

Technische Universität Graz (Graz University of Technology)  
Institut für angewandte Geowissenschaften

# **Methoden zur Erfassung und Beurteilung von Kluftkörpern in natürlichen Felsböschungen**

**Masterarbeit**  
**von**  
**Benedikt Minutillo, BSc**

Vorgelegt zur Erlangung des  
akademischen Grades eines Master  
der Studienrichtung Erdwissenschaften

(Provided to obtain the  
academic degree of a Master  
of Geosciences)

Betreuer

Ao.Univ.-Prof. Dr. Qian Liu

Graz, im Juni 2018

## **Eid (Ehrenwörtliche Erklärung)**

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ich versichere, dass ich dieses Masterarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin oder einem Beurteiler) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Graz, im Juni 2018

.....

## **Danksagung**

Es ist an der Zeit, gegen Ende meines Studiums, mich bei allen zu bedanken, die mich im Laufe meines Studiums geistig und auch tatkräftig unterstützt haben. Größter Dank gilt meinen Eltern, die mich immer wieder motiviert haben, mein Studium abzuschließen und damit auch sehr große Geduld mit mir bewiesen haben.

Weiters möchte ich mich bei all meinen Freunden und Kommilitonen des Studiums bedanken, die mich einerseits immer wieder erfolgreich vom Studium abgelenkt haben und andererseits immer freundlich und rechtzeitig auf kommende Prüfungstermine hingewiesen haben.

Ein Besonderer Dank jedoch gilt Herrn Ao.Univ.-Prof. Mag.rer.nat. Dr.rer.nat. Qian Liu, der mich im Zuge diese Masterarbeit jederzeit mit hoher Kompetenz, viel Motivation und Freundlichkeit unterstützt hat.

## **Kurzfassung**

Um eine natürliche Felsböschung auf ihr Gefahrenpotential, in Bezug auf herabstürzende Felsblöcke, einschätzen zu können, ist es besonders wichtig, mögliche Blockgrößen und mögliche Blockformen zu kennen. Der Fokus dieser Arbeit liegt in der Einschätzung und Berechnung möglicher Blockgrößen und welche Form diese haben werden. Anhand der Geländebegehung und mit Hilfe hochauflösender Fotos wurde eine erste Einschätzung der Felswand bzw. eine erste Abschätzung der Blockgrößen, basierend auf einem modifizierten GSI-System, durchgeführt. Weiters wurde mit Laserscandaten ein 3D-Modell der Felswand erstellt, um Trennflächen und Kluftkörper zu identifizieren. Die Größen der Kluftkörper wurden mit unterschiedlichen Methoden berechnet und deren Formen visuell dargestellt und mit den Ergebnissen der GSI-Einschätzung verglichen.

## **Abstract**

To be able to evaluate a natural rock face with regard to its potential danger of falling rocks, it is particularly important to know possible block sizes and shapes. The focus of the current thesis consists precisely in the assessment and calculation of possible block sizes and their shapes. On the basis of the site survey and with the help of high-resolution photos, a preliminary estimate of the rock face as well as of the block sizes was carried out using a modified GSI-approach. Furthermore, laser scan data was used to create a 3D model of the rock face to identify and measure 3D-discontinuities and rock blocks. The sizes of the blocks were calculated using different techniques and their shapes were visualized. The results of the calculations were then compared with the results of the GSI-based estimation.

## Inhaltsverzeichnis

Eid (Ehrenwörtliche Erklärung).....	ii
Danksagung.....	iii
Kurzfassung.....	iv
Abstract.....	v
Inhaltsverzeichnis.....	1
1. Problemstellung und Ziel .....	3
2. Arbeitsgebiet.....	4
2.1 Geographische Lage.....	4
2.2 Geologie .....	5
3. Methodik .....	7
3.1 Kluftkörper in der Praxis .....	7
3.2 Methoden zur Erfassung von Kluftkörpern .....	8
3.2.1 Scan Line Methode .....	9
3.2.2 Window Mapping.....	10
3.2.3 Photogrammetrie.....	10
3.2.4 LiDAR – terrestrischer Laserscan.....	11
3.3 GSI („Geological Strength Index“).....	14
3.4 Trennflächen.....	16
3.4.1 Wichtige Parameter.....	17
3.4.2 Einbau von Trennflächen im RiSCAN.....	19
3.4.3 Messen der Trennflächenabstände .....	23
3.5 Statistische Auswertung.....	25
3.5.1 Trennflächenabstände und Ausbisslängen.....	31
3.6 Verwendete Computerprogramme .....	32
3.6.1 RiSCAN PRO .....	32
3.6.2 Dips.....	33
3.6.3 B03HPGL.EXE.....	34
4. Ergebnisse.....	35

4.1	Erste Einschätzung mit Hilfe der GSI-Tafel .....	35
4.1.1	Bereich 1 .....	39
4.1.2	Bereich 2 .....	41
4.1.3	Bereich 3 .....	43
4.1.4	Bereich 4 .....	45
4.1.5	Zusammenfassend .....	47
4.2	Trennflächenmodell mit RiSCAN .....	48
4.2.1	SF1 .....	48
4.2.2	SF2 .....	50
4.2.3	KF1 .....	53
4.2.4	KF2 .....	56
4.2.5	KF3 .....	58
4.2.6	Trennflächensystem .....	60
4.2.7	Trennflächenabstände und Ausbisslängen .....	62
4.3	Kluftkörpergrößen .....	66
4.3.1	Bereich 1 .....	66
4.3.2	Bereich 2 .....	69
4.3.3	Bereich 3 .....	75
4.3.4	Bereich 4 .....	77
5.	Fazit .....	84
6.	Literaturverzeichnis .....	86
7.	Abbildungsverzeichnis .....	88
8.	Tabellenverzeichnis .....	93
9.	Anhang .....	95
9.1	Fotos .....	95
9.2	Blockformen .....	98
9.3	Trennflächenabstände und Ausbisslängen .....	110

## 1. Problemstellung und Ziel

In der vorliegenden Arbeit ging es um das Erfassen und Beurteilen von Kluftkörpern in einer natürlichen Felsböschung. Für die Entwicklung relevanter Trennflächen und in weiterer Folge Kluftkörper, ist maßgeblich die Geomorphologie der Felswand ausschlaggebend. Sie spiegelt die Einflüsse, wie Tektonik, Klima, Vegetation etc., denen die Felswand im Laufe Ihrer Geschichte ausgesetzt war, wider und gibt weiters Aufschluss über die Entstehung solcher Trennflächen. Doch im Rahmen dieser Arbeit war es nicht zielführend genauer auf die Geomorphologie der Felswand einzugehen, da dies jenen sprengen würde. Daher möchte ich auf die Arbeit von Gögele (2018) verweisen, in der die tektonische Entwicklung der Region um Moos im Passeier genauer beschrieben wird.

Für diese Arbeit war es wichtig die Trennflächen zu identifizieren und ein Trennflächenmodell zu erstellen, um Trennflächenscharen zu unterscheiden. Anhand der identifizierten Trennflächenscharen wurden mögliche Blockgrößen berechnet und deren mögliche Form rekonstruiert. Der erste Arbeitsschritt war die Abschätzung der Felswand in Bezug auf Blockgrößen mit Hilfe der GSI-Tafel (Geological Strength Index). In weiterer Folge wurde mittels Laserscan und dem Programm RiSCAN ein 3D-Modell der Felswand erstellt, Trennflächen identifiziert und zu Kluftscharen zusammengefasst. Dabei spielen besonders die Trennflächenabstände und der Durchtrennungsgrad (Persistenz) eine wichtige Rolle (siehe Kapitel 3.4.1), da diese das Volumen möglicher Blöcke limitieren. Ziel war es, die mit dem groben GSI-Verfahren eingeschätzte Gebirgszerlegung mit den präzisen Berechnungen der Blockgrößen aus dem Kluffmodell zu vergleichen und die Methoden in ihrer Anwendbarkeit gegeneinander abzuwägen.

## 2. Arbeitsgebiet

### 2.1 Geographische Lage

Die in dieser Arbeit behandelte Felswand befindet sich direkt über einer Schottergrube auf 1000m Seehöhe, zirka 300m vor der nördlichen Einfahrt des Ortes Moos in Passeier im Passeiertal in Südtirol (Italien). In Abbildung 1 ist die geographische Lage von Moos dargestellt und in Abbildung 2 die genaue Lage der untersuchten Felswand (Quelle: Google Maps, 2018). Die Felswand erstreckt sich über eine Höhe von zirka 100m und eine Breite von zirka 80m.

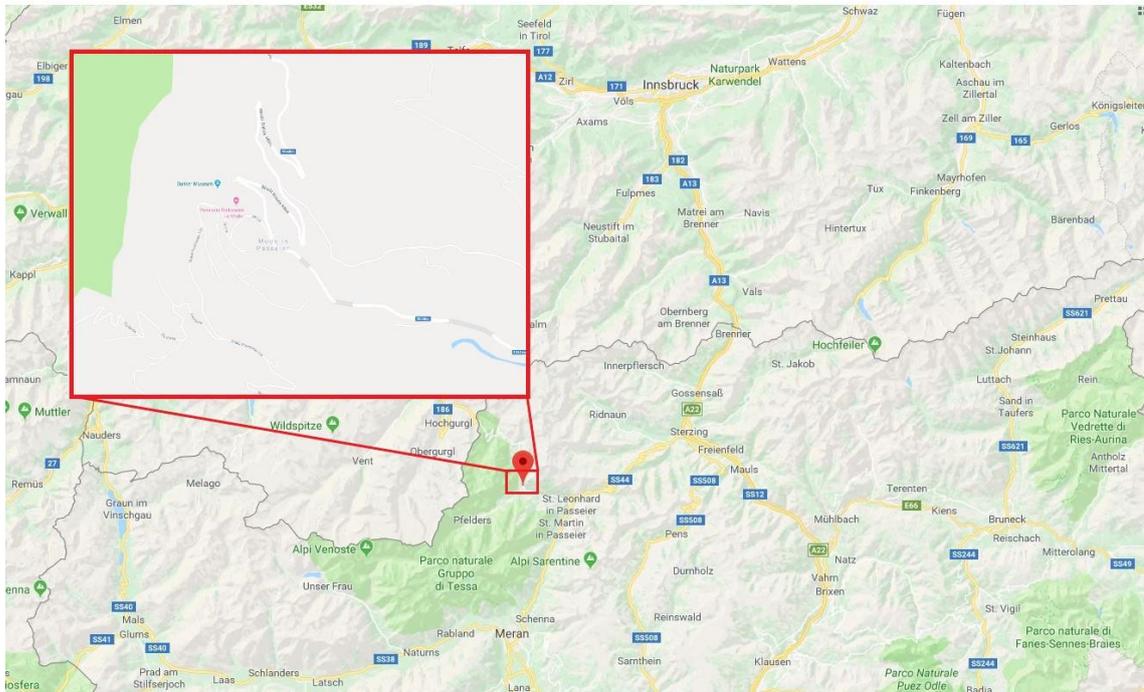


Abbildung 1: Geographische Lage des Ortes Moos im Passeier (roter Punkt)



Abbildung 2: Geographische Lage der Felswand (roter Kreis)

## 2.2 Geologie

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im sogenannten Texel Komplex. Dieser beinhaltet unterschiedlichste Lithologien, die auf eine komplexe tektonische Geschichte rückschließen lassen. Hauptsächlich treten metamorphe Gesteine wie Amphibolite, Eklogite, Paragneise und Glimmerschiefer auf. Doch auch Carbonatgesteine wie Marmore und Kalkglimmerschiefer sind anzutreffen (Sander und Hammer 1929).

Der Texel Komplex ist im Norden tektonisch durch den Schneebergkomplex begrenzt, die Passeier- und die Jaufenstörung bilden die tektonische Grenze im Osten. Im Süden bildet die Vinschgau Scherzone die Grenze (Abbildung 3).

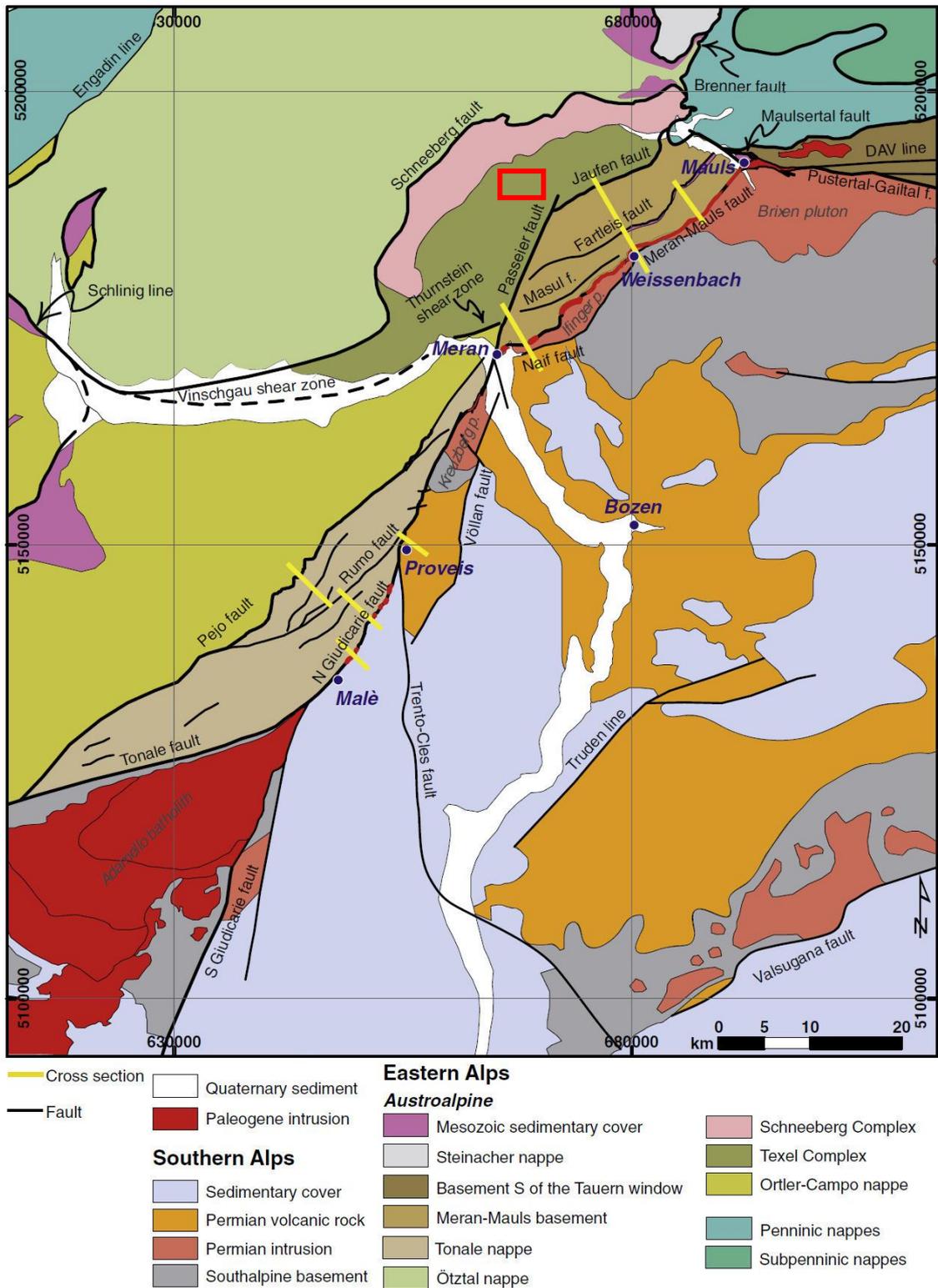


Abbildung 3: Übersicht der geologischen Karte mit den geologischen Einheiten, in Rot markiert die ungefähre Lage des Arbeitsgebietes (Pomella, Stipp und Fügenschuh 2012)

Bei dem Gestein der Felswand handelt es sich um Paragneis.

### 3. Methodik

In diesem Kapitel wird auf die Vorgangsweise bzw. Arbeitsweise und auf verwendete Programme eingegangen. Weiters werden die theoretischen Grundlagen zur Aufnahme von Klufscharen und deren relevante Parameter, die Block-Theorie und die statistische Auswertung von Klufscharen erläutert.

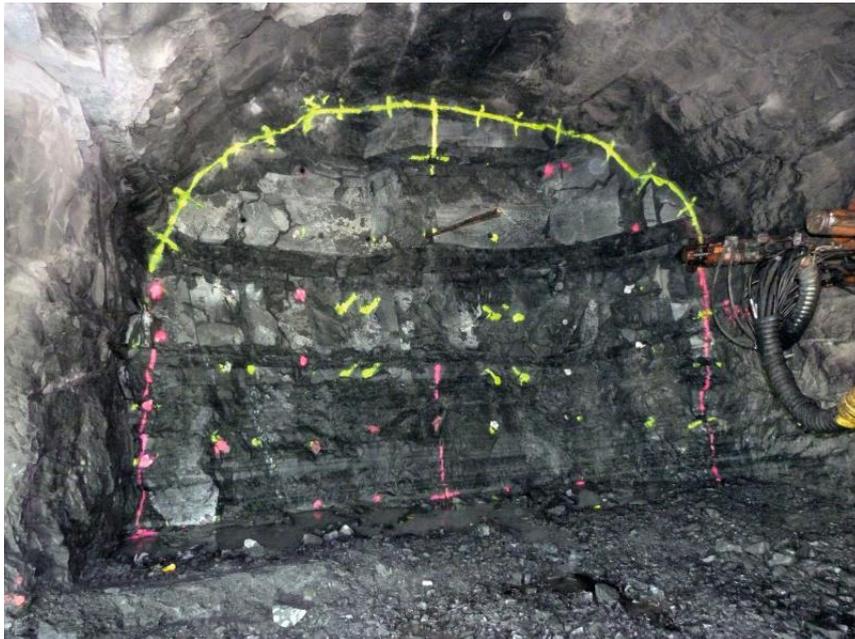
#### 3.1 Kluftkörper in der Praxis

Die Kluftkörpergröße in einem Gesteinsverband ist möglicherweise der wichtigsten Parameter, der die Stabilität und Festigkeit einer Felsböschung oder einer Tunnelwand beeinflusst (Maerz und Germain 1996). Bei Felsböschungen gilt, je größer die Kluftkörper, desto intakter und weniger zerklüftet ist der Gesteinsverband, aber desto größer ist auch die potenzielle Gefahr, die von ihm ausgeht, da mit der Größe auch die Zerstörungskraft und Reichweite im Falle eines Sturzes wesentlich zu nimmt.



Abbildung 4: Foto eines Felssturzes in der Nähe von Tramin, Südtirol. Gut zu erkennen ist, dass die kleineren Felsbrocken, im Hintergrund des Fotos, noch vor dem Haus liegengeblieben sind, wohingegen der große Block wesentlich weiter und durch das Gebäude hindurch gedonnert ist (spiegel.de, 2014).

Im Tunnelbau spielt die Kluftkörpergröße ebenso eine wichtige Rolle. Sei es beim kontinuierlichen Vortrieb mit der TBM (Tunnelbohrmaschine), wo gewisse Kluftkörpergrößen zu erheblichen Problemen führen können, oder beim Tunnelvortrieb mittels Sprengung, wo die Sprengladungen an die Kluftkörper bzw. die Gesteinsfestigkeit angepasst werden muss, um eine optimale Sprengung zu gewährleisten.



*Abbildung 5: Foto der Tunnelwand mit den markierten Bohrpunkten für die Sprengladungen. Die Sprengladungen werden an die Gesteinsfestigkeit angepasst (tunnel-online.info, 2013).*

Des Weiteren spielt die Kluftkörpergröße in vielen geomechanischen Klassifikationsschemen eine signifikante Rolle. Zum Beispiel das RMR-System (Bieniawski 1973), die Geomechanische Klassifikation (Laubscher 1977) oder das Q-System (Barton, Lien und Lunde 1974) verwenden entweder die Blockgröße direkt, oder indirekt über den Tennflächenabstand und die Orientierung (Maerz und Germain 1996). Genau so wird auch der in weiterer Folge verwendete GSI-Wert (Hoek, Kaiser und Bawden 1995) wesentlich von der Blockgröße beeinflusst.

### **3.2 Methoden zur Erfassung von Kluftkörpern**

Im Allgemeinen spricht man, bei der ingenieurgeologischen Untersuchung von Gebirgskörpern, von der sogenannten „Gebirgscharakterisierung“. Diese Charakterisierung des Gebirges erfolgt über eine Vielzahl an Informationen über die

vorherrschende Geologie, Bewegungsmechanismen, Hydrologie, Genese etc. bis hin zu der Orientierung von Trennflächen, Störungen, Trennflächenabständen, Rauigkeit, Persistenz und noch vieles mehr. Genau um diese Faktoren, Orientierung der Trennflächen, Trennflächenabstände und Persistenz (siehe Kapitel 3.4.1) dreht sich der Schwerpunkt dieser Arbeit, da diese maßgeblichen Einfluss auf die Größe von Klutkörpern haben. Hier werden nun einige Methoden aufgelistet, mit denen diese Faktoren aufgenommen werden können.

### 3.2.1 *Scan Line Methode*

Wie der Name schon sagt, wird bei der Scan Line Methode der Gesteinskörper entlang einer Linie mittels Maßband und Clark Kompass so detailliert wie möglich aufgenommen (Abbildung 6). Dabei werden Parameter wie die Orientierung der Trennflächen, der Trennflächenabstand, die Persistenz, die Oberflächenbeschaffenheit und die Termination der Trennflächen ermittelt (Erklärung der Begriffe in Kapitel 3.4.1).



*Abbildung 6: Aufnahme des Gebirges mit der Scan Line Methode (Liu, Rock Mass Characterization 2014)*

Für diese Methode muss ein direkter Zugang zur Felswand gewährleistet sein, da an der Wand gemessen wird. Problematisch ist auch, dass nur punktuell Daten aufgenommen werden, die dann repräsentativ für das gesamte Gebirge

stehen sollen. Weiters können Trennflächen die parallel zu Scanlinie verlaufen nicht aufgenommen werden. Daher empfiehlt sich eine zweite Scanlinie, am besten orthogonal zur Ersten. Die Scanlinien müssen auf jede Lokalität speziell angepasst werden (Priest 1993).

### 3.2.2 *Window Mapping*

Das Window Mapping ist der Scan Line Methode sehr ähnlich, wobei hier aber nicht entlang einer Linie gemessen wird, sondern innerhalb einer gedachten Fläche (Fenster) des Aufschlusses. Idealerweise wird dieses Fenster so groß wie möglich gewählt, da es wiederum repräsentativ für das Gebirge steht (Pahl 1981). Die aufgenommenen Parameter sind die gleichen wie bei der Scan Line Methode. Auch hier muss wieder ein direkter Zugang zur Felswand gewährleistet sein.

### 3.2.3 *Photogrammetrie*

Bei der Photogrammetrie handelt es sich um ein System der Vermessung von Trennflächen mittels digitaler Fotos von einer kalibrierten Kamera und einer Auswertungssoftware (z.B.: Shape Metrix). Dabei werden zwei Bilder, geschossen aus voneinander leicht versetzten Positionen und mit Hilfe von Referenzpunkten, zu einem Stereobild zusammengefügt, woraus sich ein 3D-Modell ergibt (Abbildung 7). Mit der entsprechenden Software können aus diesem 3D-Modell Orientierungen und Flächen gemessen werden. Im Prinzip ist diese Methode wie ein digitales Window Mapping, nur wesentlich weniger zeitaufwendig und weniger mühsam.

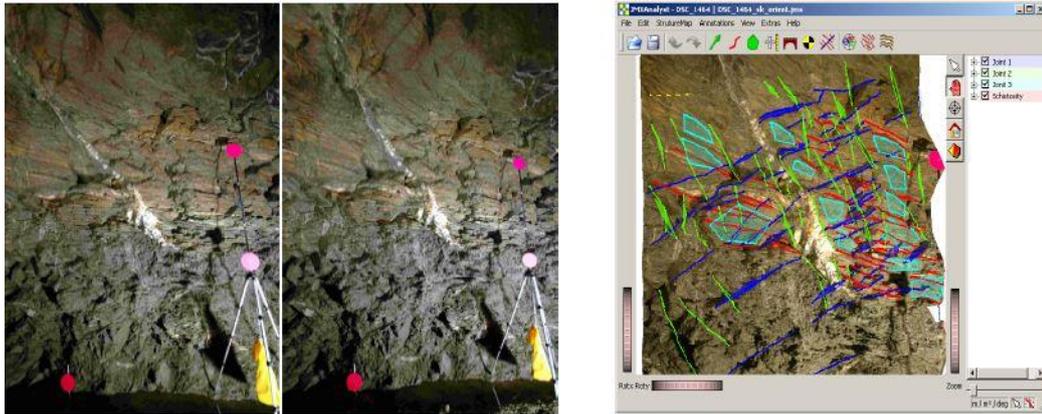


Abbildung 7: Anwendung der Photogrammetrie im Gelände. (links: zeigt die zwei Fotos mit den Referenzpunkten; rechts: zeigt das Analyzierte 3D-Bild mit den erfassten Flächen) (Liu, Rock Mass Characterization 2014)

### 3.2.4 LiDAR – terrestrischer Laserscan

Bei LiDAR (Light Detection And Ranging) handelt es sich um ein laserbasiertes Messsystem, welches mittels ausgesandter Laserstrahlen eine schnelle Ermittlung von Punktdaten erlaubt. Diese Punktdaten ergeben eine 3D-Punktwolke, welche ein exaktes Abbild der gescannten Oberfläche darstellt. Die Abtastung der Oberfläche erfolgt automatisch in gleichbleibenden Schritten in vertikaler und horizontaler Richtung (Abbildung 8), so erhält jeder Punkt genaue Informationen über die Entfernung und den Winkel. Kombiniert mit exakten GPS Koordinaten für die Scanpositionen kann diese Punktwolke in ein erdbezogenes Koordinatensystem georeferenziert werden. So erhält jeder einzelne Punkt wahre raumbezogene Koordinaten.

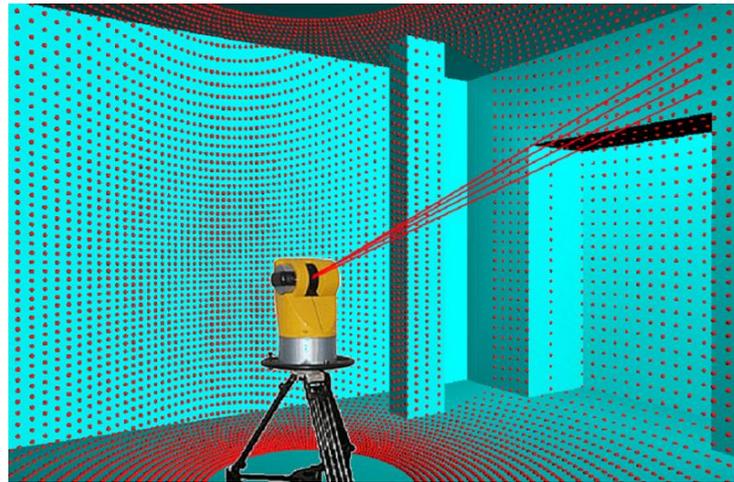


Abbildung 8: Abtastschema des Laserscanners

Die gewonnenen Daten werden mit der passenden Software (z.B.: RiSCAN Pro) bearbeitet (siehe Kapitel 3.6.1).

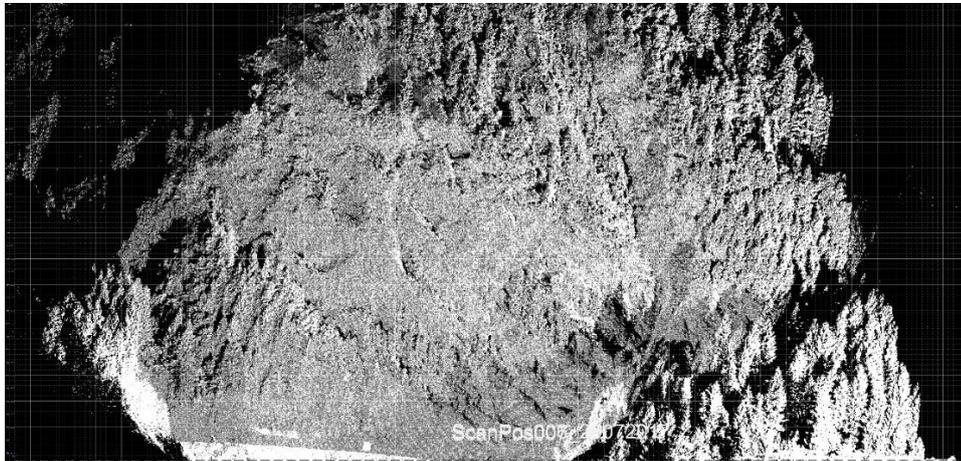
Der große Vorteil dieser Methode ist, dass nicht unmittelbar an der Felswand gearbeitet werden muss. LiDAR erlaubt es aus größeren Entfernungen, durchaus auch von mehreren hundert Metern, Scans zu erstellen (Abbildung 9). Dadurch ist einerseits die Sicherheit der Arbeiter gewährleistet, andererseits ist es möglich, auch sehr schwer zugängliche Felsböschungen zu erfassen und zu analysieren.



Abbildung 9: Entfernungen der Scanpositionen zur Spitze des Untersuchungsbereiches

Die LiDAR Methode erschien mir für diese Arbeit am geeignetsten, um Kluffkörper zu erfassen, da die Felswand nur sehr schwer und unter hohem Risiko

zugänglich war. Außerdem ließ sich damit der gesamte Arbeitsbereich und nicht nur ein kleiner Ausschnitt bearbeiten. Deswegen kamen die Scan Line Methode und das Window Mapping nicht in Frage. Auch für eine photogrammetrische Analyse wären die Entfernungen zu groß gewesen, um eine exakte Datenaufnahme zu gewährleisten. Weiters wurden mir netterweise fertige Laserscandaten vom Untersuchungsgebiet von Herrn Prof. Liu zur Verfügung gestellt. Um die Vergleichswerte für die Ergebnisse aus den Laserscandaten zu erhalten, habe ich mich dafür entschieden, die Felswand mittels GSI-Tafel zu beurteilen. Dies lieferte eine schnelle Einschätzung der Felswand mit wenig Aufwand. Was dieser GSI ist wird im folgenden Kapitel erklärt.



