



## **MASTERARBEIT**

### **Stabilitätsanalyse mittels terrestrischem Laserscan am Feldkofel in Bad Bleiberg, Kärnten**

durchgeführt am  
Institut für angewandte Geowissenschaften

zur Erlangung des Titels  
“Master of Science” (MSc)

*Betreuer:*

Ao.Univ.-Prof. Mag.rer.nat. Dr.rer.nat. Qian LIU  
Technische Universität Graz Institut für angewandte Geowissenschaften

*Außeruniversitärer Partner:*

Dr. Richard BÄK  
Amt der Kärntner Landesregierung Abteilung 8 – Kompetenzzentrum für Umwelt, Wasser  
und Naturschutz

Eingereicht von  
Stefan Weber, BSc  
Matrikelnummer: 0710001

Graz, November 2013

## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

.....

(Stefan Weber)

## Danksagungen

Dank gilt insbesondere Herrn Dr. Richard Bäk und der Kärntner Landesregierung für die Übertragung und das Vertrauen in diese Arbeit, sowie die Bereitstellung von vorhandenen Gutachten und Airborne-Laserscandaten. Für die rasche Datenübermittlung bedanke ich mich an dieser Stelle bei Herrn DI Thomas Piechl, Herrn Christian Mairamhof, MSc (ALS Daten) und Herrn DI Hannes Burger (Gutachten).

Ein weiteres großes Dankeschön richtet sich an Herrn Dr. Ao.Univ.-Prof. Qian Liu für die Betreuung dieser Masterarbeit, der bei Fragen meinerseits stets mit Rat und Tat zur Seite stand und mit großem Einsatz um die Findung von Problemlösungen bemüht war.

Bei Herrn Mag. Peter Schreiber möchte ich mich für die rasche Installation von Programmen und für die Lösung von allfälligen Computerproblemen bedanken.

Des Weiteren möchte ich mich auch bei meinen Studienkollegen/innen Anna Neubauer und Florian Tauber bedanken, ohne die das Schreiben der Masterarbeit und die Kaffeepausen weitaus weniger unterhaltsam gewesen wären.

Danke auch an Robert Zimmerman, dessen Geschichten und Weisheiten mich stets faszinieren, inspirieren und zum Nachdenken animieren.

Graz, am .....  
.....  
(Stefan Weber)

## **Kurzfassung**

Der Feldkofel befindet sich in Bad Bleiberg in Kärnten. Da es dort immer wieder zu Steinschlägen kommt, ist es notwendig eine Stabilitätsanalyse durchzuführen. Auf Grund der Unzugänglichkeit des Geländes wäre eine herkömmliche Trennflächenvermessung nur mit sehr hohem Aufwand und unter einem Gefährdungsrisiko durchführbar. Im Rahmen dieser Arbeit wurde auf Fernerkundungsmethoden zurückgegriffen. Mittels terrestrischem Laserscan (LiDAR) ist eine hochpräzise Erfassung der Trennflächen möglich, um in weiterer Folge eine Stabilitätsanalyse durchzuführen. Die Bearbeitung der Laserscans und der Trennflächeneinbau erfolgen mittels „RiScan Pro“ und liefern Position, Orientierung und Häufigkeit dieser. Die Stabilitätsanalyse erfolgt mit der Software „FracMan“ und liefert als Resultat Werte für das instabile Gesteinsvolumen. Anhand von Airbornelaserscandaten kann eine exakte Hangmorphologie dargestellt werden, um Blockstürze zu simulieren. Mit einer weiteren Software namens „RocFall“ wurde eine zweidimensionale Sturzblocksimulation durchgeführt, um die Reichweiten von Sturzblöcken zu ermitteln und somit das Gefährdungspotential abzuschätzen.

## **Abstract**

The Feldkofel is located in Bad Bleiberg, Carinthia. Because rock-fall happens on a regular basis, it is necessary to perform a stability analysis. Due to the inaccessibility of the terrain a conventional discontinuity measurement would only be feasible with very high effort and danger. Therefore remote sensing methods were used in this work. Terrestrial laser scanning (LiDAR) is carried out for a high-precision detection of the discontinuity surfaces in order to subsequently perform a stability analysis. The processing of the laser scans and the fitting of discontinuities in the model is done by means of "RiSCAN Pro" and provides position, orientation and frequency of the discontinuities. The stability analysis is performed using the software "FracMan" and as a result provides values for the unstable rock volume. Based on Airbornelaserscan data the exact slope morphology is represented and used to simulate rock-fall. A program called "RocFall" was then used to perform a two-dimensional block fall simulation to determine the run-out ranges of falling blocks and to estimate the hazard potential.

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	II
Tabellenverzeichnis.....	IV
1 Problemstellung – Ziel.....	1
2 Arbeitsgebiet.....	2
2.1 Geografische Lage.....	2
2.2 Geologie.....	3
3 Methodik.....	4
3.1 Geländebegehung.....	4
3.2 Shape Metrix.....	4
3.3 LiDAR – terrestrischer Laserscan.....	6
3.4 Übersicht über die verwendeten Computerprogramme.....	12
4 Ergebnisse.....	13
4.1 Rohdaten – Datenvorbereitung.....	13
4.1.1 GPS Daten.....	13
4.1.2 Multi Station Adjustment.....	15
4.1.3 Entfernen der Vegetation.....	19
4.1.4 Mesh.....	21
4.2 Trennflächeneinbau.....	23
4.3 Statistische Auswertungen von Orientierungsscharen mittels Sphaira.....	26
4.3.1 Bereich Top.....	27
4.3.2 Bereich Middle .....	28
4.3.3 Bereich Cliff .....	29
4.3.4 Feldkofel gesamt.....	30
4.4 Statistische Auswertungen des orientierungsscharbezogenen Äquivalenzradius.....	31
4.5 Keyblock Theorie.....	35
4.6 FracMan.....	39
4.7 RocFall.....	53
5 Zusammenfassung der Ergebnisse.....	59
6 Interpretation - Fazit.....	61
7 Literaturverzeichnis.....	62
Anhang.....	64

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Geografische Lage des Feldkofels in den Maßstäben 1:200000 und 1:30000, Untersuchungsgebiet in rot markiert.....	2
Abbildung 2: Ausschnitt aus Geologischer Karte, Maßstab 1:50000, Blatt 200 – Arnoldstein; in rot ist der Bereich des Untersuchungsgebietes (Feldkofel) markiert.....	3
Abbildung 3: Shape Metrix Aufnahme a) eines der zwei Fotos mit aufgestellten Messmarken, b) generiertes 3D Bild mit eingebauten Trennflächen.....	5
Abbildung 4: Spezifikationen der Messgenauigkeit des GPS Empfängers „Leica Viva GNSS GS15“.....	8
Abbildung 5: Scannersetup; Laserscanner, montierte Kamera und Laptop sind für den Scanvorgang notwendig. GPS Gerät wird temporär montiert. Rechts im Bild ist ein Reflektor zu sehen (Markierung).....	8
Abbildung 6 a): Karte mit markierten Koordinaten der einzelnen Scanpositionen.....	9
Abbildung 6 b): Luftaufnahme mit markierten Koordinaten der einzelnen Scanpositionen.....	10
Abbildung 6 c): Laserscan Screenshot, Entfernungen der Scanpositionen vom Gipfelbereich des Feldkofel.....	10
Abbildung 7: Perspektivische Darstellung der Entfernungen des Scanners, Blick in Richtung Nordosten.....	11
Abbildung 8: Ausschnitt des Gipfels – Scanposition 1, Scan 4 in rot und Scanposition 2, Scan 3 in grün. Versatz eindeutig erkennbar.....	14
Abbildung 9: Programmfenster für MSA, vor der Analyse, Scanposition 1 ist in ihren X, Y, und Z Koordinaten fixiert.....	15
Abbildung 10: Ergebnis des ersten Analyseschrittes – die Standardabweichungen der einzelnen Scanpositionen zu Scanposition 1 betragen 0,5164m.....	16
Abbildung 11: Resultate der MSA – a) bis f) pro Schritt wird der „search radius“ halbiert und damit die Standardabweichung geringer.....	17
Abbildung 12: Ausschnitt des Gipfels – Scanposition 1, Scan 4 in rot und Scanposition 2, Scan 3 in grün. Durch MSA ist kein Versatz mehr vorhanden, die Scans liegen hochpräzise übereinander.....	18
Abbildung 13: Punktwolke, Ausschnitt aus dem Gipfelbereich a) mit Vegetation b) ohne Vegetation.....	19
Abbildung 14: Vergleich des gesamten Feldkofels a) mit Vegetation, b) ohne Vegetation.....	20
Abbildung 15: Gegenüberstellung einer Punktwolke und eines Meshes aus dem Bereich des östlichsten Klippenteils; a) Punktwolke, b) Mesh.....	21
Abbildung 16: Blick aus der Vogelperspektive auf das kartierte dreidimensionale Trennflächennetzwerk eines Tunnels.....	22

Abbildung 17: Gegenüberstellung von a) Foto und b) 3D Laserscandaten für die Identifizierung von Trennflächen.....	24
Abbildung 18: Sämtliche eingebaute Trennflächen dargestellt im 3D Laserscanmodell bei entfernter Vegetation; $\alpha$ ...Einfallrichtung, $\beta$ ...Einfallswinkel.....	25
Abbildung 19: Plot der der Trennflächenschwerpunkte im Bereich des Gipfels.....	27
Abbildung 20: Plot der der Trennflächenschwerpunkte im Mittelbereich.....	28
Abbildung 21: Plot der der Trennflächenschwerpunkte im Bereich Cliff.....	29
Abbildung 22: Plot der Trennflächenschwerpunkte sämtlicher Trennflächen des Feldkofels .....	30
Abbildung 23: Bildhafte Erklärung des Äquivalenzradius; sämtliche Formen haben den gleichen Flächeninhalt [aus FracMan7 Workshop; 2012].....	31
Abbildung 24: Histogramme des Äquivalenzradius aller Trennflächenscharen mit a) absoluter Häufigkeit entlang der Y-Achse und b) prozentueller Y-Achse und Density-Line.....	33
Abbildung 25: Darstellung eines von Trennflächen definierten Blockes; dargestellt sind freie Flächen, Trennflächen, ein potentieller Block, sowie freier und ablösbarer Raum [aus Goodman & Shi, 1985, modifiziert].....	35
Abbildung 26: Projektionsplot für Cliff_Part_3; durchgezogene Kreise sind Trennflächen, die freien Flächen sind durch Unterbrechungen gekennzeichnet, der blaue Kreis ist der Referenzkreis; alle vollständig außerhalb des roten Bereichs liegenden Blöcke sind potentiell instabil.....	36
Abbildung 27: Block 0101111.....	37
Abbildung 28: Zwei Trennflächen einer Schar, es ist kein eindeutiger Trennflächenabstand gegeben, in rot sind die unterschiedlichen Abstände eingezeichnet.....	38
Abbildung 29: Boxen der einzelnen Teilbereiche über dem aus dem Laserscan generierten 3D Hangmorphologiemodell.....	39
Abbildung 30: Box für den Bereich Top mit generierten Trennflächenscharen.....	42
Abbildung 31: Karte der Erdbebengefährdung Österreichs.....	45
Abbildung 32: Resultat der FracMan Modellierung für Top_Face_02_FA45_wWP, stabile Blöcke in grün, instabile in rot, Face wird in hellblau dargestellt.....	46
Abbildung 33: Lage der Profile; Profile mit Bezifferung in gelb, blaue Rechtecke markieren vorhandene Schutznetze.....	53
Abbildung 34: Lage der Sturzblöcke am Fuß des Feldkofels.....	54
Abbildung 35: Ergebnis der RocFall-Modellierung für Profil 1, Reibungswinkel = 45°; a) Kurve der totalen kinetischen Energie über das Profil; b) totale kinetische Energie am Schutznetz .....	56

Abbildung 36: Zusammenfassende Darstellung der Reichweite von Sturzblöcken anhand der Profile; in gelb mit Nummerierung sind die Profile dargestellt, blaue Rechtecke markieren die Schutznetze, in pink ist die Reichweite der von [Melzner et al, 2009] kartierten Sturzblöcke dargestellt, grüne Rechtecke markieren die mittels RocFall ermittelten maximalen Reichweiten der Sturzblöcke.....60

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Entfernung der Scanpositionen zum Gipfelbereich des Feldkofels.....	11
Tabelle 2: GPS Daten aller Scanpositionen; Sx – Nummer der Scanposition; Rx_Sx – Reflektornummer in Bezug auf die jeweilige Scanposition; Koordinaten in [m]; KQ Lage und Höhe gibt die Standardabweichungen der Messungen an (in [m]); Koordinatensystem: Gauss-Krüger.....	13
Tabelle 3: Parameter der Trennflächen im Bereich Top; $\alpha$ ...Einfallrichtung, $\beta$ ...Einfallswinkel, R...prozentueller Regelungsgrad, K...Konzentrationsparameter, $\delta$ ...Vertrauenskegel, $\omega$ ...sphärischer Öffnungsgrad.....	27
Tabelle 4: Parameter der Trennflächen im Bereich Middle; $\alpha$ ...Einfallrichtung, $\beta$ ...Einfallswinkel, R...prozentueller Regelungsgrad, K...Konzentrationsparameter, $\delta$ ...Vertrauenskegel, $\omega$ ...sphärischer Öffnungsgrad.....	28
Tabelle 5: Parameter der Trennflächen im Bereich Cliff; $\alpha$ ...Einfallrichtung, $\beta$ ...Einfallswinkel, R...prozentueller Regelungsgrad, K...Konzentrationsparameter, $\delta$ ...Vertrauenskegel, $\omega$ ...sphärischer Öffnungsgrad.....	29
Tabelle 6: Parameter aller Trennflächen des Feldkofels; $\alpha$ ...Einfallrichtung, $\beta$ ...Einfallswinkel, R...prozentueller Regelungsgrad, K...Konzentrationsparameter, $\delta$ ...Vertrauenskegel, $\omega$ ...sphärischer Öffnungsgrad.....	30
Tabelle 7: Statistikübersicht des Äquivalenzradius für alle Trennflächenscharen im Bereich des gesamten Feldkofels.....	32
Tabelle 8: Trennflächenabstände im Bereich Cliff.....	37
Tabelle 9: Zusammenfassung der in FracMan erstellten Boxen für die Trennflächengenerierung.....	40
Tabelle 10: $P_{32}$ mit den aus dem Modell abgelesenen Werten für die Trennflächensumme und den mit Bezug auf die Modelloberfläche umgerechneten Trennflächensummen und daraus resultierender $P_{32}$ Werte (gekennzeichnet mit *); Werte aus dem Bereich Cliff...	41
Tabelle 11: Tabelle mit sämtlichen notwendigen Eingangsparametern für die Erstellung von Trennflächen in FracMan, aufgeteilt in die drei Teilbereiche Top, Middle und Cliff.....	43
Tabelle 12: Werte der freien Flächen (=Faces), aus RiScan entnommen.....	44
Tabelle 13: Eingabeparameter für die geomechanische Analyse in FracMan.....	46
Tabelle 14: Zusammenfassung der aufsummierten instabilen Volumina; Failure Mode (=Versagensmechanismus): f...free fall (frei fallen), s...sliding (gleiten); 0...keine instabilen Blöcke vorhanden.....	48



Tabelle 15: Zusammenfassung der gesamten (=total) und durchschnittlichen (=average) instabilen Blockvolumina für beide Versagensmechanismen; FF...free fall (frei fallende Blöcke), Sl...sliding (gleitende Blöcke), 0...keine instabilen Blöcke vorhanden.....	49-52
Tabelle 16: Koordinaten der Start- und Endpunkte der Profile.....	54
Tabelle 17: Werte der Schutznetze.....	54
Tabelle 18: Blockursprung und Gewicht pro Profil.....	55
Tabelle 19: Ergebnisse der RocFall Modellierungen in Bezug auf die das Schutznetz überspringenden Blöcke.....	55
Tabelle 20: Prozentueller Anteil des instabilen Volumens, alle Werte in [%].....	57
Tabelle 21: prozentueller Anteil der Blöcke, die das Schutznetz überspringen.....	58
Tabelle 22: absolute Versagenswahrscheinlichkeit der einzelnen Bereiche, wenn nicht anders angegeben sind alle Werte in [%]; FA...friction angle.....	58

# 1 Problemstellung - Ziel

Am Feldkofel in Bad Bleiberg kommt es immer wieder zu Steinschlägen. Da dadurch Menschen und Infrastruktur gefährdet sind wurden bereits Maßnahmen zur Sicherung getroffen und Steinschlagnetze errichtet. Dazu wurden bereits einige Arbeiten im Bereich des Feldkofels durchgeführt, unter anderem von Mölk, 2007 und 2008, sowie von Melzner et al, 2009.

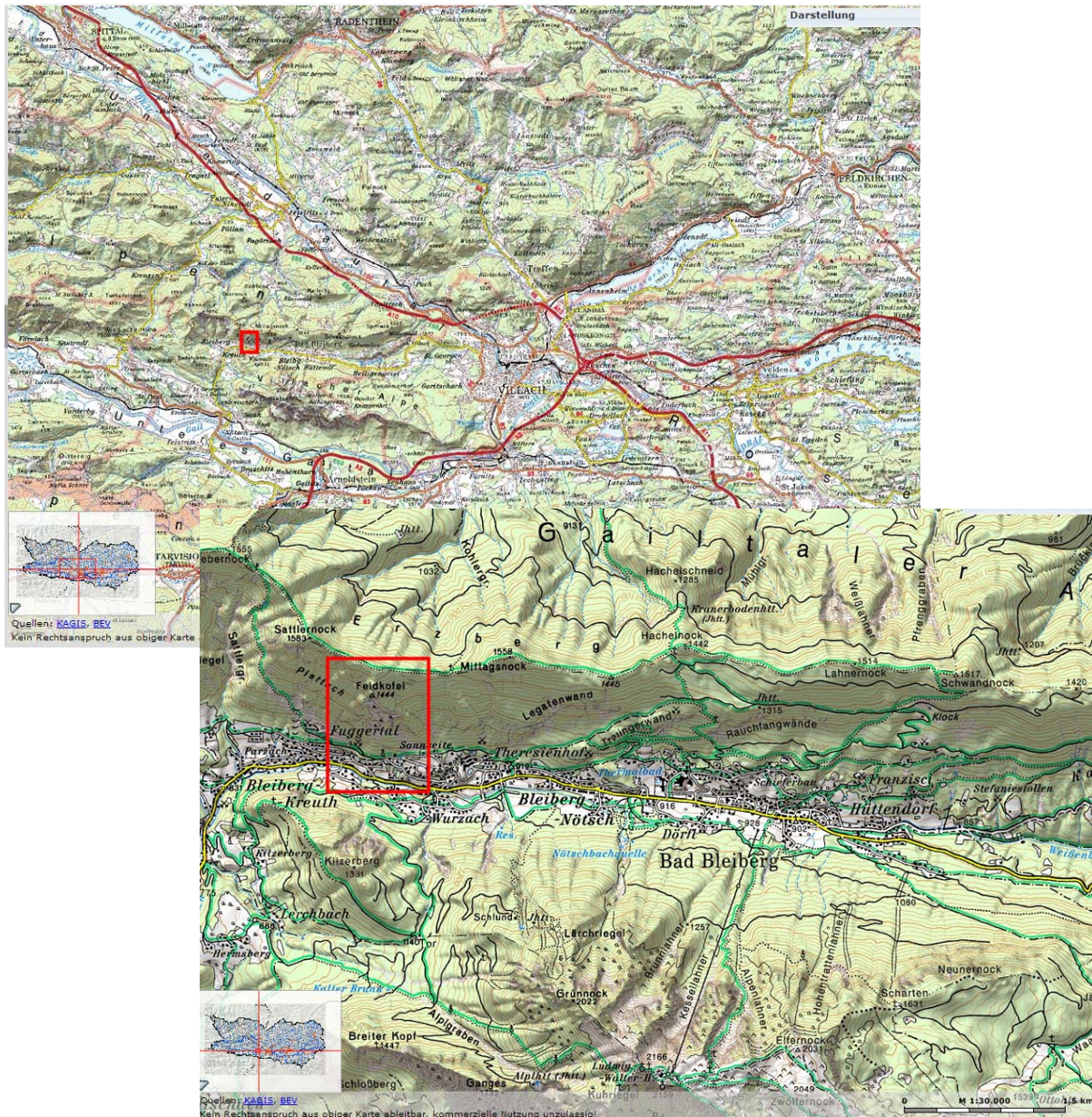
Im Bereich des Feldkofels ist das Gelände jedoch teils sehr steil und unzugänglich, daher ist eine herkömmliche Kartierung nicht in allen Bereichen möglich bzw. nur unter großem Aufwand und mit einem teils sehr hohen Gefahrenpotential verbunden. Für eine Stabilitätsanalyse ist es jedoch notwendig Trennflächencharakteristika wie Position, Orientierung, Häufigkeit und die natürliche Kluffkörpergröße zu erfassen. Des Weiteren ist für die Modellierung eine möglichst naturgetreue Darstellung der Hangmorphologie nötig. Für diese Problemstellung erweisen sich Fernerkundungsmethoden wie der terrestrische Laserscanner auf Grund seiner Eigenschaften als sehr nützlich. Mittels Laserscan und RTK-GPS können Messungen im Millimeterbereich durchgeführt werden und somit die räumliche Verteilung von Trennflächen erfasst und die Kubatur von instabilen Blöcken ermittelt werden. Um in weiterer Folge eine Steinschlagsimulation durchzuführen kann für die Hangmorphologie auf Airborne Laserscandaten zurückgegriffen werden. Die Oberfläche kann auf Grund von Beobachtungen und Fotos exakt simuliert werden, z.B. ob es sich um nackten Fels oder bewaldetes Gebiet handelt.

Ziel der vorliegenden Masterarbeit ist es, eine Stabilitätsanalyse des Feldkofels in Bad Bleiberg anhand von Fernerkundungsmethoden durchzuführen, insbesondere mittels terrestrischem Laserscan. Anhand der daraus gewonnenen Daten kann eine Sturzblockanalyse durchgeführt werden, um ein etwaiges Gefährdungspotenzial zu ermitteln. Dies geschieht auf Anregung von Herrn Dr. Bäk und der Kärntner Landesregierung, da auf Grund der Arbeiten von Mölk (2007, 2008) und Melzner (2009) eine Stabilitätsanalyse notwendig ist.

## 2 Arbeitsgebiet

### 2.1 Geografische Lage

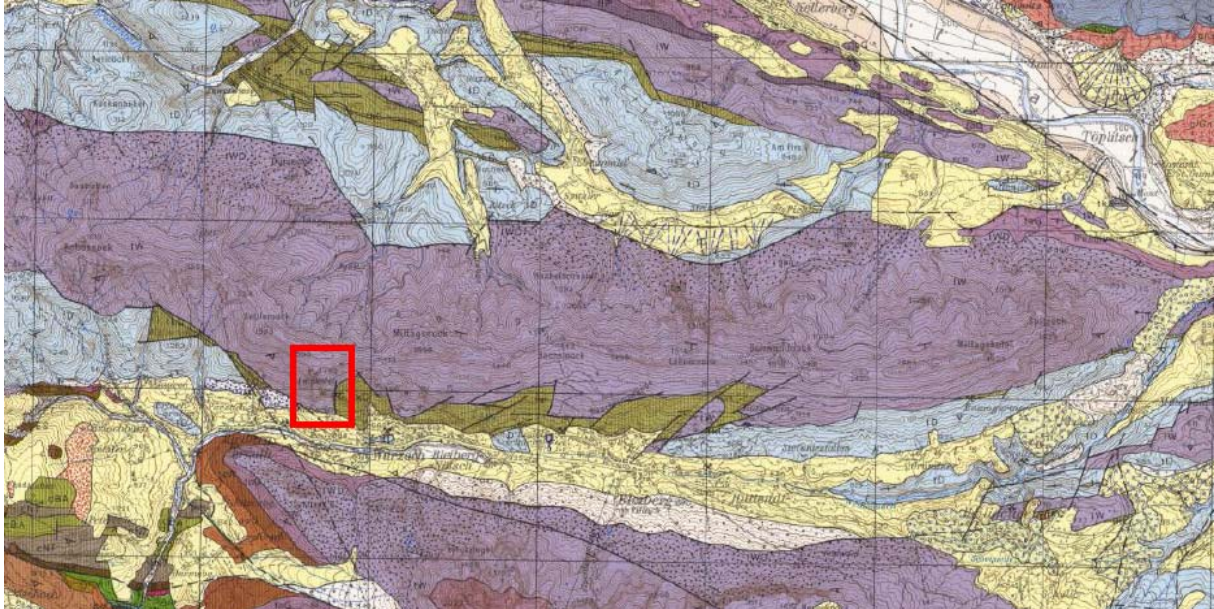
Der Feldkofel befindet sich in Bad Bleiberg im Süden Kärntens, westlich von Villach. Er liegt im nord-östlichen Teil der Katastralgemeinde Bleiberg Kreuth und hat eine Erhebung von 1444m Seehöhe. Abbildung 1 zeigt die geografische Lage des Untersuchungsgebietes in rot markiert auf Karten der Maßstäbe 1:200000 und 1:30000 [Quelle: KAGIS – Kärnten Atlas].



**Abbildung 1:** Geografische Lage des Feldkofels in den Maßstäben 1:200000 und 1:30000, Untersuchungsgebiet in rot markiert

## 2.2 Geologie

Das Untersuchungsgebiet befindet sich auf der geologischen Karte Blatt 200, Arnoldstein. In Abbildung 2 ist der Feldkofel auf der Karte in rot markiert [Anderle; 1977].



**Abbildung 2:** Ausschnitt aus Geologischer Karte, Maßstab 1:50000, Blatt 200 – Arnoldstein; in rot ist der Bereich des Untersuchungsgebietes (Feldkofel) markiert [aus Anderle; 1977]

Das Arbeitsgebiet ist Teil des Drauzuges und gehört zur nordalpinen Trias des Oberostalpins. Bei den Gesteinen handelt es sich dabei um Wettersteinkalkformationen, die im Ladin entstanden sind [Anderle; 1977].

Die Mächtigkeit der Bankung variiert in den unterschiedlichen Bereichen zwischen mehreren Dezimetern und Metern. Im Bereich des Gipfels ist teilweise sogar ein massiges Erscheinungsbild anzutreffen.

Im unteren Bereich ist die Morphologie durch Schuttfächer gekennzeichnet, die teilweise ein Produkt des stattgefundenen Bergbaues sind. Bis ins Jahr 1993 fand in Bleiberg aktiver Bergbau statt, es gab etwa 1300 Stollen und Schächte über den gesamten Bleiberger Erzberg verteilt, auch im Bereich des Feldkofels. [Quelle: <http://www.bergbauverein-bad-bleiberg.at/index.php/ueber-den-bergbau>; Stand: 3.9.2013].

Durch Verwitterungsprozesse und Entspannung des Gebirges ist es höchstwahrscheinlich zu einer Auflockerung und damit zu einer Destabilisierung des Gesteinsverbandes gekommen, was in weiterer Folge zu Instabilitäten führt.

### **3 Methodik**

Im Rahmen der Masterarbeit kamen verschiedene Methoden zum Einsatz, die in weiterer Folge kurz erläutert werden:

- Geländebegehung
- Shape Metrix Aufnahmen
- Terrestrischer LiDAR (=Laserscan)
- Computerprogramme

#### **3.1 Geländebegehung**

Um einen ersten Überblick über die gegebene Situation zu bekommen und um erste Parameter aufzunehmen erfolgte eine mehrtägige Geländebegehung. Da das Gebiet um den Feldkofel auf Grund sehr steiler Hänge, Schutthalden und Überhänge teilweise schlecht zugänglich ist, konnten nur an einigen wenigen Aufschlüssen Messungen erfolgen. Zu den im Gelände durchgeführten Aktionen gehören Clar Kompass Messungen sowie Fotos von relevanten Aufschlüssen. Des Weiteren wurden auch Fotos vom Bergfuß mit Blick auf den Gipfel des Feldkofels geschossen, um in weiterer Folge zusätzliche Informationen für die Trennflächenauswertung anhand des Laserscanmodells zu erhalten. Die Fotos befinden sich im Anhang.

Wie bereits erwähnt sind viele Aufschlüsse unzugänglich, wodurch die Erfassung mittels Laserscanner durchaus als erstrebenswert anzusehen ist. An ein paar Aufschlüssen entlang eines Pfades östlich des Feldkofels konnten Messungen durchgeführt werden. Da dieser Pfad jedoch Richtung Sonnblick führt, sind die Messungen in weiterer Folge jedoch nicht in die Auswertungen eingeflossen.

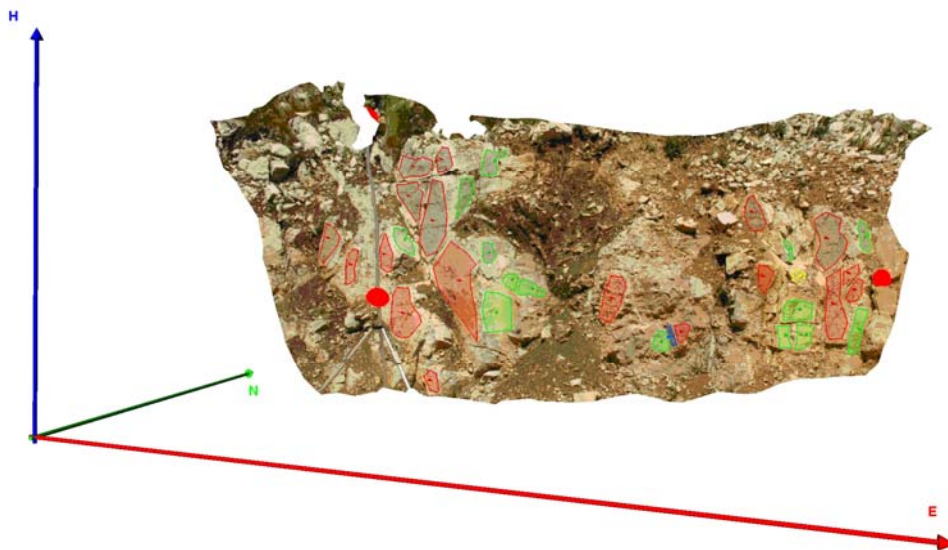
#### **3.2 Shape Metrix**

Bei Shape Metrix handelt es sich um ein System zur photogrammetrischen Vermessung von Trennflächen, welches aus einer kalibrierten Digitalkamera und einer Auswertungssoftware besteht. Dabei wird aus zwei nebeneinander geschossenen Fotos mittels Berechnung ein dreidimensionales Bild erstellt. In diesem können nun mittels Software Einfallrichtungen und –winkel, sowie Flächen gemessen werden.

Bei der Erstellung der Fotos ist es nötig, Messmarken aufzustellen, die auf beiden Fotos klar sichtbar sind, um später eine exakte Korrelation zu erstellen. Des Weiteren muss eine Profillinie zwischen den Messmarken eingemessen werden, damit Messungen überhaupt ermöglicht werden. In Abbildung 3 a) ist ein Foto mit aufgebauten Messmarken dargestellt, 3 b) zeigt das im Programm ausgewertete 3D Bild mit eingebauten Trennflächen.



a) Foto für die Erstellung eines 3D Bildes in Shape Metrix



b) In Shape Metrix erstelltes 3D Bild mit eingebauten Trennflächen

**Abbildung 3:** Shape Metrix Aufnahme a) eines der zwei Fotos mit aufgestellten Messmarken, b) generiertes 3D Bild mit eingebauten Trennflächen

Es ist notwendig, dass die Messmarken möglichst horizontal aufgestellt und von vorne fotografiert werden. Dabei sollten die Messmarken möglichst nahe am Aufschluss positioniert sein, was auf Grund der Geländesituation am Feldkofel jedoch nicht möglich ist: da das Gelände im Bereich des Feldkofels sehr steil und teils unzugänglich ist konnte am Feldkofel direkt keine Messung durchgeführt werden. Stattdessen wurde im Bereich des Sonnblicks, etwa 300m östlich, eine Aufnahme getätigt und später am Computer vermessen (vgl. Abb. 3). Da diese Messungen jedoch nicht direkt am Feldkofel sind, wurden sie in der Auswertung nicht berücksichtigt.

Bei Zugänglichkeit des Geländes ist Shape Metrix sehr gut geeignet, um eine präzise Trennflächenerfassung durchzuführen. Im Rahmen dieser Arbeit erweisen sich Shape Metrix Aufnahmen auf Grund der großen Distanz zu Aufschläüssen und der Unzugänglichkeit des Geländes jedoch als praktisch nicht durchführbar.

### 3.3 LiDAR - terrestrischer Laserscan

Bei Laserscans wird ein von einem Scanner ausgesandter Laserstrahl an einem Ziel reflektiert und zum Scanner zurückgeschickt, wo er erfasst wird. Daraus ergibt sich eine große Punktwolke, die ein exaktes Abbild der gescannten Umgebung darstellt. Dabei gilt es vor dem Scannen, nach [Buckley et al; 2008], [Liu et al; 2009] und [Liu; 2013], jedoch einige Punkte zu beachten:

- Wahl des Scanners
- Positionierung
- Reflektorensetup
- Koordinatenbestimmung

#### • Wahl des Scanners

Je nach Zweck und geländespezifischer Gegebenheiten können unterschiedliche Scanner eingesetzt werden. Die Scanner können sich in ihren äußeren als auch in ihren inneren Parametern stark unterscheiden und deshalb für einen gewissen Verwendungszweck ungeeignet sein. Zu den äußeren Parametern zählen Größe, Gewicht, Material etc., zu den inneren z.B. Auflösung, Reichweite, Genauigkeit und Geschwindigkeit.

#### • Positionierung

Bei der Aufstellung des Scannersetups ist zu beachten, dass das gesamte Aufnahmegebiet vollständig erfasst wird und keine „Schattenbereiche“ entstehen, welche vom Scanner nicht erfasst werden. Es ist daher nötig einen Aufschluss aus mehreren Positionen zu scannen, unter anderem auch aus verschiedenen Seehöhen, falls möglich. Je nach Scannermodell muss auch auf die Entfernung zum Aufschluss geachtet werden.

#### • Reflektorensetup

Um verschiedene Scanpositionen miteinander zu verbinden ist es notwendig Reflektoren aufzustellen. Dabei handelt es sich um mit einer hochreflexiven Folie ummantelte Zylinder (10cm hoch, d=10cm), welche auf einer Stange angebracht werden und dann in dem vom Scanner erfassten Bereich aufgestellt werden. Es ist zu beachten, dass die Reflektoren in ausreichendem Abstand voneinander und in unterschiedlichen Seehöhen aufgestellt werden, um später eine möglichst präzise Registrierung der einzelnen Scanpositionen zu ermöglichen. Deshalb ist es notwendig, dass für die jeweilige Scanpositionen mindestens drei Reflektoren gescannt werden. Durch die Koordinatenbestimmung der Reflektoren mittels GPS können die einzelnen Scanpositionen später miteinander registriert und zusammengefügt dargestellt werden.

#### • Koordinatenbestimmung

Um Trennflächencharakteristika wie Position, Orientierung, Abstand, Ausbisslänge, Verschneidung, Termination (beschreibt, ob eine Trennfläche im Gestein oder in einer anderen Trennfläche endet), Kluftkörpergröße sowie die Hangmorphologie genau zu erfassen, müssen die LiDAR-Messungen in einem einheitlichen Koordinatensystem registriert werden, damit in Folge der Datenverarbeitung genaue und vor allem naturnahe Ergebnisse und Messungen möglich sind. Im Gelände müssen daher die Position des Scanners und aller Reflektoren mittels GPS erfasst werden, um weit voneinander entfernte Scanpositionen, die nicht dieselbe Reflektorenaufstellung haben, zusammenzufügen.

Im konkreten Fall dieser Masterarbeit wurde der Laserscanner „Z620“ der Firma RiegI verwendet. Folgende Tabelle listet die wichtigsten Spezifikationen des Scanners auf [aus RiegI; 2008]. Dazu gehören die Eigenschaften für Line Scan (=schnelle Scans), Frame Scan (=langsame Scans), sowie Distance Meter (=Entfernungsmesser).

<b>Scanning Mechanism</b>	rotating/oscillating mirror
<b>Number of Mirror Facets</b>	3
<b>Scan Angle Range</b>	up to 80°
<b>Angular Movement</b>	Linear
<b>Scan Rate</b>	1 scan/s to max. 20 scans/s
<b>Angle Step Width <math>\Delta X</math></b> between consecutive laser shots	$0.004^\circ \leq \Delta X \leq 0.02^\circ$
<b>Angular Resolution</b>	0.002°

Line Scan (fast scanning direction) [aus RiegI; 2008]

<b>Scanning Mechanism</b>	Rotating optical head
<b>Scan Angle Range</b>	0° up to max. 360° (limited by optical end switches and mechanical end Stops)
<b>Angular Movement</b>	linear
<b>Scan Speed</b>	0.01°/s to max. 15°/s
<b>Angle Step Width <math>\Delta X</math></b> between consecutive scan lines	$0.004^\circ \leq \Delta X \leq 0.75^\circ$
<b>Angular Resolution</b>	0.0025°

Frame Scan (slow scanning direction) [aus RiegI; 2008]

<b>Measurement Principle</b>	Single-shot time-of-flight measurement
<b>Measurement Range</b> (without beam widening lens) <b>For natural targets, reflectivity <math>\geq 80\%</math></b> <b>For natural targets, reflectivity <math>\geq 10\%</math></b>	Up to 2000 m Up to 650 m
<b>Minimum Range</b>	2 m
<b>Measurement Accuracy</b>	10 mm
<b>Repeatability</b>	10 mm (single shot) 5 mm(averaged)
<b>Target Detection Modes</b>	First target, last target or alternating
<b>Laser Pulse Repetition Rate PRR</b>	24000 Hz
<b>Laser Wavelength</b>	near infrared
<b>Laser Beam Divergence</b> (full angle, $1/e^2$ value)	0.15 mrad without beam widening lens ~ 2.2 mrad with beam widening lens

Distance Meter [aus RiegI; 2008]

Um in weiterer Folge die exakten Positionen des Scanners und der Reflektoren zu bestimmen kam ein GPS Gerät der Firma Leica zum Einsatz. Es handelt sich dabei um das Modell „Leica Viva GNSS GS15“. Die Spezifikationen der Messgenauigkeit sind in Abbildung 4 dargestellt. Der GPS Rover wurde gemeinsam mit APOS (Austrian Positioning Service) RTK (Real Time Kinematic) eingesetzt, um eine Genauigkeit im Zentimeterbereich zu erreichen. Die gemessenen Koordinaten werden im Format WGS84 aufgenommen und abgespeichert. Für die später erfolgende Registrierung der Scanpositionen werden die Koordinaten in das Format Gauss-Krüger umgerechnet.



Accuracy (rms) Code differential with DGPS / RTCM <sup>2</sup>	
DGPS / RTCM	Typically 25 cm (rms)
Accuracy (rms) with Real-Time (RTK) <sup>2</sup>	
Standard of compliance	Compliance with ISO17123-8
Rapid static (phase) Static mode after initialization	Horizontal: 5 mm + 0.5 ppm (rms) Vertical: 10 mm + 0.5 ppm (rms)
Kinematic (phase) Moving mode after initialization	Horizontal: 10 mm + 1 ppm (rms) Vertical: 20 mm + 1 ppm (rms)
Accuracy (rms) with Post Processing <sup>2</sup>	
Static (phase) with long observations	Horizontal: 3 mm + 0.5 ppm (rms) Vertical: 6 mm + 0.5 ppm (rms)
Static and rapid static (phase)	Horizontal: 5 mm + 0.5 ppm (rms) Vertical: 10 mm + 0.5 ppm (rms)
Kinematic (phase)	Horizontal: 10 mm + 1 ppm (rms) Vertical: 20 mm + 1 ppm (rms)
On the Fly (OTF) Initialization	
RTK technology	Leica SmartCheck+ technology
Reliability of OTF initialization	Better than 99,99%
Time for initialization	Typically 8 sec <sup>3</sup>
OTF range	up to 50 km <sup>3</sup>
Network RTK	
NetWork technology	Leica SmartRTK technology
Supported RTK network solutions	VRS, FKP, iMAX
Supported RTK network standards	MAC (Master Auxiliary Concept) approved by RTCM SC 104

**Abbildung 4:** Spezifikationen der Messgenauigkeit des GPS Empfängers „Leica Viva GNSS GS15“ [aus Leica; 2009]

Abbildung 5 zeigt das Scannersetup. Dieses besteht aus Laserscanner mit montierter Kamera, Gestell, Stromversorgung und Laptop. Oberhalb der Kamera ist der GPS Empfänger montiert. Nach erfolgreicher Positionsbestimmung wird dieser abgeschraubt, damit der Scanvorgang beginnen kann. Am rechten Bildrand ist ein Reflektor markiert.



**Abbildung 5:** Scannersetup; Laserscanner, montierte Kamera und Laptop sind für den Scanvorgang notwendig. GPS Gerät wird temporär montiert. Rechts im Bild ist ein Reflektor zu sehen (Markierung)

Um den gesamten Feldkogel mittels Laserscan zu erfassen wurden mehrere Scans an verschiedenen Positionen durchgeführt. Dabei wurde bei jeder Scanposition sowohl mit aufrechtem, als auch mit geneigtem Scanner gemessen. Dadurch ist sowohl eine bessere, als auch eine unterschiedliche Erfassung des Aufschlusses gegeben. Je nachdem ob der Scanner aufrecht oder geneigt (getiltet) ist trifft der Laserstrahl am Objekt anders auf und wird unterschiedlich zurückgeworfen. Aus der Kombination ergibt sich eine bestmögliche Erfassung sämtlicher Oberflächen. Abbildung 6 zeigt die einzelnen Scanpositionen anhand einer a) Karte, einer b) Luftaufnahme [Quelle: [www.geoland.at](http://www.geoland.at), Geoland Viewer, Stand: 18.6.2013] und einem c) Screenshot aus dem Laserscan, in dem die Entfernungen zum Gipfelbereich des Feldkogels eingezeichnet und die Entfernungen dargestellt sind. Die Entfernungen sind in Tabelle 1 aufgelistet.



**Abbildung 6 a):** Karte mit markierten Koordinaten der einzelnen Scanpositionen [Quelle: [www.geoland.at](http://www.geoland.at) – Geoland Viewer, Stand:18.6.2013]



Abbildung 6 b): Luftaufnahme mit markierten Koordinaten der einzelnen Scanpositionen  
 [Quelle: [www.geoland.at](http://www.geoland.at) – Geoland Viewer, Stand:18.6.2013]

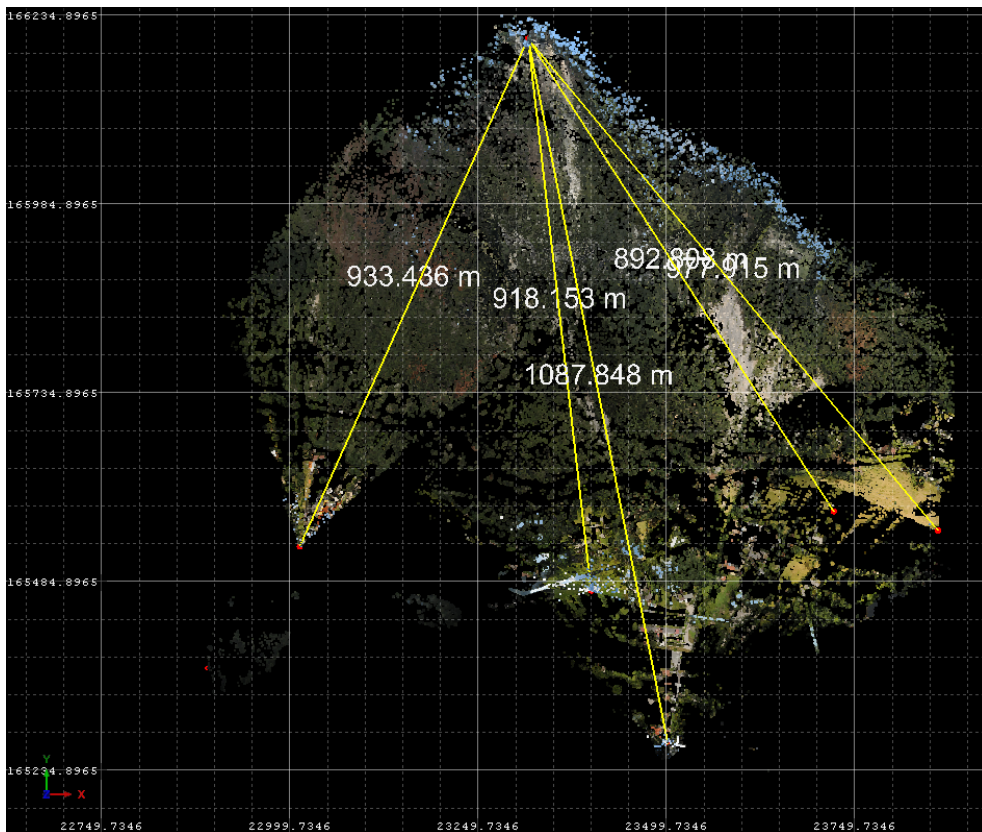


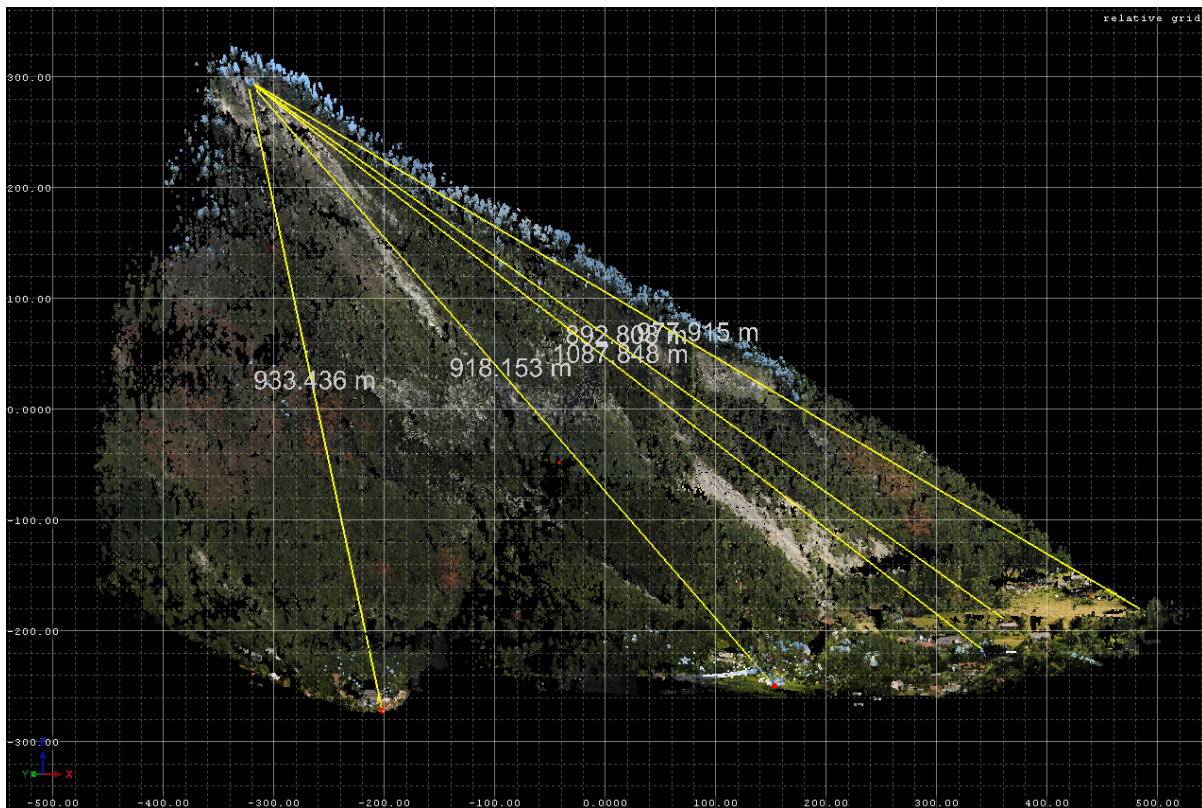
Abbildung 6 c): Laserscan Screenshot, Entfernungen der Scanpositionen vom Gipfelbereich des Feldkogel

Scanposition	Entfernung [m]
1/2	1087,848
3/4	918,153
5/6	977,915
7/8	892,808
9/10	933,436

**Tabelle 1:** Entfernung der Scanpositionen zum Gipfelbereich des Feldkofels

Die Aufnahme der Scans erfolgte innerhalb von zwei Tagen, nachdem bereits im Vorfeld am 5. und 7. Juli 2012 einzelne Probescans durchgeführt wurden. Für den Aufbau und die Durchführung der Scans waren immer zwei Personen im Einsatz. Scanlokalität 1 und 2 wurden am 16. Juli 2012, Scanlokalität 3,4 und 5 am 17. Juli 2012 aufgenommen. Aufgrund verschiedener Vorgangsweisen ergeben sich daraus 10 Scanpositionen (aufrecht – getilt) mit insgesamt 37 Scans. Im Projekt bedeuten ungerade Scanpositionen (1, 3, 5, 7, 9) das mit aufrechtem Scanner gearbeitet wurde, gerade Scanpositionen (2, 4, 6, 8, 10) weisen auf eine Neigung (Tilt) des Scanners von 20° hin.

Für die vollständige Erfassung des gesamten Feldkofels wurden die Scanpositionen im Gebiet von Bleiberg Kreuth und Bleiberg Nötsch verteilt. Zwischen benachbarten Scanpositionen ergeben sich Abstände (aus der Karte, Abb. 6a) zwischen ca. 100 und mehr als 250m. Die Entfernung zum gescannten Objekt, insbesondere im Bereich des Gipfels, liegt zwischen ca. 893 und 1088m (Luftlinie). In Abbildung 7 sind die Entfernungen mittels Scandaten perspektivisch dargestellt. Blickrichtung ist nach Nordwesten.



**Abbildung 7:** Perspektivische Darstellung der Entfernungen des Scanners, Blick in Richtung Nordosten

### 3.4 Übersicht über die verwendeten Computerprogramme

Um die im Gelände mittels Laserscan erfassten Daten auszuwerten und anschließend eine Trennflächensystemauswertung und Stabilitätsanalyse, sowie eine Steinschlagsimulation, durchzuführen, wurden folgende Programme verwendet, die hier kurz erläutert werden.

- RiScan Pro

Software, die zum Laserscanner gehört und die Bearbeitung der erfassten Punktdaten ermöglicht. In RiScan erfolgte die Registrierung mittels GPS Daten, die Bearbeitung der Punktdaten, der Einbau von Trennflächen und die Erstellung von Profilen für die Steinschlagsimulation.

- Sphaira 2.0

Sphaira dient der grafischen Darstellung und zur statistischen Auswertung der Trennflächenorientierung.

- R

R ist eine Statistiksoftware und wurde zur statistischen Auswertung der Trennflächengröße in 3D genutzt. Weiters wurden statistische Tests durchgeführt, um die Verteilungen zu verifizieren. Anschließend wurden noch Plots der Verteilungen erstellt.

- Blocktheorie Programme

Dabei handelt es sich um Programme für die Auswertung von Versagensmechanismen und der dreidimensionalen Darstellung von instabilen Blöcken, basierend auf der Keyblock Theorie.

- FracMan

Mittels FracMan wurde mit den zuvor ermittelten Parametern ein Trennflächenmodell erstellt und anschließend eine Stabilitätsanalyse durchgeführt. Dazu wurden in einer Box die Trennflächen generiert und mit einer freien Fläche verschnitten, um instabile Blöcke und deren Volumina zu ermitteln.

- RocFall 4.0

RocFall dient zur Simulation von Blockstürzen. Dabei handelt es sich um eine zweidimensionale Simulation, die die Reichweiten der Blöcke und auch ihre kinetische Energie ermitteln kann. Des Weiteren ist es möglich Schutznetze einzubauen, um eine möglichst naturgetreue Situation zu erzeugen.

Ein Blocksturz ist definiert als Sturzereignis von Einzelblöcken [aus: Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2011], während sich bei einem Felssturz ganze Felspartien lösen und eine gegenseitige Beeinflussung der Blöcke während der Bewegung erfolgt [aus: Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2010]. Eine Abgrenzung über das Volumen wird hierbei nicht durchgeführt, da es in der Literatur diesbezüglich sehr große Schwankungsbreiten gibt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die aus den FracManmodellierungen erhaltenen Werte verwendet, um Blockstürze zu modellieren.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Rohdaten - Datenvorbereitung

Als Ergebnis der Messungen im Gelände erhält man eine große Datenmenge. Je nach Auflösung liefert ein Scan mehrere hunderttausend Punkte pro Messung. Diese Punktwolken sind jedoch noch nicht registriert und müssen mittels GPS und programmgestützter Berechnungen kombiniert werden, um Messungen durchzuführen.

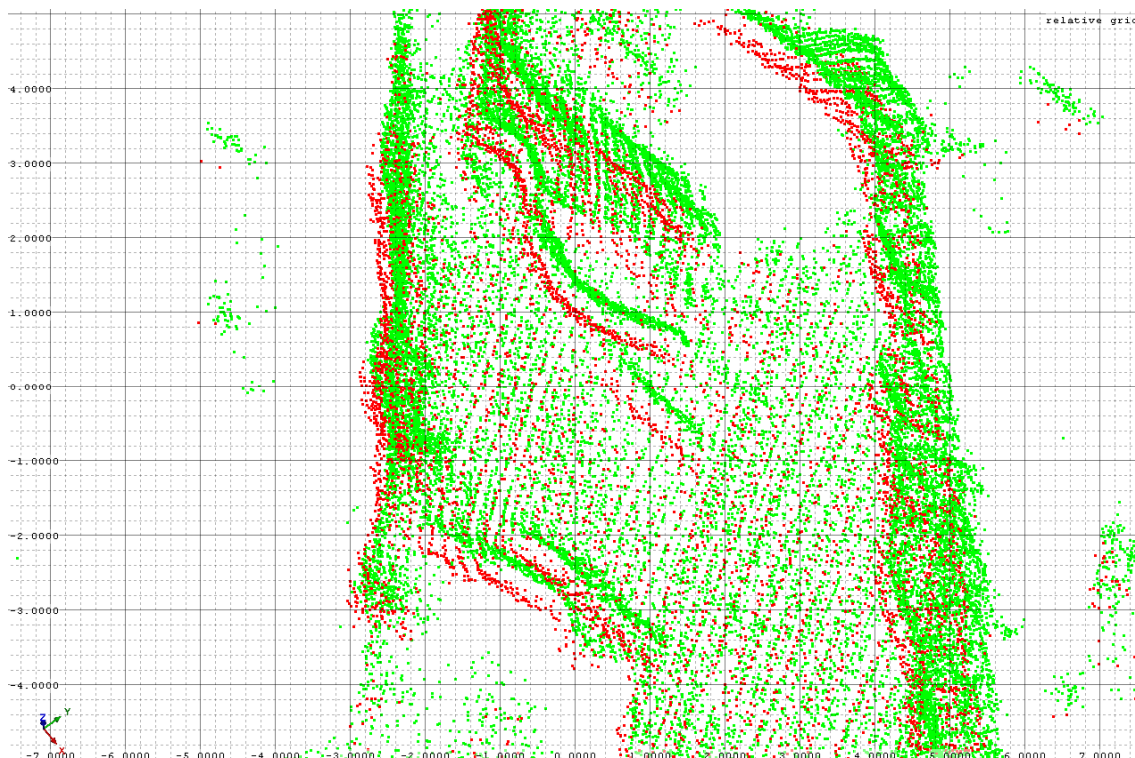
#### 4.1.1 GPS Daten

Die GPS Daten der einzelnen Scanpositionen sowie der Reflektoren sind in Tabelle 2 angeführt. Diese Daten wurden bereits aus dem Koordinatensystem WGS84 in das Format Gauss-Krüger umgerechnet. Im Feld Name steht der jeweils gemessene Punkt (Scannerposition oder Reflektor), X, Y, Z geben die Lage im Raum an, KQ Lage und Höhe beschreiben die Standardabweichungen der Messungen (Messgenauigkeit).

Name	X[m]	Y[m]	Z[m]	KQ Lage [m]	KQ Höhe [m]
S1	23501,666	165268,159	917,603	0,010	0,013
S3	23399,531	165471,679	892,353	0,014	0,020
S5	23860,873	165551,576	956,781	0,009	0,016
S7	23722,127	165576,926	951,289	0,012	0,016
S9	23011,663	165530,1	869,689	0,015	0,014
R1_S1/3	23413,051	165473,065	894,594	0,013	0,020
R2_S1/3	23386,343	165475,981	895,365	0,012	0,018
R3_S1/3	23355,999	165493,251	899,594	0,015	0,023
R4_S1/3	23380,878	165504,308	903,175	0,014	0,022
R5_S1/3	23398,347	165495,767	900,576	0,012	0,020
R6_S1/3	23416,226	165496,179	900,297	0,012	0,021
R1_S5/7	23821,393	165581,676	960,046	0,009	0,016
R2_S5/7	23781,941	165610,335	964,203	0,014	0,022
R3_S5/7	23761,636	165635,665	972,138	0,011	0,020
R4_S5/7	23794,916	165639,393	974,179	0,009	0,014
R5_S5/7	23822,372	165598,239	963,2	0,008	0,014
R1_S9	23076,808	165599,351	884,493	0,013	0,017
R2_S9	23034,643	165554,848	875,935	0,014	0,010
R3_S9	23023,16	165556,535	875,918	0,021	0,019
R4_S9	23008,936	165572,87	877,715	0,018	0,016

**Tabelle 2:** GPS Daten aller Scanpositionen; Sx – Nummer der Scanposition; Rx\_Sx – Reflektornummer in Bezug auf die jeweilige Scanposition; Koordinaten in [m]; KQ Lage und Höhe gibt die Standardabweichungen der Messungen an (in [m]); Koordinatensystem: Gauss-Krüger

Mit Hilfe dieser GPS Daten wird eine erste Registrierung der einzelnen Scanpositionen durchgeführt, die allerdings noch grob ist und im Bereich des Gipfels Abweichungen von mehreren Dezimetern zulässt. Diese Ungenauigkeit ist für eine exakte Trennflächensystemauswertung jedoch unzulässig. Abbildung 8 zeigt einen Screenshot aus dem Bereich des Gipfels, um diese Ungenauigkeit zu verdeutlichen. Es handelt sich dabei um Scan 4 von Scanposition 1 (rot) und Scan 3 in Scanposition 2 (grün). Anhand der gekrümmten Oberfläche im Mittleren Bereich des Ausschnittes ist eindeutig ein Versatz zu erkennen, obwohl es sich bei beiden Scans um ein und dieselbe Fläche handelt. Des Weiteren ist anzumerken, dass sich die beiden Scanpositionen an ein und derselben Lokalität befinden. Der einzige Unterschied liegt in der Ausrichtung des Scanners: Scanposition 1 wurde mit aufrechtem Scanner gescannt, bei Scanposition 2 war der Scanner mit 20° geneigt (getiltet).

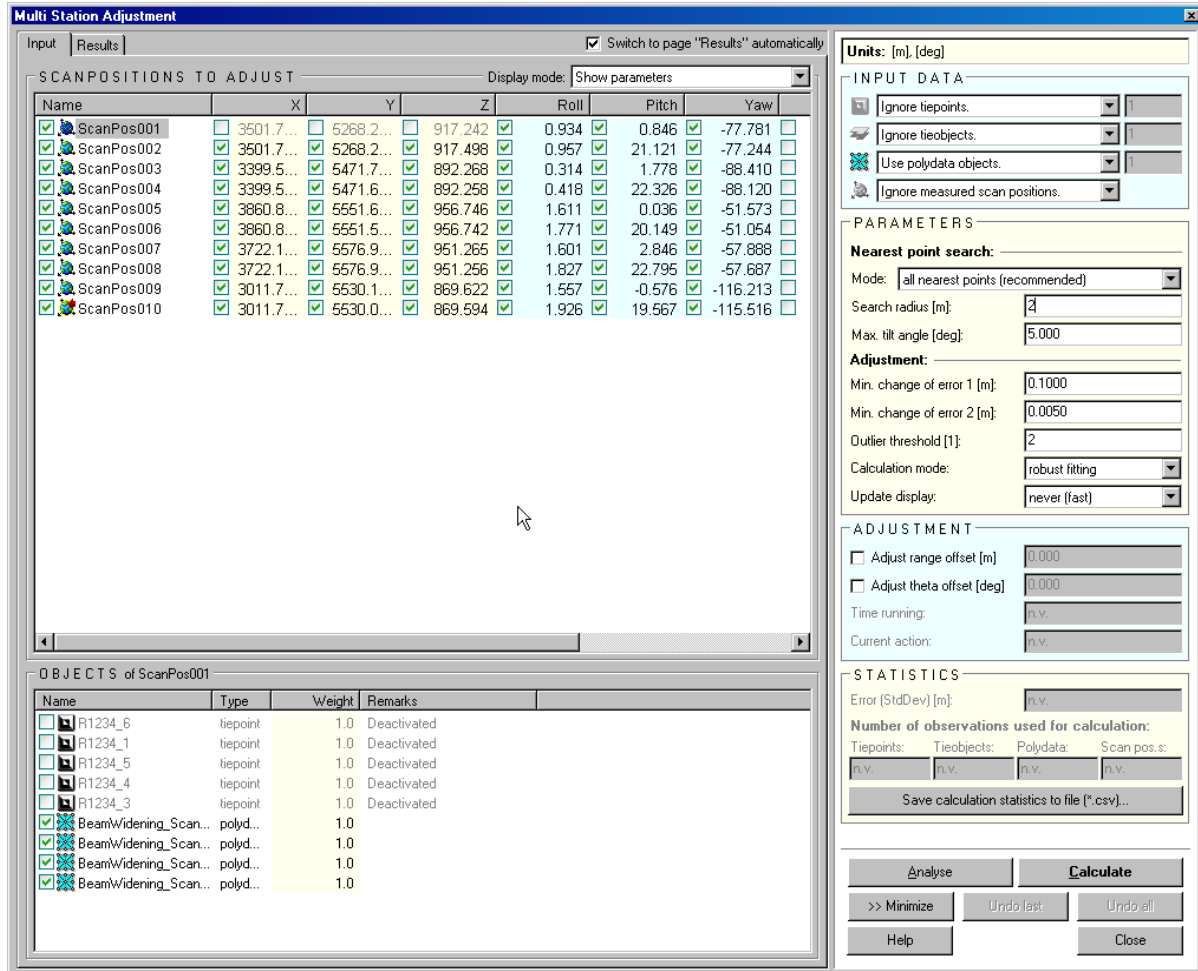


**Abbildung 8:** Ausschnitt des Gipfels – Scanposition 1, Scan 4 in rot und Scanposition 2, Scan 3 in grün. Versatz eindeutig erkennbar

Da dieser Versatz für eine exakte Trennflächenbestimmung jedoch zu groß ist, wurde mittels RiScan eine programmgestützte Korrektur durchgeführt, das sogenannte Multi Station Adjustment (MSA), welches auf den folgenden Seiten näher erläutert wird.

#### 4.1.2 Multi Station Adjustment (MSA)

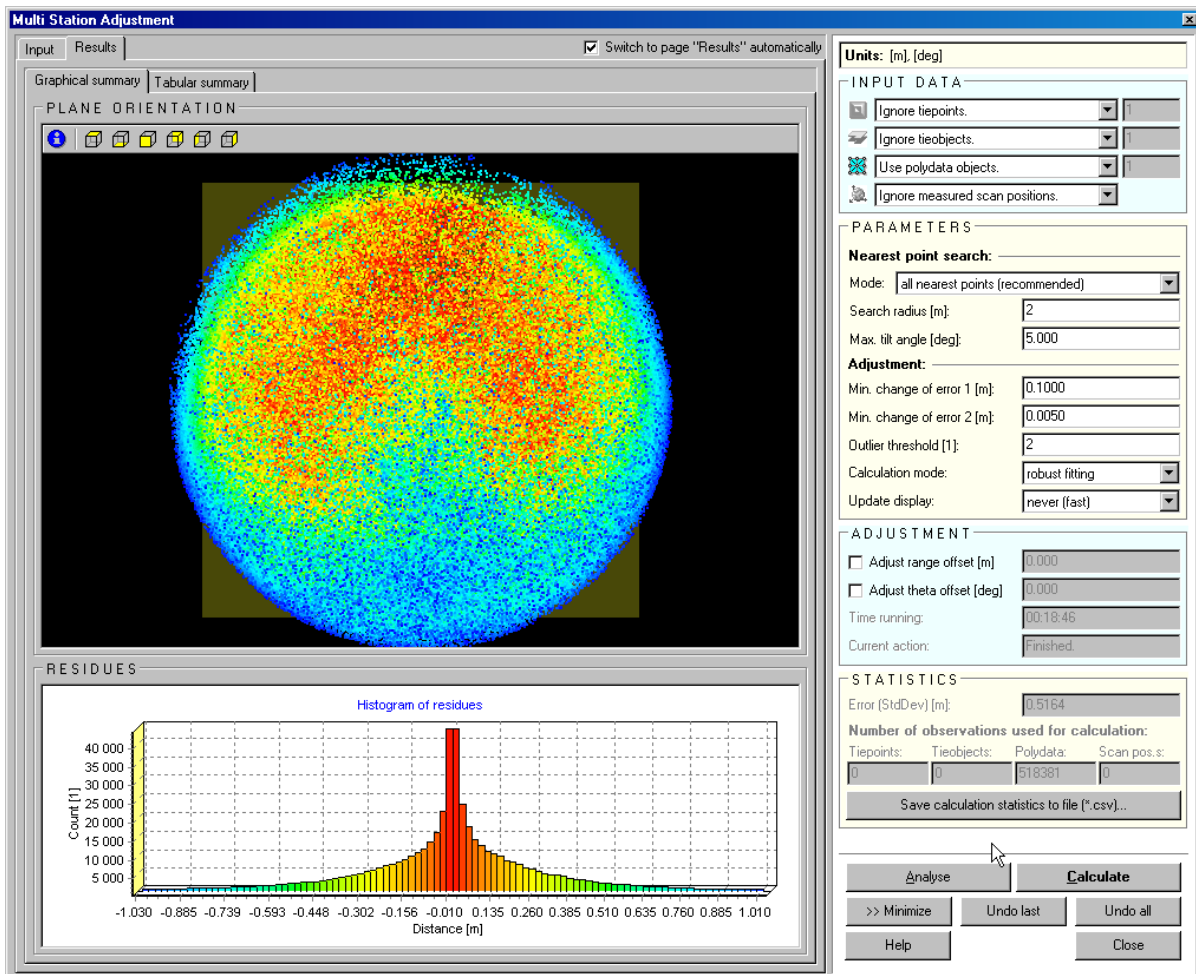
Um die oben erwähnten Ungenauigkeiten zu beseitigen kann das sogenannte Multi Station Adjustment, kurz MSA, angewendet werden. Zur Vorbereitung auf diesen Prozess muss dabei aus jeder einzelnen Punktwolke der Scans eine Polydatei erstellt werden. Um eine Adjustierung zu ermöglichen muss eine Scanposition in ihren Koordinaten (X, Y, Z) fixiert werden. Diese fixierte Position dient als Basis, auf welche die anderen Scanpositionen ausgerichtet werden. Dabei werden vom Programm gleiche Strukturen in den Polydateien erkannt und durch minimale Rotationen und Translationen zur Überlappung gebracht. Abbildung 9 zeigt das Programmfenster vor der Analyse. Scanposition 1 ist dabei fixiert.



**Abbildung 9:** Programmfenster für MSA, vor der Analyse, Scanposition 1 ist in ihren X, Y, und Z Koordinaten fixiert

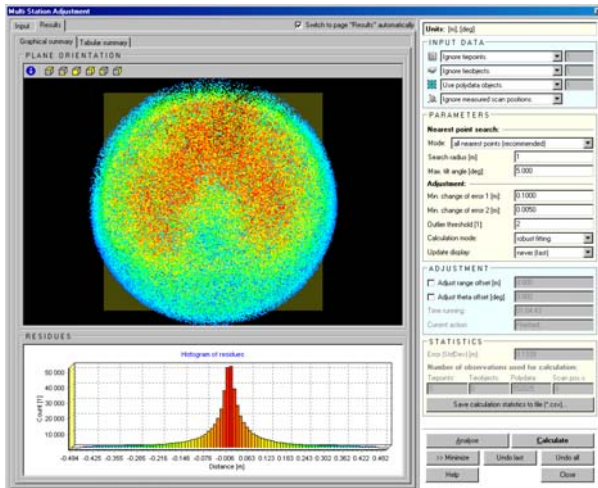
Das Resultat dieser Analyse ist in Abbildung 10 dargestellt. Von besonderer Bedeutung ist dabei der Bereich „Statistics“: hier wird die Standardabweichung (StdDev) in [m], sowie die Anzahl der verwendeten Beobachtungen dargestellt. Nach dem ersten Analyseschritt ergibt sich eine Standardabweichung von 0,5164m, also mehr als ein halber Meter. Vergleicht man dieses Ergebnis mit der Abweichung im Bereich des Gipfels (vgl. Abbildung 8) ist es durchaus zutreffend.



