

Christian Gögele, BSc

**Stabilitätsanalyse einer Felswand mittels terrestrischem
Laserscan nördlich der Ortschaft Moos in Passeier (Südtirol)**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science

Masterstudium Erdwissenschaften

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Ao.Univ.-Prof. Mag.rer.nat. Dr.rer.nat. Qian Liu

Institut für angewandte Geowissenschaften

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

Datum

Unterschrift

Danksagung

Am Ende meines Studiums ist es Zeit mich bei allen zu bedanken, die mich in meinen Entscheidungen über all die Jahre stets unterstützt haben und mir auch in schwierigen Situationen zur Seite gestanden sind. Großer Dank gebührt dabei vor allem meinen Eltern und Geschwistern.

Des Weiteren danke ich allen Kommilitonen und Professoren die ich seit meinem Studienanfang in Innsbruck kennen und schätzen gelernt habe.

Ein spezieller Dank gilt auch meinen Mitbewohnern in der WG mit denen ich unzählige lustige Stunden, unterhaltsame Kaffeepausen und auch ernste Diskussionen haben durfte.

Mein größter Dank jedoch gilt Herrn Ao.Univ.-Prof. Mag.rer.nat. Dr.rer.nat. Qian Liu, der sich auf meine Anfrage hin sofort bereit erklärt hat, den weiten Weg nach Südtirol in Kauf zu nehmen und diese Masterarbeit zu betreuen. Er hat mir jederzeit bei verschiedensten Problemen mit hoher Kompetenz, großem Einsatz und Freundlichkeit zur Seite gestanden.

Zusammenfassung

Rund um die Ortschaft Moos in Passeier (Südtirol) kommt es aufgrund der topographischen Lage immer wieder zu Steinschlägen. Für besonders gefährlich wird eine subvertikale Felswand 500 m nördlich der Ortschaft angesehen, weshalb es notwendig ist diese genauer zu untersuchen und eine Stabilitätsanalyse durchzuführen. Aufgrund des unzugänglichen Geländes ist eine konventionelle Trennflächenvermessung mit sehr hohem Aufwand verbunden und deswegen wurde entschieden, auf eine Fernerkundungsmethode mit einem terrestrischen Laserscanner (LiDAR) zurückzugreifen. Damit ist es möglich, das Relief der Felswand hochpräzise zu erfassen und mit der Software „RiSCAN PRO“ ein virtuelles Modell zu generieren. Mit Hilfe von hochauflösenden Fotos werden Trennflächen ortbezogen eingebaut und wird ein Kluftmodell erstellt. Ebenso kann das Volumen, der benötigte Reibungswinkel und die Form der potentiell instabilen Blöcke in weiterer Folge berechnet und dargestellt werden. Die ermittelten Daten werden abschließend dazu verwendet, um mit der Software RAMMS :: Rockfall eine realistische, dreidimensionale Felssturzsimulation durchzuführen und um die Reichweite der Sturzblöcke zu ermitteln und das Gefahrenpotential einzuschätzen.

Abstract

Around the village of Moos in Passeier (South Tyrol), rockfalls happen consistently due to the unfavorable topography. A sub-vertical rock face 500 m north of the village is particularly dangerous and it is necessary to examine them more closely and assess its stability. Due to the inaccessible terrain, a conventional discontinuity measurement using compass and tape rule would be very expensive and therefore it was decided to use remote sensing methods, which include the applications of a terrestrial laser scanner (LiDAR) and real time kinematic GPS (RTK-GPS). This combination makes it possible to record the relief of the rock face with high precision and to generate a virtual outcrop model (VOM). With the help of high-resolution digital photos, the in-situ discontinuities have been fitted into the VOM and a realistic fracture system model has been created. Consequently, the volume, the required friction angle and the shape of the potentially unstable blocks can be identified, computed and subsequently visualized. Finally, the rock block data are used to perform a three-dimensional rockfall simulation with the software RAMMS :: Rockfall and to determine the runout distance of the potential danger blocks.

1 Inhaltsverzeichnis

1	Problemstellung und Ziel.....	3
2	Arbeitsgebiet Moos in Passeier (Südtirol, Italien).....	4
2.1	Allgemeines	4
2.2	Geographie	4
3	Geologie.....	5
3.1	Lage und Übersichtskarte.....	5
3.2	Tektonik.....	6
3.3	Deformationsphasen D1 – D4 im Texelkomplex.....	7
3.4	Petrologie	7
4	Methodik	8
4.1	Geländebegehung	8
4.2	Fernerkundung mittels terrestrischem Laserscan (LiDAR).....	11
4.3	Auswertung der Daten mit verschiedenen Computerprogrammen	15
4.3.1	RiSCAN PRO	15
4.3.2	Rocscience Dips	15
4.3.3	Blocktheorie Programme	15
4.3.4	RAMMS :: Rockfall	16
5	Auswertung und Ergebnisse	17
5.1	Datenvorbereitung	17
5.1.1	GPS-Daten.....	17
5.1.2	Scan-Registrierung.....	18
5.1.3	Multi Station Adjustment (MSA)	19
5.1.4	Ergebnis der Scan-Registrierung.....	22
5.2	Trennflächeneinbau	23
5.3	Auswertung der Trennflächen nach ihrer Orientierung.....	25
5.4	Block Theorie.....	30
5.4.1	Allgemeines	30
5.4.2	Generierung von möglichen Blöcken	31
5.4.3	Stabilitätsanalyse von identifizierten „key blocks“	34
5.5	Steinschlagsimulation mit RAMMS :: Rockfall.....	47
5.5.1	Kalibrierung der Felssturzsimulation.....	47
5.5.2	Ergebnis der Felssturzsimulation.....	50
6	Interpretation der Ergebnisse	51
7	Diskussion.....	51

8	Fazit	52
9	Quellen	54
10	Abbildungsverzeichnis.....	55
11	Tabellenverzeichnis	57
12	Anhang.....	58

1 Problemstellung und Ziel

Moos in Passeier ist ein kleines Dorf im hinteren Passeiertal, das sich zwischen steil aufragenden Berghängen befindet. Durch die vorgegebene Topographie kommt es immer wieder zu größeren Felsstürzen in der näheren Umgebung des Dorfes. Ziel dieser Arbeit ist es, eine subvertikale Felswand, die sich nördlich der Ortschaft und südlich vom sogenannten „Gamsberg“ befindet, mit einem Laserscanner zu erfassen und mit diesen Daten ein detailgetreues dreidimensionales Oberflächenmodell zu erstellen. Dieses virtuelle Modell wird dann dazu verwendet die Trennflächen des Gebirges zu rekonstruieren und instabile Blöcke zu identifizieren. Mit diesen Daten kann in weiterer Folge eine Stabilitätsanalyse und eine Felssturzsimulation durchgeführt werden um das Gefahrenpotential für die darunterliegende Staatsstraße und das Dorf abschätzen zu können.

2 Arbeitsgebiet Moos in Passeier (Südtirol, Italien)

2.1 Allgemeines

Die Gemeinde Moos in Passeier in Südtirol (Italien) befindet sich im hinteren Passeiertal und grenzt im Norden direkt an das Bundesland Tirol in Österreich. Sie ist mit 194,58 km² die flächenmäßig größte Gemeinde im Passeiertal und zählt ca. 2100 Einwohner. Das Gemeindegebiet umfasst die Ortschaften Moos, Platt, Pfelders, Stuls, Ulfas und Rabenstein und erstreckt sich von etwa 700 m im Talboden bis hinauf auf den 3480 m hohen Gipfel der Hohen Wilde.

2.2 Geographie

Die Ortschaft Moos (Abb. 1) befindet sich auf ungefähr 1000 m Meereshöhe, direkt an der Staatsstraße 44 die zum Timmelsjoch führt. Dieser Hochgebirgspass verbindet das Ötztal im Norden mit dem Passeiertal im Süden. Das für diese Arbeit relevante Gebiet liegt vor allem auf der nordöstlichen Talseite, da hier sehr steile Felswände genau oberhalb des Dorfes liegen und somit ein hohes Risiko in sich bergen.

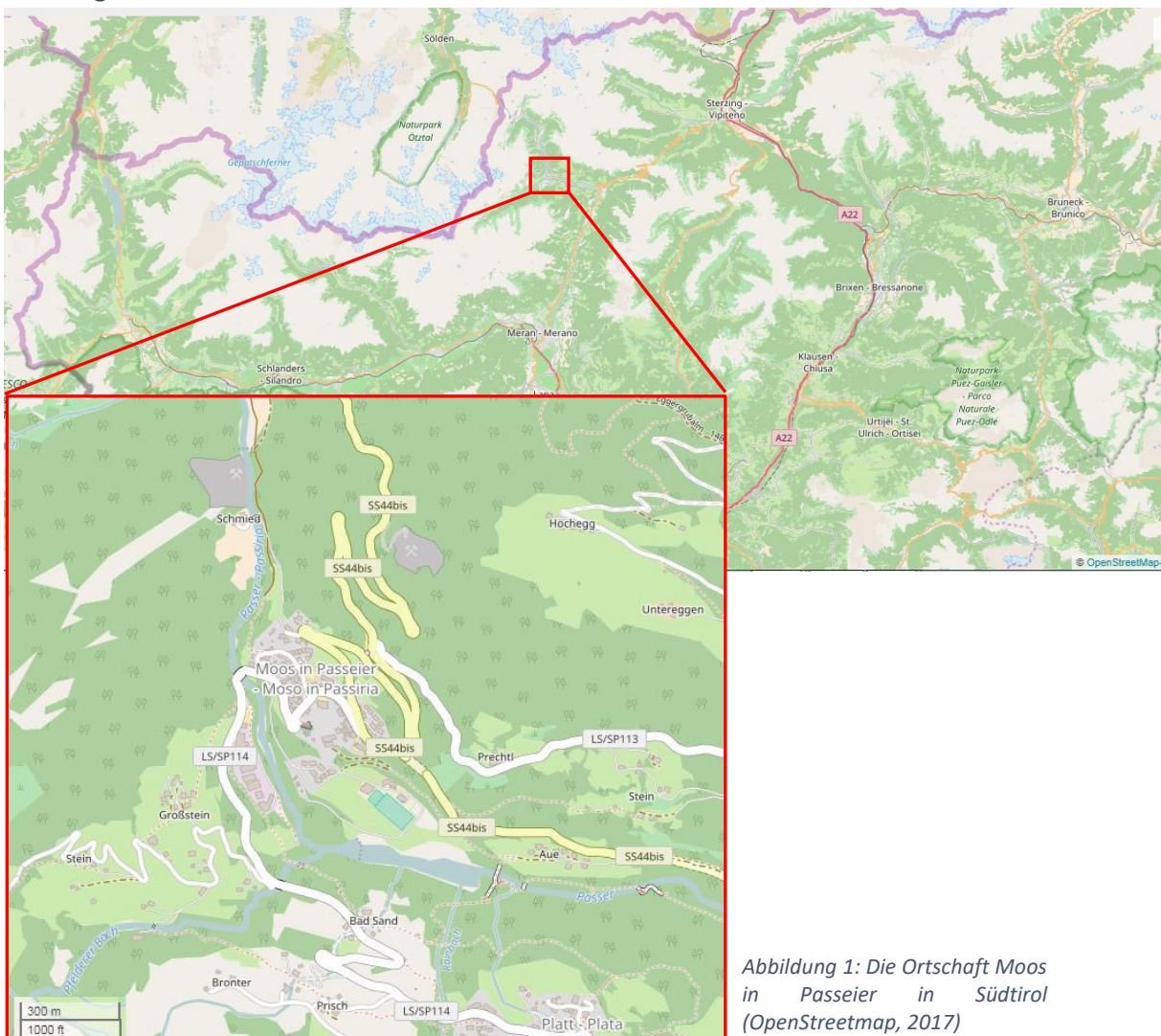


Abbildung 1: Die Ortschaft Moos in Passeier in Südtirol (OpenStreetmap, 2017)

3 Geologie

3.1 Lage und Übersichtskarte

Die Ortschaft Moos in Passeier und somit das Arbeitsgebiet der vorliegenden Arbeit befindet sich im sogenannten Texel Komplex nordwestlich der Periadriatischen Naht. Im Norden wird die Schneeberg Normal Fault Zone (SNFZ) und der Ötztal-Stubai Komplex als tektonische Grenze angesehen. Die Schlingig Linie und die Vinschgau Scherzone stellen die tektonischen Grenzen nach W (Ötztaler Decke) und S (Ortler-Campo-Kristallin) dar. Im SE trennt die Passeier- und die Jaufen-Störung den Texel vom Meran-Mauls Komplex.

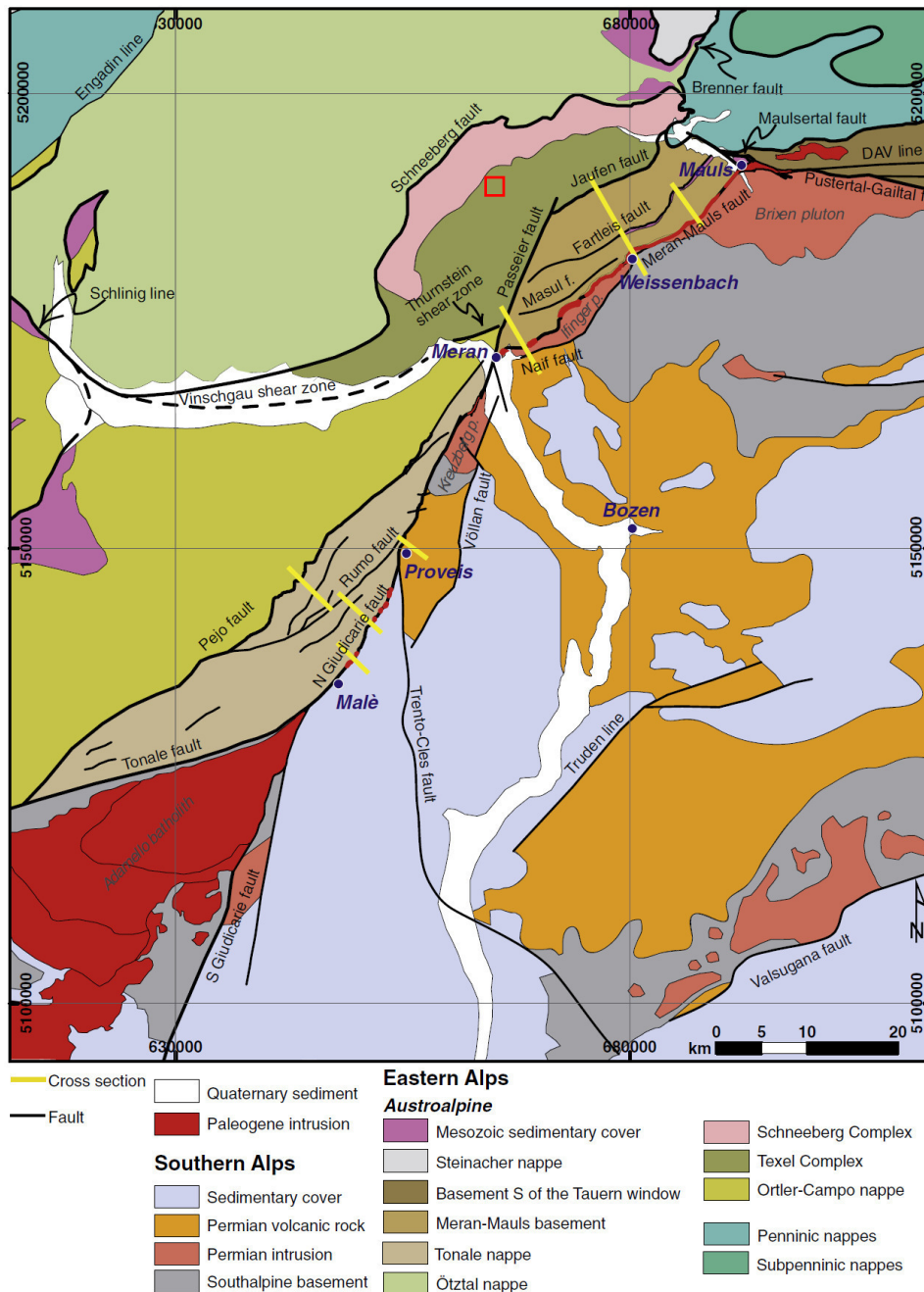


Abbildung 2: Übersichtskarte auf das Arbeitsgebiet (in rot markiert) und die tektonischen Einheiten (Pomella et al. 2012)

3.2 Tektonik

Die Genese des Texel Komplexes in der Unterkreide (Berriasium – Valanginium) resultiert aus einer intrakontinentalen Scherzone im Zuge der Schließung des Meliata Ozeans (Abb. 3). Diese Scherzone wird als Verlängerung der Suturzone des Meliata Ozeans interpretiert (u.a. Frank & Schlager, 2006) und trennt die nordapulische Platte (Unterplatte) von der südapulischen Platte (Oberplatte). Der Texel Komplex löst sich in diesem Stadium aufgrund der Konvergenz aus der Unterplatte und entwickelt sich eigenständig entlang der SE einfallenden Scherzone. Nachdem sich der Piedmont Liguria Ozean im W zu schließen beginnt, wird der eklogitfazielle Texel Komplex in der Tiefe gehalten, bis ab ca. 90 Ma eine liothermale Kompression erfolgt. In der Oberkreide wird das kompressive Regime durch einen extensionalen Kollaps abgelöst. Aufgrund der spätkretazischen Extension (Campanium – Maastrichtium) wird der ostalpine Deckenstapel durch ost- bis südostgerichtete Abschiebungen überprägt (Froitzheim et al., 1994; Wagreich et al., 1995).

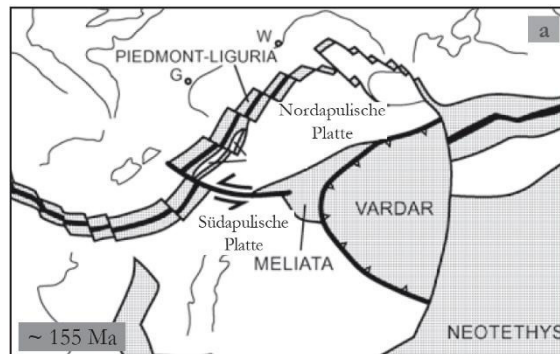


Abbildung 3: Paläographische Rekonstruktion in der Unterkreide (Schmid et al., 2004)

Der Übergang in das Eozän ist durch eine erneut einsetzende Kollisionstektonik gekennzeichnet. Nach Meier (2003) entwickelten sich im Eozän großmaßstäbliche Verfaltungen im Campo Komplex und den benachbarten Gebieten. Als Ursache dafür beschreibt er eine spätkollisionale NNW-SSE gerichtete Kompression. Diese führt zu einer regionalen Deformation der südwestlichen oberostalpinen Einheiten mit E-W bis ENE-WSW streichenden Falten. Laut Habler (2006) erfolgt die Exhumation des Texel Komplexes bis ins Eozän sehr rasch, während sich die Exhumationsrate seit dem Eozän stark verlangsamte. Das Arbeitsgebiet befindet sich in der heutigen Situation im oberen Bereich der Antiform des Texel Komplexes (Abb. 4).

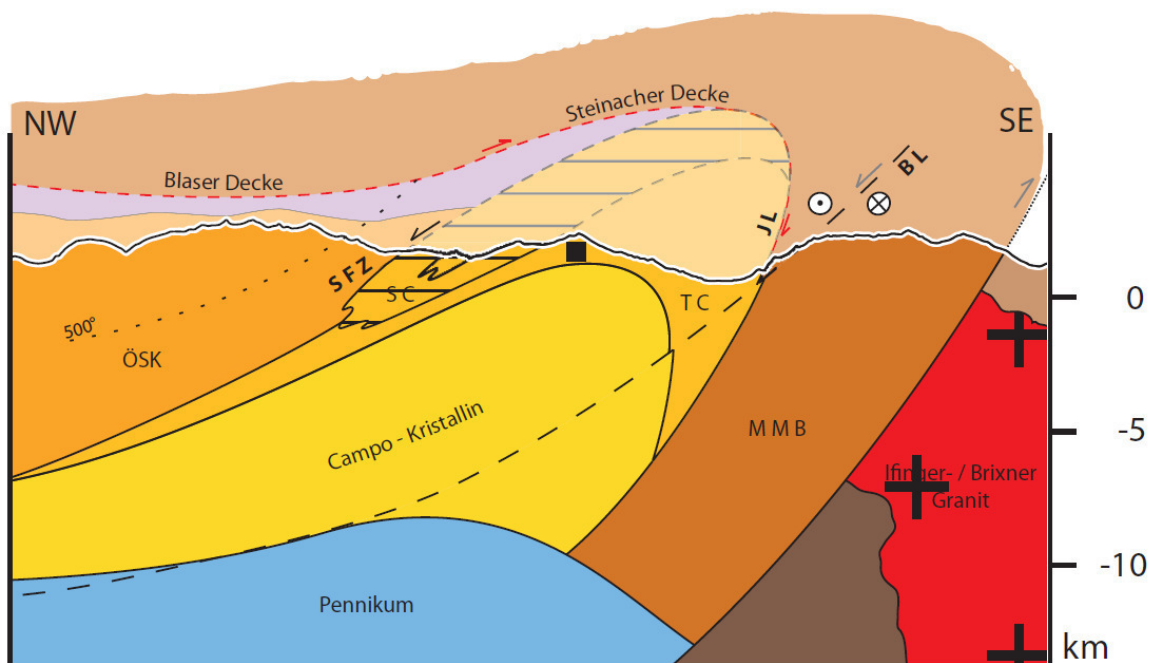


Abbildung 4: Rezente Situation im Bereich des Arbeitsgebietes, das schwarze Quadrat zeigt ungefähr die Lage des Arbeitsgebietes (Speckbacher, 2009)

3.3 Deformationsphasen D1 – D4 im Texelkomplex

Sölva (2005) beschreibt, dass im Texelkomplex 4 Deformationsphasen (D1 – D4) unterschieden werden können. Die Deformationsphase D1 (Abb. 5) passiert im Texel Komplex zeitgleich mit der eo-alpinem Hochdruck-Metamorphose und wird gekennzeichnet durch SE-NW bis WSW-ENE orientierte Streckungslineare (Sölva et al., 2001). Die Foliation fällt normalerweise mit 25° in Richtung NNW ein. Die zweite Deformationsphase D2 (Abb. 5) wird durch enge Falten mit nach N fallenden Faltenachsen charakterisiert. Kompetente Lithologien erhielten die ursprüngliche E-Vergenz der D2 Falten. Die ursprüngliche Wellenlänge beträgt ungefähr 1 km. Die Deformationsphase D3 (Abb. 5) entspricht einer intensiven Faltung mit subhorizontalen E-W streichenden Achsen und nach N abtauchenden Achsenebenen, die in unterschiedlichen, ein paar hundert Meter dicken Scherzonen auftreten. Die Deformationsphase D4 (Abb. 5) zeichnet sich durch lokal vorhandene offene Falten mit NW-SE orientierten Achsen und steil stehenden Achsenebenen aus. (Sölva et al., 2005)

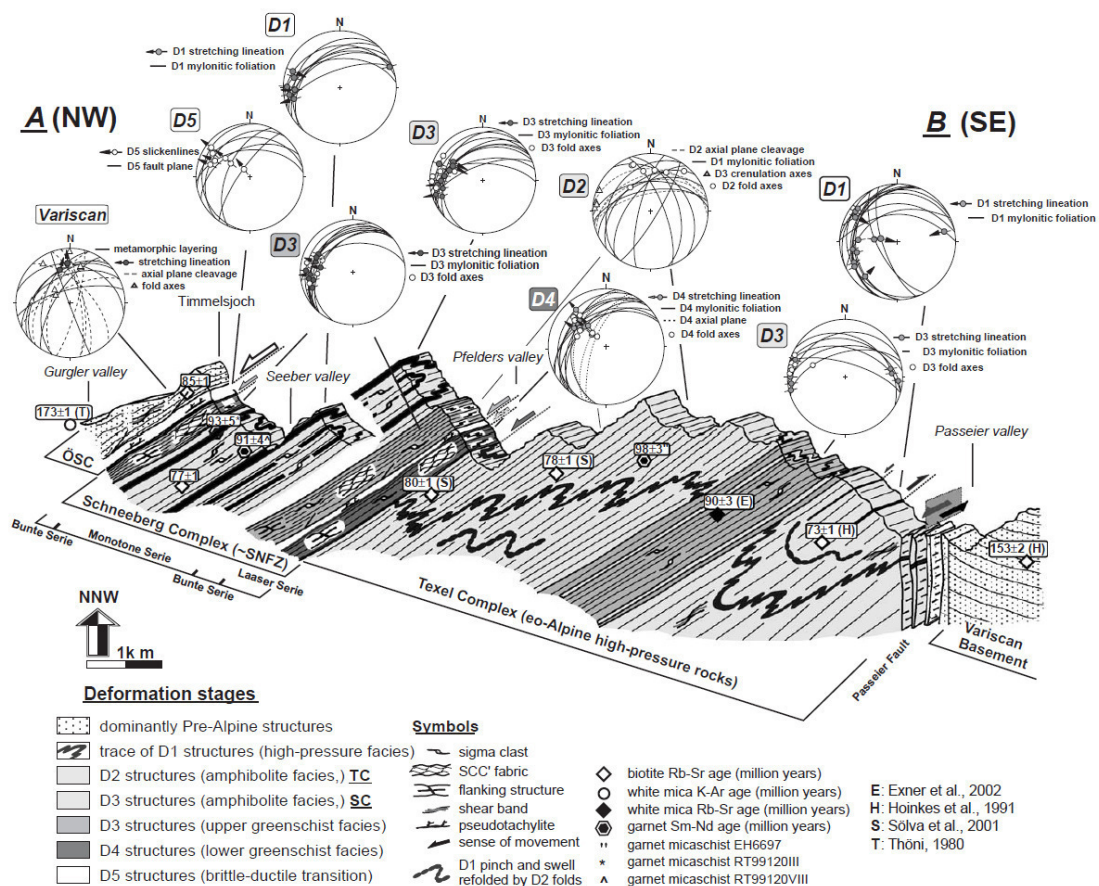


Abbildung 5: Querschnitt durch den Texel und Schneeberg Komplex, die Stereoplots zeigen die Orientierungen der planaren und linearen Gefügeelemente in den verschiedenen Deformationsphasen der eo-alpinen Scherzone (Sölva, 2005)

3.4 Petrologie

Im Texel Komplex kommt eine Vielzahl an verschiedenen Lithologien vor, die Hinweise auf die Komplexität des Ablagerungsraumes und auf die tektonische Entwicklung geben. Neben Eklogiten, Amphiboliten, Quarziten, Glimmerschiefern, Paragneisen, Marmoren und Kalkglimmerschiefern treten auch Orthogneise in Form von Biotit-Granitgneisen und Augengneisen auf (Sander & Hammer 1920).

4 Methodik

Um das Gefahrenpotential der Felswand oberhalb der Ortschaft Moos in Passeier entsprechend einschätzen zu können, kamen die in den nachfolgenden Unterkapiteln genauer erklärten Methoden zur Anwendung:

- Geländebegehung
- Fernerkundung mittels terrestrischem Laserscan (LiDAR)
- Auswertung der Daten mit verschiedenen Computerprogrammen

4.1 Geländebegehung

Die ersten geologischen Erkundungen fanden bereits im Herbst 2016 statt und dienten vor allem dazu, einen Überblick über das schwierig zu erfassende Gelände und die vorhandene Geologie zu gewinnen. Weiters wurden bestmögliche Positionen für den terrestrischen Laserscanner gesucht. Die wichtigste Voraussetzung dafür ist, dass eine klare Sichtlinie vom Instrument zur Felswand gegeben sein muss (Abb. 6). Eine Scanposition sollte so gewählt werden, dass die maximale Abdeckung des Untersuchungsgebietes innerhalb der maximalen Reichweite und Winkelsicht des Instrumentes erreicht wird. Dabei gilt es zu erwähnen, dass die maximale Reichweite eines Scanners stark von den reflektierenden Eigenschaften des Zielmaterials abhängt. Je heller das Material desto besser wird der Laserstrahl reflektiert. Die Herstellerspezifikationen werden meistens, mit einem entsprechenden Korrekturfaktor für Bereiche mit stärkerer oder schwächerer Reflektion, in Bezug auf ein bestimmtes Reflexionsvermögen angegeben (Wehr & Lohr, 1999). Es kann daher sein, dass die maximale Reichweite eines Scanners für Ziele mit einer Reflektivität von 80% angegeben ist und es deshalb bei Zielen mit geringerem Reflexionsvermögen zu weit geringeren Reichweiten kommt (Riegl, 2007).