*Abbildung 10: Fertiges 3D-Modell des Untersuchungsbereiches aus den Laserscandaten*

### 3.3 GSI („Geological Strength Index“)

Die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften einer zerklüfteten Gesteinsmasse ist immer noch einer der schwierigsten Aufgaben auf dem Gebiet der Felsmechanik. Da es so viele Parameter gibt, die die Festigkeit und die Deformierbarkeit des Gesteins beeinflussen, ist es beinahe unmöglich ein allgemeines Gesetz, zu entwickeln, um die Festigkeit eines Gesteinskörpers vorherzusagen. Normalerweise mussten diese Parameter über in-situ Schertests für die Festigkeitsparameter und Plattendruckversuche für das Deformationsmodul gemessen werden. Nur wenige Versuche wurden bisher gemacht, um Methoden zu entwickeln, die die Festigkeit und Deformierbarkeit einer zerklüfteten Felsmasse indirekt bestimmen können (Cai 2011). Das GSI-System, entwickelt von Hoek et al (1995) ist eines von ihnen.

Das GSI-System verwendet den Zerlegungsgrad des Felskörpers und den Zustand der Oberflächen (Gesteinsoberfläche, Trennflächen...), um die Festigkeit und Deformierbarkeit der Gesteinsmasse zu bestimmen, bzw. zu schätzen. Das GSI-System konzentriert sich auf die Beschreibung von zwei Faktoren, die Gesteinsstruktur und der Zustand der Gesteinsoberfläche. Es liefert ein komplettes Set von mechanischen Eigenschaften für das Hoek-Brown Kriterium für die Festigkeit von zerklüfteten Gesteinsmassen (Hoek-Brown Festigkeitsparameter  $m_b$  und  $s$ , oder die äquivalenten Mohr-Coulomb Festigkeitsparameter  $c$  und  $\phi$ , sowie den Elastizitätsmodul  $E$ ) (Hoek, Carranza-Torres und Corkum 2002).

Um die Anwendbarkeit des Systems zu erleichtern hat Cai et al. (2004) einen neuen Zugang geschaffen, indem er das Blockvolumen  $V_b$  und einen Faktor für den Zustand der Trennflächenoberfläche  $J_c$  als Faktoren für die Charakterisierung des Gesteins heranzieht (Abbildung 11) (Cai, Kaiser, et al. 2004).

Genau bei diesem Zugang von Cai et al. (2004) setzt meine Verwendung des GSI in dieser Arbeit an. Ich habe versucht, basierend rein auf den Beschreibungen des Diagramms, mögliche Blockgrößen abzuschätzen bzw. vorherzusagen, ohne irgendwelche Festigkeitsparameter zu berechnen. Die Resultate finden sich in Kapitel 4.1 wieder.

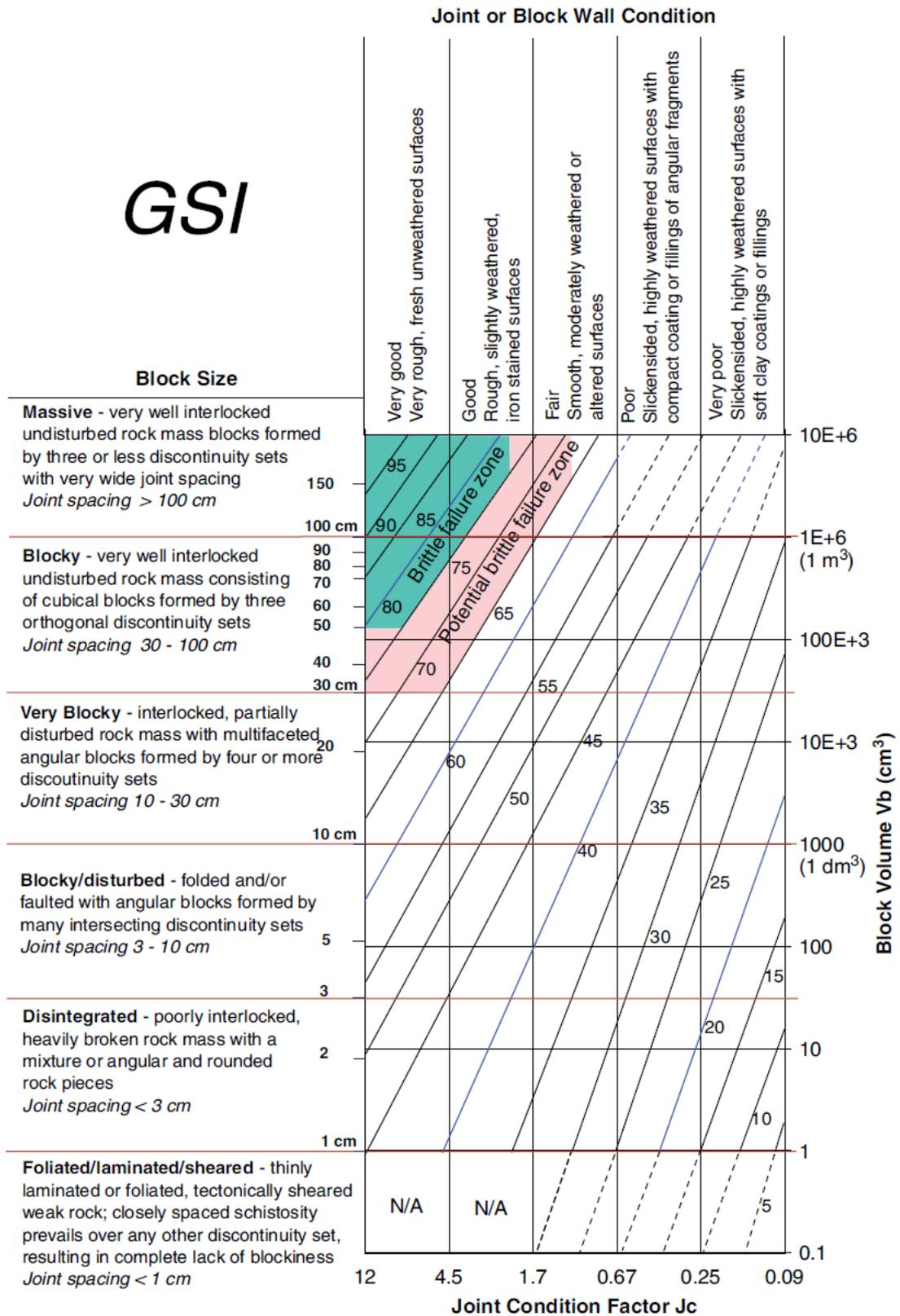


Abbildung 11: Tafel für die Bestimmung des GSI (Geological Strength Index) (Cai, Kaiser, et al. 2004)

### 3.4 Trennflächen



Abbildung 12: normal aufeinander stehende Klufflächen

Unter Trennflächen versteht man Störungen, Schieferungsflächen, Klüfte, Brüche und andere mechanische Defekte, die die Kontinuität eines Gesteinskörpers unterbrechen (Abbildung 12). Störungen, Klüfte und Brüche entstehen meist durch mechanische oder hydraulische Beanspruchung des Gesteinskörpers, während Schieferungsflächen durch die Einregelung der Minerale durch Druck und Temperatur bei der Metamorphose entstehen (Abbildung 13). Bankungsflächen entstehen durch Prozesse bei der Sedimentation. Im Gegensatz zum umgebenden Gestein besitzen Trennflächen generell eine verminderte Scherfestigkeit und

eine vernachlässigbare Zugfestigkeit. Daher ist es auch so wichtig diese zu untersuchen und ein Trennflächenmodell zu erstellen, um potenziell gefährliche Blöcke zu identifizieren.



Abbildung 13: links: Aufschluss mit feinen Ablagerungsschichten die im Zuge der Sedimentation entstanden sind; rechts: eine große Störung geht mitten durch die Felswand

### 3.4.1 Wichtige Parameter

Insgesamt beeinflussen Trennflächen die mechanischen Eigenschaften des Gesteinskörpers wesentlich. Deshalb sind sie in der geotechnischen Beurteilung von Aufschlüssen auch so wichtig. Um eine akkurate Analyse zu erhalten werden die wichtigsten Parameter der Trennflächen sorgfältig aufgenommen und statistisch ausgewertet.

Die für diese Arbeit wichtigen Parameter sind:

- Typ: Schichtflächen, Schieferungsflächen, Kluffflächen, Störungsflächen
- Orientierung: Die Orientierung einer Trennfläche wird mit Einfallrichtung (dip direction) und Einfallswinkel (dip) angegeben. Sie definiert die Form der Kluffkörper (Blöcke) und deren Versagensart (gleiten, kippen etc.) und kann mittels des klassischen Clar-Kompasses im Feld, oder eben direkt aus dem Laserscan gemessen werden. Orientierungen innerhalb einer Kluffschar können aber variieren, deshalb muss eine ausreichend große Anzahl von Messungen pro Schar aufgenommen werden, damit ein aussagekräftiger Mittelwert bestimmt werden kann.
- Anzahl der Trennflächenscharen: Die Anzahl der Trennflächenscharen ist wesentlich bestimmend für das Erscheinungsbild einer Felswand. Die gekreuzten Trennflächenscharen bestimmen die Form der Kluffkörper, je mehr desto komplizierter.
- Trennflächenabstand: Der Abstand ist definiert als der Normalabstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Trennflächen innerhalb der gleichen Trennflächenschar. Dieser Abstand ist ausschlaggebend für die Größe individueller Kluffkörper.
- Ausbisslänge: Ist der sichtbare Teil einer Trennfläche entlang der Oberfläche. Die Ausbisslänge ist ein wesentlicher Bestandteil bei der Bestimmung der Persistenz.
- Persistenz: Gibt die Durchgängigkeit einer Trennfläche im Gestein an. Sie ist eine Addierung von den offenen Strecken, dividiert durch die gesamte

Betrachtungslänge der Trennflächen und gibt die Durchgängigkeit in Prozent an. Dennoch ist die Persistenz sehr schwierig zu bestimmen, da nicht in den Fels hineingeschaut werden kann und wird daher meist nur angenommen. Sie hat einen wesentlichen Einfluss auf die Scherfestigkeit der Trennflächen und daher auch auf die Gesamtstabilität des Felses.

- Größe der Kluftkörper: Ein Kluftkörper ist begrenzt durch jeweils ein Flächenpaar jeder vorhandenen Trennflächenschar. Daher kann man anhand der Orientierung, dem Abstand, der Anzahl und der Persistenz aller Trennflächenscharen auf die Größe und Form der möglichen Kluftkörper schließen.

Zur Berechnung des Volumens eines Blockes mit einer 100 prozentigen Durchtrennung wird folgende Formel verwendet:

$$V_k = \frac{S_1 * S_2 * S_3}{\sin \alpha * \sin \beta * \sin \gamma} \quad (1)$$

$V_k$ .....Blockvolumen [m<sup>3</sup>]

$S_{123}$ .....Normalabstände der jeweiligen Trennflächen [m]

$\alpha, \beta, \gamma$ .....Winkel zwischen den jeweiligen Trennflächen [°]

Da für diese Formel nur drei Abstände verwendet werden, nimmt man die der drei Haupttrennflächen. Die Winkel zwischen den Kluftscharen betragen in der Natur oft 90° und können daher in manchen Fällen vernachlässigt und das Volumen mit  $V_k = S_1 * S_2 * S_3$  berechnet werden. Egal mit welcher Formel gerechnet wird, das Ergebnis ist immer das Volumen eines schiefen Quaders (Liu 2014).

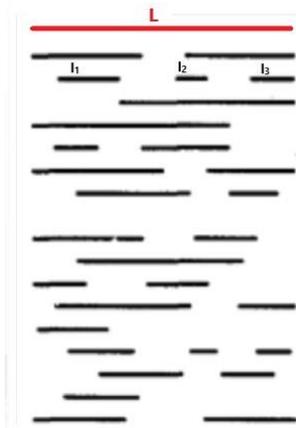


Abbildung 14: Beispiel für den Persistenzfaktor  $p$

Wenn die Persistenz nicht komplett durchgängig ist, kann in die vorherige Formel noch ein Persistenzfaktor  $p$  mit einbezogen werden. Dieser ergibt sich aus den Summen der tatsächlichen Längen der Ausbisslinien  $l_i$  der Trennflächen, dividiert durch die angenommene Gesamtlänge der Trennfläche  $L$  (Abbildung 14). Für jede einzelne Trennflächenschar ergibt dies dann einen Prozentsatz der Persistenz.

Die Formel für nicht 100 prozentig durchtrennte Trennflächen sieht dann folgendermaßen aus:

$$V_p = \frac{S_1 * S_2 * S_3}{\sqrt[3]{p_1 * p_2 * p_3} * \sin \alpha * \sin \beta * \sin \gamma} \quad (2)$$

$p_1, p_2, p_3, \dots$  Persistenzfaktoren der einzelnen Trennflächen

Mit Hilfe des Programms B03HPGL.EXE aus der Blocktheorie lässt sich ebenfalls das Volumen eines Felsblocks berechnen. Dies geschieht aber wesentlich genauer, da dieses Programm das Volumen echter Polyeder berechnet. Die Ergebnisse beider Berechnungen werden im Laufe dieser Arbeit aber noch genauer diskutiert.

### 3.4.2 Einbau von Trennflächen im RiSCAN

In diesem Kapitel werden kurz die Arbeitsschritte erklärt, wie Trennflächen in das 3D-Modell integriert werden. Das Programm RiSCAN bietet dafür hilfreiche Tools die dies relativ einfach gestalten.

## 1. Markieren des entsprechenden Bereiches:

Mithilfe des Buttons „Selection Mode“ werden, über eine „Polyline Selection“, die entsprechenden Punkte einer Ebene bzw. einer Trennfläche in der Punktwolke markiert, diese erscheinen dann in Rot (Abbildung 15). Hier kann durch drehen der Punktwolke noch einmal kontrolliert werden, ob auch alle gewählten Punkte auf der richtigen Fläche liegen. Ist dies der Fall geht es weiter mit Schritt 2.

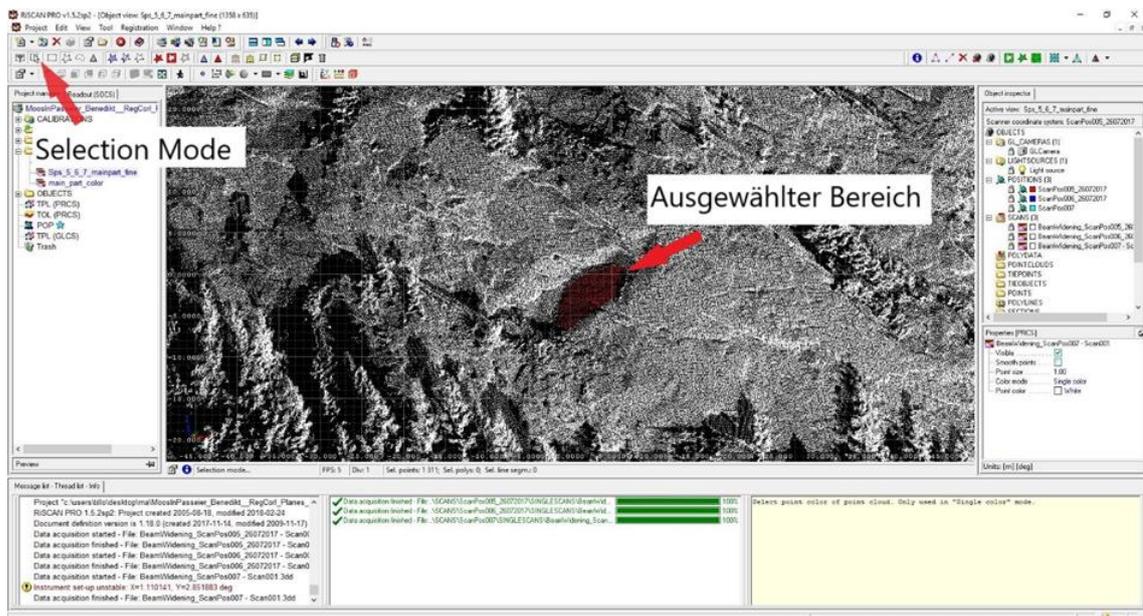


Abbildung 15: Screenshot des Arbeitsschrittes für die Auswahl des geeigneten Bereiches (ausgewählter Bereich in Rot dargestellt)

## 2. Erstellen einer Fläche:

Mit dem Button „Create new plane object from selected area“ und „From selected area (limited)“ öffnet sich das Fenster zum Erstellen einer Fläche. Hier werden der Startpunkt und der Endpunkt der Fläche definiert und so die Fläche auf die ausgewählten Punkte übertragen (Abbildung 16).

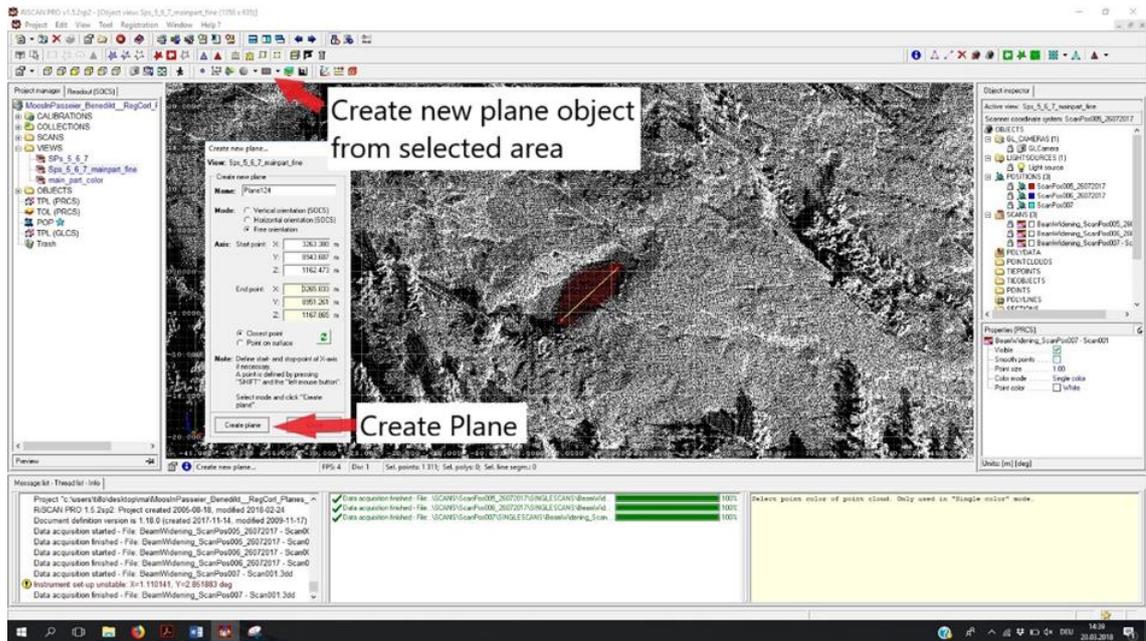


Abbildung 16: Screenshot des Arbeitsschrittes für das Erstellen einer Fläche im RiSCAN

Das Ergebnis wird in Abbildung 17 dargestellt. Die Fläche (in Blau) ist nun in die Punktwolke integriert und die Orientierung kann direkt aus dem RiSCAN abgelesen werden.

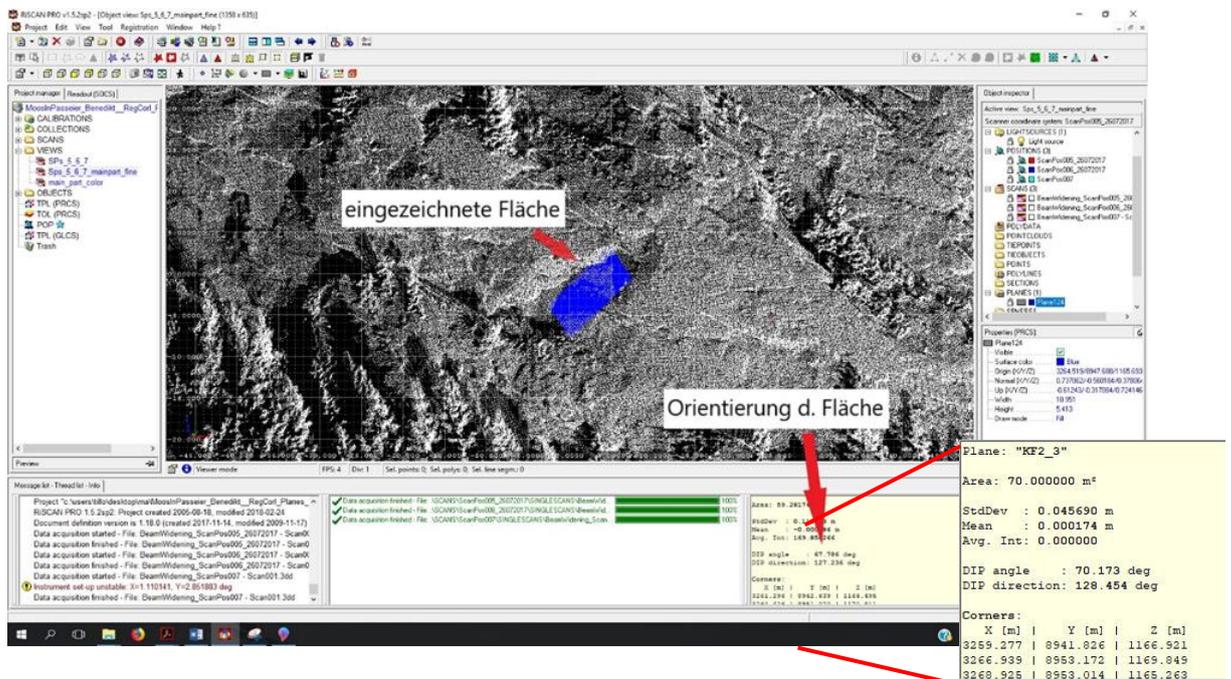


Abbildung 17: Screenshot des Arbeitsschrittes mit erstellter Fläche (Blau)

### 3. Modifikation der Orientierung und Position:

Falls die eingezeichnete Fläche noch nicht ganz der Trennfläche entspricht, kann diese in Orientierung und die Position noch weiterbearbeitet werden. Mit Rechtsklick auf die Fläche in dem „Object inspector“-Fenster wird „Modify orientation & position“ aufgerufen, welches es ermöglicht, die Fläche in alle möglichen Richtungen zu bewegen und zu rotieren (Abbildung 18).

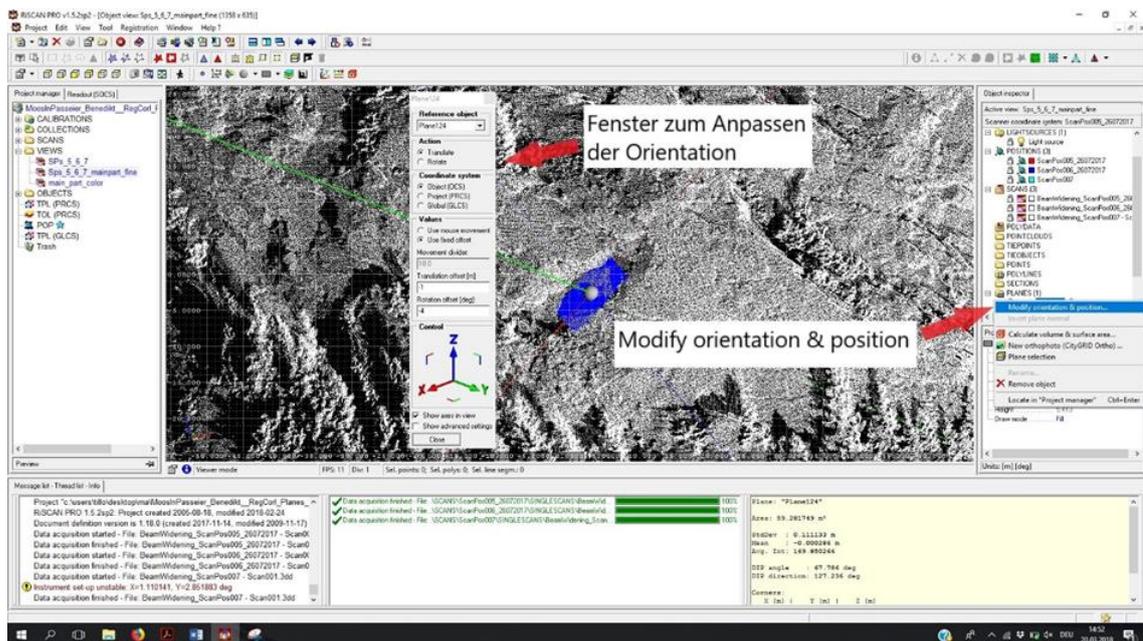


Abbildung 18: Screenshot des Arbeitsschrittes zur Modifikation der Orientierung

Dieser Operator sollte allerdings nur in kleinen Schritten und nicht zu exzessiv angewendet werden, da dies sonst in einer Verfälschung der Ergebnisse resultieren kann.

Eine wesentliche Hilfe beim Einzeichnen von Trennflächen auf der Punktwolke ist das stetige Abgleichen mit hochauflösenden Fotos. Diese Fotos bringen eine gewisse Sicherheit beim Identifizieren von Schichtflächen, Kluffflächen etc. Abbildung 19 zeigt einen Ausschnitt der Felswand mit den eingezeichneten Trennflächen. Jede Farbe gehört einer Trennflächenschar an.



Abbildung 19: Ausschnitt des 3D-Modells mit allen eingezeichneten Flächen (jede Trennflächenschar hat eine eigene Farbe)

### 3.4.3 Messen der Trennflächenabstände

Das Messen der Trennflächenabstände erfolgt im RiSCAN recht einfach mit dem Button „measure distance between two points“. Wie in Abbildung 20 ersichtlich, öffnet dieser ein Fenster, in dem der Start- und Endpunkt der Messung definiert wird. Da diese Punkte per Hand ausgewählt werden müssen, muss darauf geachtet werden, dass sie auch auf den entsprechenden Flächen liegen. Weiters sollte die Messung „normal“, dh. im rechten Winkel von einer zur anderen Fläche verlaufen, da sonst nicht der Normalabstand gemessen wird. Werden diese Schritte befolgt kann das Ergebnis der Messung direkt im 3D-Modell abgelesen werden.

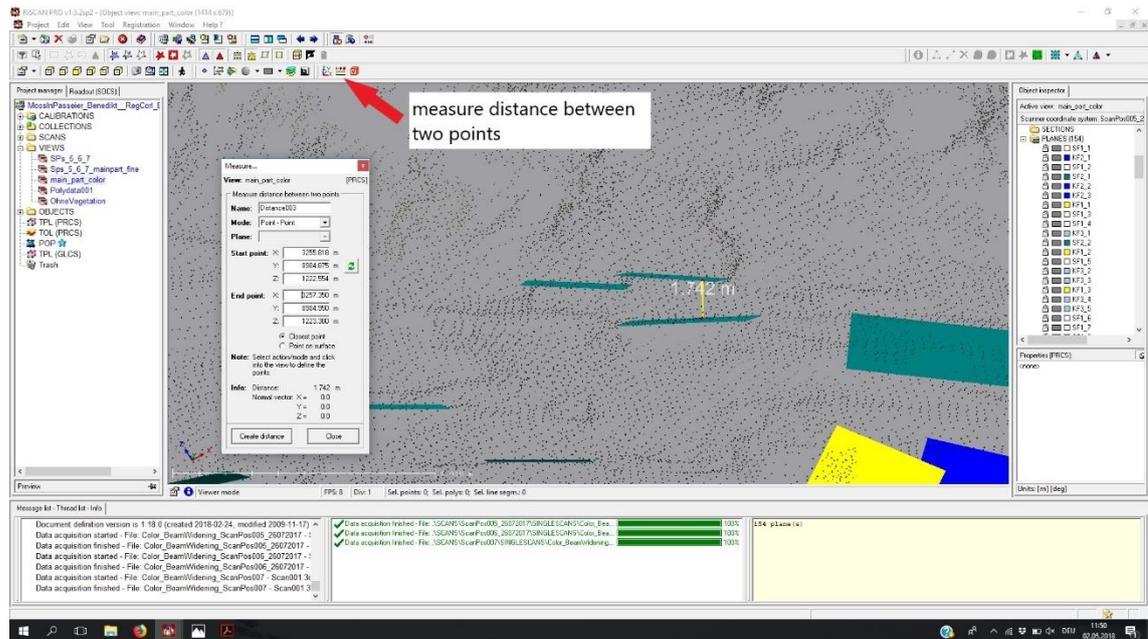


Abbildung 20: Screenshot des Arbeitsschrittes zu Messung des Normalabstandes zweier Trennflächen

### 3.5 Statistische Auswertung

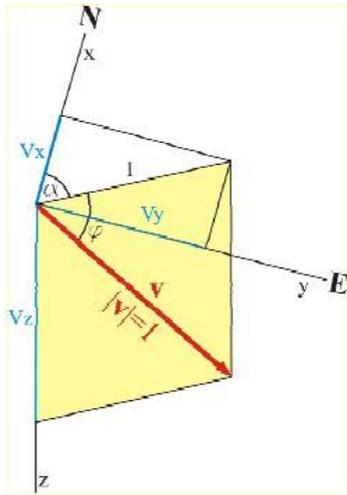


Abbildung 21: Koordinatensystem der kartesischen Vektordaten

In diesem Kapitel werden die mathematischen Grundlagen der statistischen Auswertung der Trennflächenscharen erläutert. Vor allem wird auf Parameter eingegangen, die die Streuung der Orientierungsdaten der einzelnen Trennflächensets beschreiben. Diese sind ein wichtiger Bestandteil, um die Zugehörigkeit einzelner Trennflächen zu den jeweiligen Trennflächensets zu bestätigen. Die unterschiedlichen Orientierungen der einzelnen Flächen und die der Schwerpunkflächen der Trennflächenscharen werden in Stereoplots graphisch dargestellt.