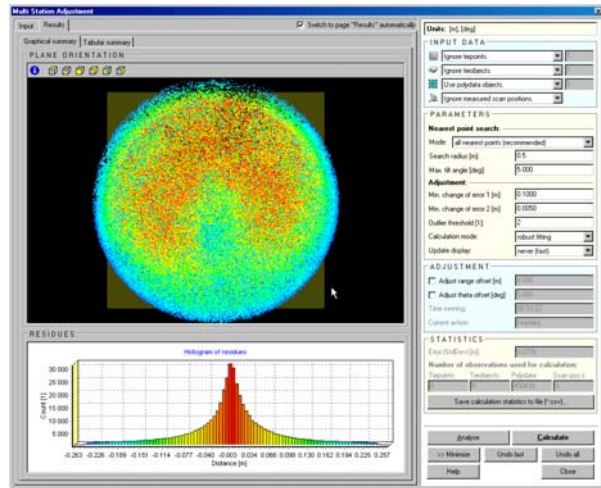


**Abbildung 10:** Ergebnis des ersten Analyseschrittes – die Standardabweichungen der einzelnen Scanpositionen zu Scanposition 1 betragen 0,5164m

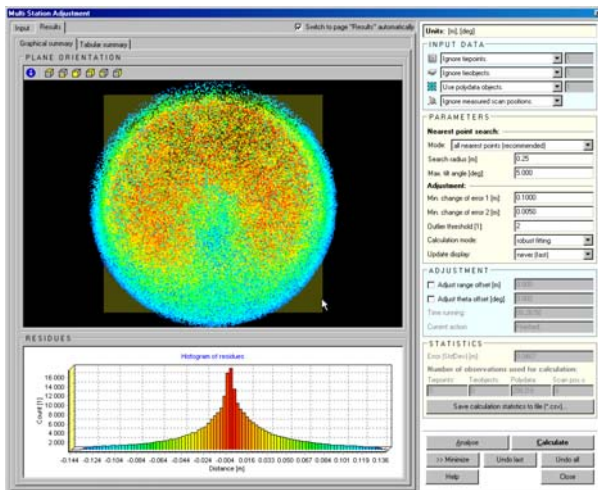
Im Laufe der Analyse und Berechnung wird nun der Parameter „search radius“ reduziert, um eine Annäherung der einzelnen Scanpositionen zu erreichen. Bei jedem Schritt wird der „search radius“ halbiert. Abbildung 11 a) bis f) zeigt die grafischen Ergebnisse, sowie die dazugehörigen Standardabweichungen. Je kleiner der „search radius“ wird, desto geringer ist die Standardabweichung. Während zu Beginn der Analyse noch sehr hohe Werte im Zehnerzentimeterbereich vorhanden sind wird dieser Wert kontinuierlich reduziert, bis schlussendlich eine Standardabweichung von nur mehr rund 0,8cm bleibt. Bei einer Entfernung von bis zu 1090m des Scanners vom Gipfelbereich des Feldkofels ist dies ein sehr guter Wert.



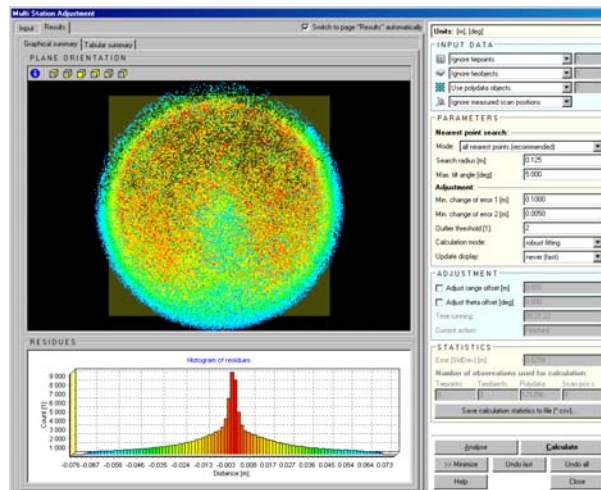
a) search radius 1m, StdDev: 0,1339m



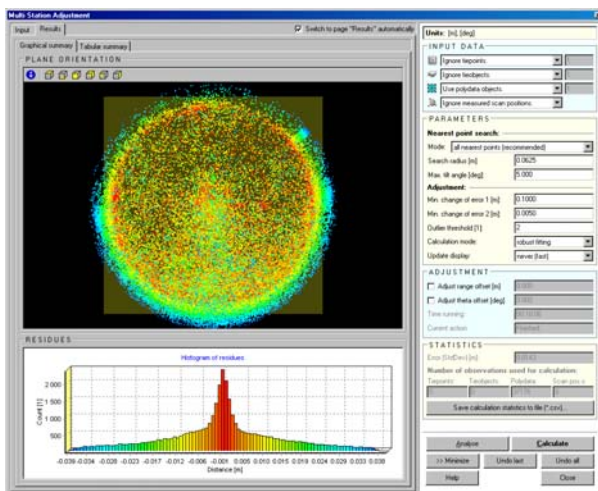
b) search radius 0,5m, StdDev: 0,0776m



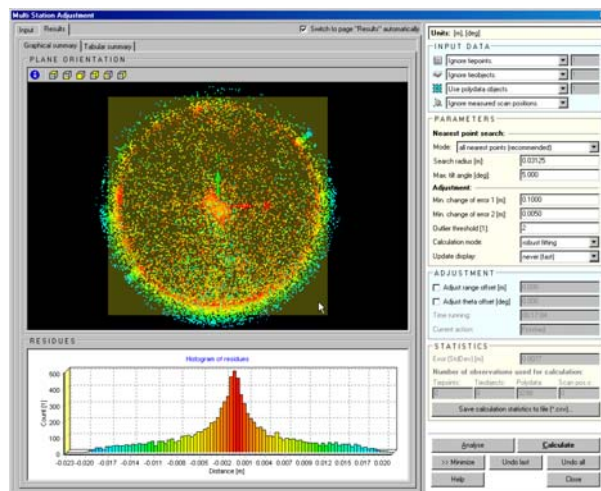
c) search radius 0,25m, StdDev: 0,0467m



d) search radius 0,125m, StdDev: 0,0259m



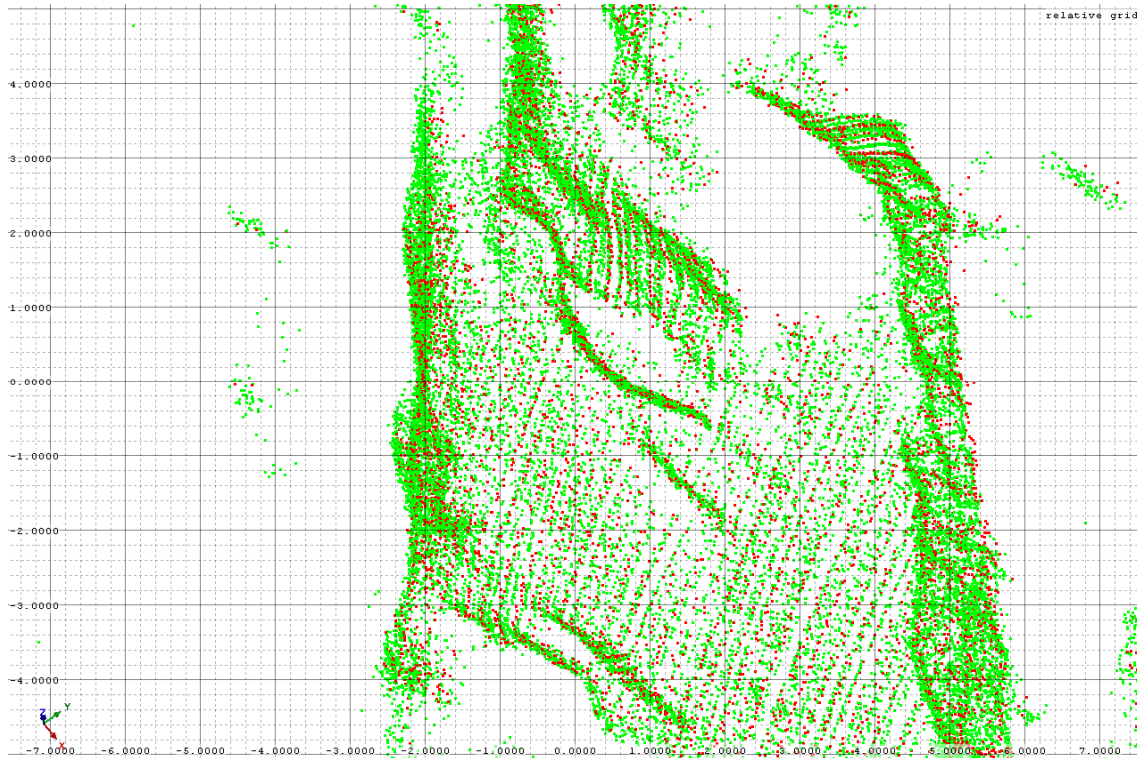
e) search radius 0,0625m, StdDev: 0,0143



f) search radius 0,03125m, StdDev: 0,0077m

**Abbildung 11:** Resultate der MSA – a) bis f) pro Schritt wird der „search radius“ halbiert und damit die Standardabweichung geringer

Das endgültige Resultat der MSA ist als Überlappung mit einer Standardabweichung von 0,0077m gegeben, was bedeutet, dass man ein hochpräzises Ergebnis erhält. Dies ist auch visuell erkennbar. Abbildung 12 zeigt erneut Scanposition 1, Scan 4 (rot) und Scanposition 2, Scan 3 (grün). Die Punktwolken der Scans liegen vollständig übereinander – es ist kein Versatz mehr zu erkennen (vgl. Abbildung 8)



**Abbildung 12:** Ausschnitt des Gipfels – Scanposition 1, Scan 4 in rot und Scanposition 2, Scan 3 in grün. Durch MSA ist kein Versatz mehr vorhanden, die Scans liegen hochpräzise übereinander.

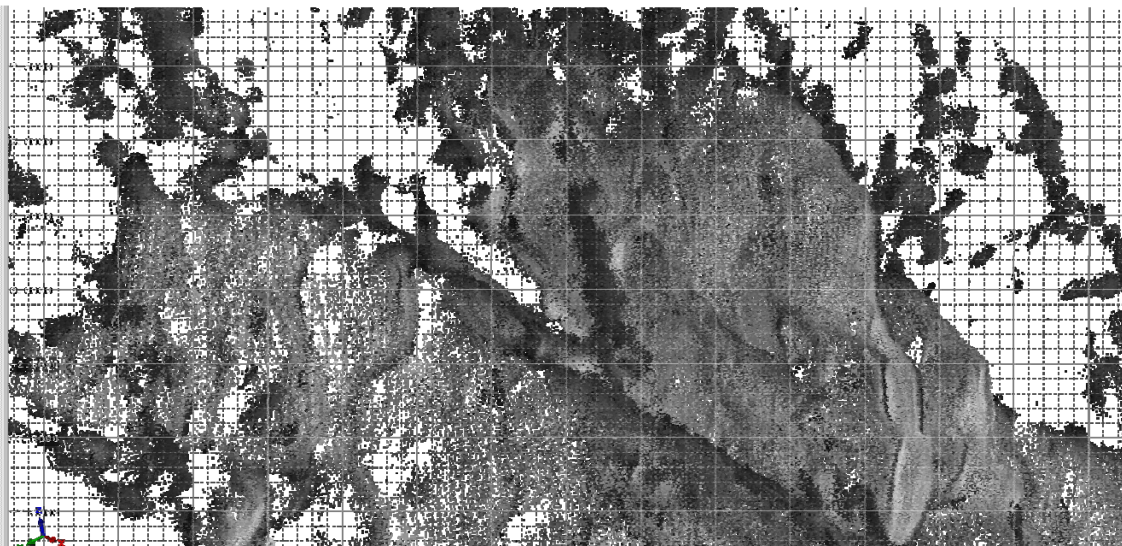
Da die Daten nun registriert sind und exakt übereinanderliegen, somit kein Versatz mehr zwischen den einzelnen Scans vorhanden ist, kann nun mit der Bearbeitung der Punktdaten begonnen werden. Dazu wurde als erstes eine Polydatei erstellt, die sämtliche Punkte aller Scans beinhaltet und als Grundlage für die weiteren Bearbeitungsschritte dient. Da diese Datei jedoch sehr groß ist wurde sie in Teilbereiche unterteilt, um eine schnellere Bearbeitung zu ermöglichen.

#### 4.1.3. Entfernen der Vegetation

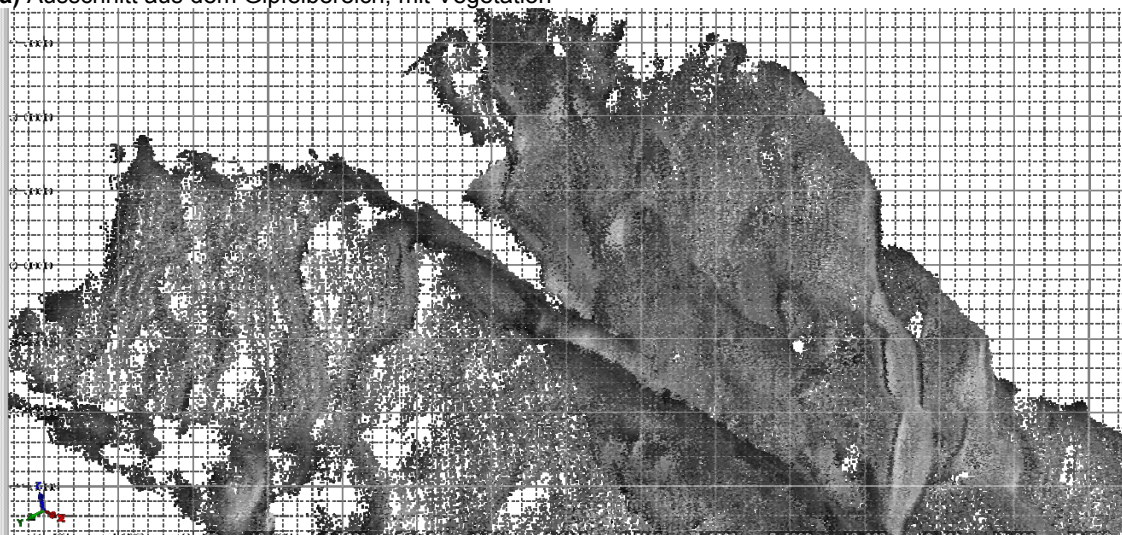
Um die Erstellung von Meshes (triangulierte Gitternetze) zu ermöglichen, muss zuerst die Vegetation aus den einzelnen Scans entfernt werden. Geschieht dies nicht kommt es bei der Triangulation zu Ausreißern, wodurch ein sehr unruhiges Oberflächenmodell entsteht, das für den Einbau von Trennflächen ungeeignet ist.

Die Entfernung geschieht durch Markierung und Löschung jener Punkte, die durch Bäume, Gestrüpp oder ähnliches verursacht werden. Dieser Prozess wurde manuell durchgeführt, um eine bestmögliche Elimination zu garantieren. Da dabei jedoch alle Bereiche Schritt für Schritt überprüft werden müssen, ist dieser Prozess sehr zeitaufwändig.

Abbildung 13 a) stellt einen Ausschnitt des Scans mit Vegetation, Abbildung 13 b) denselben Ausschnitt bereinigt dar.



a) Ausschnitt aus dem Gipfelbereich, mit Vegetation

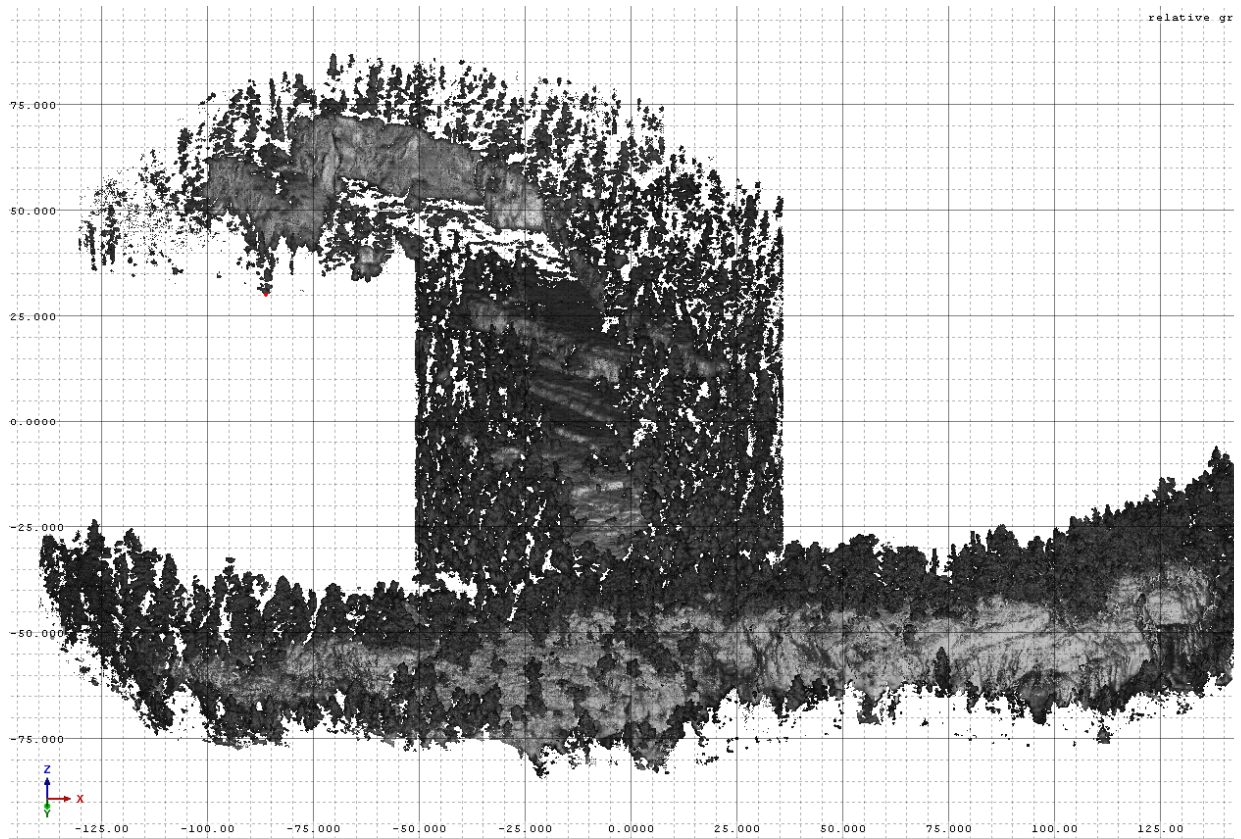


b) Ausschnitt aus dem Gipfelbereich, Vegetation manuell entfernt

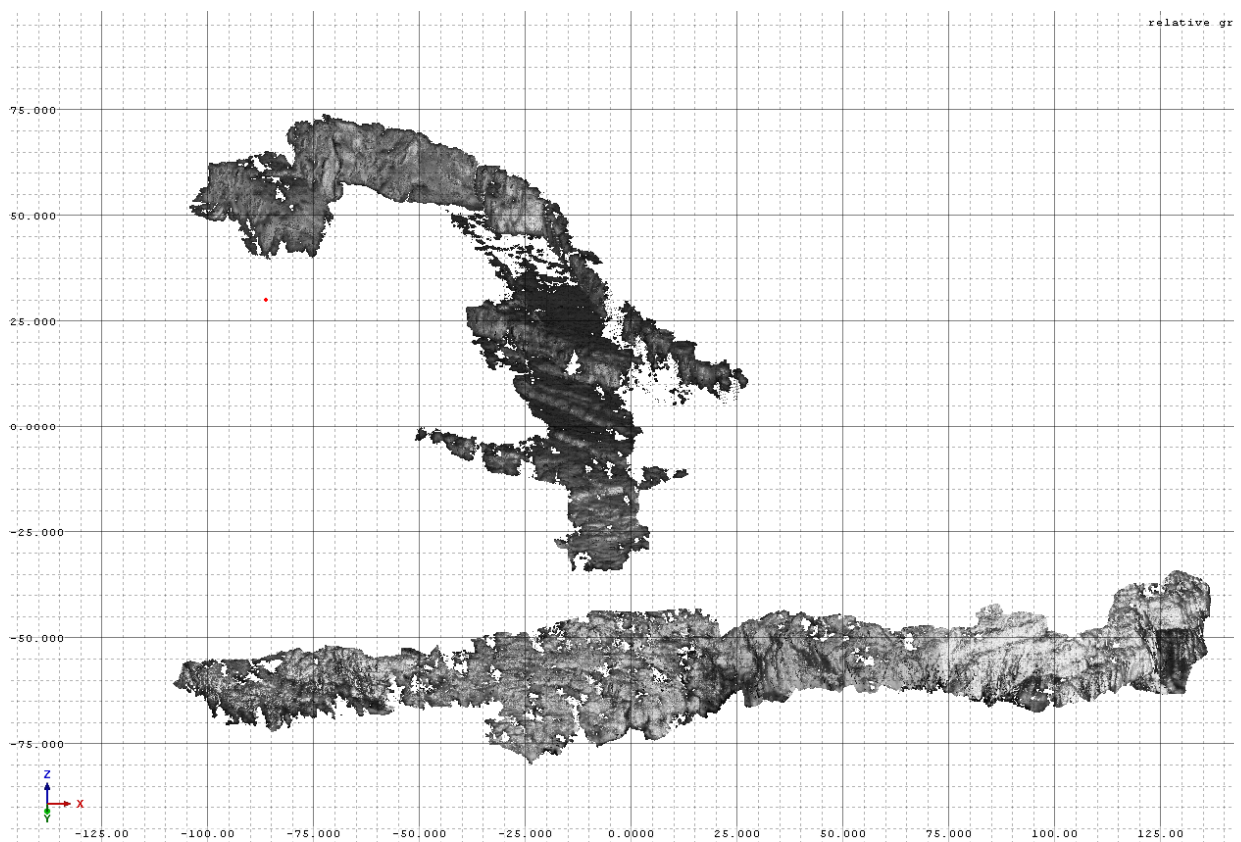
**Abbildung 13:** Punktwolke, Ausschnitt aus dem Gipfelbereich a) mit Vegetation b) ohne Vegetation

Sämtliche Punkte, die von einem Objekt zurückgeworfen wurden, welches kein Fels ist, wurden entfernt.

In Abbildung 14 ist ein Vergleich des gesamten Feldkofels a) mit und b) ohne Vegetation dargestellt. Im Anhang befinden sich weitere Screenshots der vegetationsbereinigten Scandaten.



a) Gesamter Feldkofel, mit Vegetation

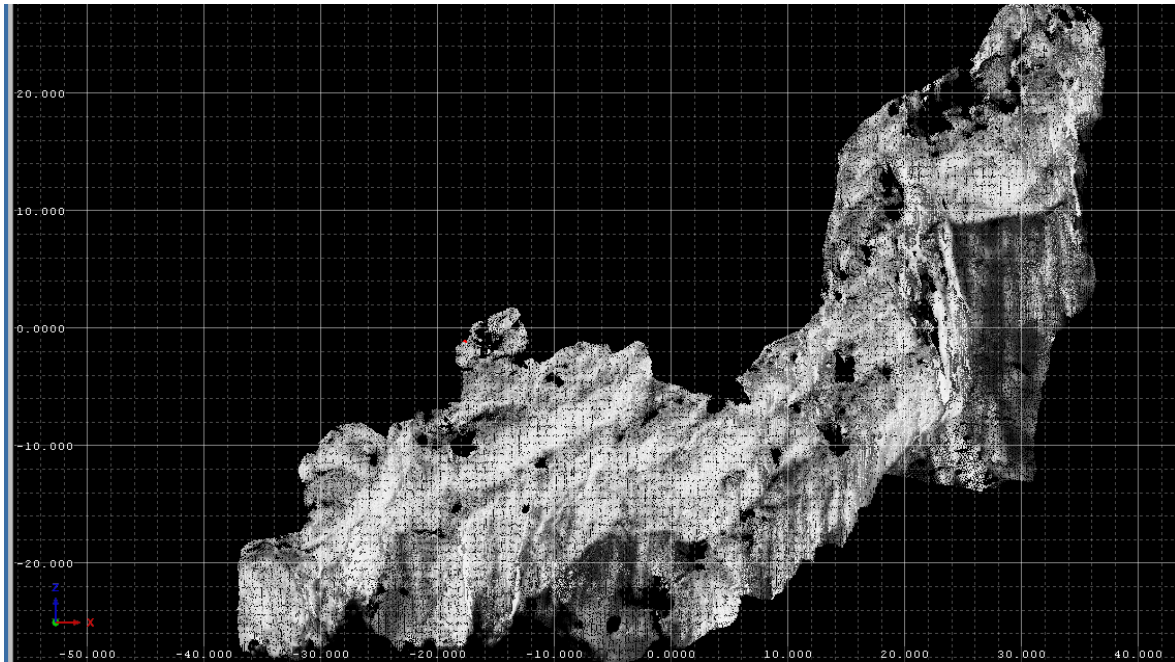


b) Gesamter Feldkofel, Vegetation entfernt

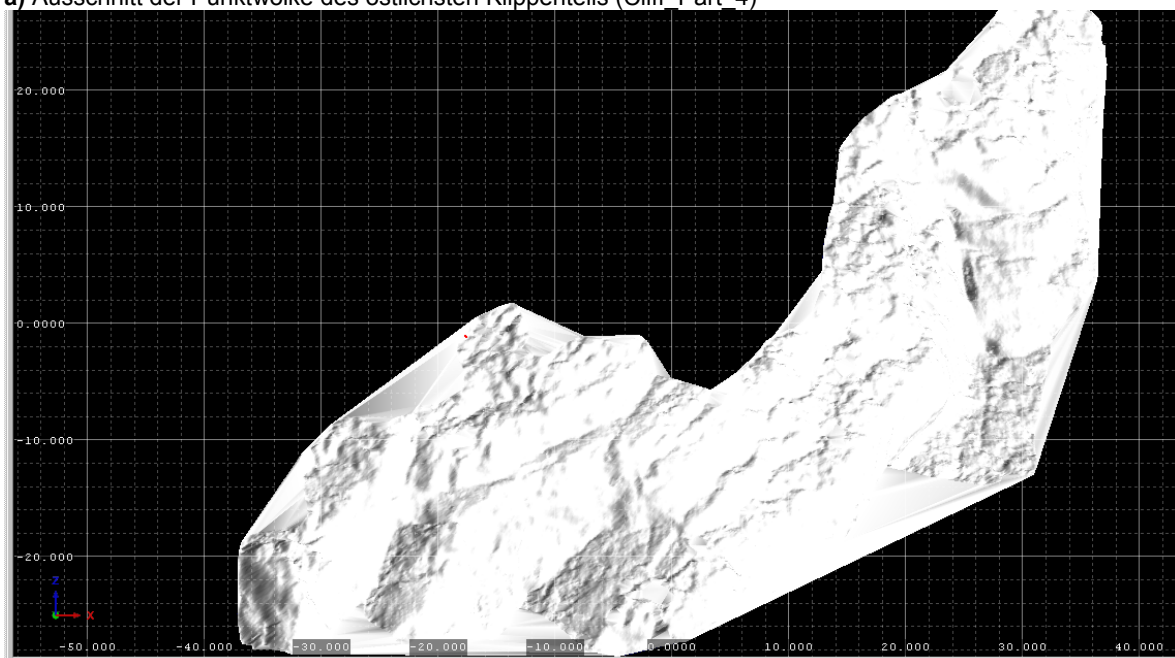
Abbildung 14: Vergleich des gesamten Feldkofels a) mit Vegetation, b) ohne Vegetation

#### 4.1.4 Mesh

Mittels Triangulation kann in RiSCAN Pro aus einer Punktwolke ein Mesh erstellt werden. Im Zuge dieses Vorgangs werden alle Punkte miteinander verbunden, wobei im Vorfeld eine Projektionsebene definiert werden muss. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Projektionsebene stets möglichst parallel zur Hangneigung oder der Oberfläche gewählt. Für ein besseres Verständnis sind in Abbildung 15 a) und b) eine Punktwolke und ein Mesh des östlichsten Klippenteils gegenübergestellt.



a) Ausschnitt der Punktwolke des östlichsten Klippenteils (Cliff\_Part\_4)



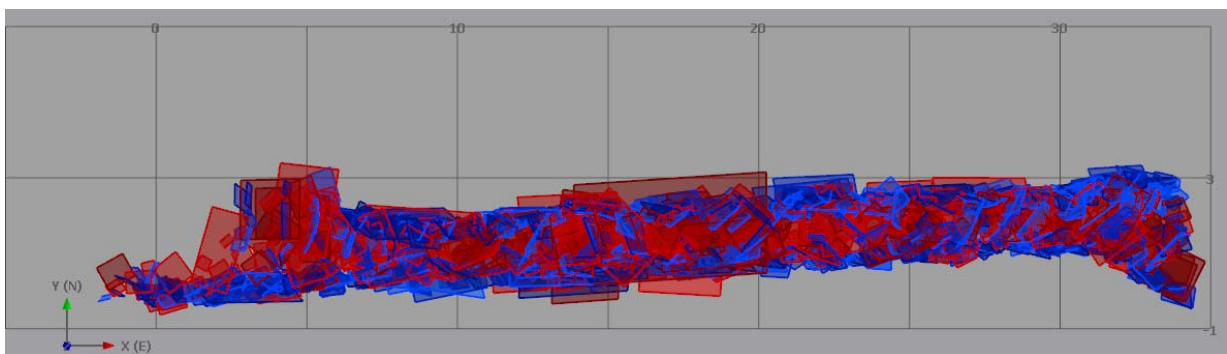
b) Ausschnitt des Meshes des östlichsten Klippenteils (Cliff\_Part\_4)

**Abbildung 15:** Gegenüberstellung einer Punktwolke und eines Meshes aus dem Bereich des östlichsten Klippenteils; a) Punktwolke, b) Mesh

Es ist zu erkennen, dass die in der Punktwolke vorhandenen Löcher, welche das Resultat von unzureichender Scannerfassung und Entfernung vorhandener Vegetation sind, mittels Triangulation geschlossen wurden. Dadurch ergibt sich eine flächenhafte Darstellung der Scandaten, einzelne exponierte Trennflächen werden nun als solche dargestellt. Durch das Schließen von Löchern kann es jedoch vorkommen, dass neue „falsche“ Flächen erstellt werden. Für den Einbau von Trennflächen ist es daher unbedingt notwendig das Modell mit Fotos des entsprechenden Bereiches zu überprüfen und zu vergleichen, um künstlich kreierte Trennflächen zu identifizieren.

Des Weiteren ist die Erstellung eines Meshes sehr von der benutzten Projektionsebenen abhängig: je nach Lage der Projektionsfläche werden unterschiedliche Richtungen bevorzugt, wodurch aus ein und derselben Punktwolke verschiedene Meshes hervorgehen. Dadurch ist es möglich, dass sich die Richtung von Trennflächen unter Umständen, wenn auch nur geringfügig, ändern kann.

Der Ansatz, Trennflächen mittels hochauflösendem Laserscan zu erfassen, ist ein sehr aktuelles Thema in den angewandten Geowissenschaften. Aus Arbeiten anderer Autoren [Liu & Kieffer; 2012] geht hervor, dass Trennflächengefüge und ein gesamtes Trennflächennetzwerk mittels terrestrischem Laserscan in einer Entfernung von weniger als 100m zum Aufschluss hochpräzise erfasst werden können. Dabei kann in einem aus Meshes erstelltem Flächenmodell eine Millimetergenauigkeit erreicht werden. Im konkreten Fall wurde ein Trennflächennetzwerk in einem Tunnel angepasst, welches in Abbildung 16 aus der Vogelperspektive dargestellt ist [aus Liu & Kieffer; 2012].



**Abbildung 16:** Blick aus der Vogelperspektive auf das kartierte dreidimensionale Trennflächennetzwerk eines Tunnels [aus Liu & Kieffer; 2012]

Soweit dem Autor in Bezug auf die Fachliteratur bekannt ist, ist der in dieser Arbeit durchgeführte Versuch, Trennflächen aus einer Entfernung von mehr als 1000m zu erfassen, erstmalig durchgeführt worden. Durch systematische Vergleiche und mehrfaches Experimentieren wurde festgestellt, dass aus dieser großen Distanz, sowie dem stark negativem Einfluss vorhandener Vegetation, eine Anpassung der Trennflächen direkt in der Punktwolke besser geeignet ist.

## 4.2 Trennflächeneinbau

Um in weiterer Folge eine Stabilitätsanalyse durchführen zu können, ist es vorher notwendig, eine Trennflächenanalyse durchzuführen

Da die Nutzung von Meshes wie bereits oben erwähnt nicht ganz unproblematisch ist, erfolgte der Trennflächeneinbau anhand der Punktwolke. Dabei kann auch die unbearbeitete Punktwolke mit vorhandener Vegetation verwendet werden, weil nur Punkte markiert werden, die zu einer Trennfläche gehören. Das Gebiet des Feldkofels wurde in drei Bereiche unterteilt, die sich auf Grund ihrer Hangmorphologie unterscheiden:

- Top: der Gipfelbereich
- Middle: der Bereich zwischen Gipfel und Steilstufe
- Cliff: die Steilstufe/Klippe auf ca. 1150m Seehöhe

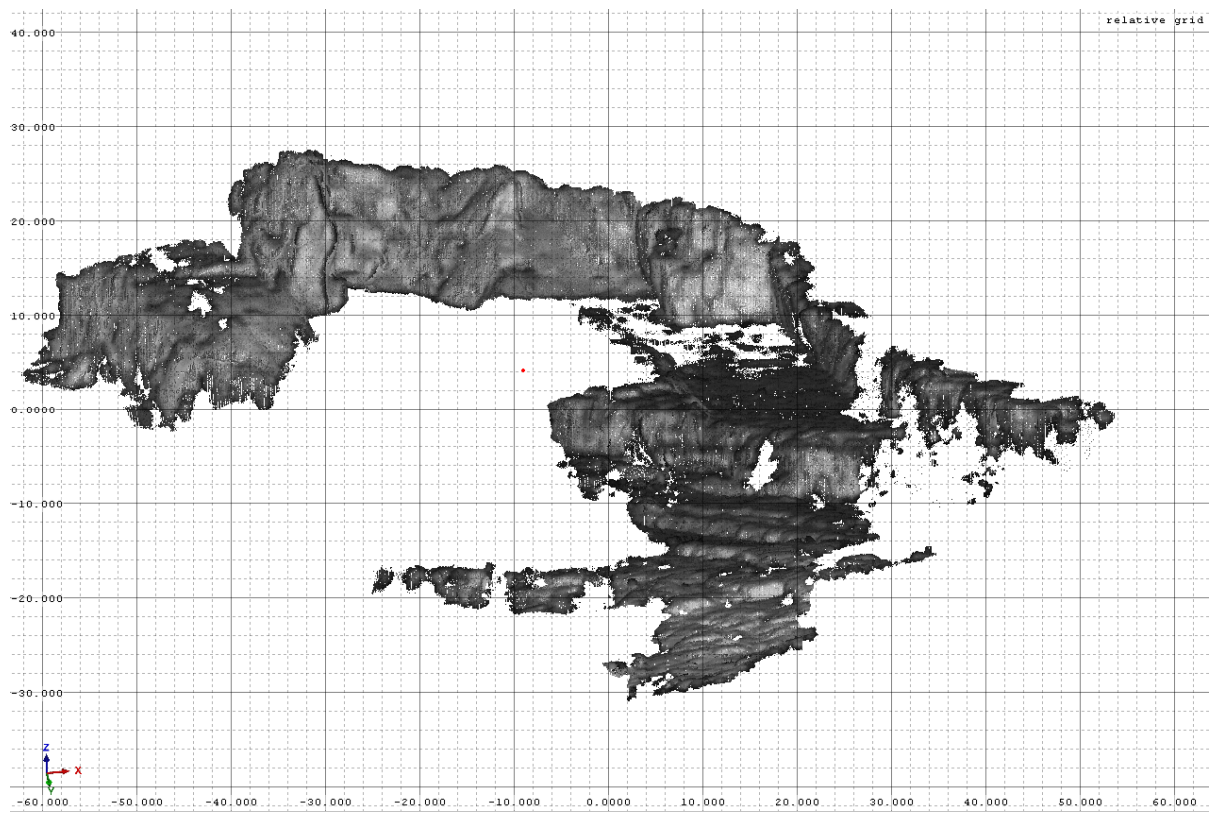
Um Trennflächen im Scan eindeutig zu identifizieren werden die Scans mit Fotos der zu bearbeitenden Gebiete verglichen. Abbildung 17 stellt ein Foto den vegetationsbereinigten Laserscandaten gegenüber, ein Ausschnitt, der sich vom Bereich Middle bis in den Bereich Top erstreckt.

In diesen drei oben erwähnten Bereichen wurden die vorhandenen Trennflächenscharen eingebaut und je nach Zusammengehörigkeit eingefärbt. In Abbildung 18 sind sämtliche eingebaute Flächen dargestellt. Als Basis dient das 3D Laserscanmodell, bei dem bereits die Vegetation entfernt wurde.





a) Foto von Middle bis Top



b) Laserscan – vegetationsbereinigte 3D Punktwolke, Ansicht entsprechend dem Foto in a)

**Abbildung 17:** Gegenüberstellung von a) Foto und b) 3D Laserscandaten für die Identifizierung von Trennflächen

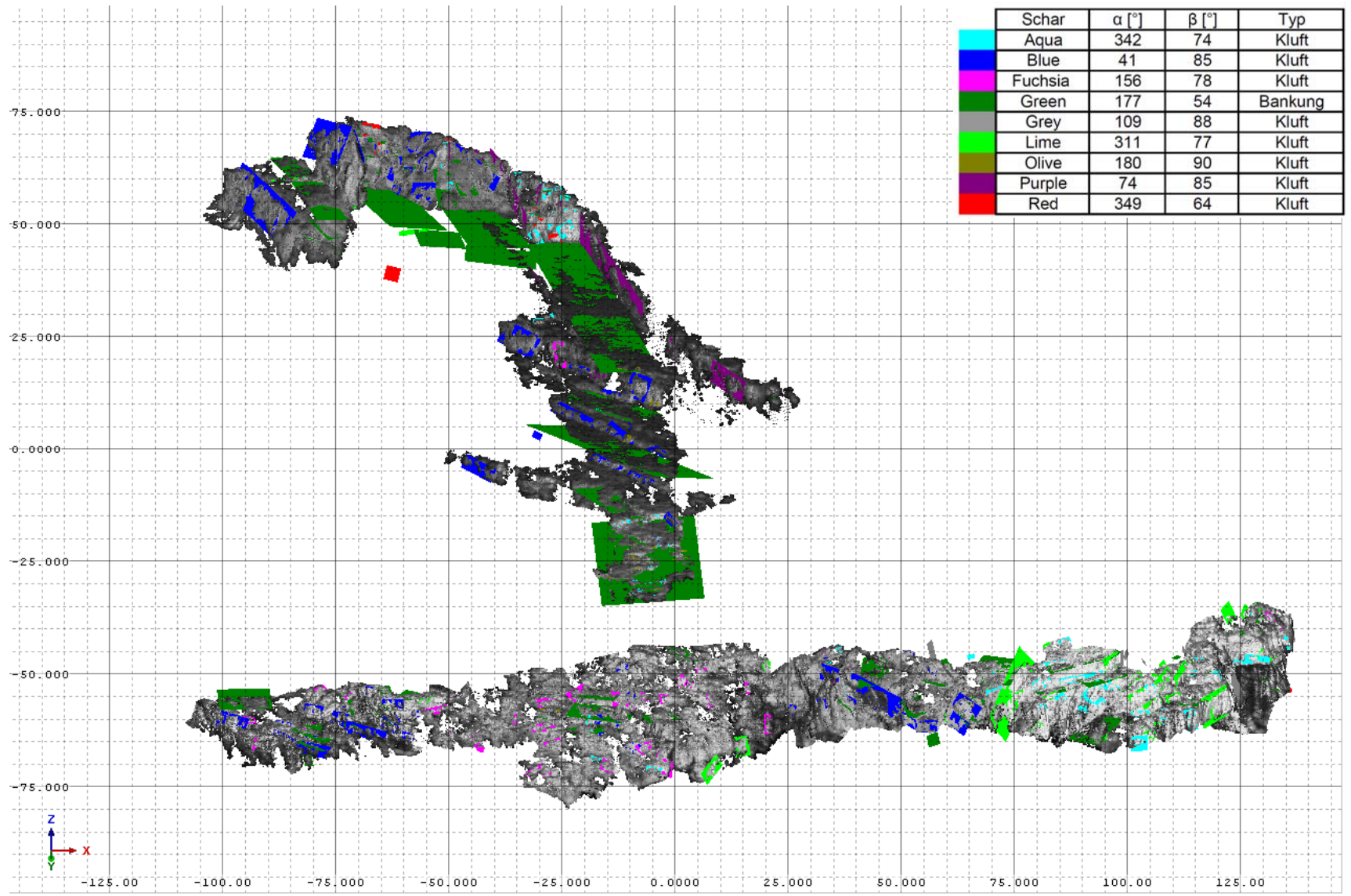


Abbildung 18: Sämtliche eingebaute Trennflächen dargestellt im 3D Laserscanmodell bei entfernter Vegetation;  $\alpha$ ...Einfallrichtung,  $\beta$ ...Einfallswinkel

### 4.3 Statistische Auswertungen von Orientierungsscharen mittels Sphaira

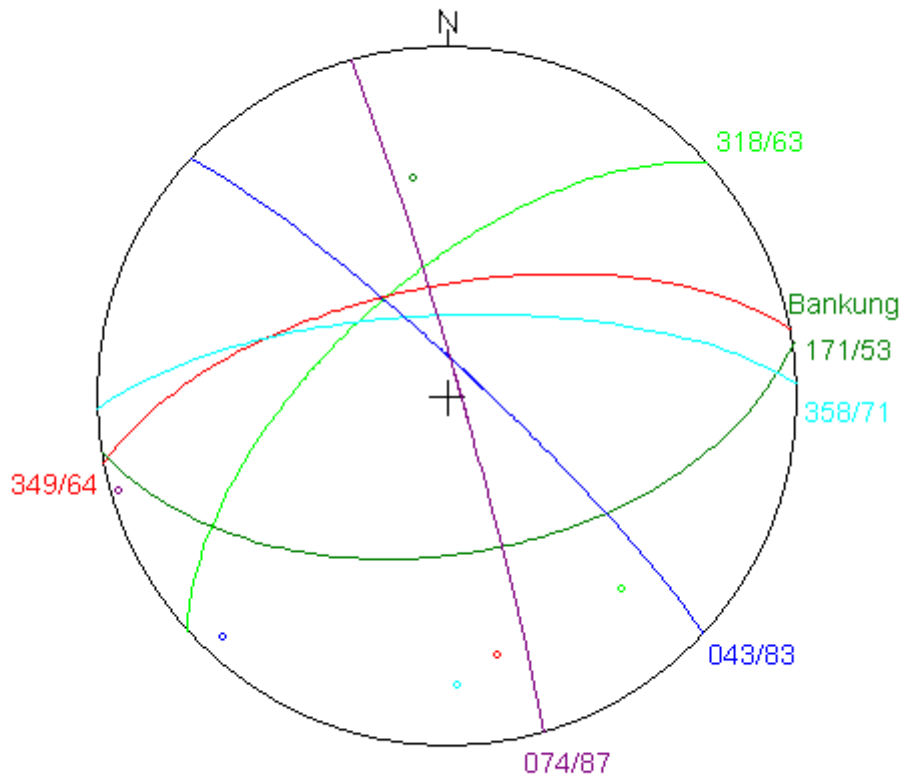
Aus den eingebauten Trennflächen wurden Schwerpunktsflächen der einzelnen Scharen ermittelt und geplottet. Dazu wurde die Software „Spahira“ verwendet und pro Schar Polpunkt und Großkreis eingezeichnet. Die Orientierungsparameter sind in weiterer Folge für die Modellierung des Trennflächensystems und der Stabilitätsanalyse sehr wichtig. In jedem der folgenden Plots sind sowohl Einfallsrichtung als auch Einfallswinkel der Schwerpunktsflächen angegeben. Folgende statistischen Parameter sind in den Tabellen aufgelistet:

- Anzahl der eingebauten Trennflächen (N)
- Einfallsrichtung ( $\alpha$ )
- Einfallswinkel ( $\beta$ )
- prozentueller Regelungsgrad (R)
- Konzentrationsparameter (K)
- Vertrauenskegel ( $\delta$ )
- sphärischer Öffnungsgrad ( $\omega$ )

Es folgt eine Übersicht über die einzelnen Bereiche, dabei werden die Sets nach ihren Farben benannt, mit denen sie in den Laserscans eingebaut wurden. Bei Set Green handelt es sich um die Bankung, alle anderen Farben beschreiben unterschiedliche Kluftscharen.

#### 4.3.1 Bereich „Top“

Der Gipfelbereich ist durch fünf verschiedene Kluftscharen und die Bankungsfläche gekennzeichnet. Abbildung 19 zeigt einen Plot der im Gipfelbereich vorhandenen Trennflächenscharen.



**Abbildung 19:** Plot der der Trennflächenscharschwerpunkte im Bereich des Gipfels

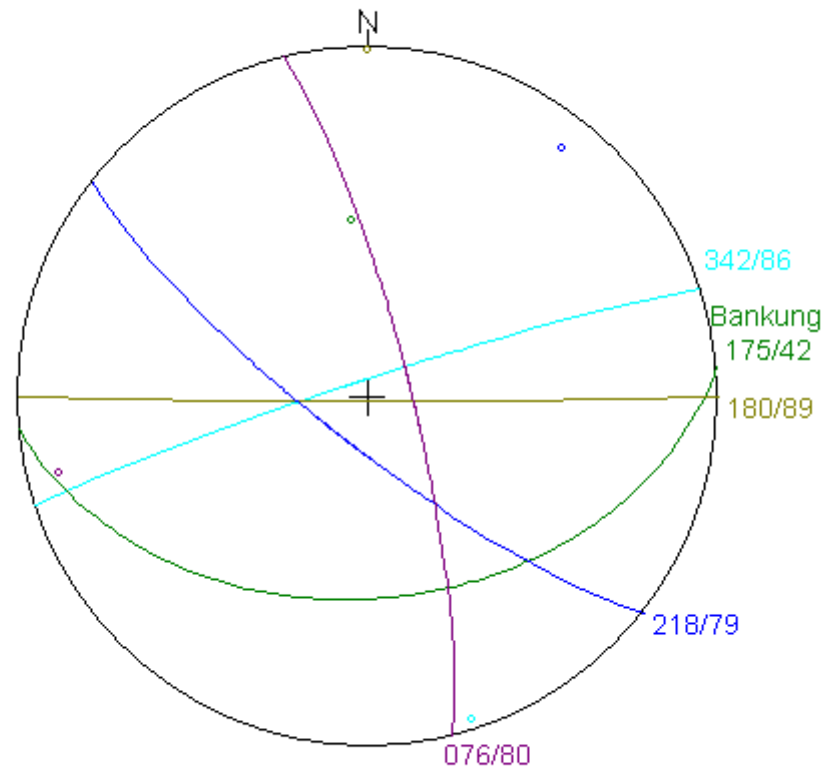
Es ist hierbei jedoch anzumerken, dass Schar Red nur sehr wenige Messwerte enthält und große Ähnlichkeit mit Schar Aqua aufweist. Die gemessenen Parameter sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Schar	N	$\alpha$ [°]	$\beta$ [°]	R [%]	K []	$\delta$ [°]	$\omega$ [°]
Aqua	16	358	71	95,05	37,87	7,75	12,86
Blue	15	43	83	90,32	19,28	11,42	18,13
Green	33	171	53	98,84	37,57	5,19	13,13
Lime	11	318	63	97,20	64,99	7,39	9,63
Purple	5	74	87	96,17	41,78	16,71	11,29
Red	7	349	67	94,22	29,65	15,07	13,91

**Tabelle 3:** Parameter der Trennflächen im Bereich Top;  $\alpha$ ...Einfallrichtung,  $\beta$ ...Einfallswinkel, R...prozentueller Regelungsgrad, K...Konzentrationsparameter,  $\delta$  ...Vertrauenskegel,  $\omega$  ...sphärischer Öffnungsgrad

#### 4.3.2 Bereich „Middle“

Im Mittelbereich zwischen Gipfel und Klippe befinden sich vier verschiedene Trennflächenscharen und wiederum die Bankung. Abbildung 20 zeigt den Plot der Setschwerpunkte.



**Abbildung 20:** Plot der der Trennflächenscharschwerpunkte im Mittelbereich

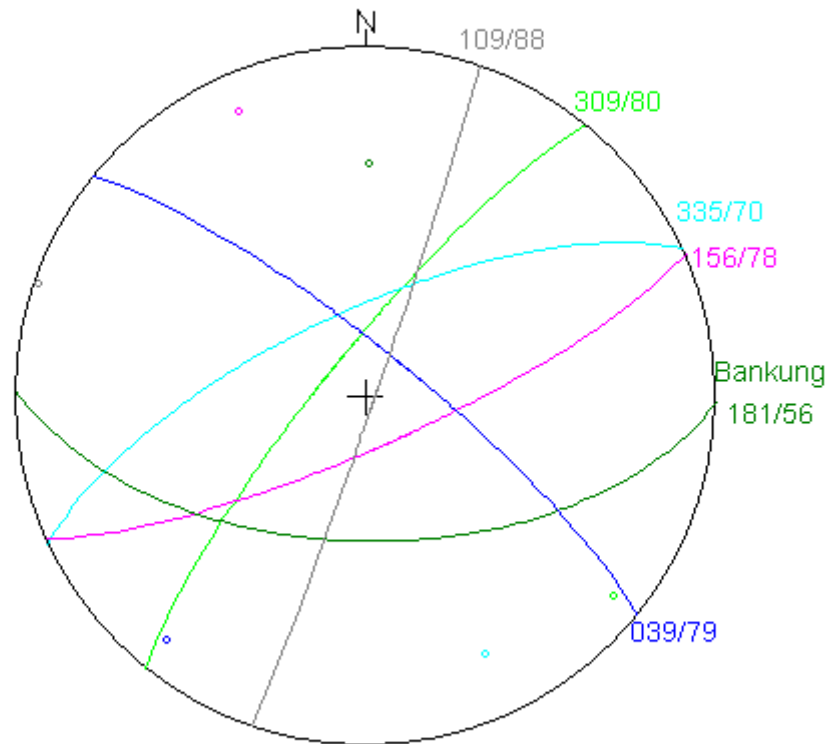
In Tabelle 4 sind die gemessenen Parameter des Bereichs Middle aufgelistet.

Schar	N	$\alpha$ [°]	$\beta$ [°]	R [%]	K []	$\delta$ [°]	$\omega$ [°]
Aqua	21	342	86	93,93	31,38	7,30	14,26
Blue	19	218	79	92,20	24,28	8,82	16,22
Green	9	175	42	99,31	258,06	4,20	4,76
Olive	26	180	89	95,15	39,66	5,75	12,72
Purple	5	76	80	90,20	16,32	27,31	18,24

**Tabelle 4:** Parameter der Trennflächen im Bereich Middle;  $\alpha$ ...Einfallrichtung,  $\beta$ ...Einfallswinkel, R...prozentueller Regelungsgrad, K...Konzentrationsparameter,  $\delta$  ...Vertrauenskegel,  $\omega$  ...sphärischer Öffnungsgrad

#### 4.3.3 Bereich „Cliff“

Im Klippenbereich konnten fünf verschiedenen Trennflächenscharen und die Bankung identifiziert werden. Der Plot der Schwerpunktsflächen ist in Abbildung 21 dargestellt.



**Abbildung 21:** Plot der der Trennflächenscharenschwerpunkte im Bereich Cliff

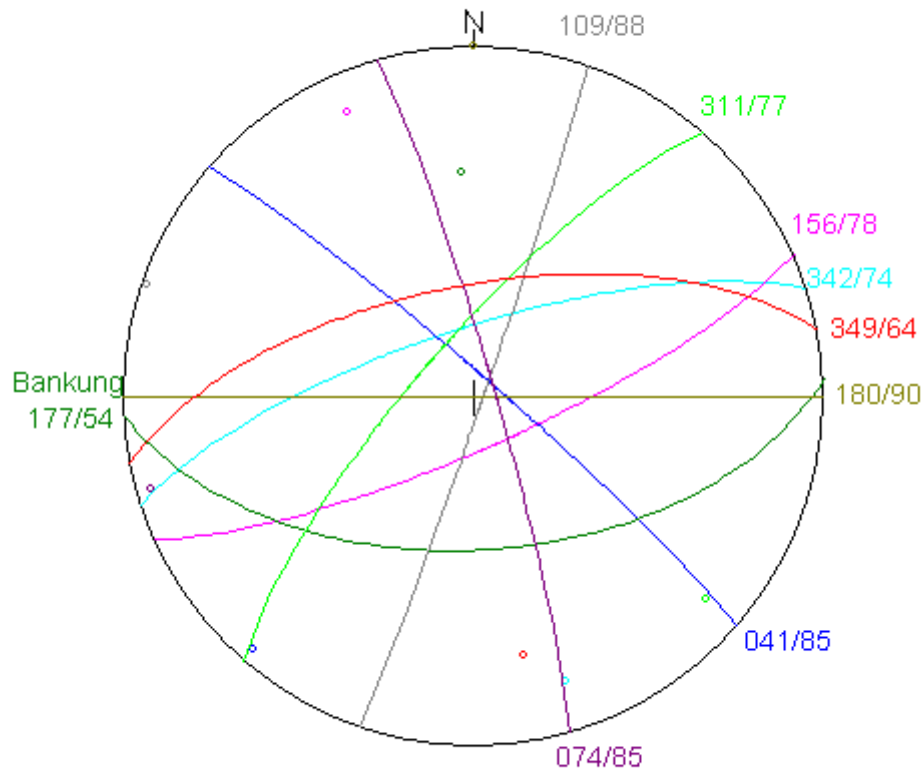
Tabelle 5 listet die gemessenen Parameter im Bereich Cliff auf.

Schar	N	$\alpha$ [°]	$\beta$ [°]	R [%]	K []	$\delta$ [°]	$\omega$ [°]
Aqua	41	335	70	92,17	24,91	5,72	16,25
Blue	42	39	79	94,03	32,72	4,90	14,14
Fuchsia	41	156	78	96,29	52,58	3,89	11,11
Green	61	181	56	96,57	57,35	3,02	10,67
Grey	21	109	88	93,56	29,57	7,53	14,70
Lime	43	309	80	96,17	51,05	3,85	11,28

**Tabelle 5:** Parameter der Trennflächen im Bereich Cliff;  $\alpha$ ...Einfallrichtung,  $\beta$ ...Einfallswinkel, R...prozentueller Regelungsgrad, K...Konzentrationsparameter,  $\delta$  ...Vertrauenskegel,  $\omega$  ...sphärischer Öffnungsgrad

#### 4.3.4 Feldkofel gesamt

Für den gesamten Feldkofel ergibt sich der in Abbildung 22 dargestellte Plot. Darin befinden sich sämtliche im Modell eingebauten Trennflächen. Dargestellt sind die Schwerpunkte der einzelnen Scharen.



**Abbildung 22:** Plot der Trennflächenschwerpunkte sämtlicher Trennflächen des Feldkofels

Die nachfolgende Tabelle 6 listet die Parameter der Trennflächen für den gesamten Feldkofel auf.

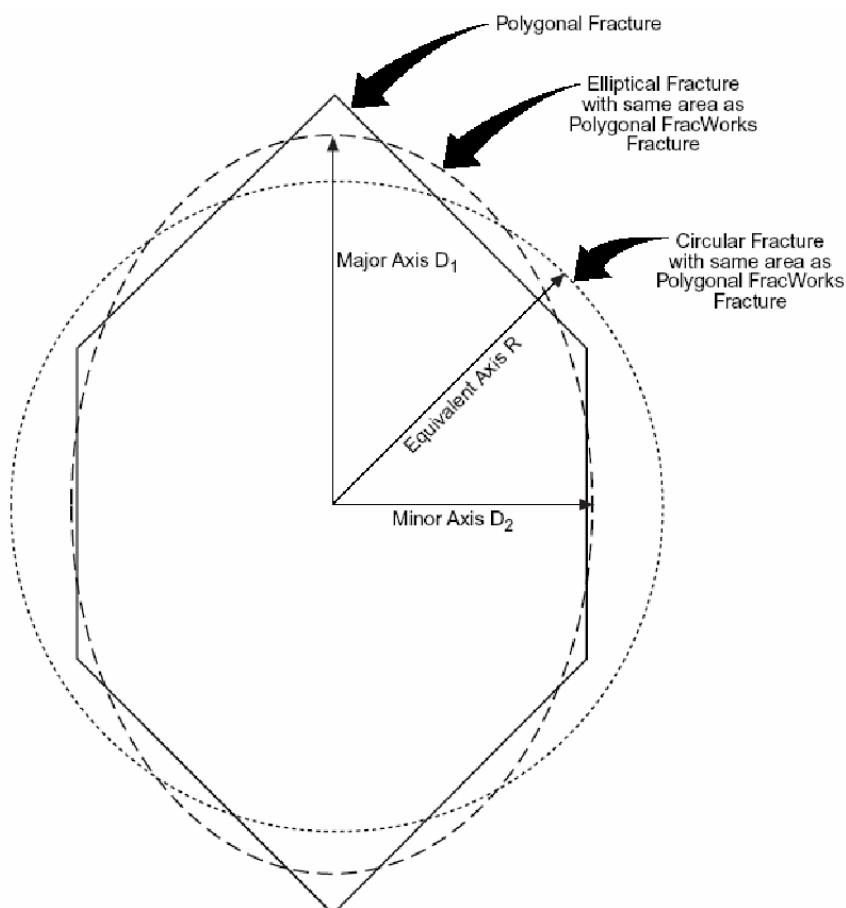
Schar	N	$\alpha$ [°]	$\beta$ [°]	R [%]	K []	$\delta$ [°]	$\omega$ [°]
Aqua	78	342	74	89,53	18,87	4,73	18,87
Blue	76	41	85	89,92	19,58	4,70	18,51
Fuchsia	41	156	78	96,29	52,58	3,89	11,11
Green	103	177	54	95,32	42,34	2,69	12,49
Grey	21	109	88	93,56	29,57	7,53	14,70
Lime	54	311	77	94,49	35,64	4,11	13,57
Olive	26	180	90	95,15	39,66	5,75	12,72
Purple	13	74	85	91,20	20,97	11,91	17,26
Red	7	349	64	94,22	29,65	15,07	13,91

**Tabelle 6:** Parameter aller Trennflächen des Feldkofels;  $\alpha$ ...Einfallrichtung,  $\beta$ ...Einfallswinkel, R...prozentueller Regelungsgrad, K...Konzentrationsparameter,  $\delta$  ...Vertrauenskegel,  $\omega$  ...sphärischer Öffnungsgrad

#### 4.4 Statistische Auswertungen des orientierungsscharbezogenen Equivalenzradius

Die aus RiScan ermittelten Flächengrößen von Trennflächenscharen wurden mittels der Statistiksoftware „R“ ausgewertet und ihre Verteilungen bezüglich Ausbisslänge (in weiterer Folge nach dem FracMan Konzept als Equivalenzradius bezeichnet) getestet. Diese Berechnungen wurden sowohl für den gesamten Feldkofel, als auch für die einzelnen Teilbereiche (Top, Middle, Cliff) durchgeführt. Die Formeln für die Berechnungen stammen aus [Liu, 2011/12]. Im Folgenden sind die wichtigsten Ergebnisse des gesamten Feldkofels aufgelistet, die vollständigen Ergebnisse, sowie die Werte der Teilbereiche, finden sich im Anhang wieder.

Da Trennflächen in der Natur verschiedenste Formen annehmen können, ist es möglich, dass die Berechnung der Fläche über mehrere Parameter, z.B. Länge und Breite, erfolgt. Das Konzept des Equivalenzradius stellt eine Vereinfachung dar. Es wird nur ein Parameter zur Berechnung der Fläche benötigt, der Radius. Zum besseren Verständnis ist in Abbildung 23 [aus FracMan7 Workshop; 2012] ein Beispiel gegeben: sämtliche Formen (polygonal, elliptisch, kreisförmig) besitzen den gleichen Flächeninhalt und können auch als Kreis beschrieben werden, wodurch die Flächenberechnung vereinfacht wird. Dadurch ist außerdem ein Vergleich der Trennflächen über einen einzigen Parameter - den Equivalenzradius - möglich. Dieser ist als Eingabeparameter für die Modellierungen in FracMan notwendig.



**Abbildung 23:** Bildhafte Erklärung des Equivalenzradius; sämtliche Formen haben den gleichen Flächeninhalt [aus FracMan7 Workshop; 2012]



In einem ersten Schritt wurde daher der Equivalenzradius jeder einzelnen Trennfläche mittels Excel berechnet. Dabei wurde aus der Fläche der einzelnen Trennflächen der Equivalenzradius mittels folgender Formel berechnet [aus FracMan7 Workshop; 2012]:

$$R_e = \sqrt{\frac{A_f}{\pi}}$$

$R_e$ ...Equivalenzradius  
 $A_f$ ...Fläche der Trennfläche  
 $\pi$  ...Pi

Für jede Trennflächenschar wurde eine Statistikübersicht, Stem & Leaf Darstellungen und Histogramme mit absoluter und auch prozentueller Häufigkeit berechnet. Tabelle 7 zeigt die Statistikzusammenfassung. Mit Ausnahme der Anzahl (= Count) sind sämtliche Werte in [m] angegeben.

Summary	Statistics						
Set	Count	Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
Aqua	78	0,3588	0,6067	0,8178	0,9678	1,192	2,221
Blue	76	0,491	0,904	1,401	1,781	2,281	8,268
Fuchsia	41	0,503	0,936	1,259	1,255	1,54	2,28
Green	103	0,456	0,9255	1,51	3,005	3,257	20,95
Grey	21	0,62	0,715	1,652	1,704	1,879	4,252
Lime	54	0,499	0,738	1,006	1,353	1,383	6,917
Olive	26	0,2965	0,4584	0,614	0,666	0,7216	2,024
Purple	13	1,3	1,488	2,42	3,421	4,333	11,4
Red	7	0,7749	1,072	1,181	1,317	1,578	1,963

**Tabelle 7:** Statistikübersicht des Equivalenzradius für alle Trennflächenscharen im Bereich des gesamten Feldkofels

Anhand der Stem & Leaf Darstellungen wurden die Häufigkeiten der einzelnen Werte ermittelt, die in weiterer Folge für die Klassenaufteilung der Histogramme erforderlich sind. Als Beispiel dient hierfür die folgende Stem & Leaf Darstellung des Sets Aqua:

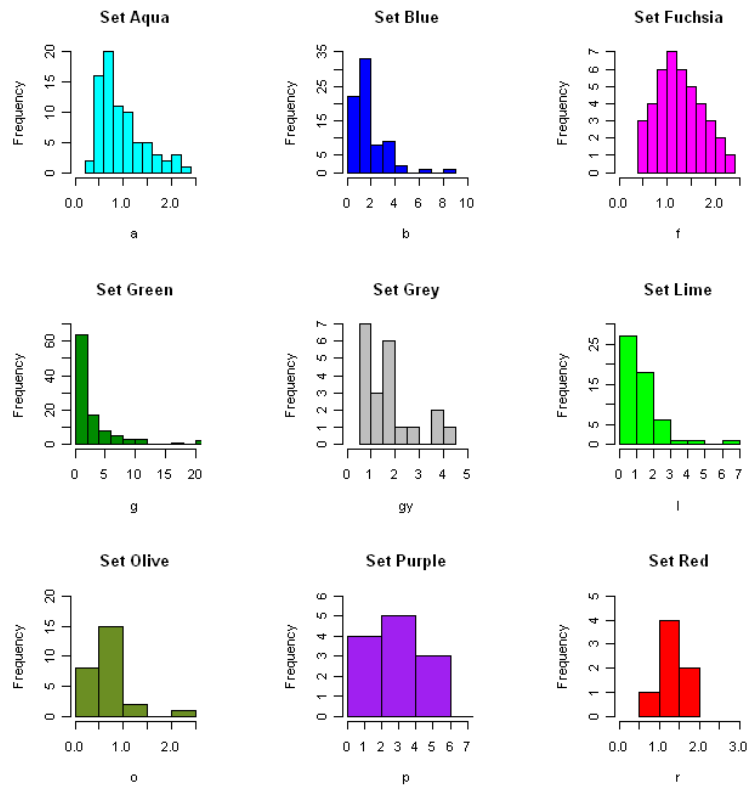
The decimal point is 1 digit(s) to the left of the |

```

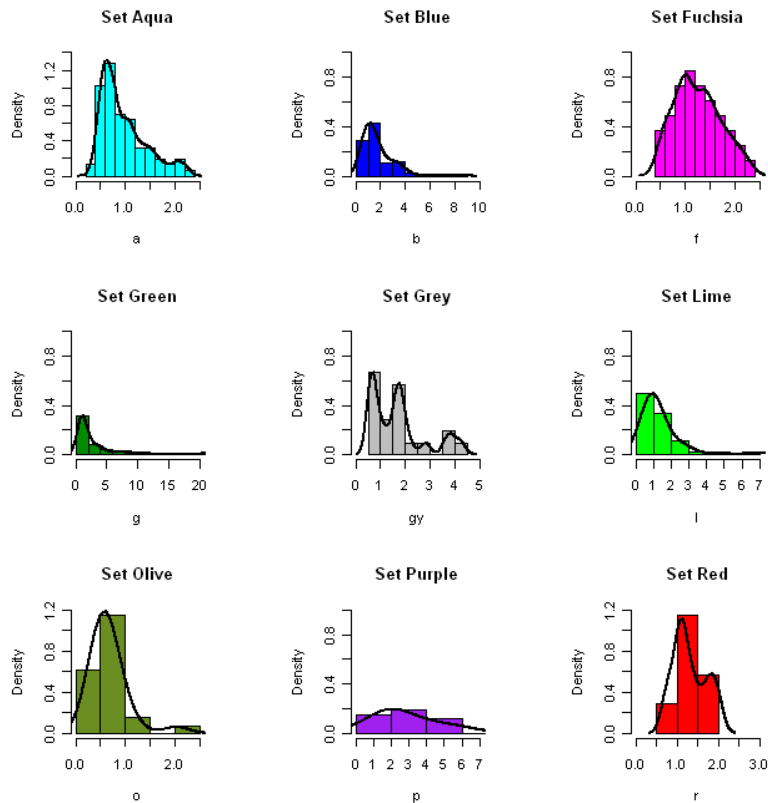
2 | 6
4 | 0611112344457789
6 | 000124467001124567889
8 | 2222599889
10 | 00678802399
12 | 57948
14 | 35737
16 | 147
18 | 05
20 | 27
22 | 02

```

Abbildung 24 zeigt die Histogramme des Equivalenzradius der Scharen a) mit absoluter Häufigkeit und b) prozentuell. In Abbildung 24 b) wird zusätzlich noch eine berechnete Density-Line dargestellt.



a) Histogramme mit absoluter Häufigkeit entlang der Y-Achse



b) Histogramme mit prozentueller Y-Achse und berechneter Density-Line

**Abbildung 24:** Histogramme des Equivalenzradius aller Trennflächenscharen mit a) absoluter Häufigkeit entlang der Y-Achse und b) prozentueller Y-Achse und Density-Line

Mittels verschiedener Statistikttests wurden die Verteilungen überprüft. Dabei kamen der Kolmogorov-Smirnov (=KS) Test, der Shapiro-Wilk Test, sowie der Chi<sup>2</sup> Test zum Einsatz. Für jedes Set wurde nach Normal-, Exponential- und Logarithmisch-Normalverteilung getestet. Dabei zeigt sich, dass die Berechnungen teilweise, je nach verwendetem Test, unterschiedliche Resultate bezüglich der Art der Verteilung liefern. Dies gilt vor allem für die Tests in den drei Teilbereichen. Sämtliche Testergebnisse finden sich im Anhang wieder, zur Veranschaulichung dienen die Testergebnisse von Set Aqua des gesamten Feldkofels:

Der KS-Test mit Set Aqua für eine Lognormalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: a  
D = 0.0934, p-value = 0.4765  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Aqua für eine Exponentiale Verteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: a  
D = 0.2648, p-value = 2.561e-05  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Aqua für eine Normalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: a  
D = 0.1613, p-value = 0.0306  
alternative hypothesis: two-sided

Der Shapiro-Test mit Set Aqua für eine Normalverteilung  
Shapiro-Wilk normality test  
data: a  
W = 0.8901, p-value = 6.025e-06

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Aqua für eine Normalverteilung  
Beobachtete Häufigkeit: 2 16 20 11 10 5 5 3 2 3 1  
Chi-squared test for given probabilities  
data: aob  
X-squared = 30.3727, df = 10, p-value = 0.0007443

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Aqua für eine Log-Normalverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: aob  
X-squared = 102169.4, df = 10, p-value < 2.2e-16

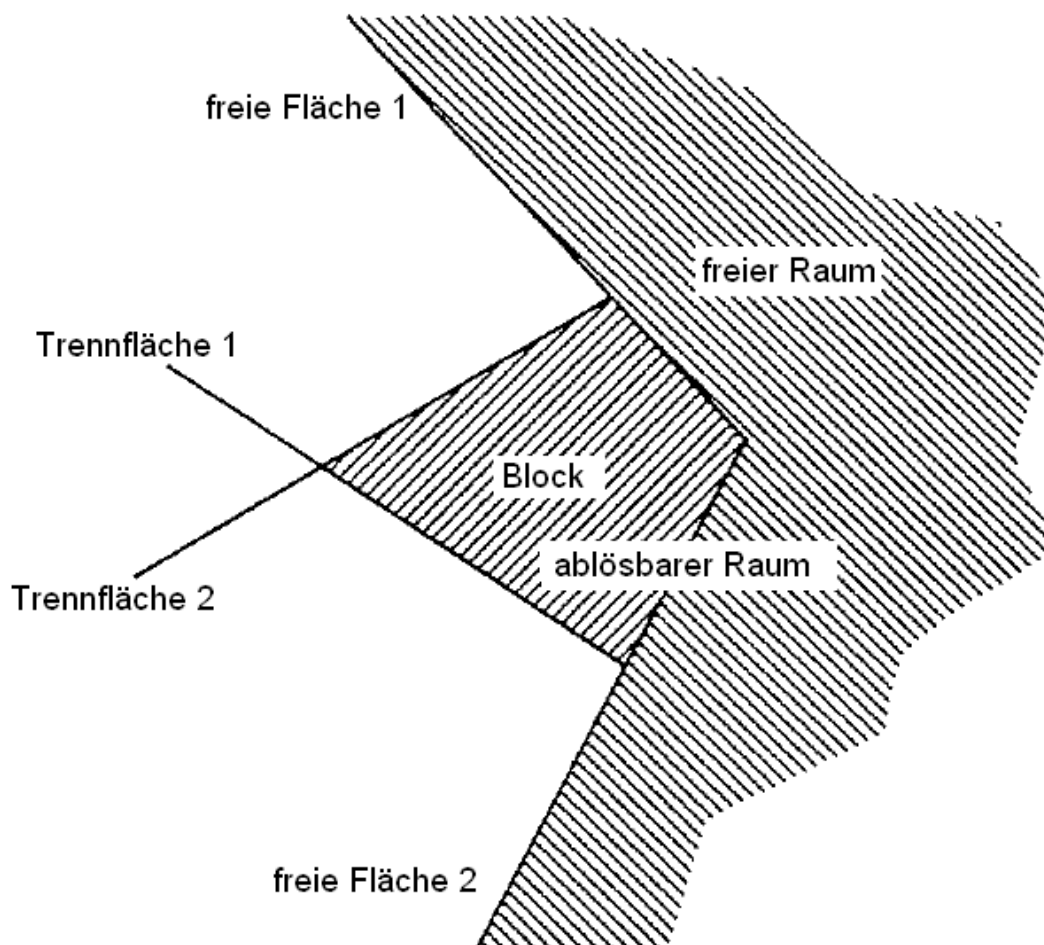
Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Aqua für eine Exponentialverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: aob  
X-squared = 27.1916, df = 10, p-value = 0.002429

Es ist zu erkennen, dass es sich bei Set Aqua laut KS Test am wahrscheinlichsten um eine Lognormalverteilung handelt, während der Chi<sup>2</sup> Test auf eine Exponentialverteilung deutet. Da jedoch der p-value für die Wahrscheinlichkeit einer Lognormalverteilung größer ist, wird diese bevorzugt. In den einzelnen Teilbereichen (z.B. Middle) sind auch uniforme Verteilungen aus den Histogrammen ersichtlich. Die Verteilungen des Äquivalenzradius sowie die statistischen Kennzahlen aus Tabelle 7 sind in weiterer Folge für die Modellierung des Trennflächensystems in FracMan von Bedeutung.

