohen Kosten einer Sprengung im alpinen Gelände und der Tatsache, dass die Region Dobratsch ein schützenswerter Naturpark ist, müsste zunächst durch weitere Untersuchungen die Gefährdung eines Felssturzes genau quantifiziert werden.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Historische Sturzereignisse vor 1882: Die Dobratsch-Bergstürze. http://www.naturgefahren.at/karten/chronik/Katastrophen_oestr/Sturzereignisse1882.html. Accessed 23 February 2017.
- [2] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Massiver Felssturz am Dobratsch bei Villach: Seismische Aufzeichnung des Felssturzes am Dobratsch. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/geophysik/news/massiver-felssturz-am-dobratsch-bei-villach>. Accessed 23 February 2017.
- [3] Gabriel Pipp. Vorabschätzung der Größe des Felsturmes. Mündliche Mitteilung. Nötsch im Gailtal; 2016.
- [4] Brandt A. Die Bergstuerze an der Villacher Alpe (Dobratsch), Kaernten/Oesterreich.: Untersuchungen zur Ursache und Mechanik der Bergstuerze. Dissertation. Hamburg; 1981.
- [5] Huetschler C-MV. Bergstuerze am Dobratsch/Kaernten/Oesterreich.: Eine tektonisch und geomechanische Analyse. Dissertation. Hamburg; 1981.
- [6] Colins E, Nachtmann W. Die permotriadische Schichtfolge der Villacher Alpe (Dobratsch), Kärnten 1974;Bd. 3.
- [7] Geologische Bundesanstalt (ed.). Erläuterungen zu Blatt 200 Arnoldstein. Wien: Geologische Bundesanstalt; 1982.
- [8] Prager C, Zangerl C, Patzelt G, Brandner R. Age distribution of fossil landslides in the Tyrol (Austria) and its surrounding areas. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2008;8(2):377–407.
- [9] U.S. Geological Survey. Landslide Types and Processes: Types of Landslides. <http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/fs-2004-3072.html>.
- [10] Abele G. Bergstürze in den Alpen: ihre Verbreitung, Morphologie und Folgeerscheinungen. Innsbruck: Univ.-Verlag Wagner; 1974.
- [11] Goodman RE, Kieffer DS. Behavior of Rock in Slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 2000:675–84.
- [12] Prinz H, Strauß R. Ingenieurgeologie. 5th ed. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl; 2011.
- [13] Turner AK, Schuster RL. Landslides: Investigation and mitigation. Washington D.C.: National Academy Press; 1996.
- [14] Freudenthaler-Pascher C. Bodenbeschleunigungen für Förk. E-Mail. Graz, Wien; 17.01.17.

-
- [15] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Friaul 1348: Erdbeben in Friaul. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/geophysik/erdbeben/historische-erdbeben/historische-erdbebenforschung-oesterreich/erdbeben-in-friaul-freitag-den-25.-jaenner-1348-gegen-17-uhr-io-10deg>. Accessed 23 February 2017.
- [16] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Magnitude. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/geophysik/lexikon/magnitude>. Accessed 15 February 2017.
- [17] Freie Universität Berlin. Temperaturverwitterung. http://www.geo.fu-berlin.de/v/pg-net/bodengeographie/verwitterung/verwitterungsformen2/physikalische_verwitterung/temperaturverwitterung/. Accessed 23 February 2017.
- [18] 3GSM GmbH. ShapeMetriX3D: 3D imaging for measuring and assessing rock and terrain surfaces. User Manual for Version 3.5. Graz; 2010.
- [19] Kramer SL. Geotechnical earthquake engineering. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall; 1996.
- [20] Rajesh Rai. Seismic Analysis. <http://www.iitbhu.ac.in/faculty/min/rajesh-rai/NMEICT-Slope/Pdf/08%20Earthquake%20Analysis.pdf>. Accessed 18 January 2017.
- [21] Hindija I. Untersuchungen zu Stabilität und Gefährdungspotential eines Felsturmes bei Förk. Bachelorarbeit. Graz; 2017.