Alle in diesem Kapitel enthaltenen Formeln und Abbildungen wurden aus Liu (2014) entnommen.

- Um überhaupt etwas berechnen zu können, müssen die Orientierungsdaten der einzelnen Flächen zuerst in kartesische Vektordaten umgerechnet werden (Abbildung 21). Dies geschieht über die Formeln:

$$x_i = \cos \alpha_i * \cos \varphi_i$$

$$y_i = \sin \alpha_i * \cos \varphi_i \quad (3)$$

$$z_i = \sin \varphi_i$$

$\alpha_i$  .....Einfallsrichtung der Trennflächen [°]

$\varphi_i$  ....Einfallswinkel der Trennflächen [°]

- Mit diesen kartesischen Koordinaten lässt sich nun die Vektorsumme, und die Koordinaten des resultierenden Längenvektors errechnen.

$$|\vec{R}| = \sqrt{\left(\sum_1^n x_i\right)^2 * \left(\sum_1^n y_i\right)^2 * \left(\sum_1^n z_i\right)^2} \quad (4)$$

$$x_R = \frac{1}{|\vec{R}|} \sum_1^n x_i \quad y_R = \frac{1}{|\vec{R}|} \sum_1^n y_i \quad z_R = \frac{1}{|\vec{R}|} \sum_1^n z_i$$

$x_R, y_R, z_R, \dots$  Koordinaten des resultierenden Längenvektors

Daraus lässt sich wiederum die Orientierung des resultierenden Längenvektors berechnen.

$$A_R = \arctan \frac{y_R}{x_R} \quad \Phi = \arcsin z_R \quad (5)$$

$A_R, \dots$  Azimuth/Fallrichtung des resultierenden Längenvektors

$\Phi, \dots$  Einfallswinkel des resultierenden Längenvektors

- Mit der Vektorsumme lässt sich der prozentuelle Regelungsgrad ( $R\%$ ) berechnen.

$$R\% = \left(\frac{2|\vec{R}| - n}{n}\right) * 100 \quad (6)$$

$n, \dots$  Anzahl der Trennflächen

Dieser gibt den Grad der bevorzugten Regelung an, sprich inwieweit orientieren sich meine Flächen in die gleiche Richtung. Wenn alle Vektoren in die gleiche Richtung zeigen, entspricht das  $R\% = 100\%$ . (Abbildung 22)



Abbildung 22: Darstellung des Regelungsgrades mit 100%

Würden alle Vektoren in unterschiedliche Richtungen zeigen, wäre  $R\% = 0$ . (Abbildung 23)

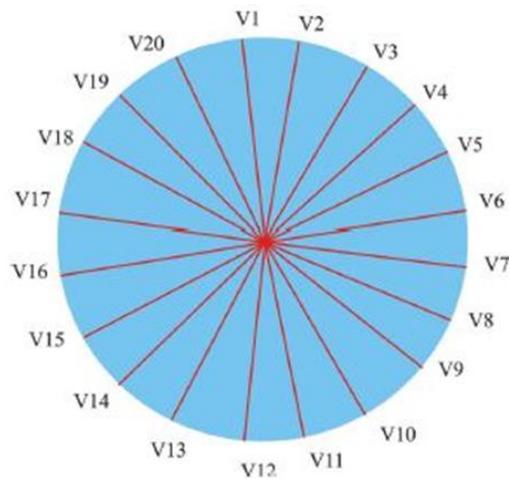


Abbildung 23: Darstellung des Regelungsgrades mit 0%

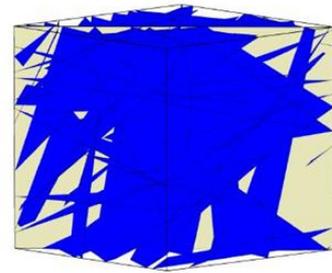
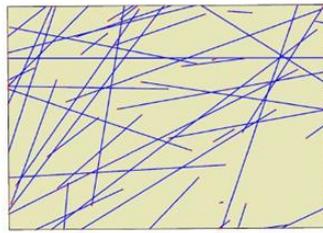
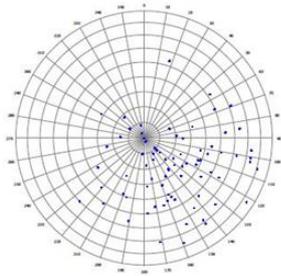
- Mit dem Regelungsgrad lässt sich nun der Konzentrationsparameter  $k$  berechnen. Dieser gibt in einer sphärischen Normalverteilung die Konzentration der gemessenen Orientierungsdaten an. Je höher der Wert, desto stärker konzentriert sind die Daten, je kleiner  $k$ , desto höher die Streuung. Die Berechnung von  $k$  erfolgt mit folgender Formel:

$$k = \frac{n - 1}{n - |\bar{R}|} \quad (7)$$

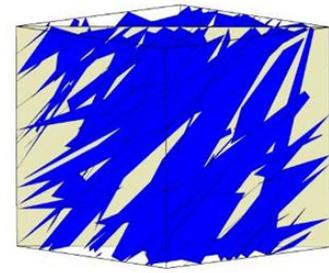
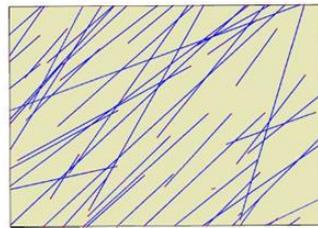
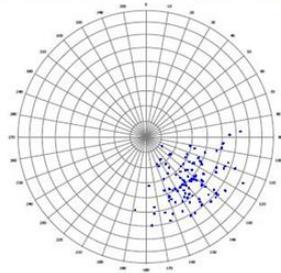
$n$ ...Anzahl der Trennflächen

Um dies zu veranschaulichen sind in Abbildung 24 Beispiele dargestellt, wie man den Wert  $k$  verstehen kann.

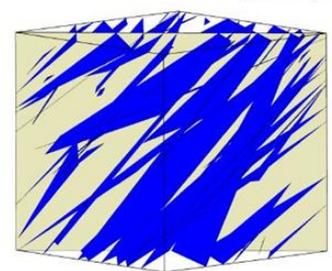
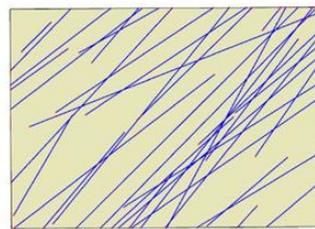
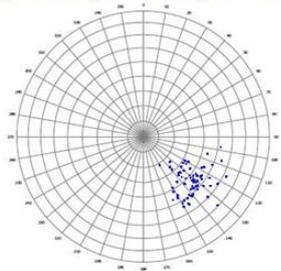
$$A_R = 315^\circ, \Phi = 45^\circ, k = 5$$



$$A_R = 315^\circ, \Phi = 45^\circ, k = 20$$



$$A_R = 315^\circ, \Phi = 45^\circ, k = 50$$



(LIU, 2014)

$$A_R = 315^\circ, \Phi = 45^\circ, k = 100$$

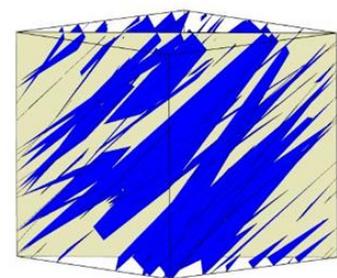
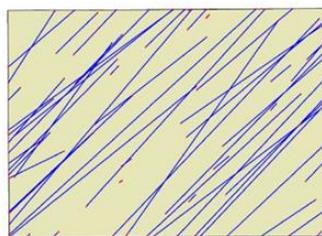
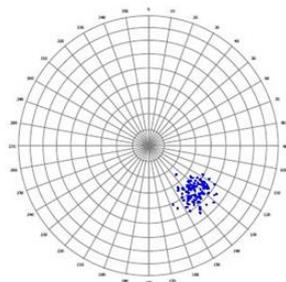


Abbildung 24: Darstellung unterschiedlicher Regelungsgrade

- Das geometrische Äquivalent zum  $k$ -Wert ist der sphärische Öffnungswinkel  $\omega$  [°] (Abbildung 25). Dieser fasst die nach dem  $k$ -Wert konzentrierten Polpunkte in einem Stereoplot zusammen und wird mit der folgenden Formel berechnet:

$$\omega = \arcsin \sqrt{2 \frac{1 - \frac{1}{n}}{k}} \quad (8)$$

$n$ ...Anzahl der Trennflächen

$k$ ...Konzentrationsparameter

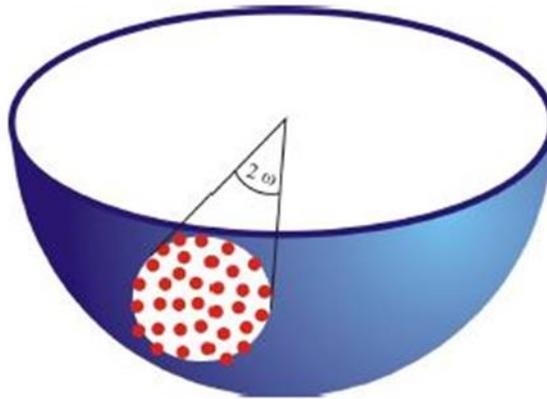


Abbildung 25: Darstellung des Öffnungswinkels

- Zum Schluss wird noch der Vertrauenskegel  $\vartheta$  [°] (Abbildung 26) berechnet, mit der Formel:

$$\vartheta = \arccos \left\{ 1 - \frac{n - |\vec{R}|}{|\vec{R}|} \left[ \left( \frac{1}{p} \right)^{\frac{1}{n-1}} - 1 \right] \right\} \quad (9)$$

$n$ ...Anzahl der Trennflächen

$p$ ...Fehlerquote (0,05)

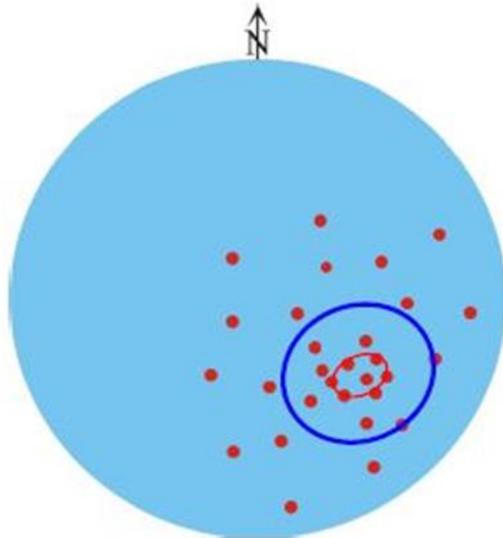


Abbildung 26: Darstellung des Vertrauenskegels (roter Kreis) und des Öffnungswinkels (blauer Kreis)

### 3.5.1 Trennflächenabstände und Ausbisslängen

Zusätzlich zur statistischen Auswertung der Orientierungswerte der Trennflächen, wurden auch die Trennflächenabstände und Ausbisslängen der einzelnen Trennflächenscharen statistisch ausgewertet. Dies geschah über den gesamten Felsbereich, da dies einen wesentlich besseren Überblick gewährt. In sogenannten „Boxplots“ wurden Mittelwert, Maximum und Minimum, Median usw. dargestellt. Wie so ein „Boxplot“ zu lesen ist wird in Abbildung 27 dargestellt.

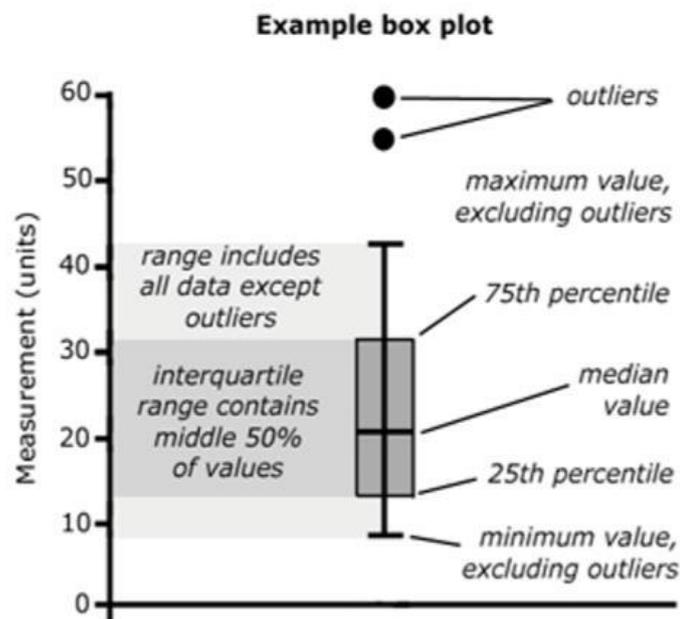


Abbildung 27: Darstellung eines Boxplots und wie er gelesen wird

## 3.6 Verwendete Computerprogramme

### 3.6.1 RiSCAN PRO

RiSCAN Pro ist ein anwendungsorientiertes Softwarepaket der Firma RIEGL, das begleitend zu den hauseigenen 3D-Laserscannern entwickelt wurde, um eine optimale Verarbeitung der Scan-Rohdaten zu ermöglichen. Die gesamten Daten der verschiedenen Scans, Feinscans, GPS-Daten und Digitalfotos werden in der Programmstruktur erfasst und können direkt nach der Akquisition visualisiert und in 3D auf ihre Vollständigkeit überprüft werden (Abbildung 28). Es bietet auch eine Vielzahl an Tools für die weitere Bearbeitung der Daten an, wie zum Beispiel: das Messen der Distanz zwischen einzelnen Punkten, den Einbau von Trennflächen und das Erstellen von Konturlinien. Weiters können im RiSCAN PRO die aufgenommenen Daten in viele unterschiedliche Datei-Formate transformiert werden, wodurch sie mit anderen Programmen weiterbearbeitet werden können.

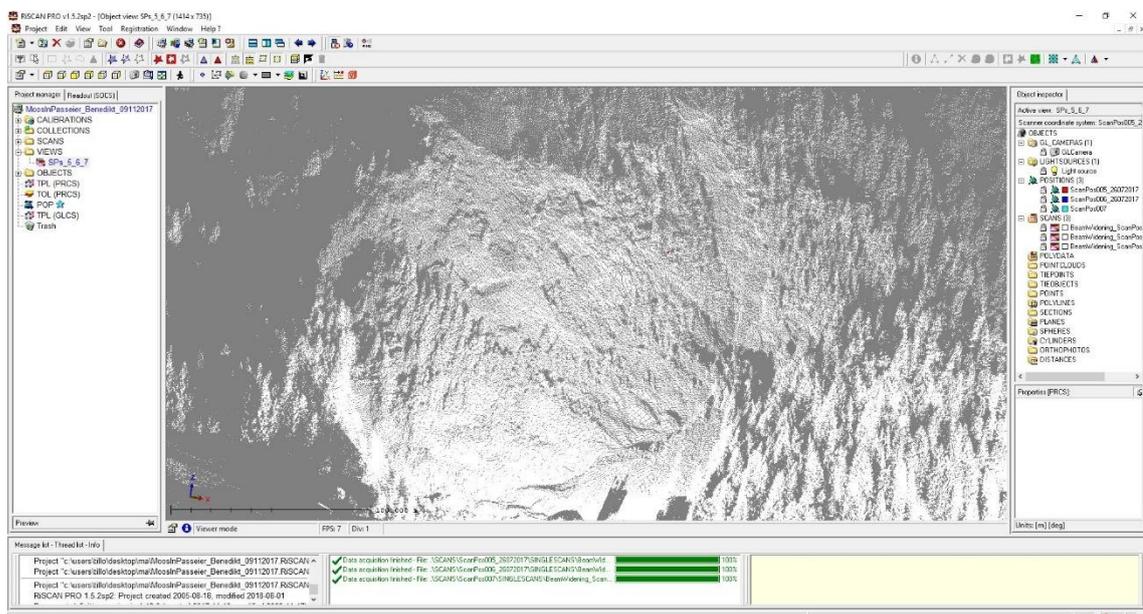


Abbildung 28: Screenshot des Programms RiSCAN mit dem fertigen 3D-Modell des Arbeitsgebietes

### 3.6.2 Dips

Dips ist eine Software der Firma Rocscience und ideal für die Digitalisierung und Visualisierung von orientierungsbezogenen Strukturdaten. Wie im manuellen Stereonetz können geologische Strukturen visualisiert, analysiert und in Stereoplots dargestellt werden (Abbildung 29).

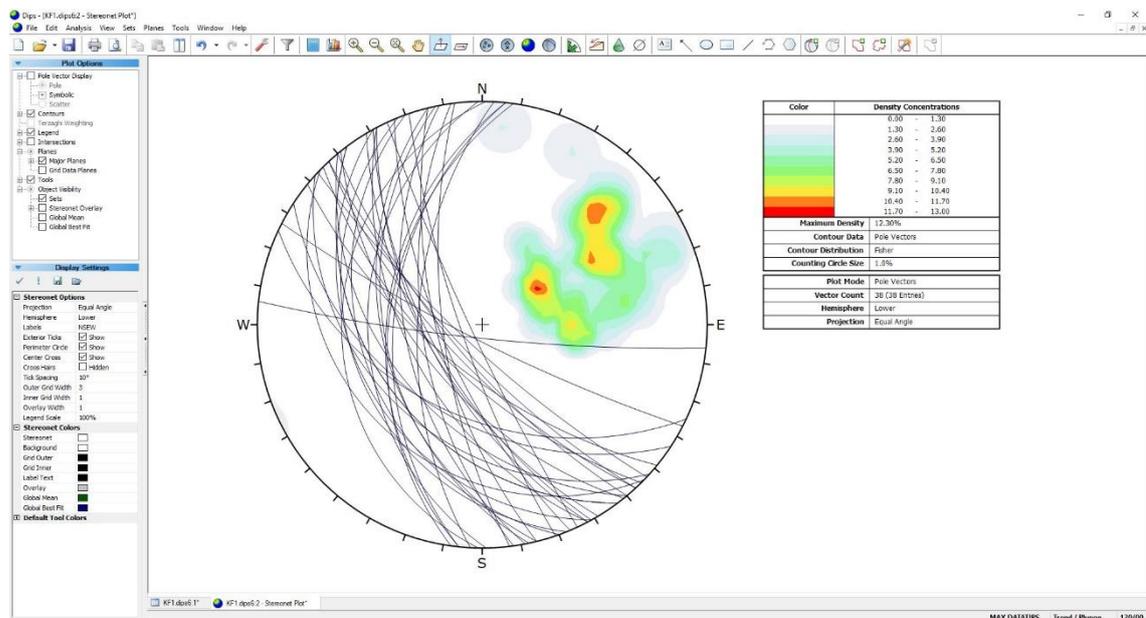


Abbildung 29: Screenshot des Programms Dips mit dem Stereoplot der SF1

### 3.6.3 B03HPGL.EXE

Dieses DOS-Programm, entwickelt von Prof. Liu basierend auf der Block Theory von Goodman & Shi (1985), ermöglicht es, die Formen der potenziell instabilen Blöcke dreidimensional darzustellen und von allen Seiten zu betrachten (Abbildung 30). Weiters wird das Volumen des jeweiligen Blockes exakt berechnet.

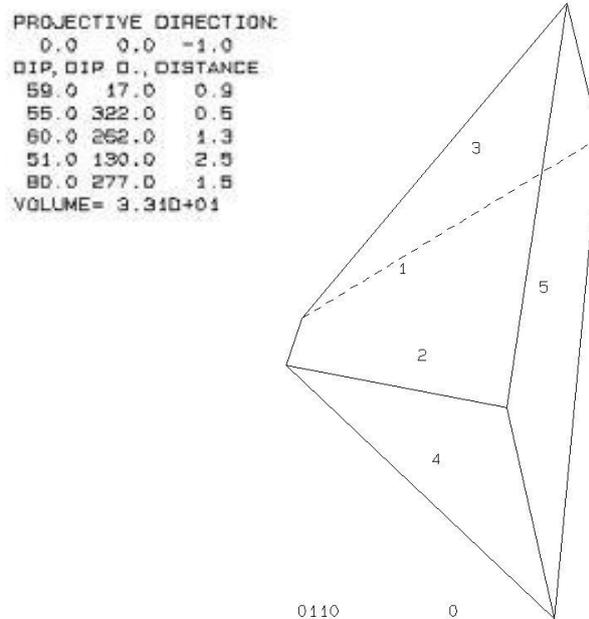


Abbildung 30: Mit dem Programm B03HPGL.EXE rekonstruierte Form des Blockes 1 mit dem exakten Volumen

## 4. Ergebnisse

### 4.1 Erste Einschätzung mit Hilfe der GSI-Tafel

Zu Beginn erfolgte eine objektive Einschätzung der Felsböschung im Zuge der direkten Beobachtung und weiters mithilfe von hochauflösenden Fotos. Daraus wurden mit der GSI-Tafel Blockgrößen der einzelnen Bereiche der Felswand abgeschätzt.

In dieser Arbeit wurde in weiterer Folge die Felswand mittels Laserscan genauer untersucht. Der Teil der Felswand der dafür verwendet wurde hat ca. eine Höhe von 100m und eine Breite von ca. 80m. Auf diesen Bereich konzentriert sich auch die GSI Abschätzung. Nun ist das GSI-System nicht darauf ausgelegt in solchen Dimensionen angewendet zu werden, daher wurde anhand von hochauflösenden Fotos sozusagen in die Wand hinein gezoomt, um kleinere Bereiche beurteilen zu können und somit einen Gesamteindruck der Felswand zu erhalten.



*Abbildung 31: Foto der gesamten Felswand; der Untersuchungsbereich ist mit dem roten Kreis markiert*

In Abbildung 31 ist sehr schön zu erkennen, dass dieser Felsstock relativ stabil sein muss, da seine Hänge sehr steil sind, ein Indiz für hohe Festigkeit. Speziell der relativ kleine Bereich des Felsstockes, von dem auch der Laserscan gemacht wurde (roter Kreis), ist nahezu senkrecht und steht daher für gute Stabilität. Wäre dem nicht so, dann würde die Böschung wesentlich flacher verlaufen.

Um nun eine Einschätzung in Bezug auf die Größe der möglichen Kluftkörper zu erhalten, wurden 4 Teilbereiche der Felswand (Abbildung 33) mit den Beschreibungen auf der GSI-Tafel verglichen. Das Problem dabei war, dass die GSI-Tafel nach Cai et al (2004) nur Blockgrößen bis  $10\text{m}^3$  zulässt. Daher wurde die Tafel so modifiziert, dass Blöcke bis  $1000\text{m}^3$  erfasst werden konnten (Abbildung 32). Dazu sei aber erwähnt, dass diese Modifikation rein auf das Blockvolumen bezogen wurde und nicht auf den GSI-Wert selbst und auch nicht auf die Beschreibungen der Tafel. Ob die GSI-Werte mit den vergrößerten Blockvolumen noch für Stabilitätsberechnungen verwendet werden können wurde in dieser Arbeit nicht nachgeprüft, da dies die Kapazitäten sprengen würde. Die modifizierte Tafel wird in dieser Arbeit rein als Hilfe zur Abschätzung der Blockgrößen verwendet.

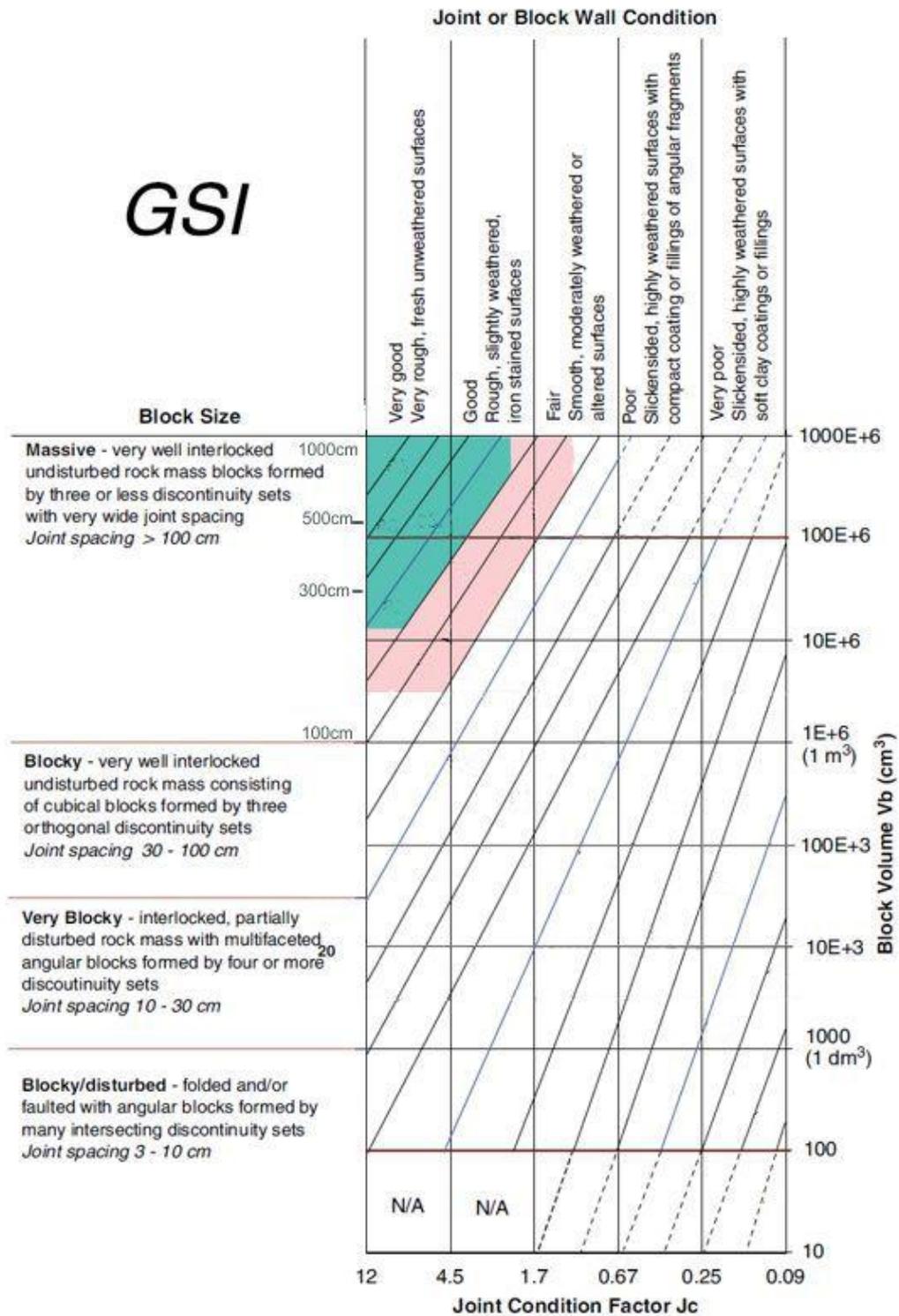


Abbildung 32: modifizierte Version der GSI-Tafel (ohne GSI-Werte)

Die 4 Teilbereiche der Felswand wurden so gewählt, dass sie die restliche Felswand bestens repräsentieren. Sie sind in Abbildung 33 mit roten Kreisen markiert.



*Abbildung 33: Foto der Felswand mit den 4 Teilbereichen (rote Kreise)*

## 4.1.1 Bereich 1



Abbildung 34: Nahaufnahme des 1. Bereiches

Das Foto in Abbildung 34 zeigt eine Nahaufnahme des 1. Bereiches, der sich in der Felswand ganz oben befindet. Das Bild ist dominiert von 3 Kluftscharen mit geschätzt recht weiten Trennflächenabständen. Zieht man den Maßstab in Betracht, so kann man anhand der GSI-Tafel nur von einer massigen Struktur ausgehen. Die Trennflächen sind schön zu erkennen und die Beschaffenheit der Trennflächenoberfläche würde ich als wenig verwittert bis gut einschätzen. Ein Indiz dafür sind die leichten Rostflecke die rötlich auf den Trennflächen zu erkennen sind. Sprich es handelt sich um stabiles Gestein. Aufgrund dieser Einschätzung sind in diesem 1. Bereich Kluftkörpergrößen von bis zu  $30\text{m}^3$  zu erwarten (Abbildung 35).