Abbildung 6: Blick von Scanposition 1 auf die Felswand, die Trennflächen werden zum Teil von Vegetation verdeckt

Retroreflektierende Markierungen können allerdings über weitaus größere Distanzen ermittelt werden. Nackter Fels hat normalerweise einen guten Reflektionsgrad von bis zu 75% (Wehr & Lohr, 1999). Auch atmosphärische Bedingungen haben einen Einfluss, so wird bei hoher Luftfeuchtigkeit das Laserlicht gestreut was ebenso zu einer reduzierten Reichweite führt. Die besten Ergebnisse werden erzielt, wenn der Sensor möglichst orthogonal zum Ziel positioniert wird. Die Sichtlinie des Scanners sollte, wenn möglich, nicht von Vegetation oder anderen störenden Umgebungseinflüssen beeinträchtigt werden, sonst kommt es zu „Schatten“ (Löcher in den Daten, die von einem dazwischenliegenden Objekt verursacht werden), die wie eine schlechte Bilderfassung auf einem Foto erscheinen. Für die meisten Aufschlussstudien wird aufgrund der dreidimensionalen geologischen Komplexität ein einzelner Scan nicht ausreichend sein, viele Details sind oft nur schräg zum Normal ersichtlich oder werden sogar komplett verdeckt. Aus diesem Grund ist es üblich, mehrere Scans aus verschiedenen Positionen zu erfassen, um einen möglichst vollständigen Datensatz zu erhalten. Oft wird eine sehr große Überlappung generiert um sicherzustellen, dass das komplexe Gelände zur Gänze abgedeckt ist und die Abschattungen auf ein Minimum reduziert werden können (Buckley et al., 2008). Das Kriterium der Orthogonalität gilt nicht nur zur Streichrichtung des Aufschlusses, sondern auch für die Höhe. Wenn der Laserscanner viel niedriger platziert werden muss als der Aufschluss, wie es beim Blick auf eine Felswand häufig der Fall ist, dann wird die Sichtlinie zu allen Bereichen bereits problematisch. Eine erhöhte Scanposition, typischerweise von der gegenüberliegenden Seite einer Schlucht oder eines Tales, kann das Problem lösen, ist aber nicht immer möglich (Abb. 7). Eine niedrige Instrumentenposition führt zu einer extremen Abschattung und infolge dessen kommt es zu einer geringeren Abdeckung und schlechteren Qualität der Daten. In solchen Situationen kann die Datenerfassung mit Fotogrammetrie oder Laserscanning aus der Luft effizienter sein oder zusätzlich zum terrestrischen Laserscannen verwendet werden (Labourdette & Jones, 2007).

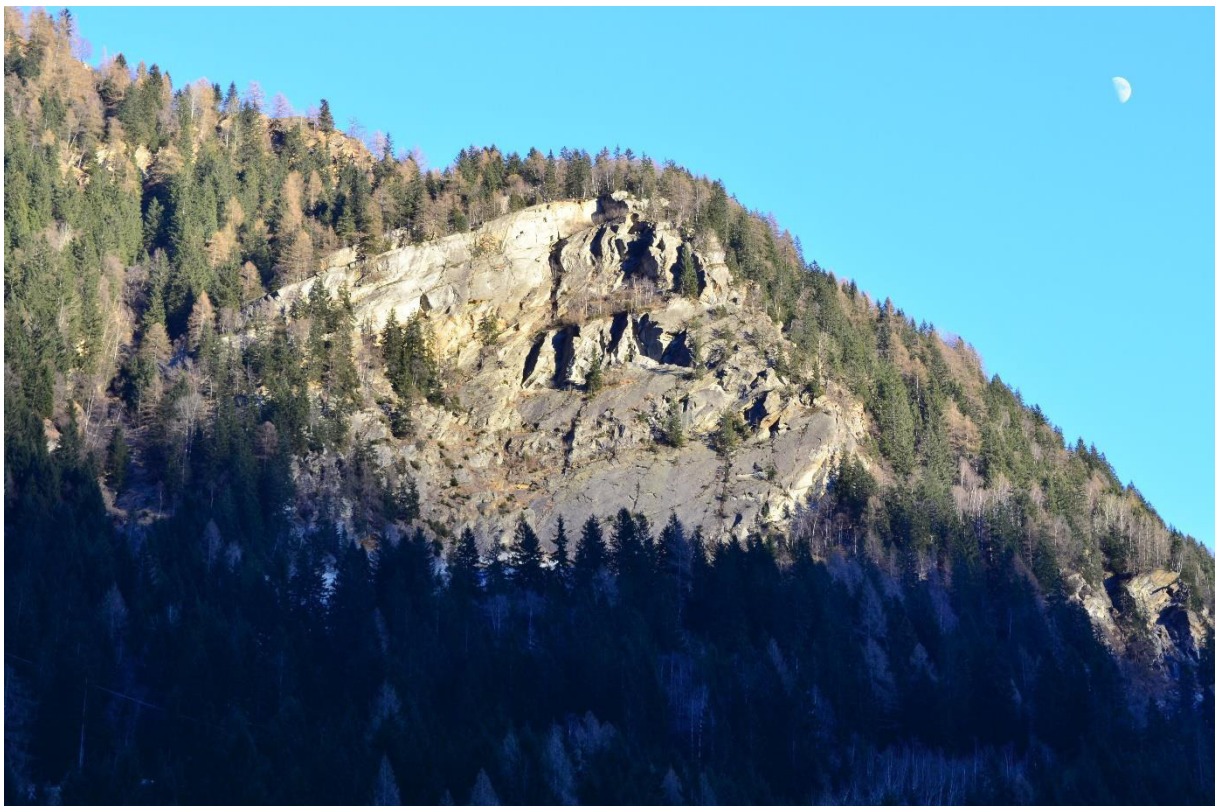


Abbildung 7: Blick von der Scanposition 2 auf die Felswand, ein höherer Standort wäre idealer ist aber nicht möglich

Folgende Scanpositionen (exakte Koordinaten in Tabelle 1) wurden im Gelände als für geeignet angesehen:

Scanposition SP1: Abstand zur Felswand ca. 440 m

Scanposition SP2: Abstand zur Felswand ca. 730 m

Scanposition SP3: Abstand zur Felswand ca. 150 m

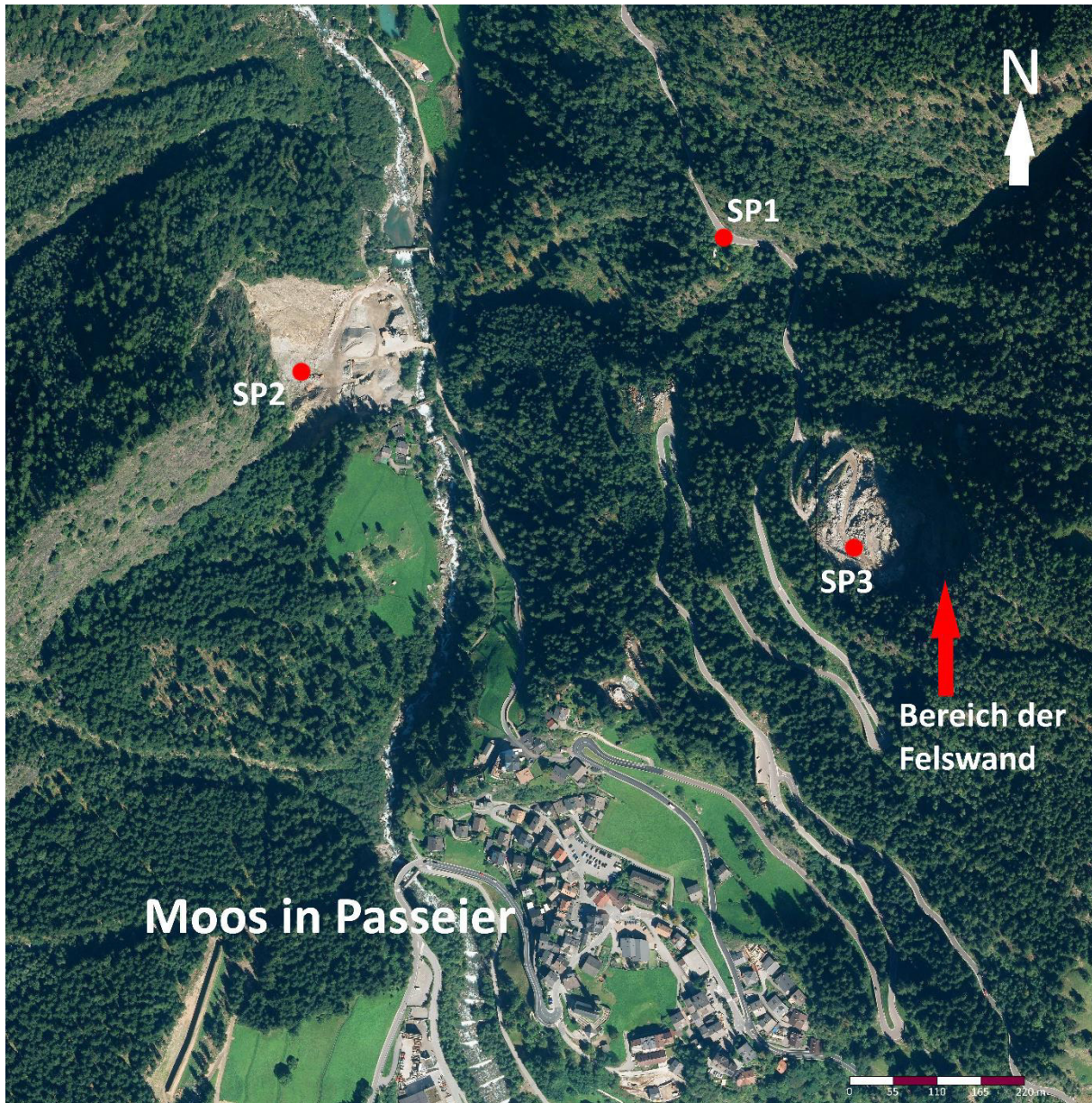


Abbildung 8: Die verschiedenen Scanpositionen neben der Felswand
(<http://gis2.provinz.bz.it/geobrowser>, 16.11.2017)

Im Zuge dieser Geländebegehungen wurden auch Fotos aus verschiedenen Blickwinkeln gemacht, um zusätzliche Informationen für die Auswertung des Trennflächengefüges mit dem 3D-Laserscanmodell zur Hand zu haben. Die Fotos sind im Anhang beigefügt.

4.2 Fernerkundung mittels terrestrischem Laserscan (LiDAR)

Das terrestrische Laserscannen (LiDAR) ist eine Technik, die in letzten 10 Jahren in der Geologie stark an Interesse gewonnen hat. Dieses laserbasierte Messsystem ist mittlerweile sehr ausgereift und ermöglicht eine schnelle Erfassung von detaillierten Punktdaten von einer luft- oder bodengestützten Plattform aus. Die gemessenen Daten können anschließend für verschiedene Zwecke verwendet werden, z.B. Kartierung, digitale Höhenmodelle (DEMs), Erosionsüberwachung, Hochwassermodellierung und vieles mehr (Wehr & Lohr, 1999).

Diese Technologie hat sich in den letzten Jahren sehr schnell weiterentwickelt und ist mittlerweile klein und robust genug um sie in verschiedensten Umgebungen praktisch einsetzen zu können. Besonders im Bereich der Geologie ist das Interesse und Potenzial deshalb sehr hoch, weil im Vergleich zu Fotogrammetrie komplexe, ortsbezogene Punktwolken mit echten 3D-Daten erstellt und verarbeitet werden können. Die Eigenschaft, dass geologische Aufschlüsse mit hoher Genauigkeit und Auflösung erfasst und charakterisiert werden können, hat eine Reihe von Vorteilen in Bezug auf die Interpretation der quantitativen Daten im virtuellen Modell (McCaffrey et al., 2005). Aufgrund dessen ergänzt sich das Laserscannen sehr gut mit den traditionellen Geländemethoden. Je nach Anwendungsbedarf ändert sich dabei auch die erforderliche Genauigkeit und dies sollte bereits im Vorfeld entsprechend geplant und berücksichtigt werden.

Die Ablenkung des Laserstrahles mithilfe eines Systems aus rotierenden Spiegeln auf einem sich drehenden Sensorkopf ermöglicht die Erfassung von horizontalen und vertikalen Winkelkomponenten. In Kombination mit der Reichweitenmessung ist es somit möglich exakte 3D-Koordinaten (x,y,z) zu berechnen. Einige solcher Systeme sind in der Lage mit sehr hoher Geschwindigkeit zu arbeiten und Tausende von Punkten pro Sekunde zu erfassen. Mit den meisten LiDAR-Sensoren ist es zusätzlich möglich die Stärke (Intensität) des reflektierten Laserstrahls zu messen, da diese sich, abhängig von der Materialoberfläche und der verwendeten Wellenlänge des Lasers, ändert. Moderne LiDAR-Systeme werden immer häufiger mit eingebauten oder separat montierten und exakt kalibrierten Digitalkameras ausgestattet, die verwendet werden können um Echtfarbinformationen für die gemessenen LiDAR-Punkte zu erhalten oder um zusätzliche digitale Bilder anzufertigen (Buckley et al., 2008).

Für diese Arbeit wurde der terrestrischer Laserscanner LMS-Z620 der Firma RIEGL (Abb. 9) verwendet um die 3D-Daten vom Aufschluss zu erfassen. Zusätzlich wurde eine Kipphalterung und ein RTK-GPS (real time kinematic-global positioning system) bei den Laserscannmessungen benutzt. Der Vorteil der Kipphalterung ist, dass damit der Laserscanner geneigt

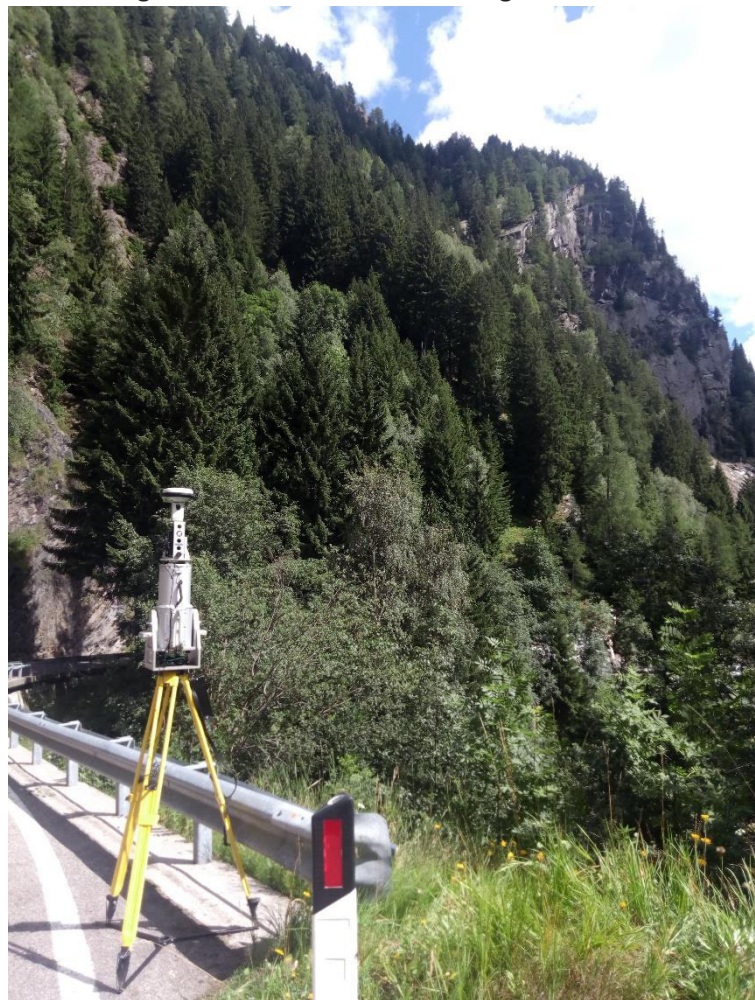


Abbildung 9: RIEGL LMS-Z620 Laserscanner mit montiertem Leica Viva GNSS GS15, im Hintergrund die Felswand

werden kann und dadurch die Winkelsicht entsprechend erweitert wird. Das GPS-Gerät wurde zum Messen der globalen Koordinaten, die für die nachfolgende Registrierung und Georeferenzierung der Daten notwendig sind, verwendet.

Ein LiDAR-System sollte in erster Linie auf seinen Verwendungszweck hin ausgewählt werden. Geologische Feldstudien können in verschiedenen Skalen, vom Mikro bis zum Makrobereich, durchgeführt werden. Basierend auf den erforderlichen Details sollte die Auswahl des Scanners getroffen werden. Je nach Aufschlussgröße ist es wichtig auf eine entsprechende Reichweite und Genauigkeit zu achten. Bei einer großen Reichweite (bis ca. 1000 m) ist eine mittlere Genauigkeit (Punktpräzision um 0,01 m) am besten geeignet (Buckley et al., 2008). Die genauen technischen Spezifikationen des RIEGL LMS-Z620 Laserscanners sind in Abb. 10 aufgelistet.

Technical Data 3D Scanner Hardware RIEGL LMS-Z620

Rangefinder performance ¹⁾

Eye safety class



according to IEC60825-1:1993+A1:1997+A2:2001
The following clause applies for instruments delivered into the United States:
Complies with 21 CFR 1040.10 and 1040.11 except for deviations pursuant
to Laser Notice No. 50, dated July 26, 2001.

Max. Measurement range ²⁾

for natural targets, $\rho \geq 80\%$

for natural targets, $\rho \geq 10\%$

up to 2000 m

up to 650 m

Minimum range

2 m

Accuracy ^{3) 5)}

10 mm

Repeatability ^{4) 5)}

10 mm (single shot), 5 mm (averaged)

Measurement rate

up to 11000 pts/sec @ low scanning rate (oscillating mirror)

up to 8000 pts/sec @ high scanning rate (rotating mirror)

Laser wavelength

near infrared

Beam divergence ⁶⁾

0.15 mrad

1) First, Last, or Alternating Target Mode selectable.

2) Typical values for average conditions. Maximum range is specified for flat targets with size in excess of the laser beam diameter and near to normal incidence of the laser beam and for atmospheric visibility in excess of 23 km. In bright sunlight, the operational range is considerably shorter than under an overcast sky.

3) Accuracy is the degree of conformity of a measured quantity to its actual (true) value.

4) Precision, also called reproducibility or repeatability, is the degree to which further measurements show the same result.

5) One sigma @ 100 m range under RIEGL test conditions.

6) 0.15 mrad correspond to 15 mm increase of beamwidth per 100 m of range.

Scanner performance

Vertical (line) scan

Scanning range

0° to 80°

Scanning mechanism

rotating / oscillating mirror

Scanning rate

1 scan/sec to 20 scans/sec @ 80° scanning range

Angle stepwidth $\Delta \vartheta$ ⁷⁾

$0.004^\circ \leq \Delta \vartheta \leq 0.2^\circ$

between consecutive laser shots

Angular resolution

0.002°

Horizontal (frame) scan

Scanning range

0° to 360°

Scanning mechanism

rotating optical head

Scanning rate ⁸⁾

0.01 °/sec to 15 °/sec

Angle stepwidth $\Delta \varphi$ ⁷⁾

$0.004^\circ \leq \Delta \varphi \leq 0.75^\circ$

between consecutive scan lines

Angular resolution

0.0025°

Inclination Sensors

integrated, for vertical scanner setup position
(specifications to be found in separate datasheet)

Internal Sync Timer

Option for GPS-synchronized time stamping of scan data
(specifications to be found in separate datasheet)

Abbildung 10: Technische Daten RIEGL LMS-Z620 (RIEGL, 2008)

Während der Datenerfassung wird der Scanner für die Dauer der Messung bei einer bestimmten Position auf einem Stativ gehalten. Das Ergebnis eines einzelnen LiDAR-Scans ist eine große Menge an 3D-Daten, die normalerweise eine Größenordnung von mehreren Millionen Messpunkten mit jeweils einem x-, y-, z-, und einem Intensitätswert haben. Ein solcher Datensatz wird als Punktwolke bezeichnet und ist das „Rohprodukt“ vom Scannen. Laser-Scannen ist im Vergleich zur Fotogrammetrie eine relativ einfache Möglichkeit um einen hochauflösenden Datensatz zu erhalten der ein geologisches Arbeitsgebiet beschreibt. Trotzdem gibt es eine Reihe von wichtigen Faktoren die berücksichtigt werden müssen bevor eine LiDAR-Untersuchung durchgeführt werden kann, damit der Einsatz dieser Technologie gerechtfertigt ist.

Laserscanner haben das Potential große Mengen an Daten zu sammeln, oft werden weit mehr erfasst als für den Auftrag eigentlich benötigt werden. Es ist daher wichtig, die Auflösung auf ein vernünftiges Maß einzustellen, abhängig von der Größe und den geologischen Gegebenheiten eines Aufschlusses. Die meisten terrestrischen Laserscanner erfassen eine grob gerasterte Punktverteilung, wobei eine

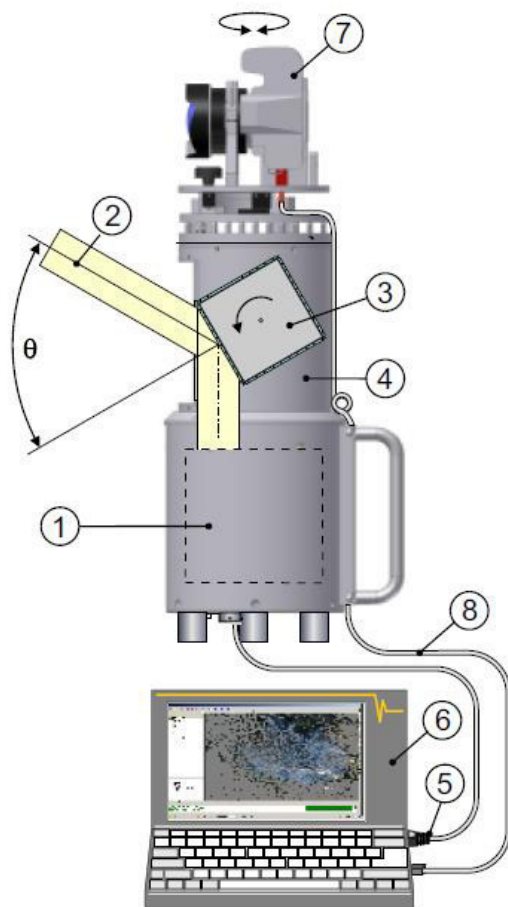


Abbildung 11: Aufbau LiDAR-Gerät: (1) Messelektronik, (2) Laserstrahl, (3) Polygon, (4) Optik, (5) Ethernet-Schnittstelle, (6) Laptop, (7) Digitalkamera, (8) USB-Schnittstelle (RIEGL 2008)

Scan-Linie (Streifen) entlang einer horizontalen oder vertikalen Winkeleinstellung erfolgt bis der Strahl abgelenkt wird und der Aufbau der nächsten Zeile des Gitters beginnt (Abb. 11). Die Auflösung des Rasterabstandes wird beim RIEGL LMS-Z620 Laserscanner in Winkeleinheiten eingegeben die den Abstand zwischen den einzelnen Punktmessungen vorgeben. Die Laserdivergenz, eine Konstante die die Größe des Laser-Fußabdruckes über die Entfernung darstellt, hat einen wichtigen Einfluss auf die Auflösung. Sie ist oft um ein Vielfaches größer als das minimale Winkelinkrement, was eine scheinbar höhere Auflösung vortäuscht. Infolge dessen kommt es bei einer zu hoch gewählten Auflösung dazu, dass feine Details verschwommen werden da sich der Laser-Fußabdruck zwischen den einzelnen Punkten überlappt.

Bei vielen geologischen Anwendungen, insbesondere bei Aufschlussgrößen-Studien, ist es wichtig zu prüfen, ob ein Datensatz mit der höchsten Auflösung (und die damit verbundenen Berechnungen und Verarbeitungsfolgen) überhaupt notwendig ist oder ob ein geringer Punkteabstand auch ausreichen könnte und dafür aber ein größeres Gebiet vermessen werden kann. Die Planung einer zweckmäßigen Untersuchung ist ein wesentlicher Bestandteil des Arbeitsablaufes (Buckley et al., 2008). Reine Punktwolken sind oft sehr schwer zu interpretieren obwohl sie die Topographie des zu untersuchenden Aufschlusses genau wiedergeben. Es ist deshalb üblich, dass eine hochauflösende Digitalkamera in den Arbeitsablauf

integriert wird um zusätzlich farbtreue Bilder zu erstellen, die auf die LiDAR-Scans bezogen sind. Diese Bilddaten mehren den Wert der Punktwolke und erleichtern die Interpretation, weil die Bildauflösung in der Regel höher ist als die Punktverteilung. Um eine Kamera und ein Objektiv für die Durchführung von genauen Messungen benutzen zu können, müssen zuerst verschiedene Parameter wie Brennweite und Verzerrung der Linsen kalibriert werden (Wolf & Dewitt, 2000).

Obwohl es unbedeutend klingt, ergeben sich aus kleinen Fehlern in der Brennweite erhebliche Skalierungsfehler über große Entfernungen. Das hat den Effekt, dass die Bilder in Bezug auf die LiDAR-Daten falsch ausgerichtet werden und die geologische Interpretation und Messung somit verschlechtert wird. Die Größe des Objektivs sollte ebenso wie die Scanauflösung auf die geologischen Gegebenheiten des Aufschlusses angepasst werden. Beim Laserscanner LMS-Z620 ist die Kamera in einer, relativ zum Scanner-Zentrum, bekannten Position montiert und kalibriert, sodass das Ziel von beiden Geräten gleichzeitig gemessen werden. Das hat den Vorteil, dass die Fotos mit der entsprechenden Software RiSCAN Pro von RIEGL direkt mit den Scandaten in Verbindung gebracht und entsprechend referenziert werden können. Werden zusätzliche Fotos unabhängig davon erstellt können diese mit Hilfe von Referenzpunkten, die in beiden Datensätzen identifizierbar sind, mit den Scandaten registriert werden. Eine direkte Montage hat den Vorteil einer hoch genauen Registrierung und einer automatischen Berechnung der Kameraposition und Ausrichtung. Oft ist es jedoch so, dass die Position des Scanners und die Lichtverhältnisse nicht optimal für die Fotografie sind. In solchen Fällen wird eine eigenständige Bilderfassung bevorzugt oder sogar benötigt. Bei komplizierten,

unregelmäßigen Aufschlüssen kann es auch erforderlich sein, Fotos zwischen den Scanpositionen aufzunehmen (Buckley et al., 2008).

Es gibt eine Reihe von Techniken die für die GPS-Positionsvermessung zur Verfügung stehen, von Handgeräten, die einzelne Punktpositionen messen bis hin zur relativen Positionsbestimmung, wo die Koordinaten eines unbekanntes Punktes in Relation zu einem zweiten bekannten Kontrollpunkt gemessen werden (z.B. Hofmann-Wellenhof et al., 1997). Es können sowohl Single- als auch Dual-Frequenzempfänger verwendet werden, wobei der Dual-Frequenzempfänger über größere Entfernungen zwischen der Basisstation und dem unbekanntes Punkt eine höhere Messgenauigkeit liefert und weniger Zeit in Anspruch nimmt. Zur exakten Positionsbestimmung des Laserscanners und eines Reflektors (tie point) wurde ein RTK-GPS vom Typ „Viva GNSS GS15“ der Firma Leica verwendet. Um Lagegenauigkeiten im Zentimeterbereich zu erreichen wurde das GPS-Gerät mit APOS (Austrian Positioning Service) in Verbindung gesetzt um die Genauigkeit der satellitenbasierten Messungen zu unterstützen. Die GPS-Daten werden im WGS84 Format aufgenommen und können direkt am Gerät in weitere Formate umgewandelt werden. Die technischen Angaben zu Performance und Genauigkeit des GPS-Empfängers sind in Abb. 12 ersichtlich. Die Aufnahmen der Scans erfolgte an zwei Tagen im Juli 2017. Am 25.07.2017 wurde von Scanposition 1 und 2 gemessen und am 26.07.2017 erfolgte die Messung von Scanposition 3 direkt unterhalb der Felswand. Bei dieser wurde auch mit geneigtem Scanner gearbeitet.

Accuracy (rms) Code differential with DGPS / RTCM²	
DGPS / RTCM	Typically 25 cm (rms)
Accuracy (rms) with Real-Time (RTK)²	
Standard of compliance	Compliance with ISO17123-8
Rapid static (phase)	Horizontal: 5 mm + 0.5 ppm (rms)
Static mode after initialization	Vertical: 10 mm + 0.5 ppm (rms)
Kinematic (phase)	Horizontal: 10 mm + 1 ppm (rms)
Moving mode after initialization	Vertical: 20 mm + 1 ppm (rms)
Accuracy (rms) with Post Processing²	
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 ³
OTF range	up to 50 km ³
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 12: Technische Angaben zu Performance und Genauigkeit des Leica Viva GNSS GS15 Empfängers (aus Leica, 2009)

4.3 Auswertung der Daten mit verschiedenen Computerprogrammen

Nach der Aufnahme der Daten im Gelände wurden diese mit Hilfe von verschiedenen Computerprogrammen ausgewertet.