Anhang A

Tabelle 6.1: Messergebnisse der händischen Trennflächenkartierung nach ÖNORM EN ISO 14689-1. Die dazugehörigen Erläuterungen sind Tabelle 3.1 zu entnehmen.

Nr.	Typ	Fall- richtung [°]	Fall- winkel [°]	Persistenz	Termination	Rauigkeit	Wellig- keit	Alter- ation
1	Kluft	240	79	P	OO	1,5	1,5	0,75
		233	75					
		242	75					
		256	75					
		235	70					
2	Kluft	/	/	P	OO	1,5	1,5	0,75
3	Kluft	/	/	P	OO	1,5	1,5	0,75
4	Kluft	260	90	P	OO	1	1	4 - 5
		254	70					
		248	90					
		255	83					
		253	90					
5	Kluft	120	74	P	OO	1,5	1,5	0,75
		111	70					
		112	80					
		113	76					
6	Kluft	218	72	P	IO	1,5	1,5	0,75
		212	80					
		214	80					
		210	81					
7	Kluft	239	70	P	OO	1,5	1,5	4 - 5
		242	67					
8	Kluft	240	58	P	OO	1,5	1,5	4 – 5 <i>Kluft- öffnung = 29 cm</i>
		224	79					
		238	74					
		240	77					
9	Kluft	220	75	P	OO	1,5	1,5	4 – 5 <i>Kluft-</i>
		235	75					

		230 228	72 75					<i>öffnung</i> = 42 cm
10	Kluft	239 241 222 236 239	72 79 65 70 72	P	OO	1,5	1,5	0,75
11	Kluft	269 229 217 212	60 64 67 65	P	00	1,5	1,5	0,75