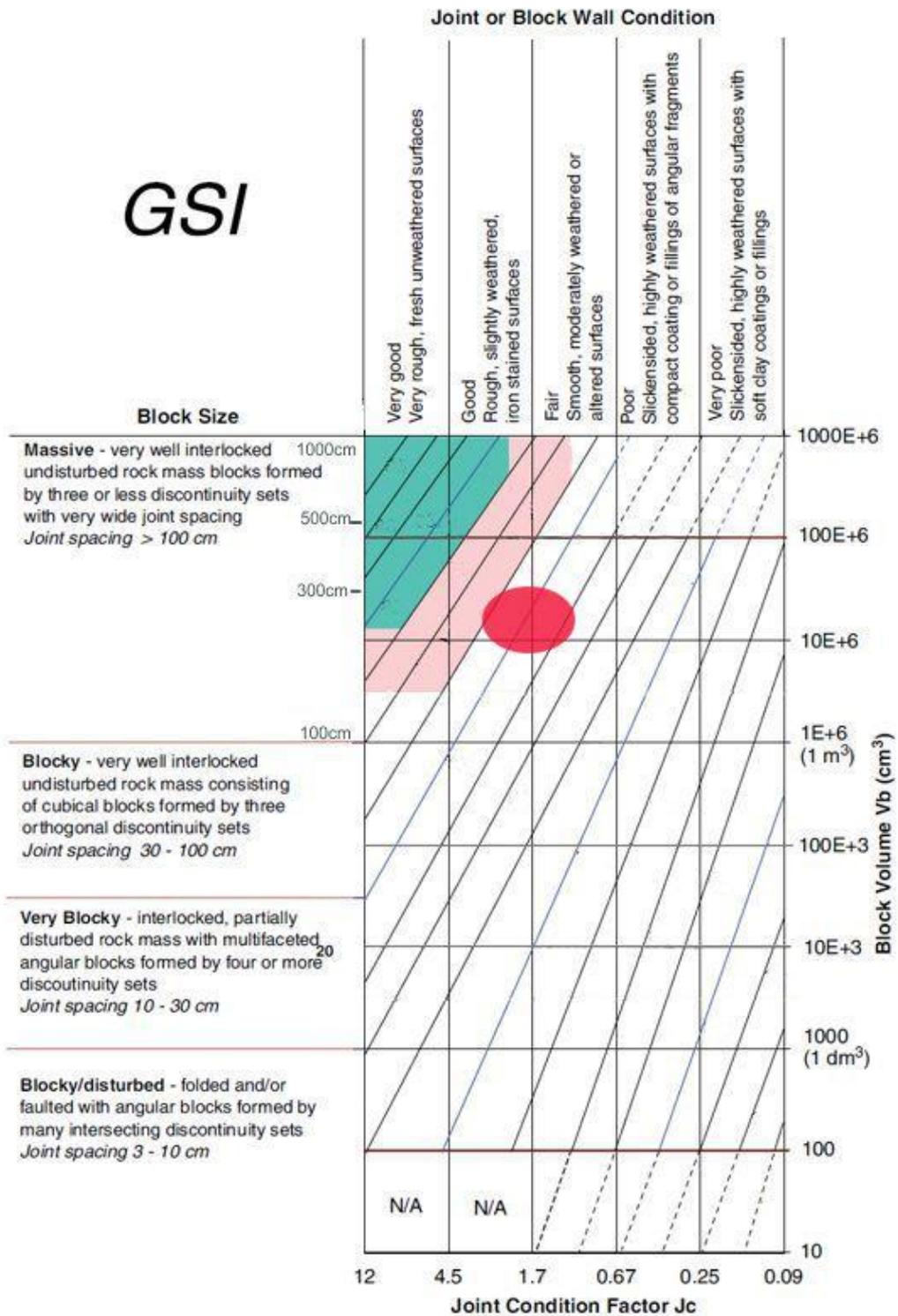


Abbildung 35: GSI-Tafel für den Bereich 1 (in Rot markiert)

## 4.1.2 Bereich 2



Abbildung 36: Nahaufnahme des 2. Bereiches

Abbildung 36 zeigt die Nahaufnahme des 2. Bereiches. Sofort ist zu erkennen, dass, im Vergleich zum 1. Bereich, hier die Zerklüftung etwas höher ist. Speziell die Schichtung ist hier wesentlich feiner ausgeprägt als zuvor. Das Gestein lässt sich hier auch als massig beschreiben, liegt jedoch im unteren Bereich. Die Oberflächen der Trennflächen sind wieder schön zu sehen und zeigen auch nur leichte Rostflecken und können daher ebenso als wenig verwittert bis gut beschrieben werden. Mit Hilfe der GSI-Tafel lassen sich Blockgrößen die kleiner als  $10\text{m}^3$  sind ableiten (Abbildung 37).

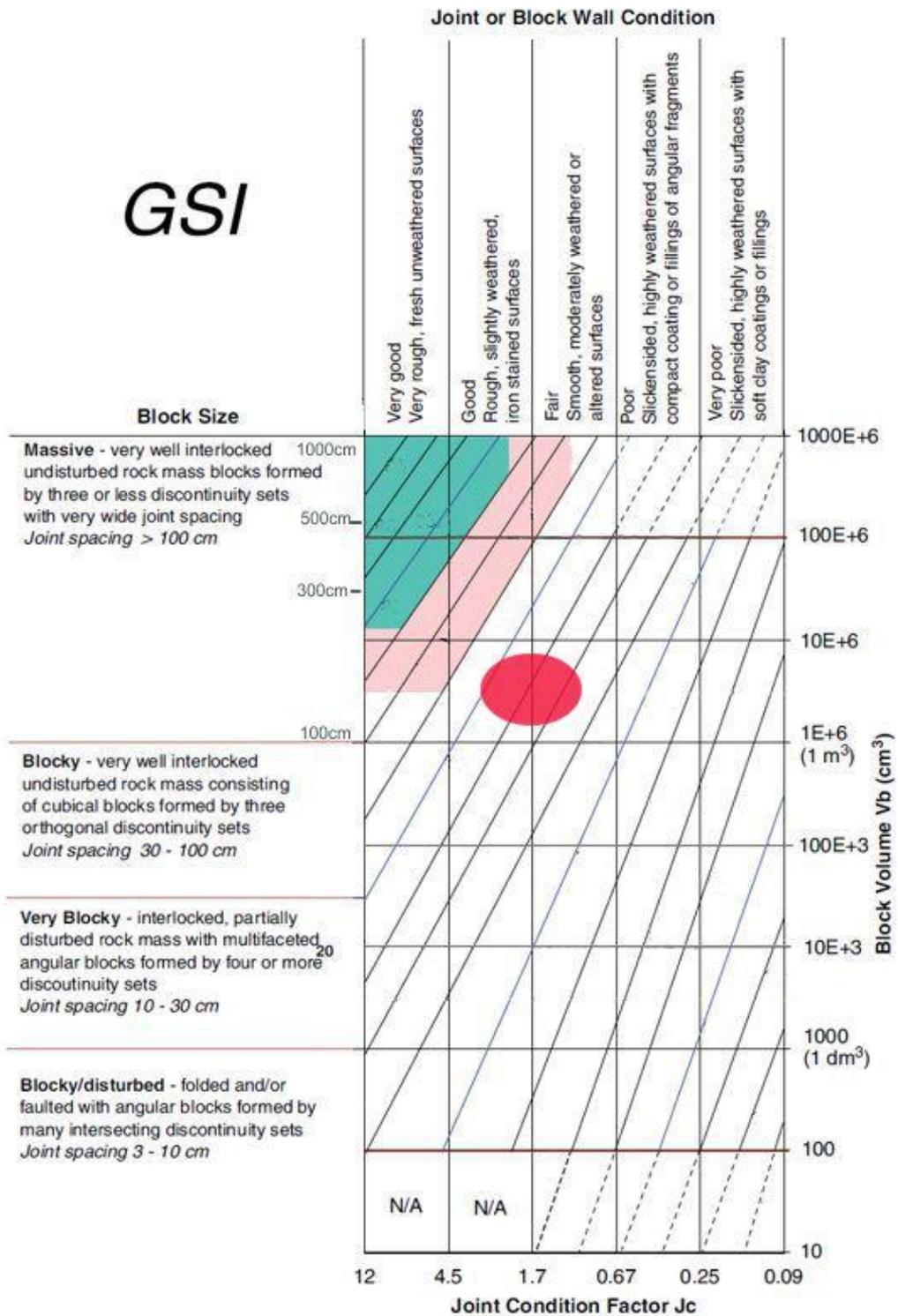


Abbildung 37: GSI-Tafel für den Bereich 2 (in Rot markiert)

### 4.1.3 Bereich 3



Abbildung 38: Nahaufnahme des 3. Bereiches

Abbildung 38 zeigt eine Nahaufnahme des 3. Bereiches. Er steht auch repräsentativ für die gesamte linke Seite der Felswand. Ganz klar erkennbar sind eigentlich nur 2 große Klüfte, der Rest des Gesteins tritt sehr massig in Erscheinung. Hier und da zeigen sich ein paar kleinere Risse, die aber sofort wieder im Fels verschwinden und nicht relevant sind. Auf Grund dieser Beobachtung wurde dieser Bereich als sehr massig eingestuft. Die Oberfläche der großen Trennfläche, rechts im Bild, ist so gut wie nicht verwittert und wurde daher als gut bis sehr gut eingestuft. Sollte hier einmal etwas herunterkommen, so muss mit Blockgrößen von geschätzt über  $40\text{m}^3$  gerechnet werden (Abbildung 39).

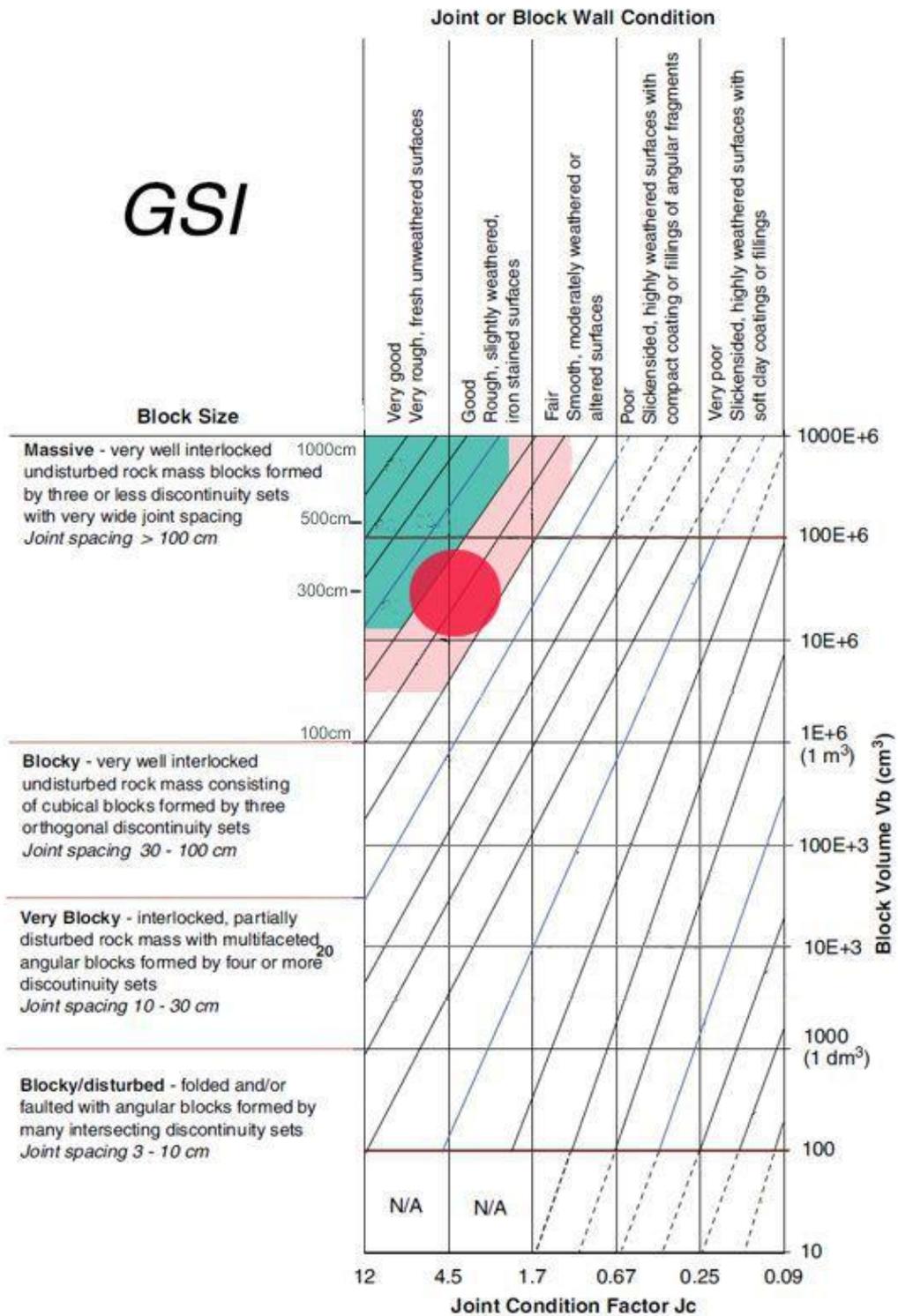


Abbildung 39: GSI-Tafel für den Bereich 3 (in Rot markiert)

#### 4.1.4 Bereich 4

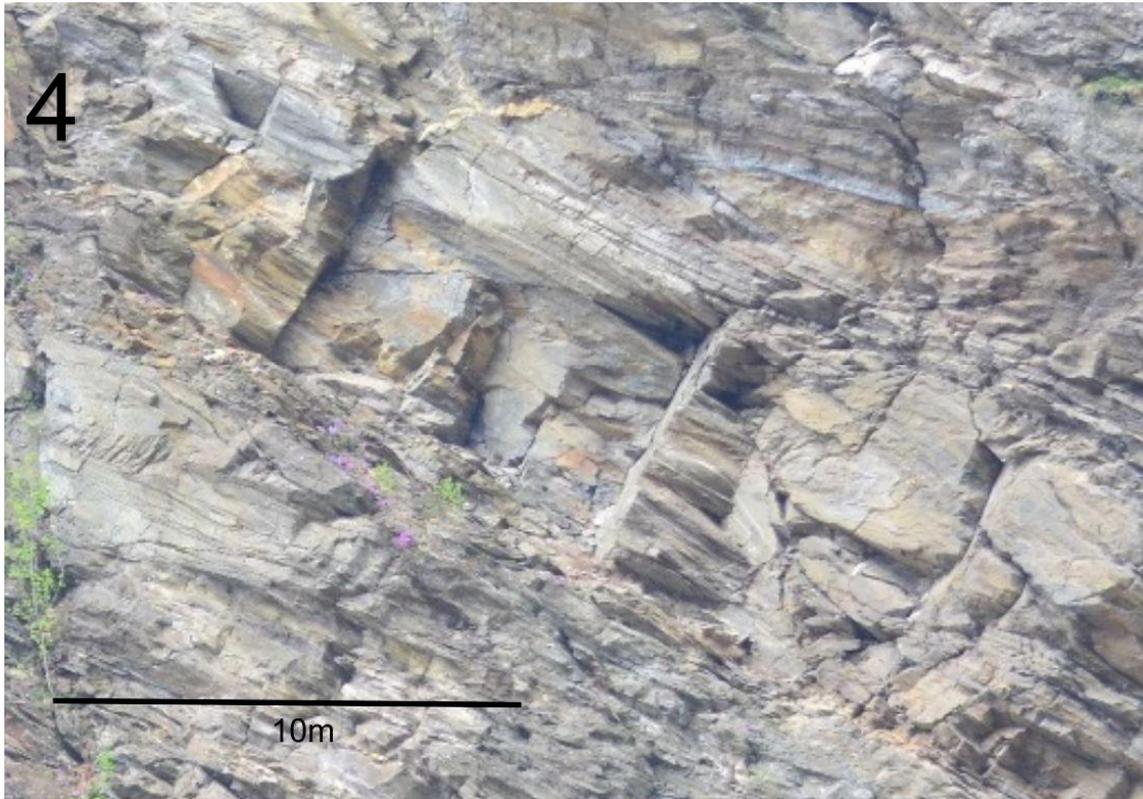


Abbildung 40: Nahaufnahme des 4. Bereichs

Dieses Foto zeigt den 4. Bereich in der Mitte der Felswand. Er ist sehr ähnlich dem 1. Bereich. Die Mitte des Fotos zeigt eine stärkere Zerklüftung als oberhalb und unterhalb. Mit Hilfe der GSI-Tafel lässt sich dieser Bereich wieder als massig einstufen. Die Oberflächen der Trennflächen weisen wieder nur leichte Rostspuren auf und zeigen eine gute Qualität. Daher muss mit Klufkörpergrößen um die  $30\text{m}^3$  gerechnet werden (Abbildung 41).

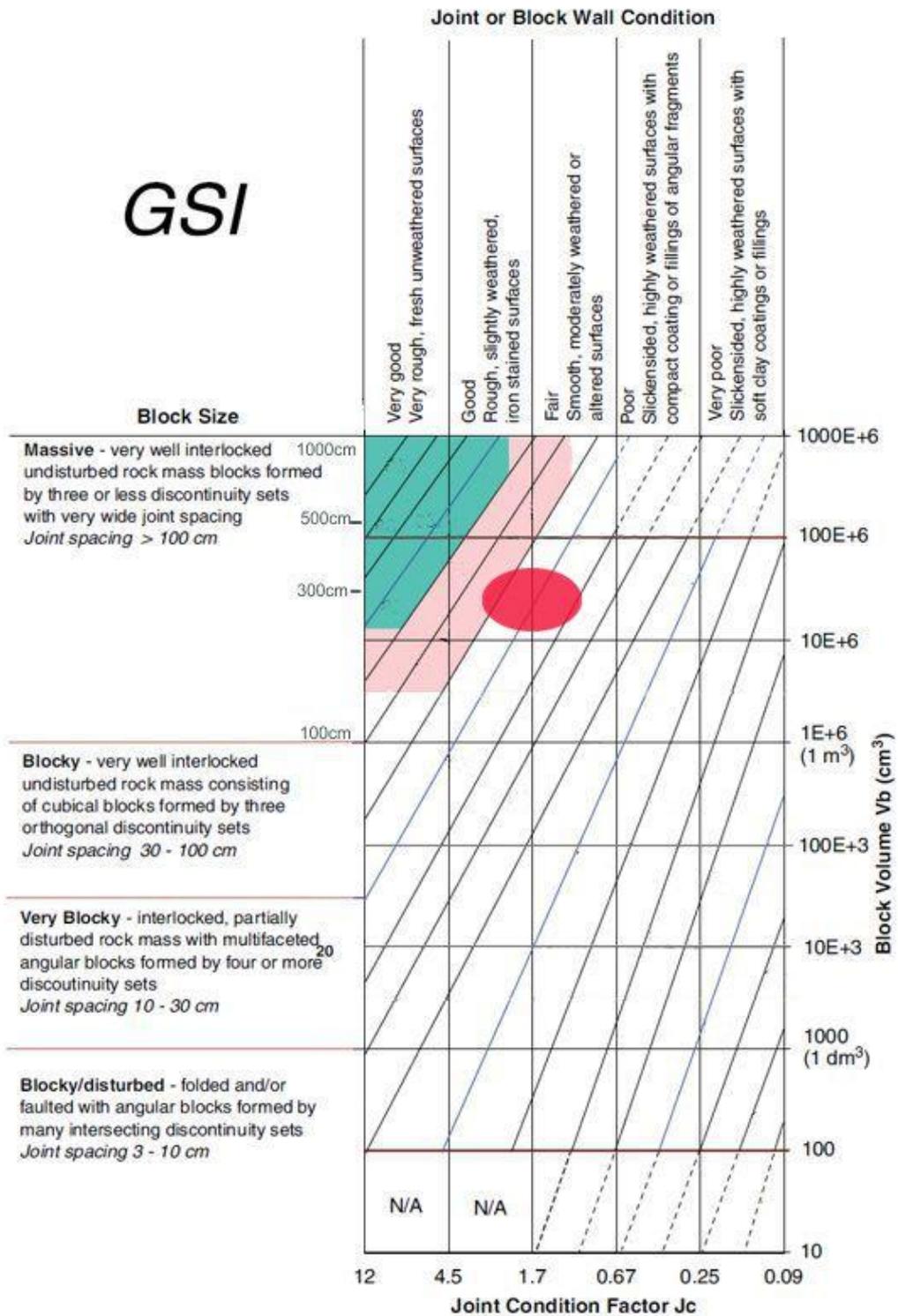


Abbildung 41: GSI-Tafel für den Bereich 4 (in Rot markiert)

#### 4.1.5 Zusammenfassend

Insgesamt kann, nach der ersten Einschätzung, gesagt werden, dass sich die gesamte Felswand in einem stabilen Zustand befindet. Dies spiegelt sich auch in den abgeschätzten Blockgrößen wider. In den Bereichen 1, 3 und 4 wird mit ähnlichen Blockgrößen von 30 – 40m<sup>3</sup> gerechnet, wohingegen im Bereich 2 kleineren Volumina bis ca. 10m<sup>3</sup> erwartet werden.

## 4.2 Trennflächenmodell mit RiSCAN

Für die exakte Berechnung eines Klufftkörpers müssen die Orientierungen der Trennflächen und Trennflächenabstände (Erklärung in Kapitel 3.4.1) bekannt sein, die diesen Klufftkörper begrenzen. Um diese Trennflächen identifizieren zu können, wurde mittels Laserscan ein 3D-Modell der Felswand erstellt, welches sich im Programm RiSCAN bearbeiten lässt. Für eine genaue Beschreibung zur Erstellung des 3D-Modells verweise ich auf die Arbeit von Gögele (2018). Wie der Einbau von Trennflächen funktioniert ist in Kapitel 3.4.2 genauer erklärt.

Die identifizierten Trennflächen wurden analysiert und anhand ihrer Orientierungen zu Trennflächenscharen zusammengefasst. In Abbildung 42 ist das 3D-Modell mit allen identifizierten Trennflächen dargestellt.

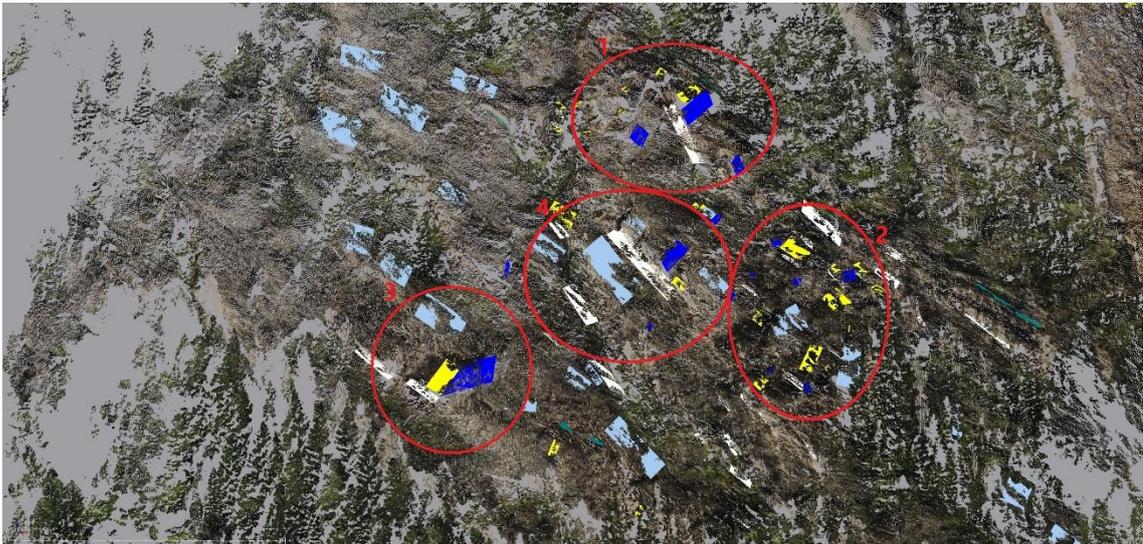


Abbildung 42: Felswand mit den 4 Bereichen (rote Kreise) und mit allen eingezeichneten Trennflächen, die unterschiedlichen Farben weisen auf unterschiedliche Scharen hin.

### 4.2.1 SF1

Die erste Trennflächenschar ist die Schichtung. Sie sind im Laserscan Modell sehr leicht zu erfassen. In der 3D-Punktwolke sind sie als weiße Flächen markiert. Sie treten hauptsächlich in der Mitte und auf der rechten Seite der Felswand auf, sprich in den Bereichen 1, 2 und 4 (Abbildung 43).



Abbildung 43: Flächen der SF1 in der Punktwolke

In Abbildung 43 ist sehr gut zu erkennen, dass die Flächengrößen im Bereich 2 wesentlich kleiner sind als in den Bereichen 1, 3 und 4, dafür treten sie häufiger auf.

In Tabelle 1 sind alle Orientierungsdaten der Trennflächen von SF1 aufgelistet.

Tabelle 1: Orientierungsdaten der SF1 (ER...Einfallrichtung [°]; EW...Einfallswinkel [°])

SF1								
Nr	ER	EW	Nr	ER	EW	Nr	ER	EW
1	11	49	12	358	51	25	27	45
2	22	56	13	9	60	26	3	37
3	9	51	15	27	72	27	5	44
4	17	59	16	14	48	28	5	59
5	18	58	17	33	52	29	3	40
6	14	40	18	22	59	30	19	49
7	35	51	19	17	38	31	7	65
8	5	41	21	9	44	32	11	60
9	1	50	22	21	57	33	44	42
10	13	48	23	18	51			
11	3	55	24	23	52			

Die Orientierungen der Flächen sind in Abbildung 44 im Stereoplot in der Projektion der unteren Halbkugel dargestellt. Der linke Plot zeigt alle Großkreise und Polpunkte der Flächen von SF1. Der rechte Plot zeigt die Dichtewolke der Polpunkte und den Großkreis der Schwerpunktläche, welche eine Orientierung von 15°/51° (ER/EW) hat. Die Werte der statistischen Auswertung finden sich in Tabelle 6 wieder.

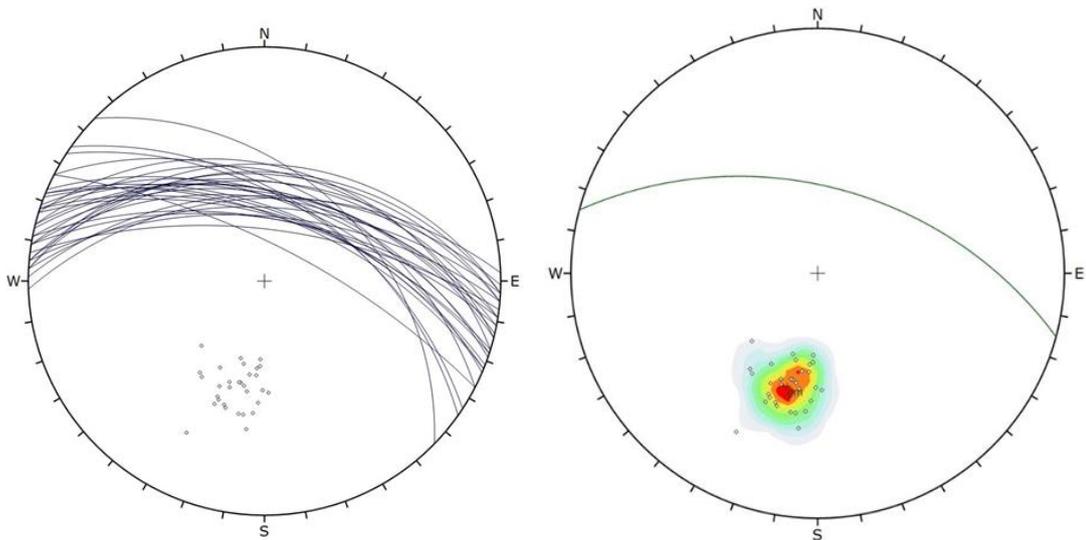


Abbildung 44: Stereoplot der Orientierungsdaten von SF1, links: alle Flächen; rechts: Schwerpunktläche mit Dichtewolke der Polpunkte

Anhand der Orientierungen und Lage der einzelnen Flächen konnten einige in der Punktwolke miteinander verbunden werden und als große Flächen dargestellt werden (Abbildung 45).



Abbildung 45: Verbundene Trennflächen der SF1

#### 4.2.2 SF2

Weitere markante Trennflächen finden sich vor allem am oberen Rand der Felswand, welche als SF2 bezeichnet werden. Die Orientierungen der Flächen von

SF2 sind denen der SF1 ähnlich, werden aber als eigene Trennflächenschar angesehen. Die Flächen wurden in der 3D-Punktwolke und dunkelgrün dargestellt.



Abbildung 46: Flächen der SF2 in der Punktwolke

In Abbildung 46 ist sehr schön zu erkennen, dass sich die Trennflächen der SF2 hauptsächlich am oberen Rand der Felswand konzentrieren. Vereinzelt sind weitere Flächen auch in der restlichen Felswand anzutreffen. Die Größe der Flächen ist relativ gleichmäßig verteilt mit nur 3 etwas größeren Flächen.

In der Tabelle 2 sind alle Orientierungsdaten der SF2 aufgelistet.

Tabelle 2: Orientierungsdaten der SF2 (ER...Einfallrichtung [°]; EW...Einfallswinkel [°])

SF2								
Nr	ER	EW	Nr	ER	EW	Nr	ER	EW
1	336	26	15	12	41	29	340	33
2	322	55	16	346	32	30	345	39
3	349	29	17	350	35	31	298	37
4	359	40	18	339	32	32	331	30
5	359	40	19	351	48	33	302	34
6	306	36	20	354	44	34	306	37
7	350	35	21	3	30	35	312	47
8	356	36	22	352	32	36	356	33
9	345	30	23	354	38	37	321	33
10	4	47	24	351	37	38	304	27
11	359	37	25	354	37	39	2	39
12	1	40	26	3	33	40	359	40
13	3	37	27	352	35	41	330	49
14	5	37	28	7	22	42	309	26

Die Orientierungen der SF2 sind in Abbildung 47 in der Projektion der unteren Halbkugel dargestellt. Der linke Plot zeigt die Polpunkte und Orientierungen aller einzelnen Flächen der SF2, der rechte Plot zeigt die Dichtewolke der Polpunkte und den Großkreis der Schwerpunktläche, welche mit  $344^\circ/35^\circ$  orientiert ist. Die Daten der statistischen Auswertung sind in Tabelle 6 aufgelistet.

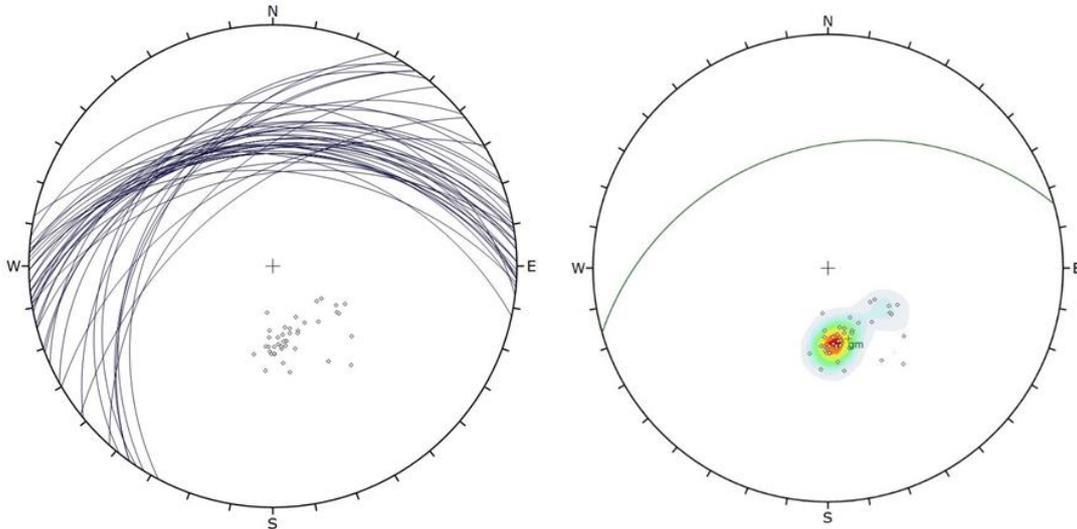


Abbildung 47: Stereoplot der Orientierungsdaten von SF2, links: alle Flächen; rechts: Schwerpunktläche mit Dichtewolke der Polpunkte

Speziell bei dieser Trennflächenschar stellte sich das Verbinden der einzelnen kleinen Flächen zu einer Großen als sehr einfach heraus, da viele der eingezeichneten Flächen wirklich direkt nebeneinander lagen. Es sei jedoch angemerkt, dass hier nur 2 große Flächen eingezeichnet wurden, obwohl noch weitere möglich wären, der Trennflächenabstand jedoch zu klein ist und man daher mehrere Großflächen nicht mehr ordentlich sichtbar machen kann (Abb.8).