4.3.1 RiSCAN PRO

RiSCAN PRO ist eine anwendungsorientierte Begleitsoftware für die terrestrischen 3D-Laserscannersysteme der Firma RIEGL. Alle Daten, die während einer Messkampagne gesammelt werden, können in der Projektstruktur des Programmes gespeichert und verarbeitet werden. Diese Daten können verschiedene Scans, Feinscans, Digitalfotos, GPS-Daten, Koordinaten der Referenzpunkte sowie Transformationsmatrizen, die bei mehreren Scans notwendig sind um sie in ein gemeinsames Koordinatensystem zu bringen, beinhalten. Die Software wurde entwickelt, um den Arbeitsablauf zum Erfassen der Daten im Feld zu optimieren und diese direkt nach der Akquisition auf ihre Vollständigkeit hin visuell und in 3D zu überprüfen. Sie bietet auch zahlreiche Möglichkeiten die gewonnenen Daten in andere Formate zu transformieren, wodurch sie mit anderen Softwareprogrammen nachbearbeitet werden können (Data sheet RIWORLD, 2010).

4.3.2 Rocscience Dips

Die Software Dips der Firma Rocscience eignet sich zur Analyse von orientierungsbasierten geologischen Daten. Damit können geologische Daten wie auf einem manuellen Stereonetz digital visualisiert und analysiert werden. Sie verfügt zusätzlich über viele Berechnungsfunktionen, wie z.B. statistische Konturierung von Clustern, mittlere Orientierung und kinematische Analysen.

4.3.3 Blocktheorie Programme

Diese speziellen DOS-Programme von Prof. Liu basieren auf der Block Theory von Goodman & Shi (1985) und dienen der Auswertung von Versagensmechanismen und der Darstellung von instabilen dreidimensionalen Blöcken.

Das Programm mit dem Namen B02HPGL.EXE stellt Trennflächen und freie Flächen als Großkreise dar und gibt die „JP codes“ der sich bildenden Blöcke aus. Trennflächen werden mit Volllinien angezeigt und freie Flächen mit Strichlinien. Jedes Polygon, das sich daraus ergibt, ist die stereografische Projektion einer „Joint Pyramid“. Zusätzlich wird der Gleitmodus und die Gleitrichtung mit einer Zahl bzw. einer kleinen Markierung am entsprechenden Kreis angegeben.

Mit B03HPGL.EXE kann die Form und das Volumen eines beweglichen oder geschlossenen Blockes berechnet werden, dafür müssen die Orientierung der Trennflächen und freien Flächen sowie deren Abstände angegeben werden. Die erstellten Blöcke können dreidimensional und von allen Seiten dargestellt werden.

Das Programm B04HPGL.EXE zeichnet die stereografische Projektion der „Joint Pyramid“ und berechnet die Stabilität eines Blockes. Auf dem erstellten Plot ist der Reibungswinkel eingezeichnet,

der erforderlich ist um den Block stabil zu halten. Dieser kann entweder entlang einer Fläche oder entlang einer Kante, wo zwei Flächen sich verschneiden, gleiten.

B10HPGL.EXE berechnet die Einheitsvektoren entlang den Kanten jeder „Joint Pyramid“. Zusätzlich dazu werden die Gleitkraft, die Gleitrichtung und der Gleitmodus jeder „Joint Pyramid“ ausgegeben. Daraus kann dann der entsprechende „Blocktyp“ ermittelt werden. Eine positive Gleitkraft entspricht einem „Keyblock Typ I“, bei einer negativen handelt es sich um einen „Block Typ II“. Ist die Gleitkraft gleich null fehlt der Versagensmechanismus und es ergibt sich ein „Block Typ III“, der sich nicht bewegen kann.

4.3.4 RAMMS :: Rockfall

Aufgrund der komplexen Topographie nördlich der Ortschaft Moos in Passeier wurde eine 3D-Steinschlagmodellierung als ideal angesehen und die Software RAMMS :: Rockfall als Werkzeug für die Analyse zukünftiger Steinschlaggefahren ausgewählt. Dieses Modul ist das dritte in einer Reihe neben RAMMS :: Debris Flow und RAMMS :: Avalanche und wurde vom Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft) und dem Institut für mechanische Systeme (ETH Zürich) entwickelt. Das Gelände wird dabei mit hochauflösenden Modellen (DEM, digital elevation model), typischerweise mit einer Auflösung von 1 bis 10 m, erstellt und berechnet, um eine genaue Darstellung von topografischen Merkmalen wie Rinnen und Felswände zu ermöglichen. Gegenwärtig stellt das RAMMS Steinschlagmodell sieben Bodenkategorien zur Verfügung: weich, mittel weich, mittel, mittel hart, hart, extra hart und Schnee. Für bewaldete Bereiche im Gelände stehen drei Typen zur Auswahl: offener Wald, mitteldichter Wald und dichter Wald. Gesteine werden als starre Polyeder modelliert, wobei diese aus einer vorgefertigten Bibliothek verwendet werden oder selbst erstellte Punktwolken importiert werden können. Es stehen dabei geometrische Formen wie Kugeln und Würfel, aber auch Formen die durch Laserscans von realen Gesteinsbrocken angefertigt wurden zur Verfügung. Durch das Koordinatensystem der Punktwolke können Rotations- und Trägheitsmomente während der Simulation berechnet werden. In RAMMS wird die Gestein-Boden-Wechselwirkung durch Reibungsoperatoren, die an der Gesteinsoberfläche wirken, parametrisiert. Der hier verwendete Hartkontakt-Festkörper-Ansatz lässt Kräfte auf die Ecken und Kanten des Gesteinskörpers wirken, was den Vorteil hat, dass die Rolle der Gesteinsform in der Interaktion zwischen Boden und Steinblock berücksichtigt wird. Dies wiederum ermöglicht eine natürliche Modellierung der vier Gesteinsbewegungsarten: Gleiten, Rollen, Überschlagen und Springen. Stochastische Methoden zur Definition der Rückprallparameter werden dabei nicht verwendet. Die Modellierung aller vier Bewegungsmodi ist Voraussetzung für eine realistische, selbstkonsistente und risikobasierte Steinschlaggefahrenanalyse.

5 Auswertung und Ergebnisse

5.1 Datenvorbereitung

Die im Feld erarbeitete Masse an Rohdaten muss zuerst entsprechend verarbeitet und registriert werden bevor mit der Auswertung begonnen werden kann. Dafür sind vor allem die exakten RTK-GPS Daten notwendig, da mit deren Hilfe eine grobe Registrierung und Georeferenzierung vorgenommen werden kann. Danach können die gemessenen Punktwolken aus den verschiedenen Scanpositionen mit einem Software-Algorithmus (multi station adjustment) auf weniger als einen Zentimeter genau aneinander angepasst werden.

5.1.1 GPS-Daten

Für diese Arbeit wurde der vorher erwähnte GPS-Empfänger Leica Viva GNSS GS15 verwendet. Bei jeder Messung mit dem Laserscanner wurde zuerst die exakte Position des Reflektors und danach die des Scanners ermittelt. Die Messwerte sind in nachfolgender Tabelle 1 aufgelistet und bereits vom Koordinatensystem WGS84 in das Gauss-Krüger Format umgerechnet. Angegeben ist jeweils der Ost-, Nord-, und Höhenwert mit den dazugehörigen Standardabweichungen der Messungen.

Tabelle 1: RTK-GPS Messwerte für Scanner- und Reflektorposition der verschiedenen Scanpositionen (SP 1-3)

	Punktnummer	Ost [m]	Nord [m]	Höhe [m]	KQ-Lage [m]	KQ-Höhe [m]
Scanposition 1						
Reflektor	GPS0001	63768,706	189108,825	1286,553	0,012	0,034
Scanner	GPS0002	63789,356	189101,008	1284,732	0,009	0,017
Scanposition 2						
Reflektor	GPS0001	63327,934	188991,165	1056,407	0,009	0,017
Scanner	GPS0002	63328,769	188979,056	1057,694	0,011	0,024
Scanposition 3						
Reflektor	GPS0001	63900,246	188823,425	1300,237	0,009	0,025
Scanner	GPS0002	63896,476	188794,443	1301,259	0,007	0,021

5.1.2 Scan-Registrierung

Eine typische Laserscan-Vermessung führt normalerweise zu einer Anzahl von Scanpositionen, die jeweils einen oder auch mehrere Scans beinhalten. Es kann auch eine große Anzahl von Bildern vorhanden sein, insbesondere wenn ein Objektiv mit einer großen Brennweite verwendet wurde. Auch wenn die einzelnen Scans sofort visualisiert werden können, muss bei mehreren vorhandenen Scans eine Registrierung durchgeführt werden um die korrekten relativen Daten der Scanpositionen zu bestimmen. Besteht die Anforderung, die Daten in ein nationales oder globales Koordinatensystem zu konvertieren, kann GPS verwendet werden um eine absolute Koordinatentransformation zu bestimmen. Die Registrierung der Scans relativ zueinander ermöglicht es, dass die Daten in einem einzigen Koordinatensystem kombiniert, betrachtet und interpretiert werden können. Für die meisten Anwendungen reicht das aus, um alle Mess-, Interpretations- und Modellierungsaufgaben durchführen zu können. Ein wesentlicher Vorteil dieser Methode ist, dass nicht zusammenhängende Feldstudien in einem nationalen oder globalen Koordinatensystem in Relation gebracht werden können. Außerdem wird es durch die absolute Positionierung ermöglicht, dass weitere registrierte Daten zu den Laserscans hinzugefügt werden können. (Buckley et al., 2008)

Um eine absolute Registrierung zu erreichen, wird in dieser Arbeit das sogenannte „Backsighting orientation“-Verfahren zur Georeferenzierung mit RiSCAN angewandt. Dabei müssen die GPS-Positionen vom Laserscanner (Own GPS position) und vom Reflektor (Remote object) eingegeben

werden. In Abb. 13 sind die einzelnen Arbeitsschritte dargestellt. Für alle drei Scanpositionen muss derselbe Vorgang durchgeführt werden um eine Grob-Registrierung zu erhalten. Damit sind die einzelnen Scans in ein globales System transformiert.

The image shows four sequential screenshots of the RiSCAN software interface for the 'Backsighting orientation' process.

Page 1 of 4: Own GPS position
 Own position in global coordinates:
 X [m]: 63789.356
 Y [m]: 189101.008
 Z [m]: 1284.732
 Instrument height [m]: 1.935
 Buttons: Read from file, Read from scan..., Use GLCS tiepoint, Measure height...

Page 2 of 4: Remote object
 ALIGNMENT:
 via remote object
 against north
 Position of remote object in global coordinates:
 X [m]: 63768.706
 Y [m]: 189108
 Z [m]: 1286.553
 Buttons: Read from file, Use GLCS tiepoint

Page 3 of 4: Alignment
 Connect to device
 ANGLE:
 Use nothing angle [deg]: 0.000
 Use tiepoint (finescanned): SP1_017
 Use inclination sensors OFFLINE
 Use inclination sensor ONLINE
 POSITONING:
 Turn left, Turn right, Stop turning
 Frame speed [deg/s]: 40.000
 PARALLAX:
 Parallax of sighting object [m]: 0.000

Page 4 of 4: Summary
 SUMMARY:

Own position	Remote object
X = 63789.356 m	X = 63768.706 m
Y = 189101.008 m	Y = 189108 m
Z = 1284.732 m	Z = 1286.553 m
Instrument height Height = 1.935 m	Used tiepoint SP1_017
Instrument orientation: Roll = -0.453 deg	Pitch = -1.893 deg

 MATRIX:
 SOP (SOCS -> GLCS):

-0.997072425	-0.069253680	0.032411523	63789.356000
0.068957750	-0.997567822	-0.010162175	189101.008000
0.033036461	-0.007897399	0.999422345	1286.667000

 Buttons: Set SOP

Abbildung 13: "Backsighting orientation" am Beispiel der Scanposition 1

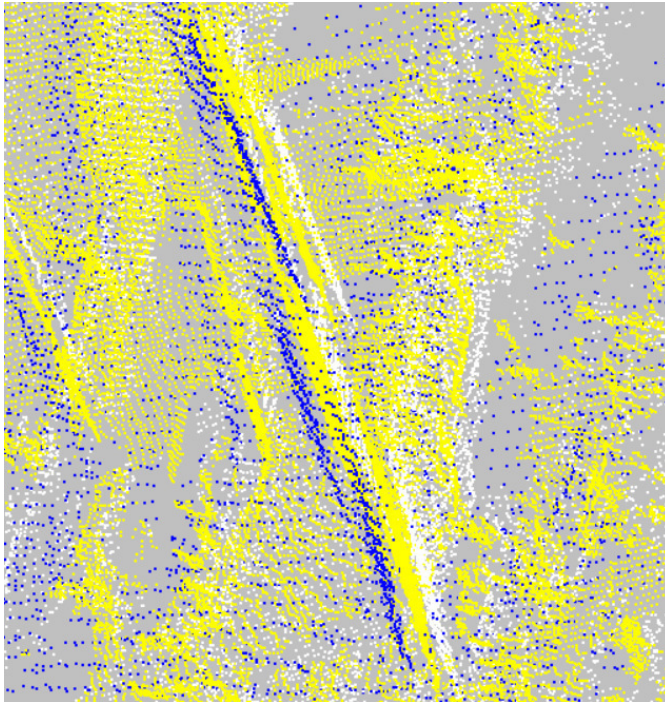


Abbildung 14: Die Abweichungen der verschiedenen Laserscans sind klar ersichtlich, SP 1 ist in weiß, SP 2 in blau und SP 3 in gelb dargestellt

Dieses Verfahren ist jedoch relativ ungenau, weil z.B. die Stativhöhe des Laserscanners nicht exakt ausgemessen wurde oder weil die eingemessene GPS Position des Reflektors von der Sollposition leicht abweicht. In Abbildung 14 ist klar ersichtlich, dass die Positionierung der Punktwolken noch um einige Zentimeter voneinander verschoben ist. Um mit dem Trennflächeneinbau beginnen zu können reicht diese Grob-Registrierung deshalb noch nicht aus, es ist jedoch möglich, mit dem „Multi Station Adjustment“-Verfahren einen Scan zu fixieren und die anderen relativ dazu exakt zu registrieren.

5.1.3 Multi Station Adjustment (MSA)

Um die drei verschiedenen Laserscans noch besser aneinander anzupassen, kann das sogenannte „Multi Station Adjustment“ in der Software RiSCAN PRO angewandt werden. Dieses Tool fixiert die Punktdaten einer Scanposition und verändert die Orientierung und Position der restlichen Punktwolken, um die beste Gesamtübereinstimmung zu berechnen. Die verschiedenen Scanpositionen werden dabei mithilfe von "tiepoints", "tieobjects" und Polydateien (reduzierte Punktwolken) miteinander verglichen.

Dieser Arbeitsvorgang beginnt damit, dass zuerst aus den Laserscandaten Polydateien erstellt werden (Abb. 15). Dies wird mit dem „plane surface filter“ gemacht, der die Anzahl der Punkte reduziert und zu Ebenen zusammenfasst. Hier können verschiedene Einstellungen vorgenommen werden, um unterschiedliche Ebenen zu erstellen, die für die nachfolgende Berechnung zur Verfügung stehen.

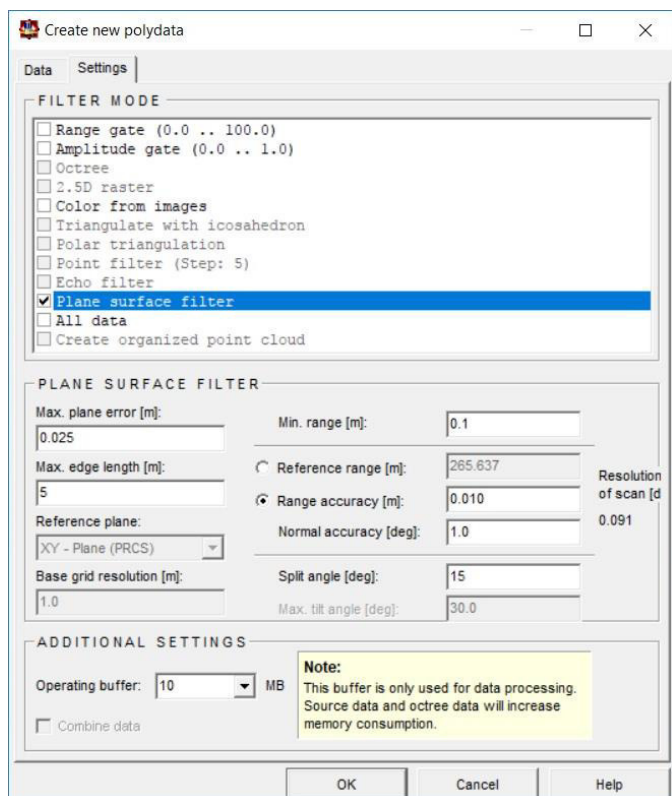


Abbildung 15: Erstellen einer Polydatei mit der Funktion "plane surface filter"

Nachdem die Polydateien für alle Laserscans erstellt sind, kann mit der eigentlichen Positionsrechnung und -anpassung begonnen werden. Die erste Scanposition wird dafür fixiert (locked) und alle weiteren werden genau darauf ausgerichtet (Abb. 16).

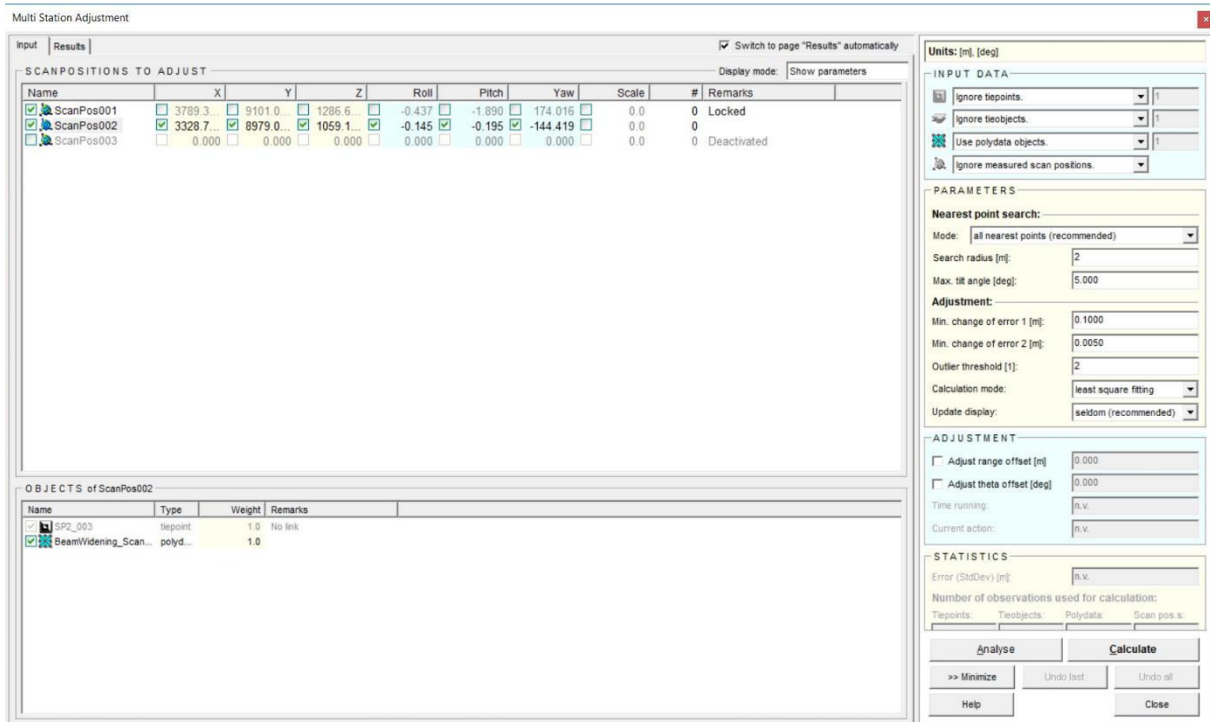


Abbildung 16: Die Scanposition 1 wird gesperrt, alle anderen werden darauf ausgerichtet

Nun müssen die Parameter auf der rechten Seite (Abb. 16 und 17), die auf Erfahrungswerten von Prof. Liu beruhen, eingegeben werden, danach kann die erste Analyse durchgeführt werden.

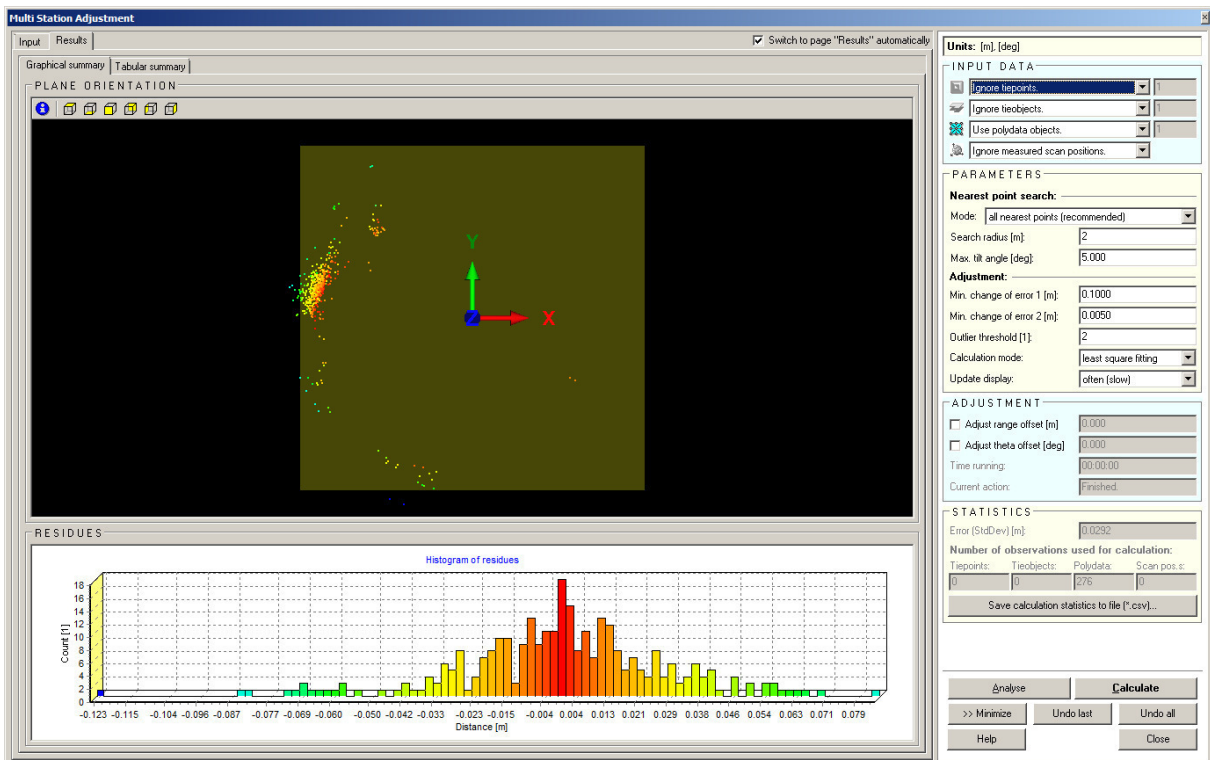


Abbildung 17: Die Polydaten von Scanposition 2 werden auf Scanposition 1 angepasst, der Suchradius beträgt 2 m und der Fehler der Standardabweichung 0,0292 m

Durch das schrittweise Verkleinern des Suchradius gelingt es auch, den Fehler der Standardabweichung zu minimieren, wie es in den folgenden Abbildungen 18 und 19 ersichtlich ist.

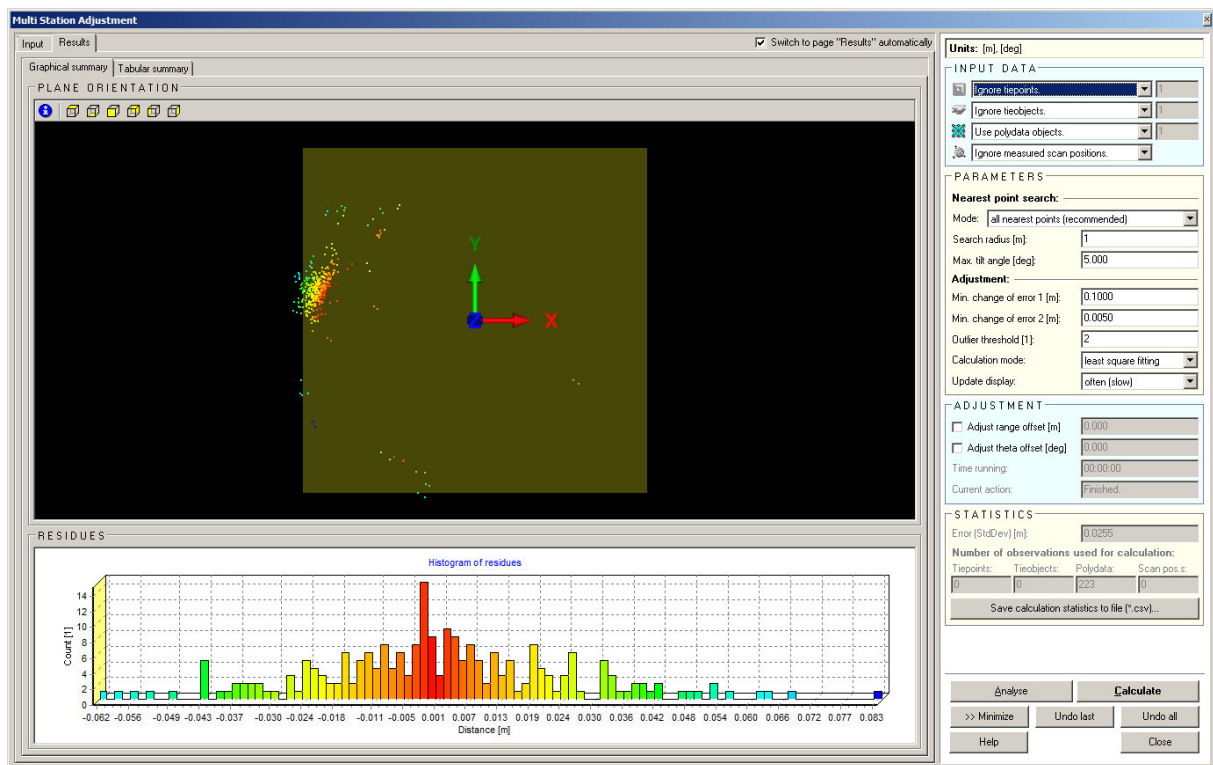


Abbildung 18: Der Suchradius beträgt jetzt 1 m und der Fehler der Standardabweichung 0,0255 m

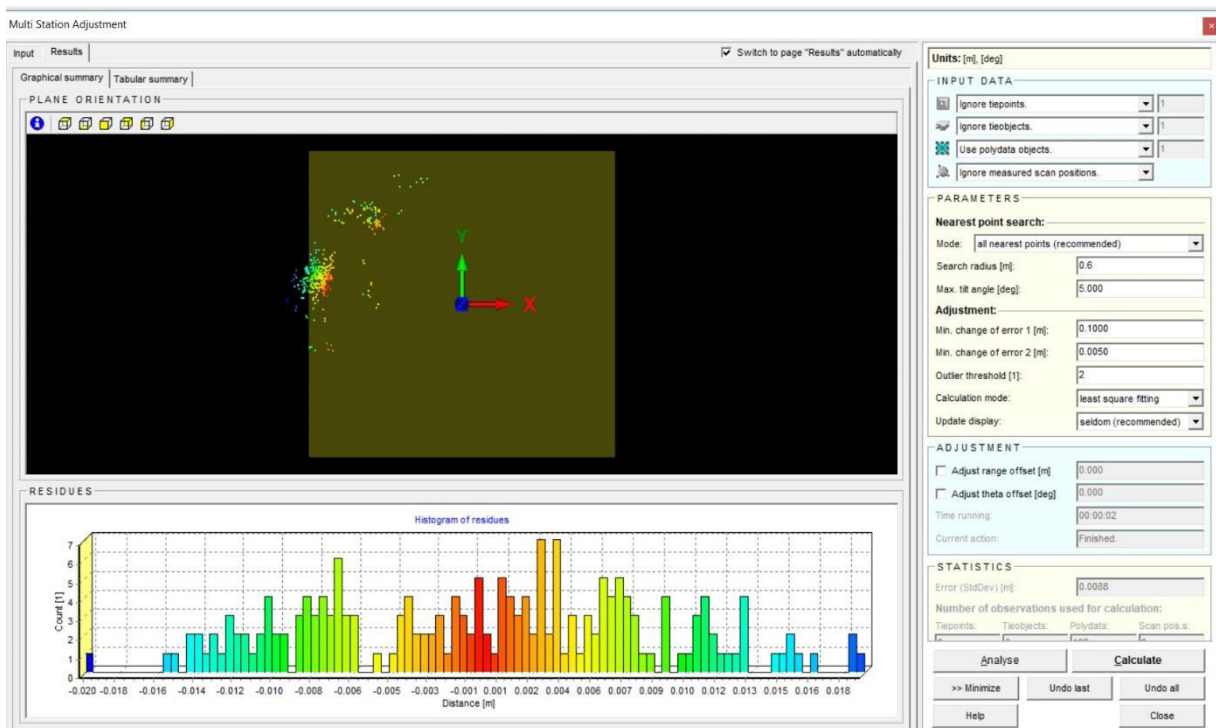


Abbildung 19: Bei einem Suchradius von mittlerweile nur noch 0,6 m konnte auch die Standardabweichung auf einen Fehler von 0,0088 m reduziert werden

5.1.4 Ergebnis der Scan-Registrierung

Nach der endgültigen Berechnung (Calculate) ergibt sich bei einem Suchradius von 0,6 m ein statistischer Fehler von 0,0088 m. Das heißt, dass die Scanpositionen mit unterschiedlichsten Entfernungen von bis zu fast einem Kilometer exakt übereinander gelegt werden können. Das Ergebnis ist in Abbildung 20 dargestellt, der Unterschied zu Abbildung 14 ist klar ersichtlich.