## 4.5 Key Block Theorie

Anhand der Schwerpunktsflächen und mittels gemessener Trennflächenabstände aus dem Laserscanmodell kann die Keyblock Theorie [nach Goodman & Shi, 1985] angewendet werden, um mögliche instabile Blöcke zu identifizieren und deren Form darzustellen. Im Rahmen dieser Arbeit kamen dafür von Prof. Liu erstellte DOS Programme zum Einsatz, welche die Trennflächenscharen und die freien Flächen (Versagensfläche, Sturz- bzw. Rutschungsfläche) plotten [Liu, 2011/12]. Die freien Flächen wurden wie die Trennflächenabstände ebenfalls aus dem Laserscanmodell ermittelt und so gewählt, dass sie möglichst der Hangneigung entsprechen. Anhand eines ersten Programms können sogenannte Keyblocks abgeleitet werden, sowie deren Versagensmechanismus (falling, sliding). Mittels eines weiteren Programms können diese Keyblocks dargestellt und ihr Volumen ermittelt werden.

Laut Keyblocktheorie kann zwischen Fels, freiem Raum und ablösbarem Raum unterschieden werden. Diese werden durch Trennflächen und freie Flächen definiert. Um dies zu veranschaulichen, ist in Abbildung 25 eine Darstellung eines von Trennflächen definierten Blockes sowie der unterschiedlichen Räume dargestellt [aus Goodman & Shi, 1985, modifiziert]. Ein Block ist potentiell instabil und wird als Keyblock bezeichnet, wenn er sich aus dem Fels in den freien Raum bewegen kann. Die Kombination aus freiem Raum und potentiell instabiler Blöcke wird als ablösbarer Raum bezeichnet. Es ist zu beachten, dass es sich hierbei um eine zweidimensionale Darstellung handelt.

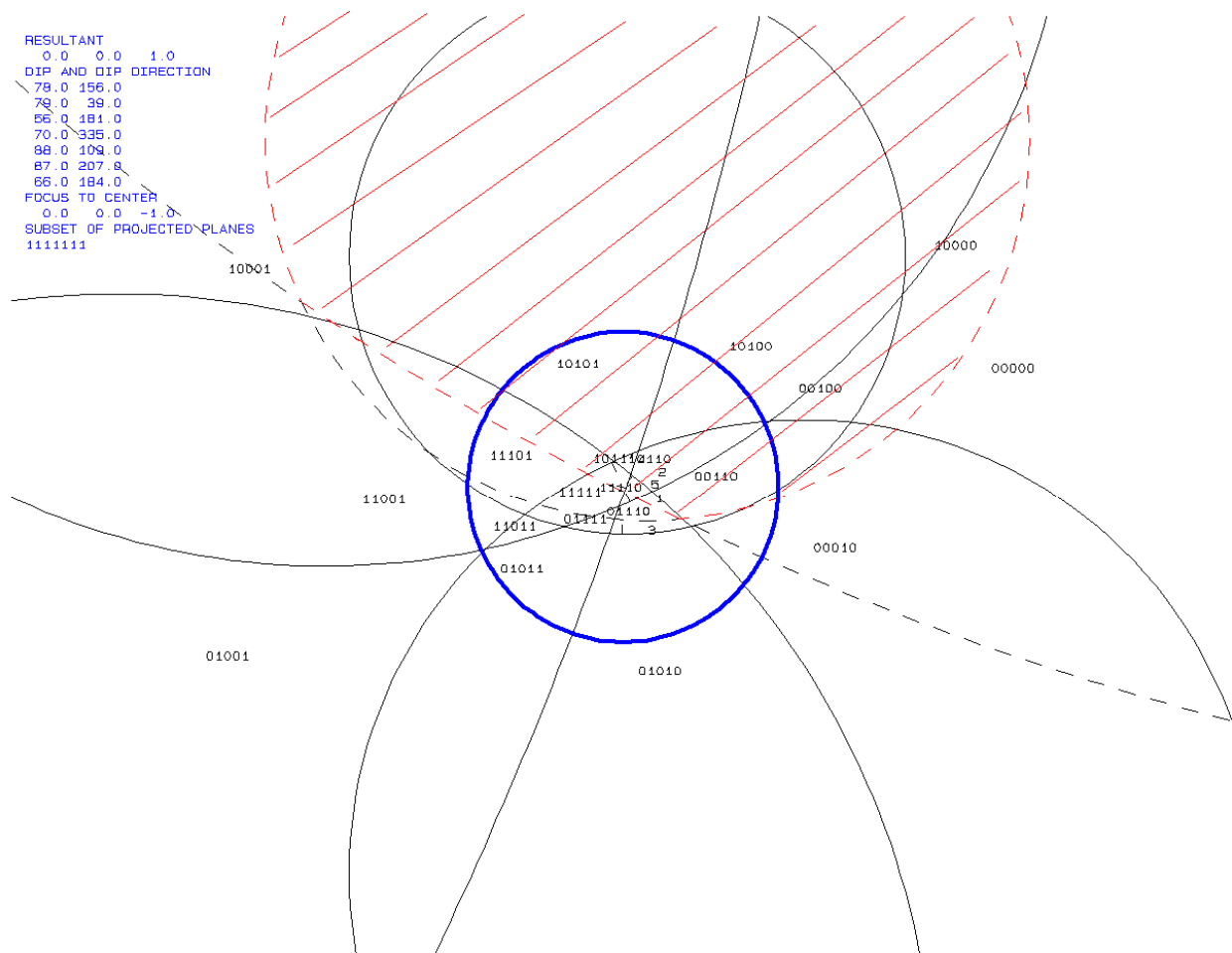


**Abbildung 25:** Darstellung eines von Trennflächen definierten Blockes; dargestellt sind freie Flächen, Trennflächen, ein potentieller Block, sowie freier und ablösbarer Raum [aus Goodman & Shi, 1985, modifiziert]

Um eine 3D Darstellung zu ermöglichen ist eine Projektion notwendig. Dabei werden alle Trennflächenscharen und freien Flächen projiziert dargestellt. Daraus ergeben sich verschiedene sogenannte „Pyramids“ (= Pyramiden):

- Excavation Pyramid (= EP): beschreibt den durch freie Flächen abgegrenzten Blockbereich
- Space Pyramid (= SP): der Komplementärbereich zur EP
- Joint Pyramid (= JP): durch natürliche Trennflächen abgegrenzter Blockbereich
- Block Pyramid (= BP): definiert als der Durchschnitt von JP und EP (=ein Block)

Befindet sich eine JP komplett in der SP bedeutet das, dass es sich um einen potentiell instabilen Block handelt. In Abbildung 26 ist die Projektion aller Trennflächenscharen und freien Flächen für Cliff\_Part\_3 dargestellt, um die potentiell instabilen Blöcke zu identifizieren. Durchgezogene Linien beschreiben Trennflächen, bei den unterbrochenen Linien handelt es sich um die freien Flächen, der blaue Kreis ist der Referenzkreis. Der rote Bereich beschreibt die EP, komplementär dazu ist der Bereich der SP. Alle JPs, die nun vollständig außerhalb des roten Bereiches liegen, befinden sich in der SP und sind somit potentiell instabil. Dabei handelt es sich um die Joint Pyramids (JP) 01001, 01010, 01011, 01111 und 11011. In Kombination mit den freien Flächen wird noch das Zahlenkürzel 11 der Excavation Pyramids (EP) hinzugefügt, das bedeutet, dass die Blöcke sich unter den freien Flächen und somit im Fels befinden.

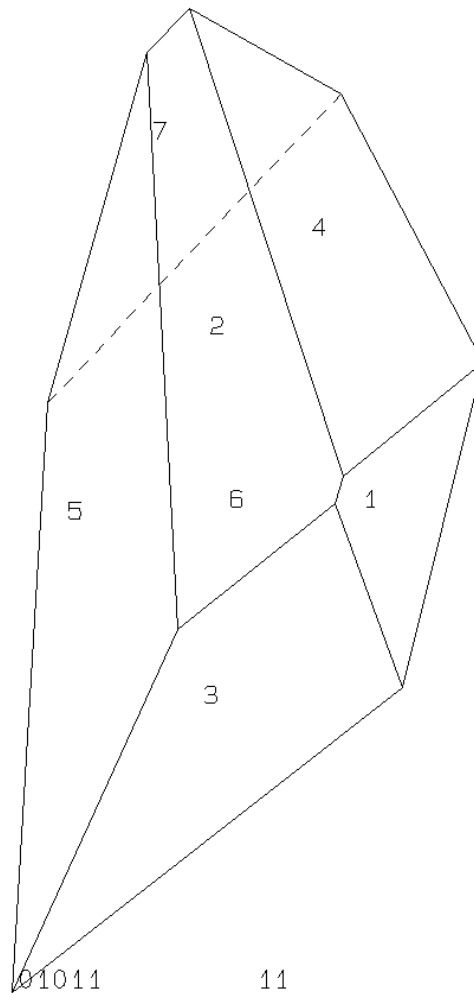


**Abbildung 26:** Projektionsplot für Cliff\_Part\_3; durchgezogene Kreise sind Trennflächen, die freien Flächen sind durch Unterbrechungen gekennzeichnet, der blaue Kreis ist der Referenzkreis; alle vollständig außerhalb des roten Bereiches liegenden Blöcke sind potentiell instabil

In der folgenden Abbildung 27 ist noch ein instabiler Block zur Veranschaulichung dargestellt. Es handelt sich dabei um Block 0101111, der aus Abbildung 26 als instabil identifiziert worden ist. In Tabelle 8 sind die verwendeten Trennflächenabstände, die in RiScan gemessen wurden, aufgelistet. Alle weiteren Blöcke, sowie die Ergebnisse der anderen Teilbereiche, finden sich im Anhang und auf der beiliegenden Daten DVD wieder.

```

PROJECTIVE DIRECTION:
 1.0  1.0  0.5
DIP, DIP D., DISTANCE
78.0 156.0  0.5
79.0  39.0  0.3
56.0 181.0  0.6
70.0 335.0  0.4
98.0 109.0  0.5
87.0 207.0  1.0
66.0 164.0  1.0
VOLUME= 4.91D+00
  
```

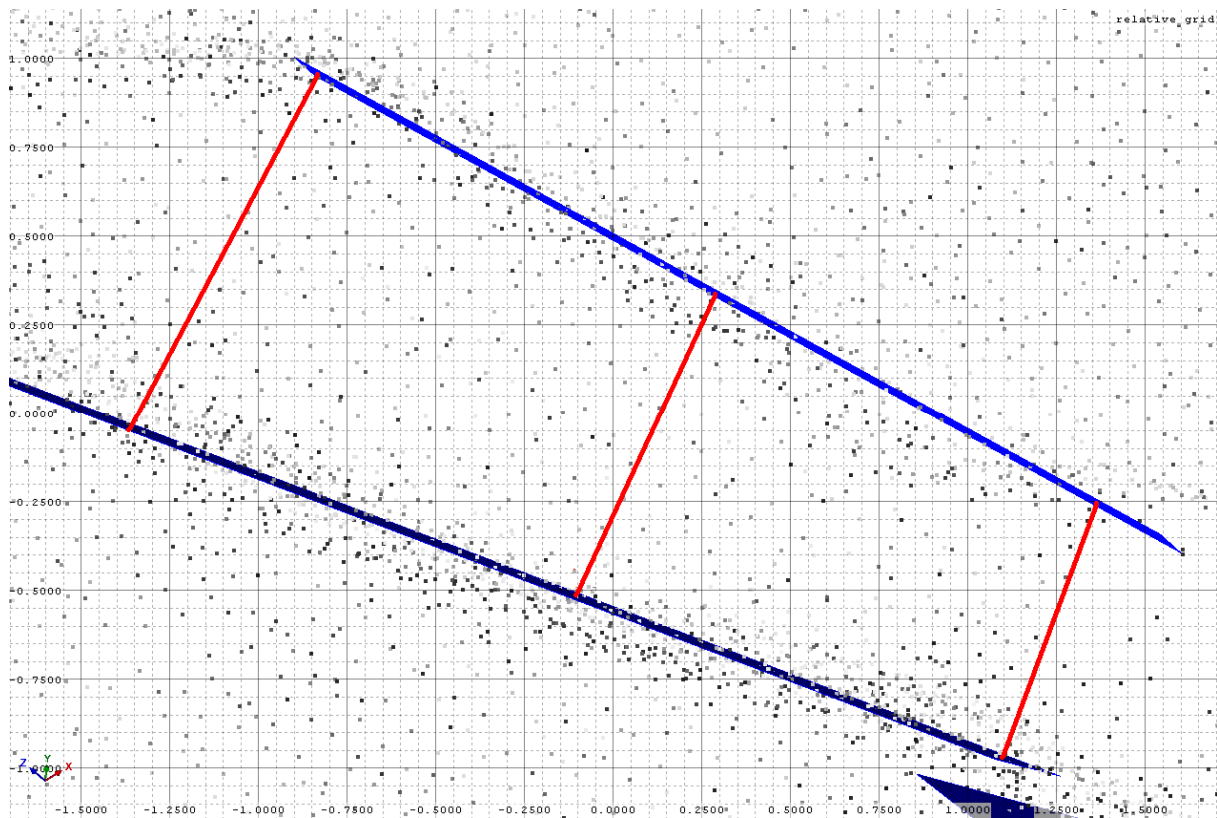


**Abbildung 27:** Block 0101111

Set	Joint Spacing [m]
Aqua	0,409
Blue	0,530
Fuchsia	0,548
Green	0,625
Grey	0,521
Lime	0,337

**Tabelle 8:** Trennflächenabstände im Bereich Cliff

Das Volumen des Blockes beträgt in diesem Fall  $4,91\text{m}^3$ . Dabei ist jedoch anzumerken, dass auf Grund der Tatsache, dass das Konzept des Trennflächenabstandes in der Natur nicht unbedingt der Realität entspricht, kein eindeutiger Trennflächenabstand gegeben ist. Um dies zu verdeutlichen sind in Abbildung 28 zwei Trennflächen derselben Schar dargestellt. In rot sind drei mögliche Messungen eingezeichnet. Es ist ersichtlich, dass die Trennflächen nicht exakt parallel sind, sondern sich einander annähern. Ein eindeutiger Trennflächenabstand ist daher nicht gegeben.



**Abbildung 28:** Zwei Trennflächen einer Schar, es ist kein eindeutiger Trennflächenabstand gegeben, in rot sind die unterschiedlichen Abstände eingezeichnet

Aus diesem Grund dient diese Methode im Rahmen der vorliegenden Arbeit nur dazu, einen Überblick über instabile Blöcke zu erhalten. Für eine exakte Bestimmung gefährdeter Volumina ist eine Modellierung vorzuziehen. In weiterer Folge wurden die mittels Key Block Theorie erhaltenen Ergebnisse nicht in die Modellierung miteinbezogen.

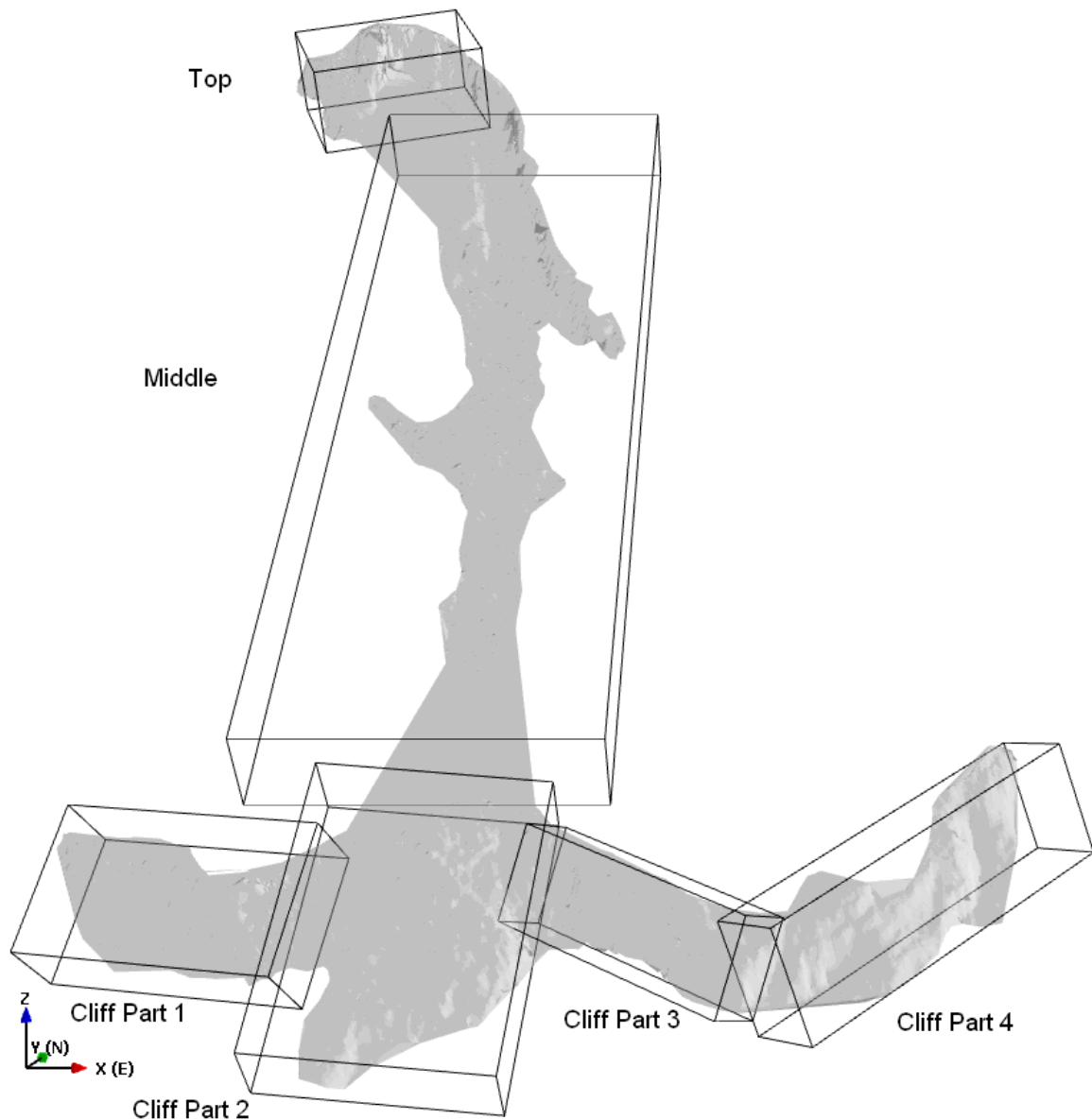
Die Blocktheorie geht von der Annahme aus, dass Trennflächen eine unendliche Größe besitzen und überall durchgehend existieren [Goodman & Shi; 1985]. Sind bei einer Böschung alle Trennflächen homogenbereichsmäßig erfassbar, ist die Anwendung der Blocktheorie zu empfehlen, da sie immer noch Standard im Felsbau ist. Im Falle der vorliegenden Arbeit sind die Trennflächen nicht direkt zugänglich und wurden mittels Laserscan hochpräzise und ortsbezogen erfasst. Die für die Stabilitätsanalyse nötigen Berechnungen werden mittels FracMan durchgeführt, dessen Algorithmus eine Erweiterung der Blocktheorie verwendet. Dabei werden die Trennflächengröße und der Ortsbezug berücksichtigt [Liu; 2011/12]. Dadurch ist eine bessere Beurteilung der Stabilität gegeben.

## 4.6 FracMan

FracMan ist eine Software, die es erlaubt anhand vorher definierter Bereiche und statistisch als signifikant identifizierter Parameter Trennflächen einzubauen, diese mit einer freien Fläche zu verschneiden und eine Stabilitätsanalyse durchzuführen.

Dabei wurde zur Vereinfachung für jeden Teilbereich des Feldkofels eine Box mit den aus RiScan gemessenen Werten erstellt. Der Bereich Cliff wurde noch in vier Bereiche unterteilt, die von West (Part 1) nach Ost (Part 4) nummeriert sind.

Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 29 die Boxen in Kombination mit dem aus dem Laserscan erhaltenen 3D Morphologiemodell dargestellt.



**Abbildung 29:** Boxen der einzelnen Teilbereiche über dem aus dem Laserscan generierten 3D Hangmorphologiemodell



Tabelle 9 zeigt eine Zusammenfassung über die Größe und Lage der Boxen im Raum. Diese sind gedreht, um möglichst der Hangmorphologie zu entsprechen.

Top	Box	center [m]	length [m]	trend [°]	plunge [°]
	x	23321,2	60	74,6615	-11,7822
	y	166195	45	337,515	-30,8133
	z	1416,65	30	183,055	-56,5341
Middle	Box	center [m]	length [m]	trend [°]	plunge [°]
	x	23372,6	95	90	0
	y	166066	300	0	-42,7096
	z	1286,92	25	180	-47,2904
Cliff Part 1	Box	center [m]	length [m]	trend [°]	plunge [°]
	x	23316,5	70	106,026	1,91163
	y	165938	20	14,7921	32,8324
	z	1154,06	40	18,9832	-57,0976
Cliff Part 2	Box	center [m]	length [m]	trend [°]	plunge [°]
	x	23374	60	92,9334	4,31633
	y	165926	20	359,337	39,7272
	z	1149,2	80	8,08371	-49,943
Cliff Part 3	Box	center [m]	length [m]	trend [°]	plunge [°]
	x	23429,9	70	126,896	13,2273
	y	165920	15	34,6452	9,48578
	z	1153,3	25	90	-73,6212
Cliff Part 4	Box	center [m]	length [m]	trend [°]	plunge [°]
	x	23496,6	100	50,655	-21,3777
	y	165928	20	321,725	2,7323
	z	1160,42	30	238,66	-68,4312

**Tabelle 9:** Zusammenfassung der in FracMan erstellten Boxen für die Trennflächengenerierung

Im Verlauf der Modellierungen hat sich gezeigt, dass die Computerleistung des Instituts für angewandte Geowissenschaften der technischen Universität Graz mit der Modellierung im Bereich Middle überfordert ist, daher wurde auch dieser Bereich noch in die Bereiche „Middle Up“ und „Middle Down“ unterteilt, da ansonsten für die freie Fläche 1 keine geomechanische Analyse möglich gewesen wäre. Diese Unterteilung wurde direkt im Modell durchgeführt.

In diesen Boxen wurden mittels FracMan die in den jeweiligen Bereichen vorhandenen Trennflächenscharen generiert.

Dazu werden folgende Eingangsparameter benötigt:

- Häufigkeit der Trennflächen (=Intensität)
- Orientierung
- Größe (Äquivalenzradius)
- Verteilungsart der Äquivalenzradii
- Termination

ad Häufigkeit der Trennflächen: es wurde im Rahmen dieser Arbeit der Parameter  $P_{32}$  angewendet. Der  $P_{32}$  Wert ist die „volumetrische Trennflächendichte“ [FracMan User’s Manual; 2011] und wird berechnet als die Summe der Trennflächengröße einer Schar dividiert durch das Volumen. Es ergibt sich daraus ein Wert der Dimension [1/m], der die gesamte Flächengröße aller Trennflächen einer Schar beschreibt. Erste Auswertungsversuche haben jedoch gezeigt, dass der ermittelte Wert sehr gering ist und kein natürliches Modell darstellt. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass nicht alle in der Natur vorhandenen Trennflächen im Laserscan erfasst werden können, einerseits auf Grund von Vegetation und auch der Tatsache, dass sehr kleine Trennflächen des Kalkgesteins aus einer Entfernung von über 1000m im Scan nicht eindeutig identifiziert werden können. Da es sich am Feldkofel um teils sehr stark zerklüfteten Kalk handelt ist eine vollständige Erfassung nicht möglich. Es wurde daher ein Umweg über die Oberfläche des Modells gewählt, der zu einem besseren Ergebnis führt: dazu wurde der prozentuelle Anteil der einzelnen Trennflächenscharen errechnet und auf die Oberfläche des Laserscanmodells übertragen. Unter der Annahme, dass die Hangoberfläche das Resultat von Trennflächen ist, wurde die Summe aller im Laserscanmodell eingebauten Trennflächen gebildet und der prozentuelle Flächenanteil der jeweiligen Scharen berechnet. Die tatsächliche Hangoberfläche kann ebenfalls mittels RiScan ermittelt werden. Durch Multiplikation der tatsächlichen Hangoberfläche mit den Prozentsätzen der einzelnen Scharen erhält man den Anteil der einzelnen Trennflächenscharen an der Hangoberfläche (in  $m^2$ ). Dadurch ergeben sich höhere  $P_{32}$  Werte als im ersten Versuch. Tabelle 10 stellt die Werte der zwei Methoden vergleichend gegenüber. Es handelt sich hierbei um die Werte aus dem Bereich Cliff.  $P_{32}$  bezieht sich auf die direkt aus dem Modell abgeleiteten Werte für die Summe der Fläche der Trennflächen pro Volumen,  $P_{32}^*$  auf die mittels Oberflächenmodell prozentuell umgerechneten Trennflächensummen.

Set	Fläche [ $m^2$ ]	$P_{32}$ [1/m]	Fläche * [ $m^2$ ]	$P_{32}^*$ [1/m]
Aqua	483,731	0,0199	629,9943	0,0259
Blue	231,181	0,0371	449,9583	0,0523
Fuchsia	314,201	0,0212	442,9838	0,0414
Green	1129,313	0,0391	5261,0001	0,1820
Grey	190,197	0,0282	247,7061	0,0367
Lime	269,677	0,0506	351,2183	0,0659

**Tabelle 10:**  $P_{32}$  mit den aus dem Modell abgelesenen Werten für die Trennflächensumme und den mit Bezug auf die Modelloberfläche umgerechneten Trennflächensummen und daraus resultierender  $P_{32}$  Werte (gekennzeichnet mit \*); Werte aus dem Bereich Cliff

Es zeigt sich, dass durch die prozentuelle Umrechnung auf die tatsächliche Oberfläche höhere  $P_{32}$  Werte errechnet werden. Da diese neu berechneten  $P_{32}$  Werte jedoch einen zweidimensionalen Bezug haben, werden sie unter Berücksichtigung der Auflockerungstiefe des gesamten Hanges verzehnfacht, um die dritte Dimension zu kompensieren. Diese verzehnfachten Werte werden in FracMan für die Erstellung der Trennflächen als Eingangsparameter verwendet.

Die mit diesen Werten generierten Trennflächensystemmodelle entsprechen in ihren Trennflächenabständen und Bankungsmächtigkeiten nun der aus der Geländebegehung resultierenden Fotodokumentation (siehe Anhang A - Fotos).

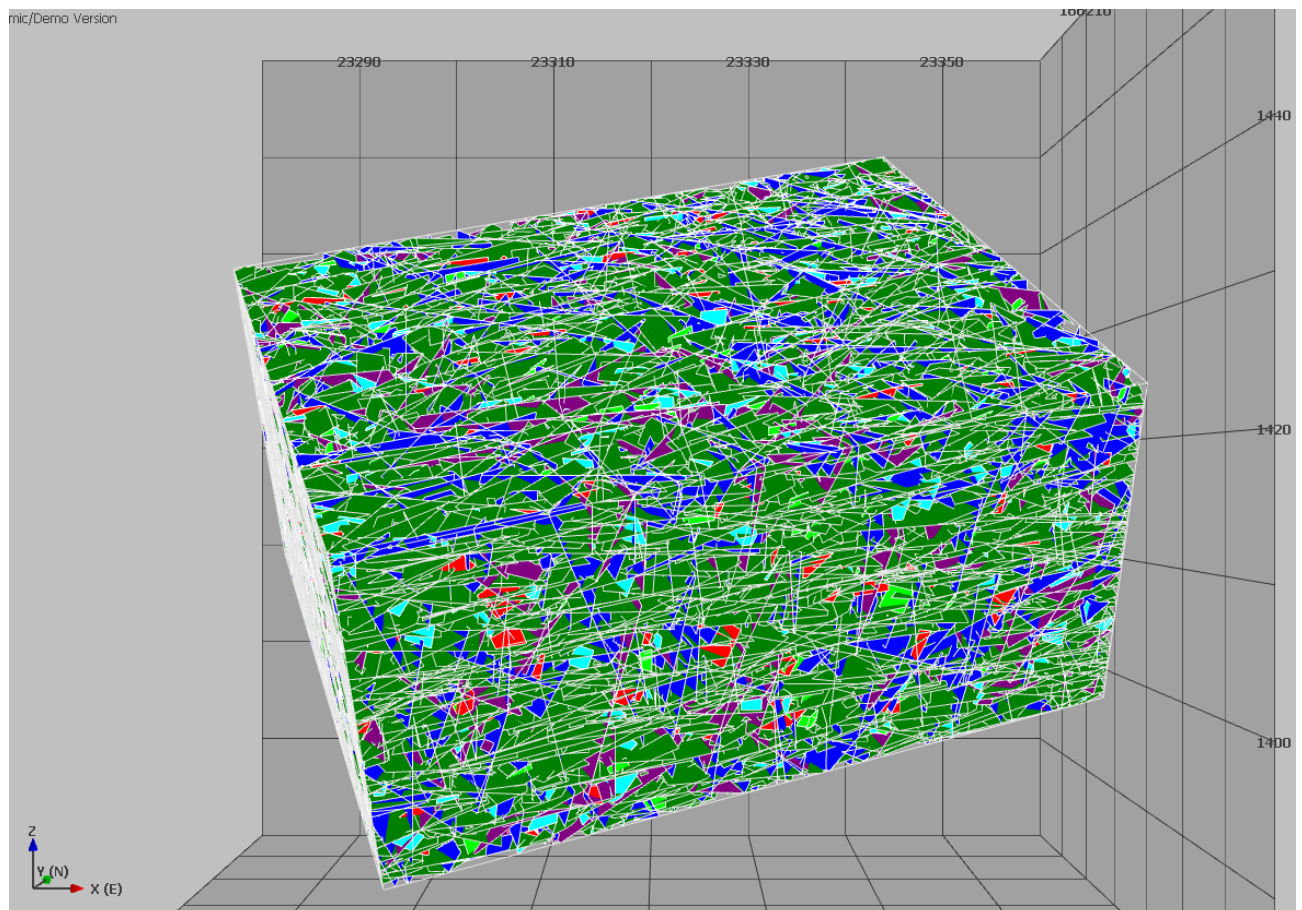
ad Orientierung: die Orientierung wurde direkt aus den Schwerpunktfächen der Sphairaplots (vgl. Abb. 19 bis 22) übernommen, da diese bereits die aus dem Laserscanmodell gemessenen Trennflächen beschreiben. Zusätzlich wird noch der Konzentrationsparameter K benötigt. Auch dieser kann aus den Sphairaplots und Statistiken (vgl. Abb.19 bis 22 und Tab. 3 bis 6) entnommen werden.

ad Größe (Äquivalenzradius): die hierfür benötigten Werte wurden bereits für die statistischen Berechnungen ermittelt und konnten somit direkt eingegeben werden. Diese Werte entsprechen dem Mittelwert aus den Äquivalenzradii der einzelnen Trennflächensets (vgl. Tabelle 7)

ad Verteilungsart der Äquivalenzradii: aus den Plots der statistischen Berechnungen (vgl. Abb. 24 sowie die begleitenden Testergebnisse) kann die Verteilungsart ermittelt werden, die für die Eingabe in FracMan notwendig ist. Des Weiteren wurden auch je nach statistisch signifikanter Verteilungsart die zusätzlich notwendigen Parameter berechnet, z.B. für eine Lognormalverteilung Mittelwert und Standardabweichung.

ad Termination: die Termination beschreibt wie viel Prozent der Trennflächen in einer anderen Trennfläche enden. 0% bedeutet, dass keine Trennfläche in einer anderen endet, 100% Prozent bedeutet, dass alle Trennflächen ineinander enden. Dabei wird Bezug genommen auf bereits vorhandene Trennflächenscharen, was bedeutet, dass man Trennflächenscharen teils gleichzeitig erstellen muss, um zu verhindern, dass die generierten Trennflächen nicht in anderen, nicht der Natur entsprechenden, Sets enden. Bei der Modellierung wurde deshalb zuerst die Bankung (Set Green) mit einer Termination von 0% erstellt. Alle weiteren Sets wurden gleichzeitig erstellt mit einer Termination von 100% in den Bankungsflächen. Dies bedeutet für das Modell, dass alle Trennflächensets in der Bankung enden.

Aus all diesen Eingangsparametern werden in FracMan die Trennflächensets definiert und anschließend generiert. In Tabelle 11 sind sämtliche Eingangsparameter für die Trennflächengenerierung in den einzelnen Bereichen aufgelistet, als Beispiel zeigt Abbildung 30 das Boxmodell mit eingebauten Trennflächen für den Bereich des Gipfels (= Top). Die übrigen Boxmodelle mit eingebauten Trennflächen finden sich auf der Daten DVD wieder.



**Abbildung 30:** Box für den Bereich Top mit generierten Trennflächenscharen

Top

Set	Dip [°]	Dip Direction [°]	K Value []	Equi r [m]	P <sub>32</sub> [1/m]	P <sub>32</sub> tenfold [1/m]	Verteilung	MW [m]	STABW [m]
Aqua	71	358	62,59	0,9752	0,0071	0,0707	lognormal	0,9752	0,3768
Green	53	171	37,91	2,6323	0,2123	2,1226	exponential	2,6323	3,0194
Lime	63	318	64,99	0,8905	0,0038	0,0383	uniform	0,8905	0,26
Purple	87	74	34,33	2,5105	0,0284	0,2838	exponential	2,5105	1,6544
Red	64	349	102,685	1,3169	0,0054	0,0538	normal	1,3169	0,4165
Blue	83	43	57,74	2,7529	0,0720	0,7204	exponential	2,7529	2,1204

Middle

Set	Dip [°]	Dip Direction [°]	K Value []	Equi r [m]	P <sub>32</sub> [1/m]	P <sub>32</sub> tenfold [1/m]	Verteilung	MW [m]	STABW [m]
Aqua	86	342	140,035	0,6930	0,0032	0,0322	lognormal	0,693	0,2347
Olive	89	180	91,875	0,6659	0,0042	0,0419	lognormal	0,6659	0,3472
Green	42	175	258,06	11,3928	0,4382	4,3820	uniform	11,3928	6,6484
Blue	79	218	73,135	1,9352	0,0276	0,2761	lognormal	1,9352	1,1718
Purple	80	76	69,16	4,8791	0,0514	0,5137	exponential	4,8791	3,8528

Cliff

Set	Dip [°]	Dip Direction [°]	K Value []	Equi r [m]	P <sub>32</sub> [1/m]	P <sub>32</sub> tenfold [1/m]	Verteilung	MW [m]	STABW [m]
Aqua	70	335	40,5	1,1057	0,0259	0,2590	lognormal	1,1057	0,5104
Fuchsia	78	156	61,395	1,2412	0,0414	0,4136	lognormal	1,2552	0,4622
Green	56	181	68,24	1,9946	0,1820	1,8195	exponential	1,9693	1,4324
Blue	79	39	53,64	1,3596	0,0523	0,5231	lognormal	1,3646	0,7332
Grey	88	109	72,665	1,7041	0,0367	0,3672	lognormal	1,7041	1,1148
Lime	80	309	56,85	1,4712	0,0659	0,6586	exponential	1,4712	1,2042

**Tabelle 11:** Tabelle mit sämtlichen notwendigen Eingangsparametern für die Erstellung von Trennflächen in FracMan, aufgeteilt in die drei Teilbereiche Top, Middle und Cliff

Als nächster Schritt muss nun eine freie Fläche (in dieser Arbeit als Face bezeichnet) definiert werden, an der es zum Versagen des Felsverbandes kommen kann. Diese freien Flächen wurden aus dem Laserscanmodell ermittelt und anhand der Werte für Dip und Dip Direction in FracMan erstellt. Tabelle 12 zeigt die für die entsprechenden Teilbereiche verwendeten freien Flächen. Da Cliff\_Part\_3\_Face\_01 und Cliff\_Part\_3\_Face\_02 praktisch identisch sind, wurde Cliff\_Part\_3\_Face\_02 nicht in der Modellierung berücksichtigt. Für Cliff\_Part\_1 und Cliff\_Part\_2 kann beide Male dasselbe Face angewendet werden.

Name	dip [°]	dip direction [°]
Cliff_Part_1_Face	60	186
Cliff_Part_2_Face	60	186
Cliff_Part_3_Face_01	87	208
Cliff_Part_3_Face_03	66	184
Cliff_Part_4_Face_01	74	135
Cliff_Part_4_Face_02	50	161
Top_Face_01	44	170
Top_Face_02	84	51
Top_Face_03	82	170
Middle_Face_01_Up	44	180
Middle_Face_01_Down	44	180
Middle_Face_02	87	247

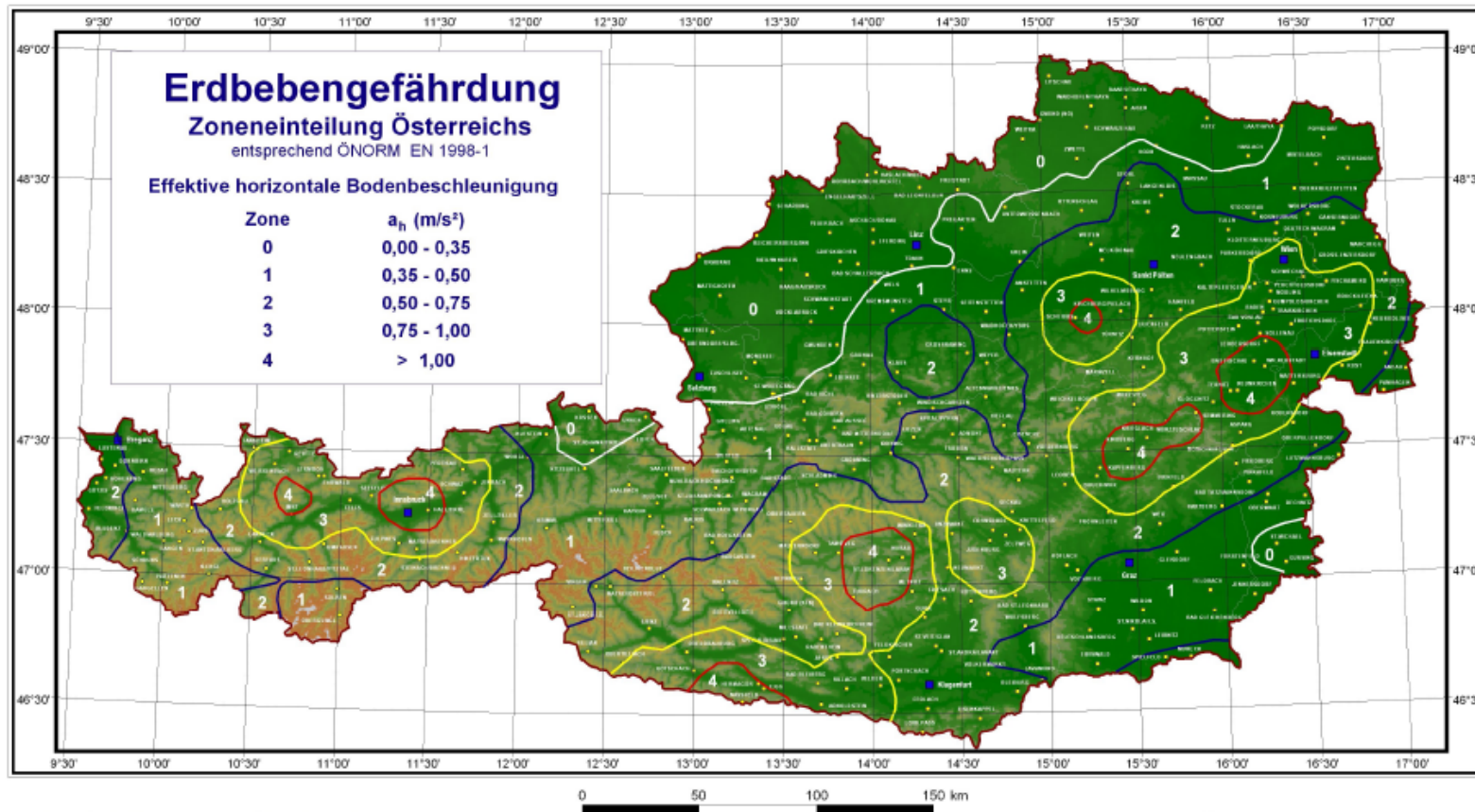
**Tabelle 12:** Werte der freien Flächen (=Faces), aus RiScan entnommen

Um zu ermitteln, ob und wie viele Blöcke instabil sind, muss nun eine geomechanische Analyse mittels FracMan durchgeführt werden. Dabei werden die in der Box generierten Trennflächensets mit der freien Fläche verschnitten, um Blöcke zu generieren. Dazu ist es wieder notwendig Eingangsparameter für die Analyse festzulegen, unter anderem Gesteinsdichte, Reibungswinkel, seismische Beschleunigung etc.

Im Rahmen der in dieser Arbeit durchgeführten Analysen wurden unterschiedliche Werte kombiniert, um unterschiedliche Szenarien zu modellieren. Während die Gesteinsdichte bei allen Modellierungen mit  $2700 \text{ kg/m}^3$  gleich bleibt, wurden für den Reibungswinkel unterschiedliche Werte angenommen. Da keine exakten Werte vorhanden sind wurde einerseits mit einem „Worst Case“ von  $26,5^\circ$  (vom Programm als Standard definierter Reibungswinkel) und einem „Best Case“ von  $45^\circ$  modelliert. Des Weiteren wurden die Werte für die seismische Beschleunigung entsprechend von Werten der ZAMG angenommen. Dazu ist in Abbildung 31 eine Karte, die die Erdbebenbeschleunigung in Österreich darstellt. Das Untersuchungsgebiet befindet sich in Zone 3, das bedeutet es können seismische Beschleunigungen zwischen  $0,75$  und  $1,00 \text{ m/s}^2$  auftreten. Diese Geschwindigkeiten wurden in [g] umgerechnet, mit der Relation  $1g = 9,81 \text{ m/s}^2$  [Quelle: Wikipedia.org; Peak Ground Acceleration, Stand: 19.8.2013].

Außerdem wurden zusätzlich noch Modellierungen mit konstantem Wasserdruck in den vertikalen Zugklüften durchgeführt. Hierbei wurde von einem maximalen Monatsniederschlag von  $429 \text{ mm}$  ausgegangen [Kulterer, 2005]. Umgerechnet entspricht dieser Wert einem Druck von ca.  $0,00421 \text{ MPa}$ .

Dadurch ergeben sich pro Face acht Modellierungen, deren Kennwerte in Tabelle 13 zusammengefasst sind. Um die Ergebnisse vergleichen zu können, wurden nur die Analyseparameter geändert, die generierten Trennflächen sind in den einzelnen Boxen stets dieselben.



Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik  
Hohe Warte 38  
A-1190 Wien

Autor: Dr. Wolfgang Lenhardt  
© ZAMG 2010

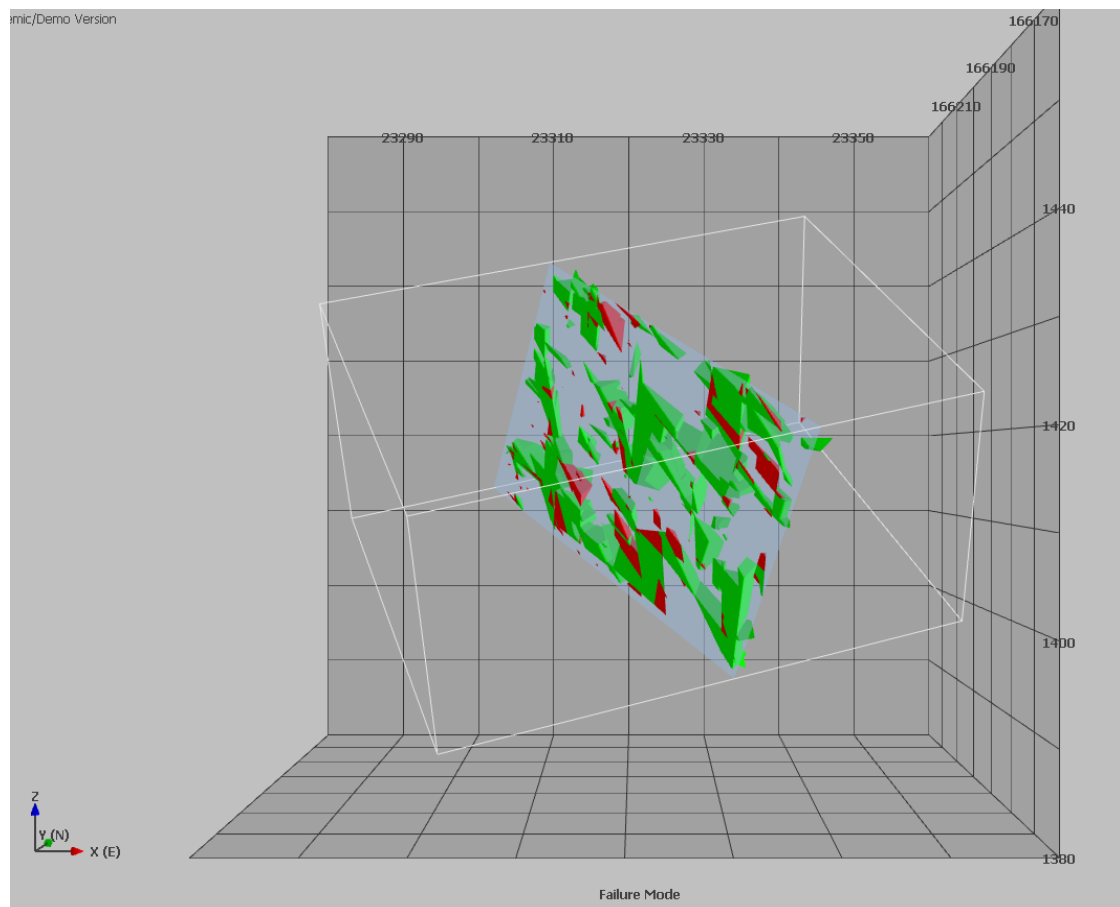
Österreichischer Geophysikalischer Dienst  
an der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik  
<http://www.zamg.ac.at>

Abbildung 31: Karte der Erdbebengefährdung Österreichs [Quelle: ZAMG, Stand 30. Juli 2013]

Attempt	density [kg/m³]	friction angle [°]	seismic acceleration [g]	water pressure [MPa]
V1	2700	26,5	0	0
V2	2700	26,5	0,0765	0
V3	2700	26,5	0,1019	0
V4	2700	26,5	0	0,00421
FA45_0SA	2700	45	0	0
FA45_75SA	2700	45	0,0765	0
FA45_100SA	2700	45	0,1019	0
FA45_wWP	2700	45	0	0,00421

**Tabelle 13:** Eingabeparameter für die geomechanische Analyse in FracMan

Durch die Modellierung sämtlicher Faces mit diesen Eingabeparametern ergeben sich somit insgesamt 96 Modellierungen. Als Resultat erhält man eine Darstellung sämtlicher Blöcke, die sich aus dem Verschnitt der Trennflächen ergeben, sowohl stabil, als auch instabil. In Abbildung 32 ist das Ergebnis der Modellierung Top\_Face\_02\_FA45\_wWP dargestellt. Die stabilen Blöcke werden in grün, die instabilen in rot dargestellt. Die hellblaue Ebene beschreibt die freie Fläche (=Face). Die Ergebnisse aller anderen Modellierungen finden sich als kleine Darstellungen im Anhang wieder, sowie im Großformat auf der beiliegenden Daten DVD.



**Abbildung 32:** Resultat der FracMan Modellierung für Top\_Face\_02\_FA45\_wWP, stabile Blöcke in grün, instabile in rot, Face wird in hellblau dargestellt

In einer sogenannten „Rock Wedge Statistics“ befinden sich die wichtigsten Werte im Überblick. Es ist dabei jedoch zu beachten, dass sich Werte nicht nur auf einzelne Felsblöcke, sondern auf Blöcke im Verband beziehen. Dies erklärt auch die Teils sehr hohen Werte für das maximale Block Volumen, die teilweise durch stabile Blöcke bedingt sind. Die Bezeichnung „Unstable Blocks“ bedeutet, dass es sich beim Versagensmechanismus um „sliding“ (= gleiten) handelt. „Free Fall Blocks“ sind ebenfalls instabile Blöcke, allerdings mit freiem Fall als Versagensmechanismus. Zur Veranschaulichung dient hierfür das Ergebnis von Top\_Face\_02\_FA45\_wWP:

#### Rock Wedge Statistics

Project Name:	Top_Face_02_FA45_wWP: Composi te
Total Blocks	329
Stable Blocks	201
Unstable Blocks	104
Free Fall Blocks	24
Maximum block weight [t]	122. 7934
Average block weight [t]	3. 5456914
Maximum block volume [m <sup>3</sup> ]	45. 479036
Average block volume [m <sup>3</sup> ]	1. 313219
Maximum block height [m]	6. 8828987
Average block height [m]	0. 96424992
Maximum block width [m]	21. 252144
Average block width [m]	3. 3465415
Maximum block surface area [m <sup>2</sup> ]	98. 971873
Average block surface area [m <sup>2</sup> ]	8. 4101514
Maximum unstable block weight [t]	9. 2280203
Average unstable block weight [t]	0. 68008995
Maximum freefall block weight [t]	24. 816475
Average freefall block weight [t]	1. 063786

Des Weiteren kann man die Volumina der einzelnen Blöcke, Factor of Safety (=FOS) und auch den Versagensmechanismus aus einer weiteren Tabelle ablesen, die sich „Composite Summary Report“ nennt. Sämtliche Ergebnisse finden sich als Dateien auf der Daten DVD wieder. Mittels Excel wurden so die Summen aller instabilen Blöcke, sowohl free falling, als auch sliding, gebildet. In Tabelle 14 sind die Werte der Modellierungen aufgelistet. Es handelt sich dabei um die Summen der instabilen Volumina.

Aus Tabelle 14 geht hervor, dass besonders der Reibungswinkel einen großen Einfluss auf das Volumen der instabilen Blöcke hat, jedoch nur auf jene, deren Versagensmechanismus Gleiten ist. So ist das Gesamtvolumen bei einem Reibungswinkel von 26,5°, ohne seismische Beschleunigung und ohne Wasserdruck ( $V_1=1105,1223\text{m}^3$ ), bereits größer als es im Fall von 45° Reibung mit Wasserdruck ( $FA45\_wWP=1069,7377\text{m}^3$ ) ist. Generell ist zu erkennen, dass die instabilen Volumina mit zunehmender seismischer Beschleunigung größer werden. Die größten Volumina sind jedoch bei Wasserdruck in Folge von Niederschlägen zu erwarten. Je nach Szenario (vgl. Tab. 13) sind instabile Volumina zwischen minimal  $642\text{m}^3$  und maximal  $1359\text{m}^3$  (siehe Tab. 14) möglich, ein Massensturz mit einem Volumen im Bereich von ca.  $23000\text{m}^3$  [Mölk, 2007] ist aus den in dieser Arbeit durchgeführten Modellierungen nicht zu erwarten.

Aus den Volumina der free fall und sliding Blöcke wurde mittels Excel für jede Modellierung der durchschnittliche Wert der einzelnen Blöcke errechnet. Diese Ergebnisse sind auf den folgenden Seiten in Tabelle 15 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die free fall Blöcke und ihr Volumen unabhängig von dem in der Modellierung verwendeten Reibungswinkel und der seismischen Beschleunigung sind.

Für frei fallende Blöcke wurde der größte Durchschnittswert in Top\_Face\_02 ohne seismische Beschleunigung mit  $1,5631\text{m}^3$  ermittelt.

Im Fall von gleitenden Blöcken beträgt das größte Durchschnittsvolumen  $1,8146\text{m}^3$  und ist in Modellierung Middle\_Face\_01\_Down\_FA45\_OSA anzutreffen.



Part	Face	Failure	Volume [m³]							
		Mode	V1	V2	V3	V4	FA45_0SA	FA45_75SA	FA45_100SA	FA45_wWP
Cliff_Part_1	1	f	0,0956	0,0956	0,0956	1,2882	0,0956	0,0956	0,0956	1,2882
	1	s	7,8107	7,8107	7,8107	8,4928	4,3566	5,2277	5,0589	6,4527
Cliff_Part_2	1	f	0,6146	0,5989	0,5989	2,9820	0,6146	0,5989	0,5989	2,9820
	1	s	8,2572	9,5280	9,6001	9,8292	4,4560	5,7878	5,7882	5,7062
Cliff_Part_3	1	f	0,9507	0,9516	0,9516	1,1628	0,9507	0,9516	0,9516	1,1628
	1	s	17,7972	21,7863	23,4761	24,3919	12,0813	12,8105	12,8406	16,5748
Cliff_Part_3	3	f	0	0	0	0,4277	0	0	0	0,4277
	3	s	1,4832	1,4834	1,3853	1,7786	0,7006	0,7583	0,7588	1,4596
Cliff_Part_4	1	f	1,0678	1,2450	1,2450	2,5823	1,0678	1,2450	1,2450	2,5823
	1	s	9,5089	9,6312	10,2987	10,6815	7,7636	7,0626	7,1052	8,6903
Cliff_Part_4	2	f	1,3628	1,3628	1,3628	0,8170	1,3628	1,3628	1,3628	0,8170
	2	s	4,0451	3,9946	4,0044	5,9949	1,8435	1,8440	1,8435	2,8078
Middle Up	1	f	12,8527	5,7394	5,7394	21,2826	12,8527	5,7394	5,7394	21,2826
	1	s	92,2947	111,8414	111,8476	111,9609	36,6267	48,7484	52,0226	94,0139
Middle Down	1	f	6,7904	6,7904	19,8531	27,2390	6,7904	6,7904	19,8531	27,2390
	1	s	172,9047	177,3565	177,9541	196,9713	32,6625	34,6162	43,1143	103,3600
Middle	2	f	183,0065	166,2353	160,9433	158,1439	376,0409	352,3920	379,9636	423,1424
	2	s	409,5075	482,9088	506,4177	573,6954	71,3338	113,5294	123,6183	225,1782
Top	1	f	6,2705	6,2705	6,2705	6,4527	6,2705	6,2705	6,2705	6,4527
	1	s	6,8712	6,9733	6,9733	7,0047	4,5220	4,5221	4,5221	3,4995
Top	2	f	9,3785	9,2637	9,2637	9,4559	9,3785	9,2637	9,2637	9,4559
	2	s	50,1887	51,5970	66,5352	69,8014	8,9605	19,5097	19,6090	26,1961
Top	3	f	3,4021	3,4021	3,4021	6,0039	3,4021	3,4021	3,4021	6,0039
	3	s	98,6608	98,7527	99,6376	100,9231	37,7515	51,8716	53,0706	72,9622
<b>sum</b>			<b>1105,1223</b>	<b>1185,6191</b>	<b>1235,6667</b>	<b>1359,3637</b>	<b>641,8853</b>	<b>694,4004</b>	<b>758,0984</b>	<b>1069,7377</b>

**Tabelle 14:** Zusammenfassung der aufsummierten instabilen Volumina; Failure Mode (=Versagensmechanismus): f...free fall (frei fallen), s...sliding (gleiten); 0...keine instabilen Blöcke vorhanden

Part	Total	FF Block Nr	Average	Total	SI Block Nr	Average
	FF Block V [m³]		FF Block V [m³]	SI Block V [m³]		SI Block V [m³]
Cliff_Part_1_FA45_0SA	0,0956	3	0,0319	4,3566	41	0,1063
Cliff_Part_1_FA45_75SA	0,0956	3	0,0319	5,2277	56	0,0934
Cliff_Part_1_FA45_100SA	0,0956	3	0,0319	5,0589	57	0,0888
Cliff_Part_1_FA45_wWP	1,2882	34	0,0379	6,4527	52	0,1241
Cliff_Part_1_V1	0,0956	3	0,0319	7,8107	73	0,1070
Cliff_Part_1_V2	0,0956	3	0,0319	7,8107	73	0,1070
Cliff_Part_1_V3	0,0956	3	0,0319	7,8107	73	0,1070
Cliff_Part_1_V4	1,2882	34	0,0379	8,4928	85	0,0999
Cliff_Part_2_FA45_0SA	0,6146	8	0,0768	4,4560	70	0,0637
Cliff_Part_2_FA45_75SA	0,5989	7	0,0856	5,7878	90	0,0643
Cliff_Part_2_FA45_100SA	0,5989	7	0,0856	5,7882	92	0,0629
Cliff_Part_2_FA45_wWP	2,9820	67	0,0445	5,7062	134	0,0426
Cliff_Part_2_V1	0,6146	8	0,0768	8,2572	134	0,0616
Cliff_Part_2_V2	0,5989	7	0,0856	9,5280	147	0,0648
Cliff_Part_2_V3	0,5989	7	0,0856	9,6001	150	0,0640
Cliff_Part_2_V4	2,9820	67	0,0445	9,8292	213	0,0461
Cliff_Part_3_Face_01_FA45_0SA	0,9507	2	0,4753	12,0813	93	0,1299
Cliff_Part_3_Face_01_FA45_75SA	0,9516	3	0,3172	12,8105	105	0,1220
Cliff_Part_3_Face_01_FA45_100SA	0,9516	3	0,3172	12,8406	107	0,1200
Cliff_Part_3_Face_01_FA45_wWP	1,1628	29	0,0401	16,5748	107	0,1549
Cliff_Part_3_Face_01_V1	0,9507	2	0,4753	17,7972	131	0,1359
Cliff_Part_3_Face_01_V2	0,9516	3	0,3172	21,7863	134	0,1626
Cliff_Part_3_Face_01_V3	0,9516	3	0,3172	23,4761	135	0,1739
Cliff_Part_3_Face_01_V4	1,1628	29	0,0401	24,3919	143	0,1706
Cliff_Part_3_Face_03_FA45_0SA	0	0	0	0,7006	20	0,0350
Cliff_Part_3_Face_03_FA45_75SA	0	0	0	0,7583	25	0,0303
Cliff_Part_3_Face_03_FA45_100SA	0	0	0	0,7588	26	0,0292
Cliff_Part_3_Face_03_FA45_wWP	0,4277	13	0,0329	1,4596	23	0,0635

Part	Total	FF Block Nr	Average	Total	SI Block Nr	Average
	FF Block V [m³]		FF Block V [m³]	SI Block V [m³]		SI Block V [m³]
Cliff_Part_3_Face_03_V1	0	0	0	1,4832	39	0,0380
Cliff_Part_3_Face_03_V2	0	0	0	1,4834	41	0,0362
Cliff_Part_3_Face_03_V3	0	0	0	1,3853	40	0,0346
Cliff_Part_3_Face_03_V4	0,4277	13	0,0329	1,7786	34	0,0523
Cliff_Part_4_Face_01_FA45_0SA	1,0678	9	0,1186	7,7636	61	0,1273
Cliff_Part_4_Face_01_FA45_75SA	1,2450	9	0,1383	7,0626	67	0,1054
Cliff_Part_4_Face_01_FA45_100SA	1,2450	9	0,1383	7,1052	72	0,0987
Cliff_Part_4_Face_01_FA45_wWP	2,5823	44	0,0587	8,6903	108	0,0805
Cliff_Part_4_Face_01_V1	1,0678	9	0,1186	9,5089	104	0,0914
Cliff_Part_4_Face_01_V2	1,2450	9	0,1383	9,6312	110	0,0876
Cliff_Part_4_Face_01_V3	1,2450	9	0,1383	10,2987	112	0,0920
Cliff_Part_4_Face_01_V4	2,5823	44	0,0587	10,6815	151	0,0707
Cliff_Part_4_Face_02_FA45_0SA	1,3628	4	0,3407	1,8435	6	0,3072
Cliff_Part_4_Face_02_FA45_75SA	1,3628	4	0,3407	1,8440	7	0,2634
Cliff_Part_4_Face_02_FA45_100SA	1,3628	4	0,3407	1,8435	6	0,3072
Cliff_Part_4_Face_02_FA45_wWP	0,8170	5	0,1634	2,8078	43	0,0653
Cliff_Part_4_Face_02_V1	1,3628	4	0,3407	4,0451	12	0,3371
Cliff_Part_4_Face_02_V2	1,3628	4	0,3407	3,9946	13	0,3073
Cliff_Part_4_Face_02_V3	1,3628	4	0,3407	4,0044	13	0,3080
Cliff_Part_4_Face_02_V4	0,8170	5	0,1634	5,9949	92	0,0652
Middle_Face_01_Down_FA45_0SA	6,7904	15	0,4527	32,6625	18	1,8146
Middle_Face_01_Down_FA45_75SA	6,7904	15	0,4527	34,6162	42	0,8242
Middle_Face_01_Down_FA45_100SA	19,8531	16	1,2408	43,1143	76	0,5673
Middle_Face_01_Down_FA45_wWP	27,2390	80	0,3405	103,3600	149	0,6937
Middle_Face_01_Down_V1	6,7904	15	0,4527	172,9047	222	0,7789
Middle_Face_01_Down_V2	6,7904	15	0,4527	177,3565	231	0,7678
Middle_Face_01_Down_V3	19,8531	16	1,2408	177,9541	233	0,7638
Middle_Face_01_Down_V4	27,2390	80	0,3405	196,9713	238	0,8276

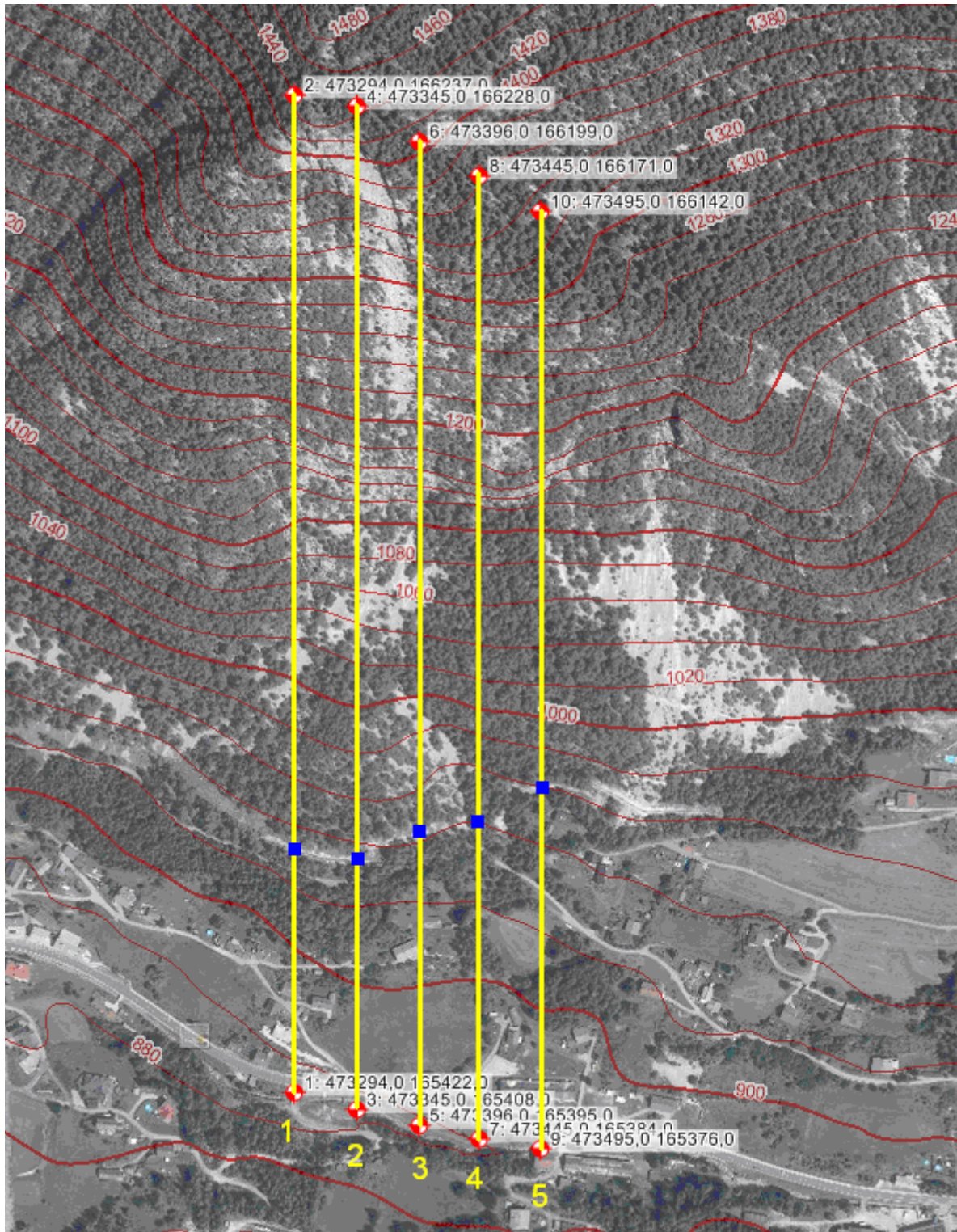
Part	Total	FF Block Nr	Average	Total	SI Block Nr	Average
	FF Block V [m³]		FF Block V [m³]	SI Block V [m³]		SI Block V [m³]
Middle_Face_01_Up_FA45_0SA	12,8527	16	0,8033	36,6267	24	1,5261
Middle_Face_01_Up_FA45_75SA	5,7394	14	0,4100	48,7484	52	0,9375
Middle_Face_01_Up_FA45_100SA	5,7394	14	0,4100	52,0226	77	0,6756
Middle_Face_01_Up_FA45_wWP	21,2826	93	0,2288	94,0139	168	0,5596
Middle_Face_01_Up_V1	12,8527	16	0,8033	92,2947	240	0,3846
Middle_Face_01_Up_V2	5,7394	14	0,4100	111,8414	262	0,4269
Middle_Face_01_Up_V3	5,7394	14	0,4100	111,8476	263	0,4253
Middle_Face_01_Up_V4	21,2826	93	0,2288	111,9609	224	0,4998
Middle_Face_02_FA45_0SA	376,0409	425	0,8848	71,3338	47	1,5177
Middle_Face_02_FA45_75SA	352,3920	454	0,7762	113,5294	84	1,3515
Middle_Face_02_FA45_100SA	379,9636	490	0,7754	123,6183	101	1,2239
Middle_Face_02_FA45_wWP	423,1424	838	0,5049	225,1782	571	0,3944
Middle_Face_02_V1	183,0065	145	1,2621	409,5075	587	0,6976
Middle_Face_02_V2	166,2353	139	1,1959	482,9088	702	0,6879
Middle_Face_02_V3	160,9433	134	1,2011	506,4177	736	0,6881
Middle_Face_02_V4	158,1439	172	0,9194	573,6954	1046	0,5485
Top_Face_01_FA45_0SA	6,2705	5	1,2541	4,5220	6	0,7537
Top_Face_01_FA45_75SA	6,2705	5	1,2541	4,5221	7	0,6460
Top_Face_01_FA45_100SA	6,2705	5	1,2541	4,5221	7	0,6460
Top_Face_01_FA45_wWP	6,4527	8	0,8066	3,4995	42	0,0833
Top_Face_01_V1	6,2705	5	1,2541	6,8712	10	0,6871
Top_Face_01_V2	6,2705	5	1,2541	6,9733	12	0,5811
Top_Face_01_V3	6,2705	5	1,2541	6,9733	12	0,5811
Top_Face_01_V4	6,4527	8	0,8066	7,0047	65	0,1078

Part	Total		Average		Total		Average	
	FF Block V [m³]	FF Block Nr	FF Block V [m³]	SI Block V [m³]	SI Block Nr	SI Block V [m³]	SI Block Nr	SI Block V [m³]
Top_Face_02_FA45_0SA	9,3785	6	1,5631	8,9605	45	0,1991		
Top_Face_02_FA45_75SA	9,2637	6	1,5439	19,5097	67	0,2912		
Top_Face_02_FA45_100SA	9,2637	6	1,5439	19,6090	71	0,2762		
Top_Face_02_FA45_wWP	9,4559	24	0,3940	26,1961	104	0,2519		
Top_Face_02_V1	9,3785	6	1,5631	50,1887	104	0,4826		
Top_Face_02_V2	9,2637	6	1,5439	51,5970	118	0,4373		
Top_Face_02_V3	9,2637	6	1,5439	66,5352	120	0,5545		
Top_Face_02_V4	9,4559	24	0,3940	69,8014	144	0,4847		
Top_Face_03_FA45_0SA	3,4021	9	0,3780	37,7515	146	0,2586		
Top_Face_03_FA45_75SA	3,4021	9	0,3780	51,8716	177	0,2931		
Top_Face_03_FA45_100SA	3,4021	9	0,3780	53,0706	183	0,2900		
Top_Face_03_FA45_wWP	6,0039	46	0,1305	72,9622	179	0,4076		
Top_Face_03_V1	3,4021	9	0,3780	98,6608	245	0,4027		
Top_Face_03_V2	3,4021	9	0,3780	98,7527	252	0,3919		
Top_Face_03_V3	3,4021	9	0,3780	99,6376	257	0,3877		
Top_Face_03_V4	6,0039	46	0,1305	100,9231	248	0,4069		

**Tabelle 15:** Zusammenfassung der gesamten (=total) und durchschnittlichen (=average) instabilen Blockvolumina für beide Versagensmechanismen; FF...free fall (frei fallende Blöcke), SI...sliding (gleitende Blöcke), 0...keine instabilen Blöcke vorhanden

## 4.7 RocFall

Mittels RiScan wurden aus den Airbornelaserscandaten des Landes Kärnten Profile im Bereich des Feldkofels erstellt und diese als Eingangsparameter für die Hangoberfläche in RocFall 4.0 verwendet. Abbildung 33 zeigt die Lage der Profile anhand eines Luftbildes [Quelle: KAGIS], in Tabelle 16 sind die Koordinaten der Start- und Endpunkte aufgelistet.