Abbildung 48: Verbundene Trennflächen der SF2

#### 4.2.3 KF1

Die erste gut erkennbare Klufflächenschar wurde als KF1 bezeichnet. Die Flächen sind hauptsächlich in der Mitte und auf der rechten Seite der Felswand anzufinden und nur vereinzelt auch auf der linken Seite (Abbildung 49).

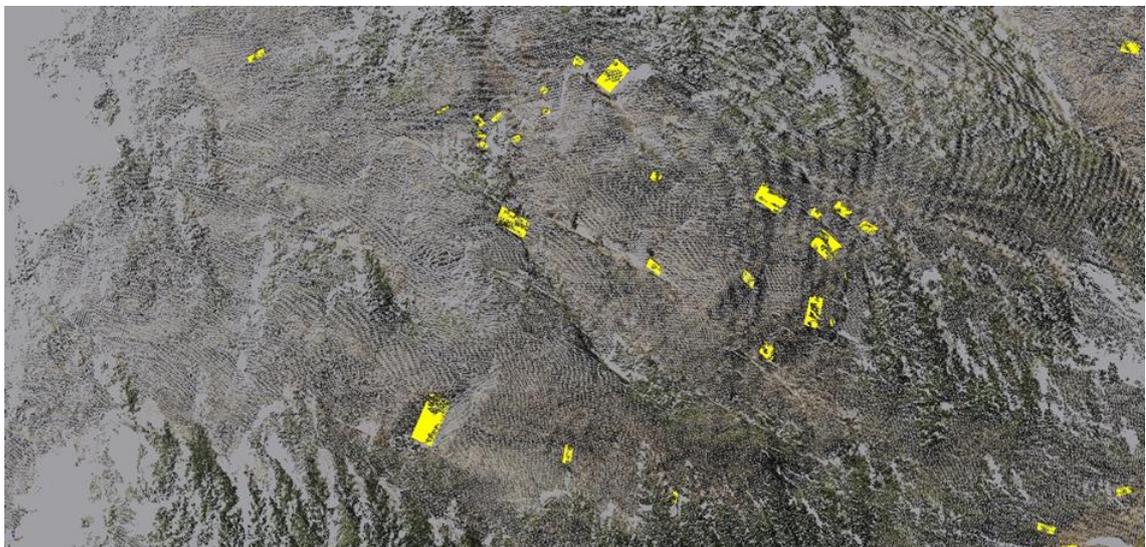


Abbildung 49: Flächen der KF1 in der Punktwolke

Die Orientierungen der KF1 sind in der Tabelle 3 aufgelistet. Diese waren am schwierigsten zu einer Schar zusammenzufassen, da sie die größten

Abweichungen aufweisen. Andererseits konnten die abweichenden Flächen auch nicht als eine weitere Schar definiert werden, denn dafür wäre die Anzahl zu gering.

Tabelle 3: Orientierungsdaten der KF1 (ER...Einfallsrichtung [°]; EW...Einfallswinkel [°])

KF1								
Nr	ER	EW	Nr	ER	EW	Nr	ER	EW
1	241	64	14	234	57	27	251	79
2	262	60	15	233	37	28	245	84
3	227	75	16	248	29	29	256	42
4	231	58	17	230	44	30	259	52
5	242	53	18	225	65	31	276	44
6	239	62	19	213	44	32	227	70
7	258	43	20	241	30	33	207	82
8	269	36	21	224	25	34	186	83
9	219	66	22	233	37	35	256	67
10	273	58	23	222	35	36	276	47
11	278	45	24	250	33	37	271	26
12	263	70	25	223	79	38	205	45
13	247	69	26	230	73			

Die Orientierungen der KF1 wurden in der Projektion von der unteren Halbkugel als Stereoplot dargestellt, ersichtlich in Abbildung 50. Der linke Plot zeigt die Polpunkte und die Großkreise der Flächen von KF1, hier sieht man die Abweichungen am besten. Mit eine Rolle spielt auch eine gewisse Ungenauigkeit bei der Erstellung der Fläche in der 3D-Punktwolke, wo möglicherweise die Auswahl der 3D-Punkte nicht optimal gewesen ist. Der rechte Plot zeigt die Dichtewolke der Polpunkte und die Orientierung der Schwerpunktläche welche mit 240°/53° orientiert ist. Die Daten der statistischen Auswertung sind in Tabelle 6 aufgelistet.

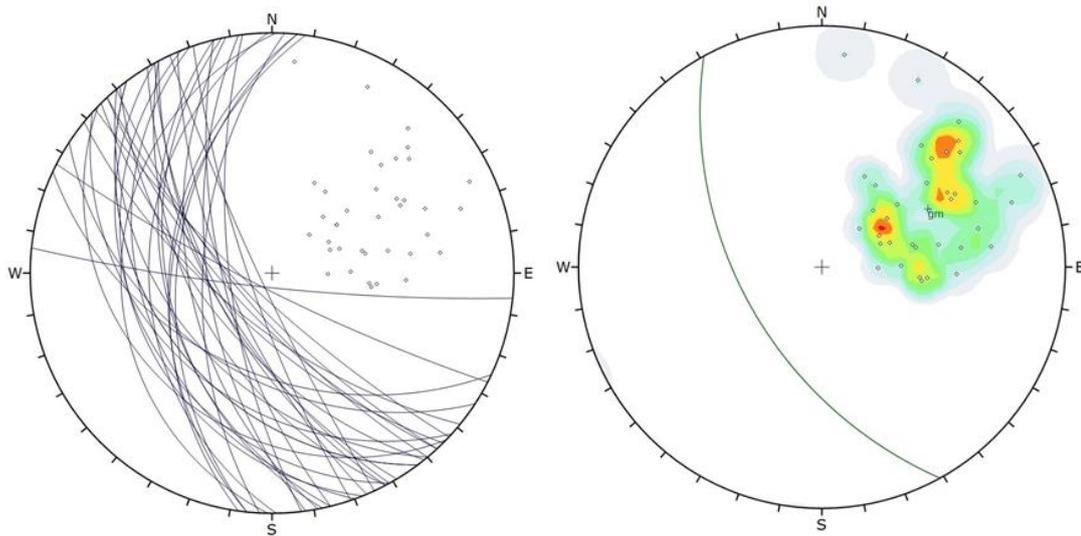


Abbildung 50: Stereoplot der Orientierungsdaten von KF1, links: alle Flächen; rechts: Schwerpunkfläche mit Dichtewolke der Polpunkte

Auch für diese Schar lassen sich einzelne Flächen zu Großflächen verbinden. In Abbildung 51 ist ersichtlich, dass diese Großflächen nur in der Mitte und auf der rechten Seite der Felswand auftreten.



Abbildung 51: Verbundene Trennflächen der KF1

#### 4.2.4 KF2

Als nächstes wurde eine weitere Klufflächenschar identifiziert, die KF2. Diese war nicht ganz so einfach zu identifizieren, da sie die Trennflächenschar mit den am wenigsten eingezeichneten Flächen im 3D-Modell darstellt.

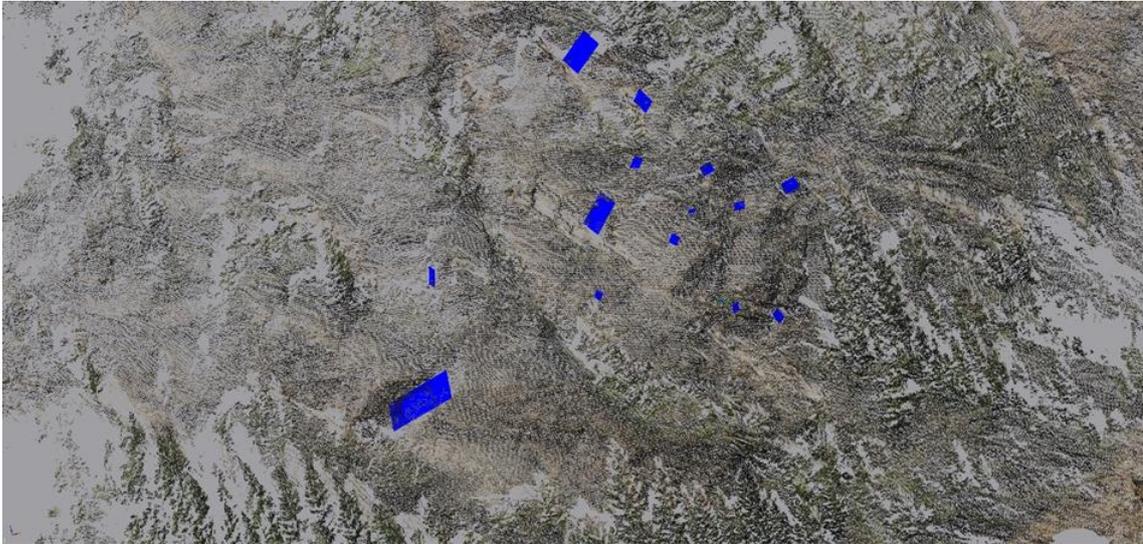


Abbildung 52: Flächen der KF2 in der Punktwolke

Wie in Abbildung 52 ersichtlich, sind die Flächen der KF2 bis auf 3 relativ klein und wiederum eher in der Mitte und auf der rechten Seite der Felswand anzufinden.

In Tabelle 4 sind die Orientierungsdaten der KF2 aufgelistet.

Tabelle 4: Orientierungsdaten der KF1 (ER...Einfallsrichtung [°]; EW...Einfallswinkel [°])

KF2								
Nr	ER	EW	Nr	ER	EW	Nr	ER	EW
1	121	68	8	130	51	14	128	74
2	130	69	9	127	77	15	117	52
3	128	70	10	125	67	16	112	79
5	133	72	11	133	74	17	100	73
6	130	82	12	114	57	18	102	62
7	136	72	13	148	84			

Diese Orientierungsdaten der KF2 wurden wieder in der Projektion der unteren Halbkugel dargestellt und als Plot visualisiert. Im linken Plot sind die Polpunkte und Großkreise aller Flächen der KF2 dargestellt, im Rechten der Großkreis der Schwerpunkfläche und die Dichtewolke der Polpunkte. Die Schwerpunkfläche

hat eine Orientierung von  $124^{\circ}/69^{\circ}$  (Abbildung 53). Die Daten der statistischen Auswertung sind in Tabelle 6 aufgelistet.

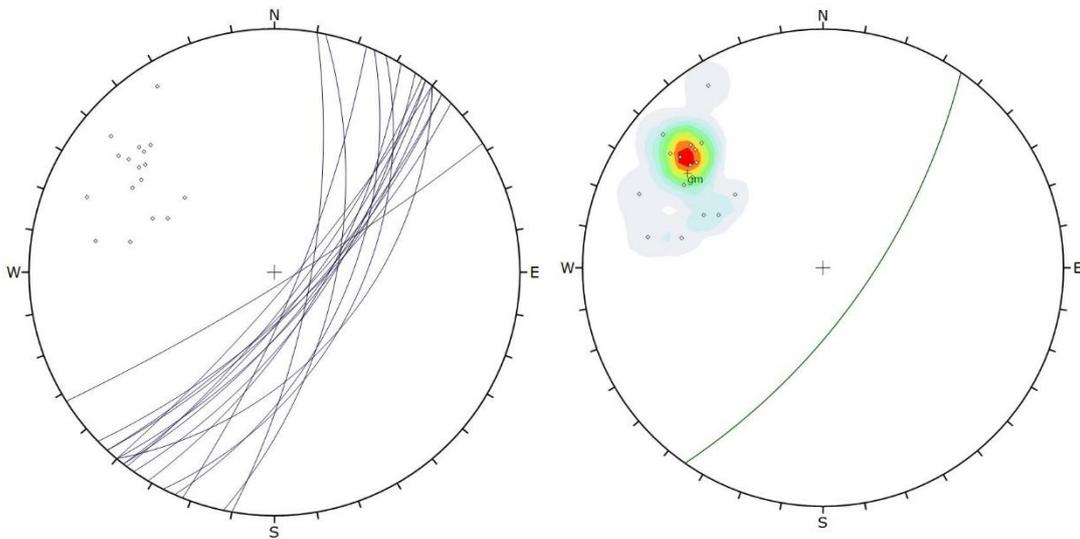


Abbildung 53: Stereoplot der Orientierungsdaten von KF2, links: alle Flächen; rechts: Schwerpunktläche mit Dichtewolke der Polpunkte

Auf Grund der geringen Anzahl von Flächen erwies es sich auch als schwieriger Großflächen zu generieren. Dennoch war es möglich manche Flächen, oftmals nur 2, direkt zu verbinden und als durchgehende Kluft darzustellen. Dies funktionierte aber nur so gut, weil die Flächen wirklich bestens zueinander passten. Das Ergebnis ist in Abbildung 54 ersichtlich.

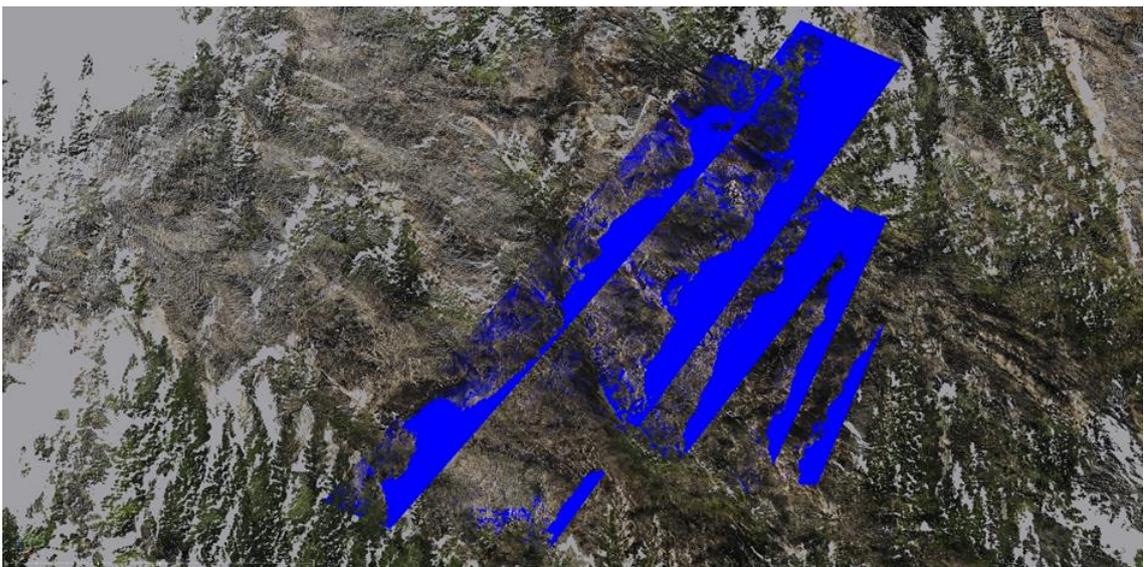


Abbildung 54: Verbundene Trennflächen der KF2

#### 4.2.5 KF3

Die letzte Trennflächenschar ist die KF3. Diese spiegelt teilweise auch die direkte Böschung wider. Die Flächen werden fast im 90° Winkel betrachtet und können direkt als Felsoberfläche wahrgenommen werden. Diese Trennflächenschar ist die einzige, deren Flächen wirklich auf der gesamten Felswand anzutreffen sind und deren Flächengröße allgemein größer sind (Abb.15).



Abbildung 55: Flächen der KF3 in der Punktwolke

Die Flächen der KF3 wurden später in der Blocktheorie für Blöcke oft als freie Flächen verwendet, da sie wirklich die Hang- bzw. Böschungsneigung widerspiegeln.

Die Orientierungsdaten der KF3 sind in der Tabelle 5 aufgelistet.

Tabelle 5: Orientierungsdaten der KF1 (ER...Einfallrichtung [°]; EW...Einfallswinkel [°])

KF3								
Nr	ER	EW	Nr	ER	EW	Nr	ER	EW
1	92	88	10	275	88	19	278	89
2	276	79	11	277	88	20	254	89
3	269	76	12	272	86	21	276	84
4	276	85	13	287	82	22	82	89
5	279	80	14	281	82	23	266	88
6	278	76	15	280	80	24	278	84
7	273	79	16	281	80	25	98	85
8	278	79	17	278	76	26	97	85
9	282	81	18	283	82			

Die Orientierungsdaten wurden wiederum geplottet und in der Projektion der unteren Halbkugel dargestellt. Links die Polpunkte und Großkreise aller Flächen und rechts die Dichtewolke der Polpunkte und der Großkreis der Schwerpunktläche. Die genaue Orientierung der Schwerpunktläche beträgt  $277^{\circ}/80^{\circ}$  (Abbildung 56). Die Daten der statistischen Auswertung sind in Tabelle 6 aufgelistet.

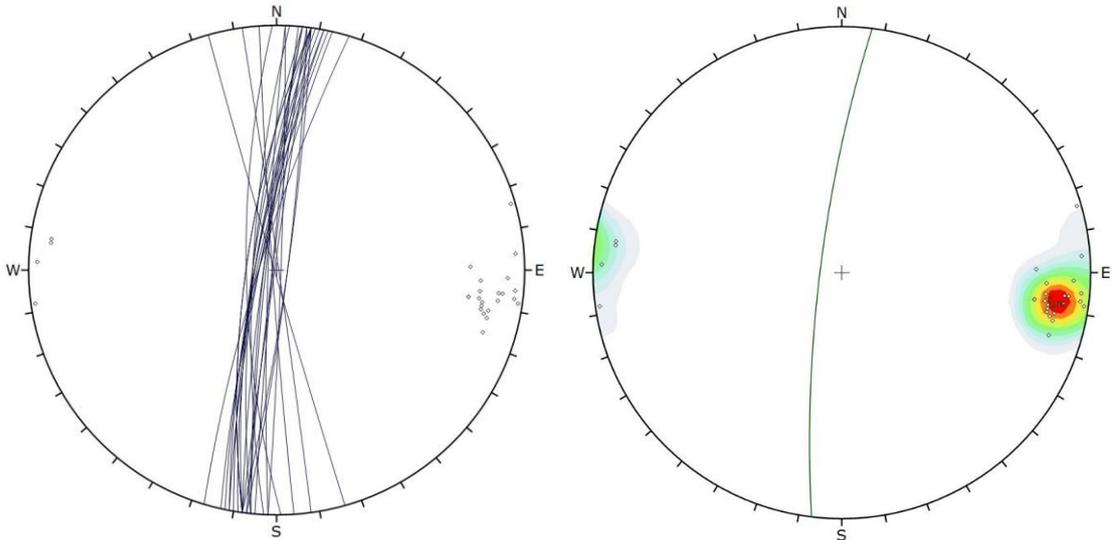


Abbildung 56: Stereoplot der Orientierungsdaten von KF3, links: alle Flächen; rechts: Schwerpunktläche mit Dichtewolke der Polpunkte

In Abbildung 56 ist gut zu erkennen, dass die Flächen der KF3 beinahe senkrecht in Richtung Westen einfallen. Dies spiegelt die Orientierung der Felswand wider welche sich ebenfalls von Nord nach Süd erstreckt und beinahe senkrecht ist. Der Unterschied ist, dass die Felswand an sich nicht überhängend ist, die Flächen der KF3 in Bezug auf die Orientierung der Felswand jedoch schon.

Für diese Kluftschar war es sehr einfach Großflächen zu generieren. Da jedoch die einzelnen Flächen beinahe alle auf gleicher Ebene liegen wurden nur 2 Großflächen in Abbildung 57 visualisiert, um sie noch möglichst anschaulich zu halten und um nicht die gesamte Felswand als hellblaue Fläche darstellen zu müssen.



Abbildung 57: Verbundene Trennflächen der KF2

#### 4.2.6 Trennflächensystem

Um die Entscheidung zu unterstützen, die im vorangegangenen Kapitel bearbeiteten Trennflächen wirklich als gesamte Scharen zu identifizieren, wurde, mit Hilfe der Formeln aus dem Kapitel 3.4, der prozentuale Regelungsgrad, der Konzentrationsparameter, der Öffnungswinkel und der Vertrauenskegel berechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in der Tabelle 6 aufgelistet. Alle Berechnungen wurden im Excel gemacht.

Tabelle 6: Daten der statistischen Auswertung der Trennflächen;  $n$ ...Anzahl der Trennflächen; ER/EW...Einfallrichtung und Einfallswinkel der Schwerpunktlächen;  $R[\%]$ ...prozentueller Regelungsgrad;  $k$ ...Konzentrationsparameter;  $\theta$ ...Vertrauenskegel;  $\omega$ ...Öffnungswinkel

	n	ER/EW	R[%]	k	$\theta$ [°]	$\omega$ [°]
SF1	31	15/51	96,58	56,67	3,46	10,65
SF2	42	344/35	90,65	20,89	4,94	17,80
KF1	38	240/53	87,06	15,05	6,19	21,08
KF2	17	124/69	96,99	62,50	4,55	9,99
KF3	26	277/80	99,06	205,55	1,98	5,55

Besonders unterstützend bei der Identifikation der Trennflächenscharen waren die Werte des prozentuellen Regelungsgrades und des Konzentrationsparameters. Bei  $R[\%]$  liegen die Werte bei allen Trennflächenscharen über 85 %, was doch relativ anschaulich für natürliche Kluftsysteme ist.

Der  $k$ -Wert ist nur bei SF2 und KF1 recht niedrig, dies ist, wie schon mehrfach im vorangegangenen Kapiteln erwähnt, auf „Ausreisserflächen“ zurückzuführen. Diese Ausreisserflächen weichen in der Orientierung von den anderen Flächen etwas ab, können aber nicht als eigenständige Kluftchar identifiziert werden. Daher werden sie der Schar mit ähnlicher Orientierung zugeordnet. Beachtlich ist der  $k$ -Wert für die KF3, welcher bei über 200 liegt, hier sind alle Flächen fast exakt gleich orientiert.

Bestätigt durch die eingezeichneten Großflächen und unterstützt durch die statistischen Berechnungen, wurde anschließend ein gesamtes Trennflächenmodell erstellt. Jede Trennflächenschar wurde in ihrer jeweiligen Farbe visualisiert und ins 3D-Modell eingezeichnet. Veranschaulicht in Abbildung 58.

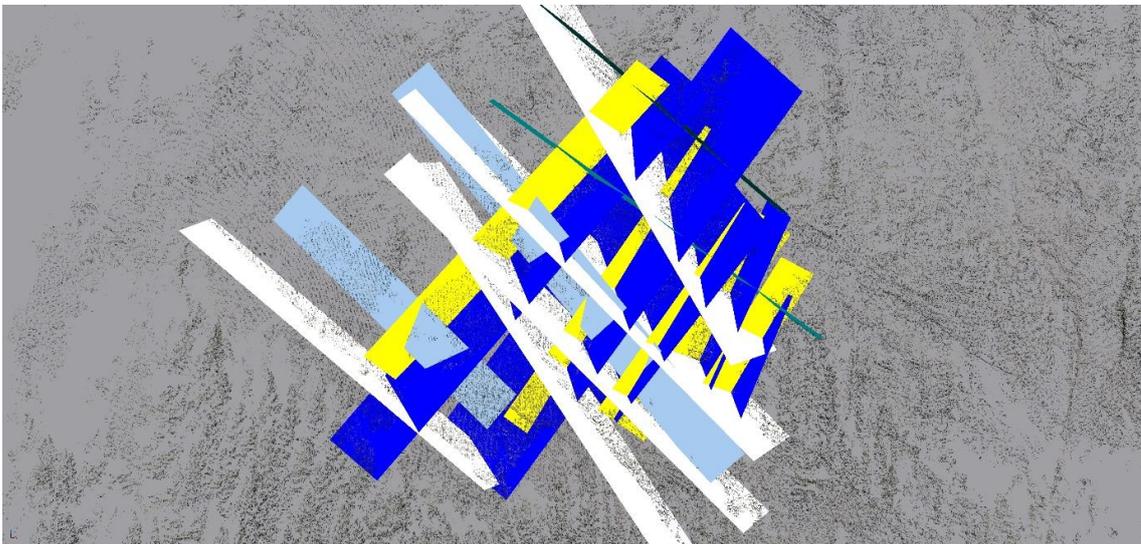


Abbildung 58: Gesamtes Trennflächenmodell der Felswand; SF1=weiß; SF2=dunkelgrün; KF1=gelb; KF2=dunkelblau, KF3=hellblau

Es ist zu erwähnen das hier nicht auf die 4 Teilbereiche speziell eingegangen wurde, da die Auflösung des Laserscans nicht hoch genug ist, um auf diese Aufschlussgröße noch kleinere Trennflächen zu identifizieren. Darum wird das Trennflächenmodell auf die ganze Felswand gespannt.

Der Stereoplot zu den Schwerpunktsflächen und Trennflächenscharen ist in Abbildung 59 in der Projektion der unteren Halbkugel dargestellt.

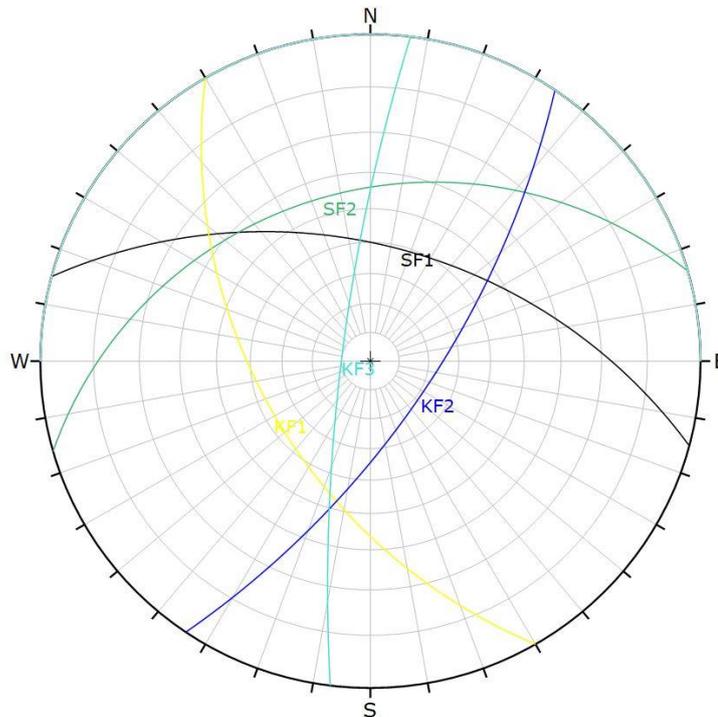


Abbildung 59: Stereoplot der Schwerpunktsflächen

#### 4.2.7 Trennflächenabstände und Ausbisslängen

Zwei weitere wichtige Parameter für Blockgrößen sind der Trennflächenabstand und die Ausbisslänge. Sie wurden im RiSCAN für jede einzelne Trennflächenschar gemessen und deren Mittelwert und Standardabweichung wurden berechnet. Diese Werte beziehen sich auf die gesamte Felswand, da für eine vernünftige statistische Auswertung der einzelnen Bereiche die Anzahl der Messungen einfach zu gering gewesen wäre.

Tabelle 7: Statistische Auswertung der Trennflächenabstände [m] (n...Anzahl der Messungen)

	n	min	1. Quantile	Mittel	3. Quantile	max	St.A.	Konf. Int.
SF1	21	0,7	1,1	2	2,6	4	0,93	0,40
SF2	32	0,2	0,5	1,1	1,6	2,3	0,60	0,21
KF1	28	0,5	1,6	2,4	3,4	4,4	1,03	0,38
KF2	11	3,3	3,8	5	6,2	7,1	1,20	0,68
KF3	17	1,9	2,4	3,5	4,4	4,7	0,94	0,43

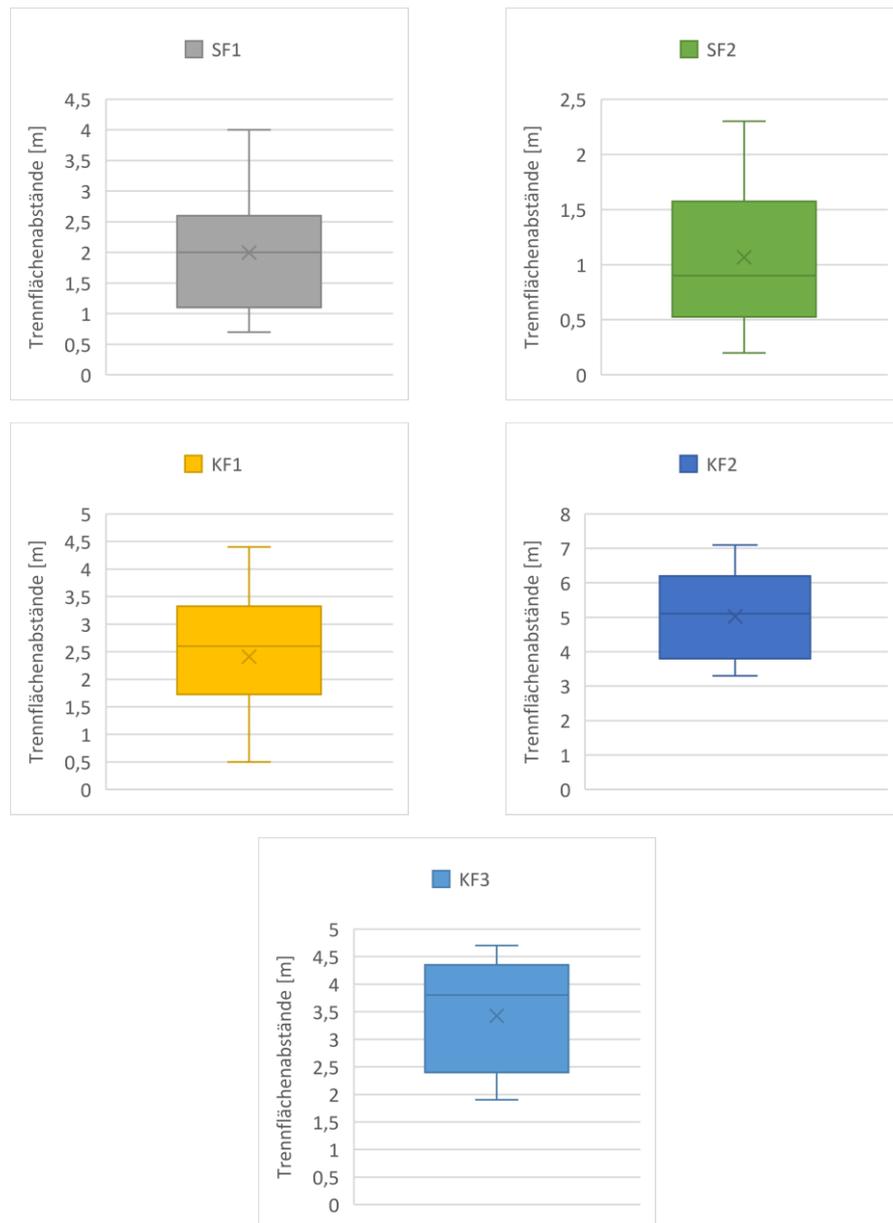


Abbildung 60: Boxplots der Trennflächenabstände (das x markiert den Mittelwert)

Der Grund dafür ist das teilweise in den Bereichen oft nur wenige der im 3D-Modell identifizierte Trennflächen existieren. Auch wenn auf den Fotos in Kapitel 4.1 viele kleinere Flächen zu sehen sind, konnten diese auf Grund der Auflösung des Laserscans nicht markiert werden.