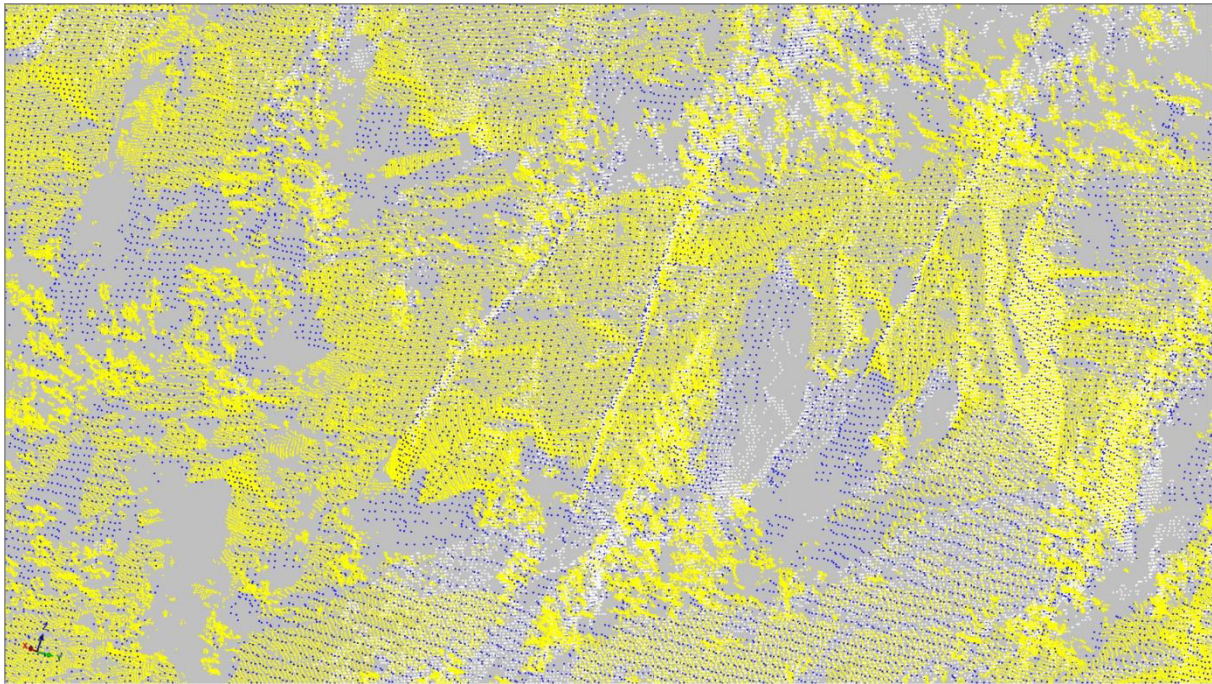


Abbildung 20: Alle Scanpositionen sind nach dem "Multi Station Adjustment" exakt aufeinander registriert, Scanposition 1 in weiß, Scanposition 2 in blau und Scanposition 3 in gelb

Da jetzt alle Scanpositionen exakt referenziert sind, kann der relevante Bereich der Felswand von den restlichen Daten ausgeschnitten und daraus eine Polydatei erstellt werden. Zusätzlich kann zur besseren Orientierung die Farbinformation aus den erstellten Fotos auf die Datenpunkte übertragen werden (Abb. 21). Somit ist die Datenvorbereitung abgeschlossen und es kann mit der eigentlichen Auswertung und dem Einbau der Trennfächen begonnen werden.



Abbildung 21: Der ausgeschnittene und Datenbereich der Felswand mit den Farbinformationen aus den Fotos

5.2 Trennflächeneinbau

Unter Trennflächen versteht man mechanisch wirksame Diskontinuitäten im Gestein die keine Zugfestigkeit besitzen. Sie können durch mechanische oder hydraulische Beanspruchung oder durch Einregelung der Minerale während der Sedimentation entstehen. Sie treten in der Regel nicht einzeln, sondern meist in parallelen Scharen auf, deren verschiedene Richtungen normalerweise in bestimmten Winkelbeziehungen zueinanderstehen, wobei häufig angenähert rechte Winkel auftreten. Die Brucharten und -winkel können sich mit dem Material- und/oder dem Spannungszustand ändern. Schieferungsflächen sind durch sekundäre Mineraleinregelung und -plättung bzw. paralleles Wachsen von Phyllosilikaten im Zuge der Metamorphose entstanden, wodurch eine dünnplattige Spaltbarkeit des Gesteins hervorgerufen wird. Schiefer weisen eine ausgeprägte Gefügeanisotropie auf. Die Orientierung einer Trennfläche kann ganz traditionell mit dem Gefügekompas oder direkt aus dem Laserscan gemessen werden, dabei wird sowohl das Einfallen (dip) der Trennfläche als auch deren Einfallrichtung (dip direction) angezeigt. Da die Orientierungen innerhalb einer Trennflächenschar statistisch streuen, ist eine ausreichend große Stichprobe zur Bestimmung der mittleren Raumstellung nötig. Trennflächen können grundsätzlich mit den Parametern aus Abbildung 22 charakterisiert werden. (Prinz und Strauß, 2011)

Lage	nur bei Großklüften, sonst Angabe des Homogenbereiches (s. Abschn. 3.2)
Art der Trennflächen	Schichtflächen (ss oder S ↘, Schieferungsfläche (sf oder Sf ↘, Großkluft (GK oder K ↘, Mittel-/ Kleinkluft (K oder k ↘, Störung (St ↘)
Raumstellung	Streichen und Fallen (z. B. N 30° E, 70° SE) bzw. Fallrichtung und Fallwinkel (z. B. 120°/70°)
Abstand	senkrechter Abstand, getrennt nach den einzelnen Klufscharen; Angaben in m oder cm
Erstreckung	Angabe in m oder m ² (bezogen auf Aufschlussgröße)
Beschaffenheit der Flächen	eben, uneben, wellig, abgesetzt; Oberfläche rau, glatt, spiegelglatt, gestriemt (Harnischflächen)
Beläge, Verwitterungserscheinungen	Beläge (Mn, Fe, Kristallrasen), Verfärbung, Entfestigung (Tiefe in cm), Lösungserscheinungen
Öffnungsweite	Angabe der mittleren, der größten und der kleinsten Weite (in mm oder cm)
Füllung	Quarzit, Calcit, Brekzie, Ton, Lehm usw.
Durchtrennungsgrad	Häufigkeit des Durchsetzens einer Kluft zur nächsten
Dichtigkeit	stellenweise Vernässung, Tropfwasser u. a. m. (s. d. Abschn. 17.2.5.2).

Abbildung 22: Parameter zur Klassifizierung von Trennflächen (Prinz, 2011)

Das Konstruieren der Trennflächen wird mit der Software RiSCAN in mehreren Arbeitsschritten durchgeführt. Mit der Funktion „Selection mode“ werden die gewünschten Datenpunkte markiert (Abb. 23). Diese Punkte ändern dann ihre Farbe auf Rot und durch das Drehen der Punktwolke in verschiedene Ansichten ist es leicht erkennbar ob die ausgewählten Punkte wirklich in einer Ebene liegen. Ist das der Fall, kann mit dem Befehl „Create new plane object from selected area“ eine Fläche generiert werden, die noch in Größe, Position und Farbe der entsprechenden Trennfläche angepasst wird.

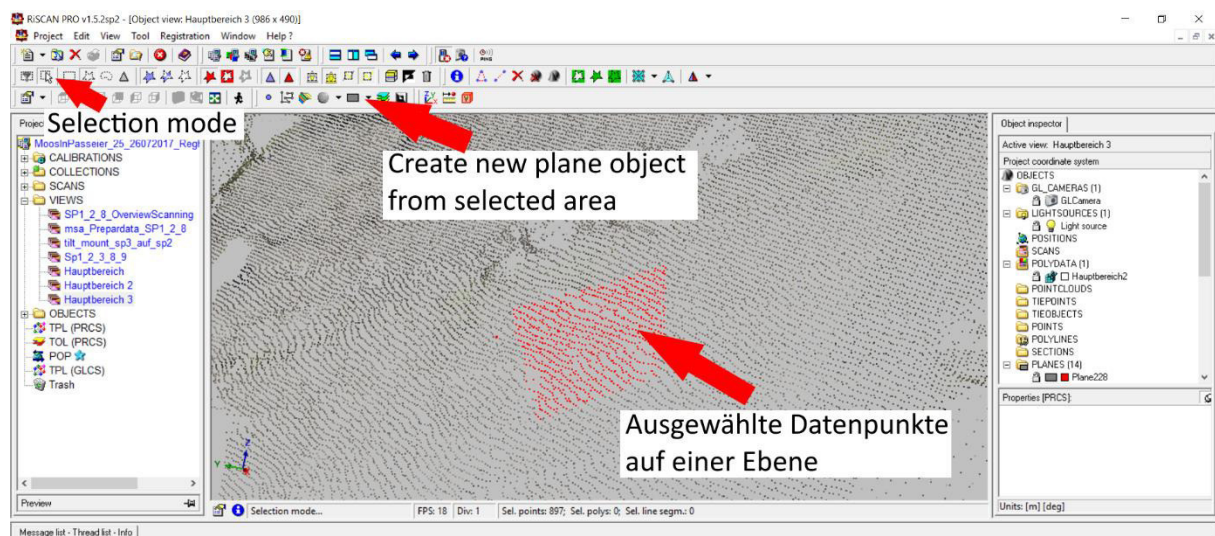


Abbildung 23: Einbau von Trennflächen im RiSCAN

Da der Einbau der Trennflächen auf der reinen Punktwolke erfolgte, waren vor allem die hochauflösenden Fotos (siehe Anhang) von den ersten Geländebegehungen eine große Hilfe. Damit fiel es um einiges leichter die großen Kluftscharen, die nahezu den ganzen Gesteinskörper durchziehen, zu identifizieren und das Trennflächenmodell entsprechend zu verbessern. Um so viele Daten wie möglich zu erhalten, wurden nahezu auf der gesamten Felswand Flächen eingebaut und je nach Orientierung und Zugehörigkeit eingefärbt. In Abbildung 24 sind sämtliche Flächen, die eingebaut wurden, dargestellt.

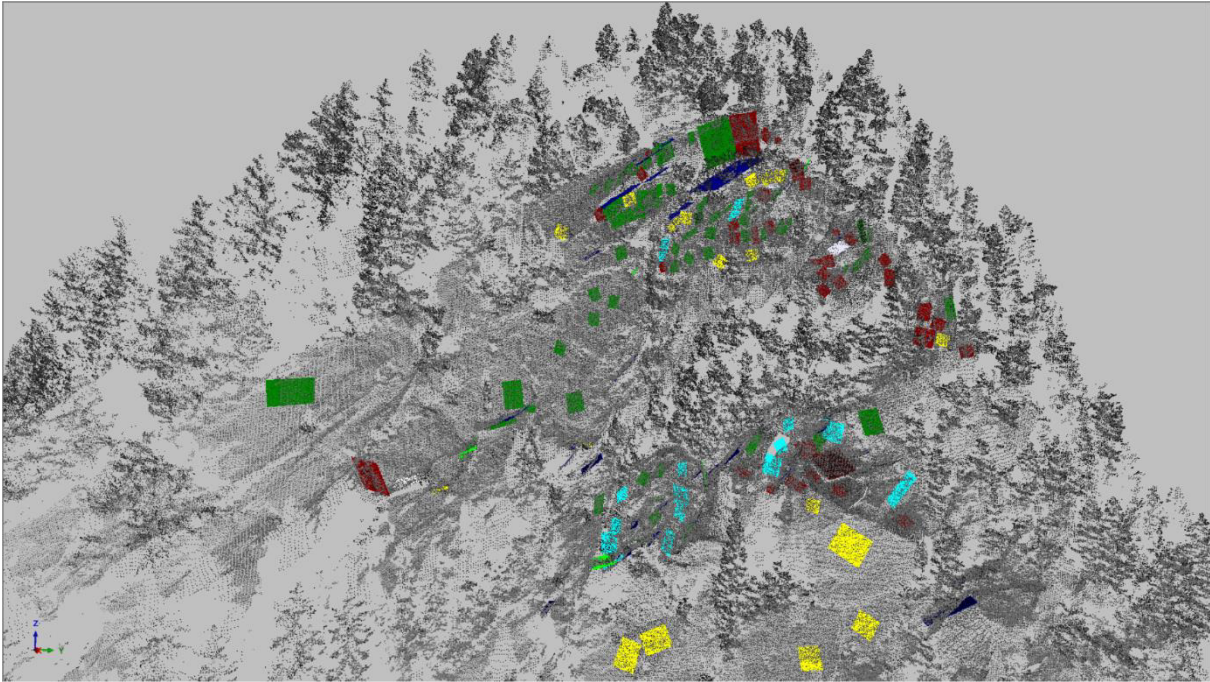


Abbildung 24: Die eingebauten und farblich zugeordneten Trennflächen im oberen Bereich der Felswand

Nachdem diese kleinen Flächen eingezeichnet wurden, hat sich herausgestellt, dass viele Kluftscharen (Abb. 25) sich verbinden lassen und die Trennflächen teilweise viel mächtiger sind als zunächst angenommen. Mit Hilfe der Fotos konnte diese Feststellung dann auch verifiziert werden.

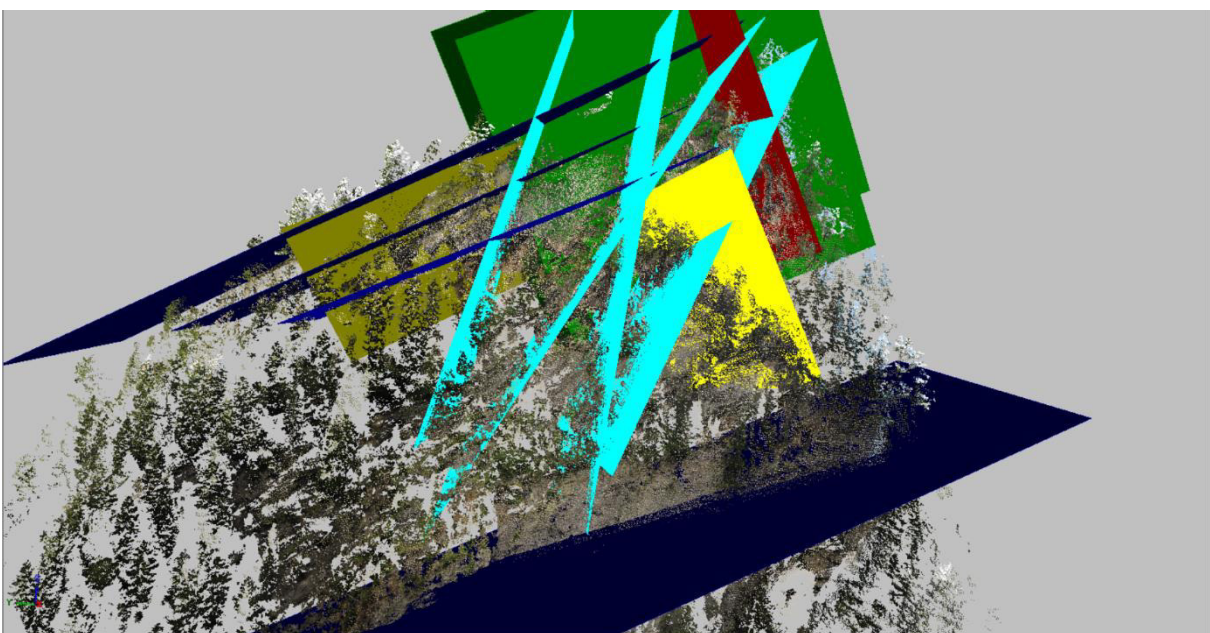


Abbildung 25: Vor allem im oberen Bereich der Felswand sind sehr mächtige Trennflächen vorhanden

5.3 Auswertung der Trennflächen nach ihrer Orientierung

Die eingebauten Trennflächen wurden zunächst, je nach Orientierung, grob farblich zugeordnet. Daraus ergaben sich die Schieferungsflächen (SF 1) und vier verschiedene Kluftscharen (KF 1-4). Diese wurden dann mit Hilfe des Stereonetzes auf ihre durchschnittliche Orientierung ausgewertet.

Die Schieferungsfläche (SF 1), die der Deformationsphase D1 zugewiesen werden kann, ist vor allem im oberen Bereich der Felswand sehr ausgeprägt, das liegt vor allem daran, dass hier ein Wechsel der Lithologie stattfindet. Der massive Paragneis im unteren Teil der Felswand geht nach oben hin in Glimmerschiefer über. Alle Messwerte der eingebauten Flächen parallel zur Schieferung sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Einfallswinkel und Fallrichtung der Schieferungsflächen

SF 1							
dip	dip direction	dip	dip direction	dip	dip direction	dip	dip direction
15,463	345,89	31,797	315,697	36,994	339,252	40,714	340,064
28,233	346,123	34,337	340,252	29,55	349,846	30,815	326,085
43,658	13,898	32,664	334,896	39,971	34,929	51,564	20,747
42,028	11,73	42,676	12,039	47,931	16,982	29,841	8,16
18,834	2,027	43,287	40,65	41,843	357,895	53,663	14,696
38,404	6,542	31,343	352,743	27,236	333,609	50,803	25,41
42,034	11,06	50,187	22,326	34,194	331,744	57,012	46,157
32,26	19,043	30,056	357,324	32,308	332,8	45,902	10,539
54,457	27,672	37,68	5,822	35,081	346,497		
41,337	19,51	38,266	335,32	34,081	350,42		
33,352	345,139	33,249	336,734	40,683	339,038		

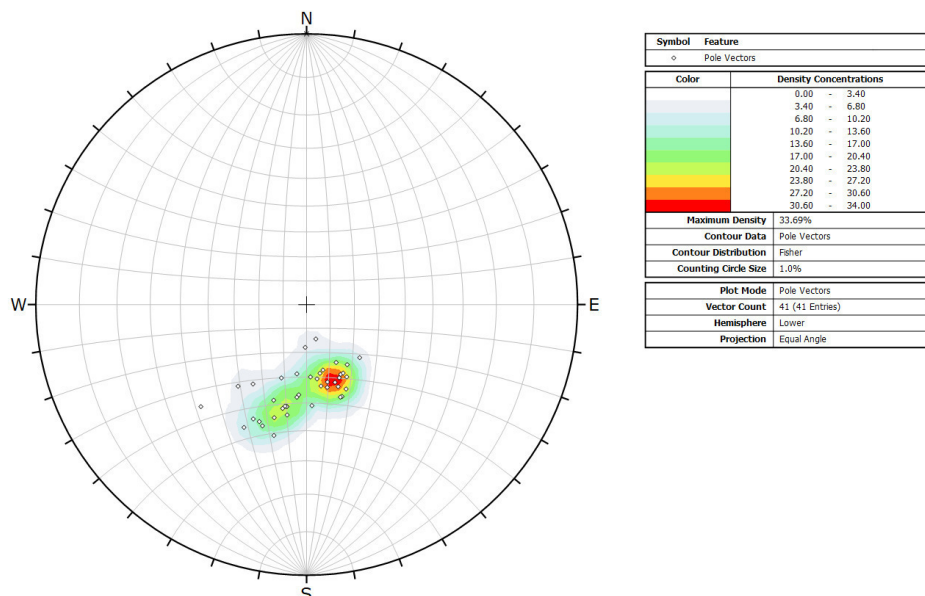


Abbildung 26: Polpunkte der Schieferungsfläche

Die Polpunkte der Schieferungsflächen (Abb. 26) haben einen Durchschnittswert von 161/57, somit fallen die Schieferungsflächen im Mittel mit 341/33 ein.

Die erste Klufflächenschar (KF 1) verläuft nahezu senkrecht zu den Schieferungsflächen und parallel zu deren Einfallrichtung. Alle Messwerte dieser Schar sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 3: Einfallswinkel und Fallrichtung von Kluftschar 1 (KF 1)

KF 1							
dip	dip direction	dip	dip direction	dip	dip direction	dip	dip direction
81,919	239,384	70,882	55,832	88,709	56,56	73,065	238,35
86,719	73,969	72,109	60,489	56,639	56,212	85,855	65,677
61,131	39,853	78,524	246,771	49,949	51,537	80,41	55,806
48,869	58,301	55,22	55,692	89,098	253,767	84,127	243,522
86,764	57,351	63,725	65,028	88,088	72,869	87,381	66,528
81,795	239,85	87,999	73,279	89,801	232,868	47,652	67,716
74,33	41,28	72,728	54,164	88,222	67,036	84,266	67,537
86,489	72,004	80,938	250,819	89,138	66,025	86,613	59,252
54,345	65,089	86,006	250,721	83,734	258,024	66,501	263,258
62,942	39,601	70,885	37,554	88,716	71,334	65,208	54,86
79,015	69,644	86,056	59,266	86,28	231,556	88,974	238,334
85,331	250,921	78,791	252,06	80,773	56,471	70,635	72,079
55,6	46,504	84,479	47,983	86,593	242,215	88,423	65,801
87,841	243,997	78,463	74,892	63,149	70,674	89,453	261,884
82,999	243,881	56,695	27,915	83,5	80,34	84,996	52,563
77,865	247,059	60,771	39,333	87,289	81,638		

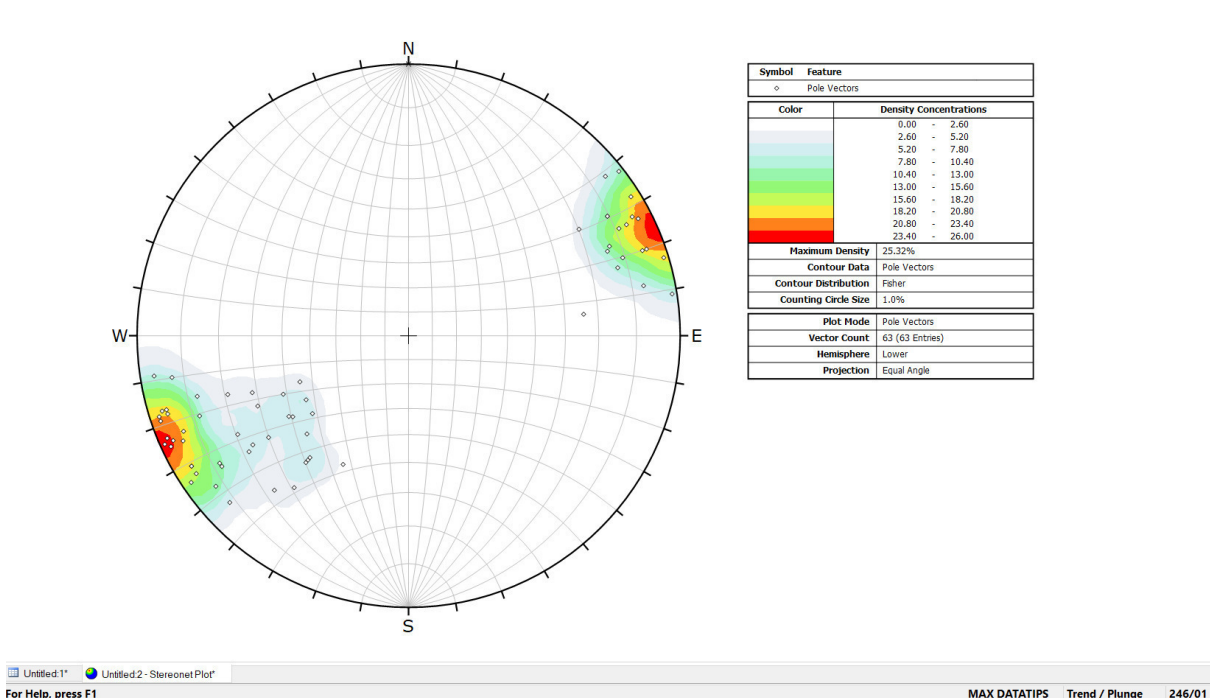


Abbildung 27: Polpunkte der Kluftschar 1 (KF 1)

Im Stereonetz ist ersichtlich, dass die Trennflächen der Kluftschar 1 (Abb. 27) normal zur Schieferungsfläche (Abb. 26) orientiert sind. Die Polpunkte haben einen Mittelwert von 246/01 und die Flächen fallen somit fast senkrecht nach NE mit 066/89 ein.

Die Trennflächen der zweiten Klufschar (KF 2) sind annähernd orthogonal zu SF1 sowie zu KF1 und streichen somit NE-SW. Alle Messwerte dieser Schar sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Einfallswinkel und Fallrichtung von Klufschar 2 (KF 2)

KF 2							
dip	dip direction	dip	dip direction	dip	dip direction	dip	dip direction
66,308	136,717	65,057	148,614	63,576	143,534	66,68	155,309
62,773	143,553	74,522	155,187	72,667	162,186	76,411	158,702
65,998	132,3	59,863	133,821	67,393	154,452	72,781	168,607
65,723	132,103	60,765	136,193	64,556	156,369	84,893	138,621
66,031	155,841	74,2	167,528	63,93	150,059	45,347	106,468
70,138	135,338	83,132	326,573	61,441	161,662	69,277	129,847
67,617	138,347	82,812	144,131	74,79	153,017	64,19	132,201
73,906	135,891	86,506	130,146	57,503	149,959		
61,66	151,512	76,141	131,616	73,323	133,46		
68,726	155,622	79,01	130,25	77,295	163,343		

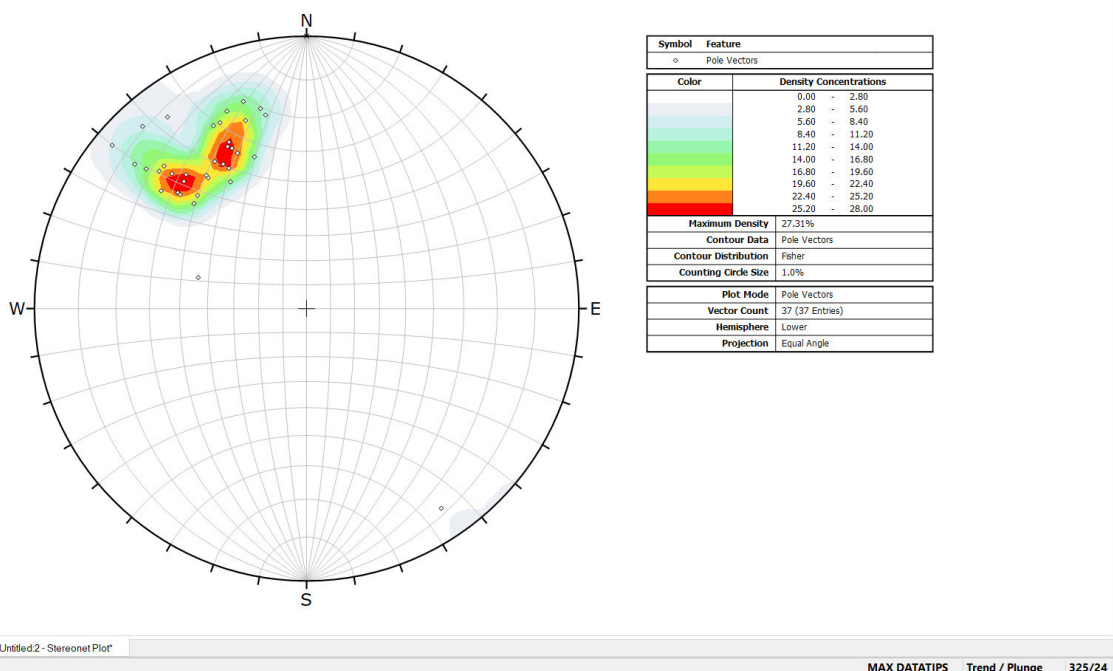


Abbildung 28: Polpunkte der Klufschar 2 (KF 2)

Die Polpunkte der Trennflächenschar KF2 sind im Mittel nach 325/24 orientiert, daraus ergibt sich, dass die Flächen durchschnittlich mit 145/66 einfallen. Die Trennflächen der Schieferungsflächen und der ersten zwei Klufscharen sind also alle nahezu senkrecht zueinander ausgerichtet.

In Tabelle 5 sind die Messwerte der eingebauten Flächen von mehreren großen Klüften aufgelistet, die nahezu die gesamte Felswand durchziehen (siehe Abb. 24) und erst im unteren Bereich des Paragneises nicht mehr verfolgt werden können. Die Trennflächen haben alle ungefähr dieselbe Einfallsrichtung wie die Schieferungsfläche, unterscheiden sich aber deutlich im Einfallswinkel. Weil hier nicht so viele Messwerte vorhanden sind, wurden sie als Kluftschar 3 (KF 3) zusammengefasst. Bei der Stabilitätsanalyse werden sie jedoch differenziert behandelt.