**Abbildung 33:** Lage der Profile; Profile mit Bezifferung in gelb, blaue Rechtecke markieren vorhandene Schutznetze

Profil	Art	X [m]	Y [m]	Z [m]
1	Startpunkt	23294	165422	879
	Endpunkt	23294	166237	1429
2	Startpunkt	23345	165408	881
	Endpunkt	23345	166228	1443
3	Startpunkt	23396	165395	883
	Endpunkt	23396	166199	1406
4	Startpunkt	23445	165384	885
	Endpunkt	23445	166171	1371
5	Startpunkt	23495	165376	886
	Endpunkt	23495	166142	1334

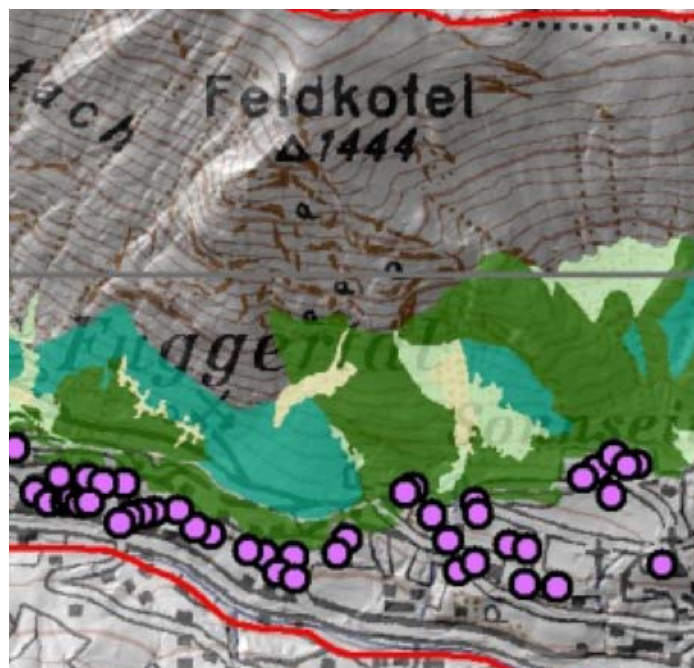
**Tabelle 16:** Koordinaten der Start- und Endpunkte der Profile

Um eine realitätsnahe Modellierung zu garantieren wurden vorhandene Schutznetze eingebaut. Deren Lage, Höhe und Energieaufnahme wurden aus [Mölk, 2008] übernommen. Die Werte finden sich in Tabelle 17 wieder.

Profil	Netzhöhe [m]	Energieaufnahmekapazität [kJ]
1	5	2000
2	5	2000
3	5	2000
4	5	2000
5	4	2000

**Tabelle 17:** Werte der Schutznetze aus [Mölk, 2008]

Für die Modellierung der Sturzblöcke wurden die Durchschnittsvolumenwerte aus den FracManmodellierungen herangezogen, um das Gewicht der instabilen Blöcke zu berechnen. In einem ersten Schritt wurde versucht die maximalen Reichweiten der in der Natur vorkommenden Sturzblöcke zu realisieren. Dabei dienen die Beobachtungen und Kartierungen von [Melzner et al, 2009] als Grundlage. Die Position der Sturzblöcke ist in Abbildung 34 dargestellt.



**Abbildung 34:** Lage der Sturzblöcke am Fuß des Feldkogels; aus [Melzner et al, 2009]

Verglichen mit den in Abbildung 33 dargestellten Profilen kann man erkennen, dass die beobachtete maximale Reichweite zwischen 900 und 920m Seehöhe liegt. In RocFall konnten durch Anpassung der für die Hangoberfläche zugewiesenen Materialien diese Werte erreicht werden. Wiederum wurde mit zwei verschiedenen Reibungswinkeln (26,5° und 45°) modelliert, um ein „Best“ und ein „Worst Case“ Szenario zu ermitteln. Für Bereiche, die eine Vegetationsbedeckung aufweisen, wurden die von RocFall definierten Werte übernommen. Anschließend wurden noch in jedem Profil die Schutznetze (im Programm als „barrier“ bezeichnet) mit den jeweiligen Energieaufnahmekapazitäten an ihrer Position erstellt. In einem letzten Schritt vor der Sturzblockmodellierung muss noch der Ort definiert werden, an dem sich die Blöcke lösen, sowie deren Gewicht. In Tabelle 18 sind die in den jeweiligen Profilen erstellten Blockursprünge und Gewichte aufgelistet. Die Werte für das Gewicht stammen direkt aus den FracManmodellierungen.

Profil	Seehöhe [m]	Gewicht [kg]
1	1434	4220
2	1429	4220
3	1324	4899
4	1153	1283
5	1164	1283

**Tabelle 18:** Blockursprung und Gewicht pro Profil

Von diesen Punkten lässt RocFall 50 Blöcke mit dem definierten Gewicht herabstürzen. Als Ergebnis erhält man die Sturzbahnen und kann die totale kinetische Energie entlang des Profils und am Schutznetz (=barrier) ablesen und grafisch darstellen lassen. Die folgende Abbildung 35 stellt dies am Beispiel von Profil 1, Reibungswinkel 26,5°, dar. Die Resultate und Grafiken der übrigen Modellierungen finden sich im Anhang und der Daten DVD wieder. Es zeigt sich, dass die Schutznetze von einzelnen Blöcken übersprungen werden. Tabelle 19 veranschaulicht die Ergebnisse der RocFall Modellierungen in Bezug auf die das Schutznetz überspringenden Blöcke.

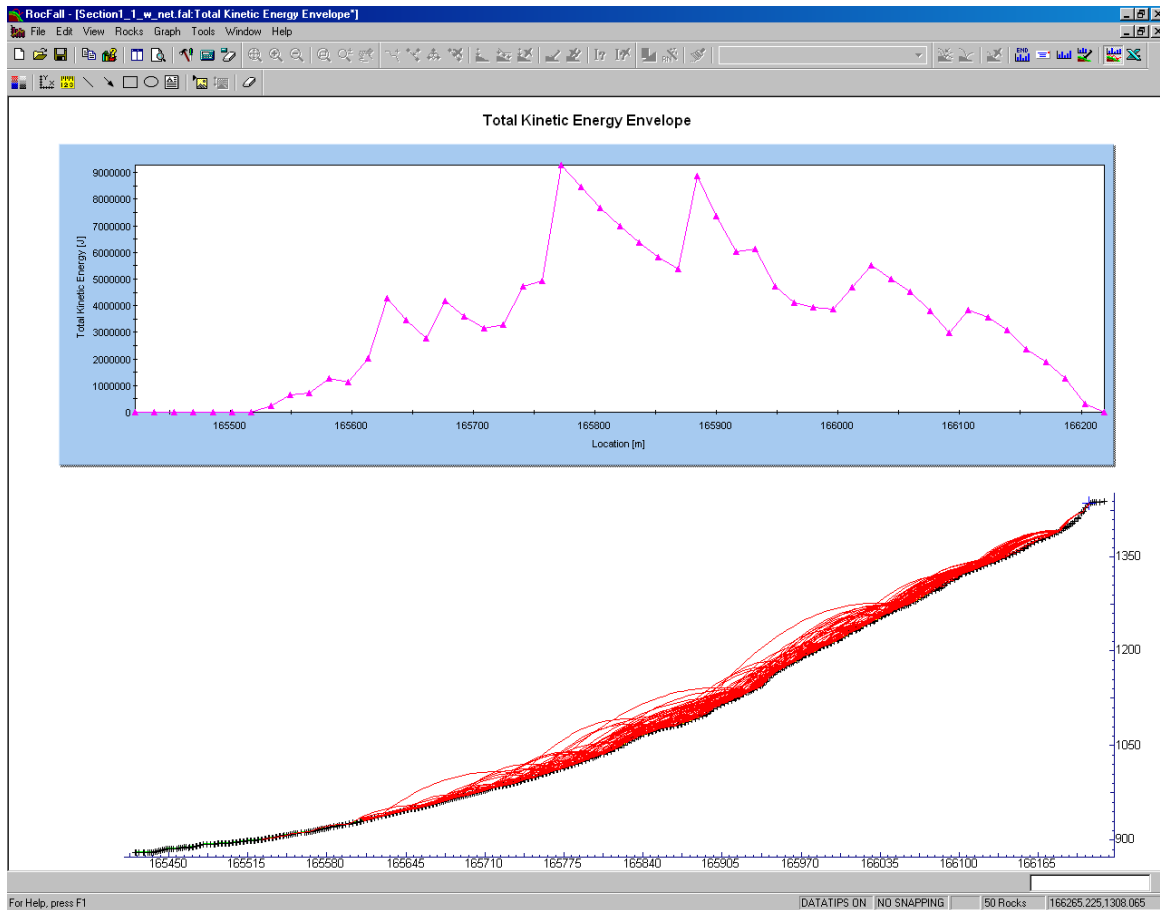
Profil	Reibungswinkel	Schutznetz übersprungen	Anzahl der Blöcke
	[°]		
1	26,5	ja	1
	45	nein	0
2	26,5	nein	0
	45	nein	0
3	26,5	ja	2
	45	ja	3
4	26,5	nein	0
	45	nein	0
5	26,5	ja	1
	45	nein	0

**Tabelle 19:** Ergebnisse der RocFall Modellierungen in Bezug auf die das Schutznetz überspringenden Blöcke

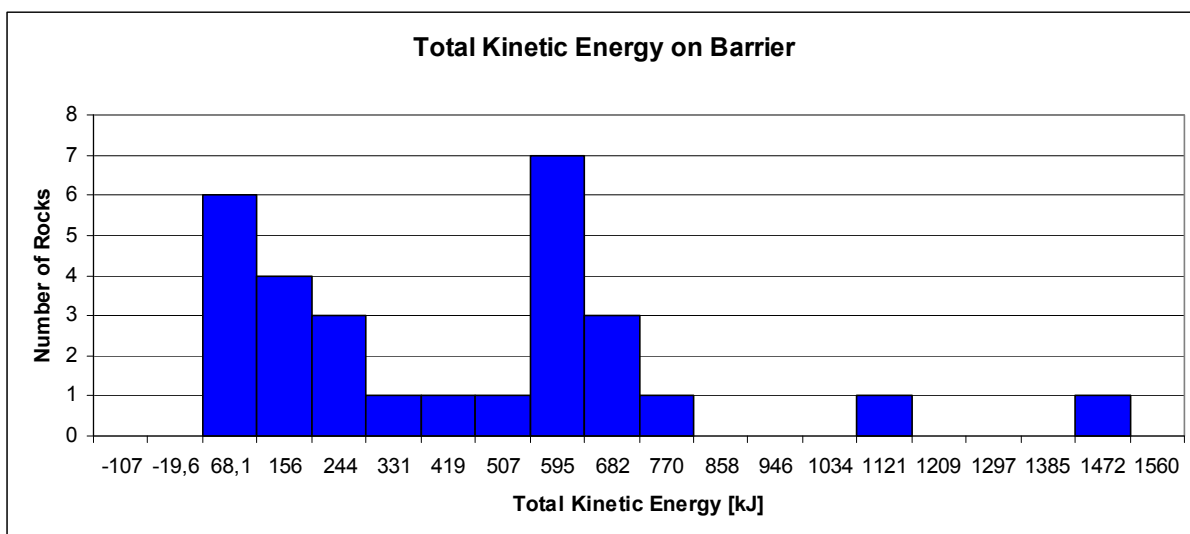
Da zuerst ohne Schutznetz modelliert und die Hangparameter entsprechend der kartierten Sturzblöcke in Abbildung 34 angepasst wurden, um die maximalen Reichweiten der Sturzblöcke zu simulieren, entsprechen die Bedingungen der Hangoberfläche nicht vollständig der Natur. So ist z.B. in Profil 5 viel Vegetation (Wald, Bäume) die das Durchkommen eines Blockes erschweren bzw. es teilweise sogar unmöglich machen.



Da sämtliche Profile geradlinig von Süden nach Norden gewählt wurden entsprechen sie teilweise nicht den natürlichen Sturzbahnen. In der Realität ist es durchaus möglich, dass ein Block, der sich im Bereich des Gipfels löst, in seiner Abwärtsbewegung die Profile 1, 2 und 3 kreuzt.



a) Kurve der totalen kinetischen Energie



b) Totale kinetische Energie am Schutznetz

**Abbildung 35:** Ergebnis der RocFall-Modellierung für Profil 1, Reibungswinkel = 26,5°; a) Kurve der totalen kinetischen Energie über das Profil; b) totale kinetische Energie am Schutznetz

Da die von [Melzner, et al; 2009] kartierten Blöcke teils auch historischen Ursprungs sind und zu der Zeit, zu der sie sich lösten die Vegetation noch nicht so entwickelt war wie heute, wurde ein zweiter RocFall Modellierungslauf mit geänderten Hangparametern gestartet. Dabei wurde darauf geachtet, dem Hang die aus Luftfotos bestimmten Materialien zuzuweisen, z.B. intakter Fels, Schutthalde mit Vegetation oder Wald. Das bedeutet, dass die maximale Reichweite der kartierten Sturzblöcke im Gelände (aus Abbildung 34) nicht berücksichtigt wird.

Wieder wurde mit zwei verschiedenen Reibungswinkeln modelliert. Die Lage der Steinschlagschutznetze und deren Parameter, sowie der Blockursprung und das Gewicht der Blöcke, blieben unverändert. Es zeigt sich, dass die Sturzblöcke nur in Profil 1 - 26,5° Reibungswinkel und Profil 3 - 26,5° und 45° Reibungswinkel, das Schutznetz erreichen und von diesem aufgehalten werden. Bei allen anderen Modellierungen erreicht kein Block das Schutznetz. Die Grafiken und Tabellen zu den Modellierungen finden sich im Anhang und der Daten DVD wieder.

Da im ersten Modellierungsversuch Blöcke das Schutznetz übersprungen haben wurde mit diesen Werten und den Ergebnissen der FracManmodellierung noch die absolute Versagenswahrscheinlichkeit berechnet. Hierfür wurde zuerst für jedes FracMan Ergebnis der prozentuelle Anteil des instabilen Volumens berechnet. Die Ergebnisse finden sich in Tabelle 20 wieder.

Part	Face	V1	V2	V3	V4	FA45_0SA	FA45_75SA	FA45_100SA	FA45_wWP
Cliff Part 1	1	0,93	0,93	0,93	0,67	0,53	0,63	0,61	0,91
Cliff Part 2	1	0,64	0,73	0,74	0,93	0,37	0,46	0,46	0,63
Cliff Part 3	1	3,25	3,94	4,23	4,42	2,26	2,38	2,39	3,07
Cliff Part 3	3	0,85	0,85	0,79	1,27	0,40	0,44	0,44	1,08
Cliff Part 4	1	0,81	0,84	0,89	1,02	0,68	0,64	0,64	0,87
Cliff Part 4	2	0,50	0,50	0,50	0,64	0,30	0,30	0,30	0,34
Top	1	0,65	0,65	0,65	0,66	0,53	0,53	0,53	0,49
Top	2	4,18	4,27	5,32	5,56	1,29	2,02	2,03	2,50
Top	3	5,89	5,90	5,95	6,17	2,38	3,19	3,26	4,56
Middle Up	1	2,16	2,42	2,42	2,74	1,02	1,12	1,19	2,37
Middle Down	1	3,27	3,35	3,60	4,08	0,72	0,75	1,15	2,38
Middle	2	4,17	4,57	4,70	5,16	3,15	3,28	3,55	4,57

**Tabelle 20:** Prozentueller Anteil des instabilen Volumens, alle Werte in [%]

Je nach Face und verwendeter Eingangsparameter sind maximal 6,17% instabiles Volumen zu erwarten (Top\_Face\_3\_V4). Da bei jeder RocFall Modellierung 50 Blöcke herabstürzen kann mit der Anzahl der das Schutznetz überspringenden Blöcke auch ein prozentueller Anteil berechnet werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 21 dargestellt.

Profil	Reibungswinkel	überspringende
	[°]	Blöcke [%]
1	26,5	2
	45	0
2	26,5	0
	45	0
3	26,5	4
	45	6
4	26,5	0
	45	0
5	26,5	2
	45	0

**Tabelle 21:** Prozentueller Anteil der Blöcke, die das Schutznetz überspringen

Wenn man nun den Anteil des instabilen Volumens mit dem Anteil der das Schutznetz überspringenden Blöcke multipliziert erhält man die absolute Versagenswahrscheinlichkeit. Dazu wurden die Werte des Bereichs Cliff mit denen von Profil 5, Bereich Top mit Profil 1 und der Bereich Middle mit Profil 3 multipliziert. Für die Bereiche Top und Cliff wurde nur eine Berechnung durchgeführt, da im Bereich Top und im Bereich Cliff nur bei einem RocFall Reibungswinkel von 26,5° Blöcke das Schutznetz überspringen. Im Bereich Middle wurde für beide RocFall Reibungswinkel eine Versagenswahrscheinlichkeit berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 22 dargestellt.

Part	Face	RocFall	V1	V2	V3	V4	FA45_0SA	FA45_75SA	FA45_100SA	FA45_wWP
		FA [°]								
Cliff Part 1	1	26,5	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
Cliff Part 2	1	26,5	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
Cliff Part 3	1	26,5	0,06	0,08	0,08	0,09	0,05	0,05	0,05	0,06
Cliff Part 3	3	26,5	0,02	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	0,02
Cliff Part 4	1	26,5	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02
Cliff Part 4	2	26,5	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Top	1	26,5	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Top	2	26,5	0,08	0,09	0,11	0,11	0,03	0,04	0,04	0,05
Top	3	26,5	0,12	0,12	0,12	0,12	0,05	0,06	0,07	0,09
Middle Up	1	26,5	0,09	0,10	0,10	0,11	0,04	0,04	0,05	0,09
Middle Down	1	26,5	0,13	0,13	0,14	0,16	0,03	0,03	0,05	0,10
Middle	2	26,5	0,17	0,18	0,19	0,21	0,13	0,13	0,14	0,18
Middle Up	1	45	0,13	0,15	0,15	0,16	0,06	0,07	0,07	0,14
Middle Down	1	45	0,20	0,20	0,22	0,25	0,04	0,05	0,07	0,14
Middle	2	45	0,25	0,27	0,28	0,31	0,19	0,20	0,21	0,27

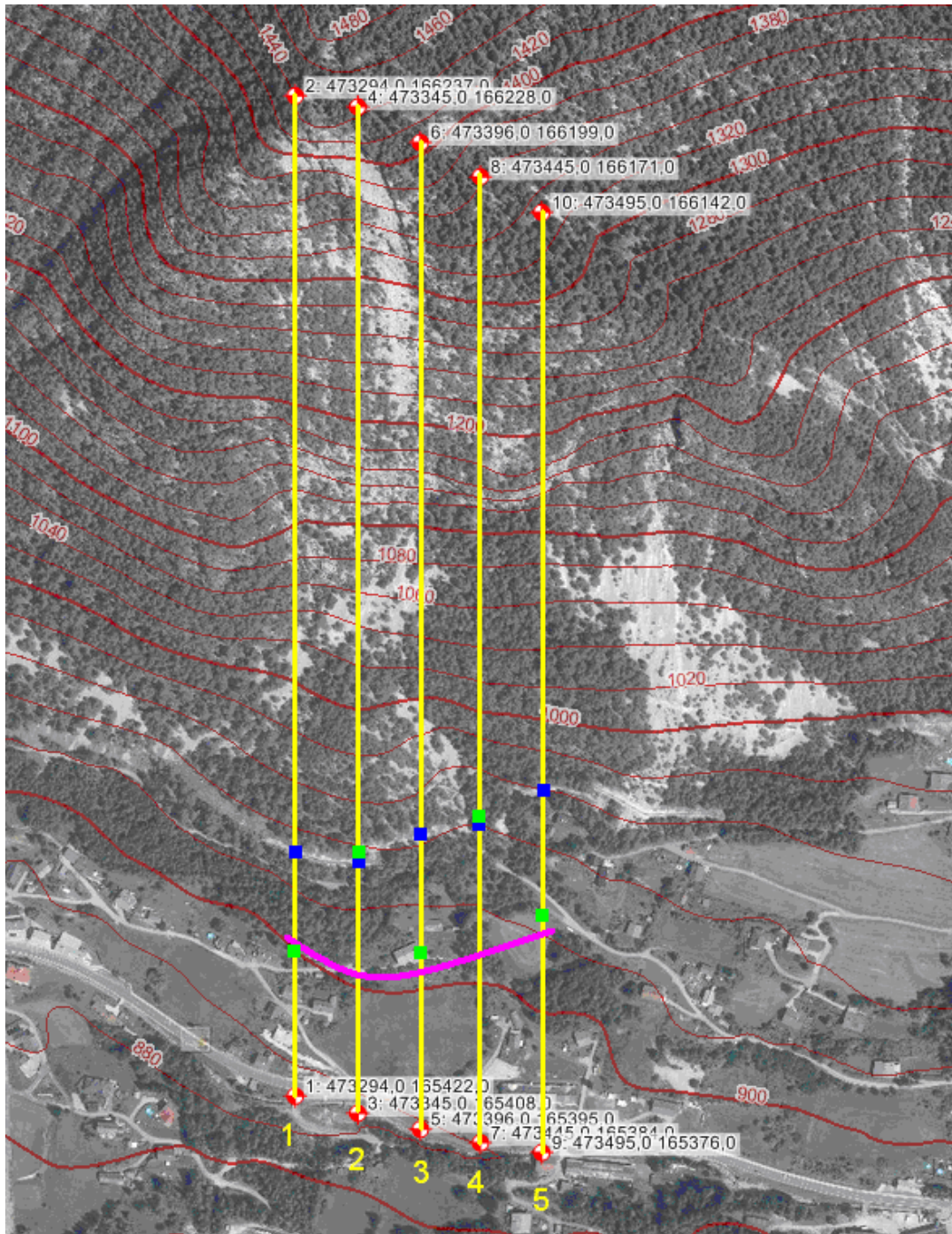
**Tabelle 22:** Absolute Versagenswahrscheinlichkeit der einzelnen Bereiche, wenn nicht anders angegeben sind alle Werte in [%]; FA...friction angle

Der maximale Wert beträgt 0,31% und betrifft den Bereich Middle\_Face\_2\_V4. Generell sind die Werte sehr niedrig. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Block sich löst und das Steinschlagschutznetz überspringt ist daher sehr gering.

## 5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die durchgeführten Untersuchungen liefern zusammengefasst folgende Resultate:

- Aus der Geländebegehung und der Fotodokumentation (siehe Anhang - Fotos) ist einerseits die starke Zerklüftung des Kalkgesteins sowie die Bankung, die sich vorwiegend im Dezimeterbereich befindet, ersichtlich. Andererseits wird durch die Unzugänglichkeit des Geländes die Notwendigkeit von Fernerkundungsmethoden evident, um eine Trennflächen- und Stabilitätsanalyse durchzuführen.
- Mittels terrestrischem Laserscan wurde eine hochpräzise Trennflächenerfassung durchgeführt (siehe Kapitel 4.2). Die große Distanz des Scanners vom Aufschluss, das zerklüftete Gestein und die Vegetationsbedeckung erweisen sich hierbei als Erschwernisse für die eindeutige Trennflächenidentifikation.
- Die statistischen Auswertungen der Trennflächen mittels Statistiksoftware „R“ liefern die für die Stabilitätsanalyse nötigen Parameter der einzelnen Trennflächenscharen (siehe Abb. 19 bis 22 und Tab. 3 bis 6).
- Es zeigt sich, dass sich eine Stabilitätsanalyse mittels der Software FracMan, welche eine Erweiterung der Keyblocktheorie darstellt, als äußerst nützlich erweist. Durch unterschiedliche Modellierungsszenarien wird das gesamte instabile Volumen des Feldkofels auf Basis der Trennflächenparameter berechnet. Die instabilen Volumina für den gesamten Feldkofel variieren je nach Szenario (siehe Tab. 13) zwischen 642 und 1359m<sup>3</sup> (siehe Tab. 14). Des Weiteren erhält man für jede Modellierung das Volumen von Einzelblöcken und deren Versagensmechanismus. Daraus lässt sich ein durchschnittliches Volumen für instabile Blöcke in den einzelnen Bereichen des Feldkofels (Top, Middle, Cliff) berechnen. Es zeigt sich, dass das maximale Durchschnittsvolumen für frei fallende Blöcke im Bereich Top mit 1,56m<sup>3</sup> und für gleitende Blöcke im Bereich Middle mit 1,81m<sup>3</sup> anzutreffen ist (siehe Tab. 15).
- Eine Blocksturzanalyse wurde auf zwei verschiedenen Arten durchgeführt. Einmal wurde auf die Reichweite der im Gelände angetroffenen Sturzblöcke aus [Melzner et al., 2009] (siehe Abb. 34) geachtet und die Hangoberfläche entsprechend angepasst, um diese Reichweiten zu modellieren. Dabei zeigt sich, dass in diesem Fall Sturzblöcke die bereits vorhandenen Schutznetze aus [Mölk, 2008] überspringen. Dies ist in den Profilen 1, 3 und 5 der Fall (siehe Abb. 33, sowie Tab. 19). Im zweiten Modellierungslauf wurde der Fokus auf die Hangoberflächenbeschaffenheit gerichtet – nicht die Reichweiten der Sturzblöcke aus [Melzner et al, 2009] waren für die Modellierung ausschlaggebend, sondern ob es sich bei der Hangoberfläche um Fels, Wald, Schutt etc. handelt. In diesem Fall erreichen Sturzblöcke zwar die Schutznetze, werden aber aufgehalten und überspringen die Schutznetze auch nicht. Das Gewicht der Sturzblöcke wurde in beiden Fällen aus den vorangegangenen FracManmodellierungen der jeweiligen Bereiche (Top, Middle, Cliff) entnommen, der Ursprung direkt aus dem Luftbild (siehe Abb. 33 und Tab. 18). Um die Ergebnisse zusammenfassend zu veranschaulichen sind in Abbildung 36 die Profile (in gelb), die Schutznetze (blaue Rechtecke), die von [Melzner, 2009] kartierten Reichweiten der Sturzblöcke (pinke Linie), sowie die Reichweiten der mit RocFall modellierten Sturzblöcke (hellgrüne Rechtecke) dargestellt. In den Profilen 1, 3 und 5 wurden die Schutznetze übersprungen, bei den Profilen 2 und 4 werden alle Blöcke von den Schutznetzen aufgehalten.



**Abbildung 36:** Zusammenfassende Darstellung der Reichweite von Sturzblöcken anhand der Profile; in gelb mit Nummerierung sind die Profile dargestellt, blaue Rechtecke markieren die Schutznetze, in pink ist die Reichweite der von [Melzner et al, 2009] kartierten Sturzblöcke dargestellt, grüne Rechtecke markieren die mittels RocFall ermittelten maximalen Reichweiten der Sturzblöcke

- Um eine absolute Versagenswahrscheinlichkeit zu berechnen wurde von einem „Worst Case“ Szenario ausgegangen, dass Blöcke die bereits errichteten Schutznetze überspringen. Die prozentuellen Anteile der instabilen Volumina aus den FracManmodellierungen (siehe Tab. 20) wurden mit dem Prozentsatz der das Netz überspringenden Blöcke (siehe Tab. 21) multipliziert, um die absolute Versagenswahrscheinlichkeit zu erhalten (siehe Tab. 22). Dabei erhält man Werte zwischen minimal 0,01% und maximal 0,31%.

## 6 Interpretation - Fazit

Wie schon aus vorausgegangenen Arbeiten anderer Autoren ersichtlich, gibt es am Feldkofel ein Potenzial für Massenbewegungen, insbesondere Steinschlag.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen dasselbe Resultat: Blockstürze sind möglich und können gegebenenfalls bis in besiedeltes Gebiet vordringen und stellen somit eine Gefährdung für Mensch und Infrastruktur dar. Je nach Eingangsparameter der Modellierungen sind unterschiedliche Szenarien möglich. Da im Arbeitsgebiet bereits Schutzmaßnahmen durchgeführt wurden, konnten diese in den Modellierungen mit einberechnet werden. Die getroffenen Maßnahmen zeigen sich in den Resultaten als äußerst wirkungsvoll, nur in einzelnen Fällen erreichen Felsblöcke besiedeltes Gebiet.

Aus den Resultaten der Stabilitätsanalyse ist zu erkennen, dass instabile Volumina in einer Größenordnung bis ca.  $1400\text{m}^3$  möglich sind. Auf Grund der geologischen Situation am Feldkofel – Kalkstein, teils stark zerklüftet – ist es jedoch unwahrscheinlich, dass sich eine solche Felsmasse auf einmal abwärts bewegt. Wahrscheinlicher ist, dass sich kontinuierlich kleinere Blöcke (bis ca.  $2\text{m}^3$ ) lösen. Diese können von den errichteten Steinschlagnetzen problemlos aufgefangen werden.

Die Trennflächenerfassung mittels Laserscanner erweist sich als sehr präzise Methode um unzugängliche Gebiete zu kartieren. Aus den daraus resultierenden Werten ist ein naturgetreues Trennflächenmodell herstellbar, welches zur Berechnung von Versagensvolumina herangezogen wird. Es zeigt sich, dass je nach Ausgangssituation mit Volumina zwischen minimal  $642\text{m}^3$  und maximal  $1359\text{m}^3$  zu rechnen ist. Terrestrische in Kombination mit Airborne-Laserscandaten machen die Erstellung eines hochgenauen Hangmorphologiemodells möglich, welches es erlaubt, Steinschlagsimulationen durchzuführen. In diesen hat sich bestätigt, dass ein Gefährdungspotential gegeben ist, wenngleich auch nur sehr gering – mit einer Versagenswahrscheinlichkeit von maximal 0,31%.

## 7 Literaturverzeichnis

- Anderle, N. 1977. Geologische Karte der Republik Österreich 1:50.000, Blatt 200 Arnoldstein. GBA Wien.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt. 2010. Felssturz
- Bayerisches Landesamt für Umwelt. 2011. Steinschlag/Blockschlag
- Buckley, S.J., Howell, J.A., Enge, H.D. & Kurz, T.H. 2008. Terrestrial laser scanning in geology: data acquisition, processing and accuracy considerations. In Journal of the Geological Society, London, Vol. 165, 2008, pp. 625-638
- FracMan User's Manual. Release 7.4. 2011. Golder Associates Inc.
- FracMan7 Workshop. 2012. Golder Associates Inc.
- Goodman, R.E. & Shi, G.H. 1985. Block Theory and Its Application to Rock Engineering. Prentice-Hall International, Inc.
- Kulterer, K. 2005. Lawinensimulation in der Gefahrenzonenplanung – Lawinen Bad Bleiberg „Exkursionsführer im Rahmen der Tagung „30 Jahre Gefahrenzonenplan“ Vom 21. – 23. September 2005 in Villach, Kärnten“. Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung. Sektion Kärnten. Gebietsbauleitung Gailtal und Mittleres Drautal.
- Leica Geosystems AG. 2009. Leica Viva GNSS GS15 receiver - Datasheet
- Liu, Q. 2010/11. Statistical Methods: Statistical Computing Using R System in Earth Sciences. Script GEO.730 of NAWI Graz: Master Curriculum – Earth Sciences
- Liu, Q. 2011/12. Modelling in Engineering Geology. Script GEO.941 of NAWI Graz: Master Curriculum – Earth Sciences
- Liu, Q. 2013. Remote sensing technologies in rock mass characterization. In ISRM Inter. Symp. "SINOROCK 2013: Rock Characterisation, Modelling and Engineering Design". Shanghai.
- Liu, Q. & Kieffer, D.S. 2012. Digital tunnel mapping using terrestrial LiDAR – a case study. In ISRM Inter. Symp. "EUROCK 2012: Rock Engineering & Technology for Sustainable Underground Construction". Stockholm.
- Liu, Q., Kieffer, D.S., Klima, K. & Brosch, F.J. 2009. A Realistic Fracture System Model for Engineering Analysis of Underground Excavations. In ISRM Inter. Symp. "SINOROCK 2009: Rock Characterisation, Modelling and Design Methods". Hong Kong.
- Melzner, S., Lotter, M., Kociu, A. & Tilch, N. 2009. Naturgefahren Kärnten II – Endbericht zum Projekt „Erstellung einer detaillierten Gefahrenhinweiskarte und ingenieurgeologische Ausarbeitung relativer Gefahrenklassen für ausgewählte Gebiete Kärntens im Maßstab 1:10000 (Testgebiet Bad Bleiberg)“. GBA Wien
- Mölk, M. 2007. GZP Bleiberg. – Brauner Hinweisbereich Steinschlag – Geologische Beurteilung. GA der Geologischen Stelle des Forsttechnischen Dienstes f. WLW, Innsbruck Juni 2007

Mölk, M. 2008. Steinschlagschutz Bad Bleiberg. – Steinschlagsimulation als Basis für die Dimensionierung von Schutzmaßnahmen. GA der Geologischen Stelle des Forsttechnischen Dienstes f. WLW, Innsbruck Juli 2008

RIEGL Austria. 2008. 3D Terrestrial Laser Scanner Z620 – Technical Data

**Webseiten:**

KAGIS der Kärntner Landesregierung, Stand: 18.6.2013

[http://gis.ktn.gv.at/atlas/%28S%28xpmjyw44mmixx1qxmbxcxf%29%29/init.aspx?karte=atlas\\_basiskarten](http://gis.ktn.gv.at/atlas/%28S%28xpmjyw44mmixx1qxmbxcxf%29%29/init.aspx?karte=atlas_basiskarten)

Das Geodatenportal der österreichischen Länder - Geolandviewer, Stand: 18.6.2013

[www.geoland.at](http://www.geoland.at)

Bergmännischer Kulturverein Bad Bleiberg, Stand: 3.9.2013

<http://www.bergbauverein-bad-bleiberg.at/index.php/ueber-den-bergbau>

Wikipedia.org - Peak Ground Acceleration, Stand: 19.8.2013

[http://en.wikipedia.org/wiki/Peak\\_ground\\_acceleration](http://en.wikipedia.org/wiki/Peak_ground_acceleration)

ZAMG – Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Stand: 30.7.2013

<http://www.zamg.ac.at/cms/de/images/geophysik/erdbebengefaehrungszone-von-oesterreich-nach-oenorm-en-1998-1.-c-zamg-geophysik>



## Anhang

Der Anhang ist in folgende Teilbereiche untergliedert:

A) Fotos.....	65
B) RiScan – Laserscanmodell.....	75
C) Statistische Berechnungen.....	85
D) Keyblock Theorie.....	115
E) FracMan Ergebnisse.....	127
F) RocFall Resultate.....	140

## **A) Fotos**

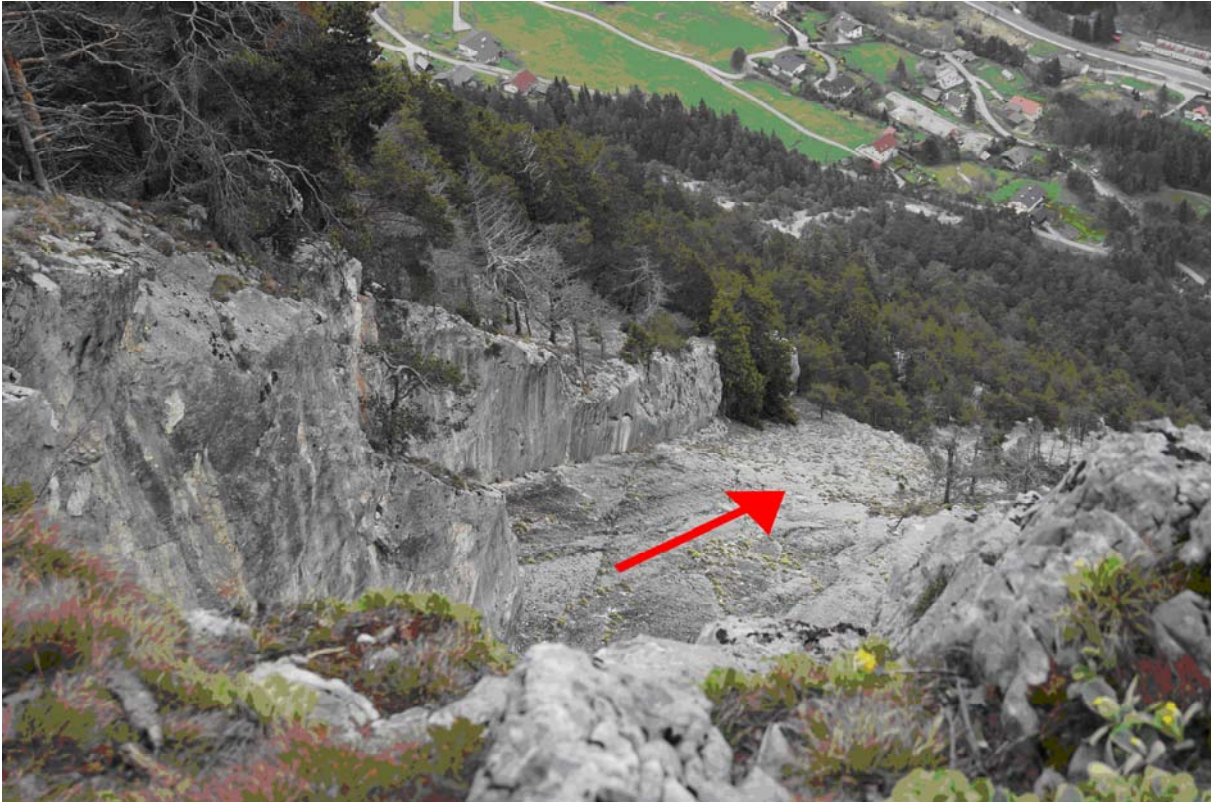
Auf den folgenden Seiten sind Fotos abgebildet, die während der Geländebegehung und den Scans aufgenommen wurden. Einige der Fotos wurden später für die Identifikation von Trennflächen im Laserscanmodell herangezogen. Einzelne Bereiche des Feldkofels wurden öfters und aus verschiedenen Blickwinkeln fotografiert worden, um eine möglichst vollständige fotografische Abdeckung des Gebietes zu erhalten.

Zum Einsatz kamen dabei die Handykamera eines Nokia E7 für Dokumentationsfotos während des Scannens, sowie eine Sony Spiegelreflexkamera mit Telezoomobjektiv während der Geländebegehung.

Um eine größere Darstellung zu ermöglichen, sind sämtliche Fotos auch auf der Daten DVD gespeichert.



**Foto 1:** Feldkofel, aufgenommen von Scanposition 1/2, Blick in Richtung Norden



**Foto 2:** Blick vom Feldkofel hinab (Blickrichtung Südost), der rote Pfeil zeigt die Bewegungsrichtung von Rutschungen, die Rutschungsfläche entspricht der Bankungsfläche



**Foto 3:** Blick vom Feldkofel (Blickrichtung Südsüdost)



**Foto 4:** Blick auf den Feldkofel, Bereiche Top (= Gipfelbereich), Middle (= Bereich zwischen Gipfel und Wandstufe), Cliff (= steil stehende Wandstufe)



**Foto 5:** Blick auf den Gipfel und oberen Mittelbereich, anhand dieses Fotos konnten Ebenen im Laserscan Modell eingebaut werden



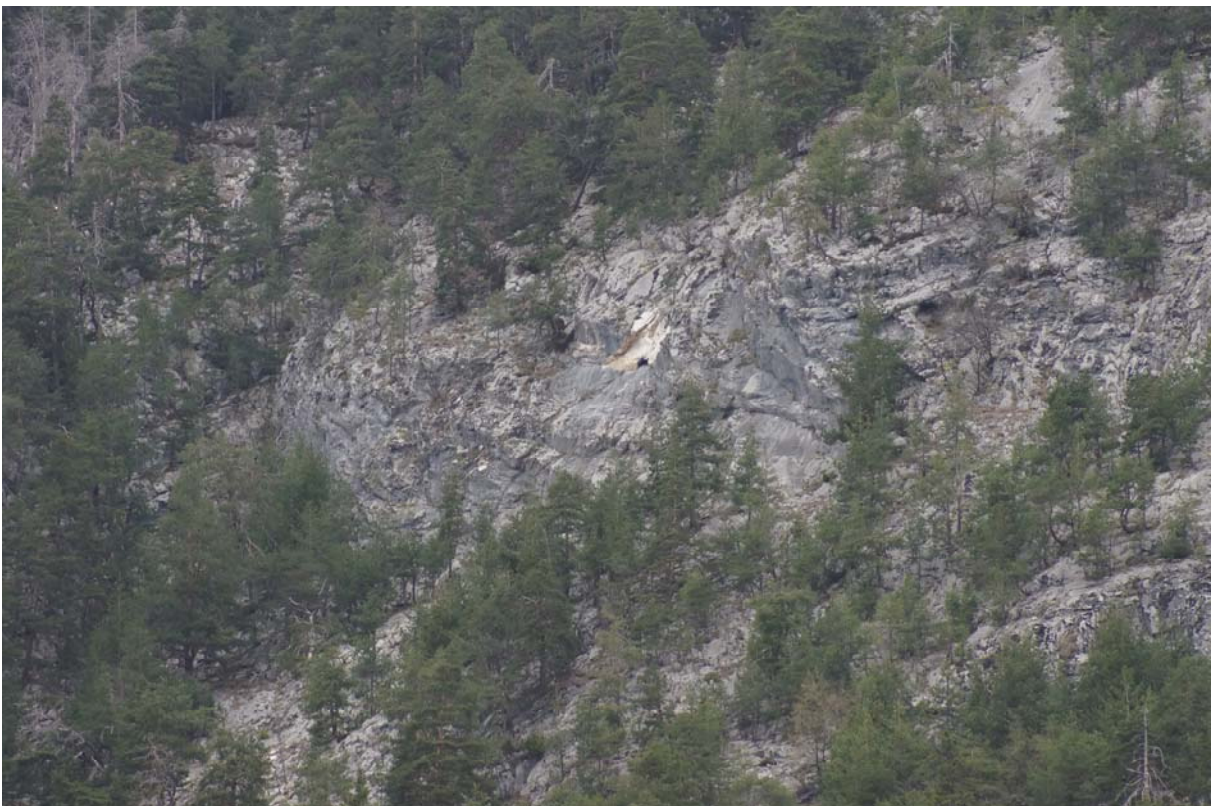
**Foto 6:** Durch Zoom in das Bild konnten hier viele Trennflächen im Bereich des Gipfels identifiziert werden, z.B. Set Green (Bankung) und Set Blue.



**Foto 7:** Mittelbereich und Teile von Cliff\_Part\_2 und 3



**Foto 8:** Blick über den Mittelbereich. Im oberen Bereich des Fotos ist die große, sich beinahe über den gesamten Mittelbereich erstreckende Störungsfläche (=Set Purple) erkennbar



**Foto 9:** Aufnahme für die Identifikation von Trennflächen im Bereich Cliff\_Part\_1



**Foto 10:** Bereich Cliff\_Part\_2



**Foto 11:** Übergang zwischen Cliff\_Part\_2 (linke Bildhälfte) und Cliff\_Part\_3 (rechte Bildhälfte). Es ist zu erkennen, dass das Gestein in Cliff\_Part\_3 ein massigeres Erscheinungsbild hat, während im Bereich Cliff\_Part\_2 ein höherer Zerlegungsgrad sichtbar ist.





**Foto 12:** Gesamtüberblick von Cliff\_Part\_2 und 3; man beachte die unterschiedliche Zerlegung des Gesteins (siehe auch Foto 11)



**Foto 13:** Cliff\_Part\_3 und 4



**Foto 14:** Cliff\_Part\_4, im oberen Bereich des Aufschlusses ist der Wettersteinkalk zerlegter als in den tiefer liegenden Bereichen, Hauptursache dürfte die von der Oberfläche angreifende Erosion sein



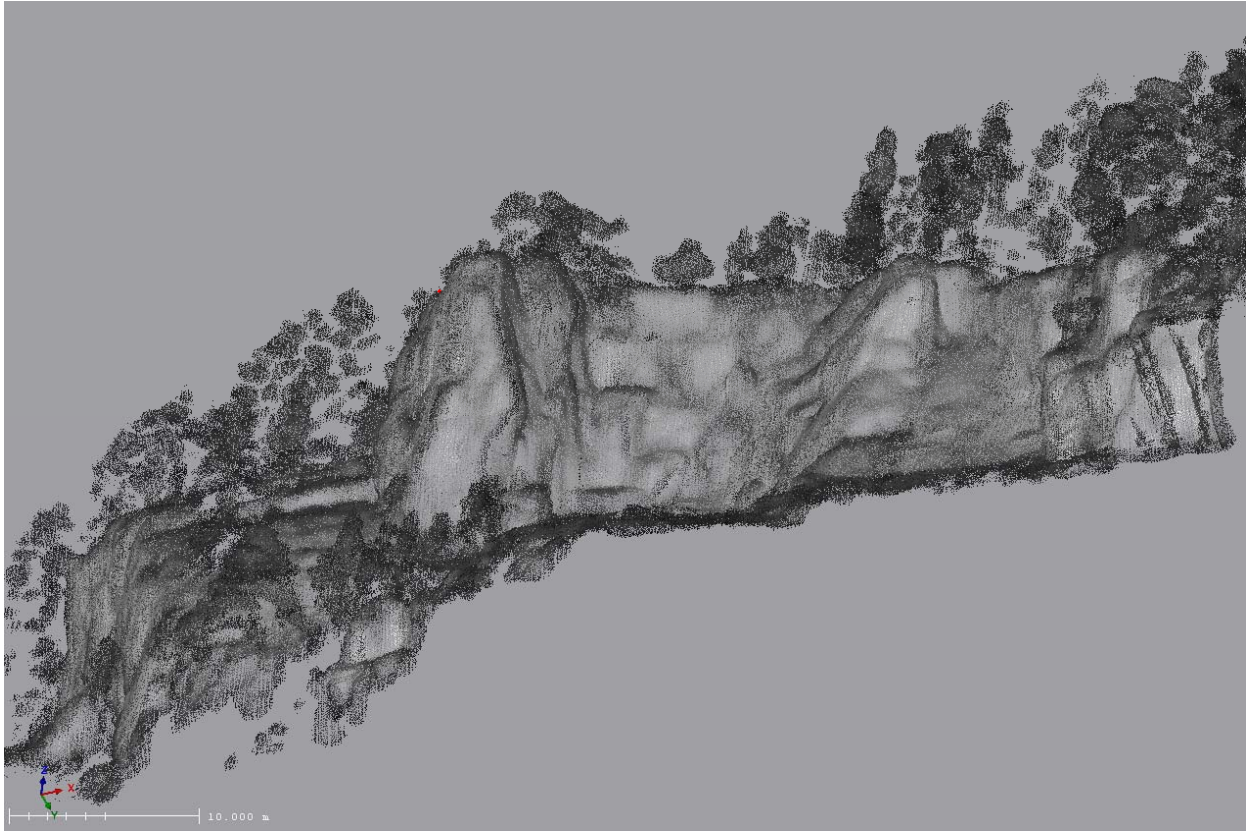
**Foto 15:** Bereits errichtete Steinschlagschutznetze im Bereich des Bergfußes



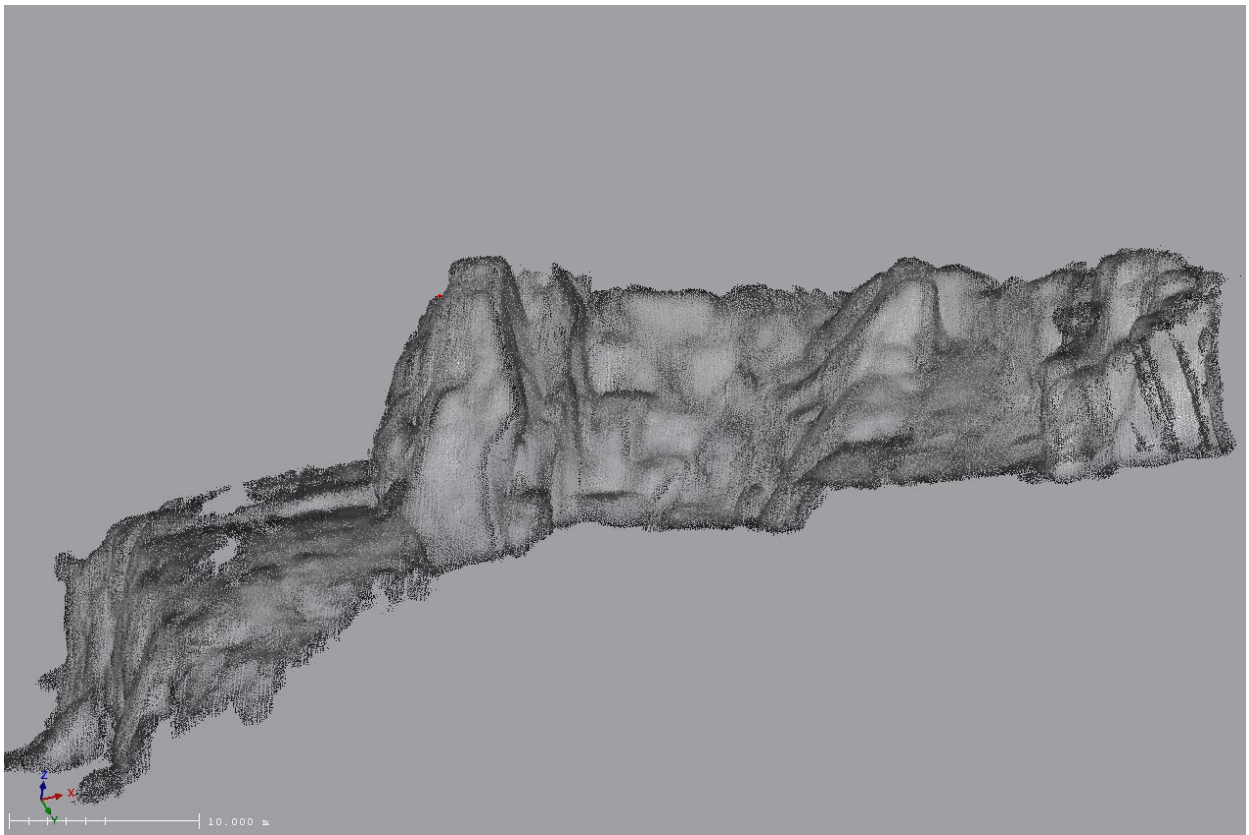
**Foto 16:** Panoramafoto der Steilstufe (Cliff) im Bereich von ca. 1150m Seehöhe

## **B) RiScan – Laserscanmodell**

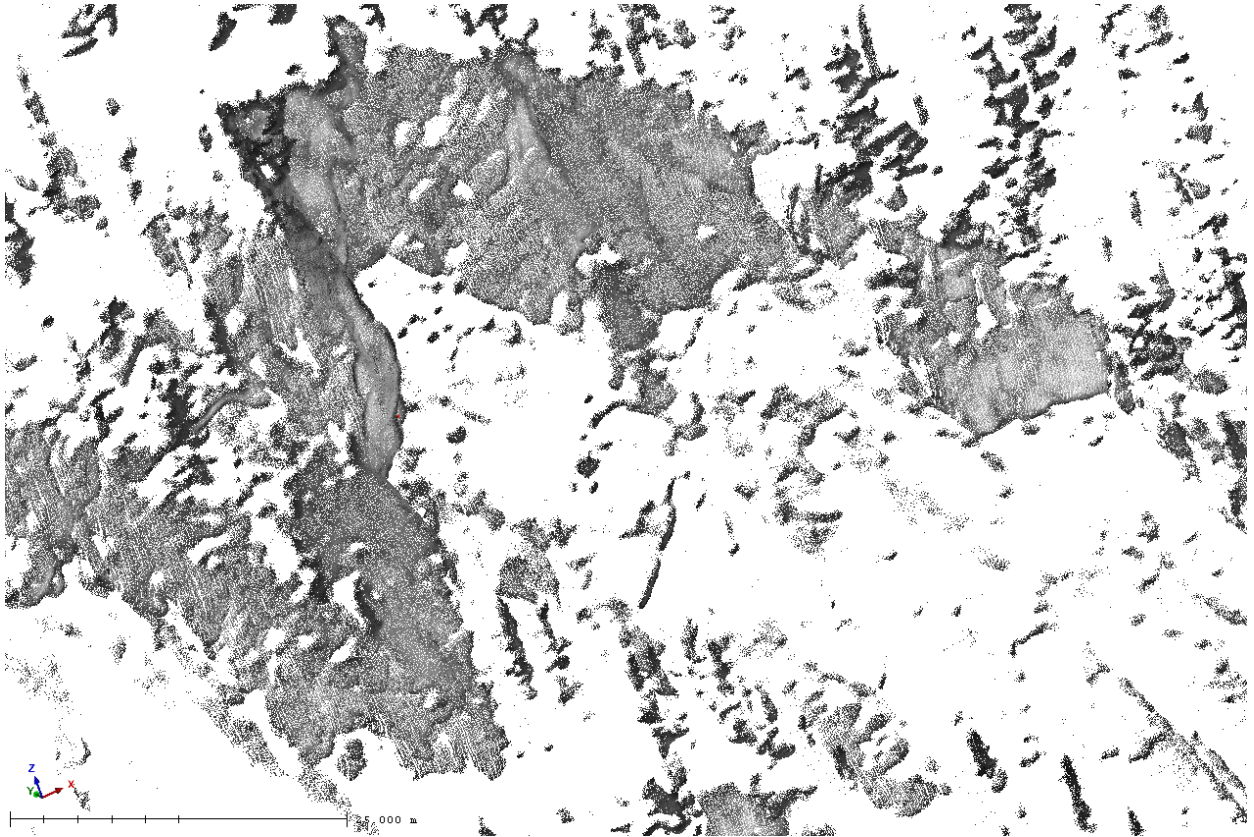
Auf den folgenden Seiten sind Ausschnitte des Laserscanmodells dargestellt. Es handelt sich dabei um Ausschnitte der einzelnen Teilbereiche: jeweils mit und ohne Vegetation. Des Weiteren sind zwei aus den Airbornelaserscandaten generierte Höhenmodelle abgebildet, mit 5m und 1m Schrittweite. Die Darstellungen befinden sich auch als .png Dateien auf der Daten DVD, um eine Betrachtung in einer größeren Abbildung zu ermöglichen.