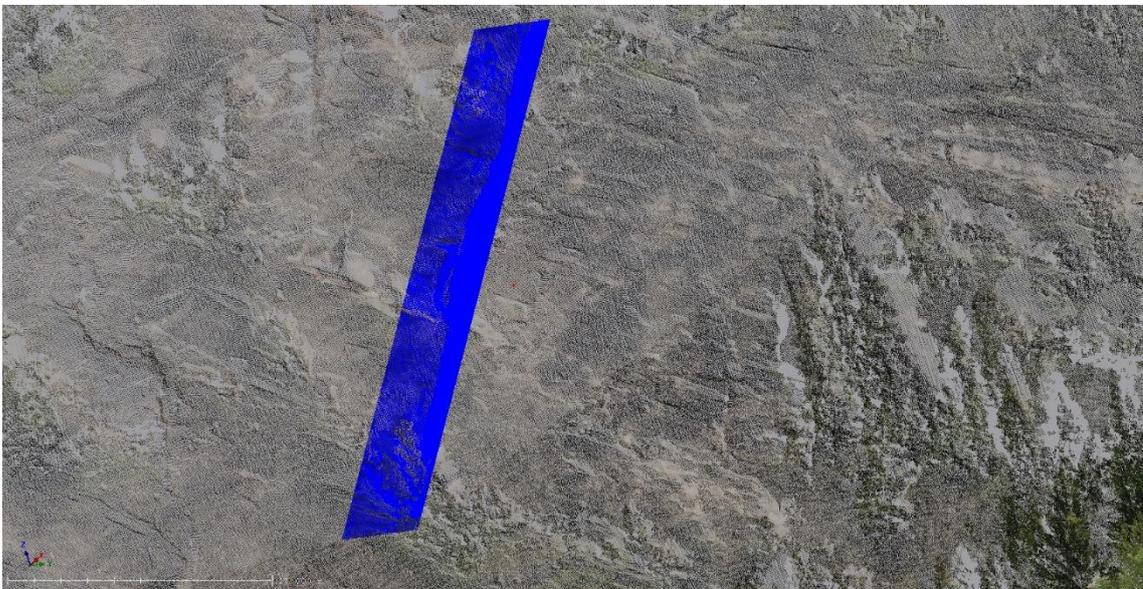


Abbildung 61: Beispiel für die Ermittlung der Ausbisslängen, hier für KF2 im RiSCAN (oben: Flächen der KF2 die auf einer Ebene mit gleicher Orientierung liegen; unten: Großfläche der verbundenen Trennflächen von KF2)

Für die Ausbisslängen (Kapitel 3.4.1) wurden für jede Trennflächenschar die Längen der im RiSCAN eingezeichneten einzelnen Flächen hergenommen und die Länge der Großfläche wird als Gesamtlänge der Trennfläche angenommen. Diese sind die direkte Bestätigung für den Ausbiss einer Trennfläche wie in Abbildung 61 zu sehen ist. Die Ausbisslängen und Gesamtlängen aller Trennflächenscharen finden sich im Anhang wieder. Diese Ausbisslängen werden für die Berechnung des Persistenzfaktors jeder Schar verwendet, wie in Kapitel 3.4.1 beschrieben. Die Berechnung der Mittelwerte und die der Standardabweichung

für die Ausbisslängen finden sich in Tabelle 8 wieder, weiters sind sie in Boxplots in Abbildung 62 dargestellt.

Tabelle 8: Statistische Auswertung der Ausbisslängen [m] (n...Anzahl der Messungen)

	n	Min	1. Quantile	Mittel	3. Quantile	Max	St. A.	konf. Int.
SF1	16	3	3,1	6,0	8	12	3,5	1,7
SF2	15	1,9	2	2,8	3	4	1,0	0,5
KF1	24	0,5	2	3,2	5	8	1,8	0,7
KF2	15	1,3	2	3,7	5,1	6	3,1	1,6
KF3	11	5	5,2	7,8	9,8	12	2,5	1,5

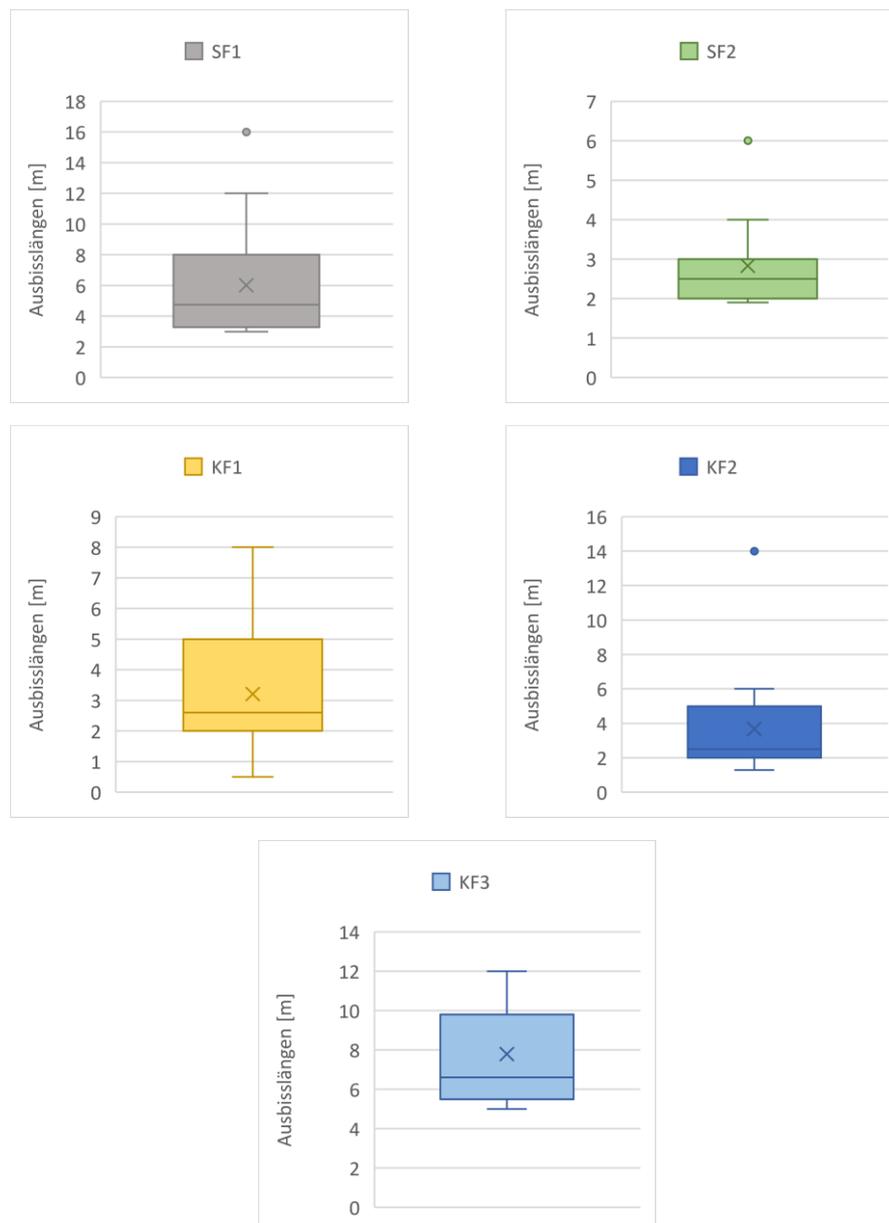


Abbildung 62: Boxplots der Ausbisslängen (das x markiert den Mittelwert)

### 4.3 Kluftkörpergrößen

Wie schon mehrfach erwähnt ist es bei der Beurteilung von natürlichen Felsböschungen sehr wichtig die zu erwartenden Blockgrößen zu kennen. Dafür werden die Trennflächenabstände und die Persistenzfaktoren der einzelnen Bereiche für Volumenberechnungen herangezogen. Die Formeln zu den Volumenberechnungen sind im Kapitel 3.4 zu finden. Zur Orientierung sind in Abbildung 63 nochmal die einzelnen Bereiche dargestellt.



Abbildung 63: Foto der Felswand mit den 4 Teilbereichen (rote Kreise)

#### 4.3.1 Bereich 1

Im ersten Bereich konnte im RiSCAN nur 1 Block deutlich identifiziert werden, benannt als Block 1, und daher wurde auch nur für diesen einen Block das Volumen berechnet. Als Haupttrennflächen für die herkömmliche Berechnung des Volumens mittels der Formel wurden die Trennflächen der SF1, KF1 und KF2 herangezogen. Die Trennflächenabstände entsprechen den in diesem Bereich gemessenen Normalabständen der Trennflächen. Die verwendeten Werte sind in der Tabelle 9 aufgelistet.

Tabelle 9: Daten für die Volumenberechnungen von Block 1

Block 1	Normalabstand [m]	Persistenzfaktor p
SF1	1,7	0,38
KF1	2,5	0,25
KF2	5	0,46

Der Winkel zwischen den verschiedenen Trennflächenscharen beträgt nur zwischen SF1 und KF2 30°, ansonsten liegt er um die 90° und ist daher zu vernachlässigen.

Die Berechnungen erfolgen jeweils mit den Formeln (1) und (2).

Tabelle 10: Ergebnis der Volumenberechnung von Block1

	$V_k$ [m <sup>3</sup> ]	$V_p$ [m <sup>3</sup> ]
Block1	42,5	119

Die Volumenberechnungen zeigen deutlich den Einfluss des Persistenzfaktors auf Blockgrößen. Das Volumen des Blockes steigt mit dem p-Wert fast auf das 3-fache an.

Um das Volumen des Blocks 1 ( $V_b$ ) noch genauer zu bestimmen, wird er mit dem Blocktheorieprogramm B03HPGL.EXE modelliert und dargestellt. Tabelle 11 zeigt die Orientierungsdaten der verwendeten Flächen und Abbildung 64 zeigt die rekonstruierte Form. Weitere Ansichten der Blockform sind im Anhang angeführt.

Tabelle 11: Orientierungsdaten der Trennflächen von Block 1

Block1				
Nr	Name	Farbe	Einfallsrichtung	Einfallswinkel
1	SF1_4	weiß	17	59
2	SF2_2	dunkelgrün	322	55
3	KF1_2	gelb	262	60
4	KF2_8	dunkelblau	130	51
5	FF1_1 (freie Fläche 1)		277	80

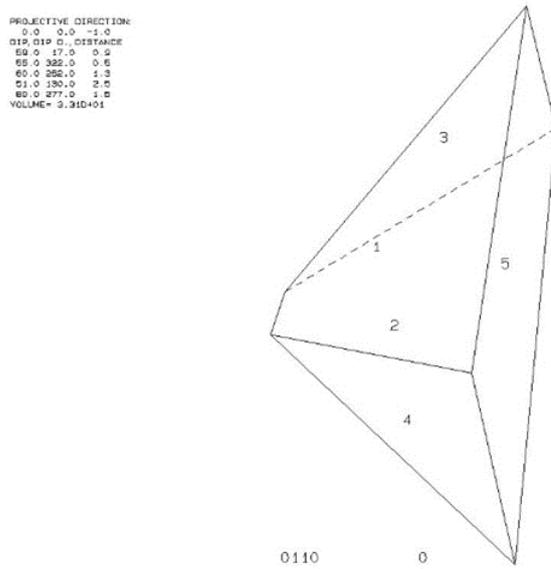


Abbildung 64: Rekonstruierte Form von Block 1

Das exakte Volumen von Block 1  $V_b$  beträgt  $33,1\text{m}^3$  und ist somit etwas kleiner als das berechnete Volumen ohne p-Wert. Abbildung 65 zeigt Block1 auf einem Foto und im 3-D Modell.

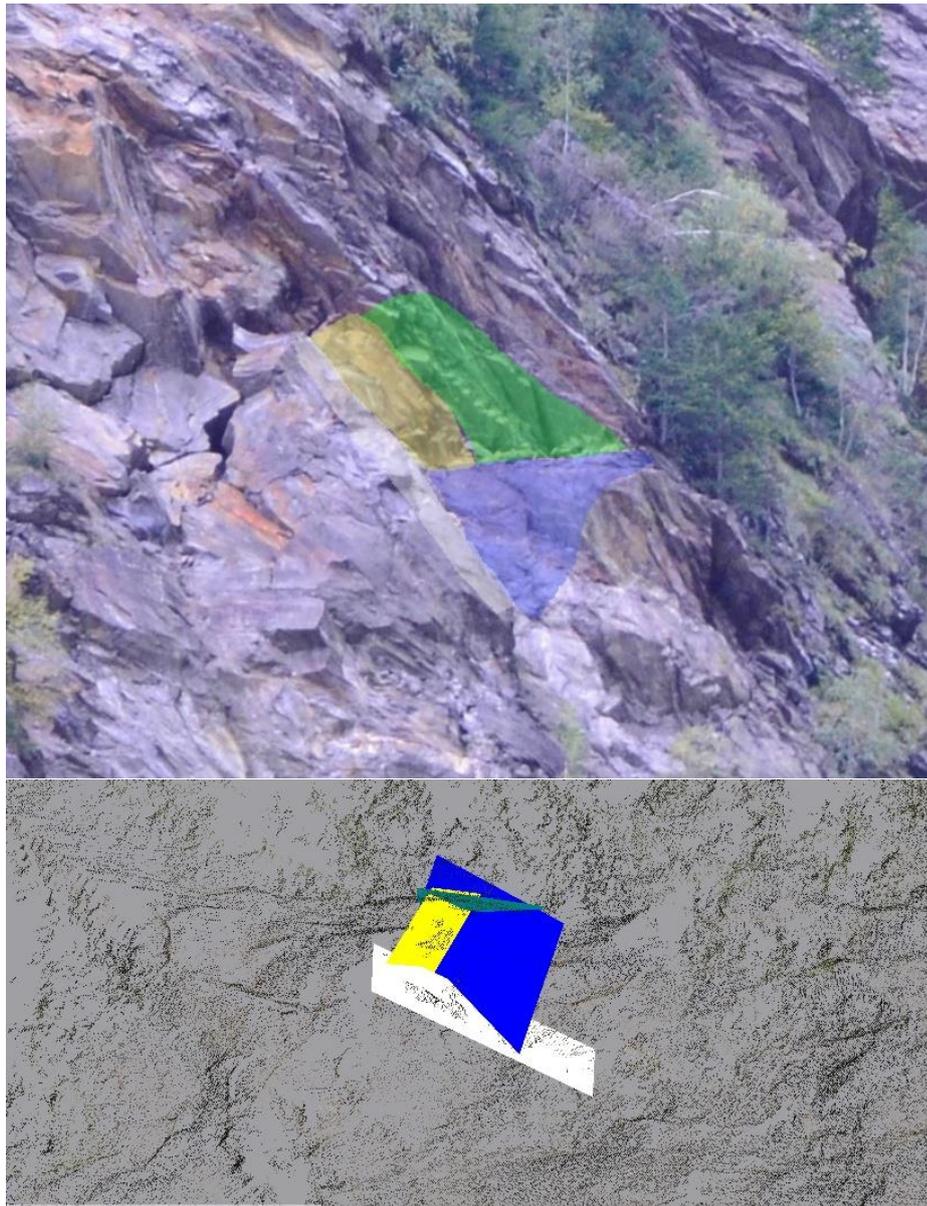


Abbildung 65: Trennflächen des 1. Blocks in der Nahaufnahme und im virtuellen Modell

#### 4.3.2 Bereich 2

Im Bereich 2 war es möglich, 2 Blöcke mittels RiSCAN deutlich zu identifizieren, Block 5 und Block 6. Für Block 5 wurden die Trennflächen der SF1, SF2 und KF2 herangezogen und für Block 6 die der SF1, KF1 und KF2. Die Werte der Normalabstände und des Persistenzfaktors sind in der Tabelle 12 aufgelistet.

Tabelle 12: Daten für die Volumenberechnungen von Block 5 und 6

<b>Block 5</b>	Normalabstand [m]	Persistenzfaktor p
SF1	1,5	0,38
SF2	1	0,28
KF2	2	0,25

<b>Block 6</b>	Normalabstand [m]	Persistenzfaktor p
SF1	1,8	0,38
KF1	1,5	0,38
KF2	2	0,25

Für Block 5 sind die Winkel zwischen den Trennflächen wieder weitestgehend zu vernachlässigen, außer zwischen SF1 und SF2, dieser beträgt 35°. Für Block 6 ist nur der Winkel zwischen SF1 und KF1 mit 75° in den Berechnungen zu berücksichtigen.

Die Ergebnisse der Berechnungen des Volumens der Blöcke 5 und 6 sind in der Tabelle 13 aufgelistet.

Tabelle 13: Ergebnis der Volumenberechnung von Block 5 und 6

	$V_k [m^3]$	$V_p [m^3]$
Block 5	5,2	17,5
Block 6	5,6	19,9

Hier ist auch schön zu sehen, dass sich die Größe der Blöcke mit dem Persistenzfaktor wieder verdrei- oder sogar vervierfacht, aber auch, dass die beiden Blöcke beinahe gleich groß sind.

Die exakten Blockgrößen wurden wiederum mit dem Programm B03HPGL.EXE der Blocktheorie bestimmt und die möglichen Blockformen modelliert (Abbildung 66, Abbildung 67). Weitere Ansichten der Blockformen finden sich im Anhang.

Tabelle 14: Orientierungsdaten der Trennflächen von Block 5 und 6

Block5				
Nr	Name	Farbe	Einfallsrichtung	Einfallswinkel
1	SF1_2	weiß	22	56
2	SF2_1	dunkelgrün	336	26
3	KF2_2	dunkelblau	130	69
4	KF1_9 (freie Fläche 1)	gelb	219	66
5	FF5_2 (freie Fläche 2)		125	75

Block6				
Nr	Name	Farbe	Einfallsrichtung	Einfallswinkel
1	SF1_9	weiß	1	50
2	KF1_6	gelb	239	62
3	KF2_17	dunkelblau	100	73
4	KF1_5 (freie Fläche 1)		242	53
5	FF6_1 (freie Fläche 2)		6	60
6	FF6_2 (freie Fläche 3)		110	65

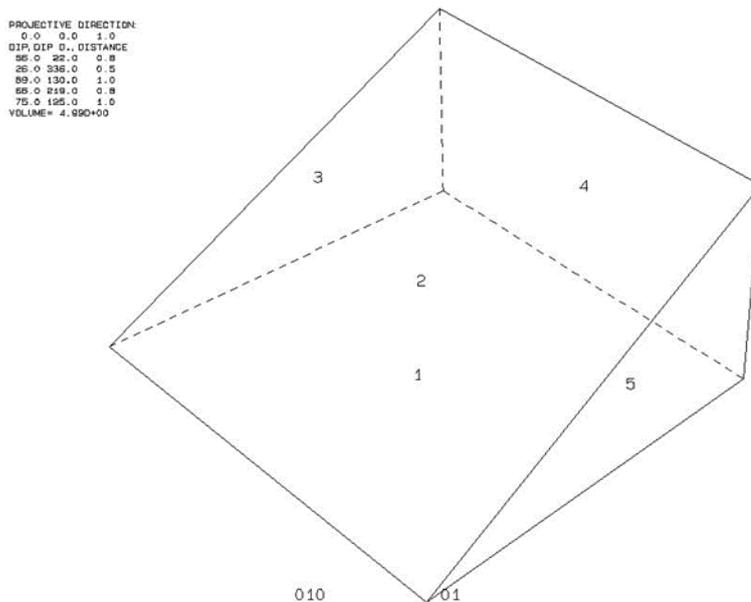


Abbildung 66: Rekonstruierte Form von Block 5

Das exakte Volumen  $V_b$  von Block 5 beträgt **4,9m<sup>3</sup>**.

```
PROJECTIVE DIRECTION:  
0.0 0.0 1.0  
DIP, DIP D., DISTANCE  
80.0 1.0 0.9  
82.0 239.0 0.8  
79.0 100.0 1.0  
83.0 842.0 0.8  
80.0 5.0 0.9  
85.0 110.0 1.0  
VOLUME= 5.880+00
```

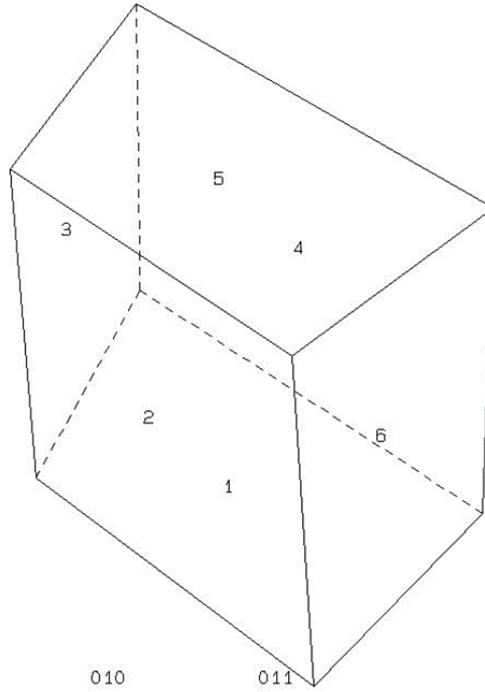


Abbildung 67: Rekonstruierte Form von Block 6

Das genaue Volumen  $V_b$  von Block 6 beträgt **5,9m<sup>3</sup>**.

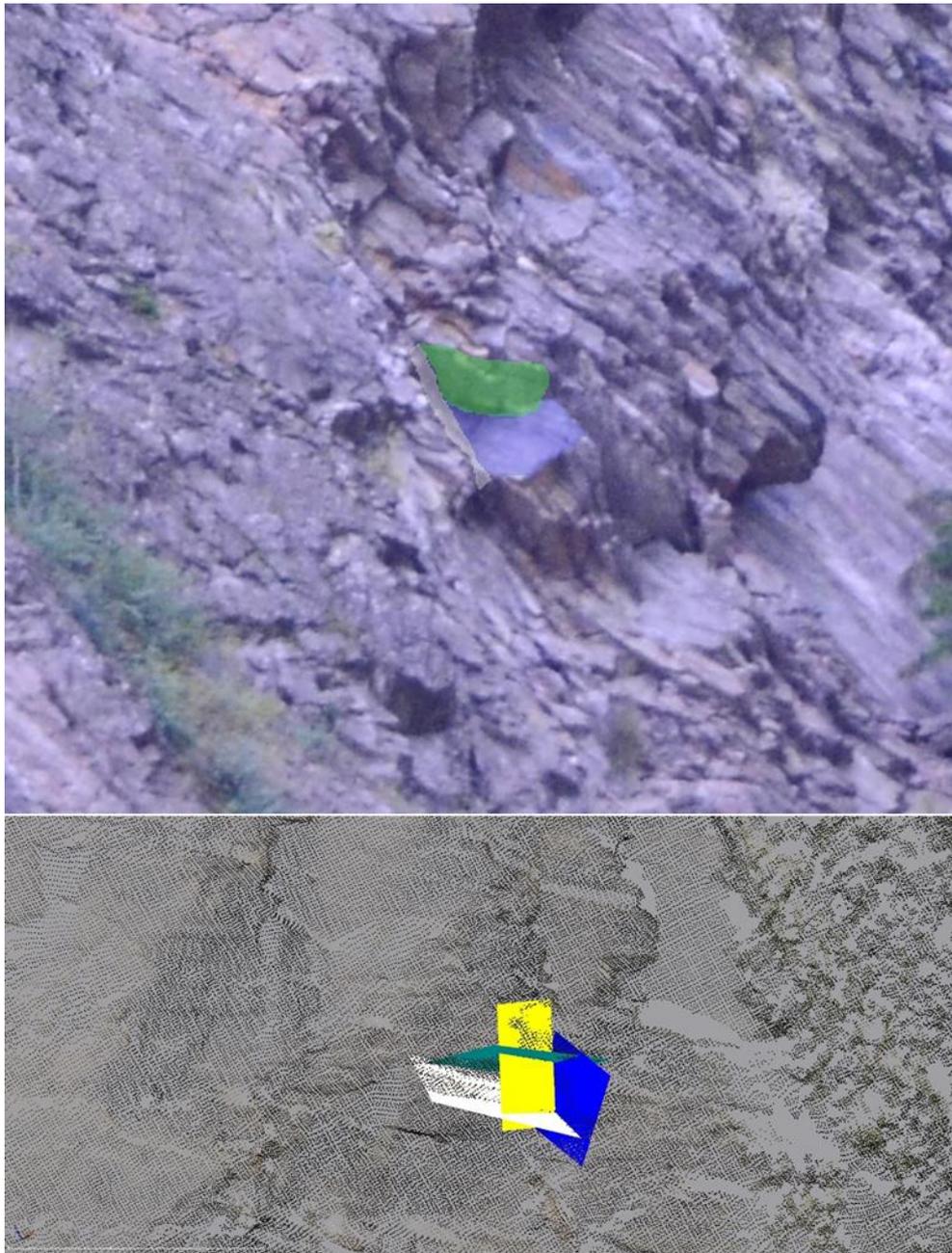
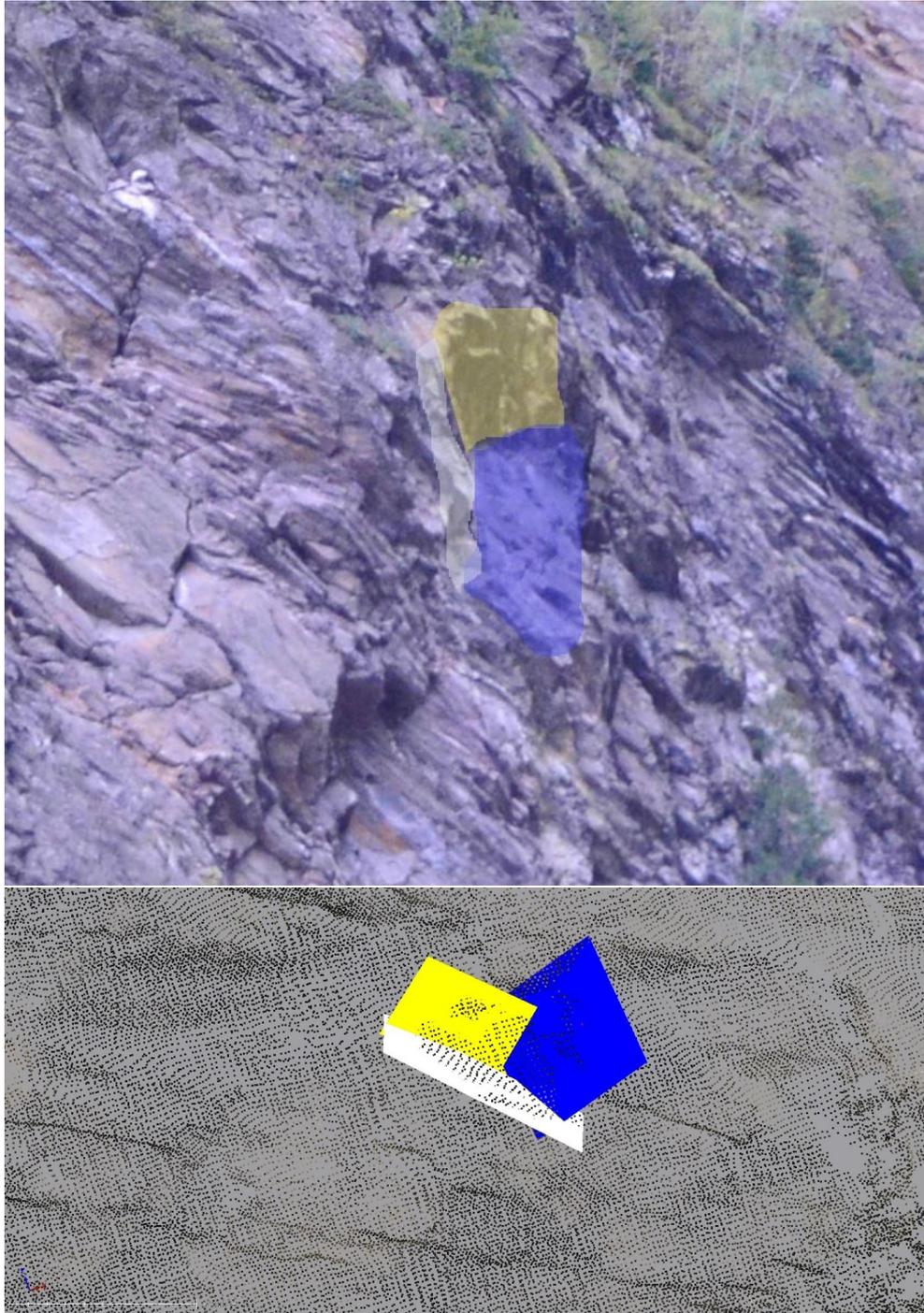


Abbildung 68: Trennflächen des 5. Blocks in der Nahaufnahme und im virtuellen Modell



*Abbildung 69: Trennflächen des 6. Blocks in der Nahaufnahme und im virtuellen Modell*

Auch wenn die beiden Blöcke 5 und 6 sich in ihrem Volumen kaum unterscheiden, so tun sie es umso mehr in ihrer Form. Block 5 ähnelt einem Keil wohingegen Block 6 eher einem Würfel gleicht.