Tabelle 5: Einfallswinkel und Fallrichtung von Kluftschar 3 (KF 3)

KF 3							
dip	dip direction	dip	dip direction	dip	dip direction	dip	dip direction
82,318	342,92	78,591	345,7	76,517	341,595	76,796	312,675
61,101	340,111	81,312	337,046	62,812	339,823	82,985	155,781
70,686	358,729	70,147	350,75	85,391	336,606	76,237	336,051
34,185	334,672	69,287	321,628	87,9	340,497		
66,416	338,842	66,985	337,164	75,045	327,581		

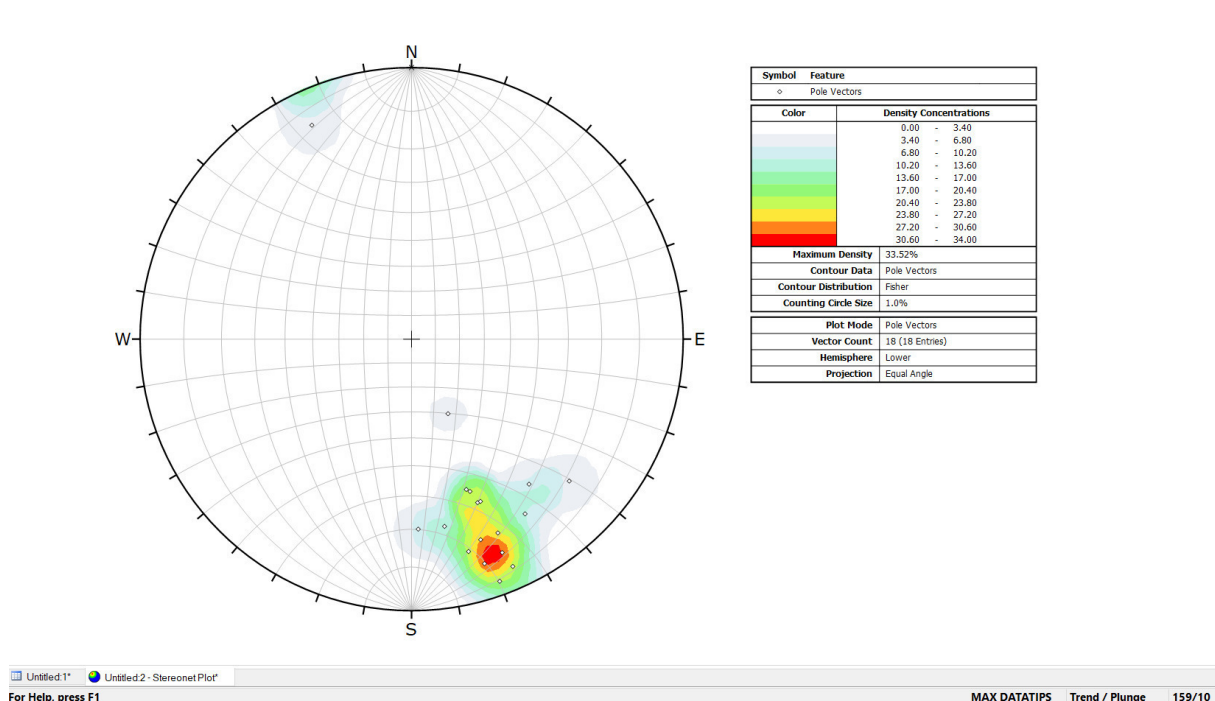


Abbildung 29: Polpunkte der Kluftschar 3 (KF 3)

Die Polpunkte liegen im Bereich von 159/10 (Abb. 29), diese Trennflächen fallen also um einiges steiler ein als die Schieferungsflächen, aber in dieselbe Richtung. Diese großen Klufflächen haben Einfallswinkel zwischen 63° und 83° und eine Fallrichtung nach NNW.

Die Trennflächen von Klufschar 4 (Tab. 6) treten vor allem im massigen Paragneis als freie Flächen auf. Sie sind aber auch im Übergangsbereich zu finden und deshalb relevant für die Stabilitätsanalyse.

Tabelle 6: Einfallswinkel und Fallrichtung von Klufschar 4 (KF 4)

KF 4							
dip	dip direction	dip	dip direction	dip	dip direction	dip	dip direction
87,24	113,444	67,275	283,241	72,931	278,722	61,174	86,466
57,856	284,508	47,48	124,609	63,145	284,852	80,496	121,311
36,709	85,053	65,146	279,916	60,904	288,127	88,088	270,807
64,825	277,545	84,173	309,157	76,868	131,567	63,023	286,524
86,999	124,892	69,346	278,579	86,677	124,629	75,633	99,477
71,141	82,879	67,124	277,684	87,671	127,026	87,966	112,39
49,606	292,234	67,924	280,164	77,088	129,671	61,206	288,166

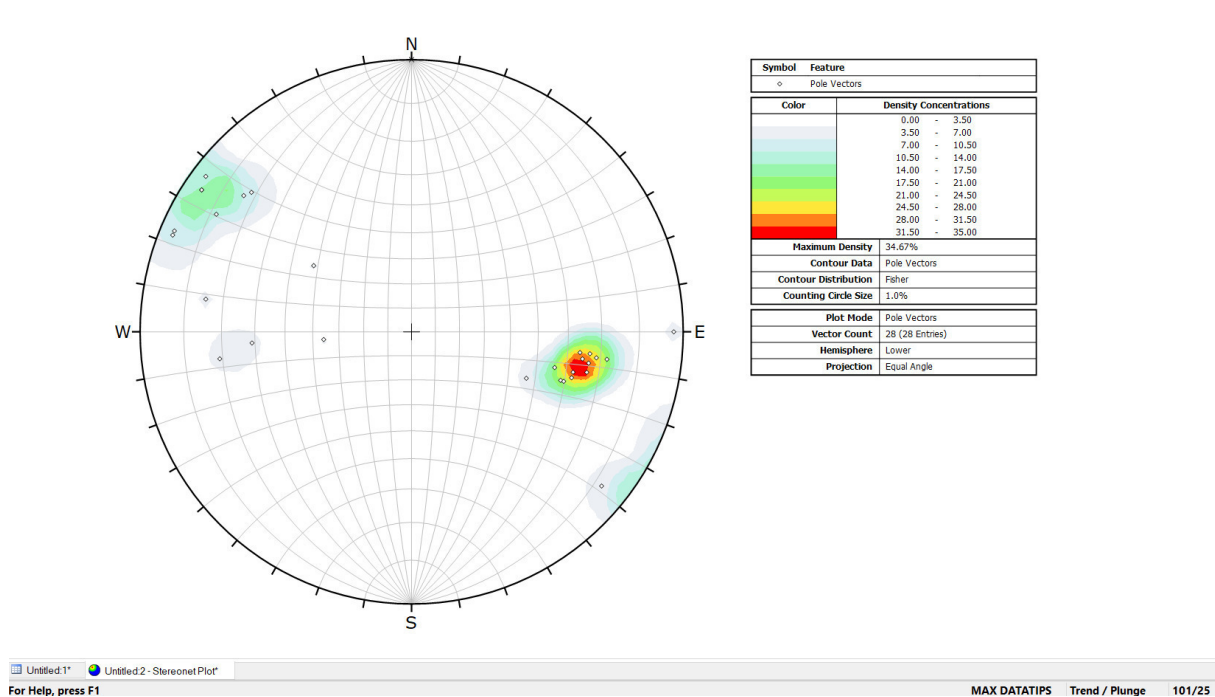


Abbildung 30: Polpunkte der Klufschar 4 (KF 4)

Die durchschnittliche Orientierung der Polpunkte ist bei dieser Klufschar 101/25 (Abb. 30). Die Trennflächen fallen also mit 65° Richtung NW (282/65) ein.

5.4 Block Theorie

5.4.1 Allgemeines

Die Block Theorie von Goodman & Shi (1985) ermöglicht es kinematisch freie Kluftkörper zu erfassen und deren Versagensmechanismen festzustellen um die Blockstabilität abschätzen zu können. Blöcke, die allseits abgetrennt sind und die aus dem Gesteinsverband in den freien Raum herausgleiten können, werden als „key blocks“ bezeichnet (Prinz und Strauß, 2011). Es werden mindestens vier Flächen benötigt um einen geschlossenen Block zu formen, dieser kann sowohl von Trennflächen als auch von freien Flächen begrenzt werden. Die Trennflächenscharen werden in einer stereographischen Projektion geplottet, die in verschiedene Bereiche unterteilt ist. Jeder Trennfläche wird ein binärer Code zugewiesen, der angibt, ob sich der Block ober- oder unterhalb der Fläche befindet. Bei einer „lower hemisphere projection“ liegen alle Räume, die innerhalb eines Großkreises einer Trennfläche plotten, unter dieser, alle die sich außerhalb befinden liegen darüber.

In der Block Theorie werden folgende Begriffe verwendet:

- Joint Pyramid (JP): durch natürliche Trennflächen abgegrenzter Block
- Excavation Pyramid (EP): durch frei Flächen abgegrenzter Block
- Space Pyramid (SP): der Komplementärbereich zur EP
- Block Pyramid (BP): der Durchschnitt von JP und EP (Block)

Ein Block ist nur „finit“ wenn er kein Teil der „Excavation Pyramid“ ($JP \cap EP = \emptyset$) ist, oder sich komplett in der „Space Pyramid“ ($JP \subset SP$) befindet. In der Block Theorie werden fünf verschiedene Blocktypen (Abb. 31) unterschieden. Ein infiniter Block (Typ V) ist stabil und kann nicht vom Gebirge gelöst werden, solange sich keine weiteren Bruchflächen bilden. Finite Blöcke werden in ablösbare (Typ I, II und III) und in nicht ablösbare Blocktypen (Typ IV) unterteilt. Ein Block Typ III bleibt auch ohne Reibungskräfte stabil, Typ II wird als potentiell instabil bzw. als "potential key block" bezeichnet. Er kann z.B. bei sehr geringen Reibungswiderständen auf der Gleitebene oder durch zu viel Auflast instabil werden. Ein "key block" (Typ I) löst sich ohne entsprechende Sicherungsmaßnahmen sofort vom Gebirgsverband und ist bei natürlichen Aufschlüssen normalerweise auch nicht vorhanden, da es bereits zum Versagensfall kam. (Liu, 2016)

- V:** infinite
- IV:** tapered
- III:** stable even without friction
- II:** potential key block
- I:** key block

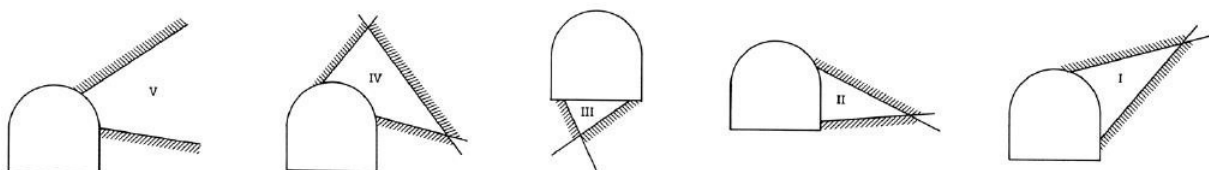
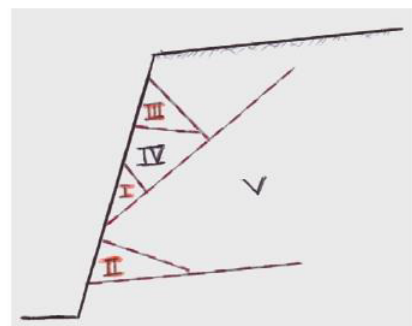


Abbildung 31: Verschiedene Blocktypen (Liu, 2016)

5.4.2 Generierung von möglichen Blöcken

Anhand der vorher, aus dem virtuellen Aufschlussmodell ermittelten Trennflächenscharen (Abb. 32 und Tab. 7), wird jetzt das dazugehörige Stereonez (Abb. 33) und die möglichen Blöcke (Abb. 34), die sich daraus ergeben, mit den vorher erwähnten Programmen B02HPGL.EXE und B03HPGL.EXE von Prof. Liu berechnet und dargestellt. Dieser erste Schritt dient jedoch nur dazu, die generierten Blöcke mit denen, die real im Gelände vorkommen zu vergleichen und eine geeignete Blockform für die Steinschlagsimulation zu finden. Die Kluftchar KF 1 wird in den zwei Programmen jeweils als freie Fläche (EP) eingegeben, weil sie nur im unteren Bereich der Felswand als Gesteinsoberfläche auftritt.

Tabelle 7: Orientierung der relevanten Kluftscharen

Kluftchar (Farbe)	dip direction	dip
SF 1 (navy)	341	33
KP 1 (EP, green)	066	89
KF 2 (maroon)	145	66
KF 3 (aqua)	341	63
KF 4 (aqua)	337	83
KF 5 (yellow)	282	65

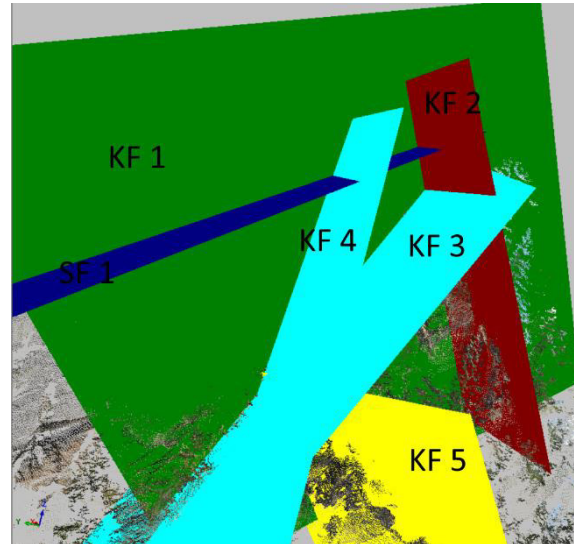


Abbildung 32: Die Kluftscharen, die zum Generieren der möglichen Blöcke verwendet wurden

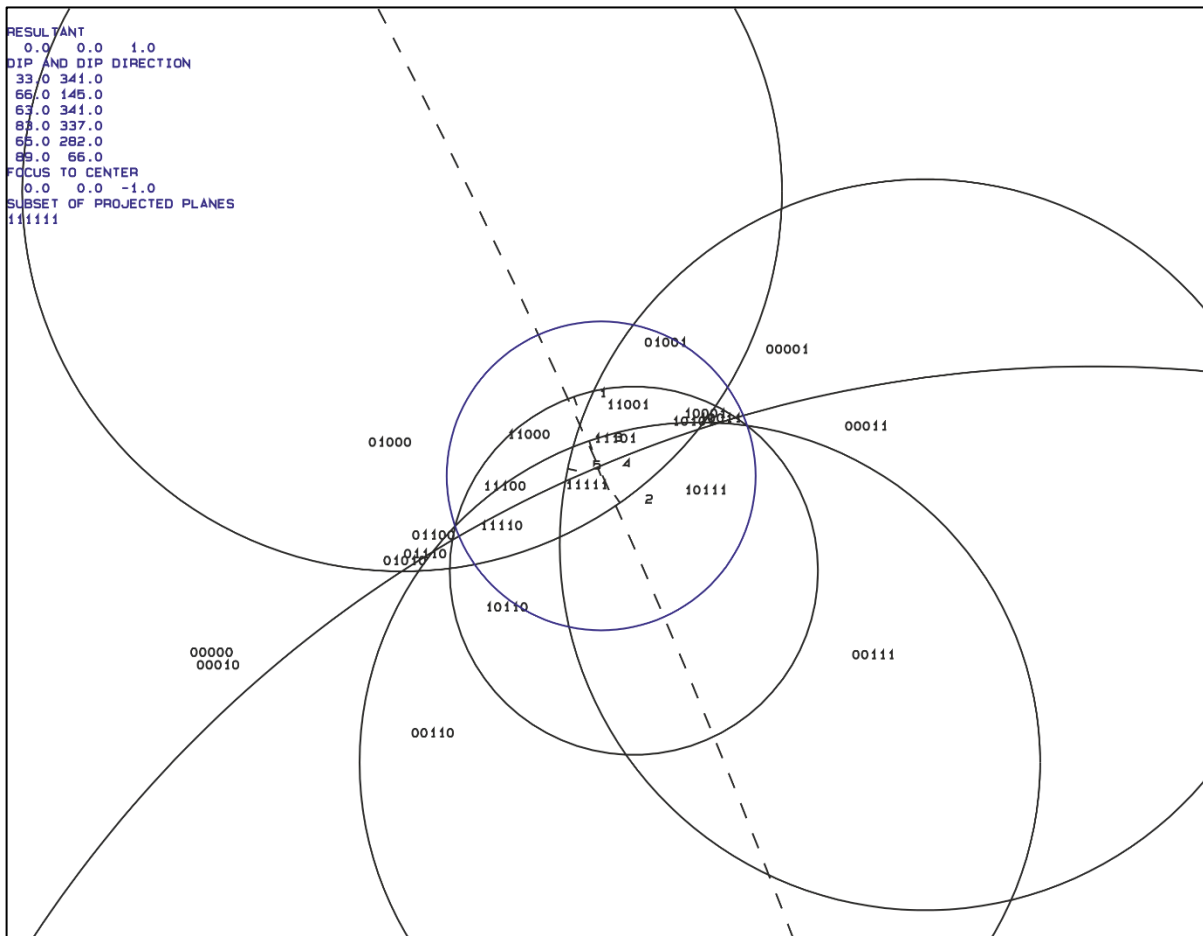


Abbildung 33: Stereographische Projektion der verschiedenen Kluftscharen mit den dazugehörigen „Block Codes“

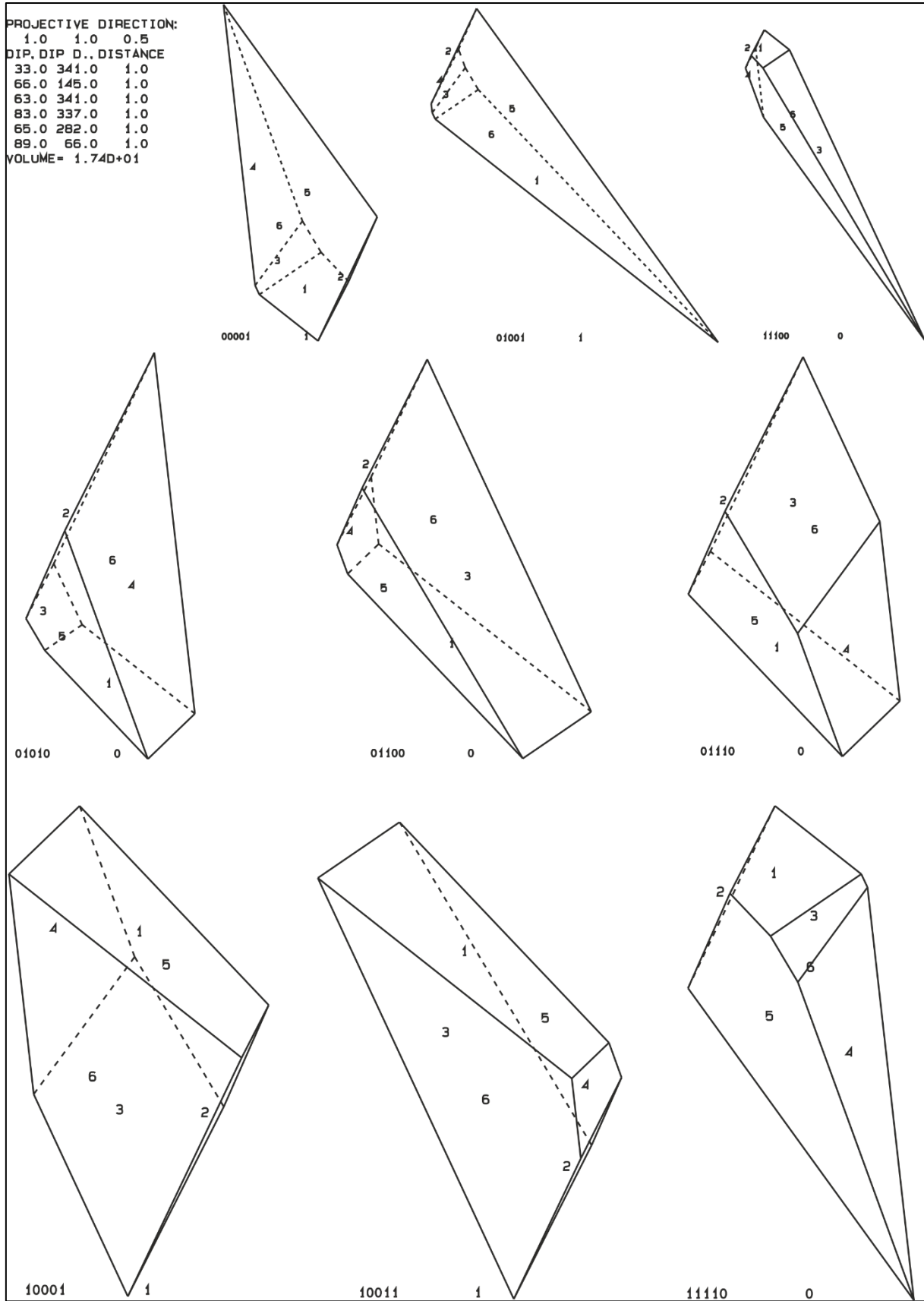


Abbildung 34: Mögliche Blockformen, es sind noch zahlreiche weitere aus denselben Kluftscharen möglich die zum Teil aber recht ähnlich aussehen



Abbildung 35: Gesteinsblöcke im Areal unterhalb der Felswand

In den Abbildungen 34 und 35 ist ersichtlich, dass sich die realen Blockformen und die generierten sehr stark ähneln. Im Untersuchungsgebiet sind sehr viele dieser keilförmigen und pyramidenförmigen Blöcke mit diversen Volumina zu finden.

5.4.3 Stabilitätsanalyse von identifizierten „key blocks“

Im folgenden Abschnitt wird das Volumen, das Versagensmodell und der effektive Reibungswinkel von verschiedenen „key blocks“, die in der Felswand identifiziert wurden, ausgewertet. Zum Teil sind diese Blöcke bereits herausgebrochen und zum Teil noch mit dem Gebirge verbunden, diese könnten sich aber beim weiteren Öffnen der Trennflächen von der Felswand lösen. Um den „half space code“ für den im Laserscan bzw. Foto dargestellten Block zu erhalten (in den nachfolgenden Tabellen 8 – 12 als BT-Code gekennzeichnet), muss zuerst der richtige JP- und EP-Code bestimmt werden. In dieser Arbeit wird die sogenannte „lower hemisphere projection“ verwendet. Die Zahl 0 bedeutet dabei, dass der Block über der Trennfläche liegt und die Zahl 1, dass er sich darunter befindet.

Block 1

Dieser Block (Abb. 36) befindet sich am obersten Rand der Felswand und hat sich vor ungefähr 25 Jahren (eigene Beobachtung) aus dieser gelöst. Der Block wird aus drei Trennflächen und drei zusätzlichen freien Flächen gebildet (Tab. 8), die parallel zu den anderen verlaufen. Das Volumen dieses Blockes kann nur über die noch vorhandenen Grundflächen abgeschätzt werden.

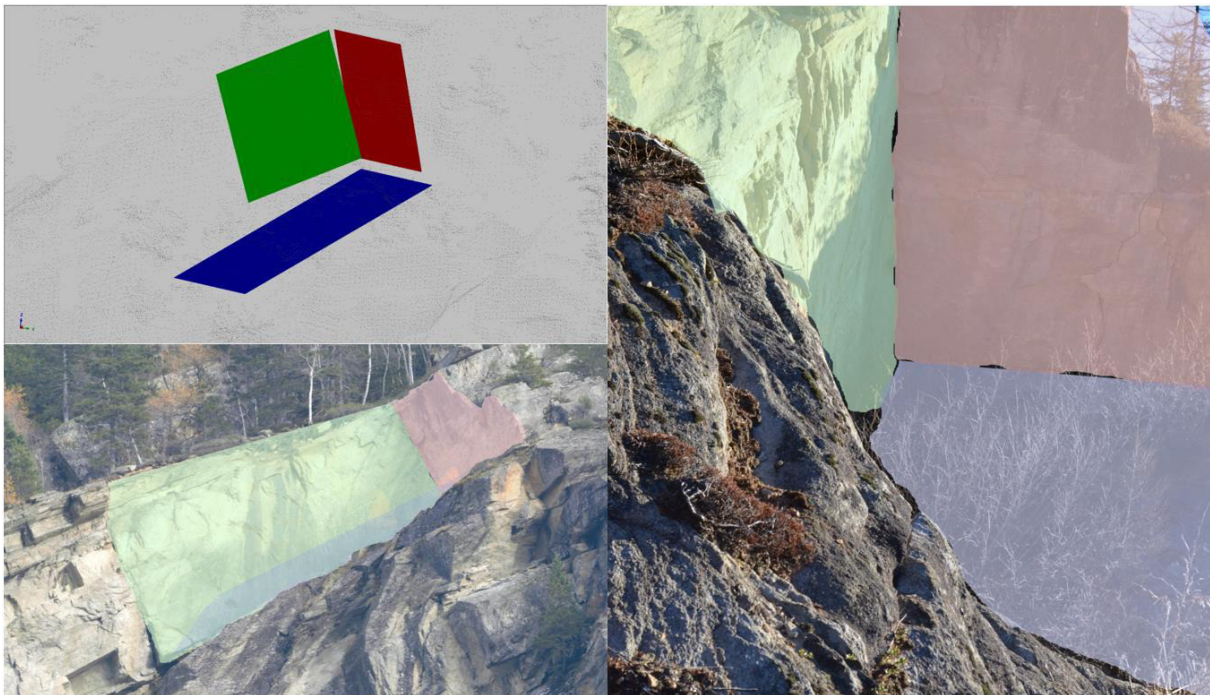


Abbildung 36: Ausschnitt links oben mit den virtuellen Trennflächen, darunter und daneben dieselben eingefärbten Flächen auf verschiedenen Fotos

Tabelle 8: Orientierung, Block Theorie Code und Volumen von Block 1

B1	Farbe	dip	dip direction	BT Code
JP1 P20	green	87	74	0
JP2 P19	maroon	66	156	1
JP3 P102	navy	33	336	0
EP1		85	76	1
EP2		64	153	0
EP3		31	334	1
Volumen [m³]	~ 900			

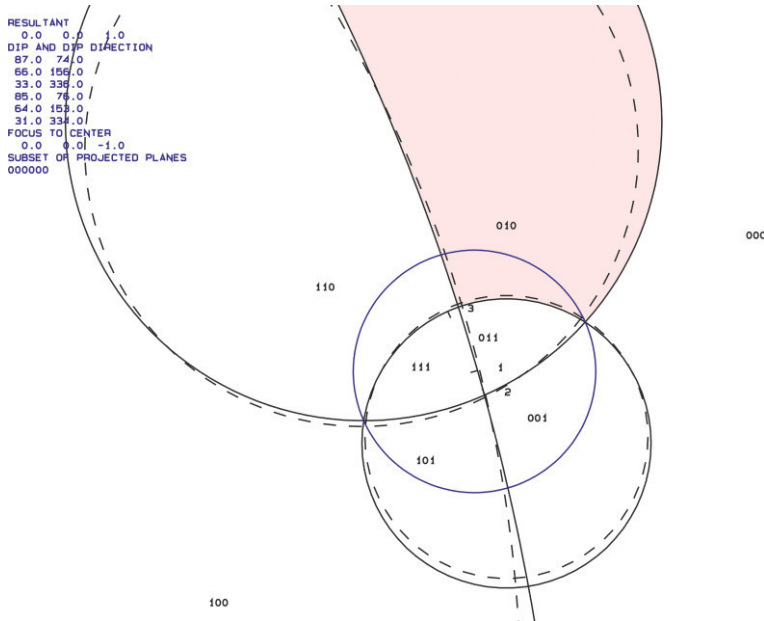


Abbildung 37: Die Großkreise der Trennflächen und freien Flächen mit den dazugehörigen JP-Codes

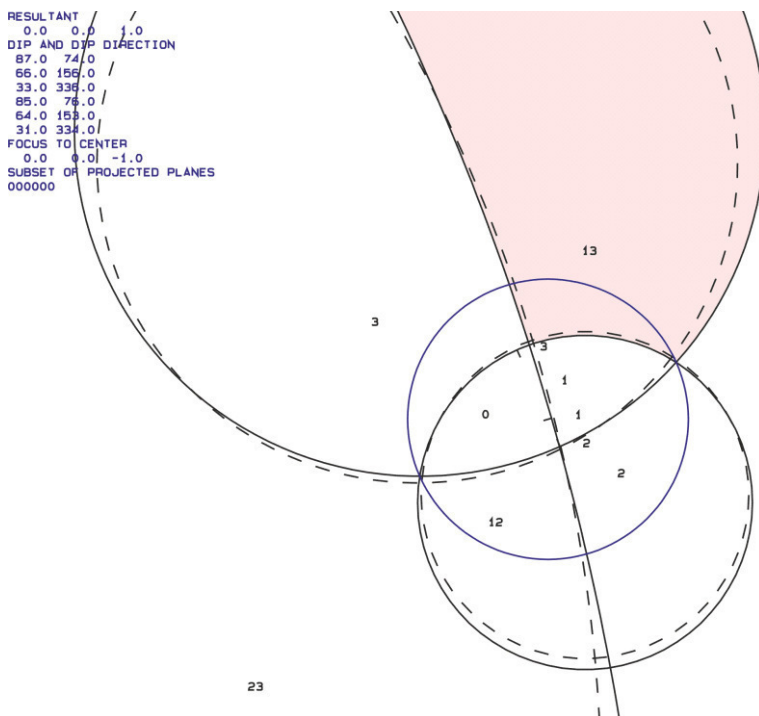


Abbildung 38: Die Großkreise der Trennflächen und freien Flächen mit den entsprechenden Versagensmechanismen

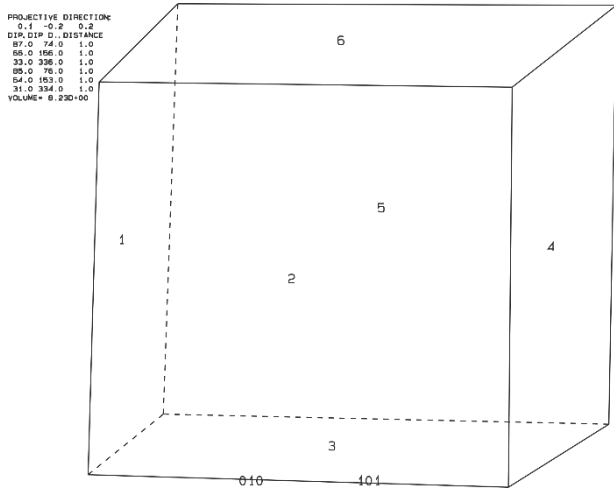


Abbildung 39: dreidimensionale Darstellung des Blockes "010101"

In den Abbildungen 37 und 38 sind die Großkreise der Trennflächen (JP) und der freien Flächen (EP) geplottet. Der Block (JP) mit dem Code „010“ (Abb. 39) kann entlang den Flächen 1 und 3 nach unten gleiten. Bei einem angenommenen Reibungswinkel von 40° berechnet das Programm B10HPGL.EXE eine „sliding force“ von -0,23, womit es sich hier um einen „key block“ vom Typ II handelt. In Abbildung 40 ist die dreidimensionale Stabilitätsanalyse vom Programm B04HPGL.EXE für den Block "010" dargestellt. Die schwarz gestrichelten Linien stellen den Reibungswinkel dar und verlaufen in einem Abstand von 5° . Das rote Plus "+" markiert den Reibungswinkel der benötigt wird, damit sich der Block in einem Gleichgewichtszustand befindet. In diesem Fall braucht es mindestens einen Reibungswinkel von 33° damit er stabil ist. Die restlichen Resultate vom Programm B10HPGL.EXE befinden sich im Anhang.