Anhang B

Tabelle 6.2: Matlabcodes für die Berechnung der Blockvolumina.

```
%% Laden der Textdatei
filename = 'J:\MASTERARBEIT\ShapeMetrix\PC_Befliegung.xyz';
delimiter = ',';
formatSpec = '%f%f%f%[\n\r]';
fileID = fopen(filename,'r');
dataArray = textscan(fileID, formatSpec, 'Delimiter', delimiter, 'EmptyValue', NaN,
'ReturnOnError', false);
fclose(fileID);

%% Graphische Darstellung der Punktwolke
X = dataArray(:, 1);
Y = dataArray(:, 2);
Z = dataArray(:, 3);
data = [X,Y,Z];
ptCloud = pointCloud(data);
figure,
pcshow(ptCloud);
colormap(gray);
xlabel('X');
ylabel('Y');
zlabel('Z');

%% 1. Definition der ROI
x_low = 3.97175*10^5;
x_up = 3.9724*10^5;
y_low = 5.161353*10^6;
y_up = 5.161423*10^6;
roi = [x_low,x_up,y_low,y_up,-inf,inf];
sampleIndices = findPointsInROI(ptCloud,roi);
PCROI = select(ptCloud,sampleIndices);
figure,
pcshow(PCROI);
colormap(gray);
xlabel('X');
ylabel('Y');
```

```
zlabel('Z');

%% 1. Transformation (um die z-Achse)
A = [cos(pi/3) sin(pi/3) 0 0; ...
     -sin(pi/3) cos(pi/3) 0 0; ...
     0 0 1 0; ...
     0 0 0 1];
tform = affine3d(A);
ptCloudOut = pctransform(PCROI,tform);
figure,
pcshow(ptCloudOut);
colormap(gray);
xlabel('X');
ylabel('Y');
zlabel('Z');

%% 2. Definition der ROI
x_low = -4.271332*10^6;
x_up = -4.271245*10^6;
y_low = 2.924657*10^6;
y_up = 2.924713*10^6;
roi = [x_low,x_up,y_low,y_up,-inf,inf];
sampleIndices = findPointsInROI(ptCloudOut,roi);
PCROI = select(ptCloudOut,sampleIndices);
figure,
pcshow(PCROI);
colormap(gray);
xlabel('X');
ylabel('Y');
zlabel('Z');

%% 2. Transformation (um die z-Achse)
A = [cos(pi/4) sin(pi/4) 0 0; ...
     -sin(pi/4) cos(pi/4) 0 0; ...
     0 0 1 0; ...
     0 0 0 1];
tform = affine3d(A);
ptCloudOut = pctransform(PCROI,tform);
figure,
pcshow(ptCloudOut);
colormap(gray);
```

```
xlabel('X');
ylabel('Y');
xlabel('Z');

%% 3. Definition der ROI
x_low = -5.08835*10^6;
x_up = -5.08829*10^6;
y_low = -9.5223*10^5;
y_up = -9.52154*10^5;
roi = [x_low,x_up,y_low,y_up,-inf,inf];
sampleIndices = findPointsInROI(ptCloudOut,roi);
PCROI = select(ptCloudOut,sampleIndices);
figure,
pcshow(PCROI);
colormap(gray);
xlabel('X');
ylabel('Y');
xlabel('Z');

%% 3. Transformation (60° um die z-Achse)
A = [cos(pi/3) sin(pi/3) 0 0; ...
     -sin(pi/3) cos(pi/3) 0 0; ...
     0 0 1 0; ...
     0 0 0 1];
tform = affine3d(A);
ptCloudOut = pctransform(PCROI,tform);
figure,
pcshow(ptCloudOut);
colormap(gray);
xlabel('X');
ylabel('Y');
xlabel('Z');

%% 4. Definition der ROI
x_low = -1.719563*10^6;
x_up = -1.719506*10^6;
y_low = -4.882754*10^6;
y_up = -4.882675*10^6;
roi = [x_low,x_up,y_low,y_up,-inf,inf];
sampleIndices = findPointsInROI(ptCloudOut,roi);
PCROI = select(ptCloudOut,sampleIndices);
```

```
figure,
pcshow(PCROI);
colormap(gray);
xlabel('X');
ylabel('Y');
zlabel('Z');

%% Transformation (um die x-Achse)
A = [1 0 0 0; ...
     0 cos(pi/3) sin(pi/3) 0; ...
     0 -sin(pi/3) cos(pi/3) 0; ...
     0 0 0 1];
tform = affine3d(A);
ptCloudOut = pctransform(PCROI,tform);
figure,
pcshow(ptCloudOut);
colormap(gray);
xlabel('X');
ylabel('Y');
zlabel('Z');

%% 5. Definiton der ROI
y_low = -3.95105*10^6;
y_up = -3.9509465*10^6
z_low = -2.86896*10^6
z_up = -2.86882*10^6
roi = [-inf,inf,y_low,y_up,z_low,z_up];
sampleIndices = findPointsInROI(ptCloudOut,roi);
PCROI = select(ptCloudOut,sampleIndices);
figure,
pcshow(PCROI);
colormap(gray);
xlabel('X');
ylabel('Y');
zlabel('Z');

%% Transformation (um die z-Achse)
A = [cos(pi/4) sin(pi/4) 0 0; ...
     -sin(pi/4) cos(pi/4) 0 0; ...
     0 0 1 0; ...
     0 0 0 1];
```

```

tform = affine3d(A);
ptCloudOut = pctransform(PCROI,tform);
figure,
pcshow(ptCloudOut);
colormap(gray);
xlabel('X');
ylabel('Y');
zlabel('Z');

%% 6. Definition der ROI
x_low = 1.57785*10^6
x_up = 1.57792*10^6
y_low = -4.00972*10^6
y_up = -4.00962*10^6
roi = [x_low,x_up,y_low,y_up,-inf,inf];
sampleIndices = findPointsInROI(ptCloudOut,roi);
PCROI = select(ptCloudOut,sampleIndices);
figure,
pcshow(PCROI);
colormap(gray);
xlabel('X');
ylabel('Y');
zlabel('Z');

%% Erzeugung und Darstellung des konvexen Volumenkörpers, Berechnung
des Volumens (V)
delta = max(PCROI.Location(:,2))-min(PCROI.Location(:,2));
d1 = delta*0.05;
min = min(PCROI.Location(:,2));
figure;
    axis equal
    grid on
    hold on
    xlabel('X(m) - Easting');
    ylabel('Y(m) - Northing');
    zlabel('Z(m) - Height');
    [K,V] = convhull (ptCloudOut.Location(:,1),ptCloudOut.Location(:,2),ptCloudOut.Location(:,3));
    trisurf(K,ptCloudOut.Location(:,1),ptCloudOut.Location(:,2),ptCloudOut.Location(:,3));
    scatter3(ptCloudOut.Location(:,1),ptCloudOut.Location(:,2),ptCloudOut.Location(:,3),...
        'r','*');