### 4.3.3 Bereich 3

Im 3. Bereich konnte nur ein einzelner großer Block identifiziert werden, Block 3. Für die Berechnungen wurden als Haupttrennflächen die SF1, KF2 und KF3 verwendet. Die Trennflächenabstände und Persistenzfaktoren sind in Tabelle 15 aufgelistet.

Tabelle 15: Daten für die Volumenberechnungen von Block 3.

Block 3	Normalabstand [m]	Persistenzfaktor p
SF1	2	0,4
KF2	5	0,38
KF3	6	0,87

Der Winkel zwischen SF1 und KF3 beträgt hier 75°.

In Tabelle 16 sind die Ergebnisse der Volumenberechnungen aufgelistet.

Tabelle 16: Ergebnis der Volumenberechnung von Block 3

	$V_k [m^3]$	$V_p [m^3]$
Block 3	62,1	121,9

Hier verdoppelt sich das Volumen mit Hilfe des p-Wertes annähernd.

Wiederum wurde von Block 3 eine genaue Berechnung des Volumens mit der Blocktheorie durchgeführt und die Form des Blockes dargestellt (Abbildung 70).

Tabelle 17: Orientierungsdaten der Trennflächen von Block 3

Block3				
Nr	Name	Farbe	Einfallsrichtung	Einfallswinkel
1	SF1_19	weiß	17	38
2	KF1_1	gelb	241	64
3	KF2_3	dunkelblau	128	70
4	KF3_5 (freie Fläche 1)		279	80
5	FF3_6 (freie Fläche 2)		20	32

```

PROJECTIVE DIRECTION:
0.0 0.0 -1.0
DIP, DIP D., DISTANCE
38.0 17.0 1.0
64.0 241.0 1.5
70.0 128.0 2.5
80.0 278.0 1.0
32.0 20.0 3.0
VOLUME= 6.650+01
    
```

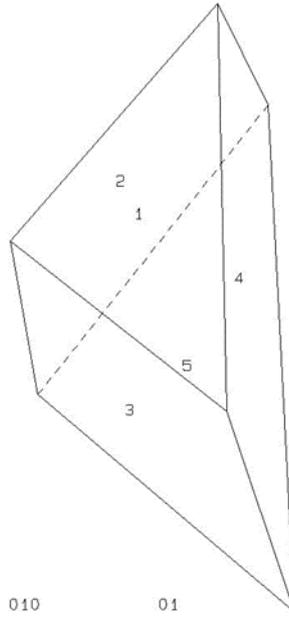


Abbildung 70: Rekonstruierte Form von Block 3

Das genaue Volumen  $V_b$  des Blocks 3 beträgt **68,5m<sup>3</sup>**.

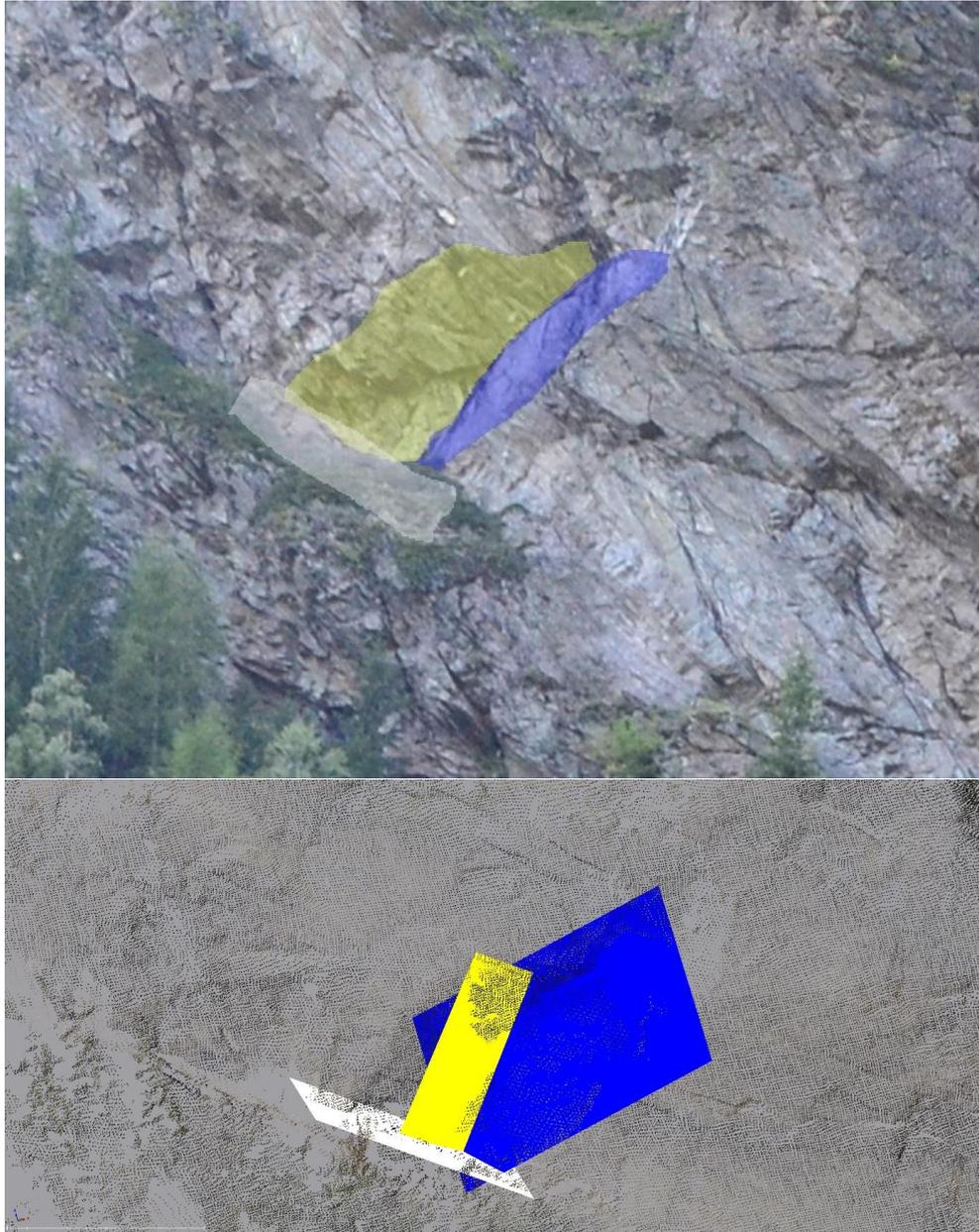


Abbildung 71: Trennflächen des 3. Blocks in der Nahaufnahme und im virtuellen Modell

#### 4.3.4 Bereich 4

Im Bereich 4 konnten wiederum 2 Blöcke im RiSCAN identifiziert werden, Block 2 und Block 4. Für Block 2 wurden SF2, KF2 und KF3 als Haupttrennflächen herangezogen und für Block 4 KF1, KF2 und KF3. Die Werte der Trennflächenabstände und der Persistenzfaktoren sind in Tabelle 18 aufgelistet.

Tabelle 18: Daten für die Volumenberechnungen von Block 2 und 4

<b>Block 2</b>	Normalabstand [m]	Persistenzfaktor p
SF2	1	0,28
KF2	1,5	0,26
KF3	1	0,75

<b>Block 4</b>	Normalabstand [m]	Persistenzfaktor p
KF1	2,5	0,22
KF2	5	0,26
KF3	3	0,75

Bei Block 2 beträgt der Winkel zwischen SF2 und KF2  $85^\circ$ , zwischen SF2 und KF3  $75^\circ$  und zwischen KF2 und KF3  $45^\circ$ . Bei Block 4 beträgt der Winkel zwischen KF1 und KF2  $50^\circ$  und zwischen KF2 und KF3  $45^\circ$ .

In Tabelle 19 sind die Ergebnisse der Berechnungen der Volumina aufgelistet.

Tabelle 19: Ergebnis der Volumenberechnung von Block 2 und 4

	$V_k [m^3]$	$V_p [m^3]$
Block 2	2,2	5,8
Block 4	54	154,3

Auffallend im 3. Bereich ist, dass die 2 Blöcke komplett unterschiedliche Größen haben. Dies hängt damit zusammen, dass der Block 2 schon sehr nahe am 2. Bereich liegt, da sich diese hier mehr oder weniger überschneiden. Weiters ist wieder zu erkennen, dass sich mit den p-Werten abermals die Blockgrößen verdreifachen.

Außerdem wurden erneut die exakten Blockgrößen mit der Blocktheorie berechnet und deren Form als Modell dargestellt (Abbildung 72 und Abbildung 73). Weitere Ansichten der Blöcke 2 und 4 finden sich im Anhang.

Tabelle 20: Orientierungsdaten der Trennflächen von Block 2 und 4

Block2				
Nr	Name	Farbe	Einfallsrichtung	Einfallswinkel
1	SF2_29	dunkelgrün	340	33
2	KF1_14	gelb	234	37
3	KF2_15	dunkelblau	117	52
4	KF3_20	hellblau	254	89
5	FF2_1 (freie Fläche 1)		250	82
6	FF2_2 (freie Fläche 2)		350	30

Block4				
Nr	Name	Farbe	Einfallsrichtung	Einfallswinkel
1	SF1_1	weiß	11	49
2	KF1_32	gelb	227	70
3	KF2_1	dunkelblau	121	68
4	KF3_4 (freie Fläche 1)		276	85
5	FF4_2 (freie Fläche 2)		20	30

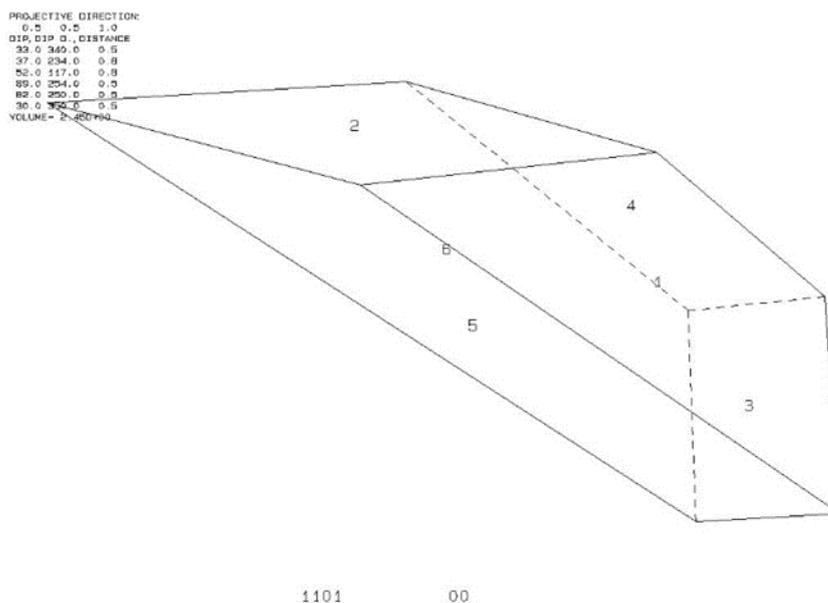


Abbildung 72: Rekonstruierte Form von Block 2

Das Volumen  $V_b$  von Block 2 beträgt  $2,5\text{m}^3$ .

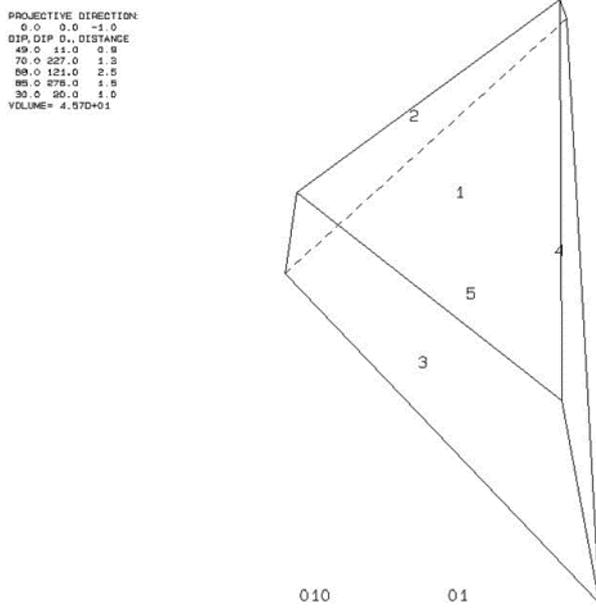
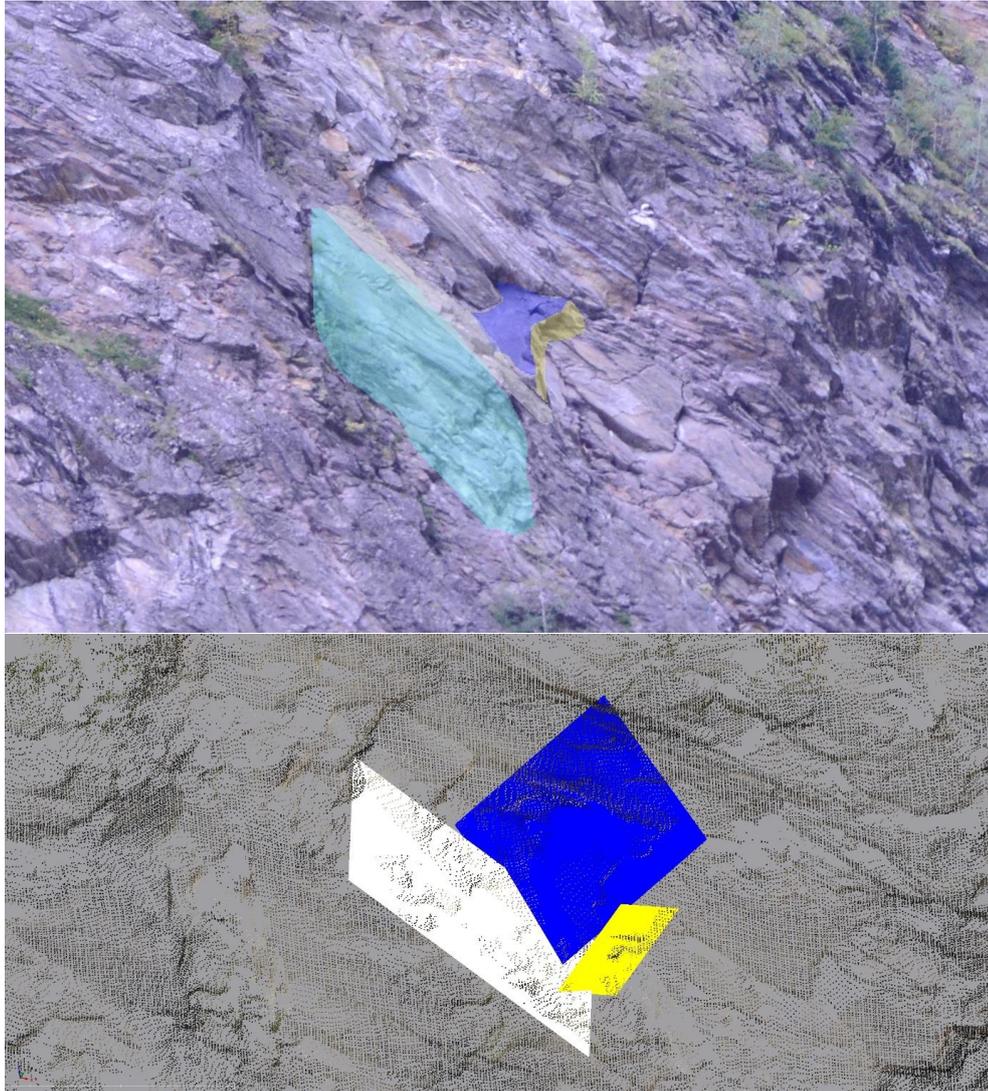


Abbildung 73: Rekonstruierte Form von Block 4

Das Volumen  $V_b$  von Block 4 beträgt **45,7m<sup>3</sup>**.



Abbildung 74: Trennflächen des 2. Blocks in der Nahaufnahme und im virtuellen Modell



*Abbildung 75: Trennflächen des 4. Blocks in der Nahaufnahme und im virtuellen Modell*

Zusammenfassend sind in Tabelle 21 nochmal alle berechneten Volumina aufgelistet. Es ist abermals sehr schön zu erkennen, dass  $V_b$  und  $V_k$  beinahe komplett übereinstimmen.

*Tabelle 21: Alle Ergebnisse der Volumenberechnungen (gelb...Bereich 1; rot...Bereich 4; blau...Bereich 3; grün...Bereich 2)*

	$V_b$ [m <sup>3</sup> ]	$V_k$ [m <sup>3</sup> ]	$V_p$ [m <sup>3</sup> ]
<b>Block 1</b>	33,1	42,5	156,57
<b>Block 2</b>	2,45	2,2	5,7
<b>Block 3</b>	68,5	62,11	144
<b>Block 4</b>	45,7	54,01	150
<b>Block 5</b>	4,99	5,23	18,6
<b>Block 6</b>	5,89	5,59	20,7

Die Bereiche 1, 3 und 4 weisen annähernd gleiche Blockgrößen auf, außer Block 2 im 4. Bereich, dieser passt, von der Größe her, eher in den 2. Bereich. Allerdings stimmen die Blockgrößen an sich, ganz gut mit der ersten GSI Einschätzung überein

## 5. Fazit

Um wirklich eine gute Einschätzung einer Felsböschung zu erhalten bedarf es großer Erfahrung und genauer Untersuchungsmethoden. Vor allem in Gebieten die nicht, bzw. nur sehr schwer und unter großem Risiko erreichbar sind. Daher ist es sinnvoll, auf Fernerkundungsmethoden wie den Laserscan zurückzugreifen. Dennoch gelingt es auch anhand der GSI-Tafel eine gute Einschätzung der Stabilität des Felsverbandes, vor allem in Bezug auf mögliche Blockgrößen, zu erhalten. Es ist sozusagen die einfachste und günstigste Methode eine Felswand zu untersuchen und gibt eine gute Grundlage für weitere Untersuchungen. Jedoch ist zu betonen, dass diese GSI-Tafel von Cai et al. (2004) für kleinere Felsböschungen ausgelegt ist, um GSI-Werte zur Berechnung von Gesteinsstabilitäten zu erhalten. Mit der modifizierten GSI-Tafel war es in diesem Fall aber möglich, in den 4 Bereichen mögliche Blockgrößen abzuschätzen. Dazu sei aber erwähnt, dass die entsprechenden GSI-Werte der modifizierten Tafel dann nicht gültig sind und daher aus der Tafel entfernt wurden. Ob es möglich ist, auch für solch große Klufkörper passende GSI-Werte für weitere Festigkeitsberechnungen zu generieren, müsste genauer untersucht werden. Für die Analyse von so großen Felsböschungen ist es vermutlich am besten, ein eigenes GSI-System zu entwickeln.

Ganz anders verhält es sich mit der Analyse der Felswand mittels Laserscan. Hier konnten auch über große Entfernung klare Trennflächen bestimmt und ein Trennflächensystem modelliert werden. Jedoch ist man auch hier etwas limitiert und zwar durch die Auflösung des Scans. Auf manchen Fotos in dieser Arbeit (z.B.: Abbildung 36) sieht man wesentlich mehr Trennflächen als im 3D-Modell eingezeichnet wurden. Dies lässt sich möglicherweise durch weitere Scans mit höherer Auflösung verbessern.

Die Berechnungen der Blockgrößen in den einzelnen Bereichen erwiesen sich aber als durchaus erfolgreich. Speziell die Berechnungen mit der Blocktheorie zeigen die tatsächliche Größe und Form der Blöcke. Diese stimmen auch weitestgehend mit den berechneten Blockgrößen  $V_k$  überein. Mit dem Persistenzfaktor in die Berechnungen involviert ergeben sich 3- bis 4-mal so große Volumina der Felsbrocken, was der Tatsache zu Grunde liegt, dass für die Ausbisslängen

der Trennflächen lediglich die tatsächlichen Längen der im 3D-Modell eingezeichneten Flächen verwendet wurden und auch für die Gesamtlänge der Trennflächen lediglich die Länge der Großflächen angenommen wurde. Dies resultiert wiederum in niedrigen Persistenzwerten und daher werden die Blöcke in den Berechnungen wesentlich größer. Deshalb ist die Berechnung von Blockgrößen mit Persistenzfaktoren eher geeignet, wenn ein direkter Zugang zur Felswand gegeben ist und Ausbisslängen und Gesamtlängen der Trennflächen an der Felswand gemessen werden können.

Als beste Methode zur Bestimmung von Kluftkörpern eignet sich, meines Erachtens nach, die Blocktheorie in Kombination mit Laserscandaten. Sie erlaubt es, exakte Volumina von realen Blöcken zu berechnen und die Kluftkörperform zu modellieren. Weiters könnten direkt mit der Blocktheorie einfache Stabilitätsanalysen durchgeführt werden, die aber für diese Arbeit nicht relevant waren. Die Blocktheorie ist zwar etwas aufwendiger wegen der DOS-Programme, jedoch meiner Meinung nach, die beste Lösung.

## 6. Literaturverzeichnis

- Barton, N, R Lien, und J Lunde. „Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support.“ *Rock Mech* 6, Nr. 4 (1974): 183-236.
- Bieniawski, Z T. „Engineering classification of jointed rock masses.“ *The Civil Engineer in South Africa*, Nr. 15 (1973): 335-344.
- Buckley, S J, J A Howell, H D Enge, und T H Kurz. *Terrestrial laser scanning in geology. Data acquisition, processing and accuracy considerations.* Journal of the Geological Society 165 (3), 2008.
- Cai, M. *Rock Mass Characterization and Rock Property Variability Considerations for Tunnel and Cavern Design.* Online: Springer, 2011.
- Cai, M, P K Kaiser, H Uno, Y Tasaka, und M Minami. „Estimation of rockmass strength and deformation modulus of jointed hard rock masses using the GSI System.“ *Int J Rock Mech Min Sci*, 2004: 3-19.
- Gögele, Christian. „Stabilitätsanalyse einer Felswand mittels terrestrischem Laserscan nördlich der Ortschaft Moos in Passeier (Südtirol).“ Technische Universität Graz, 2018.
- Goodman, Richard E, und Gen-hua Shi. *Block Theory and Its Application to Rock Engineering.* New Jersey: Prentice-Hall International, Inc., 1985.
- Haring, A. *Diplomarbeit "Modellierung terrestrischer Laserscan-Daten".* TU Wien: Institut für Photogrammetrie und Vernerkundung, 2003.
- Hoek, E, C Carranza-Torres, und B Corkum . „Hoek-Brown failure criterion - 2002 edition.“ Toronto, 2002.
- Hoek, E, P K Kaiser, und W F Bawden. *Support of underground excavations in hard rock.* Rotterdam, 1995.
- Kern, F. *Terrestrisches Laserscanning kurz & bündig.* i3mainz – Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik, FH Mainz, 2007.
- Laubscher, D H. „Geomechanics classification of jointed rock masses.“ *Mining Applications, Trans. Inst. Min. Metall.*, Nr. 86 (1977): 1-7.
- Liu, Quan. *Rock Mass Characterization.* TU Graz: Institute of Applied Geosciences, 2014.
- Liu, Quan, und Daniel Scott Kieffer. „Digital tunnel mapping using terrestrial LiDAR - a case study.“ *International Society for Rock Mechanics*

- EUROCK2012 Stockholm: Rock Engineering & Technology for Sustainable Underground Construction*, 2012: 135-145.
- Maerz, N H, und P Germain. „Block size determination around underground openings using simulations.“ In *Proceedings of the FRAGBLAST 5 Workshop on Measurement of Blast Fragmentation*, 215-223. Montreal, Canada, 1996.
- Marinos, Paul G, Vassilis Marinos, und Evert Hoek. „The Geological Strength Index (GSI): A Charakterization Tool For Assessing Engeneering Properties For Rock Masses.“ In *Underground works under special conditions*, Herausgeber: Taylor and Francis, 13-21. Taylor and Francis, 2007.
- Pahl, P J. „Estimating the mean length of discontinuity traces.“ *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*, 1981: 221-228.
- Pomella, H, M Stipp, und B Fügenschuh. *Thermochronological record of thrusting and strike-slip faulting along the Giudicarie fault system. Alps, Northern Italy: Tectonophysics* 579, 2012.
- Priest, S D. *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*. Niederlande: Springer, 1993.
- Sander, Bruno, und W Hammer. „Erläuterungen zur geologischen Karte Meran-Brixen.“ *Lernschriften* 16, 1929.
- Wehr, A, und U Lohr. „Airborne laser scanning—an introduction and overview.“ *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, 1999: 68-82.