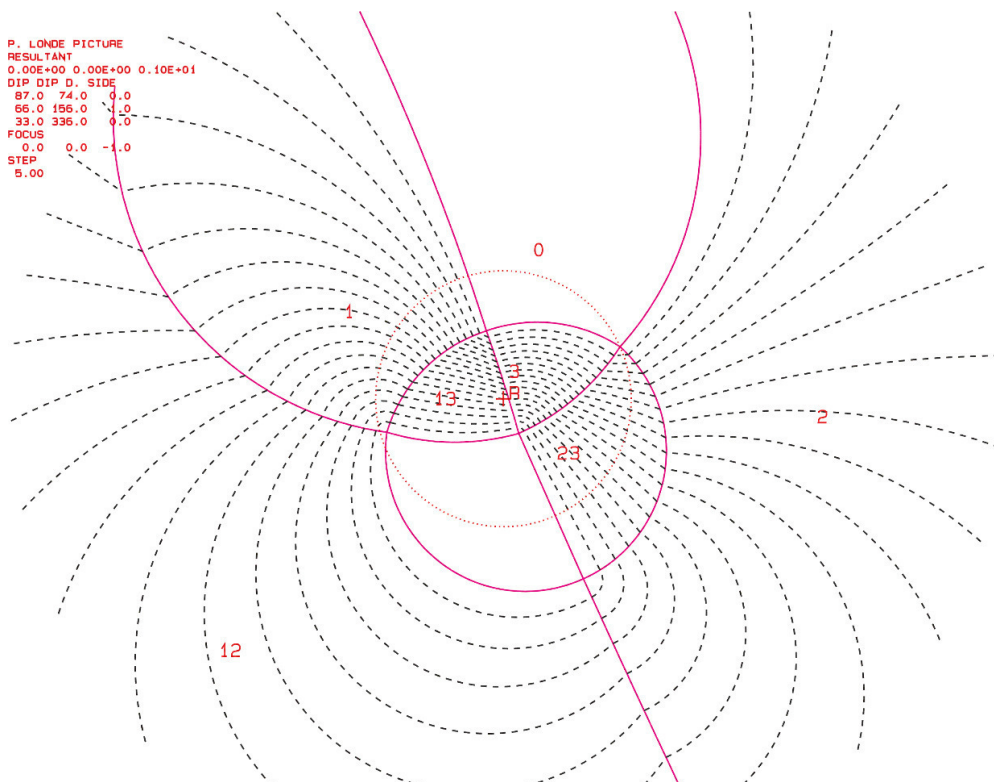


Abbildung 40: Projektion für den Block „010101“, der benötigte Reibungswinkel für einen Gleichgewichtszustand ist mit einem roten + markiert

Block 2

Der zweite Block (Abb. 41) befindet sich direkt unterhalb des ersten Blockes und ist komplett überhängend. Das heißt, hier sind die Trennflächen noch nicht durchgehend und er ist noch mit dem restlichen Gestein verbunden. Die Orientierungen aller Flächen und das abgeschätzte Volumen sind in Tabelle 9 enthalten. Sollten sich die zwei Trennflächen (P108 und P41) entsprechend erweitern, fällt dieser Block (Projektion in Abb. 42) in freiem Fall nach unten, wie das Versagensmodell in Abbildung 44 zeigt. Die Ergebnisse vom Programm B10HPGL.EXE sind im Anhang enthalten, eine weitere Stabilitätsanalyse mit dem Programm B04HPGL.EXE ist hier nicht erforderlich.

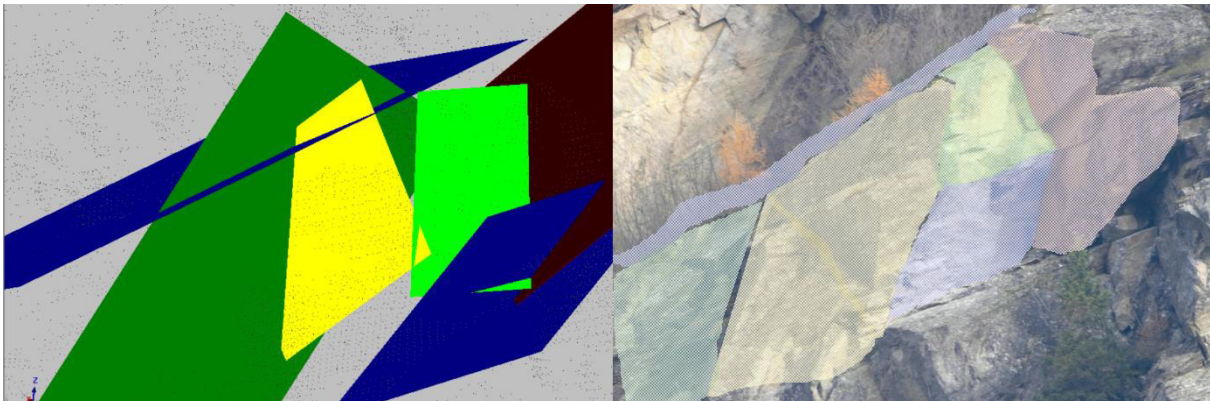


Abbildung 41: Die Trennflächen vom zweiten Block im virtuellen Modell und auf dem Foto

Tabelle 9: Orientierungen der Trennflächen des zweiten Blockes mit dem dazugehörigen BT Code und dem Volumen

B2	Farbe	dip	dip direction	BT Code
JP1 P108	green	88	73	1
JP2 P41	maroon	74	136	1
EP1 P110	lime	85	32	1
EP2 P37	yellow	87	125	0
EP3 P47	navy	43	12	1
EP4 P102	navy	33	336	0
Volumen [qm]	~ 125			

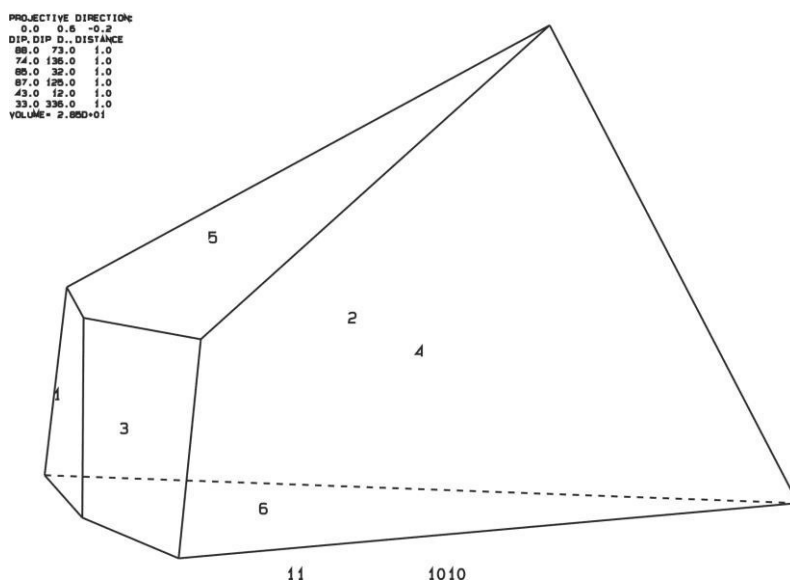


Abbildung 42: Rekonstruktion des zweiten Blockes „111010“ mit dem Programm

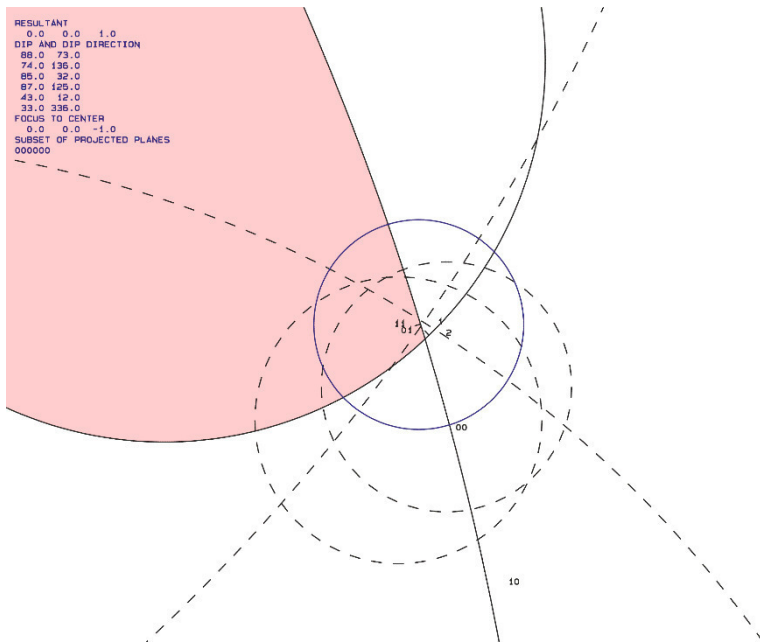


Abbildung 43: Stereographische Projektion des zweiten Blockes mit dem JP Code „11“

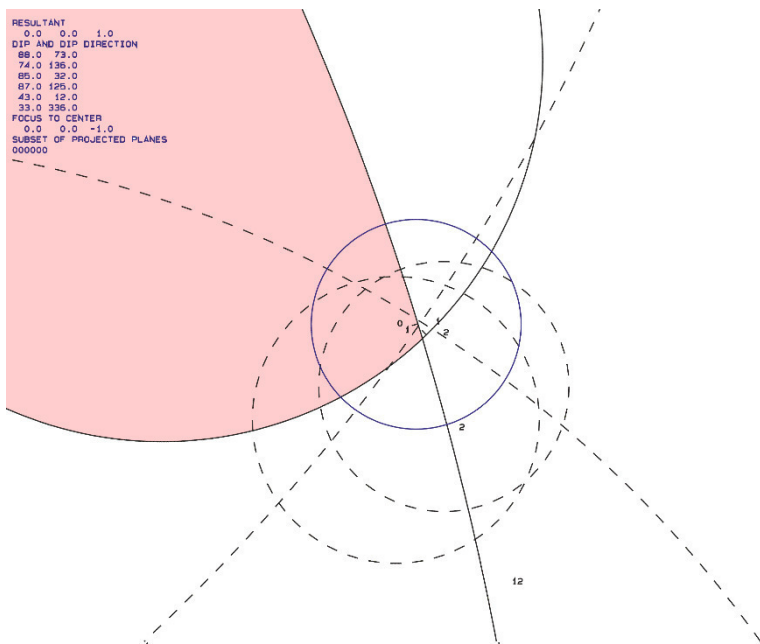


Abbildung 44: Stereographische Projektion des zweiten Blockes mit den Versagensmechanismen

Die Abbildungen 43 und 44 zeigen die Großkreise der Trennflächen und freien Flächen des zweiten Blockes mit dem Code „111010“. Die „0“ im rot markierten Bereich in Abbildung 44 bedeutet freier Fall.

Block 3

Der dritte Block ist ebenfalls bereits herausgebrochen und wird über die noch vorhandenen Trennflächen rekonstruiert (Abb. 45). Die dazugehörigen Einfallswinkel und Einfallsrichtungen sind in Tabelle 10 aufgelistet, das Volumen des Blockes beträgt ungefähr 100 m³.

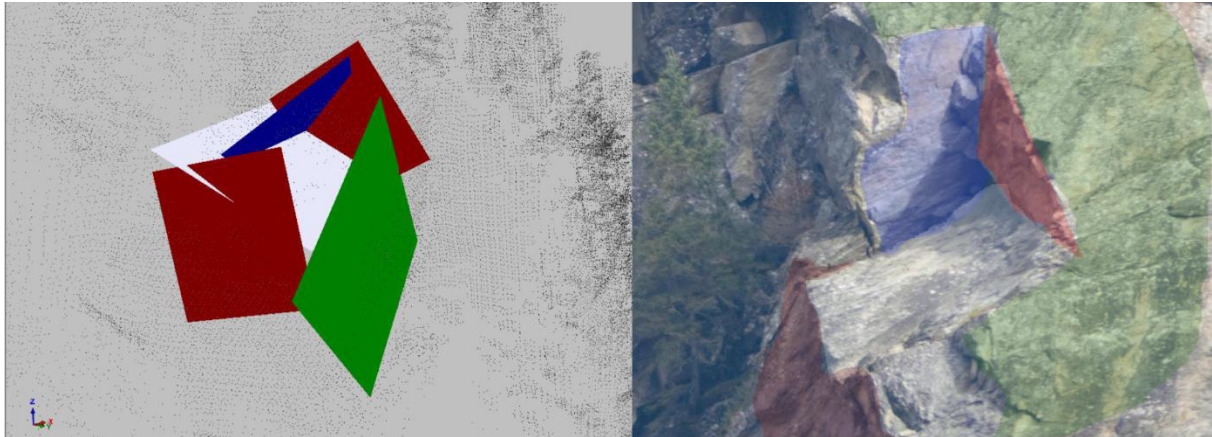


Abbildung 45: Ausschnitt links mit den virtuellen Trennflächen und daneben dieselben Flächen eingefärbt auf dem Foto

Tabelle 10: Orientierungen der Trennflächen und abgeschätztes Volumen von Block 3

B3	Farbe	dip	dip direction	BT Code
JP1 P180	white	45	282	0
JP2 P157	maroon	61	162	1
JP3 P058	navy	43	41	1
EP1 P181	maroon	76	159	0
EP2 P160	green	80	56	0
Volumen [m³]	~ 100			

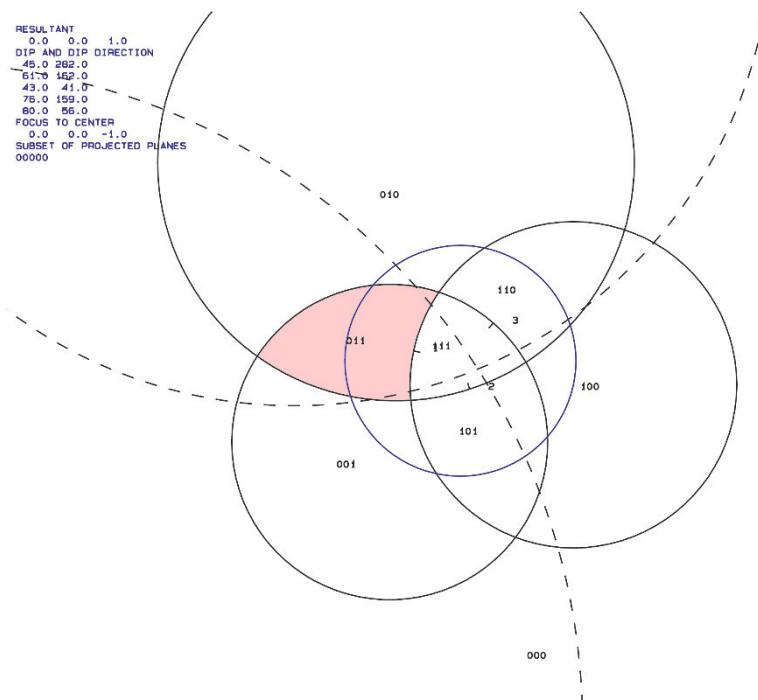


Abbildung 46: Stereographische Projektion des dritten Blockes mit dem JP Code „011“

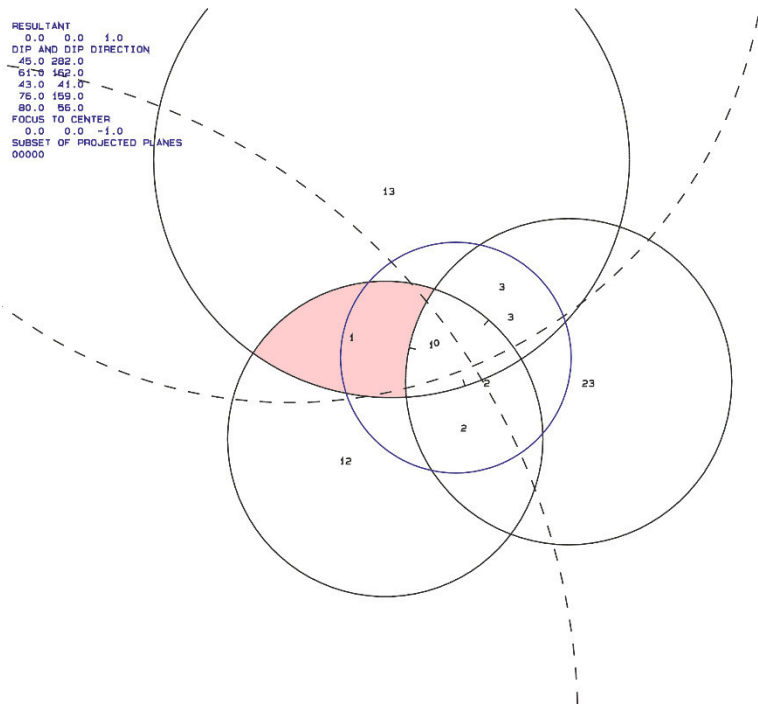


Abbildung 47: Plot mit dem Versagensmechanismus des dritten Blockes

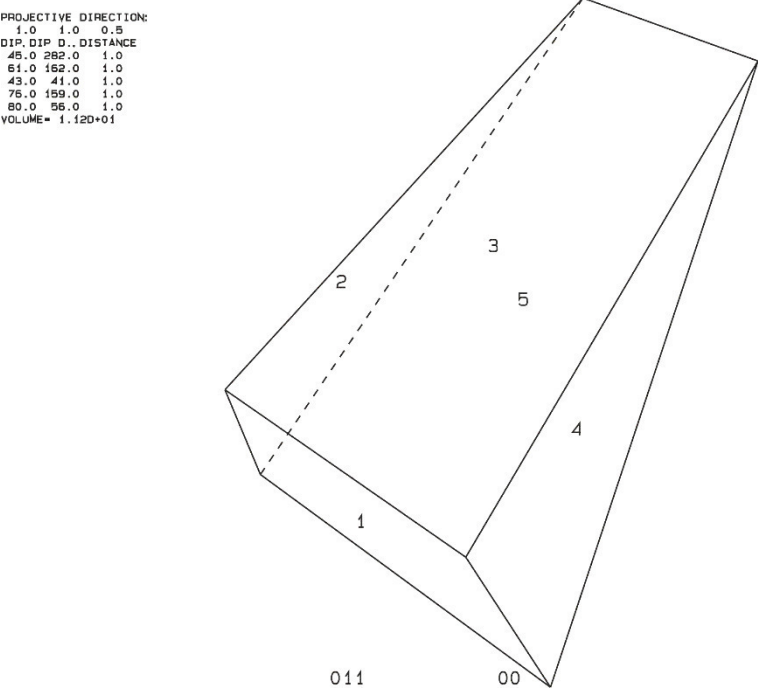


Abbildung 48: Rekonstruierte Blockform

Die Abbildungen 46 und 47 zeigen die Großkreise der Trennflächen und der freien Flächen vom dritten Block mit dem Code „01100“ (Abb. 45). Er kann entlang der Fläche 1 (P180) nach unten gleiten. Die Abbildung 48 zeigt die rekonstruierte Form mit dem Programm B03HPGL.EXE. Aus der weiteren Stabilitätsanalyse mit dem Programm B10HPGL.EXE geht hervor, dass es sich dabei um einen „key block“ vom Typ I handelt, da eine positive „sliding force“ von +0,11 berechnet wurde. In Abbildung 49 ist die dreidimensionale Stabilitätsanalyse für den Block "01100" dargestellt. In diesem Fall braucht es mindestens einen Reibungswinkel von 45° damit er stabil ist. Die gesamten Ergebnisse von Programm B10HPGL.EXE befinden sich im Anhang.

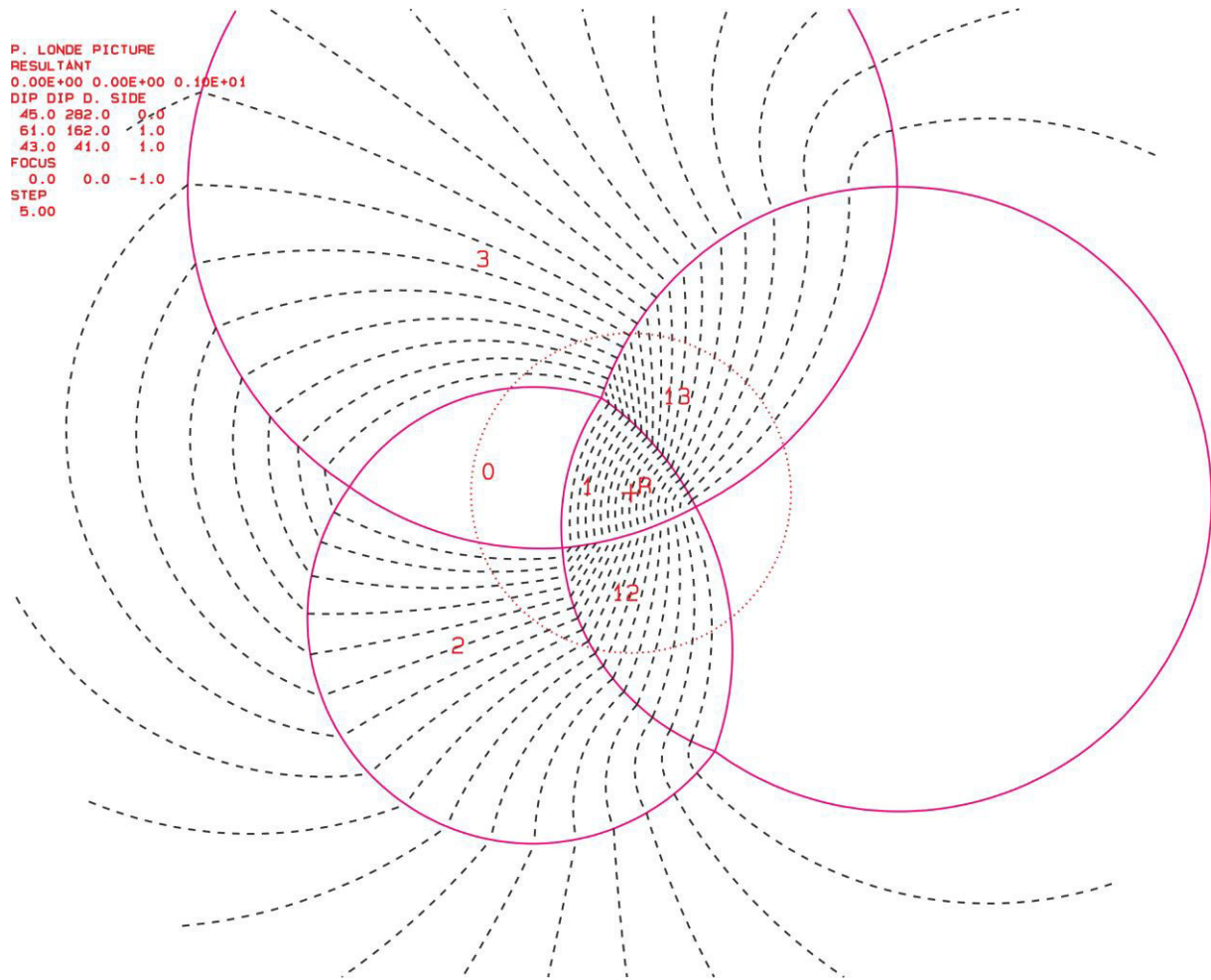


Abbildung 49: Stabilitätsanalyse des dritten Blockes mit dem Programm B04HPGL.EXE

Block 4

Der vierte Block (Abb. 50) befindet ungefähr in der Mitte der Felswand und ist, wie Block 2, komplett überhängend. Auch hier sind die Trennflächen noch nicht durchgehend und er ist noch im Verband mit dem restlichen Gestein. Die Orientierungen aller Flächen und das abgeschätzte Volumen sind in Tabelle 11 aufgelistet.