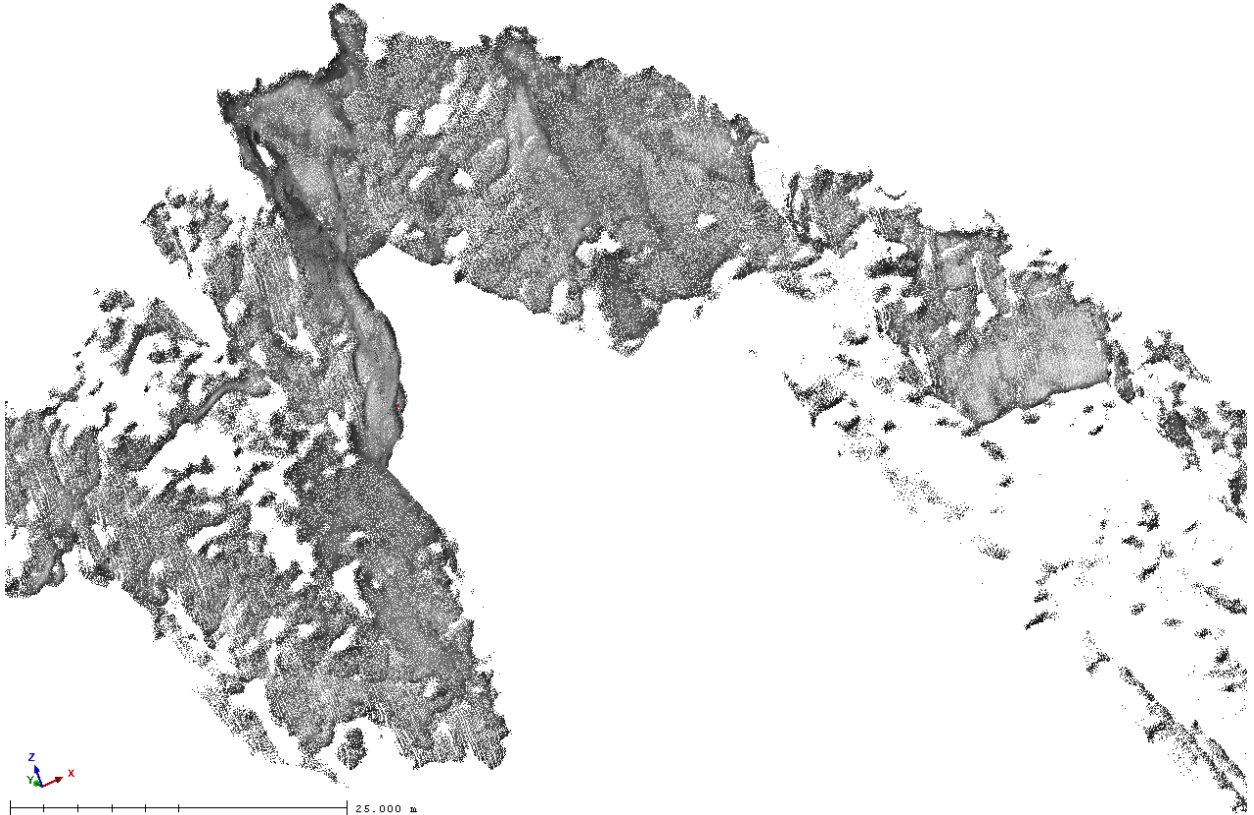
Top – mit Vegetation



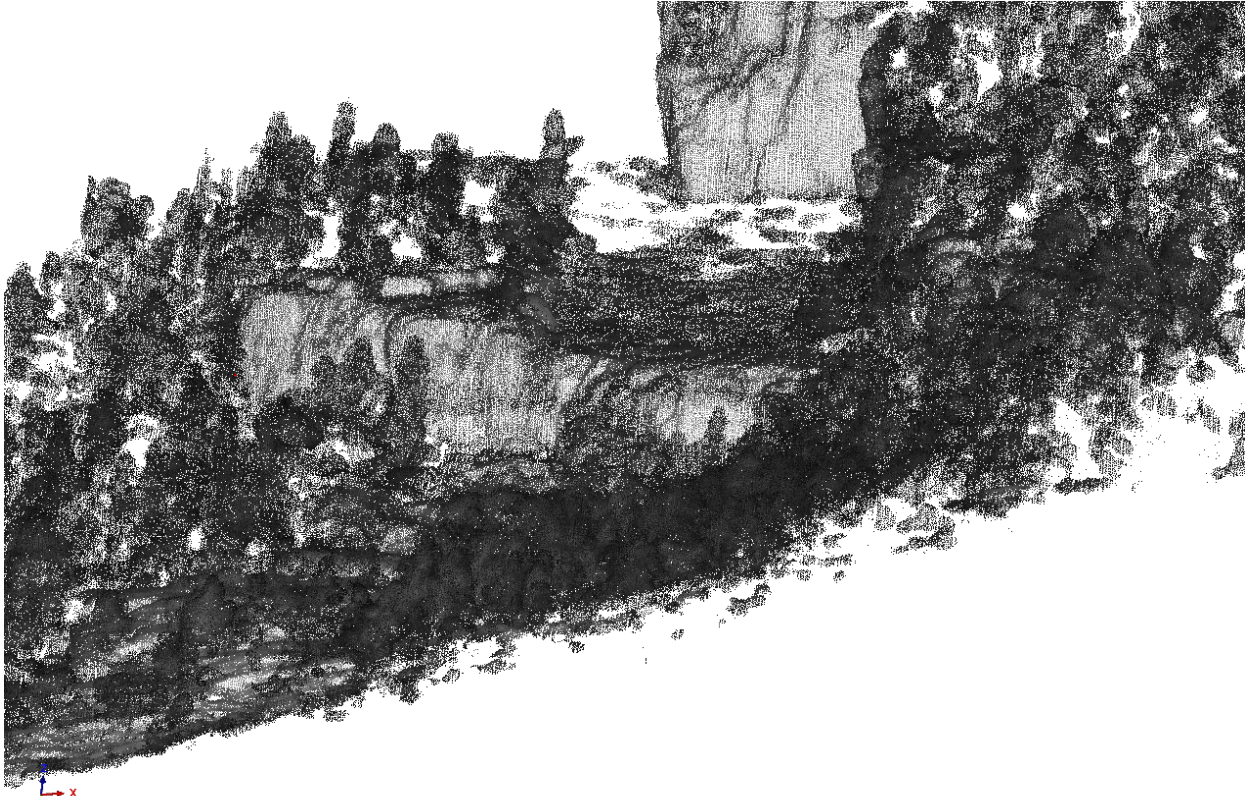
Top – ohne Vegetation



Übergang Top-Middle mit Vegetation

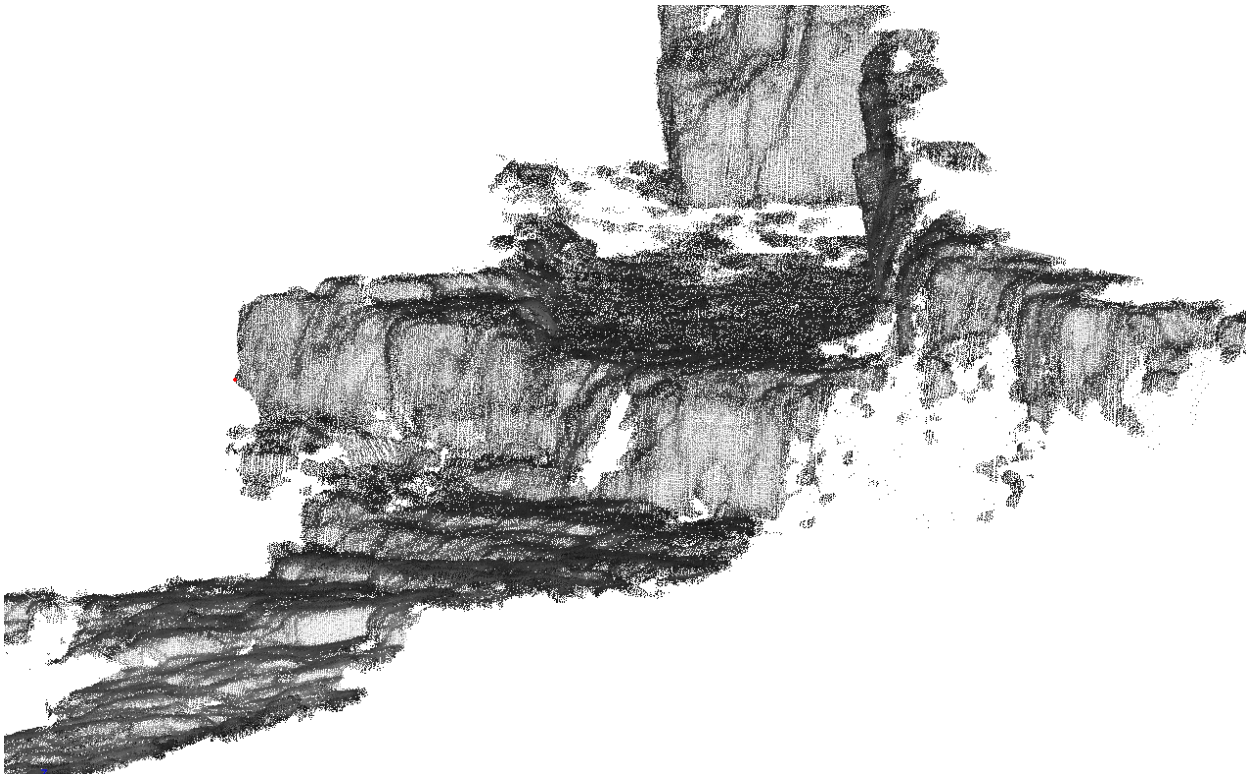


Übergang Top-Middle ohne Vegetation



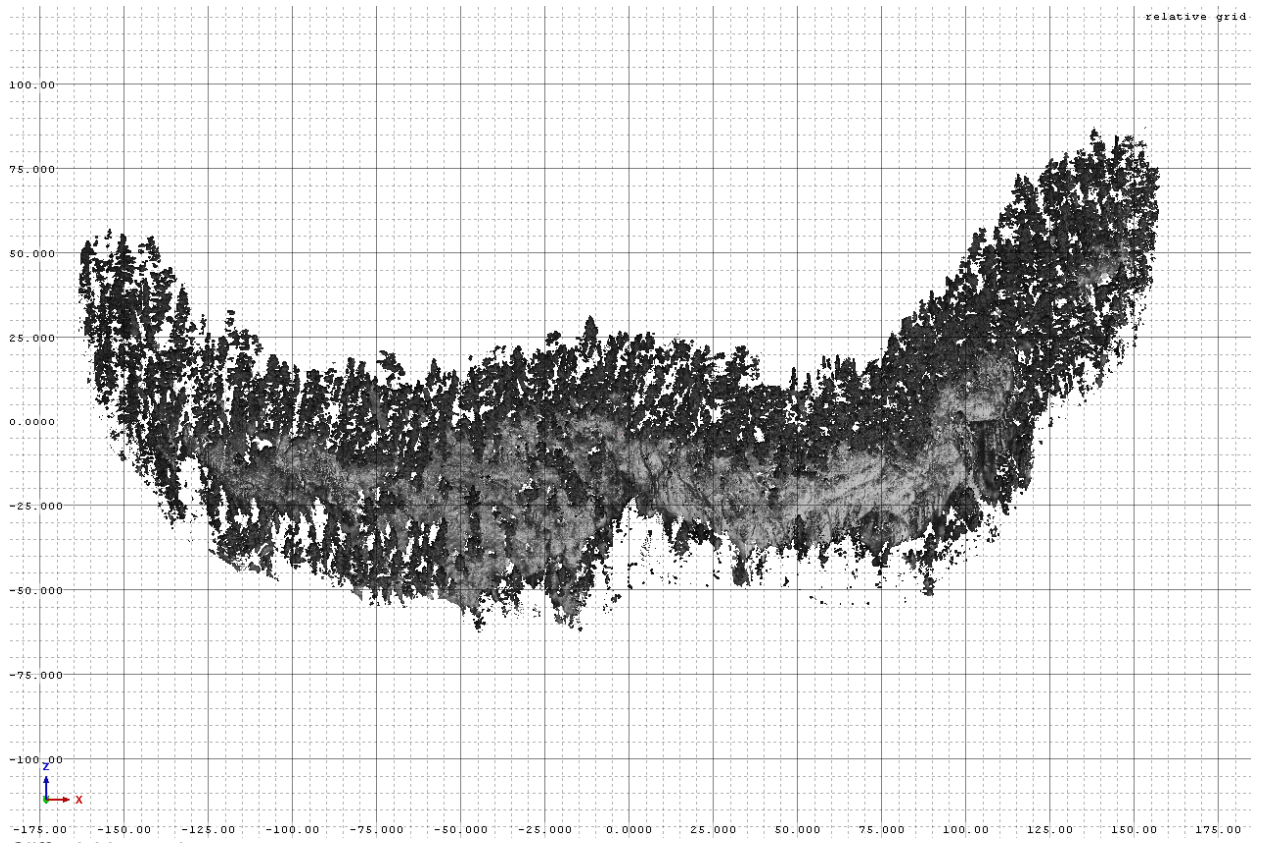
10.000 m

Middle mit Vegetation

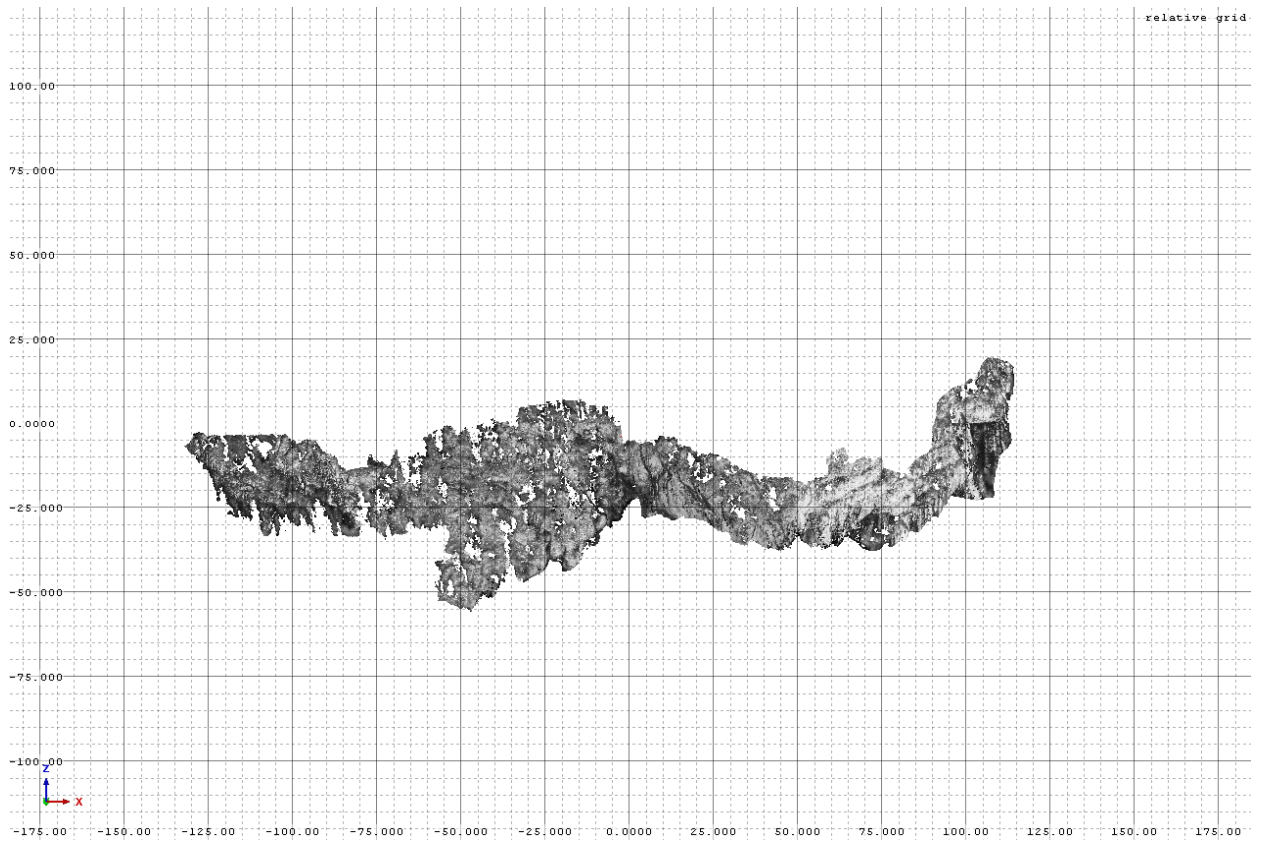


10.000 m

Middle ohne Vegetation

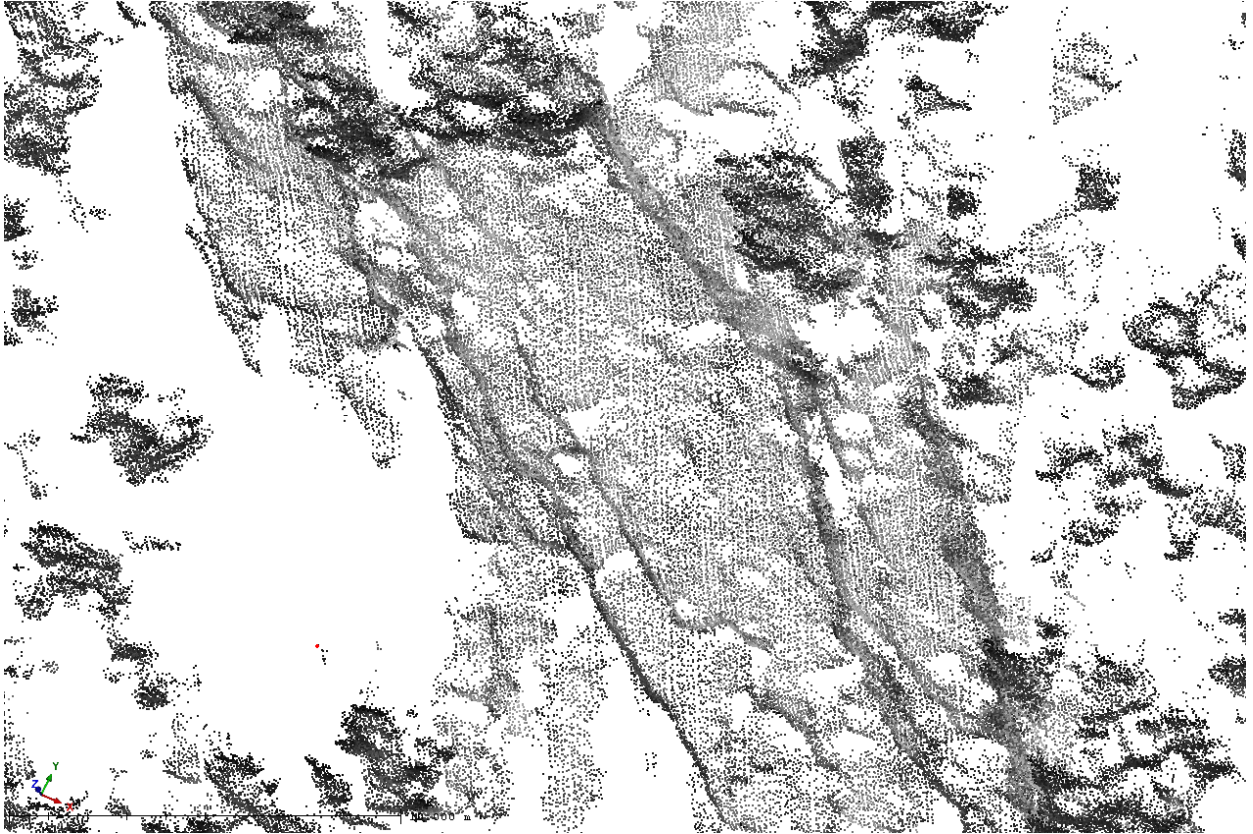


Cliff mit Vegetation

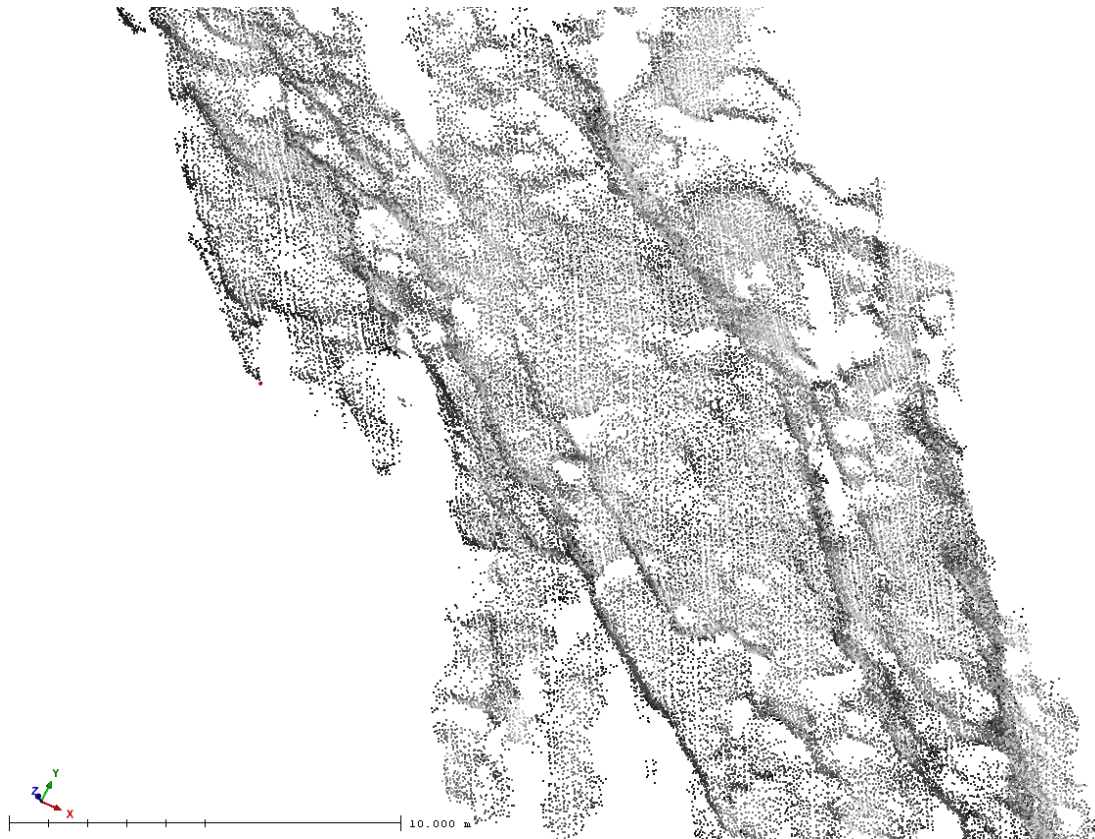


Cliff ohne Vegetation

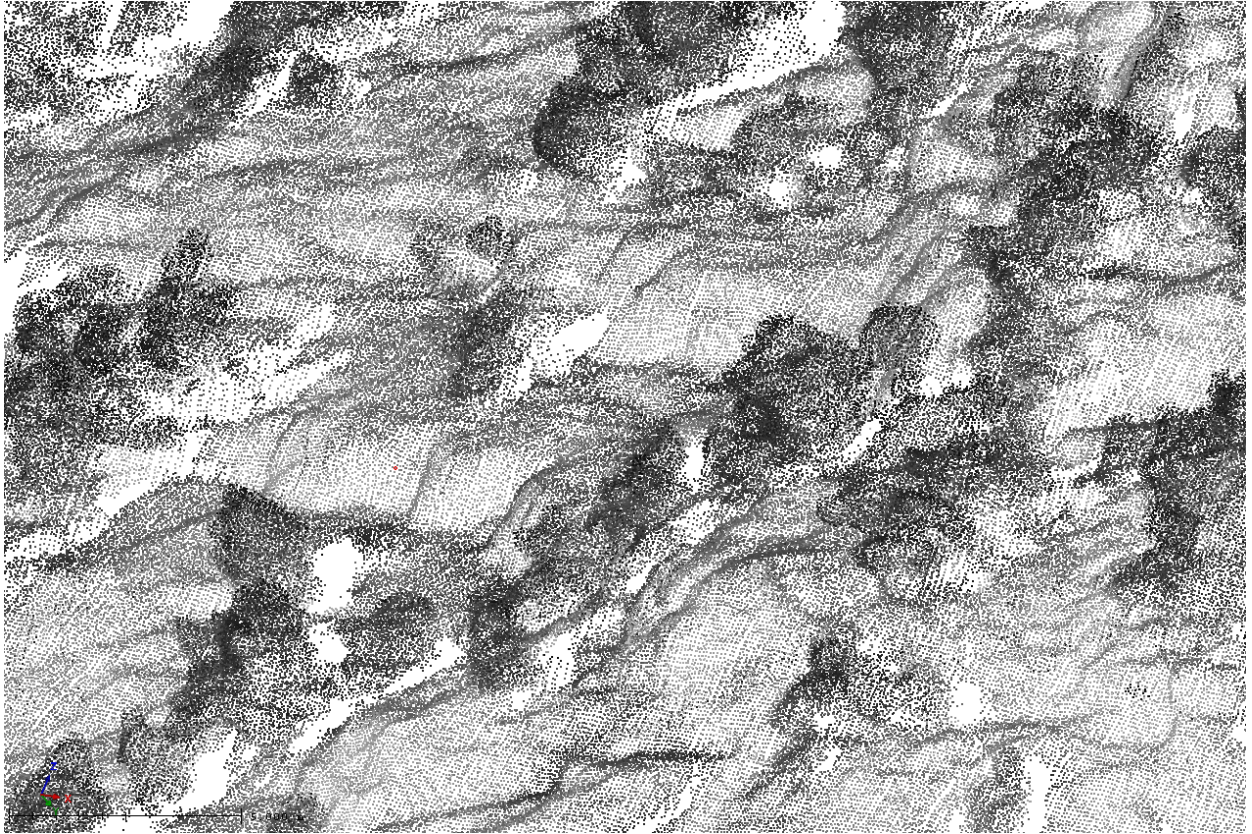




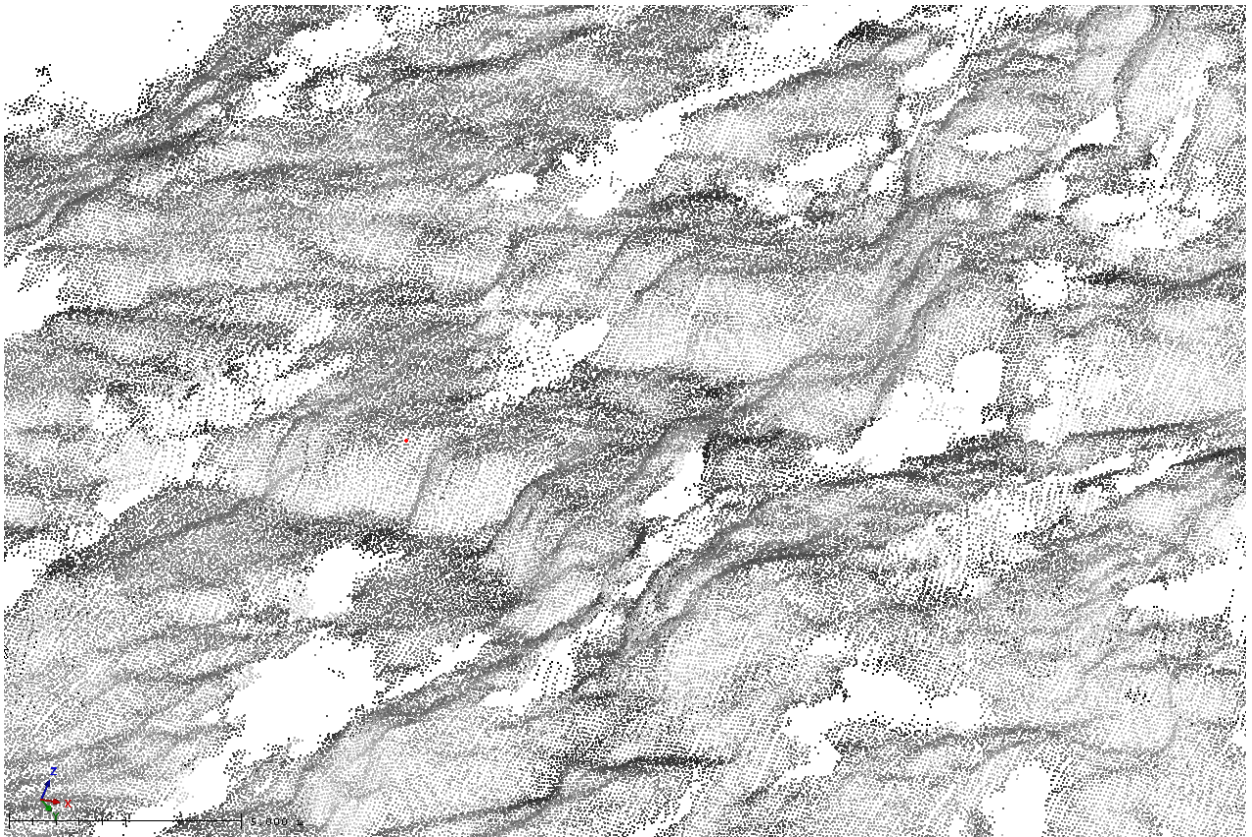
Cliff Part 1 mit Vegetation



Cliff Part 1 ohne Vegetation



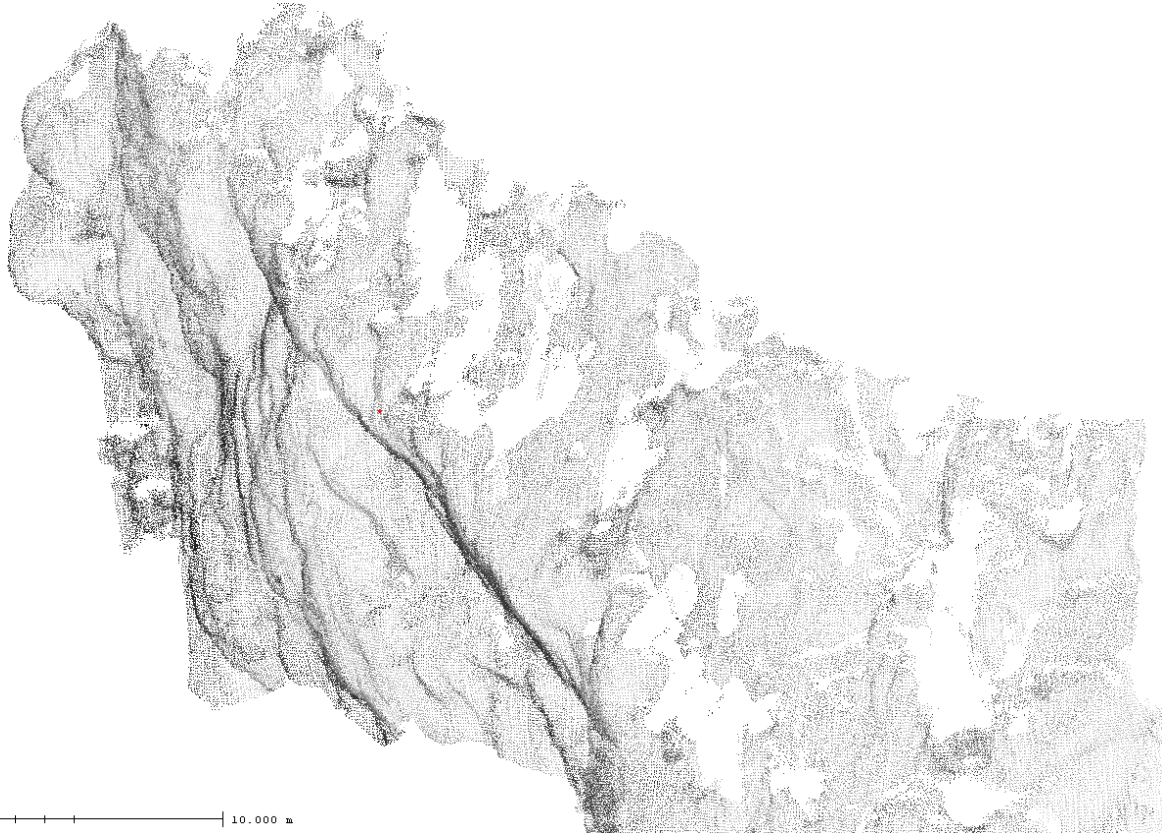
Cliff Part 2 mit Vegetation



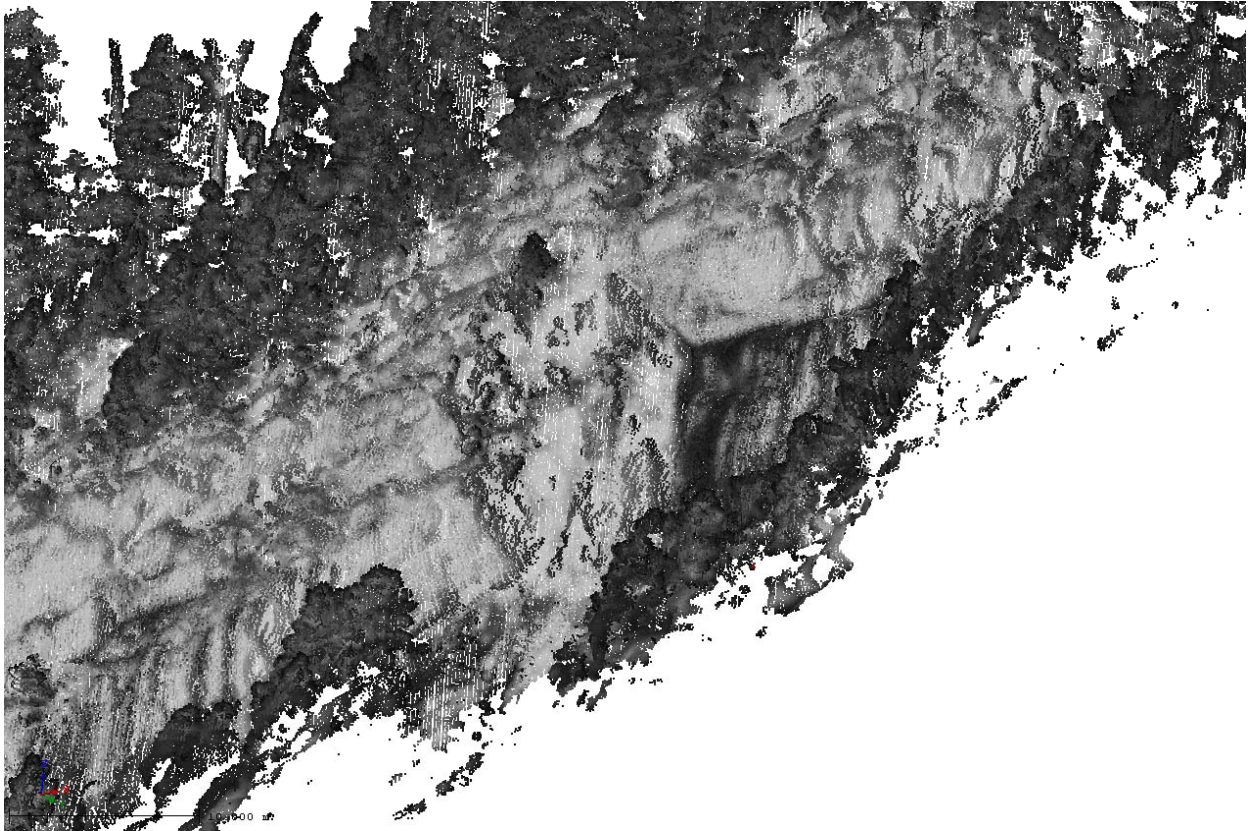
Cliff Part 2 ohne Vegetation



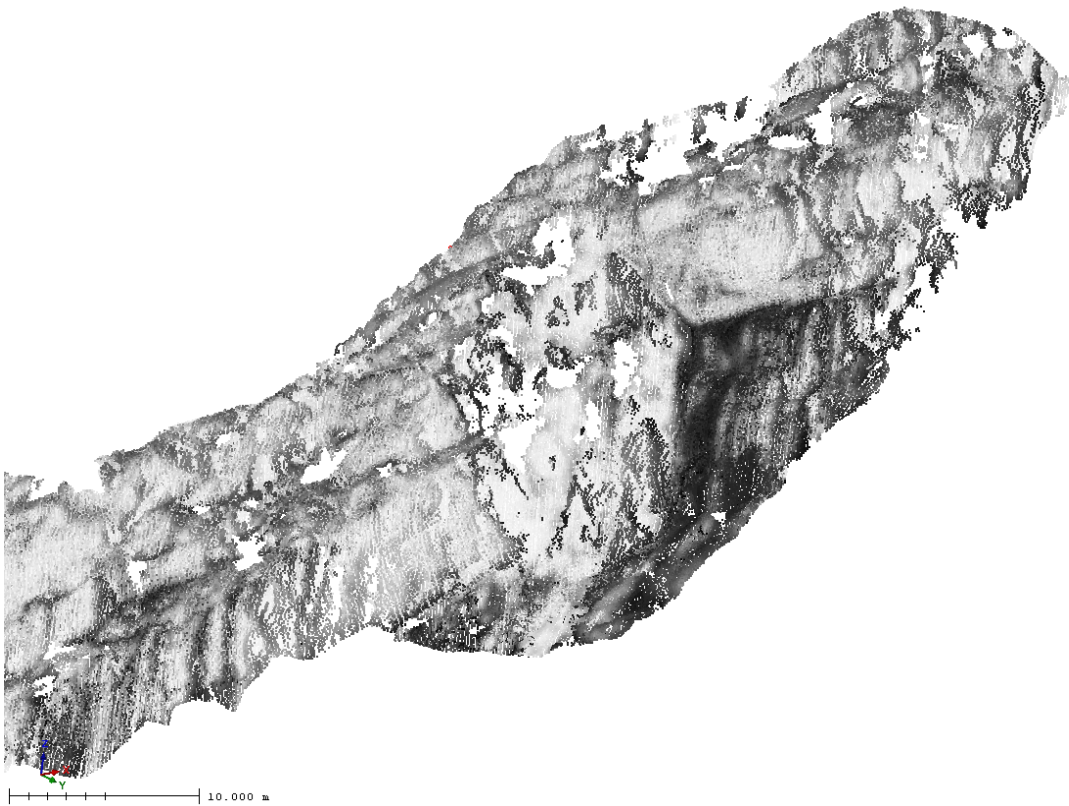
Cliff Part 3 mit Vegetation



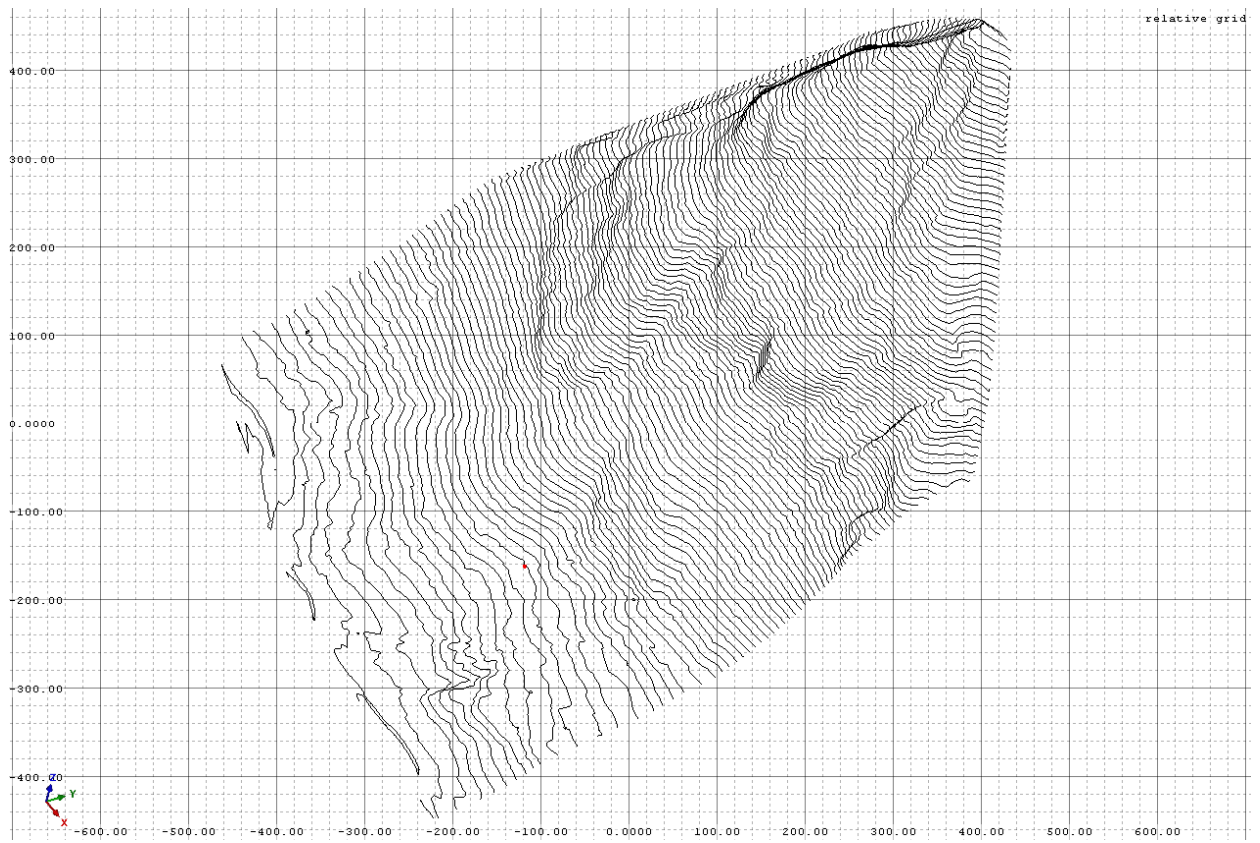
Cliff Part 3 ohne Vegetation



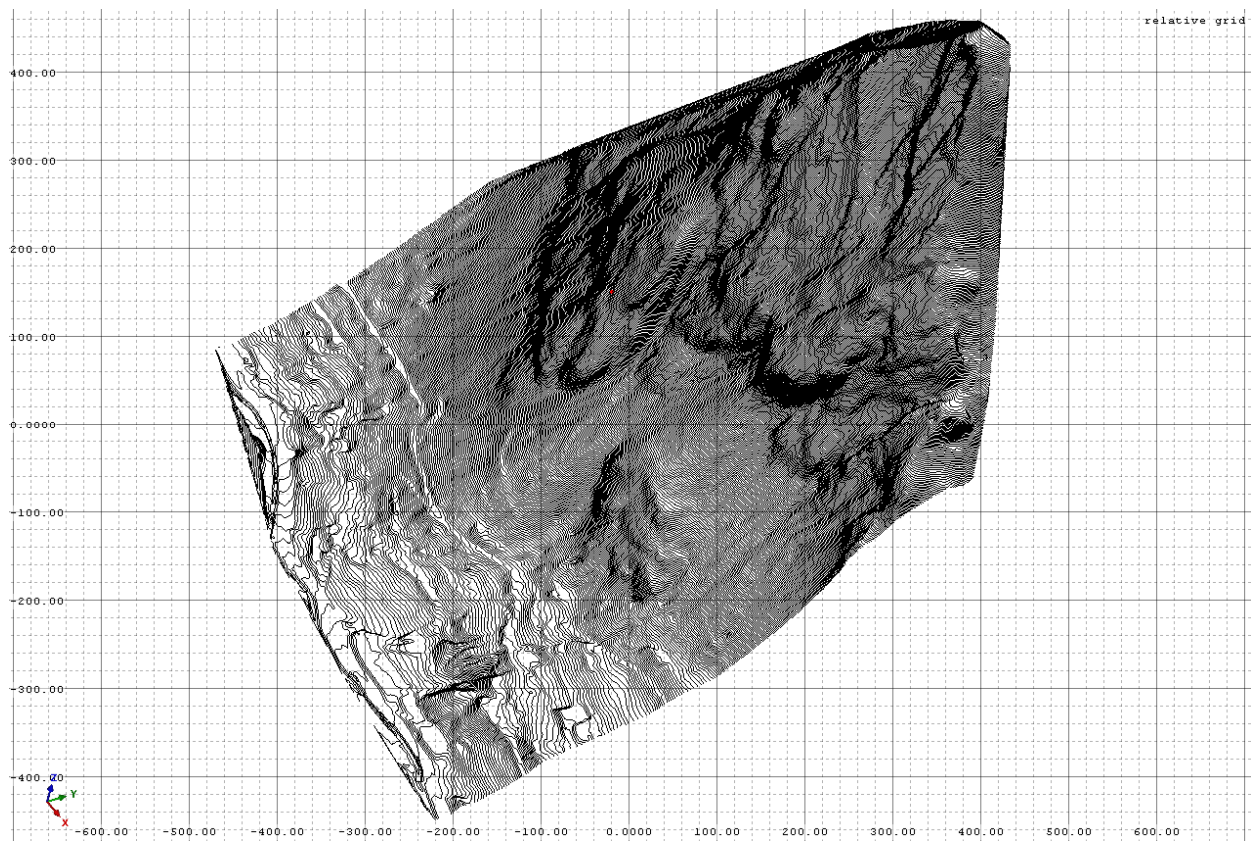
Cliff Part 4 mit Vegetation



Cliff Part 4 ohne Vegetation



Höhenmodell – 5m



Höhenmodell – 1m

## C) Statistische Berechnungen

Die Berechnungen erfolgten mit der Statistiksoftware „R“. Auf den folgenden Seiten sind die Ergebnisse der statistischen Auswertungen in dieser Reihenfolge aufgelistet:

- Feldkofel gesamt
  - Summary Statistics
  - Stem and Leaf
  - Histograms
  - Distribution Tests
  
- Top
  - Summary Statistics
  - Stem and Leaf
  - Histograms
  - Distribution Tests
  
- Middle
  - Summary Statistics
  - Stem and Leaf
  - Histograms
  - Distribution Tests
  
- Cliff
  - Summary Statistics
  - Stem and Leaf
  - Histograms
  - Distribution Tests

Die Histogramme der einzelnen Bereiche befinden sich zur größeren Darstellung auch als .png Files auf der Daten DVD.

## Statistische Auswertungen für den Feldkofel gesamt

### Summary Statistics

set aqua

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.3588	0.6067	0.8178	0.9678	1.1920	2.2210

set blue

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.491	0.904	1.401	1.781	2.281	8.268

set fuchsi a

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.503	0.936	1.259	1.255	1.540	2.280

set green

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.4560	0.9255	1.5100	3.0050	3.2570	20.9500

set grey

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.620	0.715	1.652	1.704	1.879	4.252

set lime

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.499	0.738	1.006	1.353	1.383	6.917

set olive

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.2965	0.4584	0.6140	0.6660	0.7216	2.0240

set purple

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
1.300	1.488	2.420	3.421	4.333	11.400

set red

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.7749	1.0720	1.1810	1.3170	1.5780	1.9630

### Stem and Leaf

set aqua

The decimal point is 1 digit(s) to the left of the |

2		6
4		0611112344457789
6		000124467001124567889
8		2222599889
10		00678802399
12		57948
14		35737
16		147
18		05
20		27
22		02

set blue

The decimal point is at the |

0		55566666777777899999
1		00011111222333334445555666667789999
2		133344
3		000023456
4		011
5		
6		2
7		
8		3

set fuchsi a

The decimal point is 1 digit(s) to the left of the |

4		048
6		2923
8		201459
10		1123614
12		6890
14		0005804
16		2589
18		27
20		016
22		8

set green

The decimal point is at the |

0		556666667777778888888999999
1		000011111222333344444555566666777789
2		112346779
3		01223689
4		113456
5		09
6		58
7		118
8		7
9		11
10		
11		004
12		
13		
14		
15		
16		3
17		
18		
19		
20		6
21		0

set grey

The decimal point is at the |

0		6667778
1		025778889
2		28
3		79
4		3



set lime

The decimal point is at the |

0		566666666777778888999999
1		000011111222233444579
2		025579
3		1
4		7
5		
6		9

set olive

The decimal point is 1 digit(s) to the left of the |

2		0139
4		11592358
6		03779003
8		124
10		70
12		
14		
16		
18		
20		2

set purple

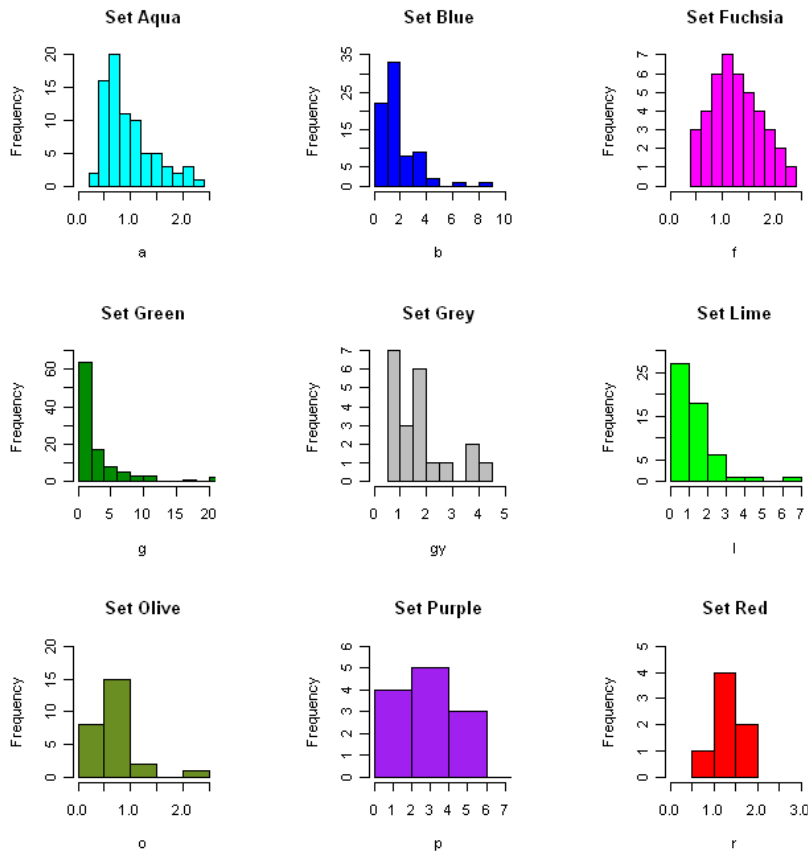
The decimal point is 1 digit(s) to the right of the |

0		1111222334
0		56
1		1

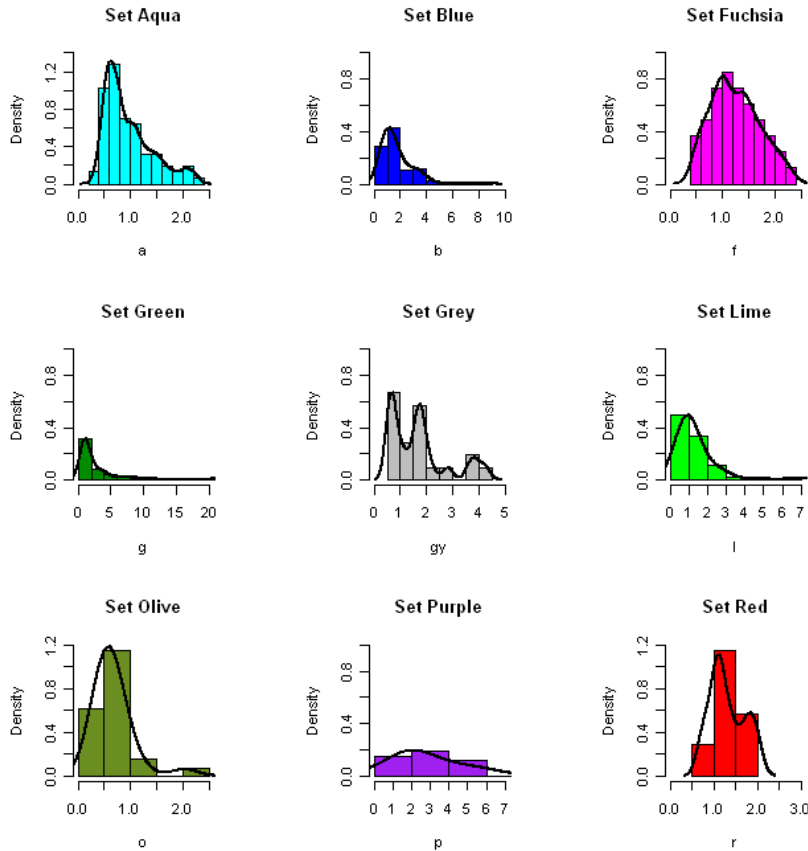
set red

The decimal point is at the |

0		8
1		0124
1		7
2		0



Histogramm der Equivalenzradien mit absoluten Häufigkeiten entlang der Y-Achse



Histogramm der Equivalenzradien mit prozentuell umgerechneter Y-Achse und eingezeichneter Density-Line

Der KS-Test mit Set Aqua für eine Lognormalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: a  
D = 0.0934, p-value = 0.4765  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Aqua für eine Exponentiale Verteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: a  
D = 0.2648, p-value = 2.561e-05  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Aqua für eine Normalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: a  
D = 0.1613, p-value = 0.0306  
alternative hypothesis: two-sided

Der Shapiro-Test mit Set Aqua für eine Normalverteilung  
Shapiro-Wilk normality test  
data: a  
W = 0.8901, p-value = 6.025e-06

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Aqua für eine Normalverteilung  
Beobachtete Häufigkeit: 2 16 20 11 10 5 5 3 2 3 1  
Chi-squared test for given probabilities  
data: aob  
X-squared = 30.3727, df = 10, p-value = 0.0007443

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Aqua für eine Log-Normalverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: aob  
X-squared = 102169.4, df = 10, p-value < 2.2e-16

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Aqua für eine Exponentialverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: aob  
X-squared = 27.1916, df = 10, p-value = 0.002429

Der KS-Test mit Set Blue für eine Lognormalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: b  
D = 0.0689, p-value = 0.8387  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Blue für eine Exponentiale Verteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: b  
D = 0.558, p-value = 8.882e-16  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Blue für eine Normalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: b  
D = 0.1813, p-value = 0.01172  
alternative hypothesis: two-sided

Der Shapiro-Test mit Set Blue für eine Normalverteilung  
Shapiro-Wilk normality test  
data: b  
W = 0.7815, p-value = 2.873e-09

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Blue für eine Normalverteilung  
Beobachtete Häufigkeit: 22 33 8 9 2 0 1 0 1  
Chi-squared test for given probabilities  
data: bob  
X-squared = 9173.648, df = 8, p-value < 2.2e-16

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Blue für eine Log-Normalverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: bob  
X-squared = NaN, df = 8, p-value = NA

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Blue für eine Exponentialverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: bob  
X-squared = 4552.268, df = 8, p-value < 2.2e-16

Der KS-Test mit Set Fuchsia für eine Lognormalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: f  
D = 0.0894, p-value = 0.8698  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Fuchsia für eine Exponentiale Verteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: f  
D = 0.3507, p-value = 5.16e-05  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Fuchsia für eine Normalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: f  
D = 0.1057, p-value = 0.7099  
alternative hypothesis: two-sided

Der Shapiro-Test mit Set Fuchsia für eine Normalverteilung  
Shapiro-Wilk normality test  
data: f  
W = 0.9716, p-value = 0.389

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Fuchsia für eine Normalverteilung  
Beobachtete Häufigkeit: 3 4 6 7 6 5 4 3 2 1  
Chi-squared test for given probabilities  
data: fob  
X-squared = 1.7938, df = 9, p-value = 0.9943

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Fuchsia für eine Log-Normalverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: fob  
X-squared = 107240.3, df = 9, p-value < 2.2e-16

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Fuchsia für eine Exponentialverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: fob  
X-squared = 8.0271, df = 9, p-value = 0.5314

Der KS-Test mit Set Green für eine Lognormalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: g  
D = 0.135, p-value = 0.04695  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Green für eine Exponentiale Verteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: g  
D = 0.8309, p-value < 2.2e-16  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Green für eine Normalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: g  
D = 0.2511, p-value = 4.583e-06  
alternative hypothesis: two-sided

Der Shapiro-Test mit Set Green für eine Normalverteilung  
Shapiro-Wilk normality test  
data: g  
W = 0.6316, p-value = 1.062e-14

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Green für eine Normalverteilung  
Beobachtete Häufigkeit: 64 17 8 5 3 3 0 0 1 0 2  
Chi-squared test for given probabilities  
data: gob  
X-squared = 8710.485, df = 10, p-value < 2.2e-16

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Green für eine Log-Normalverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: gob  
X-squared = NaN, df = 10, p-value = NA

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Green für eine Exponentialverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: gob  
X-squared = NaN, df = 10, p-value = NA

Der KS-Test mit Set Grey für eine Lognormalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: gy  
D = 0.1684, p-value = 0.5357  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Grey für eine Exponentiale Verteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: gy  
D = 0.5827, p-value = 2.653e-07  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Grey für eine Normalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: gy  
D = 0.1996, p-value = 0.328  
alternative hypothesis: two-sided

Der Shapiro-Test mit Set Grey für eine Normalverteilung  
Shapiro-Wilk normality test  
data: gy  
W = 0.8478, p-value = 0.0039

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Grey für eine Normalverteilung  
Beobachtete Häufigkeit: 7 3 6 1 1 0 2 1  
Chi-squared test for given probabilities  
data: gyob  
X-squared = 13.98, df = 7, p-value = 0.05154

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Grey für eine Log-Normalverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: gyob  
X-squared = 4233345, df = 7, p-value < 2.2e-16

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Grey für eine Exponentialverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: gyob  
X-squared = 40.2578, df = 7, p-value = 1.124e-06

Der KS-Test mit Set Lime für eine Lognormalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: l  
D = 0.1385, p-value = 0.2292  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Lime für eine Exponentiale Verteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: l  
D = 0.4788, p-value = 6.65e-12  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Lime für eine Normalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: l  
D = 0.2554, p-value = 0.001358  
alternative hypothesis: two-sided

Der Shapiro-Test mit Set Lime für eine Normalverteilung  
Shapiro-Wilk normality test  
data: l  
W = 0.6485, p-value = 4.135e-10

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Lime für eine Normalverteilung  
Beobachtete Häufigkeit: 27 18 6 1 1 0 1  
Chi-squared test for given probabilities  
data: l ob  
X-squared = 1325.51, df = 6, p-value < 2.2e-16

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Lime für eine Log-Normalverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: l ob  
X-squared = NaN, df = 6, p-value = NA

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Lime für eine Exponentialverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: l ob  
X-squared = 51.1905, df = 6, p-value = 2.712e-09  
Der KS-Test mit Set Olive für eine Lognormalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: o  
D = 0.103, p-value = 0.9193  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Olive für eine Exponentiale Verteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: o  
D = 0.537, p-value = 1.545e-07  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Olive für eine Normalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: o  
D = 0.1983, p-value = 0.2261  
alternative hypothesis: two-sided

Der Shapiro-Test mit Set Olive für eine Normalverteilung  
Shapiro-Wilk normality test  
data: o  
W = 0.7656, p-value = 4.826e-05

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Olive für eine Normalverteilung  
Beobachtete Häufigkeit: 8 15 2 0 1  
Chi-squared test for given probabilities  
data: o ob  
X-squared = 614.5556, df = 4, p-value < 2.2e-16

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Olive für eine Log-Normalverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: o ob  
X-squared = 1971102, df = 4, p-value < 2.2e-16

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Olive für eine Exponentialverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: o ob  
X-squared = 18.842, df = 4, p-value = 0.0008442

Der KS-Test mit Set Purple für eine Lognormalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: p  
D = 0.1733, p-value = 0.7698  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Purple für eine Exponentiale Verteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: p  
D = 0.9828, p-value < 2.2e-16  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Purple für eine Normalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: p  
D = 0.2784, p-value = 0.2205  
alternative hypothesis: two-sided

Der Shapiro-Test mit Set Purple für eine Normalverteilung  
Shapiro-Wilk normality test  
data: p  
W = 0.7404, p-value = 0.001454

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Purple für eine Normalverteilung  
Beobachtete Häufigkeit: 4 5 3 0 0 1  
Chi-squared test for given probabilities  
data: pob  
X-squared = 9.1932, df = 5, p-value = 0.1016

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Purple für eine Log-Normalverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: pob  
X-squared = NaN, df = 5, p-value = NA

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Purple für eine Exponentialverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: pob  
X-squared = 2.828006e+12, df = 5, p-value < 2.2e-16

Der KS-Test mit Set Red für eine Lognormalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: r  
D = 0.1534, p-value = 0.9867  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Red für eine Exponentiale Verteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: r  
D = 0.4891, p-value = 0.04572  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Red für eine Normalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: r  
D = 0.1997, p-value = 0.8954  
alternative hypothesis: two-sided

Der Shapiro-Test mit Set Red für eine Normalverteilung  
Shapiro-Wilk normality test  
data: r  
W = 0.9583, p-value = 0.8044

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Red für eine Normalverteilung  
Beobachtete Häufigkeit: 1 4 2  
Chi-squared test for given probabilities  
data: rob  
X-squared = 0.2881, df = 2, p-value = 0.8659

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Red für eine Log-Normalverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: rob  
X-squared = 3265.327, df = 2, p-value < 2.2e-16

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Red für eine Exponentialverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: rob  
X-squared = 3.4009, df = 2, p-value = 0.1826

## Statistische Auswertungen für den Bereich „Top“

### Statistic Summary

set aqua

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.5103	0.7079	0.8713	0.9752	1.1520	1.8010

set green

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.5399	0.9359	1.2960	2.6320	3.2200	11.4200

set lime

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.5682	0.6298	0.8916	0.8905	1.1390	1.2500

set purple

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
1.300	1.407	1.765	2.510	2.898	5.752

set red

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.7749	1.0720	1.1810	1.3170	1.5780	1.9630

set blue

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.7058	1.3370	1.6450	2.7530	3.4400	8.2680

### Stem and Leaf

set aqua

The decimal point is at the |

0		566777889
1		0113
1		558

set green

The decimal point is at the |

0		56666889900111233344556
2		326
4		14
6		51
8		1
10		04

set lime

The decimal point is 1 digit(s) to the left of the |

4		79
6		15
8		592
10		359
12		5



set purple

The decimal point is at the |

1		3345
2		04
3		
4		3
5		8

set red

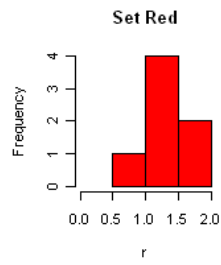
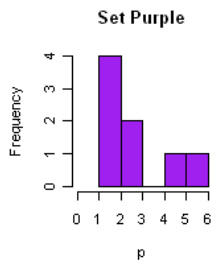
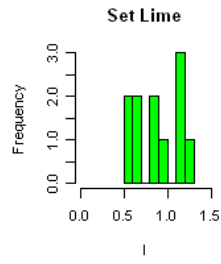
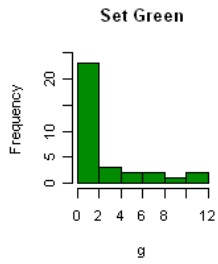
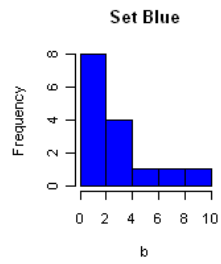
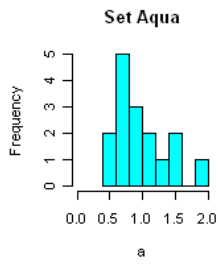
The decimal point is at the |

0		8
1		0124
1		7
2		0

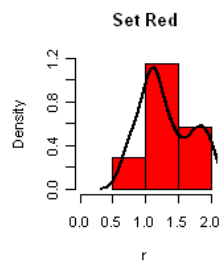
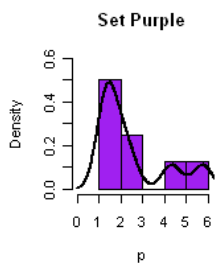
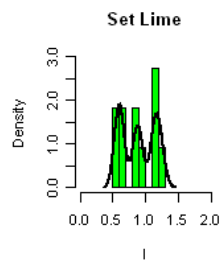
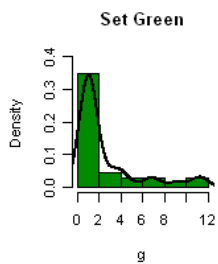
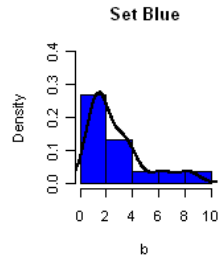
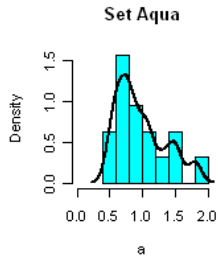
set blue

The decimal point is at the |

0		72334466
2		3045
4		1
6		2
8		3



Histogramm der Equivalenzradien mit absoluten Häufigkeiten entlang der Y-Achse



Histogramm der Equivalenzradien mit prozentuell umgerechneter Y-Achse und eingezeichneter Density-Line

Der KS-Test mit Set Aqua für eine Lognormalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: a  
D = 0.0888, p-value = 0.9983  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Aqua für eine Exponentiale Verteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: a  
D = 0.2959, p-value = 0.09766  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Aqua für eine Normalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: a  
D = 0.1473, p-value = 0.83  
alternative hypothesis: two-sided

Der Shapiro-Test mit Set Aqua für eine Normalverteilung  
Shapiro-Wilk normality test  
data: a  
W = 0.9252, p-value = 0.2042

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Aqua für eine Normalverteilung  
Beobachtete Häufigkeit: 2 5 3 2 1 2 0 1  
Chi-squared test for given probabilities  
data: aob  
X-squared = 7.7605, df = 7, p-value = 0.3542

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Aqua für eine Log-Normalverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: aob  
X-squared = 33371.4, df = 7, p-value < 2.2e-16

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Aqua für eine Exponentialverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: aob  
X-squared = 4.4399, df = 7, p-value = 0.728

Der KS-Test mit Set Blue für eine Lognormalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: b  
D = 0.1928, p-value = 0.5677  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Blue für eine Exponentiale Verteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: b  
D = 0.8753, p-value = 5.518e-14  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Blue für eine Normalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: b  
D = 0.2326, p-value = 0.3375  
alternative hypothesis: two-sided

Der Shapiro-Test mit Set Blue für eine Normalverteilung  
Shapiro-Wilk normality test  
data: b  
W = 0.8098, p-value = 0.004924

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Blue für eine Normalverteilung  
Beobachtete Häufigkeit: 8 4 1 1 1  
Chi-squared test for given probabilities  
data: bob  
X-squared = 13.0692, df = 4, p-value = 0.01094

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Blue für eine Log-Normalverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: bob  
X-squared = Inf, df = 4, p-value < 2.2e-16

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Blue für eine Exponentialverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: bob  
X-squared = 19785484, df = 4, p-value < 2.2e-16

Der KS-Test mit Set Green für eine Lognormalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: g  
D = 0.2116, p-value = 0.08954  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Green für eine Exponentiale Verteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: g  
D = 0.7825, p-value = 4.441e-16  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Green für eine Normalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: g  
D = 0.3278, p-value = 0.001167  
alternative hypothesis: two-sided

Der Shapiro-Test mit Set Green für eine Normalverteilung  
Shapiro-Wilk normality test  
data: g  
W = 0.6765, p-value = 2.927e-07

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Green für eine Normalverteilung  
Beobachtete Häufigkeit: 23 3 2 2 1 2  
Chi-squared test for given probabilities  
data: gob  
X-squared = 42.9556, df = 5, p-value = 3.772e-08

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Green für eine Log-Normalverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: gob  
X-squared = Inf, df = 5, p-value < 2.2e-16

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Green für eine Exponentialverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: gob  
X-squared = 227989522030, df = 5, p-value < 2.2e-16  
Der KS-Test mit Set Lime für eine Lognormalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: l  
D = 0.1826, p-value = 0.7948  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Lime für eine Exponentiale Verteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: l  
D = 0.4872, p-value = 0.006276  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Lime für eine Normalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: l  
D = 0.1871, p-value = 0.7718  
alternative hypothesis: two-sided

Der Shapiro-Test mit Set Lime für eine Normalverteilung  
Shapiro-Wilk normality test  
data: l  
W = 0.8911, p-value = 0.1437

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Lime für eine Normalverteilung  
Beobachtete Häufigkeit: 2 2 0 2 1 0 3 1  
Chi-squared test for given probabilities  
data: lob  
X-squared = 8.7334, df = 7, p-value = 0.2724

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Lime für eine Log-Normalverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: lob  
X-squared = 1419.923, df = 7, p-value < 2.2e-16

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Lime für eine Exponentialverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: lob  
X-squared = 6.0678, df = 7, p-value = 0.5319

Der KS-Test mit Set Purple für eine Lognormalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: p  
D = 0.2395, p-value = 0.664  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Purple für eine Exponentiale Verteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: p  
D = 0.9333, p-value = 7.793e-10  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Purple für eine Normalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: p  
D = 0.2718, p-value = 0.5119  
alternative hypothesis: two-sided

Der Shapiro-Test mit Set Purple für eine Normalverteilung  
Shapiro-Wilk normality test  
data: p  
W = 0.775, p-value = 0.01539

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Purple für eine Normalverteilung  
Beobachtete Häufigkeit: 4 2 0 1 1  
Chi-squared test for given probabilities  
data: pob  
X-squared = 4.688, df = 4, p-value = 0.3208

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Purple für eine Log-Normalverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: pob  
X-squared = 8.15421e+11, df = 4, p-value < 2.2e-16

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Purple für eine Exponentialverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: pob  
X-squared = 664.5859, df = 4, p-value < 2.2e-16

Der KS-Test mit Set Red für eine Lognormalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: r  
D = 0.1534, p-value = 0.9867  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Red für eine Exponentiale Verteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: r  
D = 0.4891, p-value = 0.04572  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Red für eine Normalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: r  
D = 0.1997, p-value = 0.8954  
alternative hypothesis: two-sided

Der Shapiro-Test mit Set Red für eine Normalverteilung  
Shapiro-Wilk normality test  
data: r  
W = 0.9583, p-value = 0.8044

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Red für eine Normalverteilung  
Beobachtete Häufigkeit: 1 4 2  
Chi-squared test for given probabilities  
data: rob  
X-squared = 0.2881, df = 2, p-value = 0.8659

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Red für eine Log-Normalverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: rob  
X-squared = 3265.327, df = 2, p-value < 2.2e-16

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Red für eine Exponentialverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: rob  
X-squared = 3.4009, df = 2, p-value = 0.1826

## Statistische Auswertungen für den Bereich „Middle“

### Statistic Summary

set aqua

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.3588	0.5252	0.6380	0.6930	0.8176	1.2510

set olive

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.2965	0.4584	0.6140	0.6660	0.7216	2.0240

set green

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.8847	7.8470	9.1460	11.3900	16.2800	20.9500

set blue

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.4937	0.9383	1.8850	1.9350	2.7240	4.0680

set purple

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
2.295	2.507	2.807	4.879	5.387	11.400

### Stem and Leaf

set aqua

The decimal point is 1 digit(s) to the left of the |

2		6
4		01113479
6		040011
8		229
10		82
12		5

set olive

The decimal point is 1 digit(s) to the left of the |

2		0139
4		11592358
6		03779003
8		124
10		70
12		
14		
16		
18		
20		2

set green

The decimal point is 1 digit(s) to the right of the |

0		1
0		7899
1		1
1		6
2		11

set blue

The decimal point is at the |

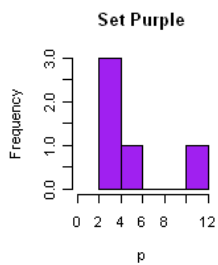
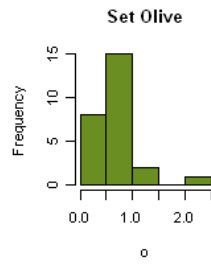
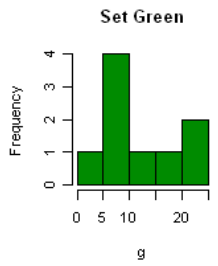
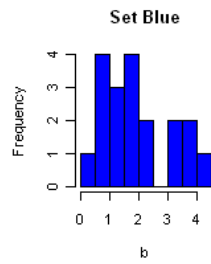
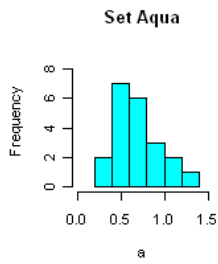
0		55678
1		1157999
2		34
3		026
4		01

set purple

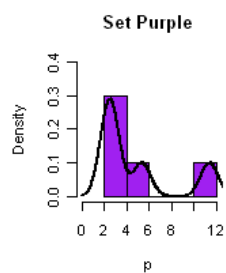
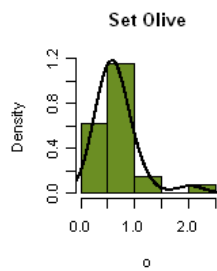
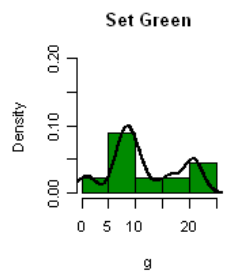
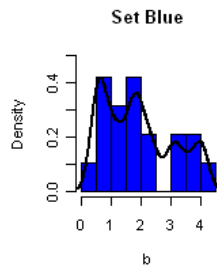
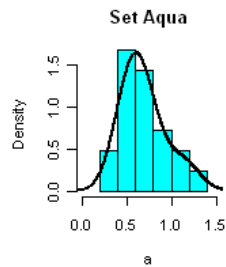
The decimal point is at the |

2		358
4		4
6		
8		
10		4





Histogramm der Äquivalenzradien mit absoluten Häufigkeiten entlang der Y-Achse



Histogramm der Äquivalenzradien mit prozentuell umgerechneter Y-Achse und eingezeichneter Density-Line

Der KS-Test mit Set Aqua für eine Lognormalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: a  
D = 0.1235, p-value = 0.8677  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Aqua für eine Exponentiale Verteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: a  
D = 0.5598, p-value = 9.935e-07  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Aqua für eine Normalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: a  
D = 0.1864, p-value = 0.4088  
alternative hypothesis: two-sided

Der Shapiro-Test mit Set Aqua für eine Normalverteilung  
Shapiro-Wilk normality test  
data: a  
W = 0.9158, p-value = 0.07141

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Aqua für eine Normalverteilung  
Beobachtete Häufigkeit: 2 7 6 3 2 1  
Chi-squared test for given probabilities  
data: aob  
X-squared = 3.2408, df = 5, p-value = 0.6629

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Aqua für eine Log-Normalverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: aob  
X-squared = 5929.73, df = 5, p-value < 2.2e-16

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Aqua für eine Exponentialverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: aob  
X-squared = 6.618, df = 5, p-value = 0.2506

Der KS-Test mit Set Blue für eine Lognormalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: b  
D = 0.1275, p-value = 0.8795  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Blue für eine Exponentiale Verteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: b  
D = 0.563, p-value = 3.28e-06  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Blue für eine Normalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: b  
D = 0.1285, p-value = 0.8735  
alternative hypothesis: two-sided

Der Shapiro-Test mit Set Blue für eine Normalverteilung  
Shapiro-Wilk normality test  
data: b  
W = 0.9212, p-value = 0.119

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Blue für eine Normalverteilung  
Beobachtete Häufigkeit: 1 4 3 4 2 0 2 2 1  
Chi-squared test for given probabilities  
data: bob  
X-squared = 6.5382, df = 8, p-value = 0.5872

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Blue für eine Log-Normalverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: bob  
X-squared = 341707.7, df = 8, p-value < 2.2e-16

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Blue für eine Exponentialverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: bob  
X-squared = 192.6479, df = 8, p-value < 2.2e-16

Der KS-Test mit Set Green für eine Lognormalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: g  
D = 0.3006, p-value = 0.3222  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Green für eine Exponentiale Verteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: g  
D = 0.9997, p-value < 2.2e-16  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Green für eine Normalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: g  
D = 0.1878, p-value = 0.8536  
alternative hypothesis: two-sided

Der Shapiro-Test mit Set Green für eine Normalverteilung  
Shapiro-Wilk normality test  
data: g  
W = 0.9248, p-value = 0.4333

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Green für eine Normalverteilung  
Beobachtete Häufigkeit: 1 4 1 1 2  
Chi-squared test for given probabilities  
data: gob  
X-squared = 4.7901, df = 4, p-value = 0.3095

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Green für eine Log-Normalverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: gob  
X-squared = Inf, df = 4, p-value < 2.2e-16

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Green für eine Exponentialverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: gob  
X-squared = Inf, df = 4, p-value < 2.2e-16

Der KS-Test mit Set Olive für eine Lognormalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: o  
D = 0.103, p-value = 0.9193  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Olive für eine Exponentiale Verteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: o  
D = 0.537, p-value = 1.545e-07  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Olive für eine Normalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: o  
D = 0.1983, p-value = 0.2261  
alternative hypothesis: two-sided

Der Shapiro-Test mit Set Olive für eine Normalverteilung  
Shapiro-Wilk normality test  
data: o  
W = 0.7656, p-value = 4.826e-05

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Olive für eine Normalverteilung  
Beobachtete Häufigkeit: 8 15 2 0 1  
Chi-squared test for given probabilities  
data: oob  
X-squared = 614.5556, df = 4, p-value < 2.2e-16

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Olive für eine Log-Normalverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: oob  
X-squared = 1971102, df = 4, p-value < 2.2e-16

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Olive für eine Exponentialverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: oob  
X-squared = 18.842, df = 4, p-value = 0.0008442

Der KS-Test mit Set Purple für eine Lognormalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: p  
D = 0.2961, p-value = 0.6795  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Purple für eine Exponentiale Verteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: p  
D = 1, p-value < 2.2e-16  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Purple für eine Normalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: p  
D = 0.3047, p-value = 0.6456  
alternative hypothesis: two-sided

Der Shapiro-Test mit Set Purple für eine Normalverteilung  
Shapiro-Wilk normality test  
data: p  
W = 0.7666, p-value = 0.04208

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Purple für eine Normalverteilung  
Beobachtete Häufigkeit: 3 1 1  
Chi-squared test for given probabilities  
data: pob  
X-squared = 3.4514, df = 2, p-value = 0.1781

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Purple für eine Log-Normalverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: pob  
X-squared = 7702450703, df = 2, p-value < 2.2e-16

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Purple für eine Exponentialverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: pob  
X-squared = 7683324, df = 2, p-value < 2.2e-16

## Statistische Auswertungen für den Bereich „Cliff“

### Summary Statistics

set aqua

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.461	0.658	0.997	1.106	1.427	2.221

set fuchsi a

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.503	0.936	1.259	1.255	1.540	2.280

set green

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.456	0.831	1.574	1.969	2.695	6.817

set blue

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.4910	0.8758	1.1460	1.3650	1.5780	3.2860

set grey

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.620	0.715	1.652	1.704	1.879	4.252

set lime

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.499	0.770	1.067	1.471	1.609	6.917

### Stem and Leaf

set aqua

The decimal point is 1 digit(s) to the left of the |

4		624458
6		0124656788
8		2288
10		0067399
12		748
14		377
16		147
18		5
20		27
22		02

set fuchsi a

The decimal point is 1 digit(s) to the left of the |

4		048
6		2923
8		201459
10		1123614
12		6890
14		0005804
16		2589
18		27
20		016
22		8

set green

The decimal point is at the |

0		5667777778888888999
1		001122444556666777789
2		11246779
3		012389
4		1356
5		09
6		8

set blue

The decimal point is at the |

0		
0		566667777799999
1		00011123334
1		555666789
2		134
2		
3		0003

set grey

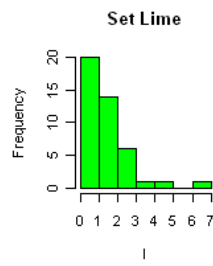
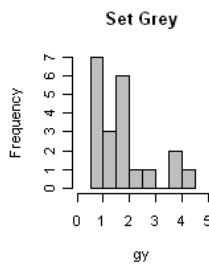
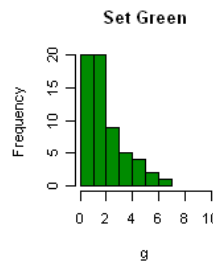
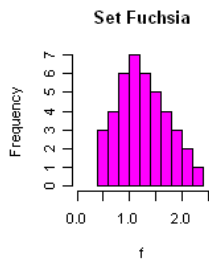
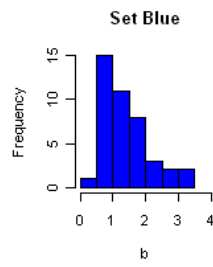
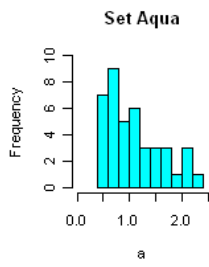
The decimal point is at the |

0		6667778
1		025778889
2		28
3		79
4		3

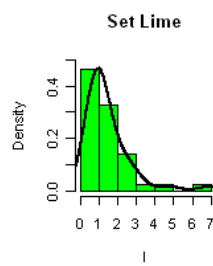
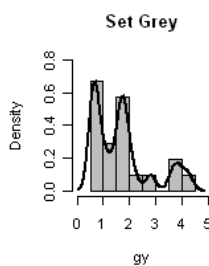
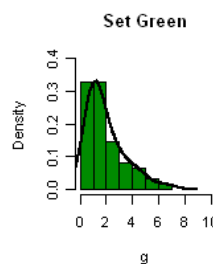
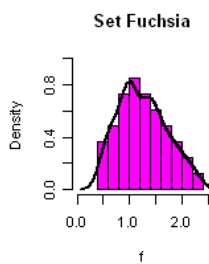
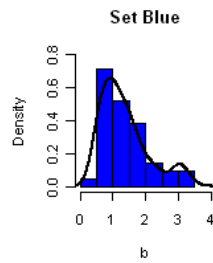
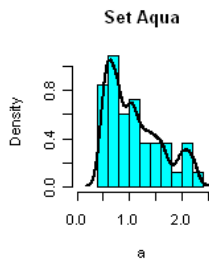
set lime

The decimal point is at the |

0		56666777778889999
1		00001111223444579
2		025579
3		1
4		7
5		
6		9



Histogramm der Äquivalenzradien mit absoluten Häufigkeiten entlang der Y-Achse



Histogramm der Äquivalenzradien mit prozentuell umgerechneter Y-Achse und eingezeichneter Density-Linie

Der KS-Test mit Set Aqua für eine Lognormalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: a  
D = 0.102, p-value = 0.7485  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Aqua für eine Exponentielle Verteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: a  
D = 0.3208, p-value = 0.000297  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Aqua für eine Normalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: a  
D = 0.1478, p-value = 0.3017  
alternative hypothesis: two-sided

Der Shapiro-Test mit Set Aqua für eine Normalverteilung  
Shapiro-Wilk normality test  
data: a  
W = 0.911, p-value = 0.003550

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Aqua für eine Normalverteilung  
Beobachtete Häufigkeit: 7 9 5 6 3 3 3 1 3 1  
Chi-squared test for given probabilities  
data: aob  
X-squared = 14.5078, df = 9, p-value = 0.1054

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Aqua für eine Log-Normalverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: aob  
X-squared = 16668.62, df = 9, p-value < 2.2e-16

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Aqua für eine Exponentialverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: aob  
X-squared = 3.3318, df = 9, p-value = 0.9497

Der KS-Test mit Set Blue für eine Lognormalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: b  
D = 0.0733, p-value = 0.9653  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Blue für eine Exponentielle Verteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: b  
D = 0.4353, p-value = 9.321e-08  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Blue für eine Normalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: b  
D = 0.1468, p-value = 0.2957  
alternative hypothesis: two-sided

Der Shapiro-Test mit Set Blue für eine Normalverteilung  
Shapiro-Wilk normality test  
data: b  
W = 0.8798, p-value = 0.0003782

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Blue für eine Normalverteilung  
Beobachtete Häufigkeit: 1 15 11 8 3 2 2  
Chi-squared test for given probabilities  
data: bob  
X-squared = 14.1521, df = 6, p-value = 0.02798



Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Blue für eine Log-Normalverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: bob  
X-squared = 4427575, df = 6, p-value < 2.2e-16

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Blue für eine Exponentialverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: bob  
X-squared = 29.4437, df = 6, p-value = 5.013e-05

Der KS-Test mit Set Fuchsia für eine Lognormalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: f  
D = 0.0894, p-value = 0.8698  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Fuchsia für eine Exponentiale Verteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: f  
D = 0.3507, p-value = 5.16e-05  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Fuchsia für eine Normalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: f  
D = 0.1057, p-value = 0.7099  
alternative hypothesis: two-sided

Der Shapiro-Test mit Set Fuchsia für eine Normalverteilung  
Shapiro-Wilk normality test  
data: f  
W = 0.9716, p-value = 0.389

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Fuchsia für eine Normalverteilung  
Beobachtete Häufigkeit: 3 4 6 7 6 5 4 3 2 1  
Chi-squared test for given probabilities  
data: fob  
X-squared = 1.7938, df = 9, p-value = 0.9943

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Fuchsia für eine Log-Normalverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: fob  
X-squared = 107240.3, df = 9, p-value < 2.2e-16

Der X<sup>2</sup>-Test mit Set Fuchsia für eine Exponentialverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: fob  
X-squared = 8.0271, df = 9, p-value = 0.5314

Der KS-Test mit Set Green für eine Lognormalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: g  
D = 0.0909, p-value = 0.6943  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Green für eine Exponentiale Verteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: g  
D = 0.6341, p-value < 2.2e-16  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Green für eine Normalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: g  
D = 0.1915, p-value = 0.02281  
alternative hypothesis: two-sided

Der Shapiro-Test mit Set Green für eine Normalverteilung  
Shapiro-Wilk normality test  
data: g  
W = 0.8463, p-value = 2.024e-06

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Green für eine Normalverteilung  
Beobachtete Häufigkeit: 20 20 9 5 4 2 1  
Chi-squared test for given probabilities  
data: gob  
X-squared = 20.4729, df = 6, p-value = 0.002280

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Green für eine Log-Normalverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: gob  
X-squared = 1.100918e+14, df = 6, p-value < 2.2e-16

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Green für eine Exponentialverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: gob  
X-squared = 1349.488, df = 6, p-value < 2.2e-16

Der KS-Test mit Set Grey für eine Lognormalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: gy  
D = 0.1684, p-value = 0.5357  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Grey für eine Exponentiale Verteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: gy  
D = 0.5827, p-value = 2.653e-07  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Grey für eine Normalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: gy  
D = 0.1996, p-value = 0.328  
alternative hypothesis: two-sided

Der Shapiro-Test mit Set Grey für eine Normalverteilung  
Shapiro-Wilk normality test  
data: gy  
W = 0.8478, p-value = 0.0039

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Grey für eine Normalverteilung  
Beobachtete Häufigkeit: 7 3 6 1 1 0 2 1  
Chi-squared test for given probabilities  
data: gyob  
X-squared = 13.98, df = 7, p-value = 0.05154

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Grey für eine Log-Normalverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: gyob  
X-squared = 4233345, df = 7, p-value < 2.2e-16

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Grey für eine Exponentialverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: gyob  
X-squared = 40.2578, df = 7, p-value = 1.124e-06

Der KS-Test mit Set Lime für eine Lognormalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: l  
D = 0.1205, p-value = 0.5214  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Lime für eine Exponentiale Verteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: l  
D = 0.504, p-value = 1.232e-10  
alternative hypothesis: two-sided

Der KS-Test mit Set Lime für eine Normalverteilung  
One-sample Kolmogorov-Smirnov test  
data: l  
D = 0.2339, p-value = 0.01492  
alternative hypothesis: two-sided

Der Shapiro-Test mit Set Lime für eine Normalverteilung  
Shapiro-Wilk normality test  
data: l  
W = 0.6853, p-value = 2.575e-08

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Lime für eine Normalverteilung  
Beobachtete Häufigkeit: 20 14 6 1 1 0 1  
Chi-squared test for given probabilities  
data: l ob  
X-squared = 259.834, df = 6, p-value < 2.2e-16

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Lime für eine Log-Normalverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: l ob  
X-squared = Inf, df = 6, p-value < 2.2e-16

Der  $\chi^2$ -Test mit Set Lime für eine Exponentialverteilung  
Chi-squared test for given probabilities  
data: l ob  
X-squared = 114.5292, df = 6, p-value < 2.2e-16

## D) Keyblock Theorie

Im Folgenden sind die Ergebnisse der mit den von Prof. Liu berechneten DOS Programmen aufgelistet.