```

Anhang C

Tabelle 6.3: Berechnete Werte für k_y zu den Annahmen für φ und den daraus errechneten Werten für c .

φ [°]	c [MPa] SF 1	c [MPa] SF 1,5	c [MPa] SF 2	c [MPa] SF 3	k_y [%g] SF 1	k_y [%g] SF 1,5	k_y [%g] SF 2	k_y [%g] SF 3
79.95				0.00				0.32
79				0.35				0.35
78				0.66				0.38
77				0.92				0.41
76				1.15				0.44
75.11			0.00	1.32			0.23	0.47
75			0.02	1.34			0.23	0.47
74			0.19	1.52			0.25	0.50
73			0.35	1.67			0.26	0.53
72.63			0.40	1.72			0.27	0.54
71			0.60	1.93			0.29	0.58
70.48		0.00	0.66	1.98		0.15	0.30	0.60
70		0.05	0.71	2.04		0.15	0.30	0.61
69.47		0.11	0.77	2.09		0.16	0.31	0.62
68		0.24	0.91	2.23		0.17	0.33	0.67
67		0.33	0.99	2.31		0.17	0.35	0.69
66		0.40	1.07	2.39		0.18	0.36	0.72
65		0.48	1.14	2.46		0.19	0.37	0.75
64		0.54	1.20	2.53		0.19	0.39	0.77
63		0.60	1.27	2.59		0.20	0.40	0.80
62	0.00	0.66	1.32	2.65		0.21	0.41	0.83
61	0.05	0.72	1.38	2.70	0.00	0.21	0.43	0.86
60	0.10	0.77	1.43	2.75	0.00	0.22	0.44	0.88
59	0.15	0.81	1.48	2.80	0.00	0.23	0.46	0.91
58	0.20	0.86	1.52	2.84	0.00	0.23	0.47	0.94
57	0.24	0.90	1.56	2.89	0.00	0.24	0.48	0.97
56	0.28	0.94	1.60	2.93	0.00	0.25	0.50	0.99
55	0.32	0.98	1.64	2.96	0.00	0.26	0.51	1.02
54	0.35	1.02	1.68	3.00	0.00	0.26	0.52	1.05
53	0.39	1.05	1.71	3.04	0.00	0.27	0.54	1.08
52	0.42	1.08	1.75	3.07	0.00	0.28	0.55	1.10
51	0.45	1.12	1.78	3.10	0.00	0.28	0.57	1.13
50	0.48	1.15	1.81	3.13	0.00	0.29	0.58	1.16
49	0.51	1.18	1.84	3.16	0.00	0.30	0.59	1.19
48	0.54	1.20	1.87	3.19	0.00	0.30	0.61	1.22
47	0.57	1.23	1.89	3.22	0.00	0.31	0.62	1.25
46	0.59	1.26	1.92	3.24	0.00	0.32	0.64	1.28
45	0.62	1.28	1.94	3.27	0.00	0.33	0.65	1.31
44	0.64	1.31	1.97	3.29	0.00	0.33	0.67	1.34