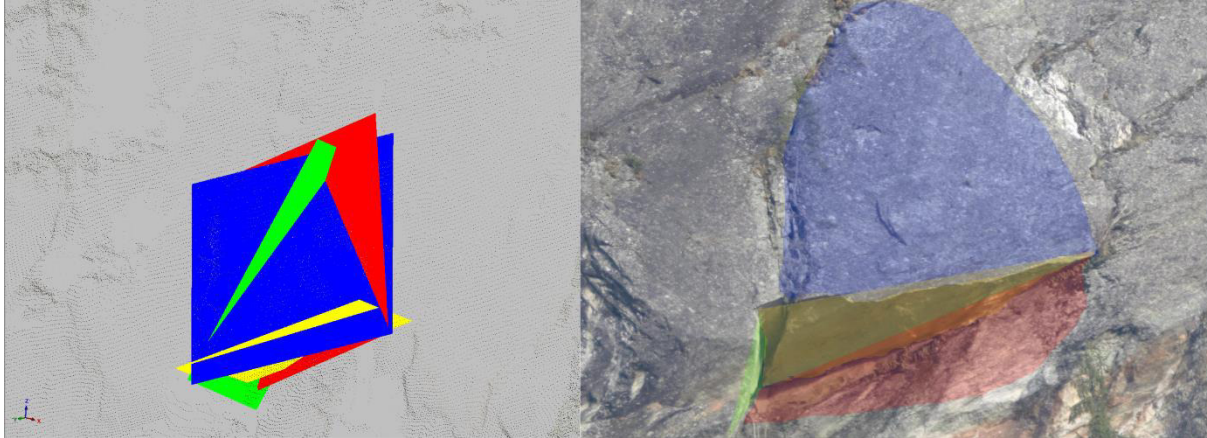


Abbildung 50: Die Trennflächen von Block 4 im virtuellen Modell links und auf dem Foto rechts

Tabelle 11: Fallwinkel und Fallrichtung der Trennflächen des vierten Blockes, ebenso angegeben ist das Volumen

B4	Farbe	dip	dip direction	BT Code
JP1 P100	green	62	341	1
JP2 P207	red	86	89	1
EP1 P001	yellow	16	346	0
EP2 P095	blue	79	247	1
Volumen [m³]	~ 200			

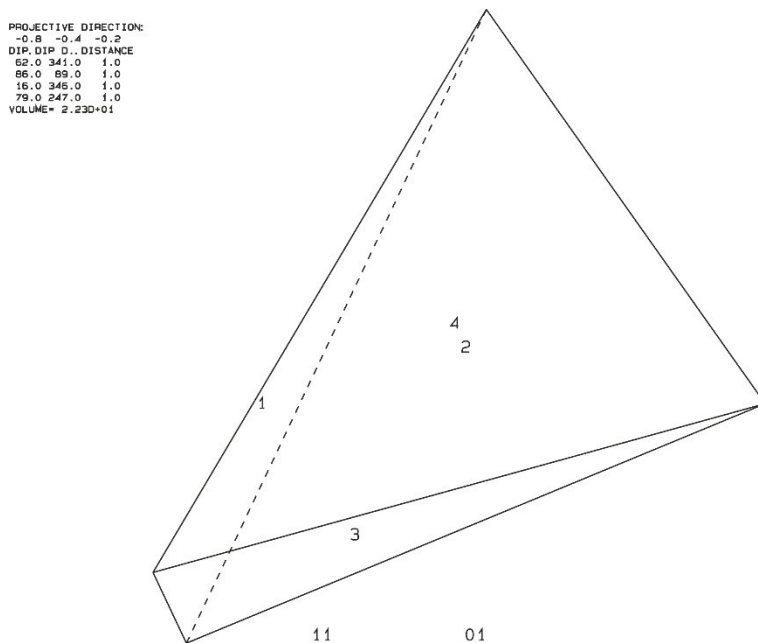


Abbildung 51: Rekonstruierte Blockform

```

RESULTANT
0.0 0.0 1.0
DIP AND DIP DIRECTION
52.0 341.0
66.0 89.0
16.0 346.0
79.0 247.0
FOCUS TO CENTER
0.0 0.0 -1.0
SUBSET OF PROJECTED PLANES
0000

```

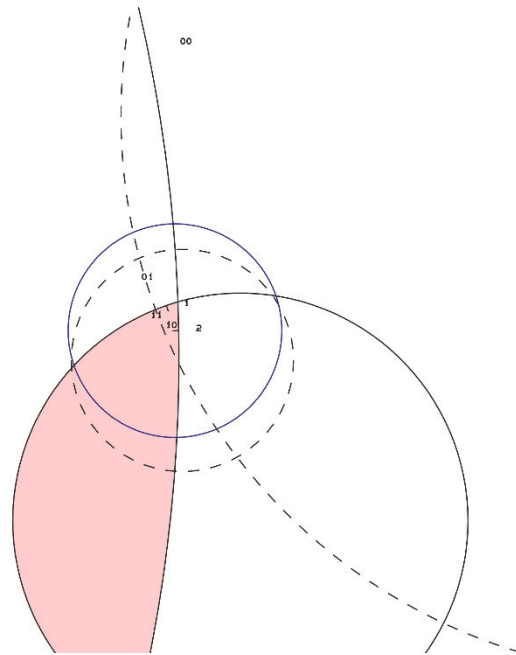


Abbildung 52: Die Trennflächen in der stereographischen Projektion

```

RESULTANT
0.0 0.0 1.0
DIP AND DIP DIRECTION
52.0 341.0
66.0 89.0
16.0 346.0
79.0 247.0
FOCUS TO CENTER
0.0 0.0 -1.0
SUBSET OF PROJECTED PLANES
0000

```

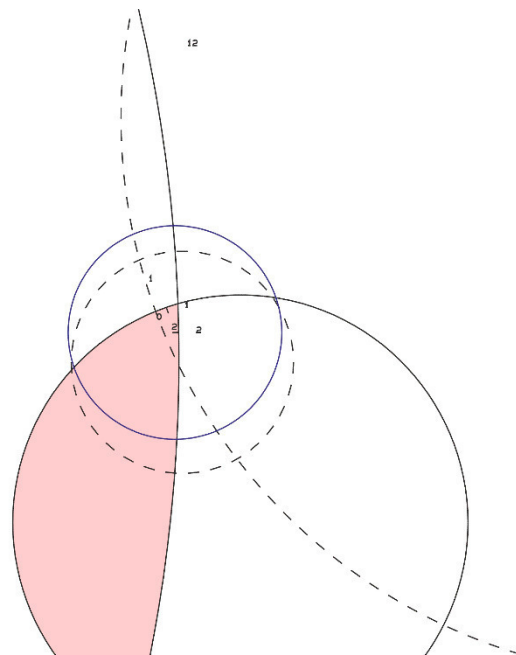


Abbildung 53: Stereographische Projektion mit den möglichen Versagensmechanismen

In Abbildung 51 ist die mit dem Programm B03HPGL.EXE rekonstruierte Blockform dargestellt. Die Großkreise der Trennflächen und freien Flächen des zweiten Blockes sind in den Abbildungen 52 und 53 geplottet. Laut berechnetem Versagensmechanismus fällt dieser Block in freiem Fall nach unten, wenn sich die zwei Trennflächen (P207 und P100) entsprechend erweitern sollten. Eine weitere Stabilitätsanalyse mit den Programmen B04HPGL.EXE ist deswegen auch hier nicht erforderlich. Die Ergebnisse vom Programm B10HPGL.EXE befinden sich im Anhang.

Block 5

Der fünfte Block befindet sich im mittleren Bereich der Felswand und bildet eine größere Stufe mit einem Volumen von fast 1000 m³. Der Block wird aus zwei Trennflächen und drei zusätzlichen freien Flächen gebildet (Abbildung 54 und Tab. 12).



Abbildung 54: Links Foto des Blockes und rechts das virtuelle Modell mit den konstruierten Trennflächen

Tabelle 12: Fallwinkel und Fallrichtung der Trennflächen von Block 5 mit dem JP Code „00“

B5	Farbe	dip	dip direction	BT Code
J1 P237	turquoise	85	344	0
J2 P238	orange	89	245	0
E1 P241	brown	14	152	0
E2 P239	violett	63	340	1
E2 P240	green	85	255	1
Volumen [m³]	~ 900			

PROJECTIVE DIRECTION:
 -0.5 0.2 0.4
 DIP, DIP 0, DISTANCE
 85.0 344.0 1.0
 89.0 245.0 1.0
 14.0 152.0 1.0
 63.0 340.0 1.0
 85.0 255.0 1.0
 VOLUME= 1.520+01

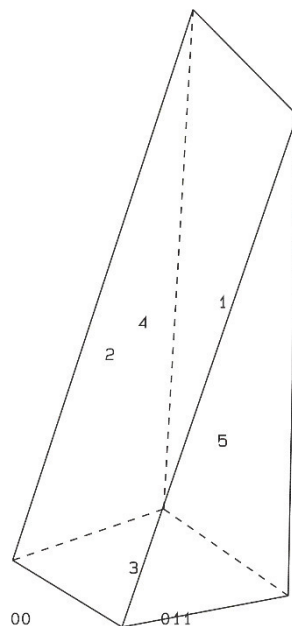


Abbildung 55: Konstruktion von Block 5 mit dem JP Code „00“

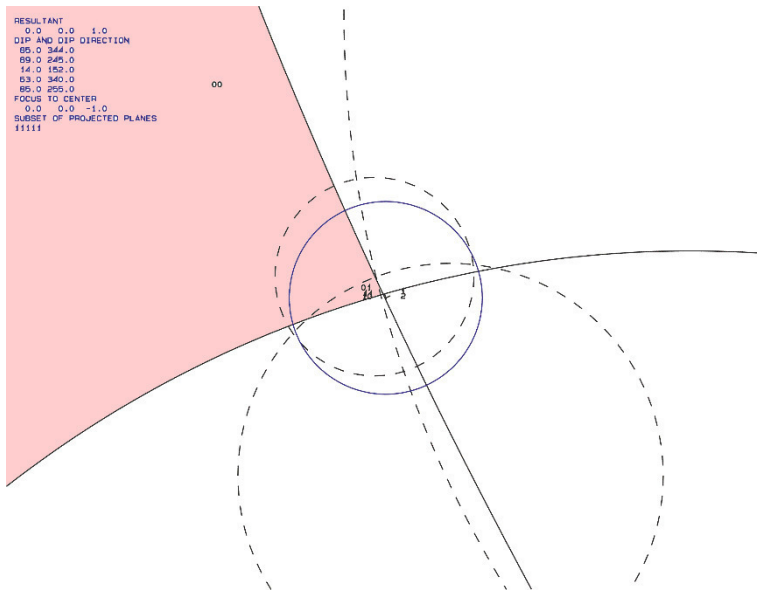


Abbildung 56: Die Großkreise der Trennflächen und freien Flächen mit den dazugehörigen JP-Codes

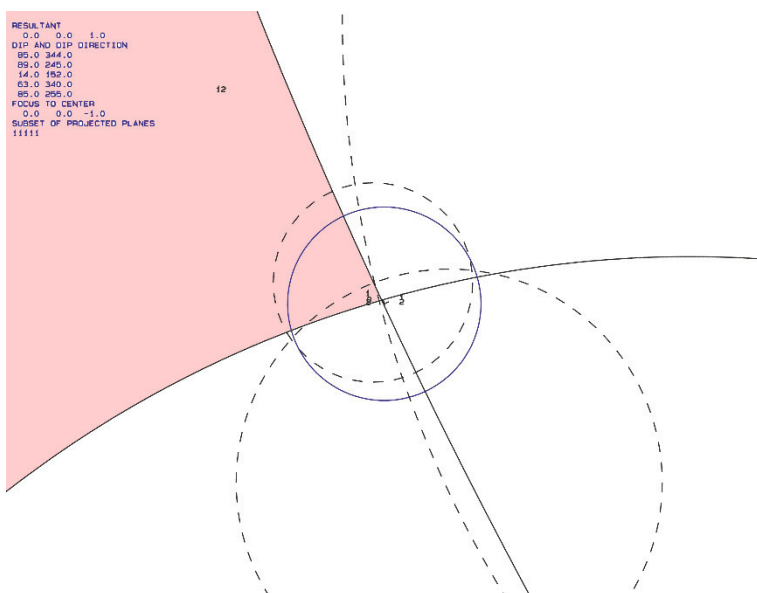


Abbildung 57: Die Großkreise der Trennflächen und freien Flächen mit den dazugehörigen Versagensmechanismen

In den Abbildungen 56 und 57 sind die Großkreise der zwei Trennflächen und der drei freien Flächen geplottet, der Block mit dem JP Code „00“ (Abb. 55) kann entlang der Flächen 1 (P237) und 2 (P238) nach unten gleiten. Das Programm B10HPGL.EXE gibt hier eine positive „sliding force“ von +0,91 aus und somit handelt sich dabei um einen „key block“ vom Typ I, falls sich die Trennflächen weiter öffnen und der Block nicht mehr mit dem restlichen Gestein verbunden bleibt. In Abbildung 58 ist die dreidimensionale Stabilitätsanalyse vom Programm B04HPGL.EXE für den Block „00“ dargestellt. Die schwarz gestrichelten Linien stellen den Reibungswinkel dar und verlaufen in einem Abstand von 5°. Das rote Plus "+" markiert den Reibungswinkel der benötigt wird, damit sich der Block in einem Gleichgewichtszustand befindet. In diesem Fall würde es einen Reibungswinkel von fast 90° brauchen, damit er stabil ist. Die gesamten Resultate von Programm B10HPGL.EXE befinden sich im Anhang.

RESULTANT
0.00E+00 0.00E+00 0.10E+01
DIP DIP D. SIDE
85.0 344.0 0.0
89.0 245.0 0.0
FOCUS:
0.0 0.0 -1.0
CONTOUR INTERVAL
5.0

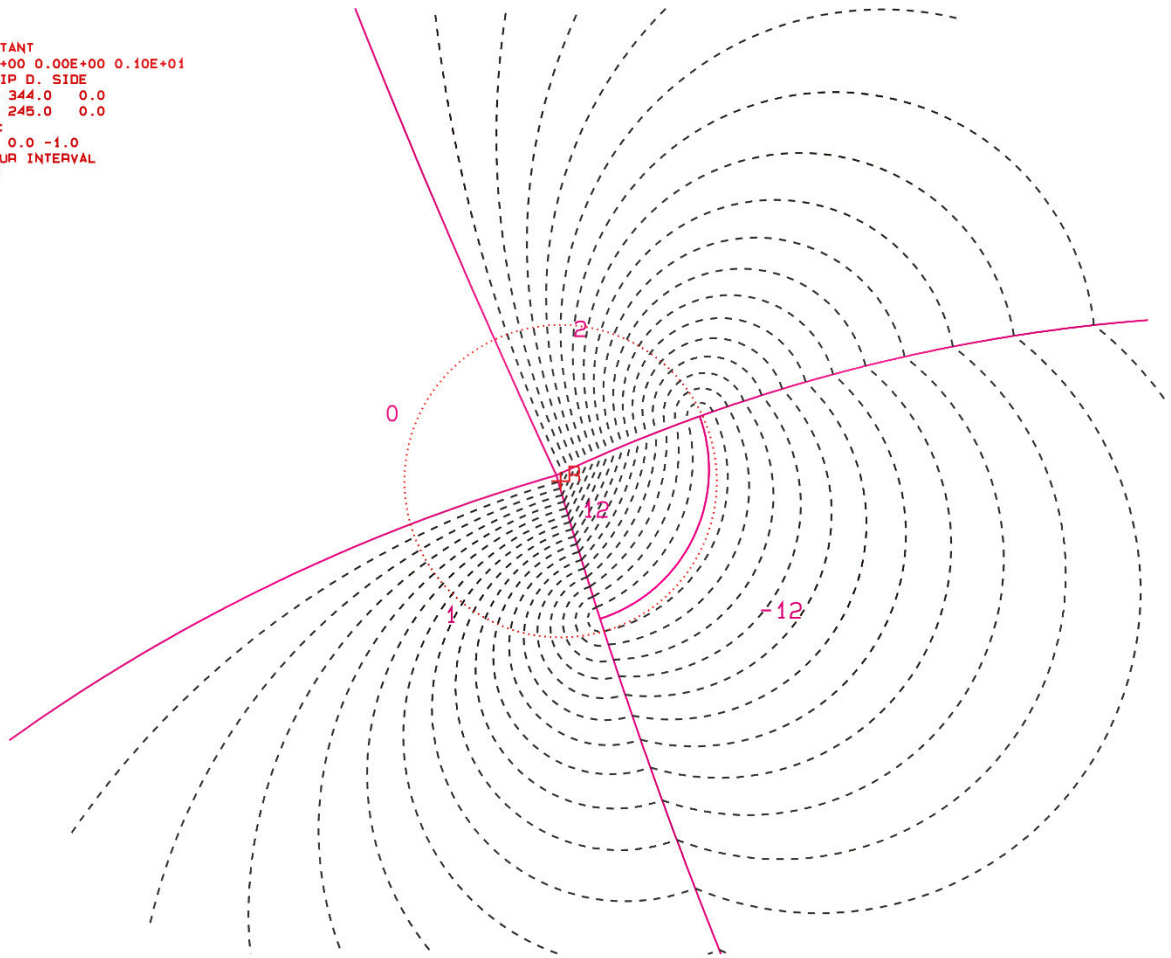


Abbildung 58: Stabilitätsanalyse für Block 5 mit dem JP Code „00“

5.5 Steinschlagsimulation mit RAMMS :: Rockfall

5.5.1 Kalibrierung der Felssturzsimulation

Um eine Steinschlagsimulation mit der Software RAMMS :: Rockfall durchzuführen sind digitale Rasterdaten eines Laserscans aus der Luft des Untersuchungsgebietes notwendig. Diese können direkt und kostenlos vom Geobrowser der Provinz Südtirol mit einer Auflösung von 5 m heruntergeladen werden. Daraus lässt sich ein digitales Höhenmodell erstellen, das mit dem passenden Orthofoto oder sonstigem Kartenmaterial überlagert werden kann. Für die Simulation müssen drei verschiedene „Shape files“ angelegt werden, die das Gelände in die Bereiche mit Wald, Boden (hier der Ablagerungsraum) und Felswand unterteilen (siehe Abb. 59).

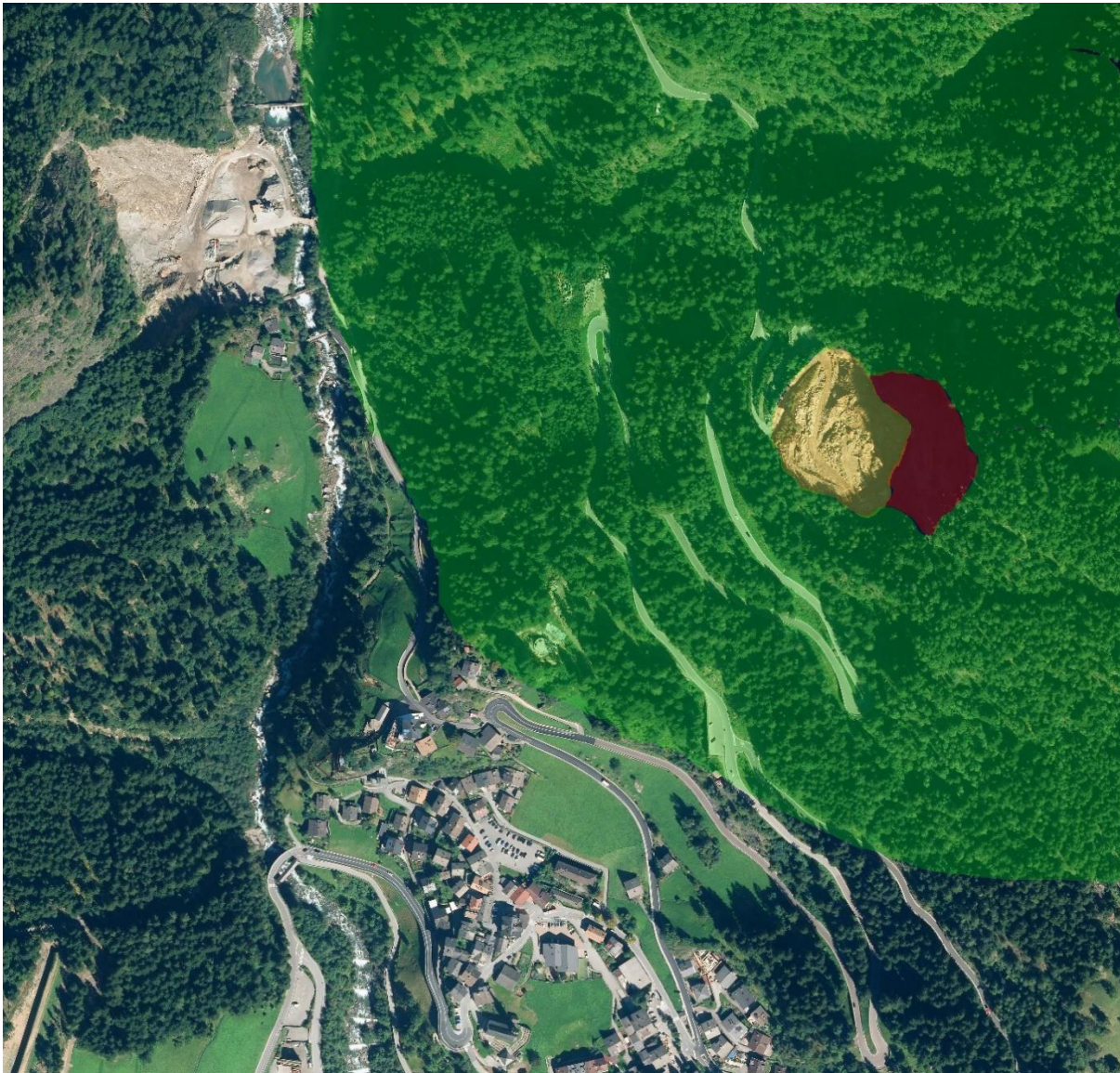


Abbildung 59: Die verschiedenen Shape-files mit Wald (grün), Ablagerungsareal (gelb) und Felswand (rot)

Ein weiteres „shape file“ wird gebraucht, um die Stellen auf der Felswand zu markieren, auf denen die Blöcke ihren Ausgangspunkt für die Simulation haben sollen. Dies kann entweder ganz gezielt über einzelne Punkte erfolgen oder auf mehreren Linien zufällig (Abb. 60) verteilt werden. Sind diese Dateien erstellt, kann damit begonnen werden die verschiedenen Parameter für die Felssturzsimulation einzustellen.



Abbildung 60: shape file mit den "Release lines" auf verschiedenen Höhenstufen

Sind all diese Dateien erstellt, müssen mit Hilfe des Benutzerhandbuches noch verschiedene Parameter (Abb. 61) eingestellt werden, bevor die Simulation gestartet werden kann.

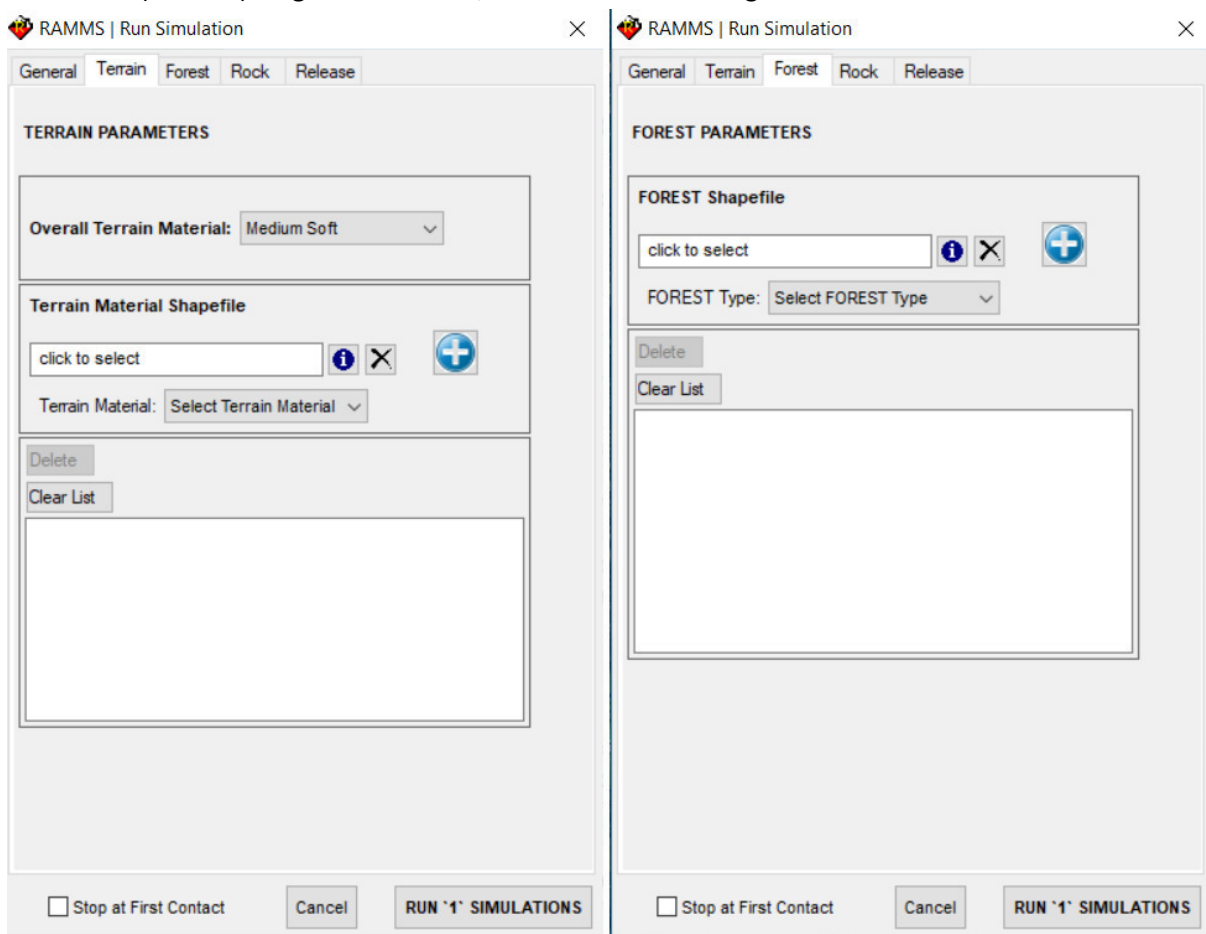


Abbildung 61: Den shape files für Boden und Wald muss ein Materialparameter zugewiesen werden

Der Felswand wird dabei die Kategorie „extra hard“, dem Ablagerungsareal darunter „hard“ und dem Wald wird eine mittlere Dichte zugewiesen.

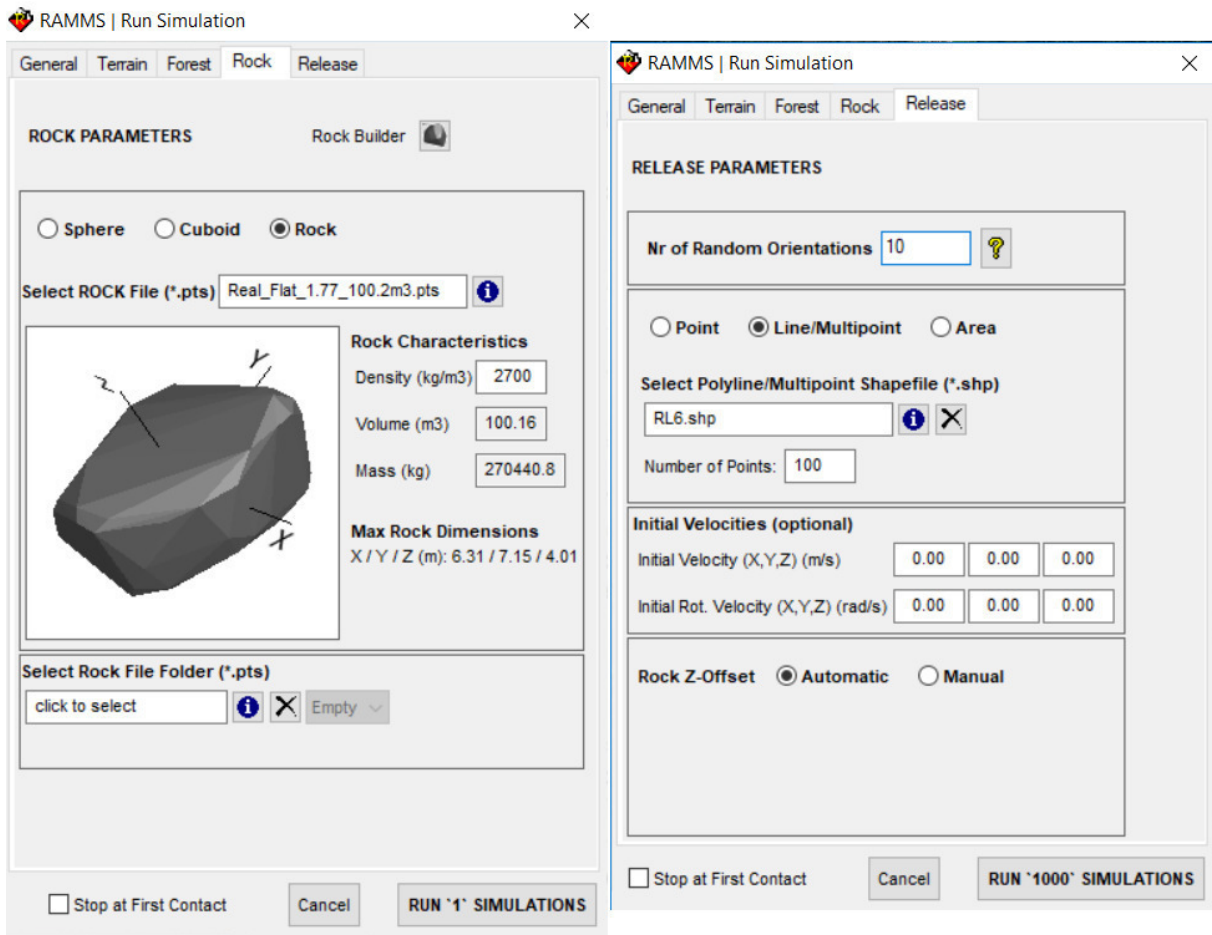


Abbildung 62: Eingabe von Blockform, shape file für die "Release line" und die Anzahl der Simulationen

Zum Schluss muss noch die Blockform, das Volumen und die Anzahl an gewünschten Simulationen eingegeben werden. Als Blocktyp wurde die Form „Real_Flat“ mit einem Volumen von 100 m³. ausgewählt. Aus den Ergebnissen der Stabilitätsanalysen hat sich ergeben, dass die Volumina der Blöcke durchaus größer sein können. Mit diesem Simulationsprogramm ist es jedoch nicht möglich solche zu berechnen. Auf den verschiedenen Höhenlinien entlang der Felswand werden 100 Simulationen mit zufälligen Startpunkten und 10 verschiedenen Orientierungen des Blockes durchgeführt. Es werden also insgesamt 1000 Felssturzsimulationen berechnet, am Ende bleiben aber auf Grund von verschiedenen Fehlern bei den Startpunkten noch 350 übrig.

5.5.2 Ergebnis der Felssturzsimulation

Das Resultat der Simulationen sind verschiedene „shape files“ und Plots mit allen relevanten Daten um entsprechende Schutzmaßnahmen planen zu können. Die zwei Wichtigsten sind in den nachfolgenden Bildern (Abb. 63 – 64) abgebildet. Alle weiteren Daten der Analyse befinden sich im Anhang.