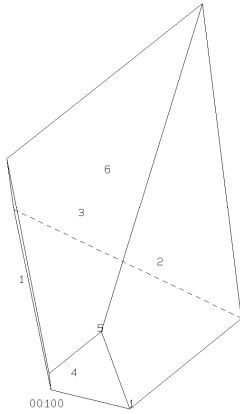
Die Ergebnisse sind folgendermaßen gegliedert:

- Cliff Part 1 and 2
  - Projection Plot
  - Failure Mode
  - unstable Blocks
  
- Cliff Part 3
  - Projection Plot
  - Failure Mode
  - unstable Blocks
  
- Cliff Part 4
  - Projection Plot
  - Failure Mode
  - unstable Blocks
  
- Middle
  - Projection Plot
  - Failure Mode
  - unstable Blocks
  
- Top
  - Projection Plot
  - Failure Mode
  - unstable Blocks

Die Anzahl der instabilen Blöcke wurde aus den Projection Plots ermittelt. Auf der Daten DVD befinden sich sämtliche Grafiken als .png Dateien zwecks größerer Darstellung.

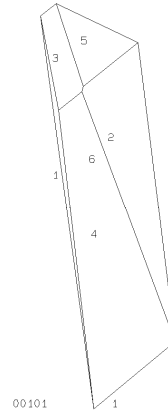


PROJECTIVE\_DIRECTION:  
 0 0 1.0 0.5  
 010.030 0.0 DISTANCE  
 80 0 309.0 0.3  
 78 0 100.0 0.3  
 78 0 89.0 0.3  
 88 0 181.0 0.8  
 70 0 335.0 0.4  
 60 0 189.0 1.0  
 VOLUME= 6.710403



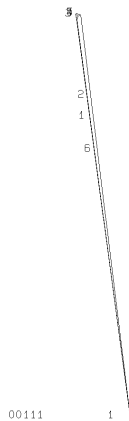
001001

PROJECTIVE\_DIRECTION:  
 0 0 1.0 0.5  
 010.030 0.0 DISTANCE  
 80 0 309.0 0.3  
 78 0 100.0 0.3  
 78 0 89.0 0.3  
 88 0 181.0 0.8  
 70 0 335.0 0.4  
 60 0 189.0 1.0  
 VOLUME= 2.470401



001011

PROJECTIVE\_DIRECTION:  
 0 0 1.0 0.5  
 010.030 0.0 DISTANCE  
 80 0 309.0 0.3  
 78 0 100.0 0.3  
 78 0 89.0 0.3  
 88 0 181.0 0.8  
 70 0 335.0 0.4  
 60 0 189.0 1.0  
 VOLUME= 3.210402



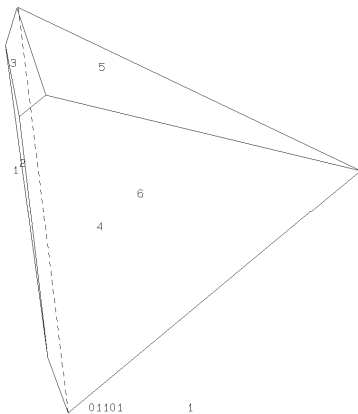
001111

PROJECTIVE\_DIRECTION:  
 0 0 1.0 0.5  
 010.030 0.0 DISTANCE  
 80 0 309.0 0.3  
 78 0 100.0 0.3  
 78 0 89.0 0.3  
 88 0 181.0 0.8  
 70 0 335.0 0.4  
 60 0 189.0 1.0  
 VOLUME= 1.780403



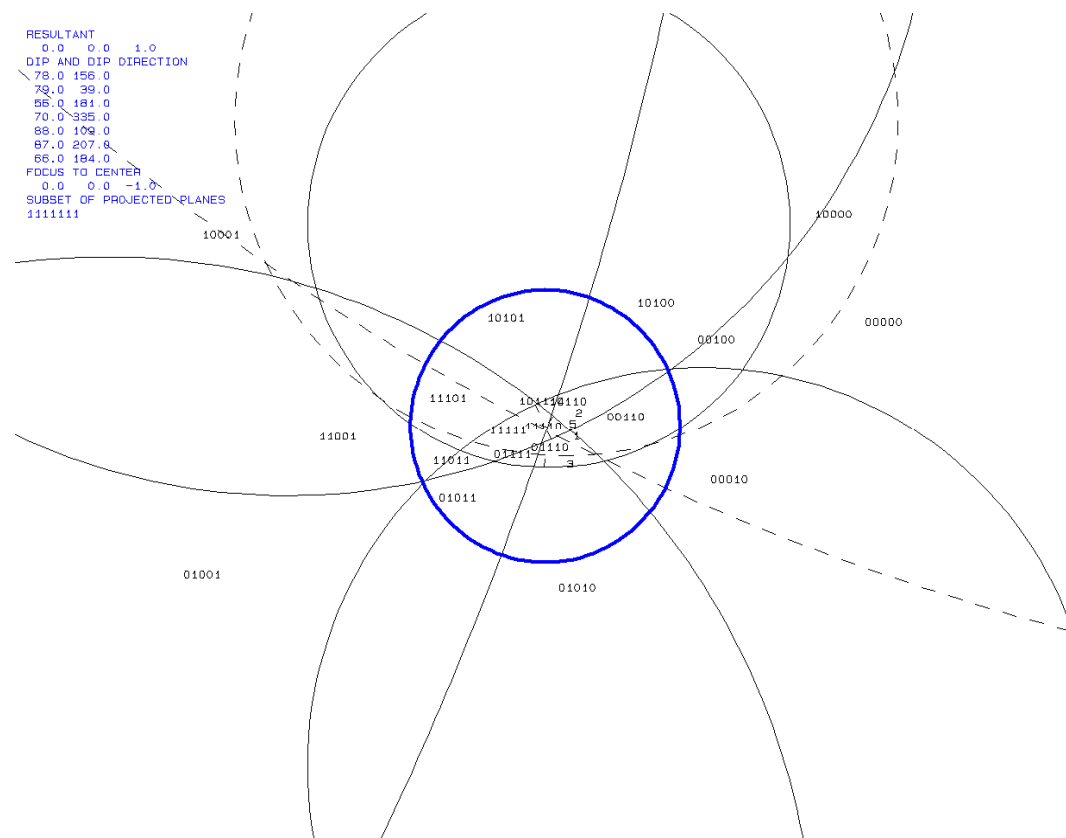
011001

PROJECTIVE\_DIRECTION:  
 0 0 1.0 0.5  
 010.030 0.0 DISTANCE  
 80 0 309.0 0.3  
 78 0 100.0 0.3  
 78 0 89.0 0.3  
 88 0 181.0 0.8  
 70 0 335.0 0.4  
 60 0 189.0 1.0  
 VOLUME= 4.880401

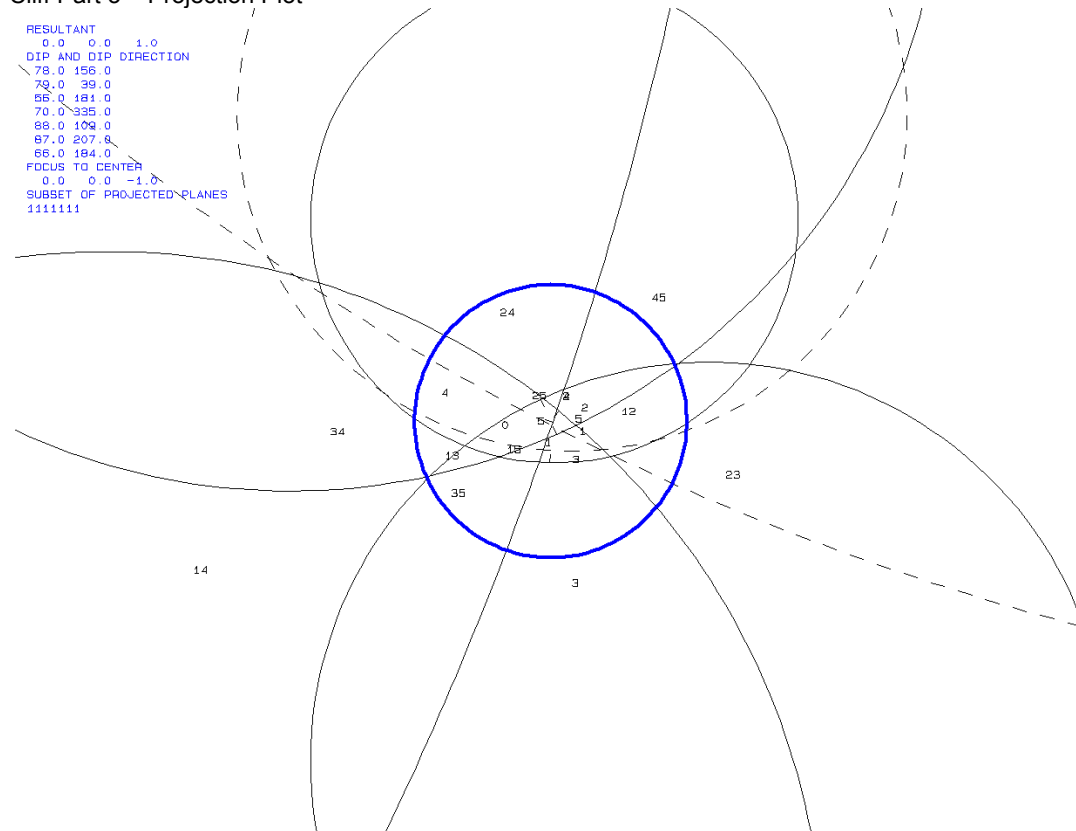


011011

### Keyblock Theorie – Bereich Cliff Part 3

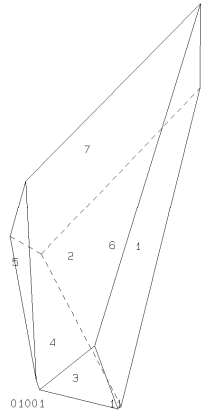


### Cliff Part 3 – Projection Plot



### Cliff Part 3 – Failure Mode

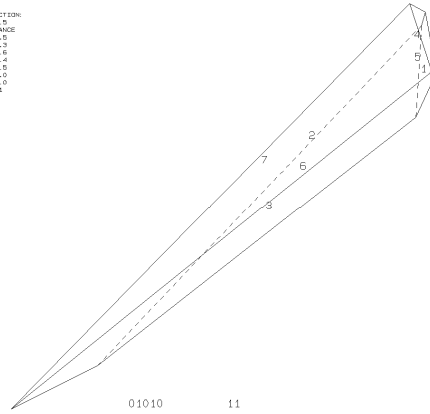
PROJECTIVE\_DIRECTIONS:  
 0 0 1.0 0.5  
 010:010:0:0:DISTANCE  
 70 0 195.0 0.5  
 75 0 39.0 0.5  
 80 0 181.0 0.6  
 70 0 336.0 0.4  
 80 0 209.0 0.5  
 87 0 307.0 1.0  
 86 0 164.0 1.0  
 VOLUME = 5.33E+03



01001

**0100111**

PROJECTIVE\_DIRECTIONS:  
 0 0 1.0 0.5  
 010:010:0:0:DISTANCE  
 70 0 195.0 0.5  
 75 0 39.0 0.5  
 80 0 181.0 0.6  
 70 0 336.0 0.4  
 80 0 209.0 0.5  
 87 0 307.0 1.0  
 86 0 164.0 1.0  
 VOLUME = 2.52E+01

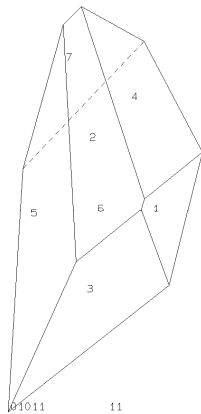


01010

11

**0101011**

PROJECTIVE\_DIRECTIONS:  
 0 0 1.0 0.5  
 010:010:0:0:DISTANCE  
 70 0 195.0 0.5  
 75 0 39.0 0.5  
 80 0 181.0 0.6  
 70 0 336.0 0.4  
 80 0 209.0 0.5  
 87 0 307.0 1.0  
 86 0 164.0 1.0  
 VOLUME = 4.81E+03

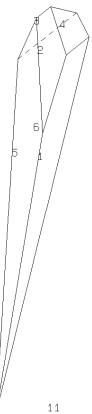


01011

11

**0101111**

PROJECTIVE\_DIRECTIONS:  
 0 0 1.0 0.5  
 010:010:0:0:DISTANCE  
 70 0 195.0 0.5  
 75 0 39.0 0.5  
 80 0 181.0 0.6  
 70 0 336.0 0.4  
 80 0 209.0 0.5  
 87 0 307.0 1.0  
 86 0 164.0 1.0  
 VOLUME = 1.92E+01

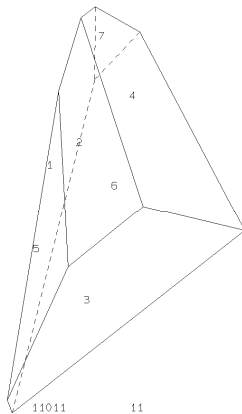


01111

11

**0111111**

PROJECTIVE\_DIRECTIONS:  
 0 0 1.0 0.5  
 010:010:0:0:DISTANCE  
 70 0 195.0 0.5  
 75 0 39.0 0.5  
 80 0 181.0 0.6  
 70 0 336.0 0.4  
 80 0 209.0 0.5  
 87 0 307.0 1.0  
 86 0 164.0 1.0  
 VOLUME = 4.42E+03



11011

11

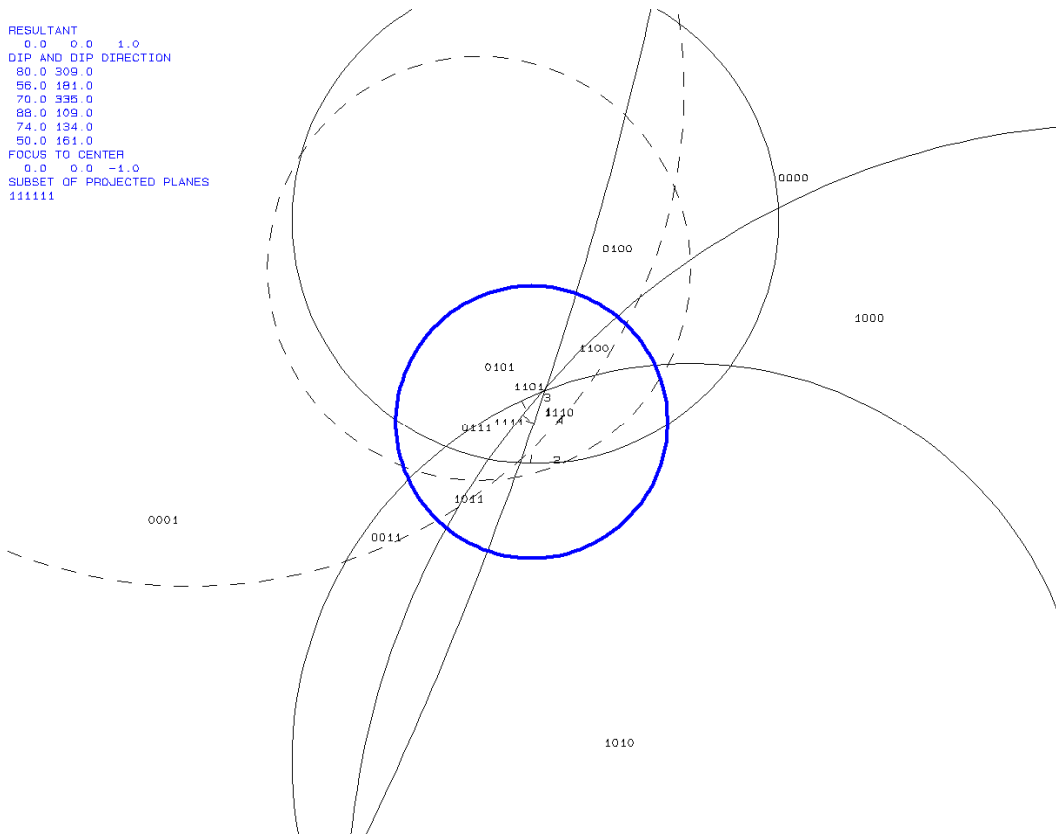
**1101111**



## Keyblock Theorie – Bereich Cliff Part 4

```

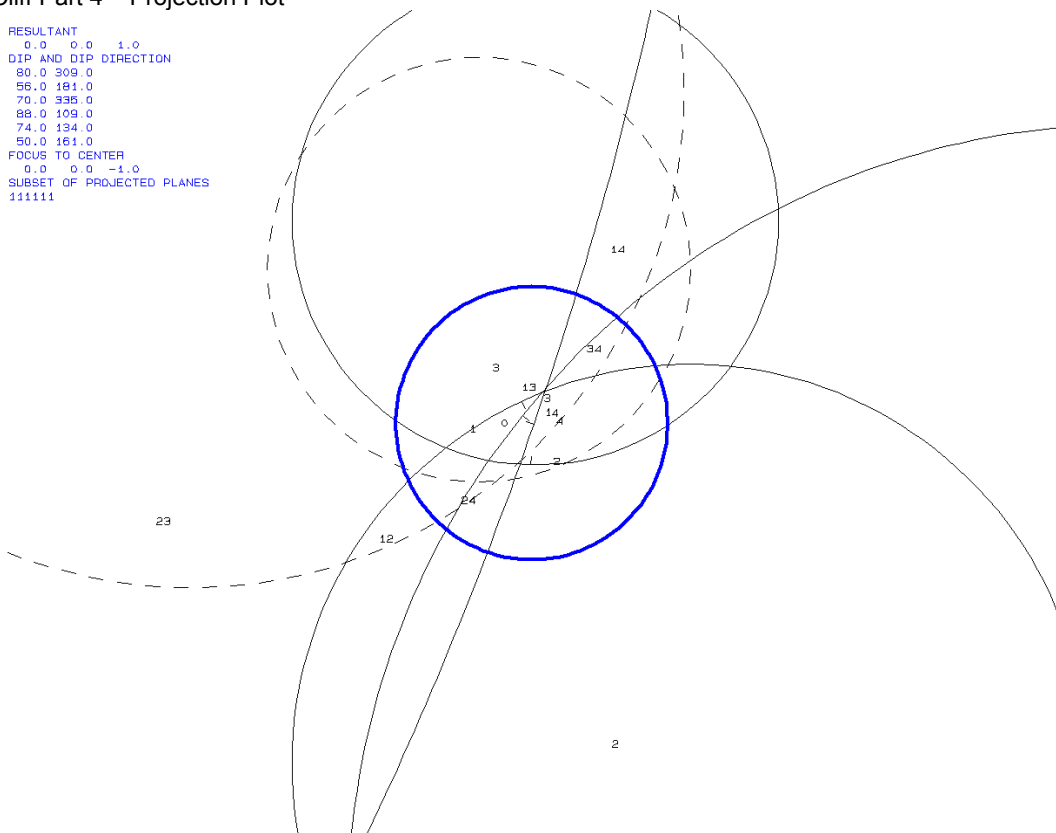
RESULTANT
0.0 0.0 1.0
DIP AND DIP DIRECTION
80.0 309.0
56.0 181.0
70.0 335.0
88.0 109.0
74.0 134.0
50.0 161.0
FOCUS TO CENTER
0.0 0.0 -1.0
SUBSET OF PROJECTED PLANES
111111
    
```



## Cliff Part 4 – Projection Plot

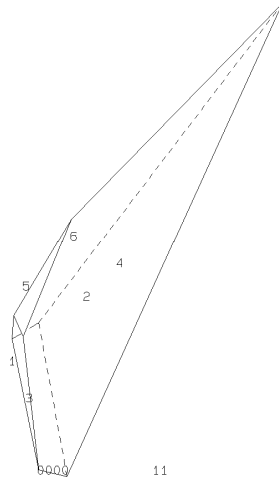
```

RESULTANT
0.0 0.0 1.0
DIP AND DIP DIRECTION
80.0 309.0
56.0 181.0
70.0 335.0
88.0 109.0
74.0 134.0
50.0 161.0
FOCUS TO CENTER
0.0 0.0 -1.0
SUBSET OF PROJECTED PLANES
111111
    
```



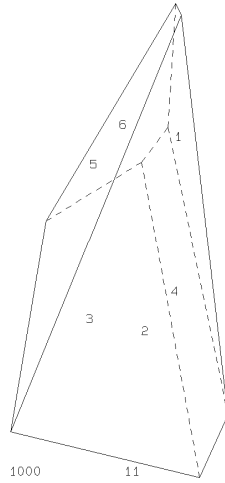
## Cliff Part 4 – Failure Mode

PROJECTIVE DIRECTION:  
 1 0 1.0 0.5  
 DIR, DIP 0., DISTANCE  
 80.0 309.0 0.3  
 56.0 181.0 0.6  
 70.0 335.0 0.4  
 98.0 199.0 0.5  
 74.0 134.0 1.0  
 50.0 181.0 1.0  
 VOLUME= 1.390+01



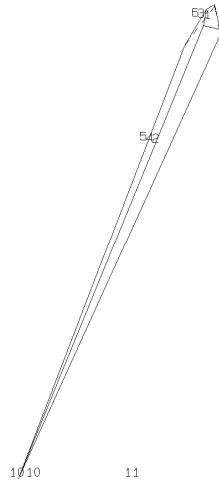
000011

PROJECTIVE DIRECTION:  
 1 0 1.0 0.5  
 DIR, DIP 0., DISTANCE  
 80.0 309.0 0.3  
 56.0 181.0 0.6  
 70.0 335.0 0.4  
 98.0 199.0 0.5  
 74.0 134.0 1.0  
 50.0 181.0 1.0  
 VOLUME= 6.210+00



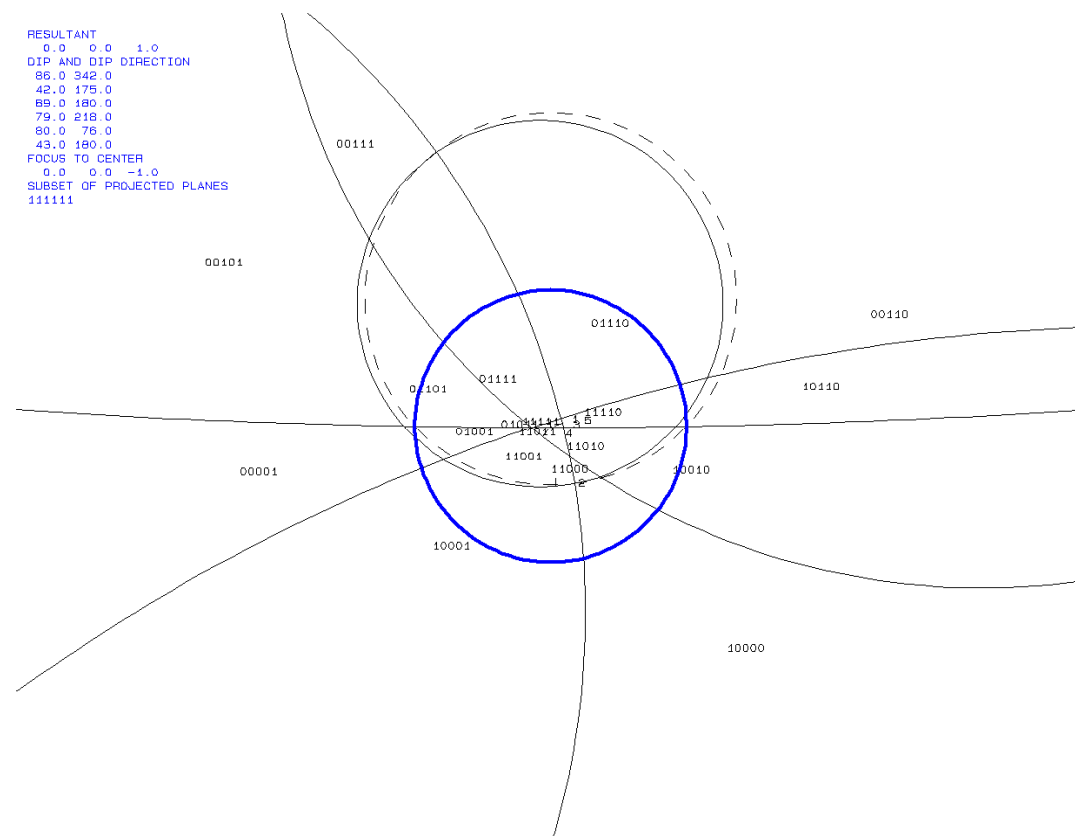
100011

PROJECTIVE DIRECTION:  
 1 0 1.0 0.5  
 DIR, DIP 0., DISTANCE  
 80.0 309.0 0.3  
 56.0 181.0 0.6  
 70.0 335.0 0.4  
 98.0 199.0 0.5  
 74.0 134.0 1.0  
 50.0 181.0 1.0  
 VOLUME= 7.600+01

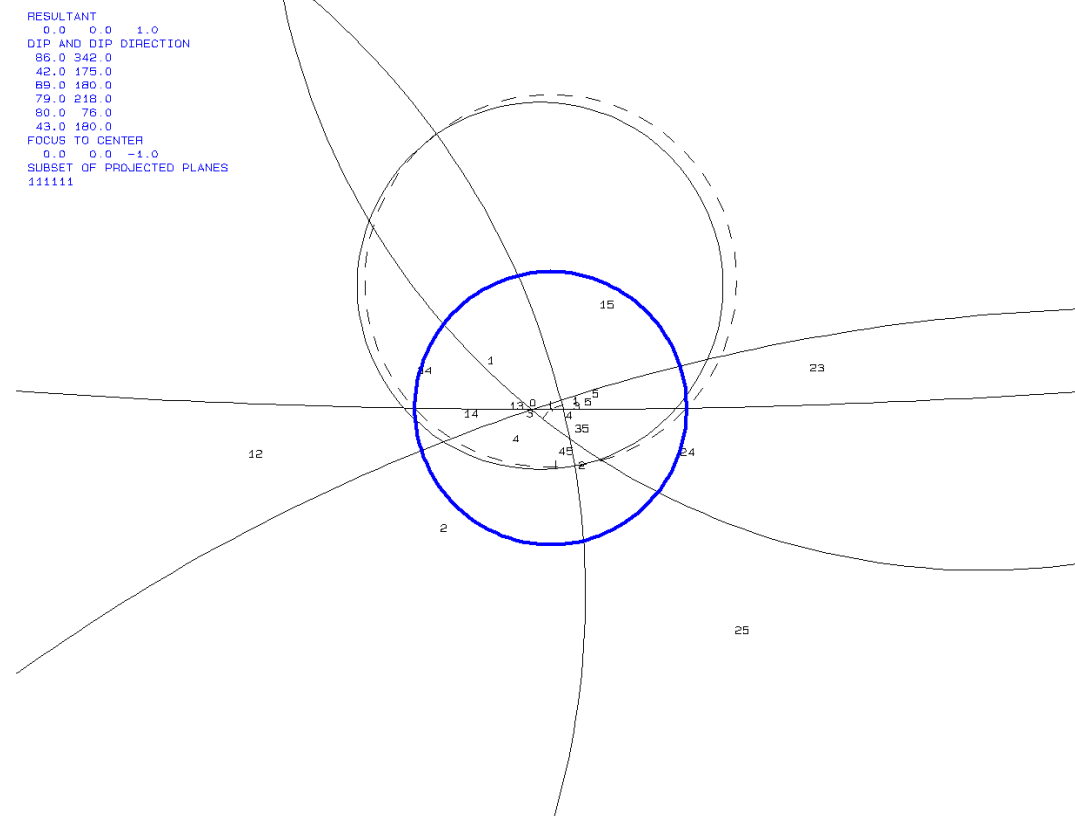


101011

## Keyblock Theorie – Bereich Middle

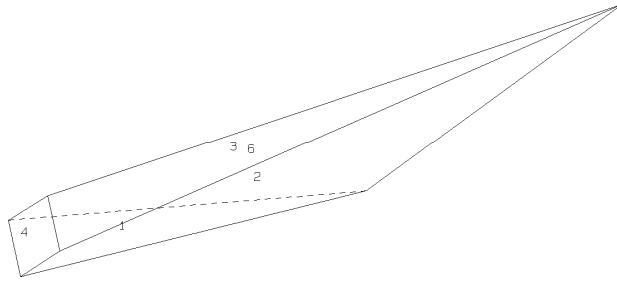


## Middle – Projection Plot



## Middle – Failure Mode

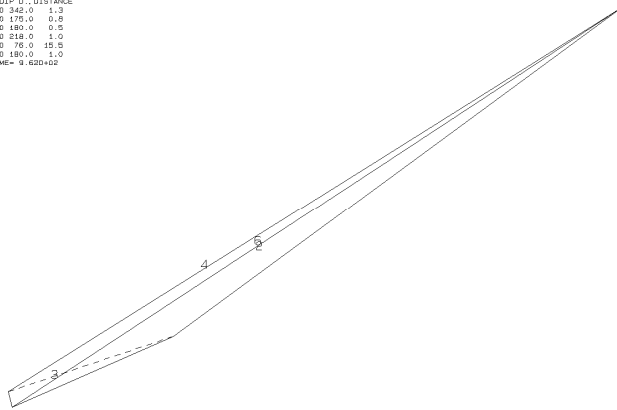
PROJECTIVE DIRECTION:  
 1.0 1.0 0.5  
 DIP, DIP 0., DISTANCE  
 86.0 342.0 1.3  
 42.0 175.0 0.8  
 88.0 180.0 0.5  
 78.0 218.0 1.0  
 80.0 75.0 15.5  
 43.0 180.0 1.0  
 VOLUME= 1.890+02



00001 1

000011

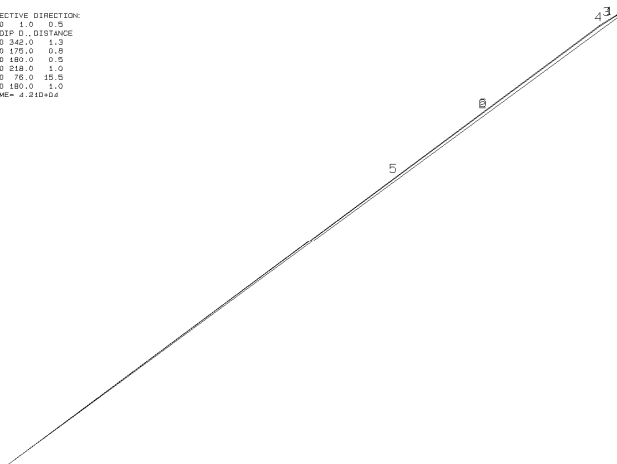
PROJECTIVE DIRECTION:  
 1.0 1.0 0.5  
 DIP, DIP 0., DISTANCE  
 86.0 342.0 1.3  
 42.0 175.0 0.8  
 88.0 180.0 0.5  
 78.0 218.0 1.0  
 80.0 75.0 15.5  
 43.0 180.0 1.0  
 VOLUME= 0.620+02



00101 1

001011

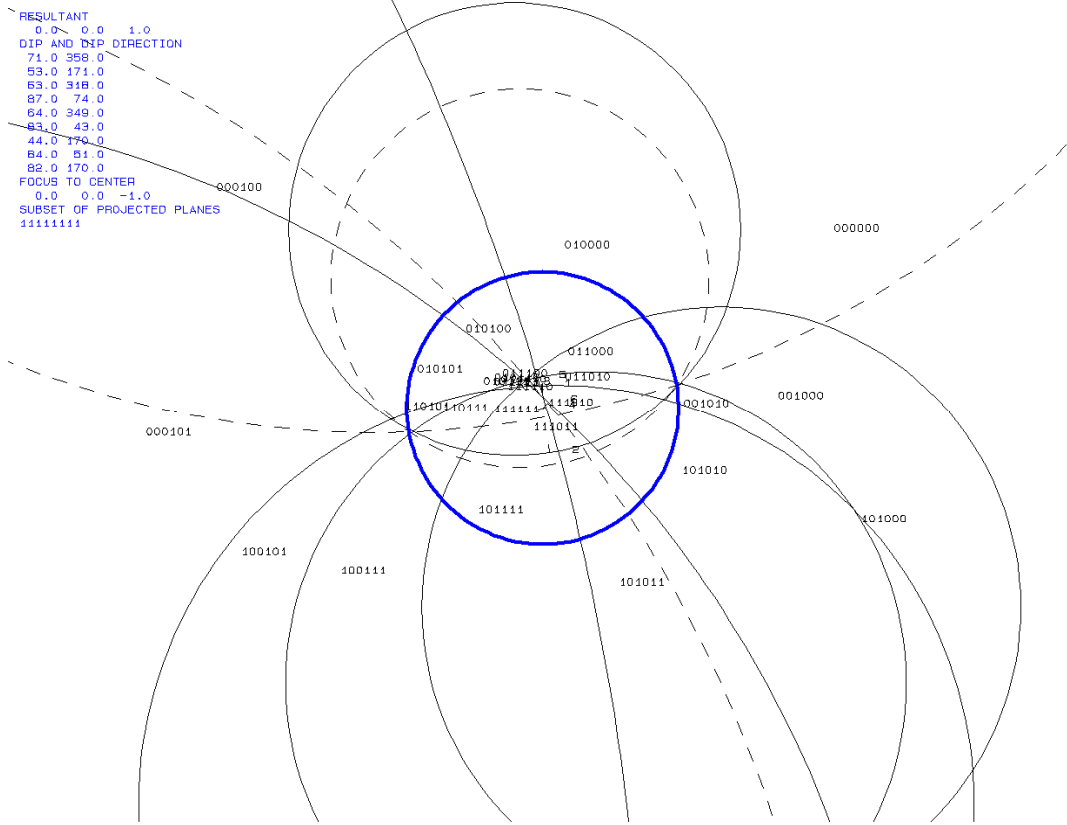
PROJECTIVE DIRECTION:  
 1.0 1.0 0.5  
 DIP, DIP 0., DISTANCE  
 86.0 342.0 1.3  
 42.0 175.0 0.8  
 88.0 180.0 0.5  
 78.0 218.0 1.0  
 80.0 75.0 15.5  
 43.0 180.0 1.0  
 VOLUME= 4.210+04



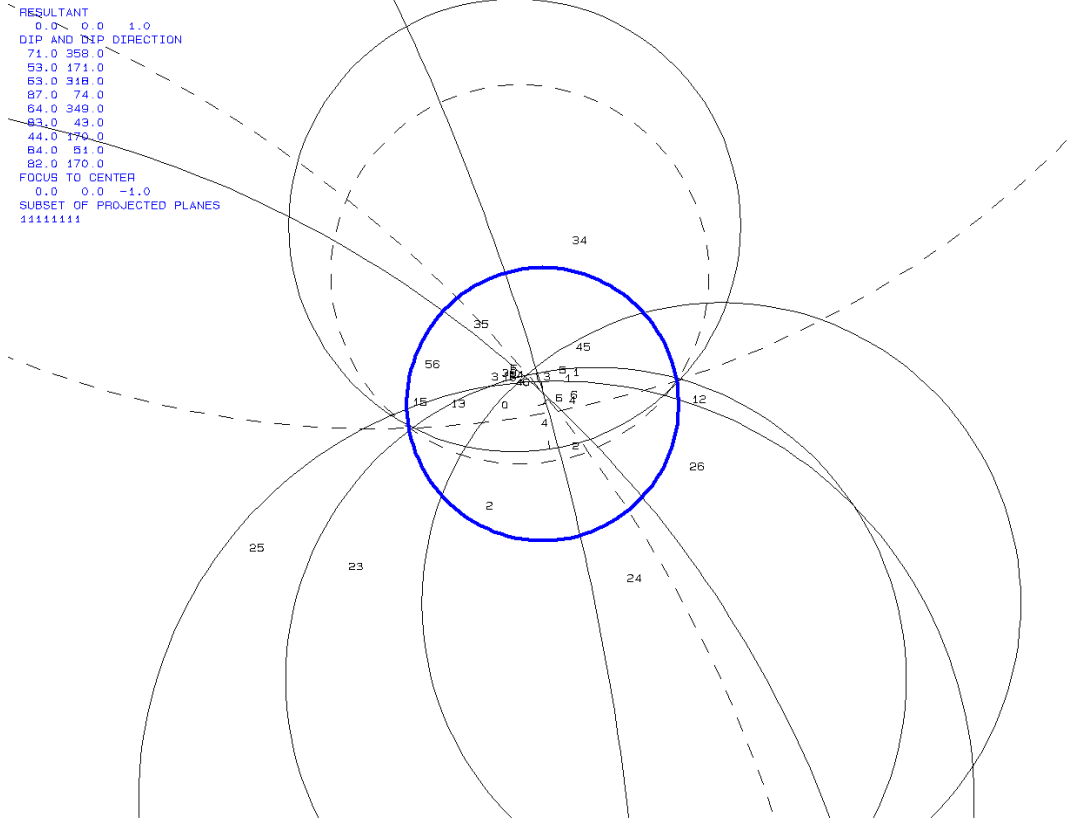
10001 1

100011

Keyblock Theorie – Bereich Top

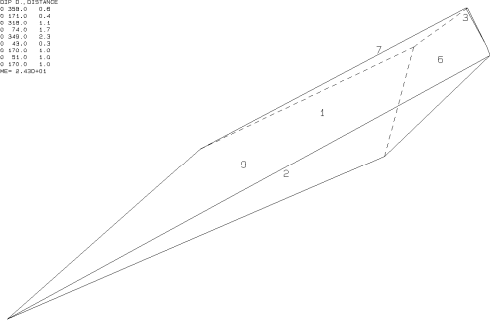


Top – Projection Plot



Top – Failure Mode

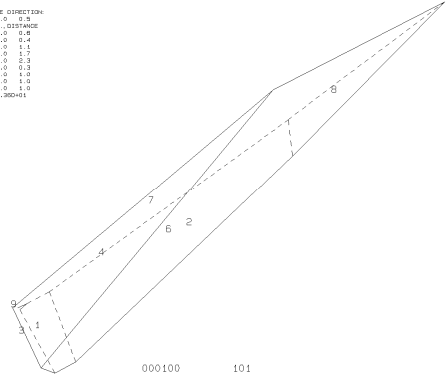
PROJECTIVE DIRECTION:  
 1 0 1.0 0.0  
 D10 D1P 0.0 DISTANCE  
 71 0 380.0 0.0  
 83 0 171.0 0.4  
 85 0 349.0 1.1  
 87 0 74.0 1.7  
 89 0 349.0 2.3  
 91 0 43.0 2.9  
 93 0 170.0 1.0  
 95 0 91.0 1.0  
 97 0 170.0 1.0  
 VOLUME= 2.42E+01



101000 101

101000101

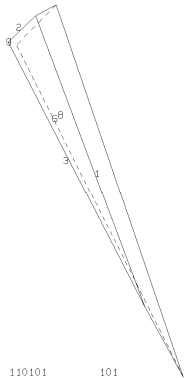
PROJECTIVE DIRECTION:  
 1 0 1.0 0.0  
 D10 D1P 0.0 DISTANCE  
 71 0 380.0 0.0  
 83 0 171.0 0.4  
 85 0 349.0 1.1  
 87 0 74.0 1.7  
 89 0 349.0 2.3  
 91 0 43.0 2.9  
 93 0 170.0 1.0  
 95 0 91.0 1.0  
 97 0 170.0 1.0  
 VOLUME= 2.32E+01



000100 101

000100101

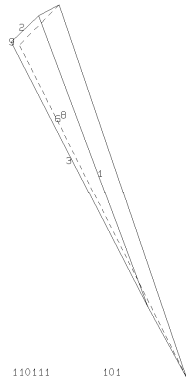
PROJECTIVE DIRECTION:  
 1 0 1.0 0.0  
 D10 D1P 0.0 DISTANCE  
 71 0 380.0 0.0  
 83 0 171.0 0.4  
 85 0 349.0 1.1  
 87 0 74.0 1.7  
 89 0 349.0 2.3  
 91 0 43.0 2.9  
 93 0 170.0 1.0  
 95 0 91.0 1.0  
 97 0 170.0 1.0  
 VOLUME= 2.10E+01



110101 101

110101101

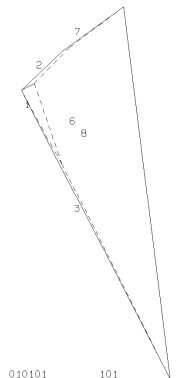
PROJECTIVE DIRECTION:  
 1 0 1.0 0.0  
 D10 D1P 0.0 DISTANCE  
 71 0 380.0 0.0  
 83 0 171.0 0.4  
 85 0 349.0 1.1  
 87 0 74.0 1.7  
 89 0 349.0 2.3  
 91 0 43.0 2.9  
 93 0 170.0 1.0  
 95 0 91.0 1.0  
 97 0 170.0 1.0  
 VOLUME= 2.10E+01



110111 101

110111101

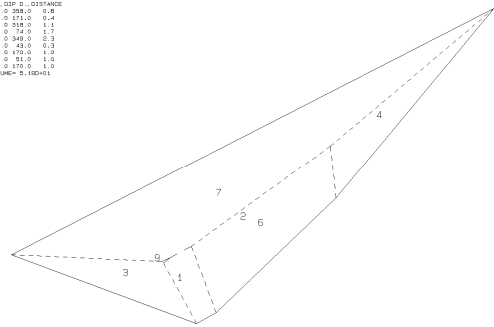
PROJECTIVE DIRECTION:  
 1 0 1.0 0.0  
 D10 D1P 0.0 DISTANCE  
 71 0 380.0 0.0  
 83 0 171.0 0.4  
 85 0 349.0 1.1  
 87 0 74.0 1.7  
 89 0 349.0 2.3  
 91 0 43.0 2.9  
 93 0 170.0 1.0  
 95 0 91.0 1.0  
 97 0 170.0 1.0  
 VOLUME= 2.10E+01



010101 101

010101101

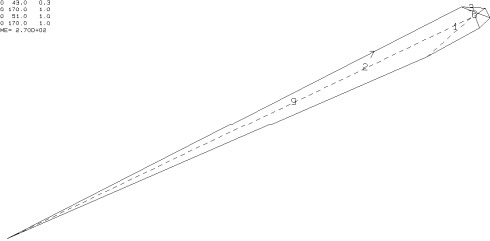
PROJECTIVE DIRECTION:  
 1 0 1.0 0.0  
 D10 D1P 0.0 DISTANCE  
 71 0 380.0 0.0  
 83 0 171.0 0.4  
 85 0 349.0 1.1  
 87 0 74.0 1.7  
 89 0 349.0 2.3  
 91 0 43.0 2.9  
 93 0 170.0 1.0  
 95 0 91.0 1.0  
 97 0 170.0 1.0  
 VOLUME= 2.10E+01



000000 101

000000101

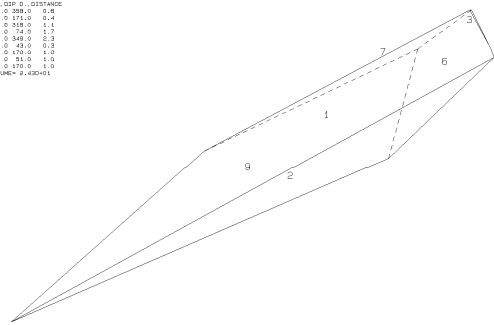
PROJECTIVE DIRECTION:  
 1 0 1.0 0.0  
 D10 D1P 0.0 DISTANCE  
 71 0 380.0 0.0  
 83 0 171.0 0.4  
 85 0 349.0 1.1  
 87 0 74.0 1.7  
 89 0 349.0 2.3  
 91 0 43.0 2.9  
 93 0 170.0 1.0  
 95 0 91.0 1.0  
 97 0 170.0 1.0  
 VOLUME= 2.10E+01



001000 101

001000101

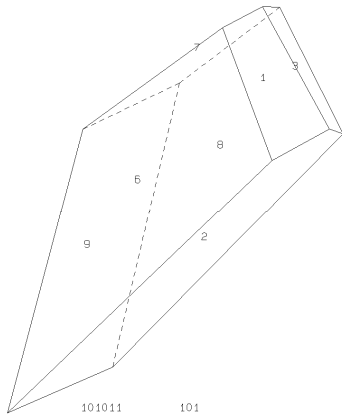
PROJECTIVE DIRECTION:  
 1 0 1.0 0.0  
 D10 D1P 0.0 DISTANCE  
 71 0 380.0 0.0  
 83 0 171.0 0.4  
 85 0 349.0 1.1  
 87 0 74.0 1.7  
 89 0 349.0 2.3  
 91 0 43.0 2.9  
 93 0 170.0 1.0  
 95 0 91.0 1.0  
 97 0 170.0 1.0  
 VOLUME= 2.42E+01



101010 101

101010101

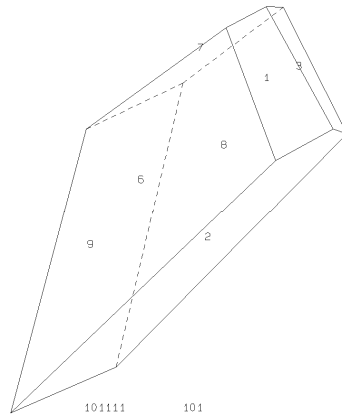
PROJECTIVE DIRECTION:  
 1 0 1 0 10.5  
 010 210 0 011111111  
 71 0 259 0 0.6  
 63 0 171 0 0.4  
 63 0 318 0 1.1  
 67 0 74 0 1.7  
 64 0 349 0 2.3  
 65 0 48 0 0.2  
 44 0 170 0 1.0  
 64 0 31 0 1.0  
 52 0 170 0 1.0  
 VOLUME: 6.370100



101011 101

101011101

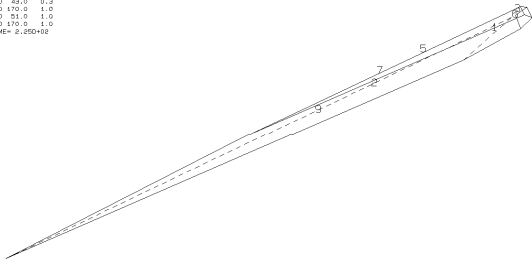
PROJECTIVE DIRECTION:  
 1 0 1 0 10.5  
 010 210 0 011111111  
 71 0 259 0 0.6  
 63 0 171 0 0.4  
 63 0 318 0 1.1  
 67 0 74 0 1.7  
 64 0 349 0 2.3  
 65 0 48 0 0.2  
 44 0 170 0 1.0  
 64 0 31 0 1.0  
 52 0 170 0 1.0  
 VOLUME: 6.370100



101111 101

101111101

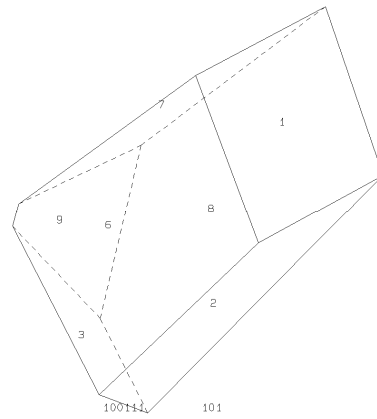
PROJECTIVE DIRECTION:  
 1 0 1 0 10.5  
 010 210 0 011111111  
 71 0 259 0 0.6  
 63 0 171 0 0.4  
 63 0 318 0 1.1  
 67 0 74 0 1.7  
 64 0 349 0 2.3  
 65 0 48 0 0.2  
 44 0 170 0 1.0  
 64 0 31 0 1.0  
 52 0 170 0 1.0  
 VOLUME: 4.320100



001010 101

001010101

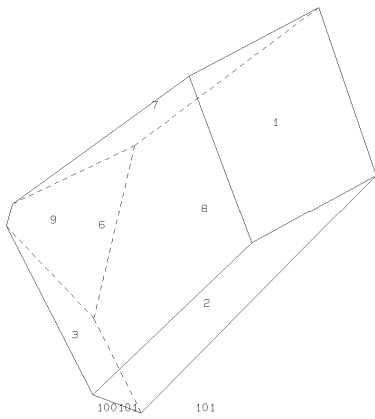
PROJECTIVE DIRECTION:  
 1 0 1 0 10.5  
 010 210 0 011111111  
 71 0 259 0 0.6  
 63 0 171 0 0.4  
 63 0 318 0 1.1  
 67 0 74 0 1.7  
 64 0 349 0 2.3  
 65 0 48 0 0.2  
 44 0 170 0 1.0  
 64 0 31 0 1.0  
 52 0 170 0 1.0  
 VOLUME: 4.320100



100111 101

100111101

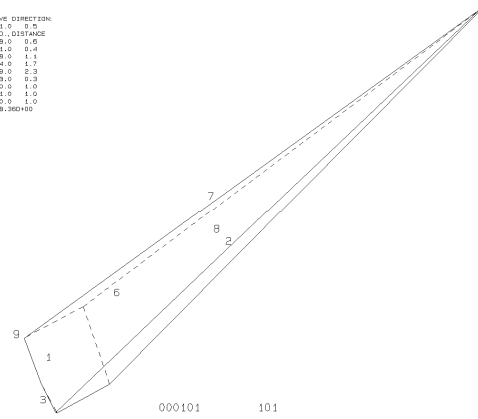
PROJECTIVE DIRECTION:  
 1 0 1 0 10.5  
 010 210 0 011111111  
 71 0 259 0 0.6  
 63 0 171 0 0.4  
 63 0 318 0 1.1  
 67 0 74 0 1.7  
 64 0 349 0 2.3  
 65 0 48 0 0.2  
 44 0 170 0 1.0  
 64 0 31 0 1.0  
 52 0 170 0 1.0  
 VOLUME: 4.320100



100101 101

100101101

PROJECTIVE DIRECTION:  
 1 0 1 0 10.5  
 010 210 0 011111111  
 71 0 259 0 0.6  
 63 0 171 0 0.4  
 63 0 318 0 1.1  
 67 0 74 0 1.7  
 64 0 349 0 2.3  
 65 0 48 0 0.2  
 44 0 170 0 1.0  
 64 0 31 0 1.0  
 52 0 170 0 1.0  
 VOLUME: 8.320100



000101 101

000101101

## E) FracMan Ergebnisse

Auf den folgenden Seiten befinden sich die Screenshots der einzelnen FracMan Modellierungen. Es sind die stabilen (grün) und instabilen Blöcke (rot) dargestellt, sowie die Box, in der die Modellierung durchgeführt wurde. Die Blickrichtung ist stets von Süd nach Nord.

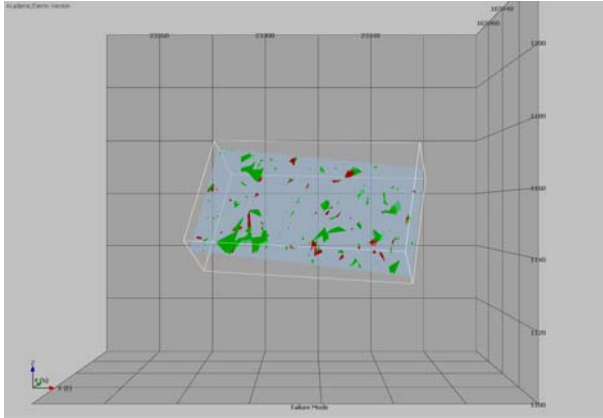
Die Beschriftung der Ergebnisse befindet sich unter den Abbildungen. Top, Middle, Cliff geben den Bereich an, Face beschreibt, welche freie Fläche verwendet wurde. Danach folgt die Benennung der Eingangsparameter, die in Tabelle A aufgelistet sind.

Attempt	density [kg/m <sup>3</sup> ]	friction angle [°]	seismic acceleration [g]	water pressure [MPa]
V1	2700	26,5	0	0
V2	2700	26,5	0,0765	0
V3	2700	26,5	0,1019	0
V4	2700	26,5	0	0,00421
FA45_0SA	2700	45	0	0
FA45_75SA	2700	45	0,0765	0
FA45_100SA	2700	45	0,1019	0
FA45_wWP	2700	45	0	0,00421

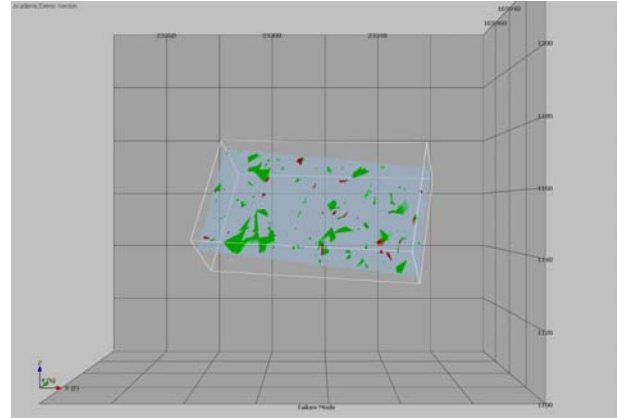
**Tabelle A:** Eingangsparameter für die FracMan Modellierungen

Um Ressourcen (Papier) zu schonen sind die Bilder nur klein dargestellt. Die großformatigen Ergebnisse befinden sich als .png Dateien auf der Daten DVD. Dort befinden sich des Weiteren die Textfiles der „Rock Wedge Statistics“ und der „Composite Summary Reports“.