## 7. **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Geographische Lage des Ortes Moos im Passeier (roter Punkt) ..	4
Abbildung 2: Geographische Lage der Felswand (roter Kreis).....	5
Abbildung 3: Übersicht der geologischen Karte mit den geologischen Einheiten, in Rot markiert die ungefähre Lage des Arbeitsgebietes (Pomella, et al., 2012) .....	6
Abbildung 4: Foto eines Felssturzes in der Nähe von Tramin, Südtirol. Gut zu erkennen ist, dass die kleineren Felsbrocken, im Hintergrund des Fotos, noch vor dem Haus liegengeblieben sind, wohingegen der große Block wesentlich weiter und durch das Gebäude hindurch gedonnert ist (spiegel.de, 2014)..	7
Abbildung 5: Foto der Tunnelwand mit den markierten Bohrpunkten für die Sprengladungen. Die Sprengladungen werden an die Gesteinsfestigkeit angepasst (tunnel-online.info, 2013).....	8
Abbildung 6: Aufnahme des Gebirges mit der Scan Line Methode (Liu, 2014)..	9
Abbildung 7: Anwendung der Photogrammetrie im Gelände. (links: zeigt die zwei Fotos mit den Referenzpunkten; rechts: zeigt das Analyisierte 3D-Bild mit den erfassten Flächen) (Liu, 2014) .....	11
Abbildung 8: Abtastschema des Laserscanners .....	12
Abbildung 9: Entfernungen der Scanpositionen zur Spitze des Untersuchungsbereiches .....	12
Abbildung 10: Fertiges 3D-Modell des Untersuchungsbereiches aus den Laserscandaten .....	13
Abbildung 11: Tafel für die Bestimmung des GSI (Geological Strength Index) (Cai, et al., 2004) .....	15
Abbildung 12:normal aufeinander stehende Kluffflächen .....	16
Abbildung 13: links: Aufschluss mit feinen Ablagerungsschichten die im Zuge der Sedimentation entstanden sind; rechts: eine große Störung geht mitten durch die Felswand.....	16
Abbildung 14: Beispiel für den Persistenzfaktor p .....	19

Abbildung 15: Screenshot des Arbeitsschrittes für die Auswahl des geeigneten Bereiches (ausgewählter Bereich in Rot dargestellt) .....	20
Abbildung 16: Screenshot des Arbeitsschrittes für das Erstellen einer Fläche im RiSCAN .....	21
Abbildung 17: Screenshot des Arbeitsschrittes mit erstellter Fläche (Blau) .....	21
Abbildung 18: Screenshot des Arbeitsschrittes zur Modifikation der Orientierung .....	22
Abbildung 19: Ausschnitt des 3D-Modells mit allen eingezeichneten Flächen (jede Trennflächenschar hat eine eigene Farbe) .....	23
Abbildung 20: Screenshot des Arbeitsschrittes zu Messung des Normalabstandes zweier Trennflächen.....	24
Abbildung 21: Koordinatensystem der kartesischen Vektordaten .....	25
Abbildung 22: Darstellung des Regelungsgrades mit 100% .....	27
Abbildung 23: Darstellung des Regelungsgrades mit 0% .....	27
Abbildung 24: Darstellung unterschiedlicher Regelungsgrade .....	28
Abbildung 25: Darstellung des Öffnungswinkels .....	29
Abbildung 26: Darstellung des Vertrauenskegels (roter Kreis) und des Öffnungswinkels (blauer Kreis) .....	30
Abbildung 27: Darstellung eines Boxplott und wie er gelesen wird .....	31
Abbildung 28: Screenshot des Programms RiSCAN mit dem fertigen 3D-Modell des Arbeitsgebietes .....	32
Abbildung 29: Screenshot des Programms Dips mit dem Stereoplot der SF1 .	33
Abbildung 30: Mit dem Programm B03HPGL.EXE rekonstruierte Form des Blockes 1 mit dem exakten Volumen.....	34
Abbildung 31: Foto der gesamten Felswand; der Untersuchungsbereich ist mit dem roten Kreis markiert.....	35
Abbildung 32: modifizierte Version der GSI-Tafel (ohne GSI-Werte) .....	37
Abbildung 33: Foto der Felswand mit den 4 Teilbereichen (rote Kreise) .....	38

Abbildung 34: Nahaufnahme des 1. Bereiches .....	39
Abbildung 35: GSI-Tafel für den Bereich 1 (in Rot markiert) .....	40
Abbildung 36: Nahaufnahme des 2. Bereiches .....	41
Abbildung 37: GSI-Tafel für den Bereich 2 (in Rot markiert) .....	42
Abbildung 38: Nahaufnahme des 3. Bereiches .....	43
Abbildung 39: GSI-Tafel für den Bereich 3 (in Rot markiert) .....	44
Abbildung 40: Nahaufnahme des 4. Bereichs .....	45
Abbildung 41: GSI-Tafel für den Bereich 4 (in Rot markiert) .....	46
Abbildung 42: Felswand mit den 4 Bereichen (rote Kreise) und mit allen eingezeichneten Trennflächen, die unterschiedlichen Farben weisen auf unterschiedliche Scharen hin.....	48
Abbildung 43: Flächen der SF1 in der Punktwolke.....	49
Abbildung 44: Stereoplot der Orientierungsdaten von SF1, links: alle Flächen; rechts: Schwerpunkfläche mit Dichtewolke der Polpunkte.....	50
Abbildung 45: Verbundene Trennflächen der SF1 .....	50
Abbildung 46: Flächen der SF2 in der Punktwolke.....	51
Abbildung 47: Stereoplot der Orientierungsdaten von SF2, links: alle Flächen; rechts: Schwerpunkfläche mit Dichtewolke der Polpunkte.....	52
Abbildung 48: Verbundene Trennflächen der SF2 .....	53
Abbildung 49: Flächen der KF1 in der Punktwolke.....	53
Abbildung 50: Stereoplot der Orientierungsdaten von KF1, links: alle Flächen; rechts: Schwerpunkfläche mit Dichtewolke der Polpunkte.....	55
Abbildung 51: Verbundene Trennflächen der KF1 .....	55
Abbildung 52: Flächen der KF2 in der Punktwolke.....	56
Abbildung 53: Stereoplot der Orientierungsdaten von KF2, links: alle Flächen; rechts: Schwerpunkfläche mit Dichtewolke der Polpunkte.....	57
Abbildung 54: Verbundene Trennflächen der KF2 .....	57
Abbildung 55: Flächen der KF3 in der Punktwolke.....	58

Abbildung 56: Stereoplot der Orientierungsdaten von KF3, links: alle Flächen; rechts: Schwerpunktläche mit Dichtewolke der Polpunkte.....	59
Abbildung 57: Verbundene Trennflächen der KF2 .....	60
Abbildung 58: Gesamtes Trennflächenmodell der Felswand; SF1=weiß; SF2=dunkelgrün; KF1=gelb; KF2=dunkelblau, KF3=hellblau .....	61
Abbildung 59: Stereoplot der Schwerpunktlächen.....	62
Abbildung 60: Boxplots der Trennflächenabstände (das x markiert den Mittelwert) .....	63
Abbildung 61: Beispiel für die Ermittlung der Ausbisslängen, hier für KF2 im RiSCAN(oben: Flächen der KF2 die auf einer Eben mit gleicher Orientierung liegen; unten: Großfläche der verbundenen Trennflächen von KF2) .....	64
Abbildung 62: Boxplots der Ausbisslängen (das x markiert den Mittelwert) ....	65
Abbildung 63: Foto der Felswand mit den 4 Teilbereichen (rote Kreise) .....	66
Abbildung 64: Rekonstruierte Form von Block 1 .....	68
Abbildung 65: Trennflächen des 1. Blocks in der Nahaufnahme und im virtuellen Modell .....	69
Abbildung 66: Rekonstruierte Form von Block 5 .....	71
Abbildung 67: Rekonstruierte Form von Block 6 .....	72
Abbildung 68: Trennflächen des 5. Blocks in der Nahaufnahme und im virtuellen Modell .....	73
Abbildung 69: Trennflächen des 6. Blocks in der Nahaufnahme und im virtuellen Modell .....	74
Abbildung 70: Rekonstruierte Form von Block 3 .....	76
Abbildung 71: Trennflächen des 3. Blocks in der Nahaufnahme und im virtuellen Modell .....	77
Abbildung 72: Rekonstruierte Form von Block 2 .....	79
Abbildung 73: Rekonstruierte Form von Block 4 .....	80

---

Abbildung 74: Trennflächen des 2. Blocks in der Nahaufnahme und im virtuellen Modell .....	81
Abbildung 75: Trennflächen des 4. Blocks in der Nahaufnahme und im virtuellen Modell .....	82

## 8. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Orientierungsdaten der SF1 (ER...Einfallrichtung [°]; EW...Einfallswinkel [°]) .....	49
Tabelle 2: Orientierungsdaten der SF2 (ER...Einfallrichtung [°]; EW...Einfallswinkel [°]) .....	51
Tabelle 3: Orientierungsdaten der KF1 (ER...Einfallrichtung [°]; EW...Einfallswinkel [°]) .....	54
Tabelle 4: Orientierungsdaten der KF1 (ER...Einfallrichtung [°]; EW...Einfallswinkel [°]) .....	56
Tabelle 5: Orientierungsdaten der KF1 (ER...Einfallrichtung [°]; EW...Einfallswinkel [°]) .....	58
Tabelle 6: Daten der statistischen Auswertung der Trennflächen; n...Anzahl der Trennflächen; ER/EW...Einfallrichtung und Einfallswinkel der Schwerpunktflächen; R[%]...prozentueller Regelungsgrad; k...Konzentrationsparameter; $\theta$ ...Vertrauenskegel; $\omega$ ...Öffnungswinkel ....	60
Tabelle 7: Statistische Auswertung der Trennflächenabstände [m] (n...Anzahl der Messungen) .....	62
Tabelle 8: Statistische Auswertung der Ausbisslängen [m] (n...Anzahl der Messungen) .....	65
Tabelle 9: Daten für die Volumenberechnungen von Block 1 .....	67
Tabelle 10: Ergebnis der Volumenberechnung von Block1 .....	67
Tabelle 11: Orientierungsdaten der Trennflächen von Block 1 .....	67
Tabelle 12: Daten für die Volumenberechnungen von Block 5 und 6.....	70
Tabelle 13: Ergebnis der Volumenberechnung von Block 5 und 6.....	70
Tabelle 14: Orientierungsdaten der Trennflächen von Block 5 und 6.....	71
Tabelle 15: Daten für die Volumenberechnungen von Block 3.....	75
Tabelle 16: Ergebnis der Volumenberechnung von Block 3.....	75
Tabelle 17: Orientierungsdaten der Trennflächen von Block 3 .....	75

---

Tabelle 18: Daten für die Volumenberechnungen von Block 2 und 4.....	78
Tabelle 19: Ergebnis der Volumenberechnung von Block 2 und 4.....	78
Tabelle 20: Orientierungsdaten der Trennflächen von Block 2 und 4.....	79
Tabelle 21: Alle Ergebnisse der Volumenberechnungen (gelb...Bereich 1; rot...Bereich 4; blau...Bereich 3; grün...Bereich 2) .....	83

## 9. Anhang

### 9.1 Fotos



Blickrichtung Süd auf die Felswand



Blickrichtung Süd auf gescannten Bereich der Felswand



Oberer Bereich der gescannten Felswand



Blickrichtung Südost auf gescannten Bereich der Felswand

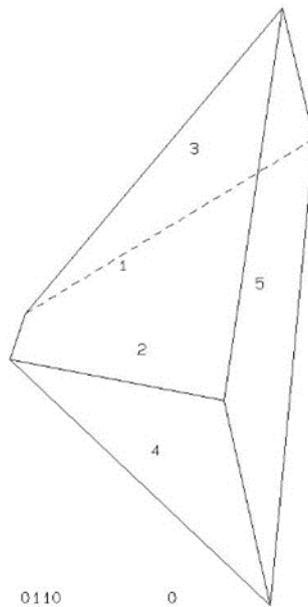


Unterer Bereich der gescannten Felswand

## 9.2 Blockformen

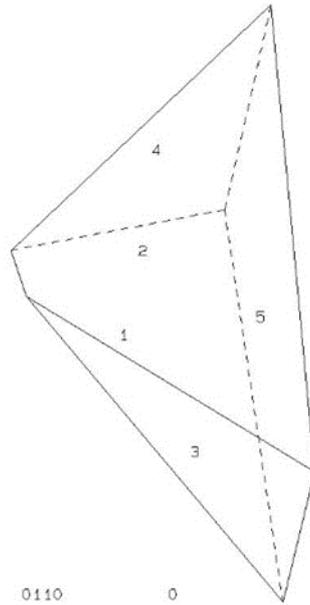
Block 1

```
PROJECTIVE DIRECTION:  
0.0 0.0 -1.0  
DIP, DIP D., DISTANCE  
50.0 17.0 0.2  
55.0 322.0 0.5  
60.0 252.0 1.3  
51.0 190.0 2.5  
50.0 277.0 1.0  
VOLUME= 2.91D+01
```



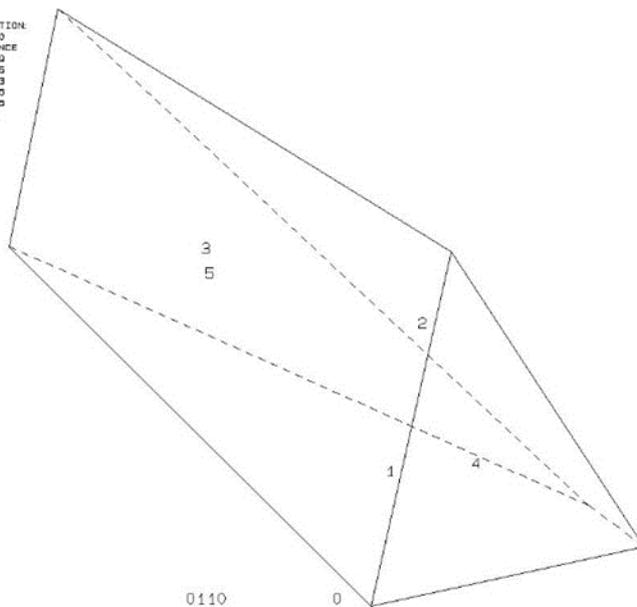
```

PROJECTIVE DIRECTION:
0.0 0.0 1.0
DIP, DIP D., DISTANCE
50.0 17.0 0.0
55.0 322.0 0.5
60.0 262.0 1.3
51.0 130.0 2.5
80.0 277.0 1.5
VOLUME= 3.31D+01
    
```



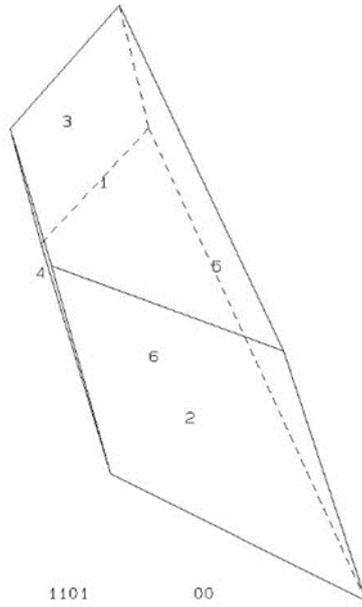
```

PROJECTIVE DIRECTION:
0.3 1.0 -1.0
DIP, DIP D., DISTANCE
50.0 17.0 0.0
55.0 322.0 0.5
60.0 262.0 1.3
51.0 130.0 2.5
80.0 277.0 1.5
VOLUME= 3.21D+01
    
```

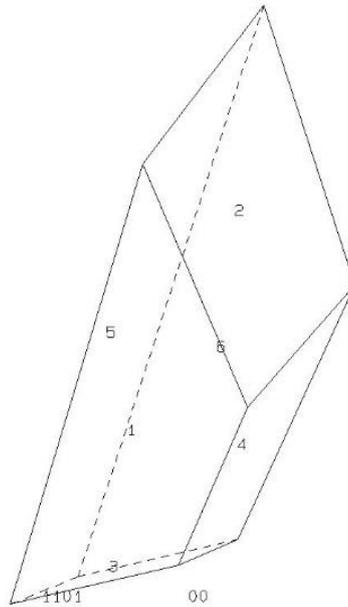


Block 2

PROJECTIVE DIRECTION:  
0.0 0.0 1.0  
DIP, DIP 0., DISTANCE  
33.0 340.0 0.5  
37.0 234.0 0.8  
52.0 117.0 0.8  
89.0 254.0 0.5  
82.0 260.0 0.5  
30.0 260.0 0.5  
VOLUME= 2.46D+00

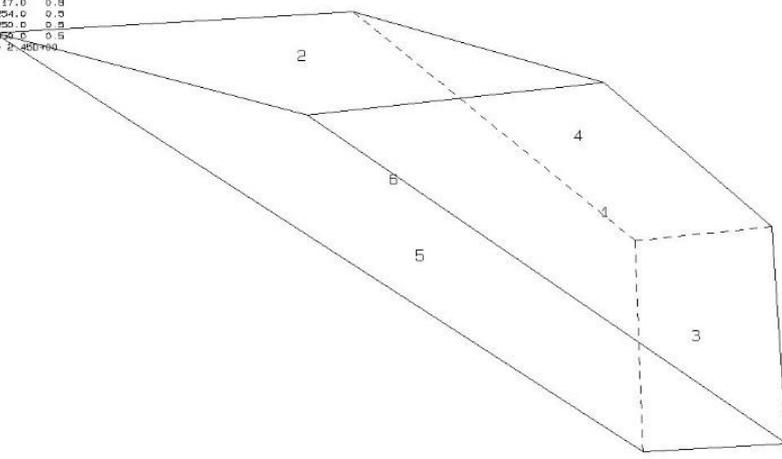


PROJECTIVE DIRECTION:  
-0.5 0.5 1.0  
DIP, DIP 0., DISTANCE  
33.0 340.0 0.5  
37.0 234.0 0.8  
52.0 117.0 0.8  
89.0 254.0 0.5  
82.0 260.0 0.5  
30.0 260.0 0.5  
VOLUME= 2.46D+00



```

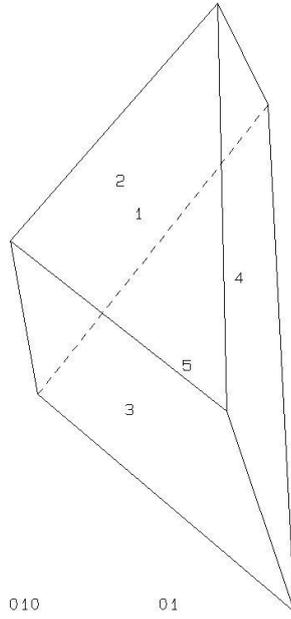
PROJECTIVE DIRECTION:
0.5 0.5 1.0
DIR, DIR D., DISTANCE
33.0 349.0 0.5
37.0 294.0 0.8
52.0 117.0 0.8
59.0 254.0 0.5
68.0 290.0 0.5
30.0 350.0 0.5
VOLUME = 2.400700
    
```



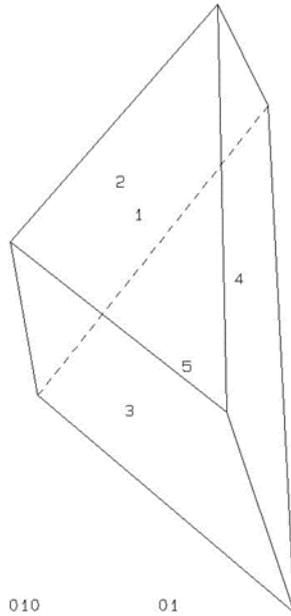
1101 00

Block 3

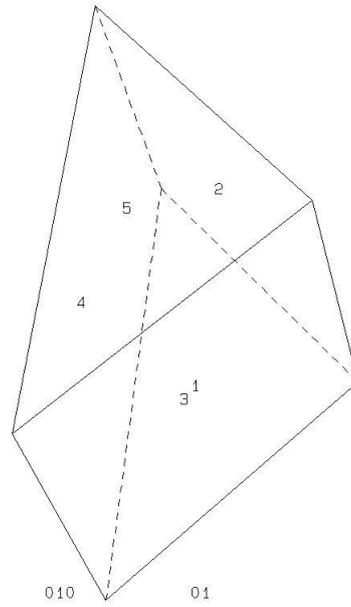
```
PROJECTIVE DIRECTION:  
0.0 0.0 -1.0  
DIP, DIP D., DISTANCE  
38.0 17.0 1.0  
64.0 241.0 1.5  
70.0 128.0 2.5  
80.0 279.0 1.0  
32.0 20.0 3.0  
VOLUME= 6.650+01
```



```
PROJECTIVE DIRECTION:  
0.0 0.0 -1.0  
DIP, DIP D., DISTANCE  
38.0 17.0 1.0  
64.0 241.0 1.5  
70.0 128.0 2.5  
80.0 279.0 1.0  
32.0 20.0 3.0  
VOLUME= 6.650+01
```

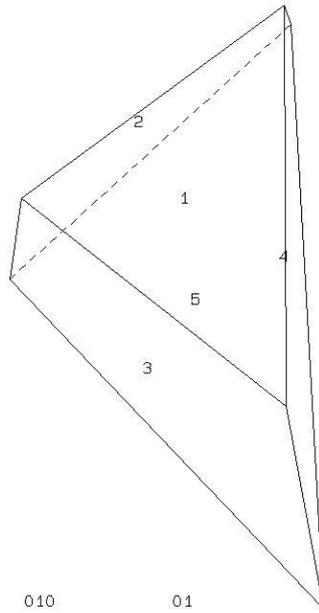


```
PROJECTIVE DIRECTION:  
-0.5 5.0 1.0  
DIP, D1P D., DISTANCE  
28.0 37.0 1.0  
64.0 241.0 1.5  
70.0 128.0 2.5  
80.0 278.0 1.0  
32.0 20.0 3.0  
VOLUME= 6.850+01
```

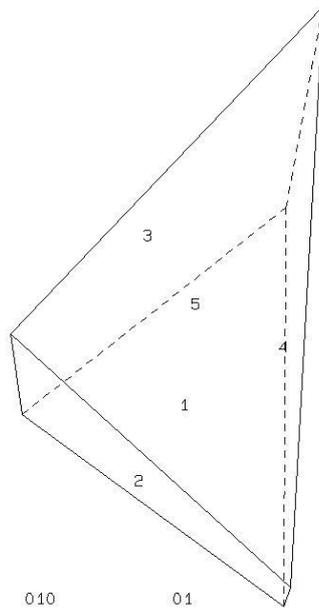


Block 4

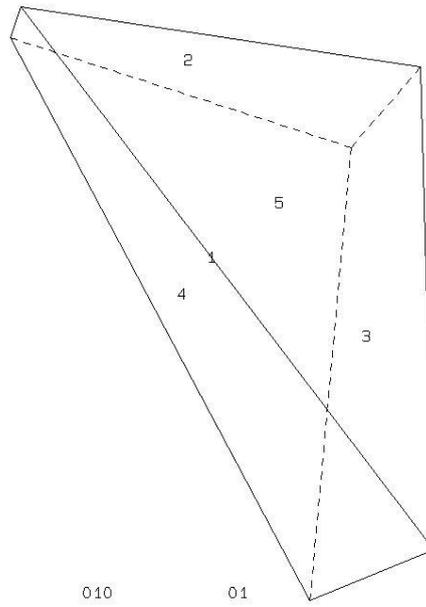
```
PROJECTIVE DIRECTION:  
0.0 0.0 -1.0  
DIP, DIP D., DISTANCE  
49.0 41.0 0.9  
70.0 227.0 1.3  
68.0 121.0 2.5  
85.0 878.0 1.5  
30.0 20.0 1.0  
VOLUME= 4.57D+01
```



```
PROJECTIVE DIRECTION:  
0.0 0.0 1.0  
DIP, DIP D., DISTANCE  
49.0 41.0 0.9  
70.0 227.0 1.3  
68.0 121.0 2.5  
85.0 878.0 1.5  
30.0 20.0 1.0  
VOLUME= 4.57D+01
```

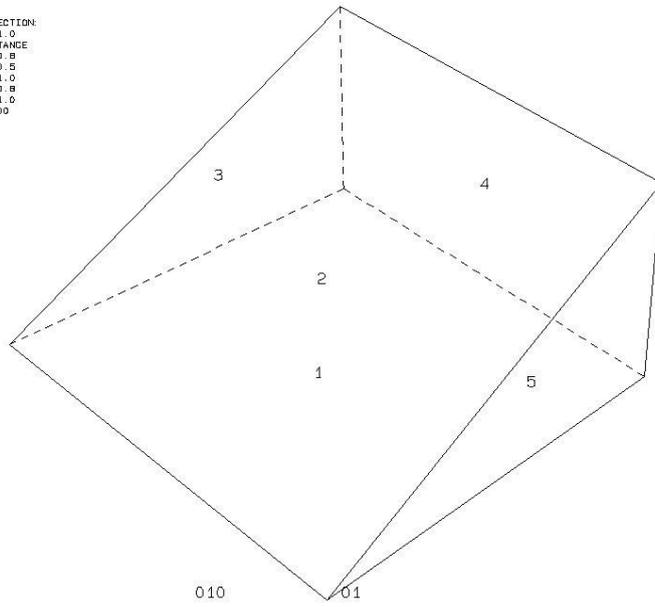


```
PROJECTIVE DIRECTION:  
1.0 1.0 1.0  
DIP, DIP D., DISTANCE  
45.0 11.0 0.3  
70.0 227.0 1.3  
88.0 121.0 2.5  
85.0 275.0 1.5  
30.0 20.0 1.0  
VOLUME= 4.57D+01
```

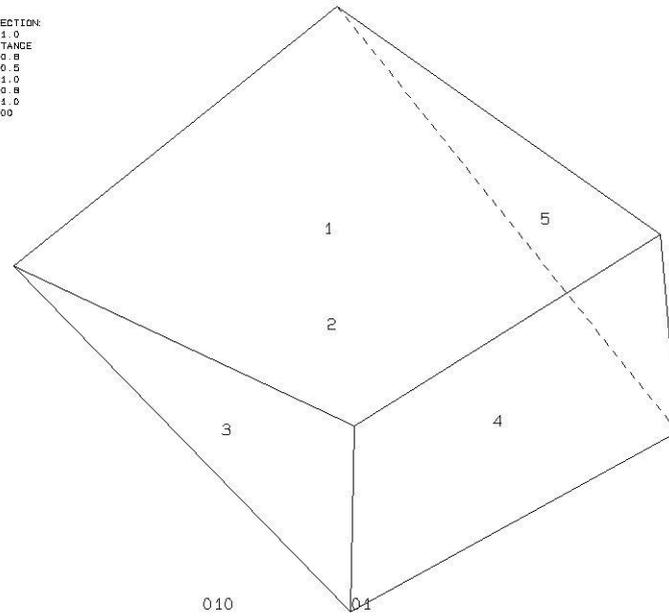


Block 5

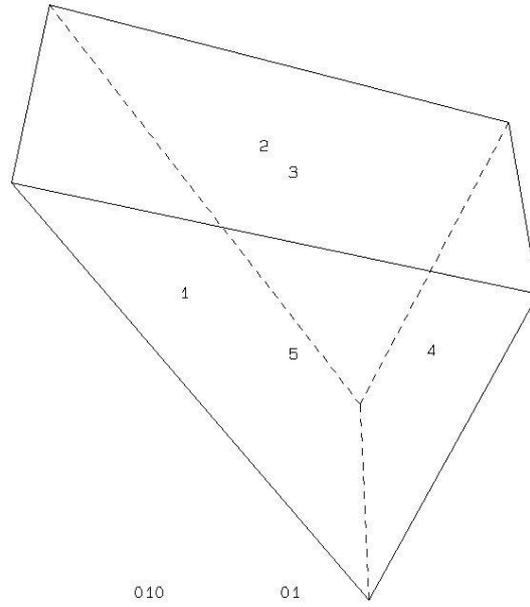
PROJECTIVE DIRECTION:  
 0.0 0.0 1.0  
 DIP, DIP D., DISTANCE  
 56.0 22.0 0.8  
 26.0 236.0 0.5  
 69.0 130.0 1.0  
 65.0 219.0 0.8  
 75.0 125.0 1.0  
 VOLUME= 4.990+00



PROJECTIVE DIRECTION:  
 0.0 0.0 -1.0  
 DIP, DIP D., DISTANCE  
 56.0 22.0 0.8  
 26.0 236.0 0.5  
 69.0 130.0 1.0  
 65.0 219.0 0.8  
 75.0 125.0 1.0  
 VOLUME= 4.990+00

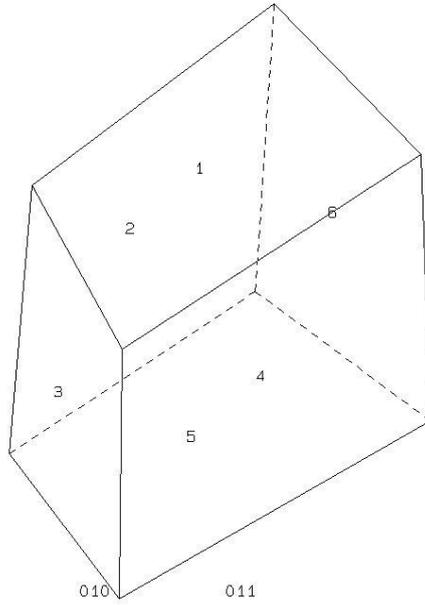


```
PROJECTIVE DIRECTION:  
0.8 -0.5 1.0  
DIP, DIP, D., DISTANCE  
SS: 0 22.0 0.8  
SE: 0 338.0 0.5  
SW: 0 130.0 1.0  
SS: 0 219.0 0.8  
TS: 0 125.0 1.0  
VOLUME= 4.890+00
```

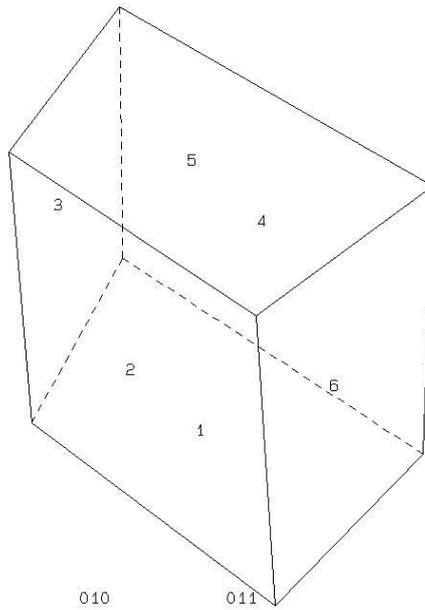


Block 6

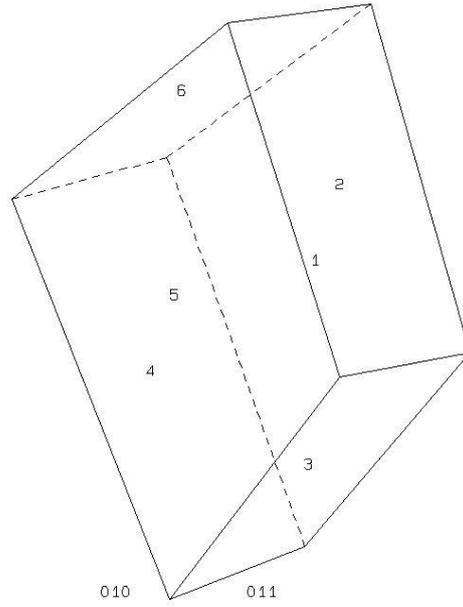
PROJECTIVE DIRECTION:  
0.0 0.0 -1.0  
DIP, DIP, D., DISTANCE  
80.0 1.0 0.8  
82.0 239.0 0.8  
79.0 100.0 1.0  
83.0 242.0 0.8  
80.0 6.0 0.8  
85.0 110.0 1.0  
VOLUME= 5.880+00



PROJECTIVE DIRECTION:  
0.0 0.0 1.0  
DIP, DIP, D., DISTANCE  
80.0 1.0 0.8  
82.0 239.0 0.8  
79.0 100.0 1.0  
83.0 242.0 0.8  
80.0 6.0 0.8  
85.0 110.0 1.0  
VOLUME= 5.880+00



```
PROJECTIVE DIRECTION:  
-0.5 0.8 1.0  
DIP, DIP D., DISTANCE  
50.0 1.0 0.8  
52.0 239.0 0.8  
73.0 100.0 1.0  
53.0 242.0 0.8  
50.0 6.0 0.8  
55.0 110.0 1.0  
VOLUME= 5.85D+00
```



### 9.3 Trennflächenabstände und Ausbisslängen

Trennflächenabstände [m] (gerundet auf eine Kommastelle)				
SF1	SF2	KF1	KF2	KF3
0,7	0,2	0,5	3,3	1,9
0,8	0,3	0,8	3,3	2
0,8	0,3	0,9	3,8	2,3
1	0,3	1	4,1	2,3
1	0,4	1	5	2,5
1,2	0,4	1,1	5,1	2,8
1,3	0,5	1,7	5,1	2,8
1,5	0,5	1,8	5,4	3,4
1,5	0,6	1,8	6,2	3,8
1,9	0,6	1,9	6,8	3,8
2	0,6	1,9	7,1	3,9
2,1	0,7	2,1		4,1
2,3	0,7	2,6		4,3
2,4	0,8	2,6		4,4
2,5	0,8	2,6		4,5
2,5	0,9	2,7		4,7
2,7	0,9	2,7		4,7
3	1,1	2,7		
3,1	1,3	2,7		
3,6	1,4	3		
4	1,4	3,1		
	1,5	3,4		
	1,5	3,5		
	1,5	3,5		
	1,6	3,5		
	1,7	3,8		
	1,8	4,2		
	1,8	4,4		
	1,8			
	1,9			
	2			
	2,3			

Ausbisslängen der Trennflächenscharen [m] (gerundet auf eine Kommastelle)				
SF1	SF2	KF1	KF2	KF3
3	1,9	0,5	1,3	6
3	2	1,3	1,5	12
3	2	1,4	1,7	8,3
3,2	2	1,8	2	9,8
3,5	2	1,9	2	6,5
4	2,3	2	2	5
4	2,5	2	2	12
4,5	2,5	2	2,5	9
5	3	2	2,5	5,5
5	3	2,1	3	5
6	3	2,5	3,5	6,6
8	3	2,5	5	
8	3,3	2,7	6	
8	4	3	6	
12	6	3	14	
16		3		
		3,2		
		5		
		5		
		5		
		5		
		6		
		6		
		8		