43	0.67	1.33	1.99	3.31	0.00	0.34	0.68	1.37
42	0.69	1.35	2.01	3.34	0.00	0.35	0.70	1.40
41	0.71	1.37	2.03	3.36	0.00	0.36	0.71	1.43
40	0.73	1.39	2.06	3.38	0.00	0.36	0.73	1.46
39	0.75	1.42	2.08	3.40	0.00	0.37	0.75	1.49
38	0.77	1.44	2.10	3.42	0.00	0.38	0.76	1.52
37	0.79	1.45	2.12	3.44	0.00	0.39	0.78	1.56
36	0.81	1.47	2.14	3.46	0.00	0.40	0.79	1.59
35	0.83	1.49	2.15	3.48	0.00	0.41	0.81	1.62
34	0.85	1.51	2.17	3.50	0.00	0.41	0.83	1.66
33	0.87	1.53	2.19	3.51	0.00	0.42	0.85	1.69
32	0.88	1.55	2.21	3.53	0.00	0.43	0.86	1.73
31	0.90	1.56	2.22	3.55	0.00	0.44	0.88	1.77
30	0.92	1.58	2.24	3.56	0.00	0.45	0.90	1.80
29	0.93	1.59	2.26	3.58	0.00	0.46	0.92	1.84
28	0.95	1.61	2.27	3.60	0.00	0.47	0.94	1.88
27	0.96	1.63	2.29	3.61	0.00	0.48	0.96	1.92
26	0.98	1.64	2.30	3.63	0.00	0.49	0.98	1.96
25	1.00	1.66	2.32	3.64	0.00	0.50	1.00	2.00
24	1.01	1.67	2.33	3.66	0.00	0.51	1.02	2.05
23	1.02	1.69	2.35	3.67	0.00	0.52	1.05	2.09
22	1.04	1.70	2.36	3.69	0.00	0.53	1.07	2.14
21	1.05	1.71	2.38	3.70	0.00	0.55	1.09	2.18
20	1.07	1.73	2.39	3.71	0.00	0.56	1.12	2.23
19	1.08	1.74	2.40	3.73	0.00	0.57	1.14	2.28
18	1.09	1.76	2.42	3.74	0.00	0.58	1.17	2.33
17	1.11	1.77	2.43	3.75	0.00	0.60	1.19	2.39
16	1.12	1.78	2.44	3.77	0.00	0.61	1.22	2.44
15	1.13	1.80	2.46	3.78	0.00	0.63	1.25	2.50
14	1.15	1.81	2.47	3.79	0.00	0.64	1.28	2.56
13	1.16	1.82	2.48	3.81	0.00	0.66	1.31	2.62
12	1.17	1.84	2.50	3.82	0.00	0.67	1.34	2.69
11	1.19	1.85	2.51	3.83	0.00	0.69	1.38	2.75
10	1.20	1.86	2.52	3.85	0.00	0.71	1.41	2.82
9	1.21	1.87	2.54	3.86	0.00	0.72	1.45	2.90
8	1.22	1.89	2.55	3.87	0.00	0.74	1.49	2.98
7	1.24	1.90	2.56	3.88	0.00	0.76	1.53	3.06
6	1.25	1.91	2.57	3.90	0.00	0.79	1.57	3.14
5	1.26	1.92	2.58	3.91	0.00	0.81	1.61	3.23
4	1.27	1.94	2.60	3.92	0.00	0.83	1.66	3.32
3	1.29	1.95	2.61	3.93	0.00	0.86	1.71	3.42
2	1.30	1.96	2.62	3.95	0.00	0.88	1.76	3.53
1	1.31	1.97	2.63	3.96	0.00	0.91	1.82	3.64
0	1.32	1.98	2.65	3.97	0.00	0.94	1.88	3.76