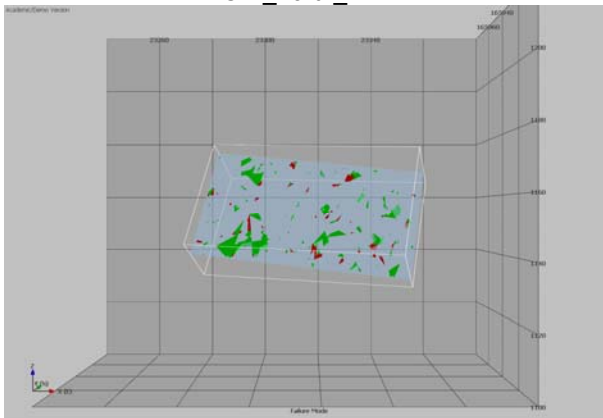




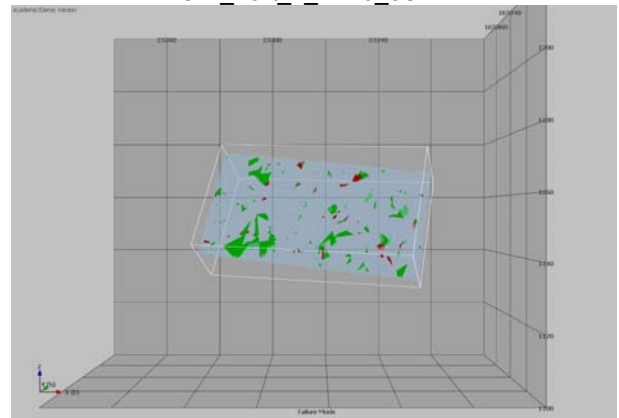
Cliff\_Part1\_V1



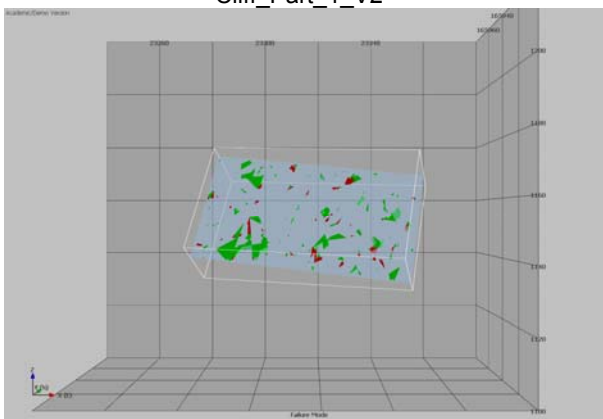
Cliff\_Part1\_FA45\_0SA



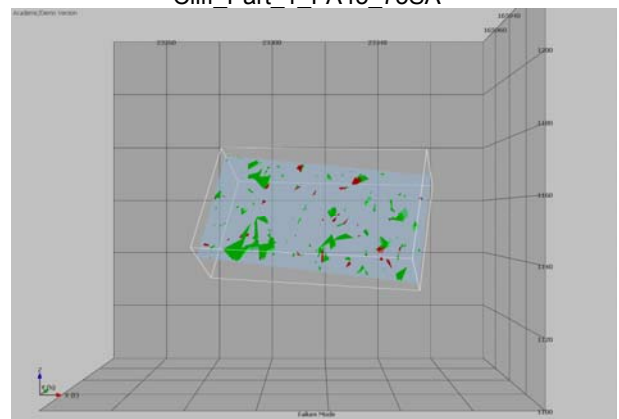
Cliff\_Part1\_V2



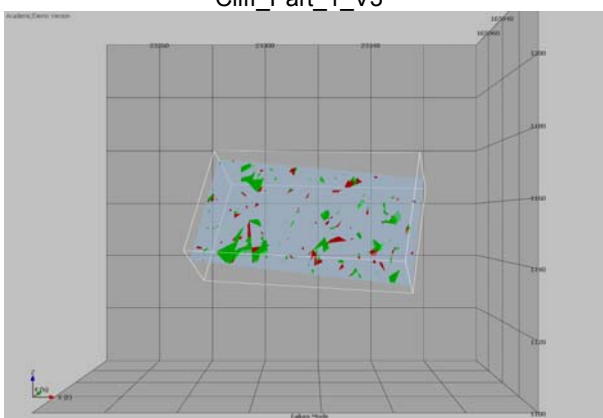
Cliff\_Part1\_FA45\_75SA



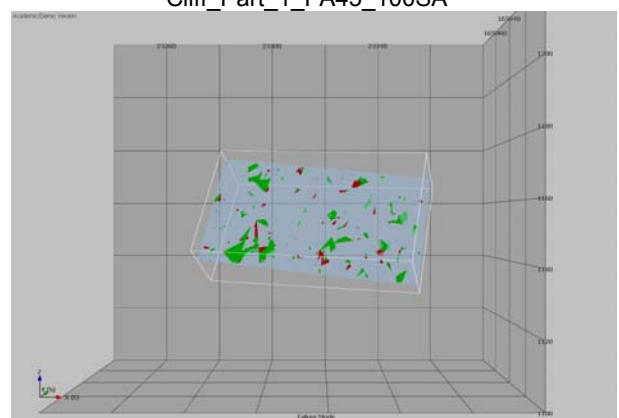
Cliff\_Part1\_V3



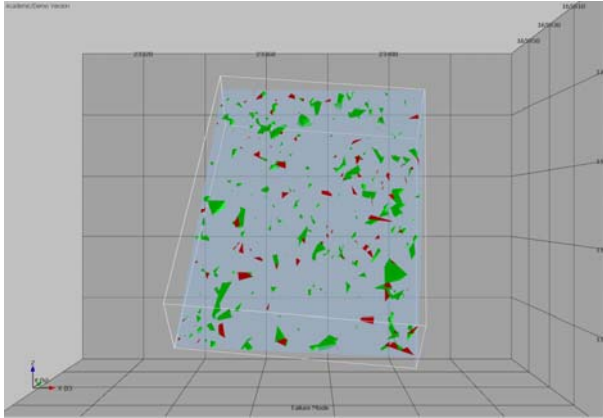
Cliff\_Part1\_FA45\_100SA



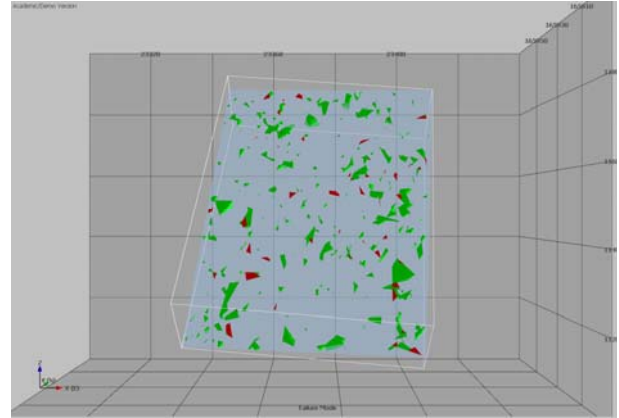
Cliff\_Part1\_V4



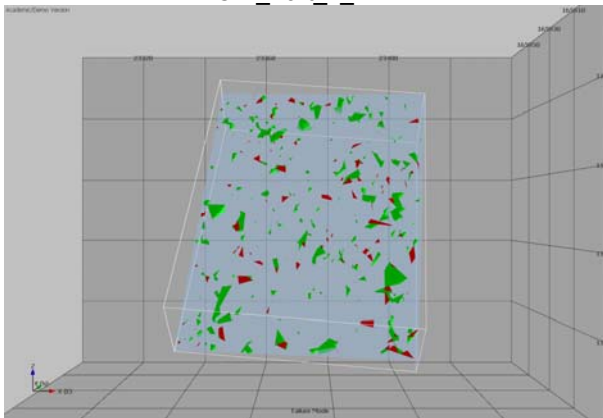
Cliff\_Part1\_FA45\_wWP



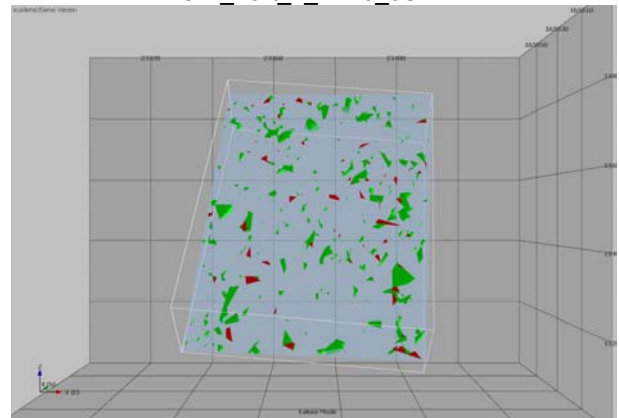
Cliff\_Part\_2\_V1



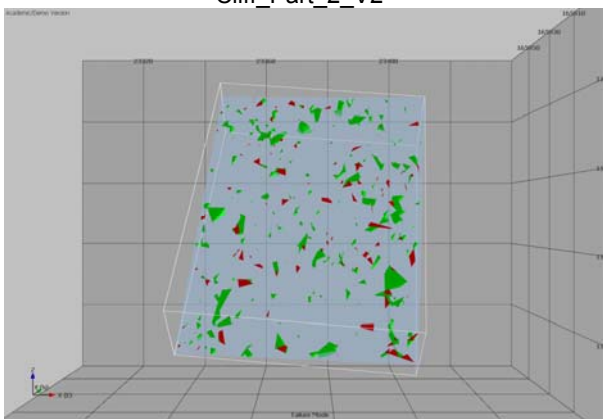
Cliff\_Part\_2\_FA45\_0SA



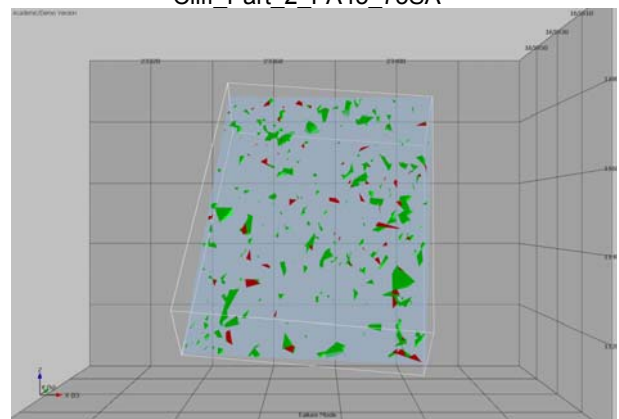
Cliff\_Part\_2\_V2



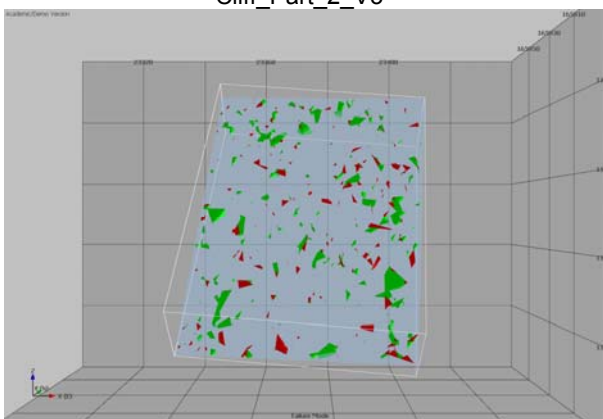
Cliff\_Part\_2\_FA45\_75SA



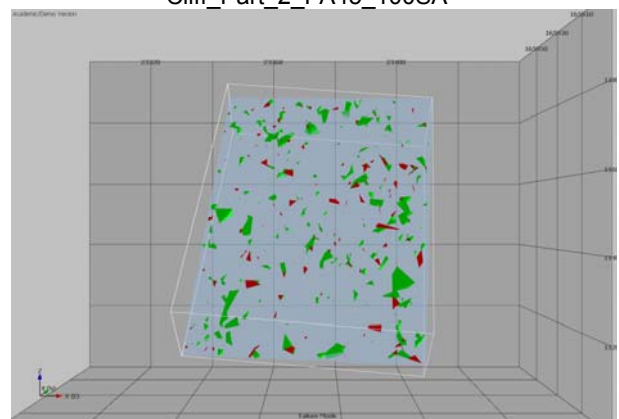
Cliff\_Part\_2\_V3



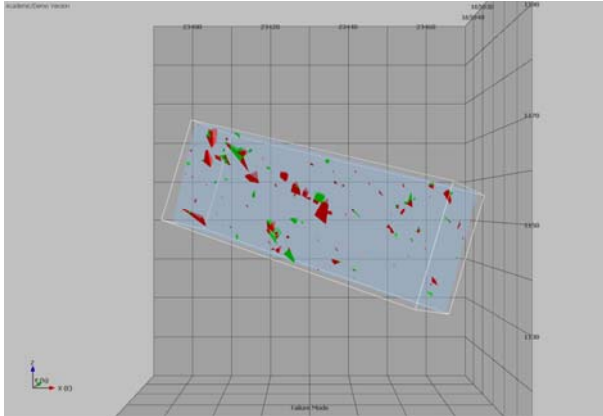
Cliff\_Part\_2\_FA45\_100SA



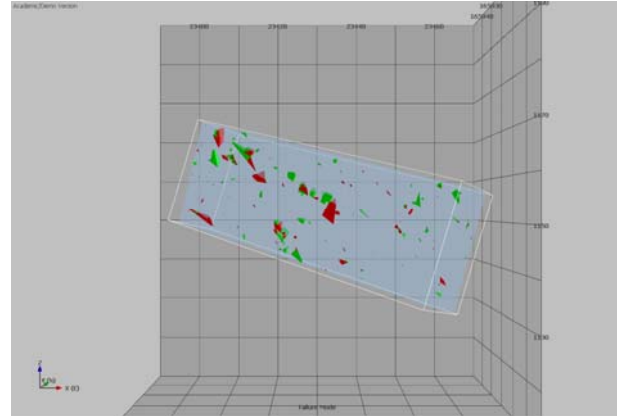
Cliff\_Part\_2\_V4



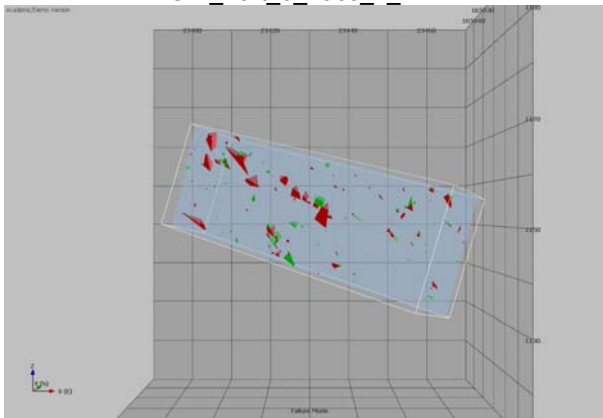
Cliff\_Part\_2\_FA45\_wWP



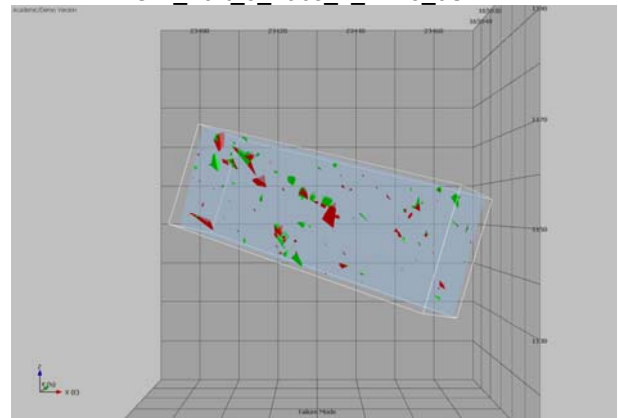
Cliff\_Part\_3 Face\_1 V1



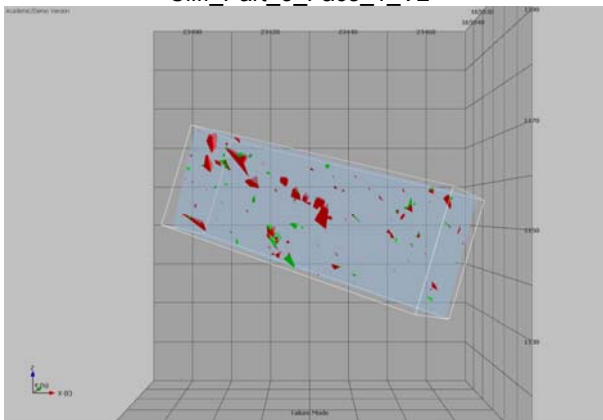
Cliff\_Part\_3 Face\_1 FA45\_0SA



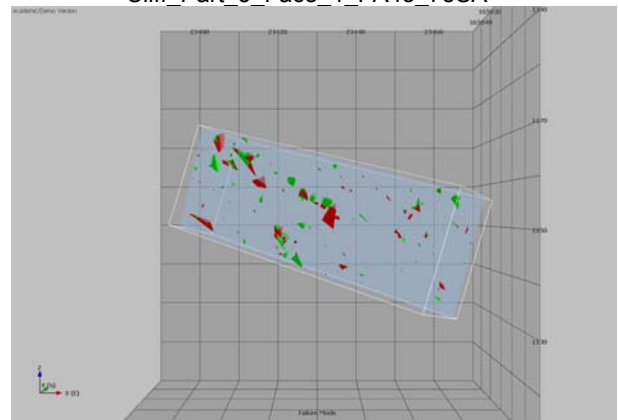
Cliff\_Part\_3 Face\_1 V2



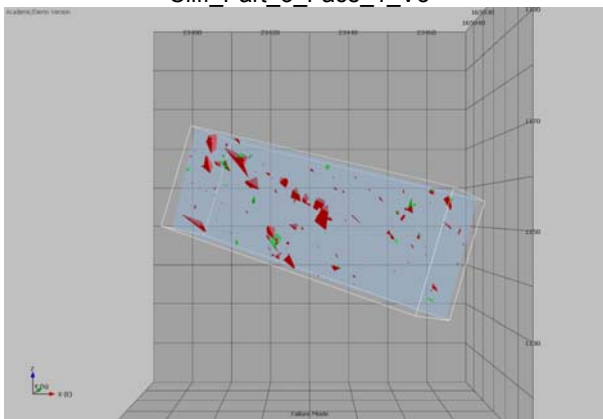
Cliff\_Part\_3 Face\_1 FA45\_75SA



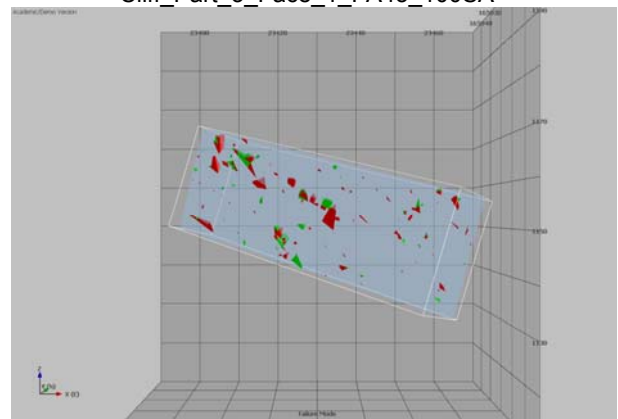
Cliff\_Part\_3 Face\_1 V3



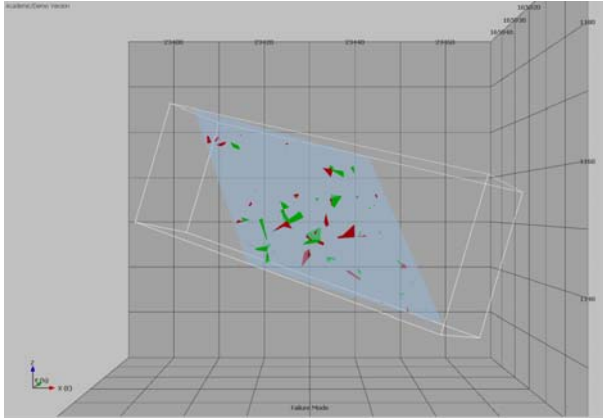
Cliff\_Part\_3 Face\_1 FA45\_100SA



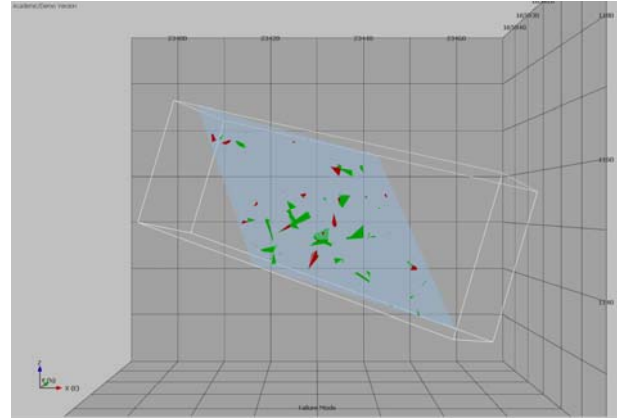
Cliff\_Part\_3 Face\_1 V4



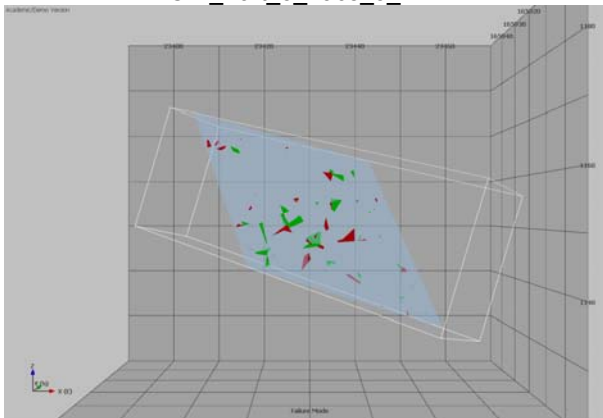
Cliff\_Part\_3 Face\_1 FA45\_wWP



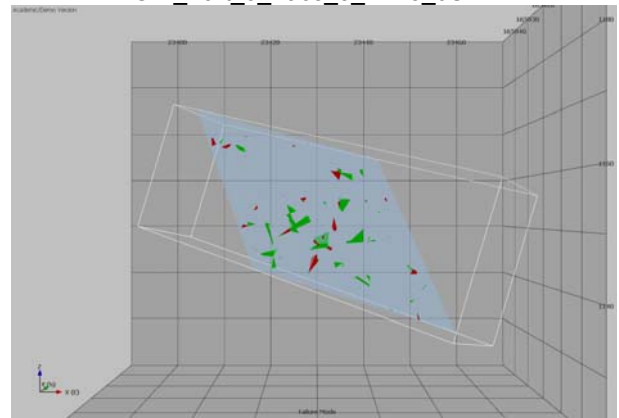
Cliff\_Part\_3 Face\_3 V1



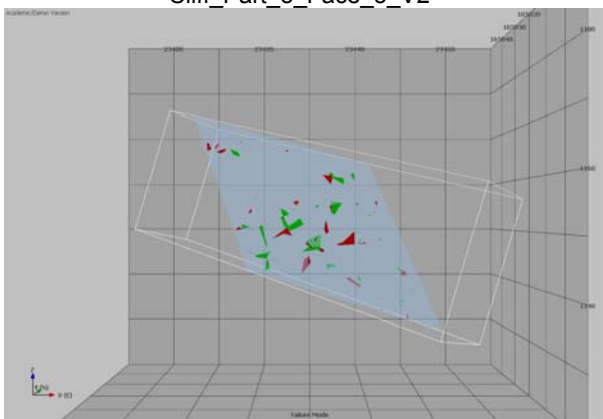
Cliff\_Part\_3 Face\_3 FA45\_0SA



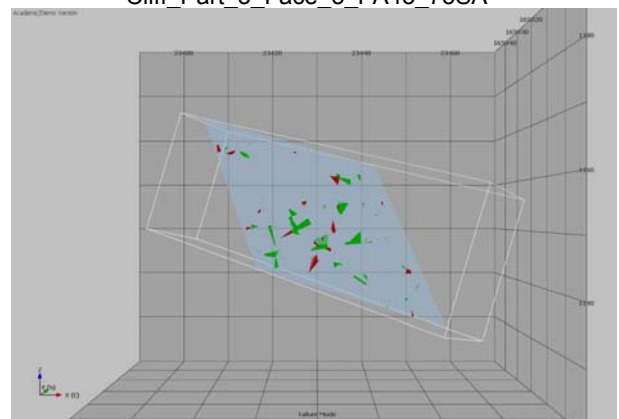
Cliff\_Part\_3 Face\_3 V2



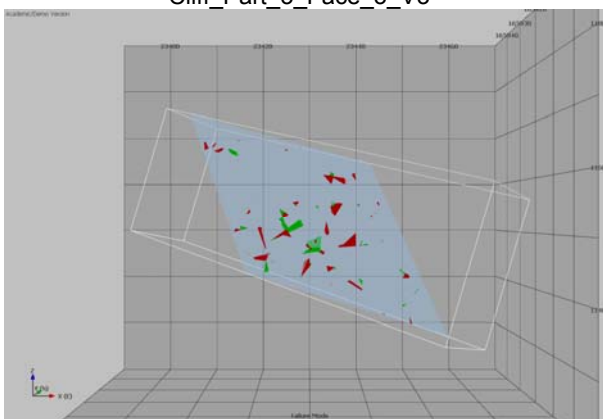
Cliff\_Part\_3 Face\_3 FA45\_75SA



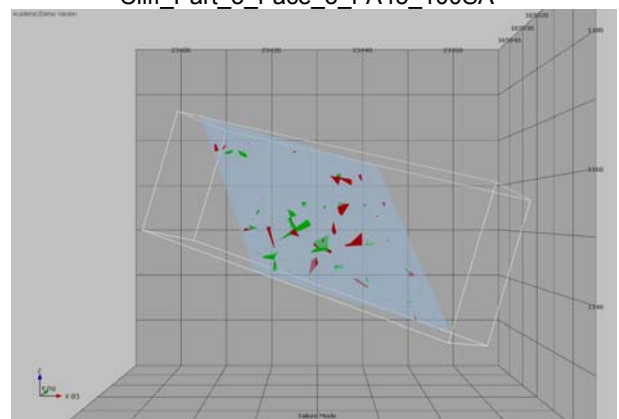
Cliff\_Part\_3 Face\_3 V3



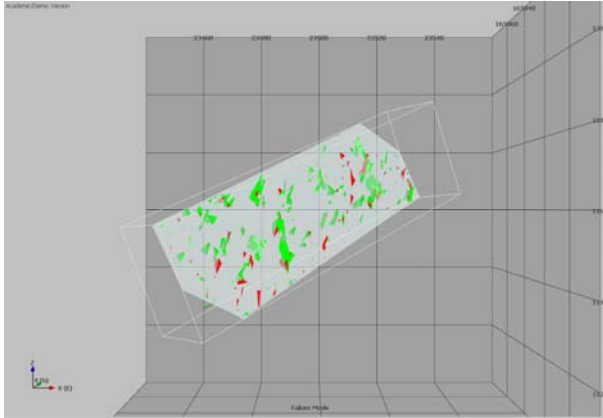
Cliff\_Part\_3 Face\_3 FA45\_100SA



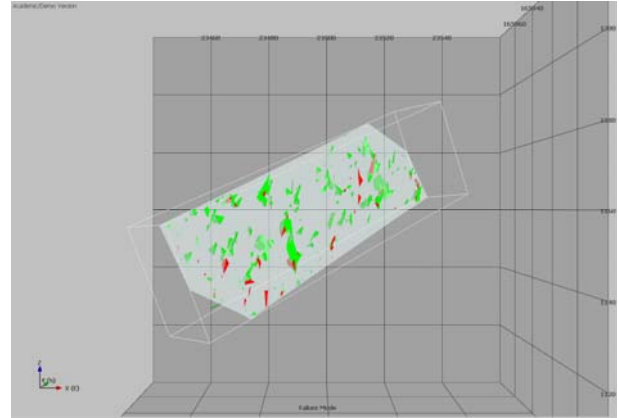
Cliff\_Part\_3 Face\_3 V4



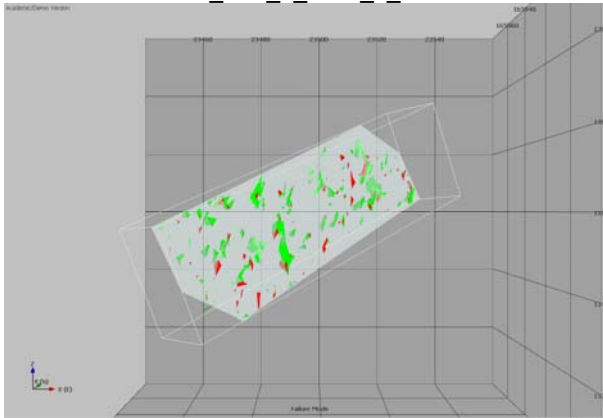
Cliff\_Part\_3 Face\_3 FA45\_wWP



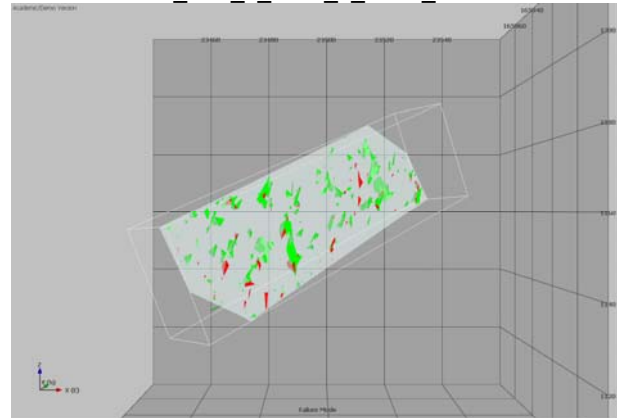
Cliff\_Part\_4\_Face\_1\_V1



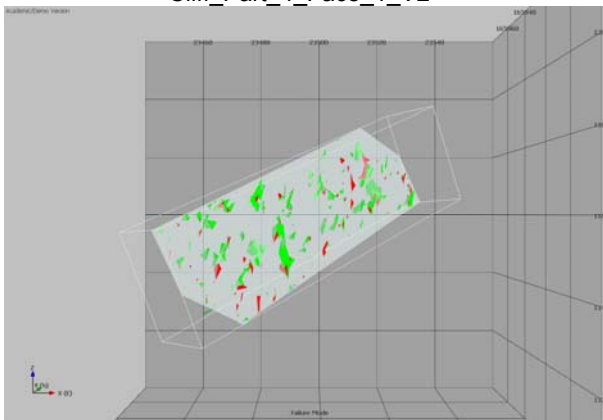
Cliff\_Part\_4\_Face\_1\_FA45\_0SA



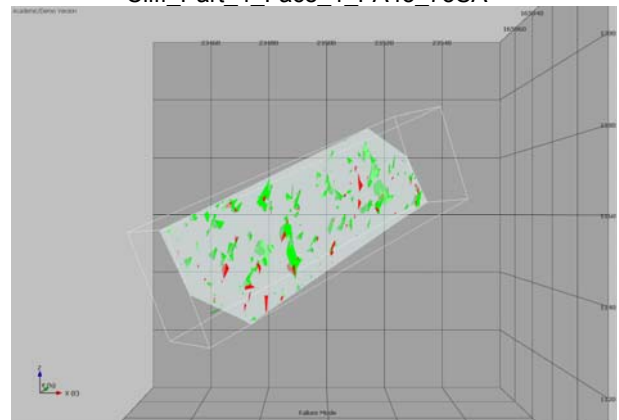
Cliff\_Part\_4\_Face\_1\_V2



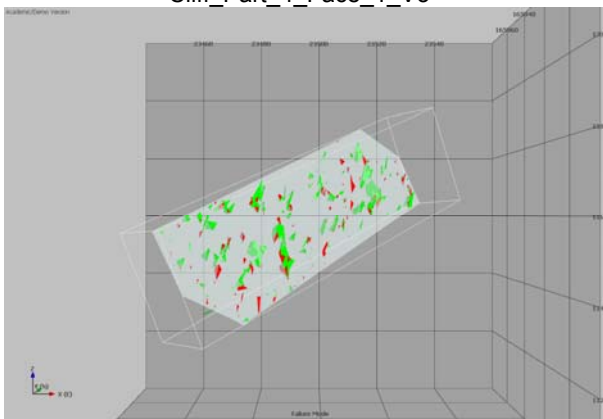
Cliff\_Part\_4\_Face\_1\_FA45\_75SA



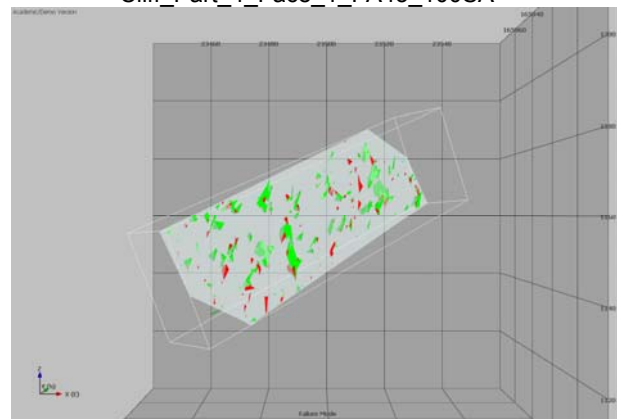
Cliff\_Part\_4\_Face\_1\_V3



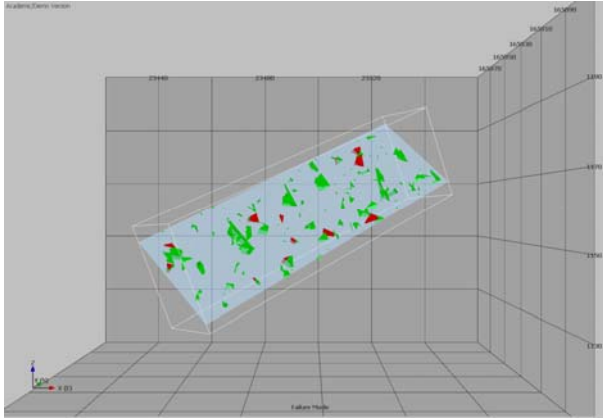
Cliff\_Part\_4\_Face\_1\_FA45\_100SA



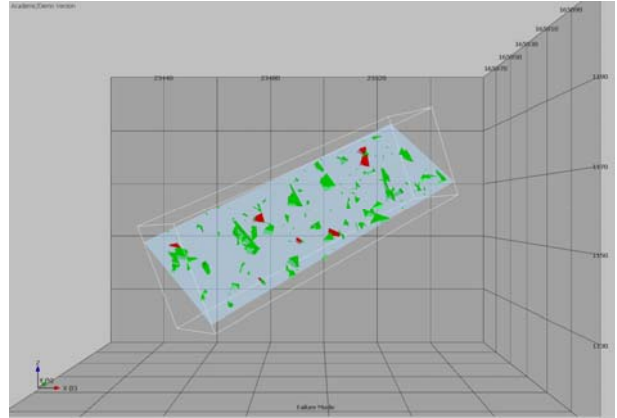
Cliff\_Part\_4\_Face\_1\_V4



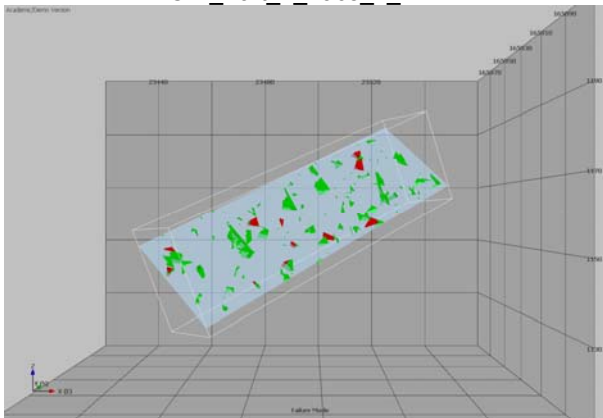
Cliff\_Part\_4\_Face\_1\_FA45\_wWP



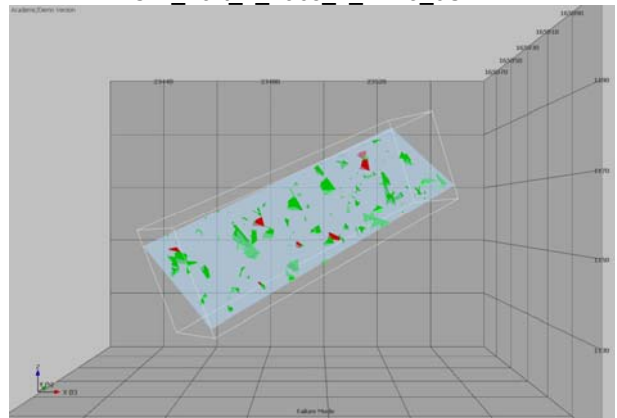
Cliff\_Part\_4\_Face\_2\_V1



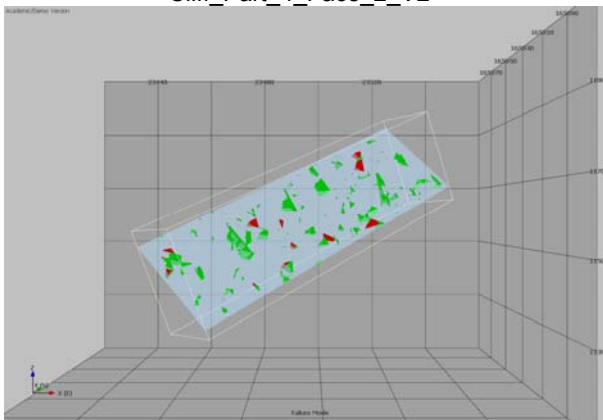
Cliff\_Part\_4\_Face\_2\_FA45\_0SA



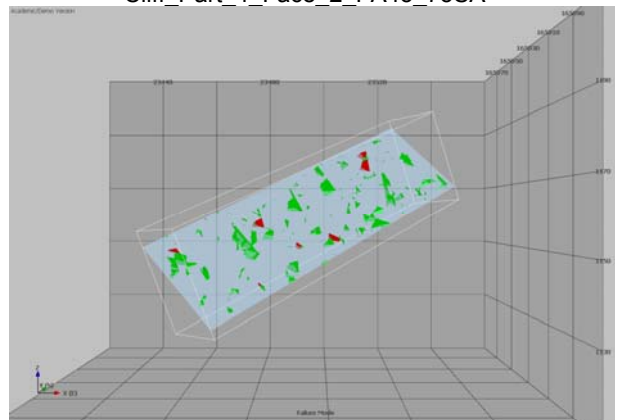
Cliff\_Part\_4\_Face\_2\_V2



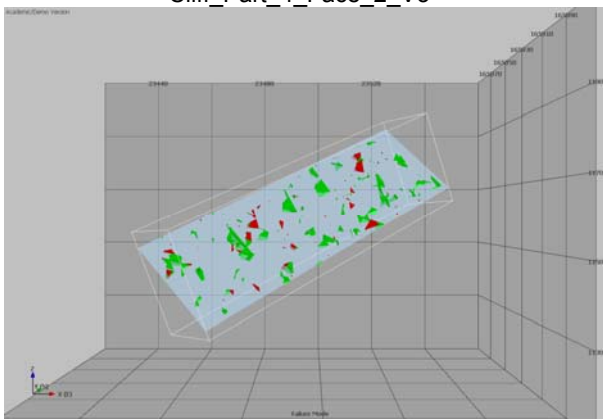
Cliff\_Part\_4\_Face\_2\_FA45\_75SA



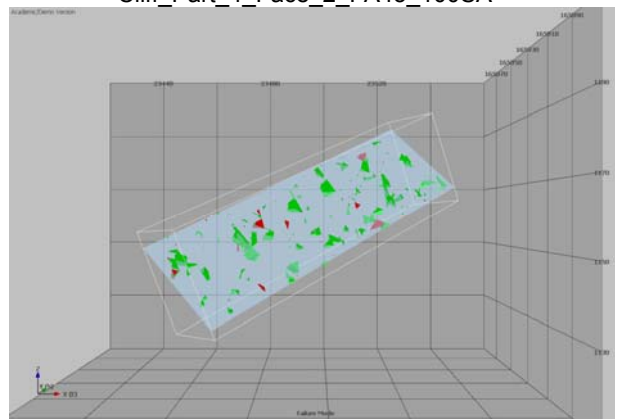
Cliff\_Part\_4\_Face\_2\_V3



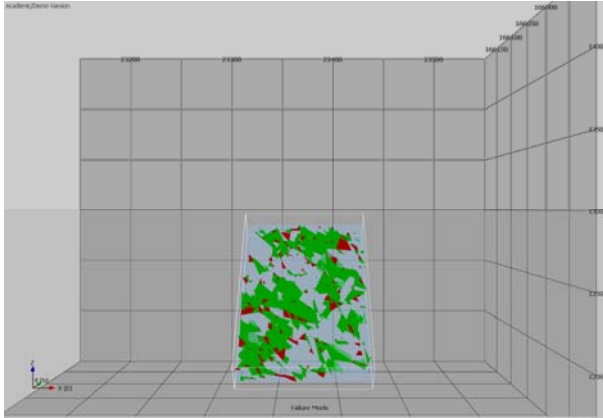
Cliff\_Part\_4\_Face\_2\_FA45\_100SA



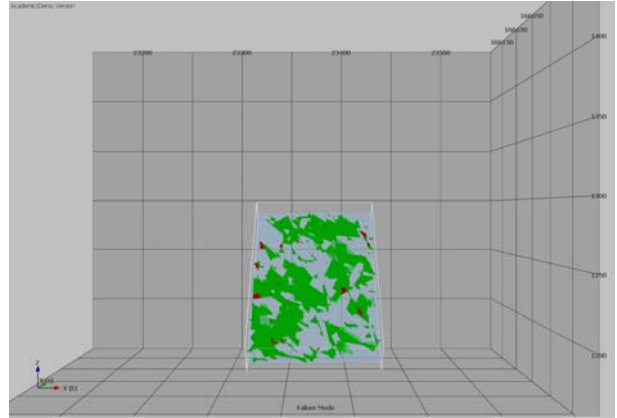
Cliff\_Part\_4\_Face\_2\_V4



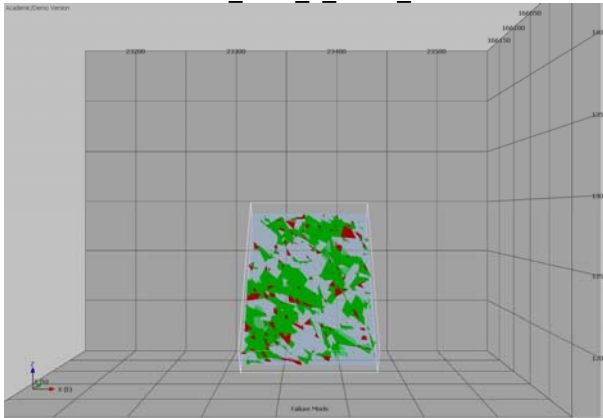
Cliff\_Part\_4\_Face\_2\_FA45\_wWP



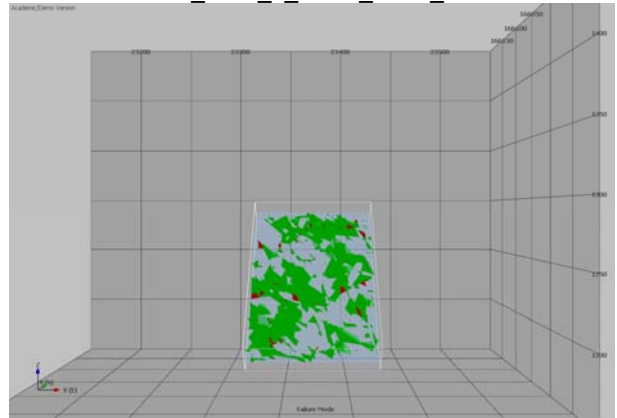
Middle\_Face\_1\_Down\_V1



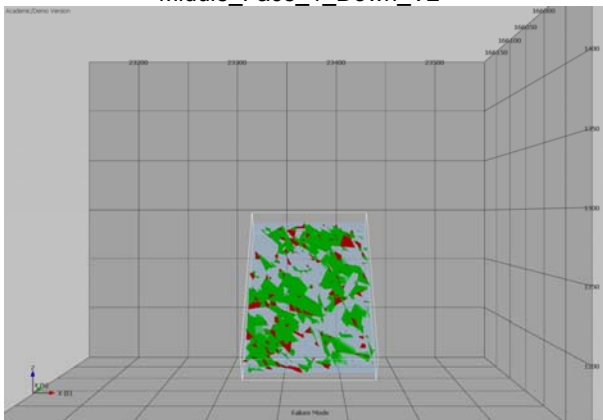
Middle\_Face\_1\_Down\_FA45\_0SA



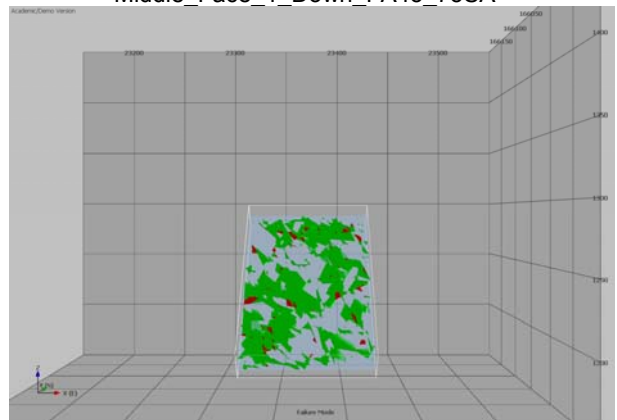
Middle\_Face\_1\_Down\_V2



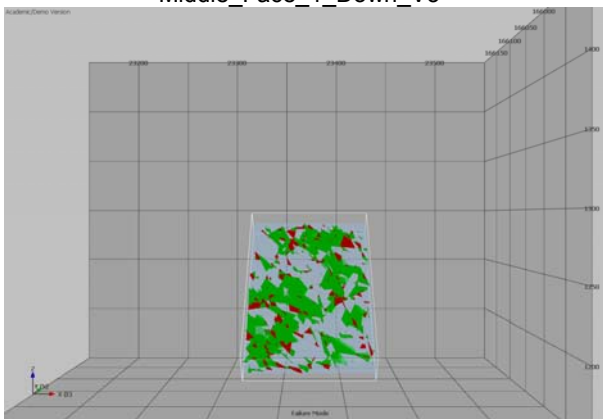
Middle\_Face\_1\_Down\_FA45\_75SA



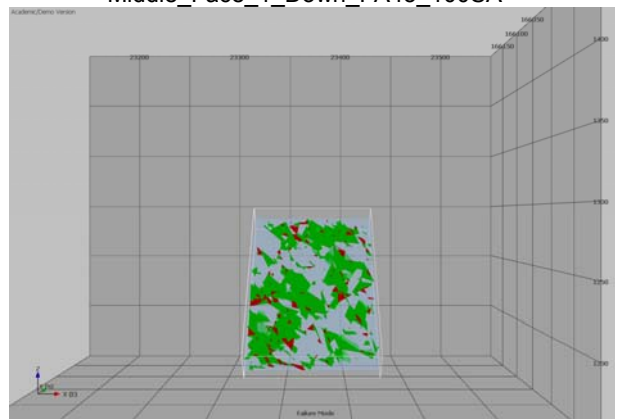
Middle\_Face\_1\_Down\_V3



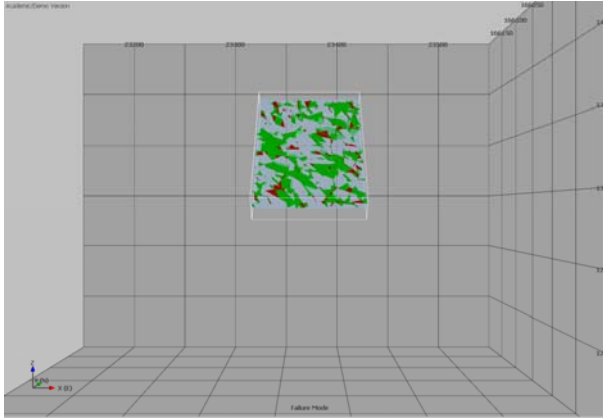
Middle\_Face\_1\_Down\_FA45\_100SA



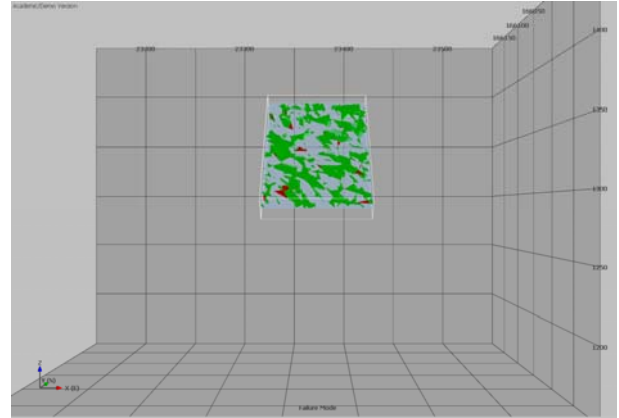
Middle\_Face\_1\_Down\_V4



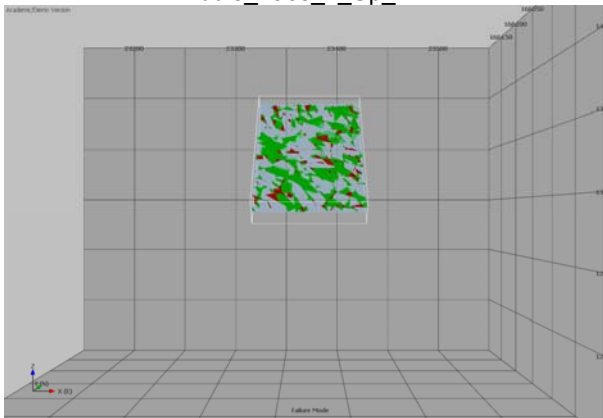
Middle\_Face\_1\_Down\_FA45\_wWP



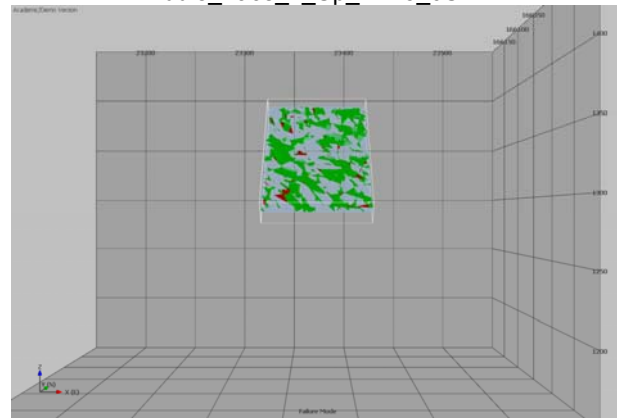
Middle\_Face\_1\_Up\_V1



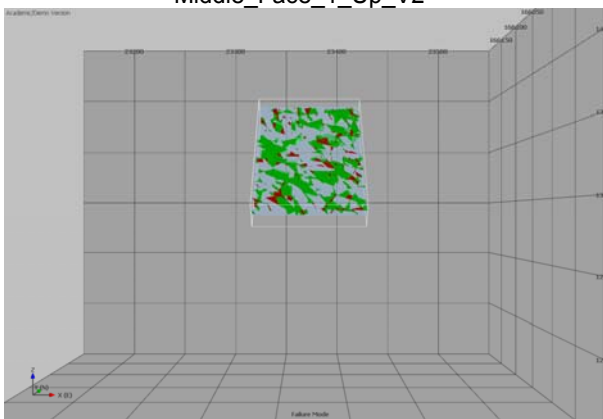
Middle\_Face\_1\_Up\_FA45\_0SA



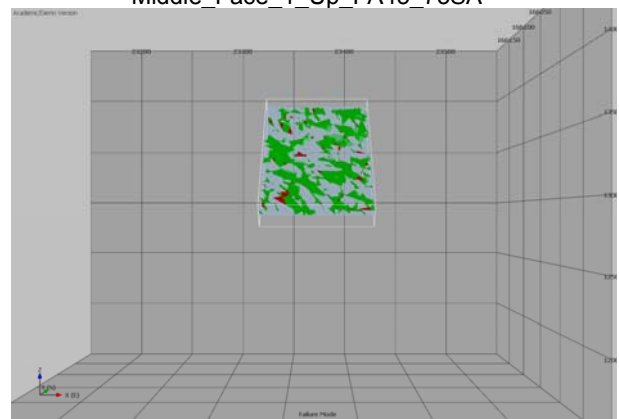
Middle\_Face\_1\_Up\_V2



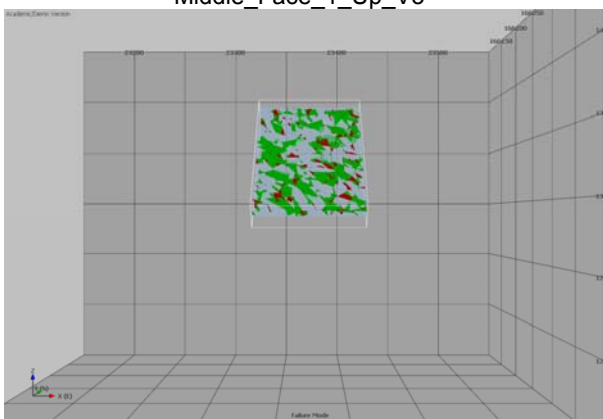
Middle\_Face\_1\_Up\_FA45\_75SA



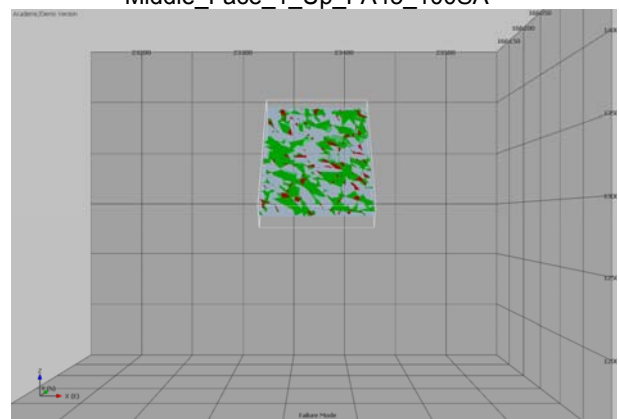
Middle\_Face\_1\_Up\_V3



Middle\_Face\_1\_Up\_FA45\_100SA

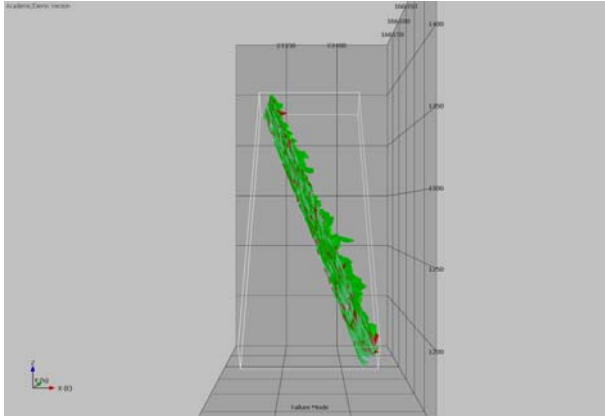


Middle\_Face\_1\_Up\_V4

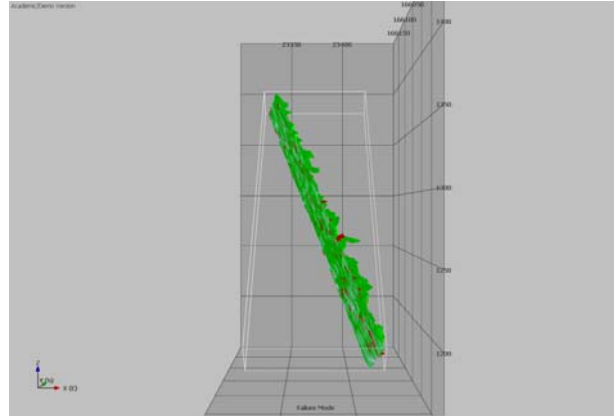


Middle\_Face\_1\_Up\_FA45\_wWP

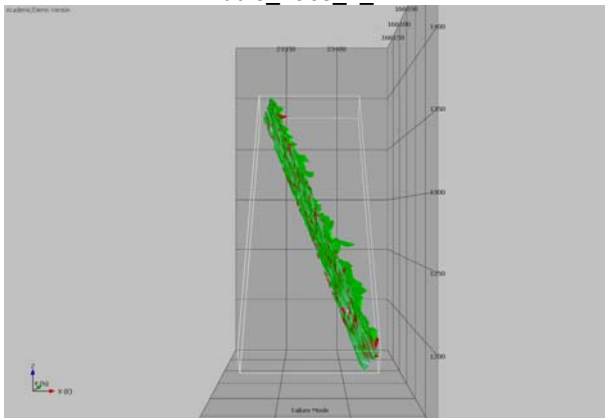




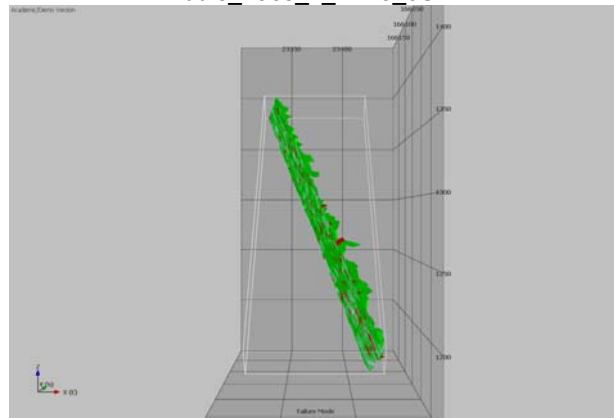
Middle\_Face\_2\_V1



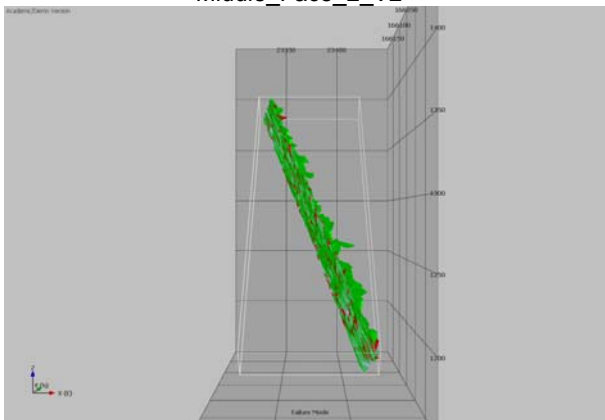
Middle\_Face\_2\_FA45\_0SA



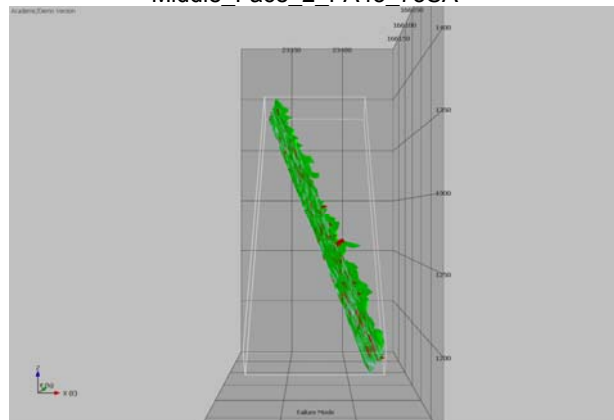
Middle\_Face\_2\_V2



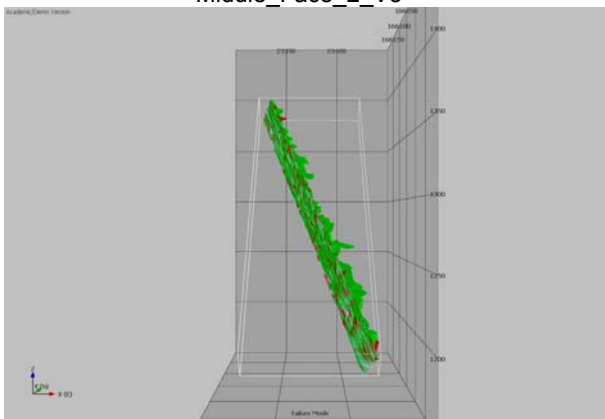
Middle\_Face\_2\_FA45\_75SA



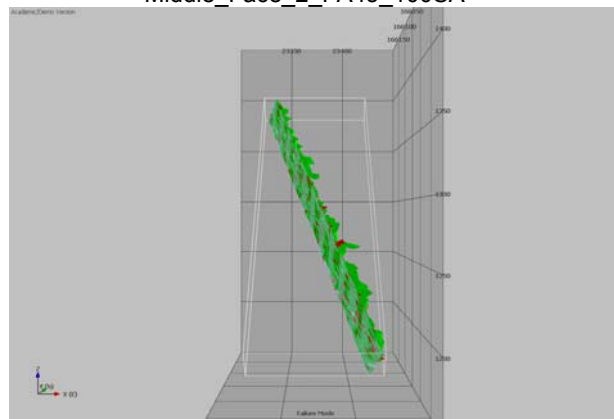
Middle\_Face\_2\_V3



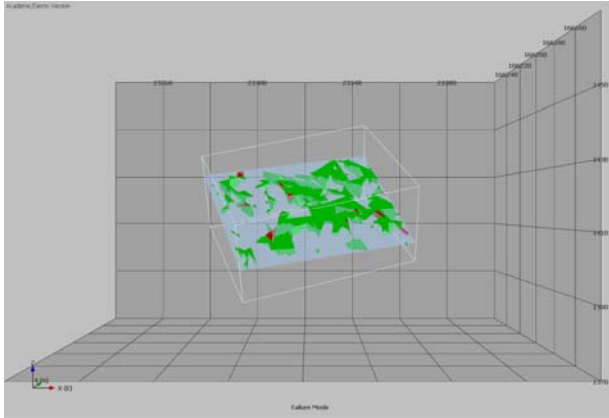
Middle\_Face\_2\_FA45\_100SA



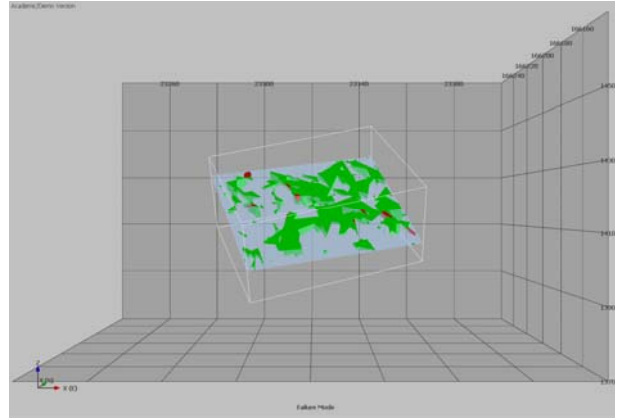
Middle\_Face\_2\_V4



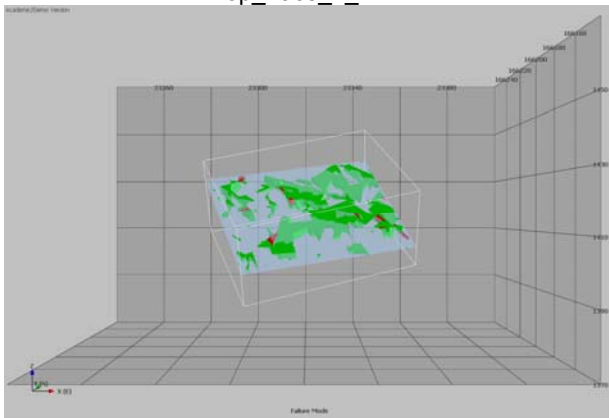
Middle\_Face\_2\_FA45\_wWP



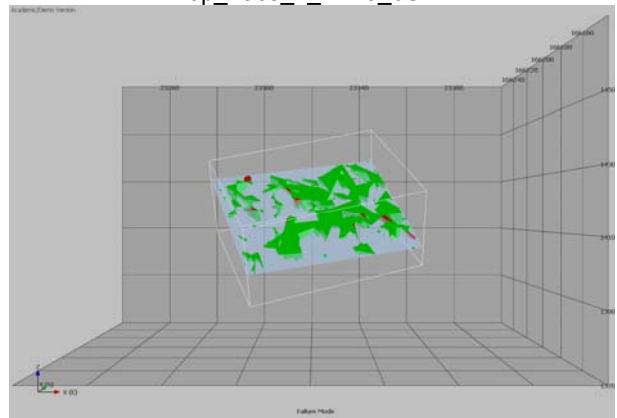
Top\_Face\_1\_V1



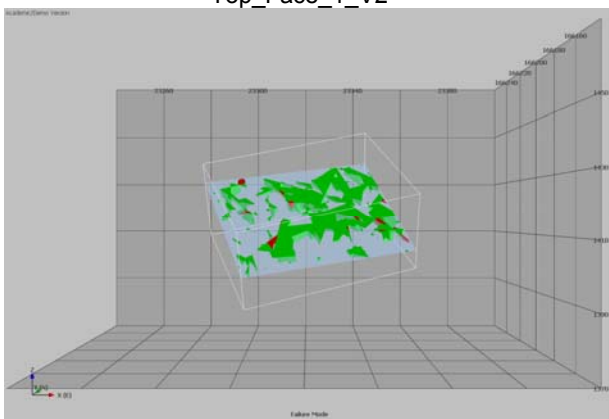
Top\_Face\_1\_FA45\_0SA



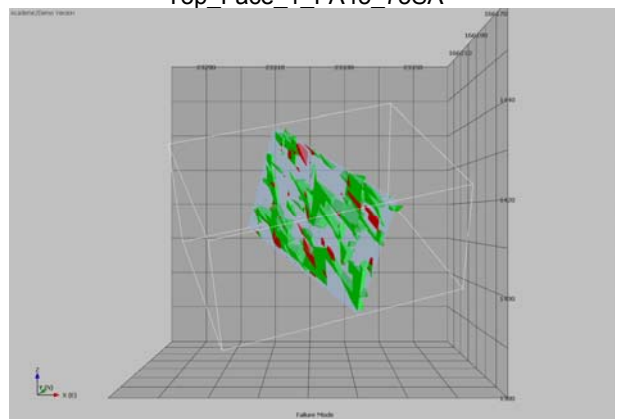
Top\_Face\_1\_V2



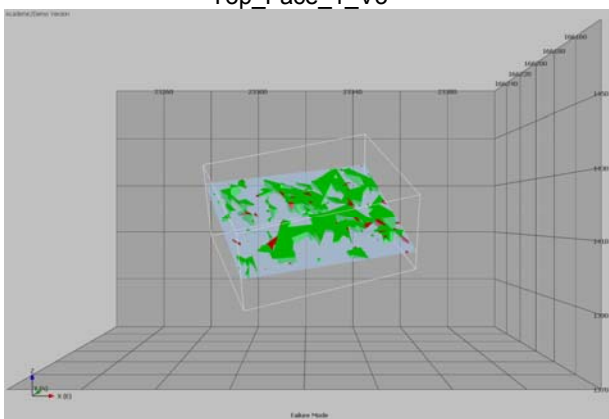
Top\_Face\_1\_FA45\_75SA



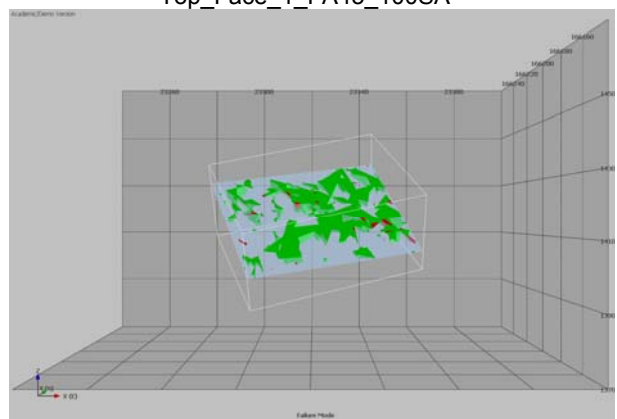
Top\_Face\_1\_V3



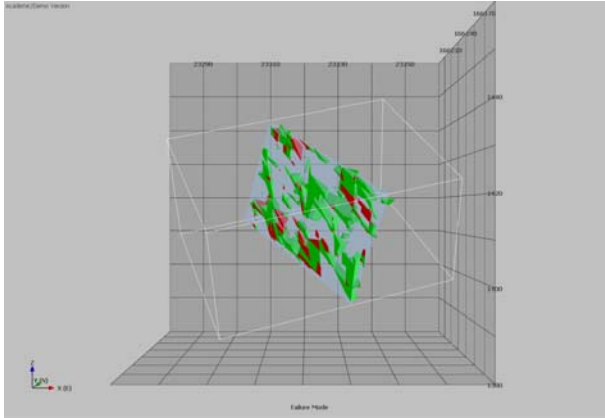
Top\_Face\_1\_FA45\_100SA



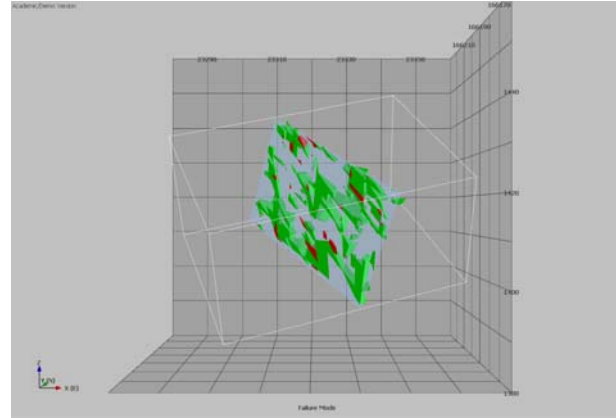
Top\_Face\_1\_V4



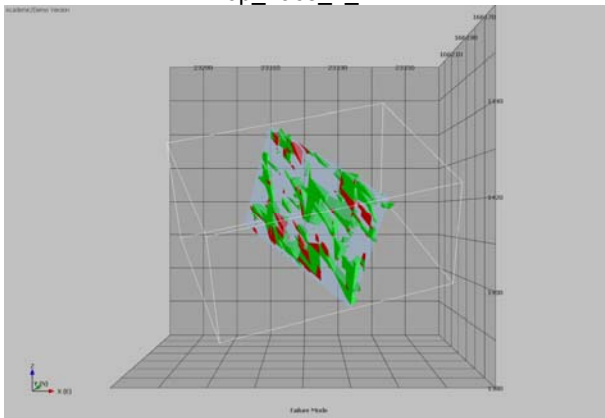
Top\_Face\_1\_FA45\_wWP



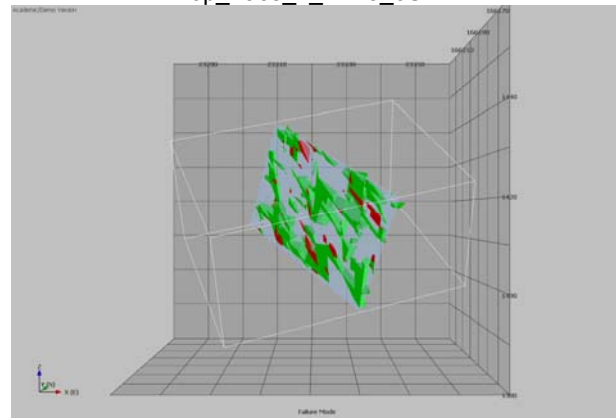
Top Face 2\_V1



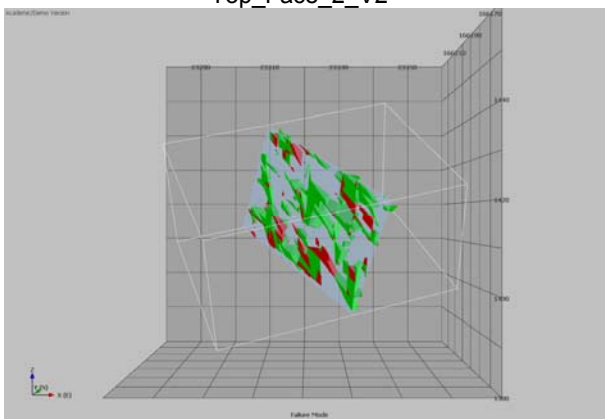
Top Face 2\_FA45\_0SA



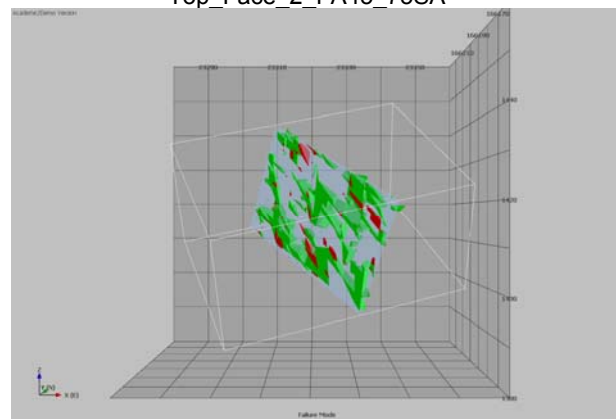
Top Face 2\_V2



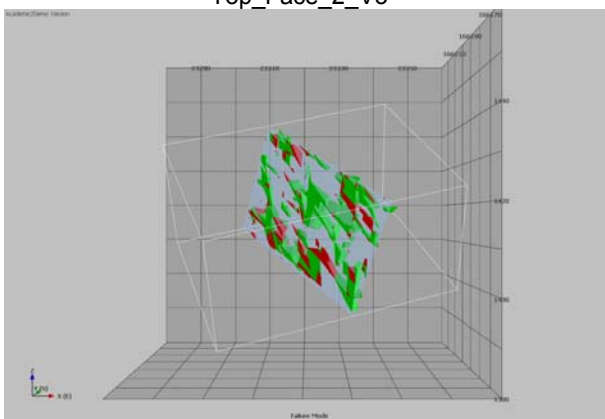
Top Face 2\_FA45\_75SA



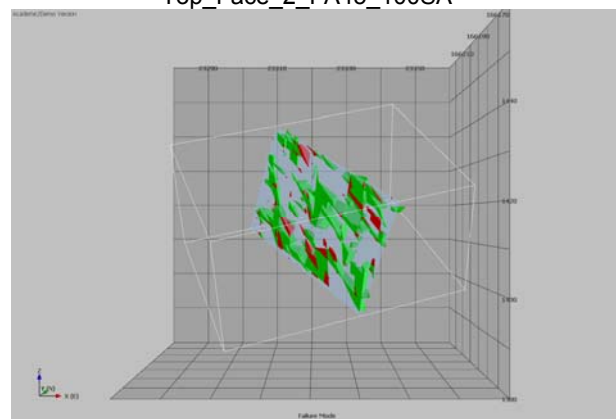
Top Face 2\_V3



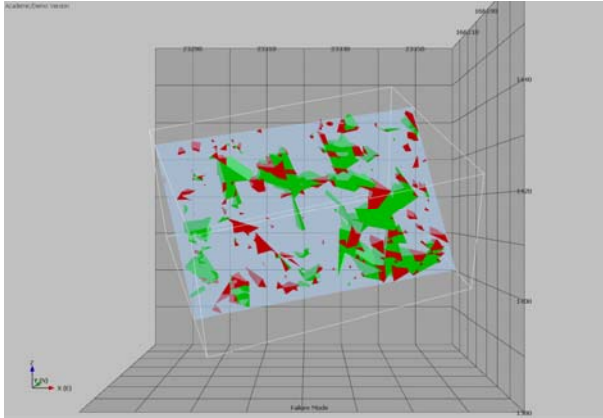
Top Face 2\_FA45\_100SA



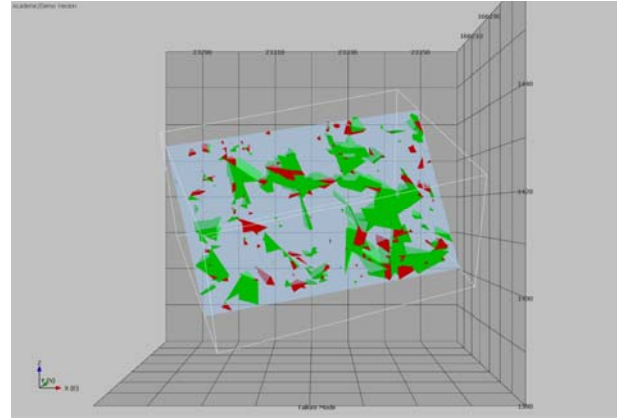
Top Face 2\_V4



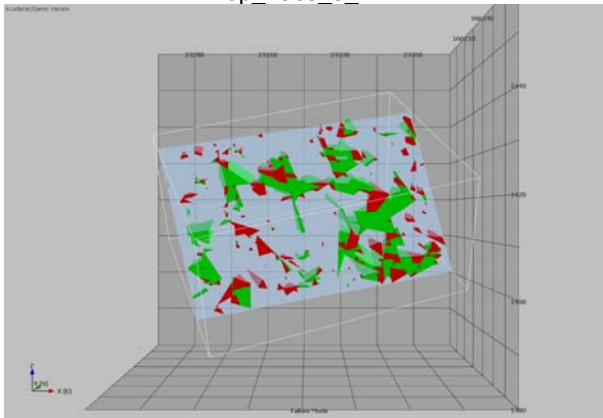
Top Face 2\_FA45\_wWP



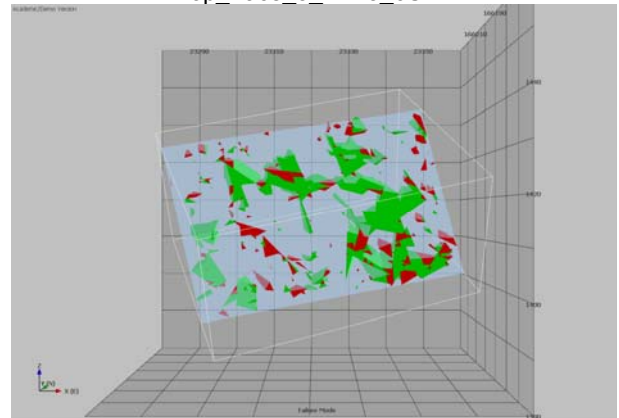
Top Face 3\_V1



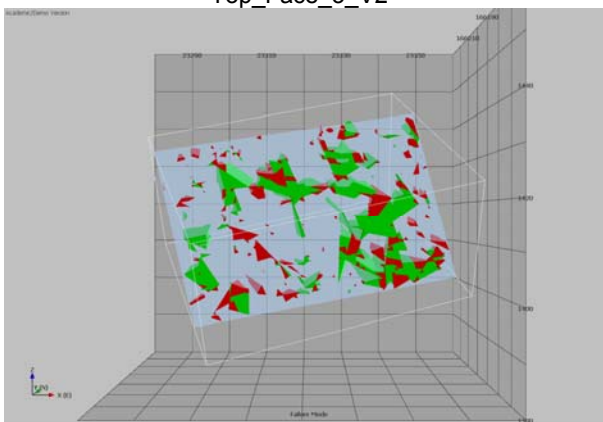
Top Face 3\_FA45\_0SA



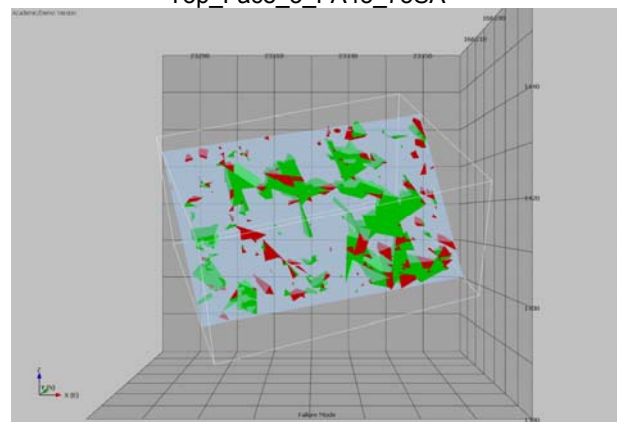
Top Face 3\_V2



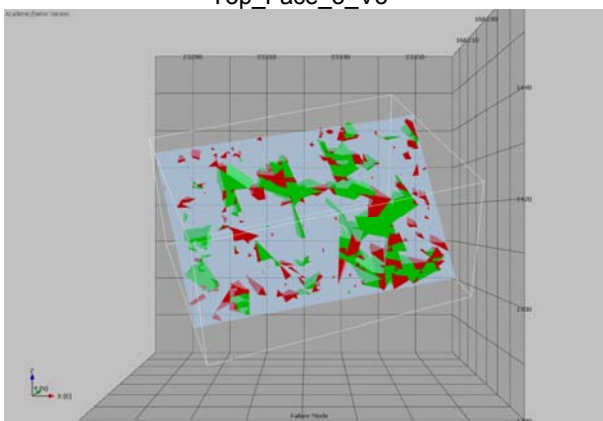
Top Face 3\_FA45\_75SA



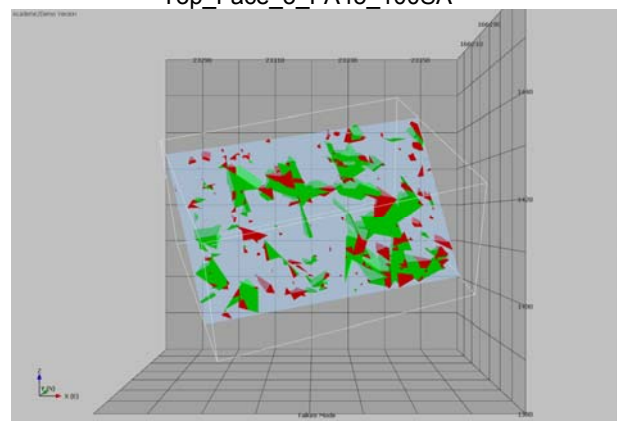
Top Face 3\_V3



Top Face 3\_FA45\_100SA



Top Face 3\_V4



Top Face 3\_FA45\_wWP

## F) RocFall Resultate

Bei den RocFall Modellierungen wurden fünf Profile verwendet. Mit jedem Profil wurden in einem ersten Schritt zwei Modellierungen durchgeführt: einmal für einen Reibungswinkel des Gesteins von 26,5° und einmal für 45°.

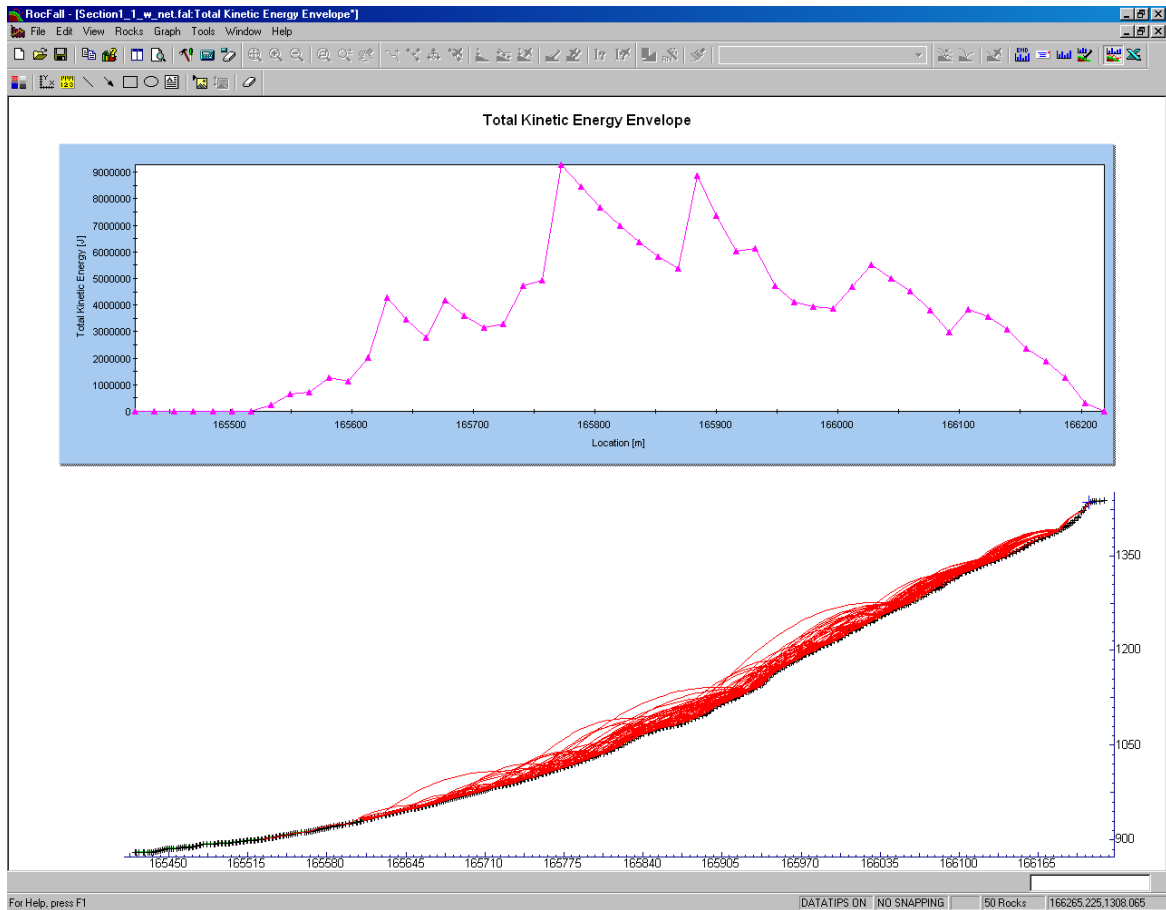
Da einige wenige Sturzblöcke die Schutznetze überspringen, dies aber in den Abbildungen nur schwer zu erkennen ist, sind in Tabelle B die Profile, bei denen das Schutznetz übersprungen wurde und die Anzahl der Blöcke aufgelistet.

Profil	Reibungswinkel [°]	Schutznetz übersprungen	Anzahl der Blöcke
1	26,5	ja	1
	45	nein	0
2	26,5	nein	0
	45	nein	0
3	26,5	ja	2
	45	ja	3
4	26,5	nein	0
	45	nein	0
5	26,5	ja	1
	45	nein	0

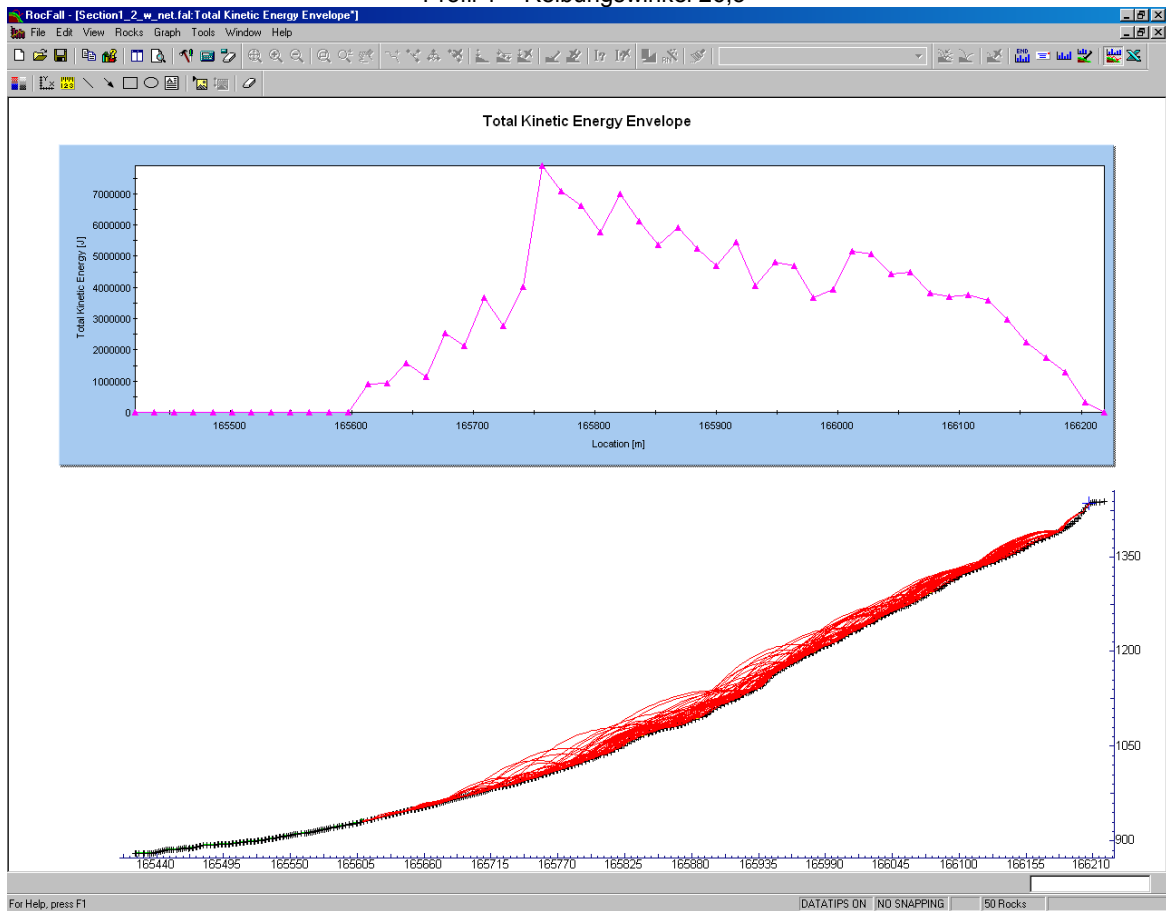
**Tabelle B:** Anzahl der die in den einzelnen Profilen Schutznetze überspringenden Blöcke

In einem zweiten Schritt wurden die Hangparameter der Natur angepasst. Die Ergebnisse befinden sich im Anschluss an die der ersten Modellierungen und sind in ihrer Beschriftung an der Bezeichnung „natürlicher Hang“ erkennbar.

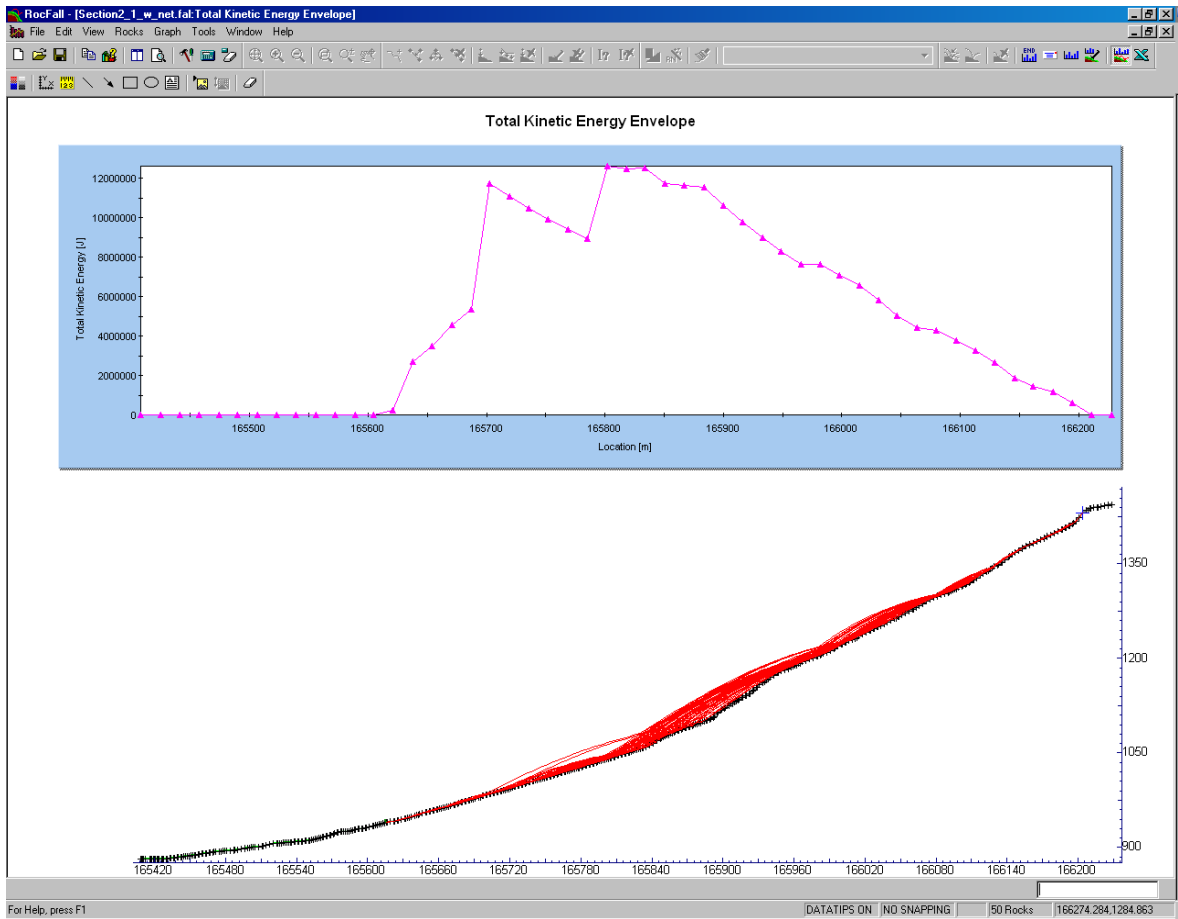
Sämtliche Ergebnisse sind zum Zweck einer größeren Darstellung als .png Dateien auf der Daten DVD vorhanden. Des Weiteren finden sich dort auch Excel Files mit den Werten der kinetischen Energie am Schutznetz für jene Profile, an denen Blöcke das Schutznetz erreichen.



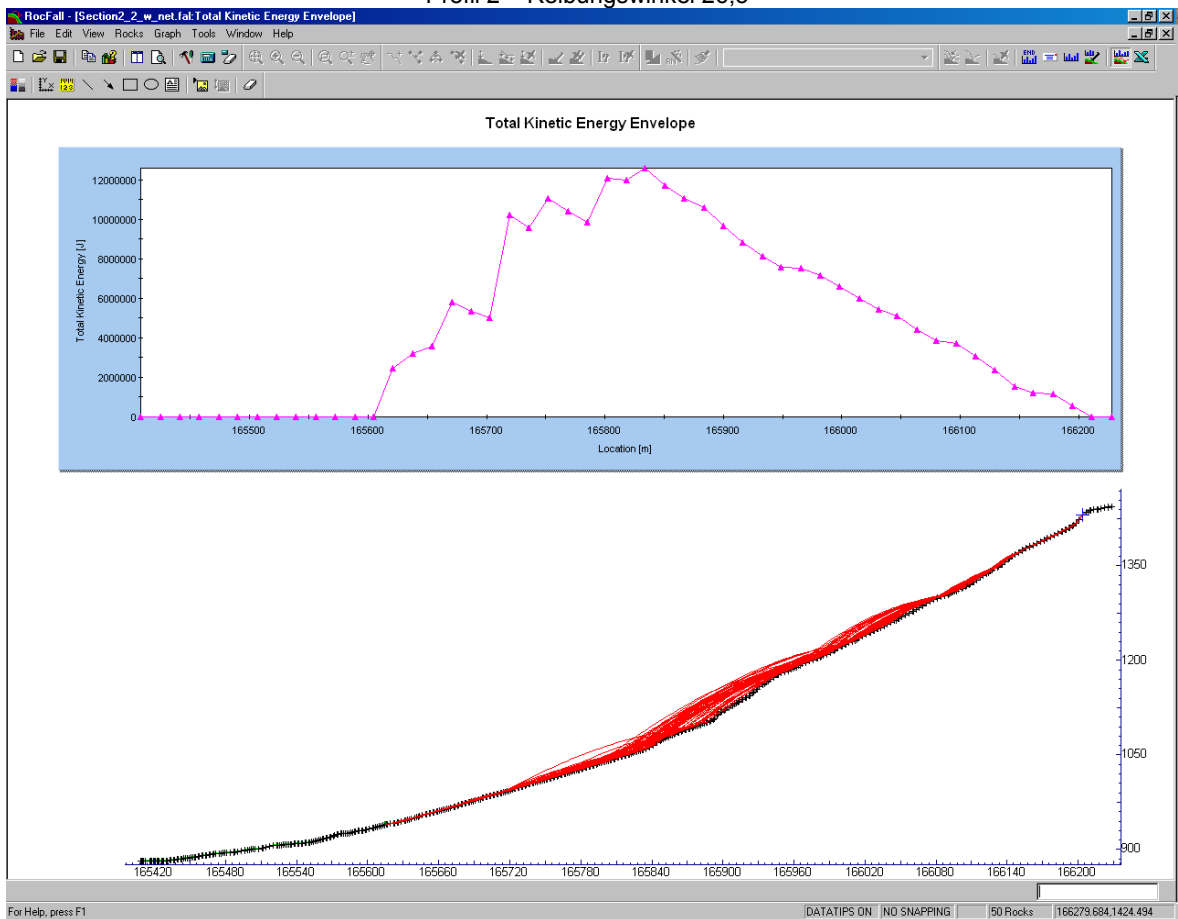
Profil 1 – Reibungswinkel 26,5°



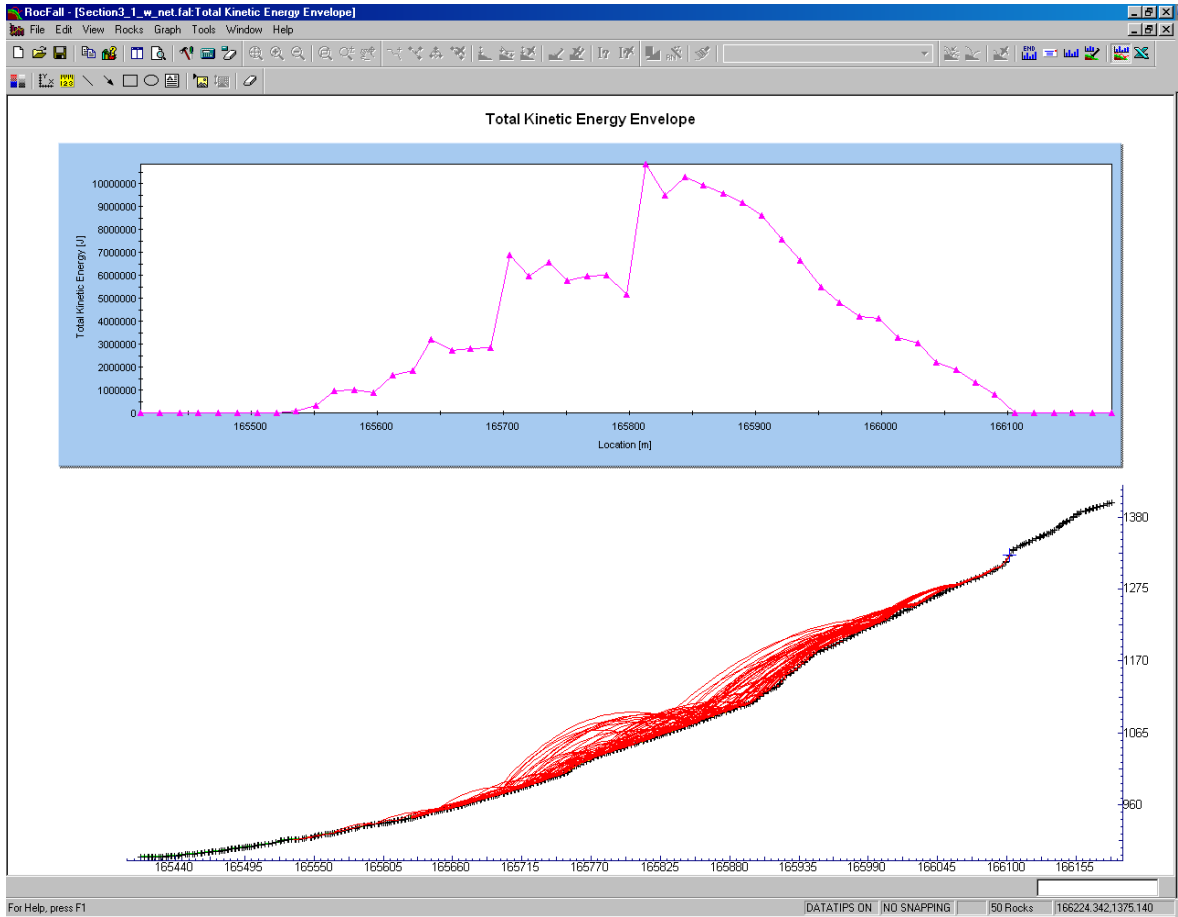
Profil 1 – Reibungswinkel 45°



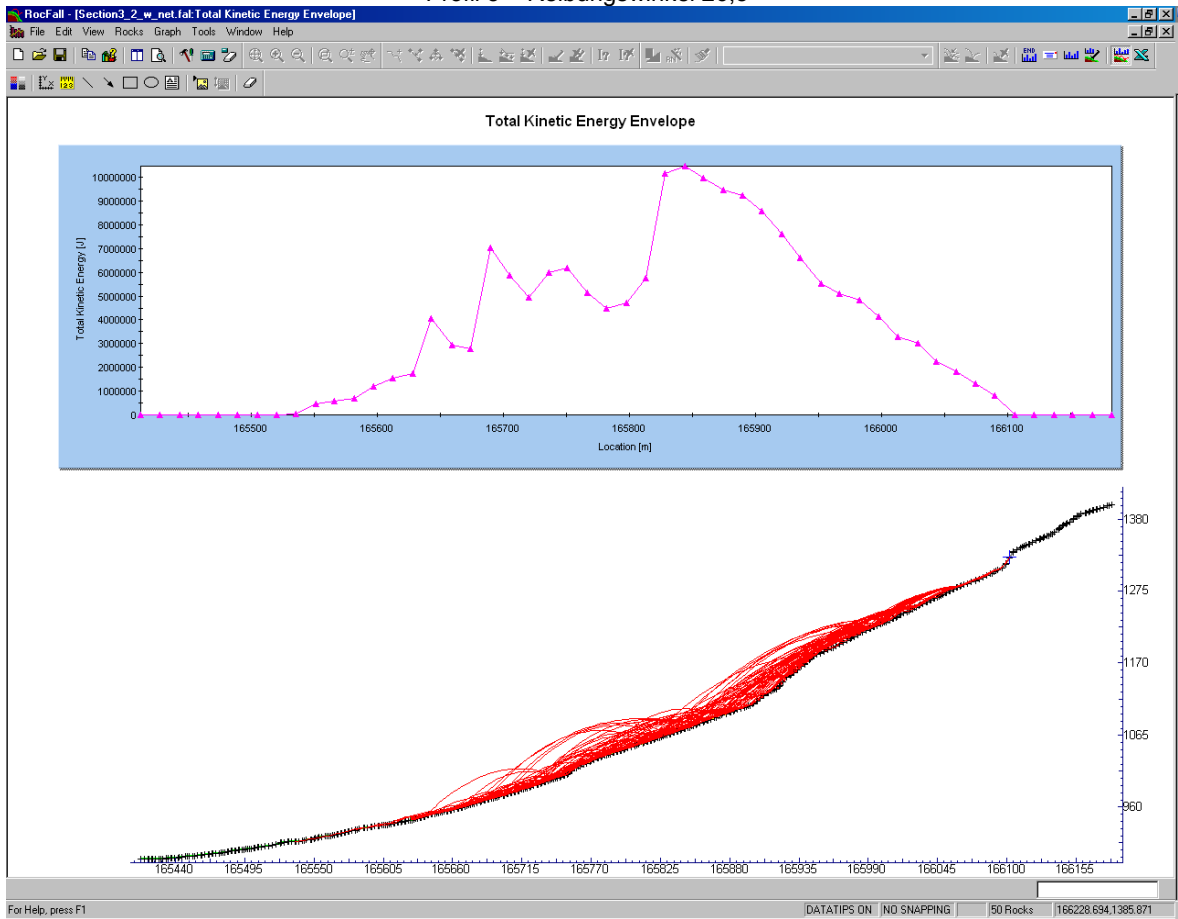
Profil 2 – Reibungswinkel 26,5°



Profil 2 – Reibungswinkel 45°

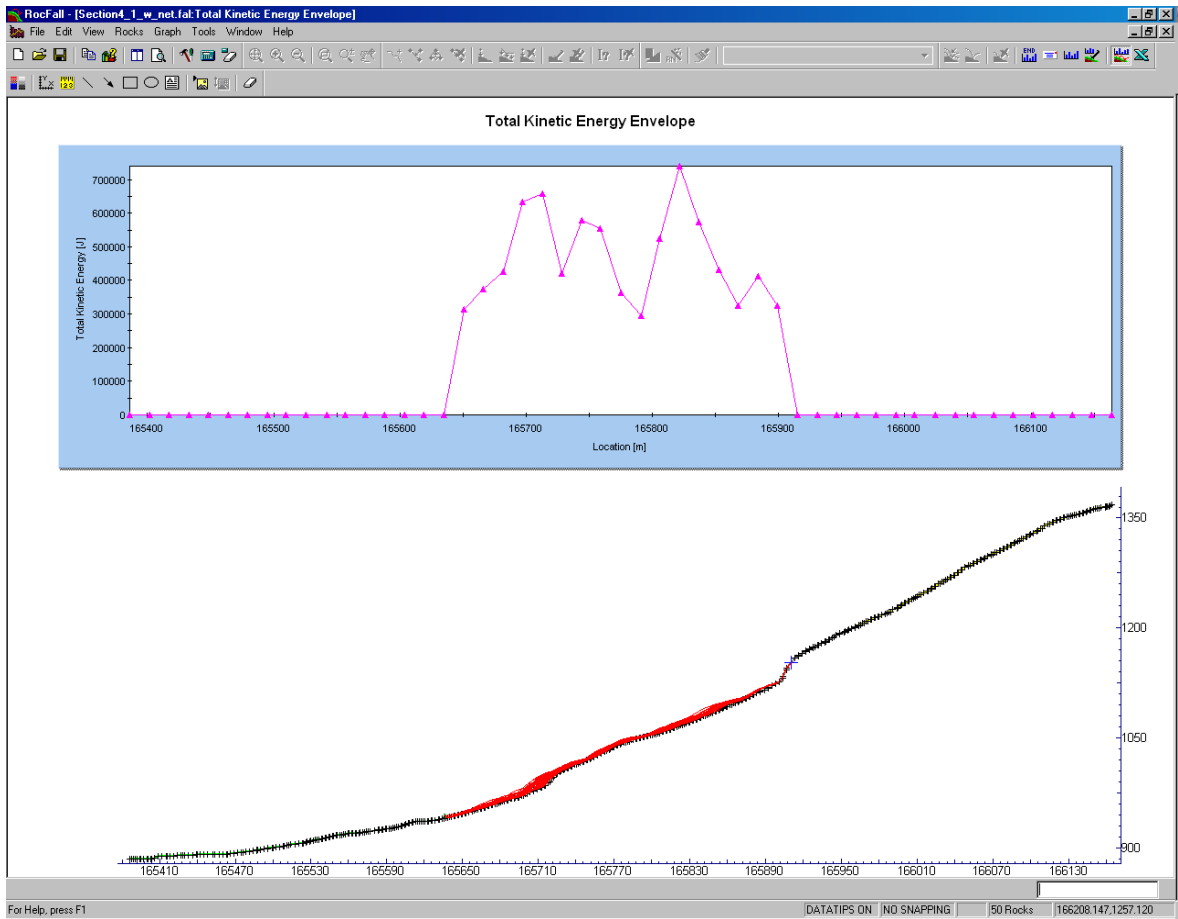


Profil 3 – Reibungswinkel 26,5°

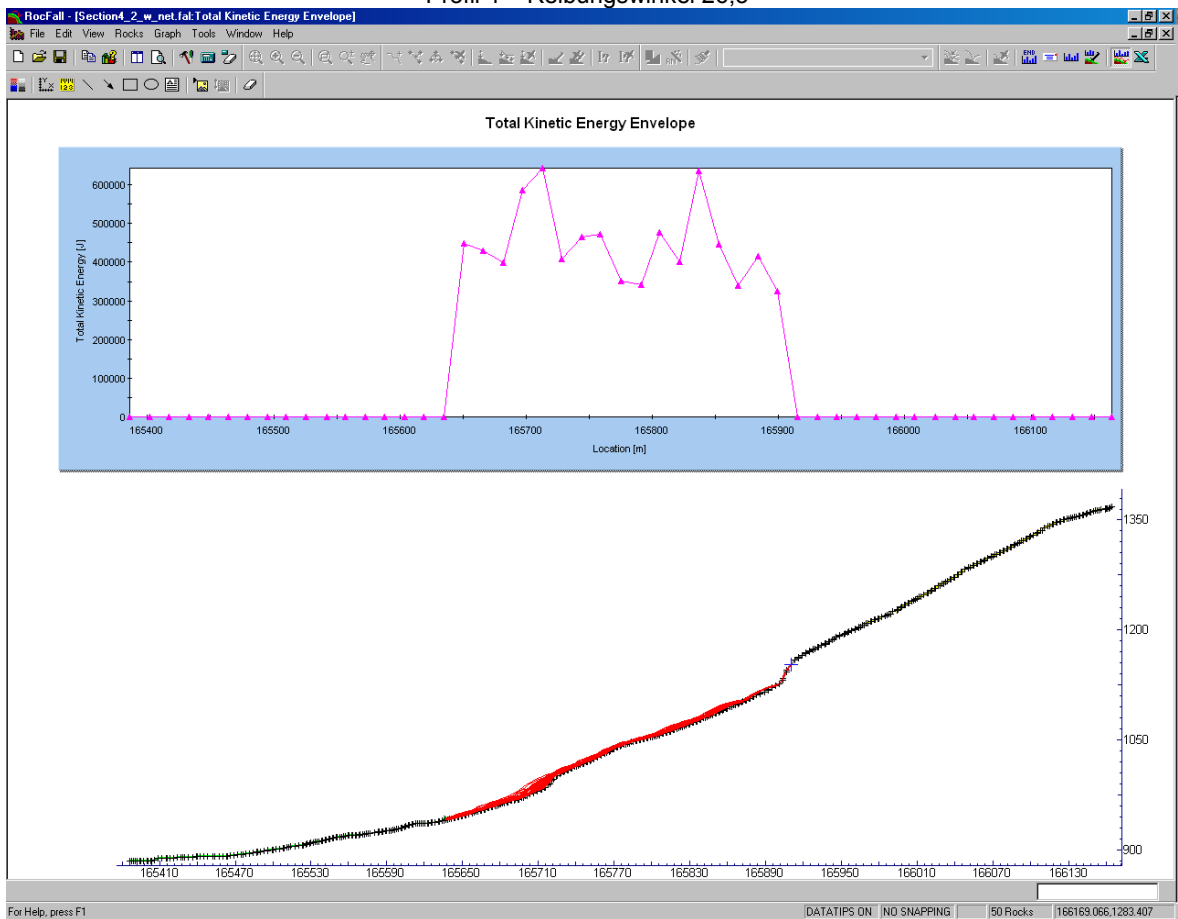


Profil 3 – Reibungswinkel 45°

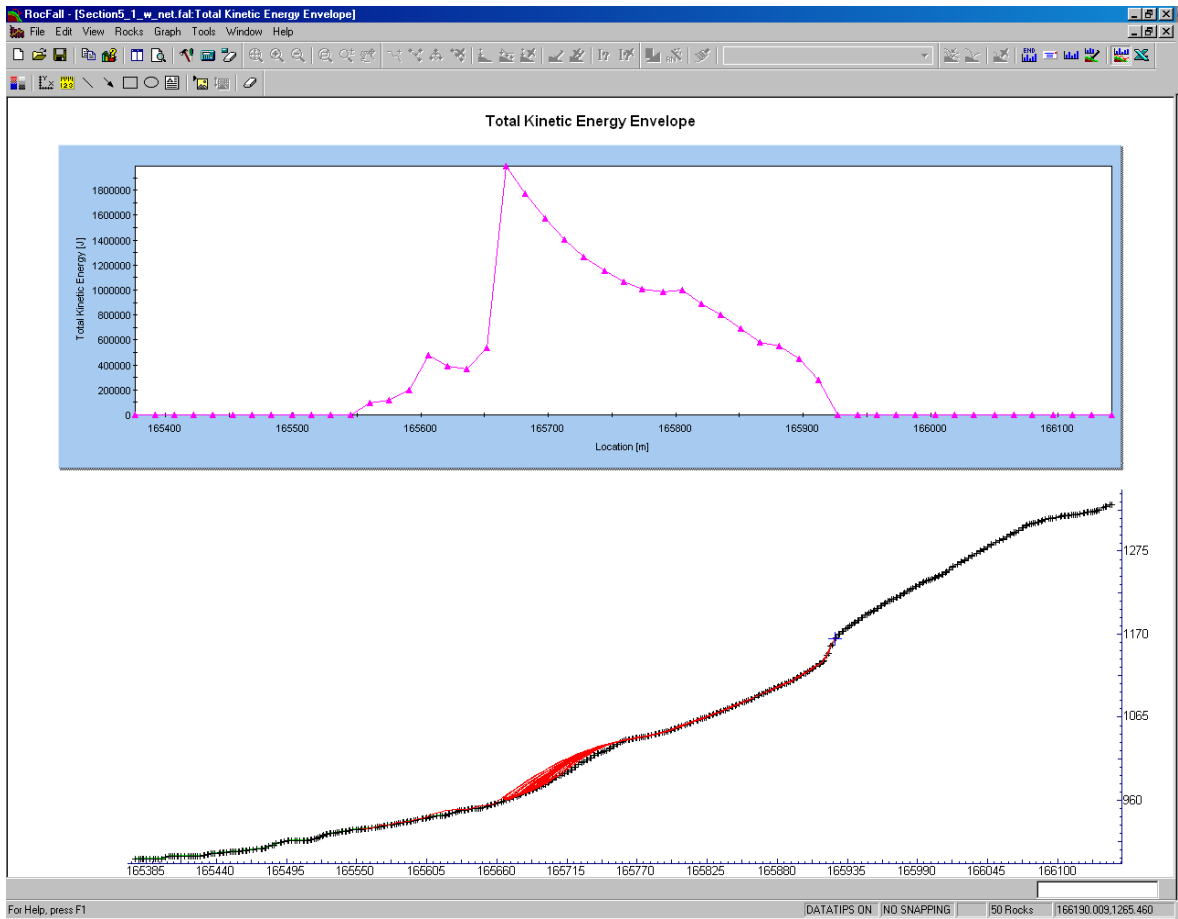




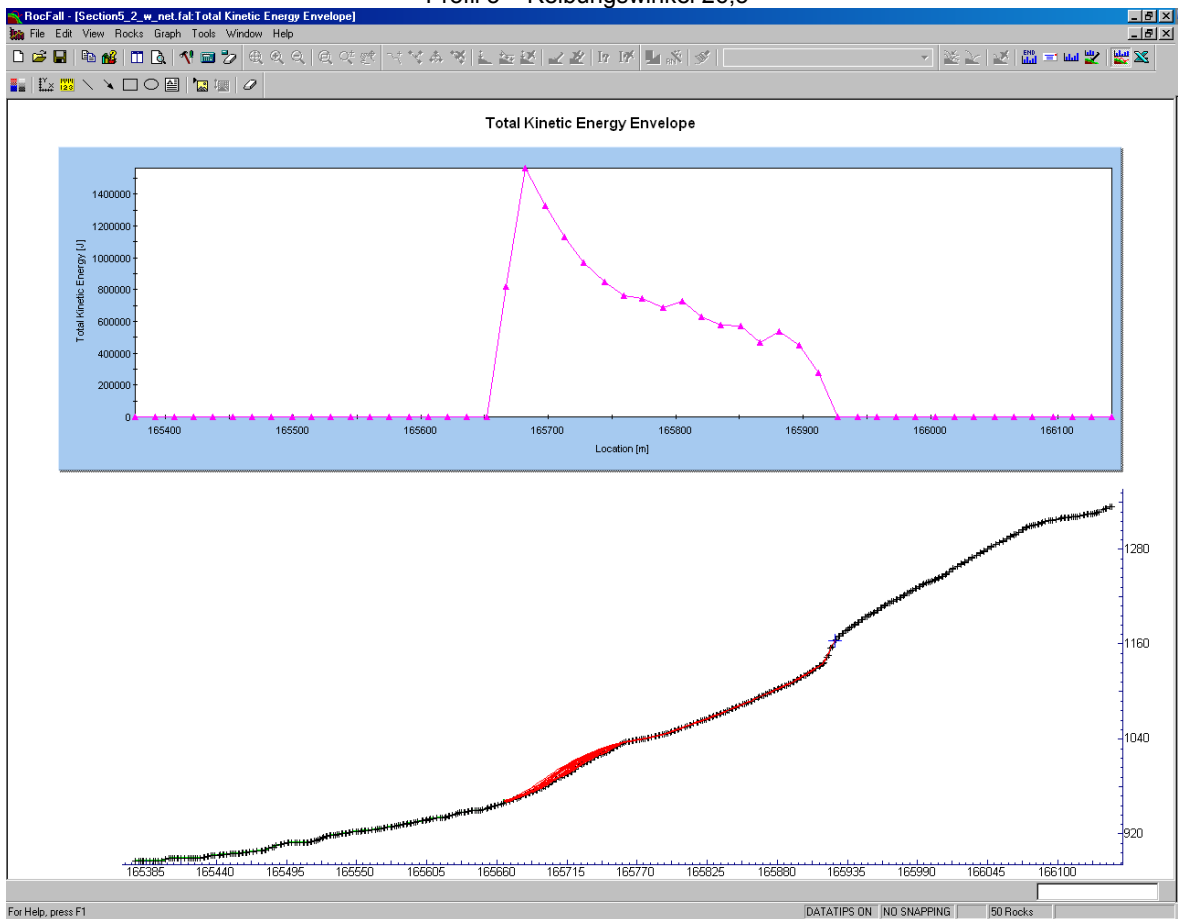
Profil 4 – Reibungswinkel 26,5°



Profil 4 – Reibungswinkel 45°

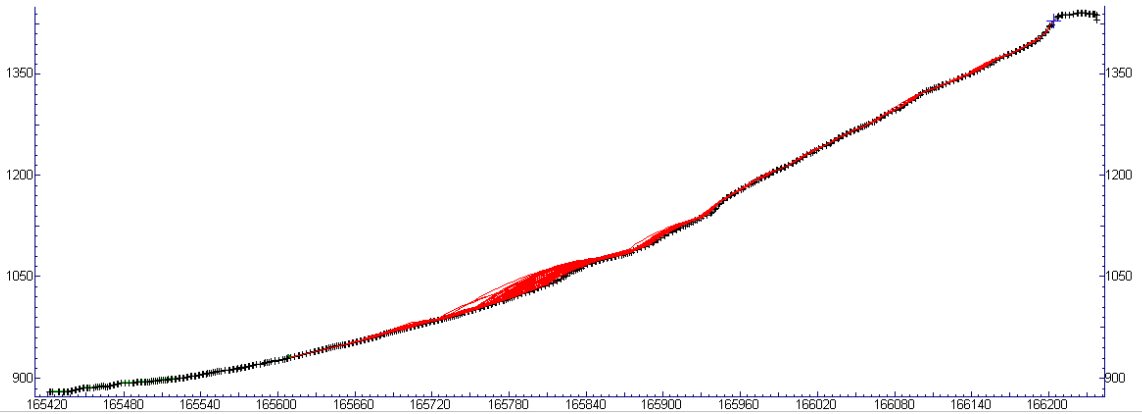
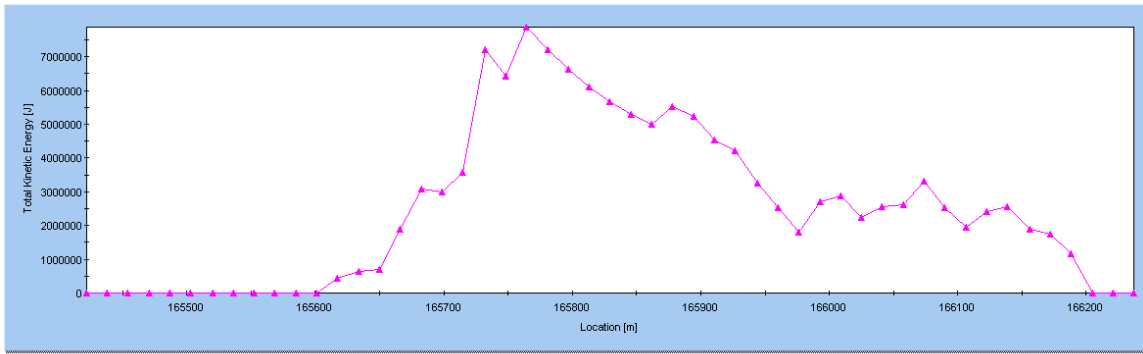


Profil 5 – Reibungswinkel 26,5°



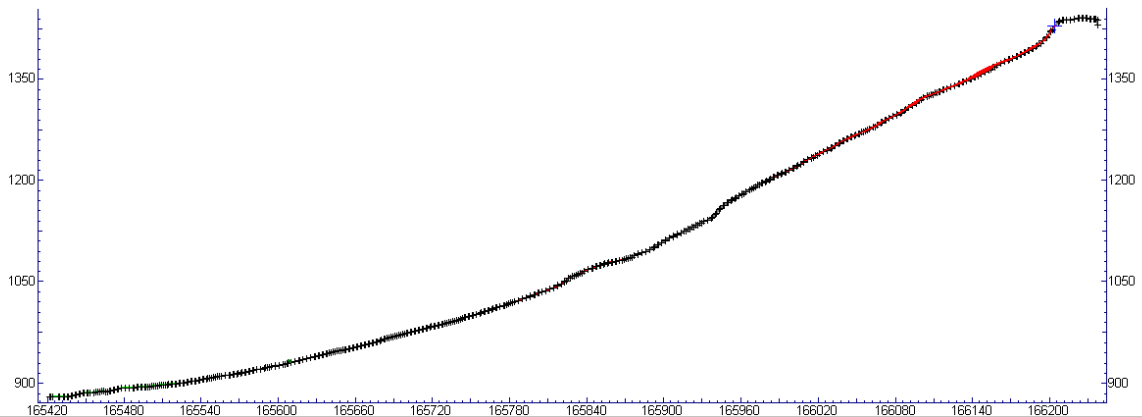
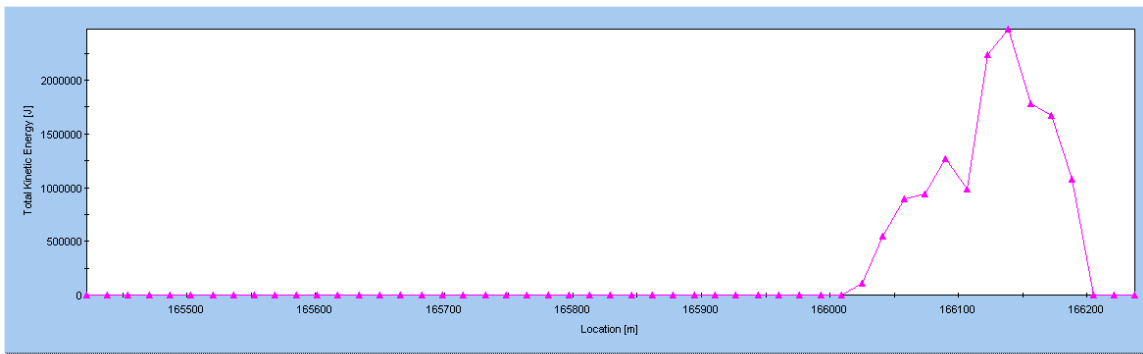
Profil 5 – Reibungswinkel 45°

Total Kinetic Energy Envelope



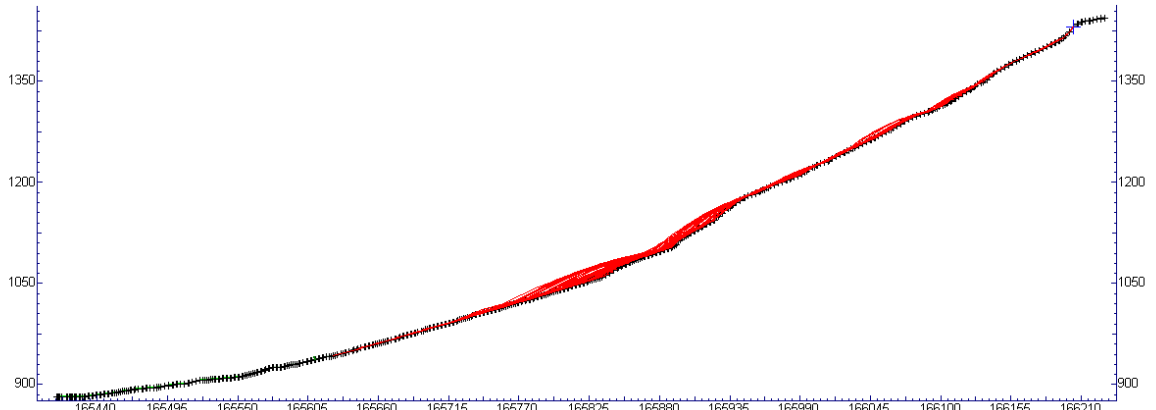
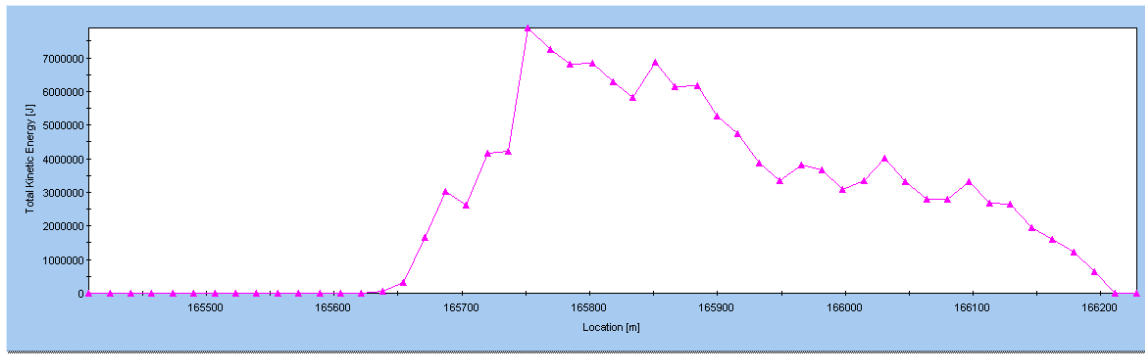
Profil 1 - natürlicher Hang, Reibungswinkel 26,5°

Total Kinetic Energy Envelope



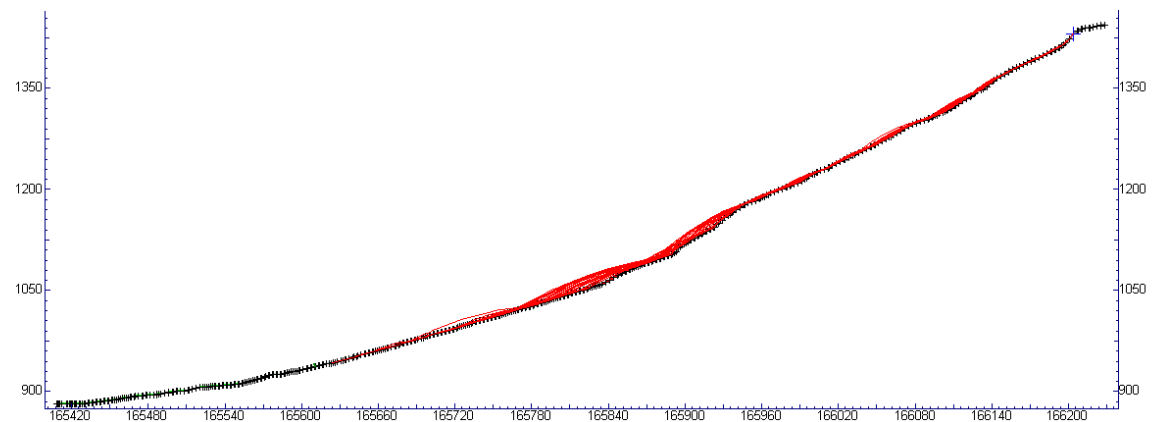
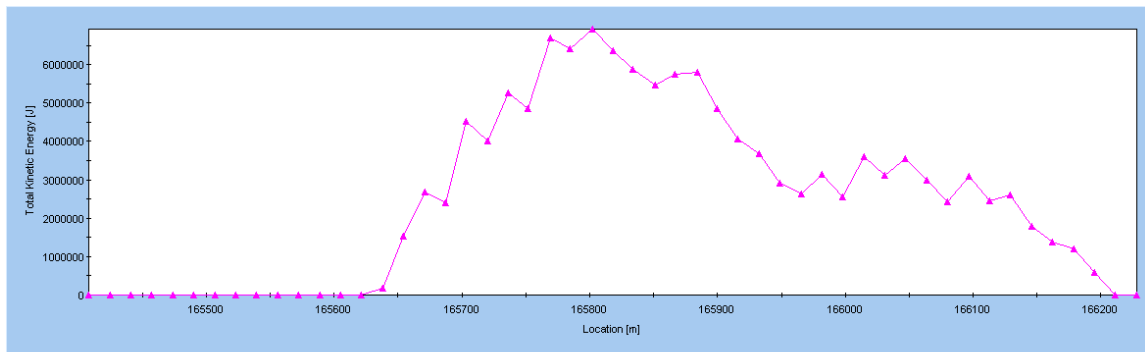
Profil 1 – natürlicher Hang, Reibungswinkel 45°

Total Kinetic Energy Envelope



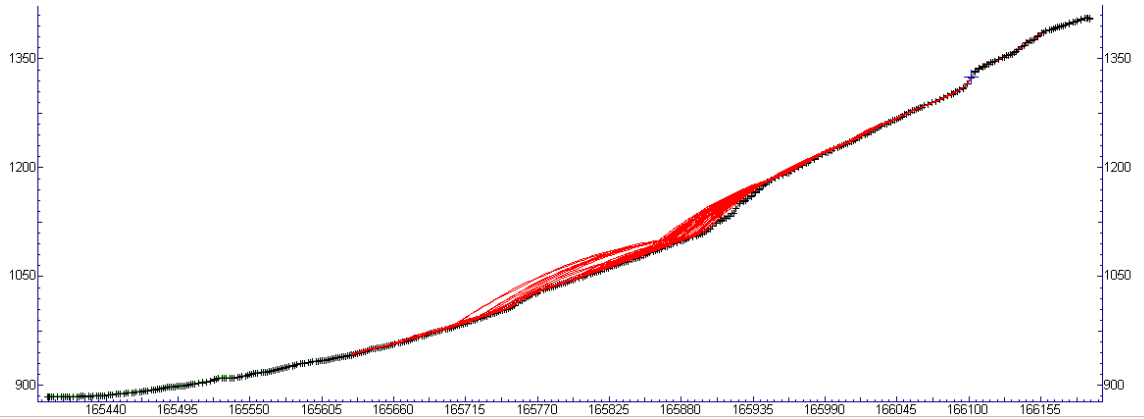
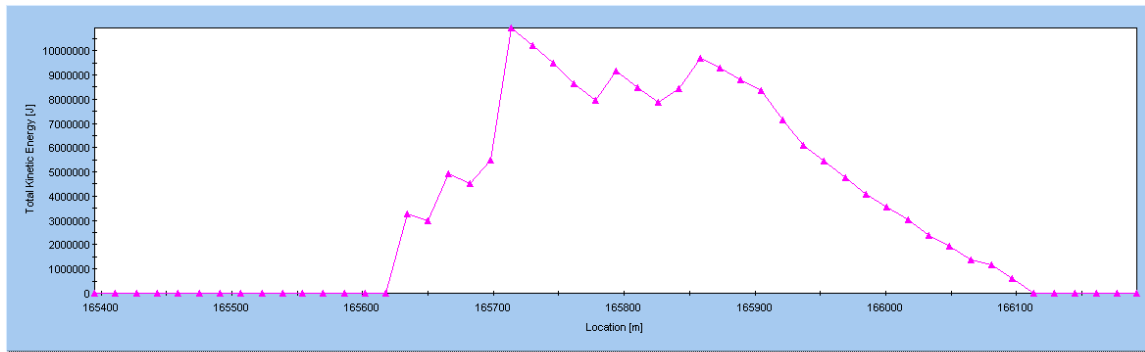
Profil 2 – natürlicher Hang, Reibungswinkel 26,5°

Total Kinetic Energy Envelope



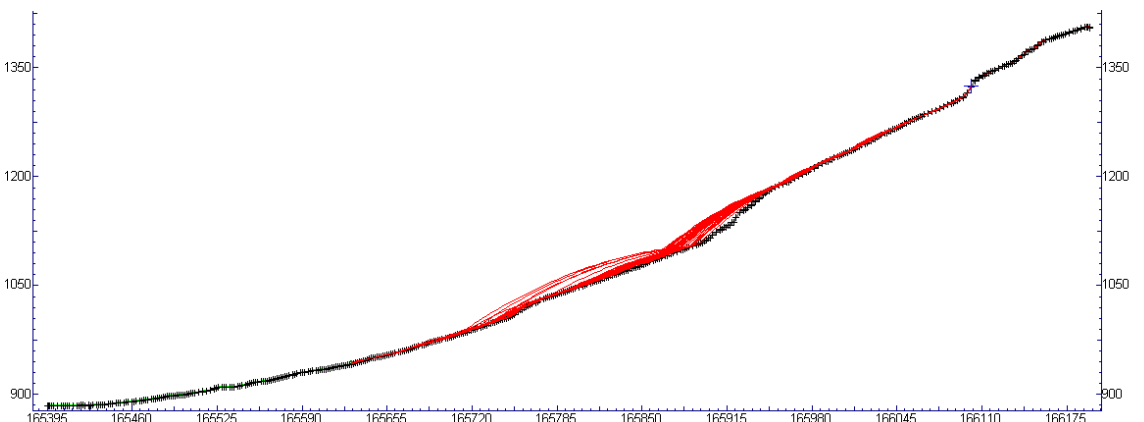
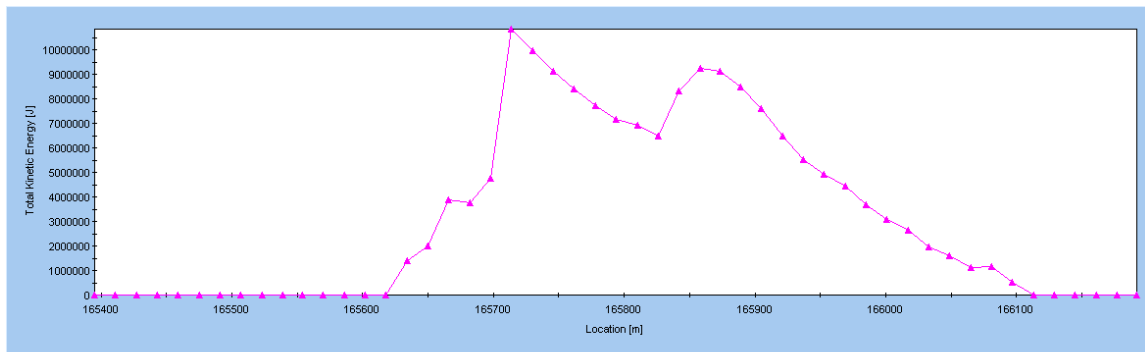
Profil 2 – natürlicher Hang, Reibungswinkel 45°

Total Kinetic Energy Envelope



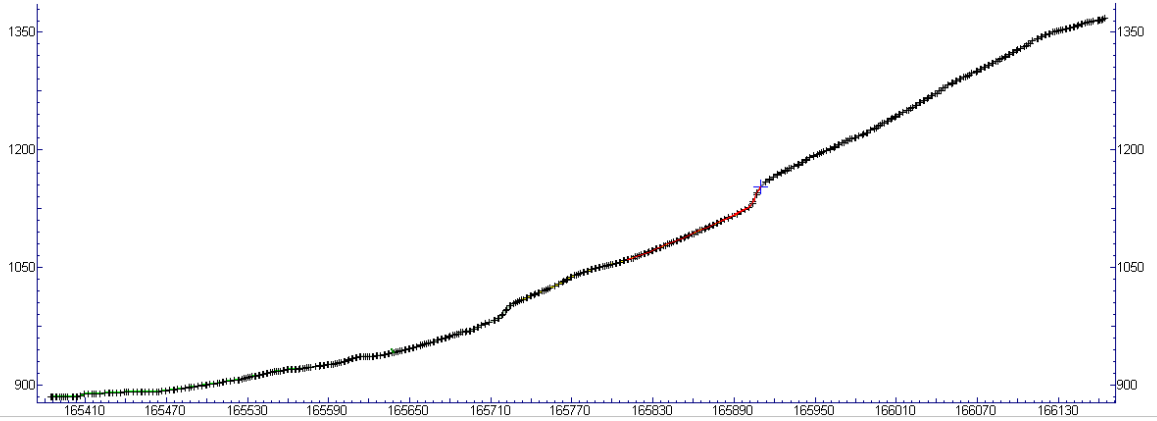
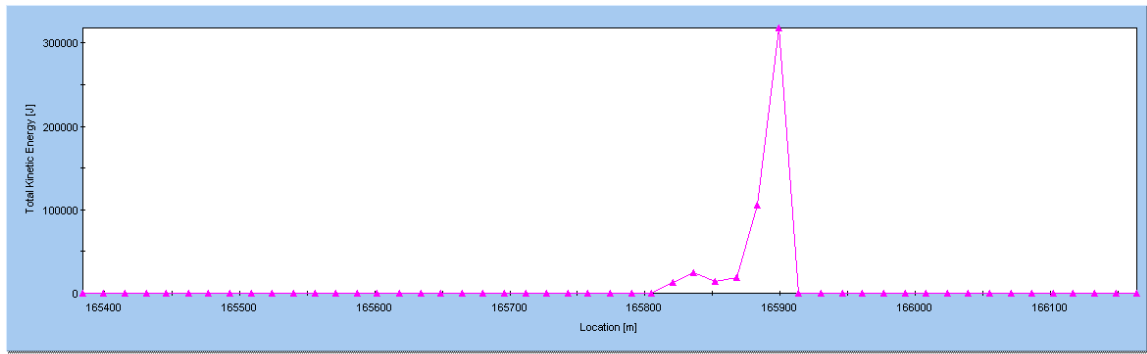
Profil 3 – natürlicher Hang, Reibungswinkel 26,5°

Total Kinetic Energy Envelope



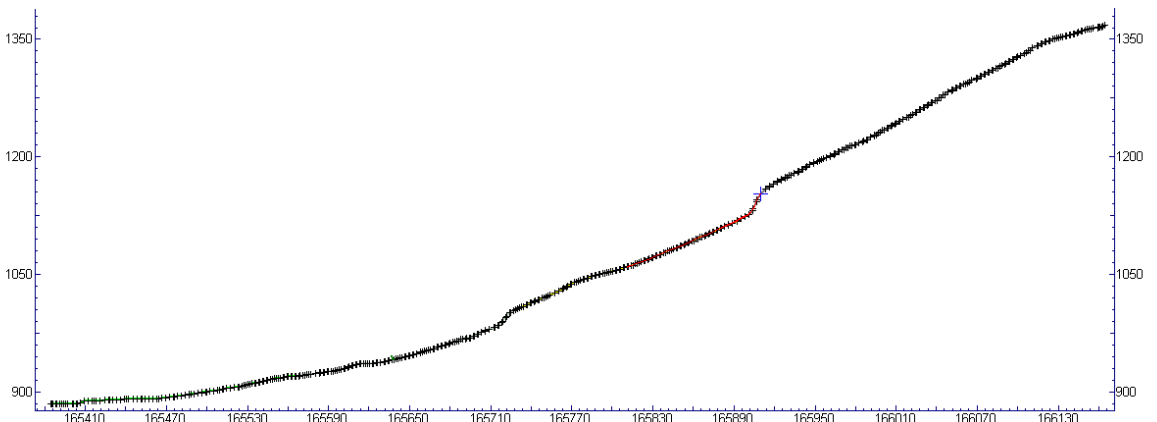
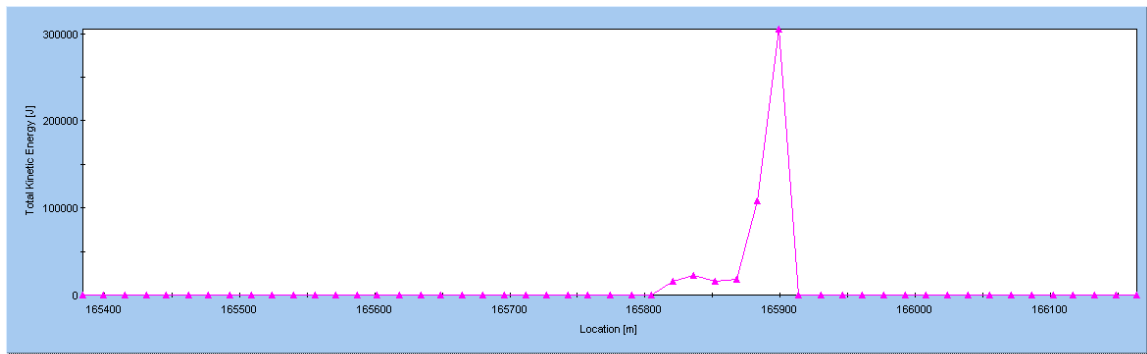
Profil 3 – natürlicher Hang, Reibungswinkel 45°

Total Kinetic Energy Envelope



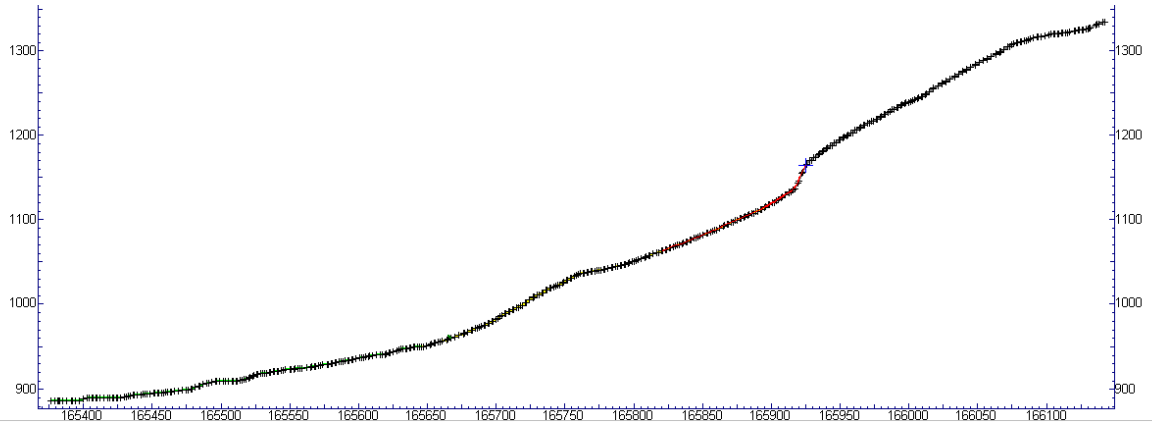
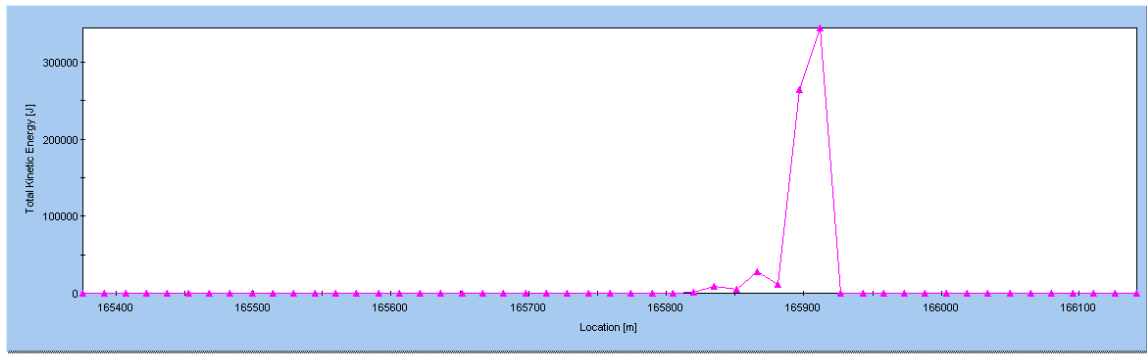
Profil 4 – natürlicher Hang, Reibungswinkel 26,5°

Total Kinetic Energy Envelope



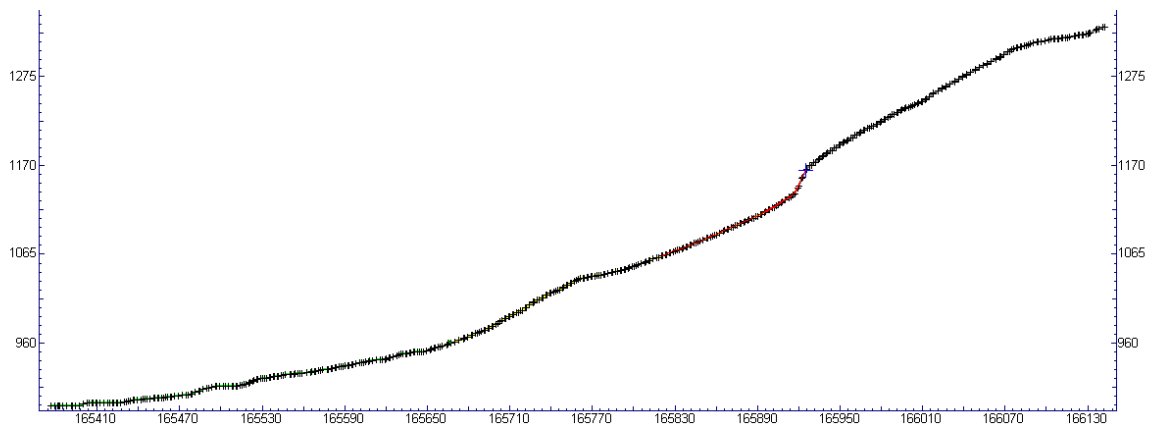
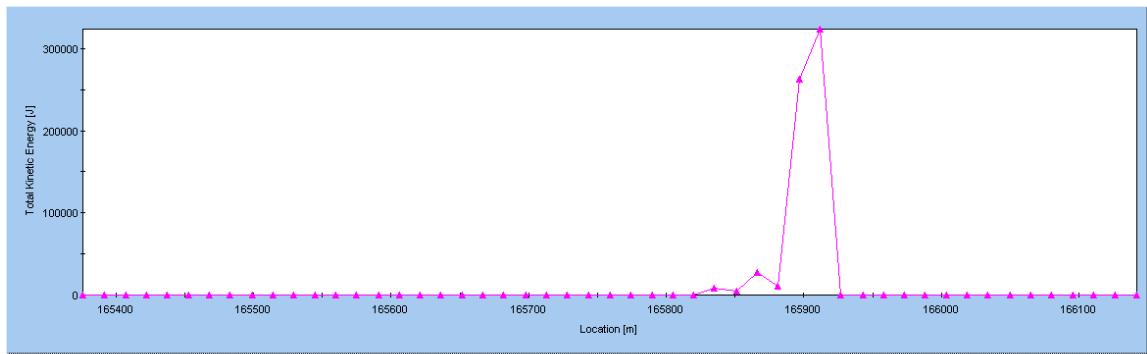
Profil 4 – natürlicher Hang, Reibungswinkel 45°

Total Kinetic Energy Envelope



Profil 5 – natürlicher Hang, Reibungswinkel 26,5°

Total Kinetic Energy Envelope



Profil 5 – natürlicher Hang, Reibungswinkel 45°