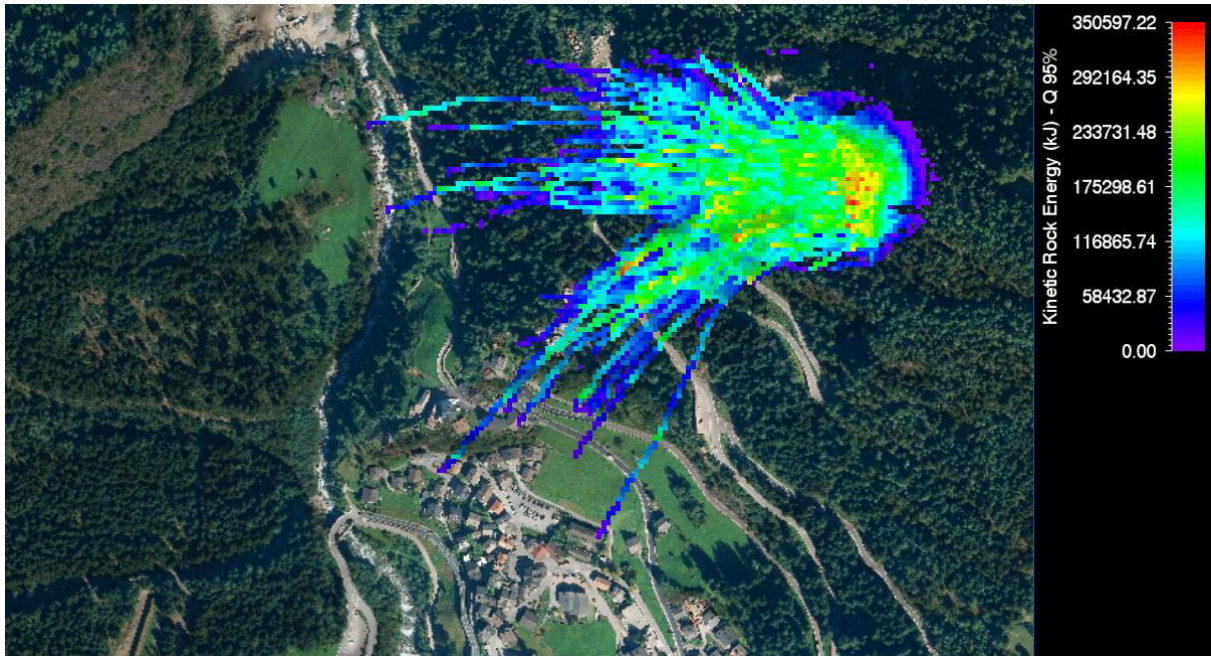


Abbildung 63: Kinetische Energie der Blöcke entlang ihres Sturzpfades (Draufsicht)

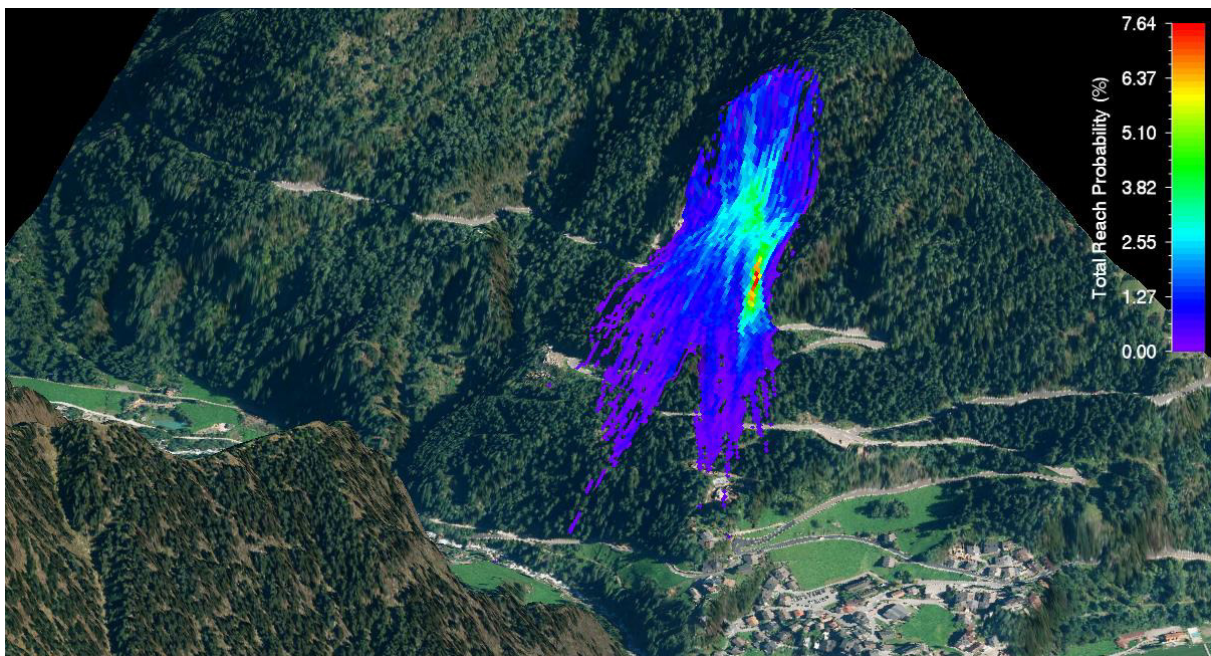


Abbildung 64: Mögliche Reichweite der Blöcke, Blickrichtung NE

Aus Abbildung 63 geht hervor, wie sich die kinetische Energie eines Blockes auf ihrem Weg ins Tal entlang von verschiedenen Sturzbahnen entwickelt. Auf Abbildung 64 ist zu sehen, wo sich Blöcke mit einem Volumen von 100 m^3 am wahrscheinlichsten ablagern werden.

6 Interpretation der Ergebnisse

Die räumliche Erfassung der Topographie mittels terrestrischem Laserscanner erlaubt es Punktwolken aus verschiedenen Scanpositionen miteinander zu registrieren und zu georeferenzieren. Dadurch kann ein hochgenaues, virtuelles 3D-Modell erstellt werden, in dem diverse Strukturen (z.B. Trennflächen und Blöcke) sehr genau charakterisiert werden können. Die darin ermittelten Trennflächen dienen als Grundlage um reale Blockformen zu rekonstruieren, die in weiterer Folge zur Kalibrierung der Felssturzsimulation verwendet wurden.

Aus der Stabilitätsanalyse mit der Block Theorie geht hervor, dass die rekonstruierten Blockformen, die sich aus den verschiedenen Trennflächen bilden können, sehr gut mit den im Gelände vorkommenden Formen übereinstimmen. Im virtuellen 3D-Laserscanmodell konnten instabile Blöcke mit einem Volumen bis ca. 1000 m³ ausgemacht werden. Besonders im oberen Bereich der Felswand wurden hauptsächlich "key blocks" und potentielle „key blocks" identifiziert (Block 1 entspricht dem Blocktyp II, Blöcke 2-4 entsprechen dem Blocktyp I, siehe Unterkapitel 5.4.3). Entweder fallen diese Blöcke direkt aus der Felswand oder gleiten entlang einer oder zweier Flächen nach unten. Weiters kann das Volumen, die Form und das Versagensmodell für jeden Block spezifisch und ortsbezogen bestimmt werden.

In Kombination mit Airborne-Laserscandaten wurde eine Steinschlagsimulation durchgeführt aus der sich ergibt, dass Felsstürze bis zum Rand von besiedeltem Gebiet möglich sind und somit eine Gefährdung für Mensch und Infrastruktur darstellen (vergleiche Kapitel 5.5.2). Das Programm RAMMS :: Rockfall berechnet bei einem Blockvolumen von 100 m³ eine Aufprallenergie von ca. 350000 kJ und eine Fallgeschwindigkeit von 50 ms⁻¹. Die meisten großen Blöcke werden beim Aufprall jedoch fragmentieren, wie es auch beim Sturz von Block 1 (siehe Kapitel 5.4.3) geschah.

7 Diskussion

Die Trennflächenerfassung mittels terrestrischem Laserscanner in Kombination mit hochauflösenden Fotos erweist sich als sehr effektive Methode um schwer zugängliche Gebiete zu vermessen und zu charakterisieren. Aus den daraus resultierenden Daten ist es möglich ein realistisches, virtuelles Trennflächenmodell zu erstellen. In Kombination mit der Block Theorie können damit Aussagen über die Stabilität eines Gebirges gemacht werden. Da alle Datenpunkte aus dem Laserscan einer x-, y- und z- Koordinate zugeordnet und georeferenziert sind, lassen sich die identifizierten Blöcke und Trennflächen ortsbezogen im Computermodell darstellen. Dieses Modell wurde vor allem dazu verwendet um die wahrscheinlichen Blockformen und -größen für einen Steinschlag am Standort abzuschätzen.

Die numerische Felssturzsimulation mit dem Programm RAMMS :: Rockfall liefert räumliche Informationen wie das Risiko eines Felssturzes einzuschätzen ist. Sie funktioniert aber nur bis zu einem Volumen von 100 m³. Aus der Stabilitätsanalyse mit der Block Theorie geht aber hervor, dass aber mit weitaus größeren Volumina gerechnet werden muss. Die Simulation berücksichtigt auch keine Fragmentierung von Gesteinsblöcken, die sicher eine Auswirkung auf den Ausgang eines Felssturzes hat. Ein großer Felsbrocken bewegt sich weiter, da es weniger wahrscheinlich ist, dass er durch Unebenheiten des Gefälles und Vegetation gestoppt wird. Die Blockform wiederum beeinflusst die Dynamik eines Felssturzevents, weshalb es von Vorteil wäre, wenn die modellierten Blockformen direkt in das Simulationsprogramm importiert werden könnten. Dies ist bei derzeitigem Stand der

Software aber nicht möglich. Weiters ist die Genauigkeit der Steinschlagsimulation von der Dichte der Vegetation und dem Untergrund abhängig. Da die Dichte der Vegetation nur abgeschätzt und nicht parametrisiert wurde kann es sicher zu Abweichungen in der Reichweite der Blöcke kommen. Auch die Härte des Untergrundes variiert zwischen den Jahreszeiten. Diese natürlichen Schwankungen haben einen großen Einfluss auf das Ergebnis eines Felssturzes.

Aus den Beobachtungen der Ablagerungsräume und der Blockgrößen im Gelände unterhalb der Felswand lässt sich schließen, dass die Felssturzsimulation sehr realistische Werte liefert und sich die im Feld ermittelten Daten sehr gut zur Kalibrierung des Programmes eignen.

8 Fazit

In dieser Arbeit konnten aus LiDAR - Fernerkundungsdaten und hochauflösenden Digitalfotos Trennflächen und Blöcke auf einer normalerweise sehr schwer zu erfassenden Felswand identifiziert werden. Mit den georeferenzierten Laserscandaten ist es möglich die Kluftscharen und die sich daraus bildenden Blockkörper ortbezogen und mit sehr hoher Genauigkeit in einem virtuellen Modell darzustellen. Die Block Theorie beweist sich als effektive Möglichkeit um Erkenntnisse über die Stabilität, den Versagensmechanismus, das Volumen und die Form der einzelnen Gesteinskörper zu erhalten. Diese Ergebnisse können in weiterer Folge für die Felssturzsimulation verwendet werden.

Vor allem am Top der untersuchten Felswand konnten zahlreiche potentielle „key blocks“ identifiziert werden, die zum Teil ein Volumen von mehreren 100 m³ haben. Sollten sich hier die Trennflächen öffnen, fallen oder gleiten sie sofort in die Tiefe. Dies ist insofern höchst relevant, da dies der Bereich mit der größten potentiellen Energie ist und somit für die am Hangfuß liegende Straße und Ortschaft die größte Gefahr birgt. Grund für die Ausbildung der potentiellen „key blocks“ und somit des Steinschlagpotentials ist vor allem der Wechsel in der Lithologie vom Paragneis zum Glimmerschiefer.

Die Analyse der Felssturzsimulation zeigt, dass das Dorf Moos in Passeier relativ gut vor Steinschlag geschützt ist, die Staatsstraße (SS44) aber durchaus davon betroffen sein kann. Da die Simulation nur mit einem maximalen Einzelblockvolumen von 100 m³ durchgeführt werden kann, sollte dennoch mit einer größeren Reichweite gerechnet werden, da sich bei der Auswertung der Trennflächen herausgestellt hat, dass sich aus der Felswand weitaus größere Blöcke lösen können. Um vor allem die Straße und somit passierende Personen zu schützen, wird empfohlen am Rand des Ablagerungsareals (Abb. 65) einen entsprechend dimensionierten bewehrten Damm zu errichten. Die Ergebnisse in der vorliegenden Masterarbeit weisen lediglich auf das Gefahrenpotential hin, das die untersuchte Felswand nördlich von Moos in Passeier in sich birgt, und verdeutlichen dieses. Für die Berechnung der Dammdimensionen und der exakten Positionierung sind weitere Untersuchungen und Simulationen notwendig.



Abbildung 65: die empfohlene Position des Dammes ist mit rot markiert

9 Quellen

- 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. 625-638.
- Frank, W., Schlager, W. (2006): Jurassic strike slip versus subduction in the Eastern Alps. *Int. J. Earth Sci.* 95. 431-450.
- Froitzheim, N., Schmid, S.M., Conti, P. (1994): Repeated change from crustal shortening to orogen-parallel extension in the Austroalpine units of Graubünden. *Eclogae Geol. Helv.* 87. 559-612.
- Goodman, R.E. & Shi, G.H. (1985): *Block Theory and Its Application to Rock Engineering*. Prentice-Hall International, Inc.
- Habler, G., Thöni, M. & Sölva, H. (2006): Tracing the high-pressure stage in the polymetamorphic Texel Complex (Austroalpine basement unit, Eastern Alps): P-T-t-d constraints. *Mineralogy Petrology* 88. 269-296.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. & Collins, J. (1997): *Global Positioning System: Theory and Practice*. 4th. Springer, Berlin.
- Laubscher, HP. (1988): Material balance in Alpine orogeny. *Geol Soc Am Bull* 100. 1313-1328.
- Leica Geosystems AG (2009): *Leica Viva GNSS GS15 receiver – Datasheet*
- Liu Q., *Modelling in Engineering Geology* (2016): Skript GEO.941. TU Graz
- McCaffrey, K.J.W., Jones, R.R. & Holdsworth, R.E. et al. (2005): Unlocking the spatial dimension: digital technologies and the future of geoscience fieldwork. *Journal of the Geological Society*. London. 162. 927–938.
- Meier, A. (2003): *The Periadriatic fault system in Valtellina (N-Italy) and the evolution of the southwestern segment of the Eastern Alps*. PhD thesis. ETH Zürich No. 15008. 234.
- Pomella, H., Stipp, M., & Fügenschuh, B. (2012). Thermochronological record of thrusting and strike-slip faulting along the Giudicarie fault system (Alps, Northern Italy). *Tectonophysics* 579. 118-130.
- Prinz H. & und Strauß R. (2011): *Ingenieurgeologie*. 5. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag. 118-122.
- RIEGL Austria (2008): *3D Terrestrial Laser Scanner Z620 – Technical Data*
- RiSCAN PRO Help, version (2009): 1.5.2sp2. RIEGL LMS GmbH.
- Rod, E. (1979): Origin of arc of the Western Alps. *Bulletin of the Australian Society of Exploration Geophysicists* 10(2). 169-173.
- Schmid, S.M., Fügenschuh, B., Kissling, E., Schuster, R. (2004): Tectonic map and overall architecture of the Alpine orogen. *Eclogae geol. Helv.* 97. 93-117.
- Sölva, H., Thöni, M., Grasmann, B., Linner, M. (2001): Emplacement of eo-Alpine high-pressure rocks in the Austroalpine Ötztal Complex (Texel Group, Italy/Austria). *Geodin Acta* 14. 345–360.

- Sölva, H., Grasmann, B., Thöni, M., Thiede, R., Habler, G. (2005): The Schneeberg Normal Fault Zone: Normal faulting associated with the Cretaceous SE-directed extrusion in the Eastern Alps (Italy/Austria). *Tectonophysics* 401. 143-166.
- Speckbacher, R. (2009). Die tektonometamorphe Entwicklung des Texel Komplexes: Strukturgeologie im Pfossental, Südtirol. Diplomarbeit an der Universität Innsbruck
- Wagreich, M. (1995): Subduction tectonic erosion and Late Cretaceous subsidence along the northern Austroalpine margin (Eastern Alps, Austria). *Tectonophysics* 242. 63-78.
- Wehr, A. & Lohr, U. (1999): Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54. 68–82.

Webseiten:

- http://gis2.provinz.bz.it/geobrowser/?project=geobrowser_pro&view=geobrowser_pro_atlas-b&locale=de, 20.11.2018
- http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/11_DataSheet_RiSCAN-PRO_22-09-2010_03.pdf, 20.11.2018

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die Ortschaft Moos in Passeier in Südtirol (OpenStreetmap, 2017)	4
Abbildung 2: Übersichtskarte auf das Arbeitsgebiet (in rot markiert) und die tektonischen Einheiten (Pomella et al. 2012)	5
Abbildung 3: Paläographische Rekonstruktion in der Unterkreide (Schmid et al., 2004).....	6
Abbildung 4: Rezente Situation im Bereich des Arbeitsgebietes, das schwarze Quadrat zeigt ungefähr die Lage des Arbeitsgebietes (Speckbacher, 2009).....	6
Abbildung 5: Querschnitt durch den Texel und Schneeberg Komplex, die Stereoplots zeigen die Orientierungen der planaren und linearen Gefügeelemente in den verschiedenen Deformationsphasen der eo-alpinen Scherzone (Sölva, 2005).....	7
Abbildung 6: Blick von Scanposition 1 auf die Felswand, die Trennflächen werden zum Teil von Vegetation verdeckt	8
Abbildung 7: Blick von der Scanposition 2 auf die Felswand, ein höherer Standort wäre idealer ist aber nicht möglich.....	9
Abbildung 8: Die verschiedenen Scanpositionen neben der Felswand (http://gis2.provinz.bz.it/geobrowser , 16.11.2017)	10
Abbildung 9: RIEGL LMS-Z620 Laserscanner mit montiertem Leica Viva GNSS GS15, im Hintergrund die Felswand.....	11
Abbildung 10: Technische Daten RIEGL LMS-Z620 (RIEGL, 2008)	12
Abbildung 11: Aufbau LiDAR-Gerät: (1) Messelektronik, (2) Laserstrahl, (3) Polygon, (4) Optik, (5) Ethernet-Schnittstelle, (6) Laptop, (7) Digitalkamera, (8) USB-Schnittstelle (RIEGL 2008).....	13
Abbildung 12: Technische Angaben zu Performance und Genauigkeit des Leica Viva GNSS GS15 Empfängers (aus Leica, 2009).....	14
Abbildung 13: "Backsighting orientation" am Beispiel der Scanposition 1.....	18

Abbildung 14: Die Abweichungen der verschiedenen Laserscans sind klar ersichtlich, SP 1 ist in weiß, SP 2 in blau und SP 3 in gelb dargestellt	19
Abbildung 15: Erstellen einer Polydatei mit der Funktion "plane surface filter"	19
Abbildung 16: Die Scanposition 1 wird gesperrt, alle anderen werden darauf ausgerichtet	20
Abbildung 17: Die Polydaten von Scanposition 2 werden auf Scanposition 1 angepasst, der Suchradius beträgt 2 m und der Fehler der Standardabweichung 0,0292 m.....	20
Abbildung 18: Der Suchradius beträgt jetzt 1 m und der Fehler der Standardabweichung 0,0255 m .	21
Abbildung 19: Bei einem Suchradius von mittlerweile nur noch 0,6 m konnte auch die Standardabweichung auf einen Fehler von 0,0088 m reduziert werden.....	21
Abbildung 20: Alle Scanpositionen sind nach dem "Multi Station Adjustment" exakt aufeinander registriert, Scanposition 1 in weiß, Scanposition 2 in blau und Scanposition 3 in gelb	22
Abbildung 21: Der ausgeschnittene und Datenbereich der Felswand mit den Farbinformationen aus den Fotos.....	22
Abbildung 22: Parameter zur Klassifizierung von Trennflächen (Prinz, 2011)	23
Abbildung 23: Einbau von Trennflächen im RiSCAN	23
Abbildung 24: Die eingebauten und farblich zugeordneten Trennflächen im oberen Bereich der Felswand.....	24
Abbildung 25: Vor allem im oberen Bereich der Felswand sind sehr mächtige Trennflächen vorhanden	24
Abbildung 26: Polpunkte der Schieferungsfläche	25
Abbildung 27: Polpunkte der Kluftschar 1 (KF 1)	26
Abbildung 28: Polpunkte der Kluftschar 2 (KF 2)	27
Abbildung 29: Polpunkte der Kluftschar 3 (KF 3)	28
Abbildung 30: Polpunkte der Kluftschar 4 (KF 4)	29
Abbildung 31: Verschiedene Blocktypen (Liu, 2016).....	30
Abbildung 32: Die Kluftscharen, die zum Generieren der möglichen Blöcke verwendet wurden	31
Abbildung 33: Stereographische Projektion der verschiedenen Kluftscharen mit den dazugehörenden „Block Codes“	31
Abbildung 34: Mögliche Blockformen, es sind noch zahlreiche weitere aus denselben Kluftscharen möglich die zum Teil aber recht ähnlich aussehen	32
Abbildung 35: Gesteinsblöcke im Areal unterhalb der Felswand	33
Abbildung 36: Ausschnitt links oben mit den virtuellen Trennflächen, darunter und daneben dieselben eingefärbten Flächen auf verschiedenen Fotos.....	34
Abbildung 37: Die Großkreise der Trennflächen und freien Flächen mit den dazugehörenden JP-Codes	35
Abbildung 38: Die Großkreise der Trennflächen und freien Flächen mit den entsprechenden Versagensmechanismen.....	35
Abbildung 39: dreidimensionale Darstellung des Blockes "010101"	36
Abbildung 40: Projektion für den Block „010101“, der benötigte Reibungswinkel für einen Gleichgewichtszustand ist mit einem roten + markiert	36
Abbildung 41: Die Trennflächen vom zweiten Block im virtuellen Modell und auf dem Foto	37
Abbildung 42: Rekonstruktion des zweiten Blockes „111010“ mit dem Programm B03HPGL.EXE.....	37
Abbildung 43: Stereographische Projektion des zweiten Blockes mit dem JP Code „11“	38
Abbildung 44: Stereographische Projektion des zweiten Blockes mit den Versagensmechanismen... ..	38
Abbildung 45: Ausschnitt links mit den virtuellen Trennflächen und daneben dieselben Flächen eingefärbt auf dem Foto.....	39
Abbildung 46: Stereographische Projektion des dritten Blockes mit dem JP Code „011“	39
Abbildung 47: Plot mit dem Versagensmechanismus des dritten Blockes	40
Abbildung 48: Rekonstruierte Blockform	40

Abbildung 49: Stabilitätsanalyse des dritten Blockes mit dem Programm B04HPGL.EXE	41
Abbildung 50: Die Trennflächen von Block 4 im virtuellen Modell links und auf dem Foto rechts	42
Abbildung 51: Rekonstruierte Blockform	42
Abbildung 52: Die Trennflächen in der stereographischen Projektion	43
Abbildung 53: Stereographische Projektion mit den möglichen Versagensmechanismen	43
Abbildung 54: Links Foto des Blockes und rechts das virtuelle Modell mit den konstruierten Trennflächen	44
Abbildung 55: Konstruktion von Block 5 mit dem JP Code „00“	44
Abbildung 56: Die Großkreise der Trennflächen und freien Flächen mit den dazugehörenden JP-Codes	45
Abbildung 57: Die Großkreise der Trennflächen und freien Flächen mit den dazugehörenden Versagensmechanismen.....	45
Abbildung 58: Stabilitätsanalyse für Block 5 mit dem JP Code „00“	46
Abbildung 59: Die verschiedenen Shape-files mit Wald (grün), Ablagerungsareal (gelb) und Felswand (rot).....	47
Abbildung 60: shape file mit den "Release lines" auf verschiedenen Höhenstufen	48
Abbildung 61: Den shape files für Boden und Wald muss ein Materialparameter zugewiesen werden	48
Abbildung 62: Eingabe von Blockform, shape file für die "Release line" und die Anzahl der Simulationen	49
Abbildung 63: Kinetische Energie der Blöcke entlang ihres Sturzpades (Draufsicht)	50
Abbildung 64: Mögliche Reichweite der Blöcke, Blickrichtung NE	50
Abbildung 65: die empfohlene Position des Dammes ist mit rot markiert.....	53

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: RTK-GPS Messwerte für Scanner- und Reflektorposition der verschiedenen Scanpositionen (SP 1-3)	17
Tabelle 2: Einfallswinkel und Fallrichtung der Schieferungsflächen	25
Tabelle 3: Einfallswinkel und Fallrichtung von Kluftschar 1 (KF 1)	26
Tabelle 4: Einfallswinkel und Fallrichtung von Kluftschar 2 (KF 2)	27
Tabelle 5: Einfallswinkel und Fallrichtung von Kluftschar 3 (KF 3)	28
Tabelle 6: Einfallswinkel und Fallrichtung von Kluftschar 4 (KF 4)	29
Tabelle 7: Orientierung der relevanten Kluftscharen.....	31
Tabelle 8: Orientierung, Block Theorie Code und Volumen von Block 1	35
Tabelle 9: Orientierungen der Trennflächen des zweiten Blockes mit dem dazugehörenden BT Code und dem Volumen	37
Tabelle 10: Orientierungen der Trennflächen und abgeschätztes Volumen von Block 3.....	39
Tabelle 11: Fallwinkel und Fallrichtung der Trennflächen des vierten Blockes, ebenso angegeben ist das Volumen.....	42
Tabelle 12: Fallwinkel und Fallrichtung der Trennflächen von Block 5 mit dem JP Code „00“	44

12 Anhang

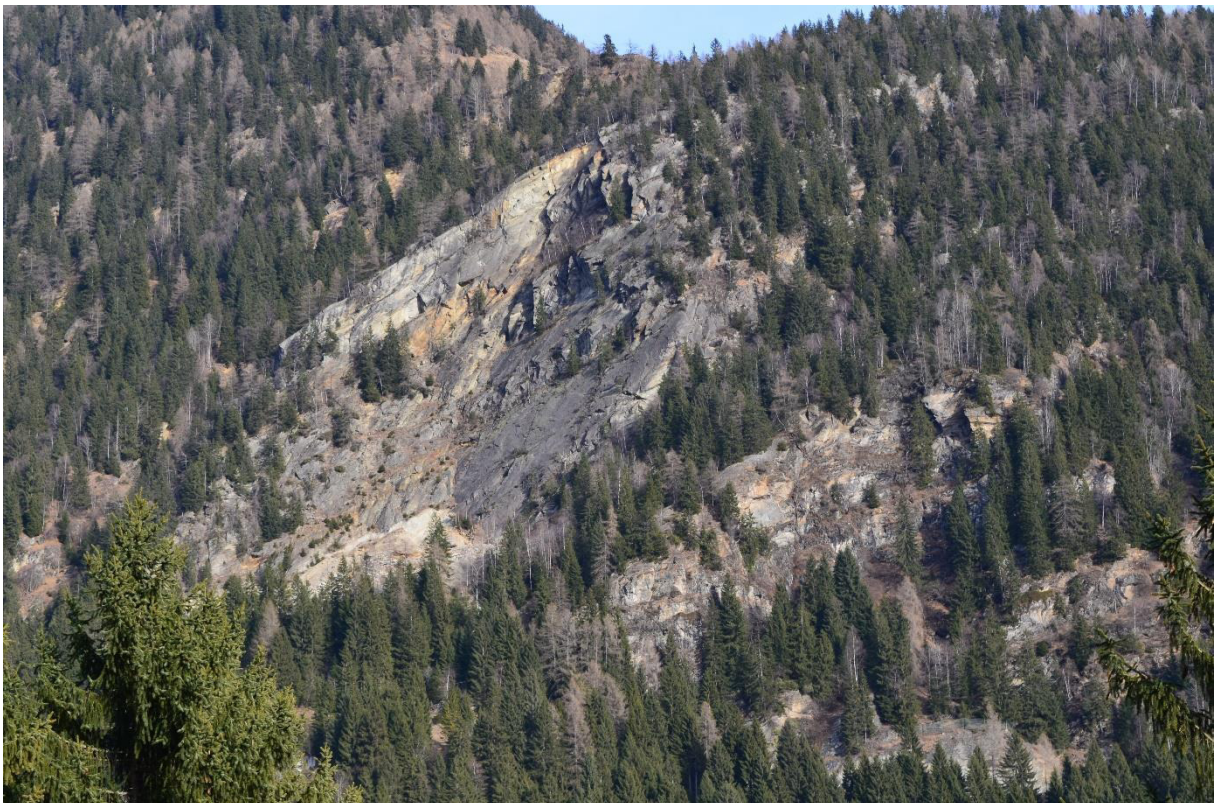
Der Anhang ist in folgende Teilbereiche untergliedert:

A) Fotos.....	57
B) RiScan – Laserscanmodell.....	60
C) Keyblock Theorie.....	64
D) RAMMS :: Rockfall Resultate.....	73

A) Fotos



Die Ortschaft Moos in Passeier mit der untersuchten Felswand im Hintergrund, Blickrichtung NE



Blickrichtung NE auf die Felswand



Blick von Scanposition 3 auf die Felswand

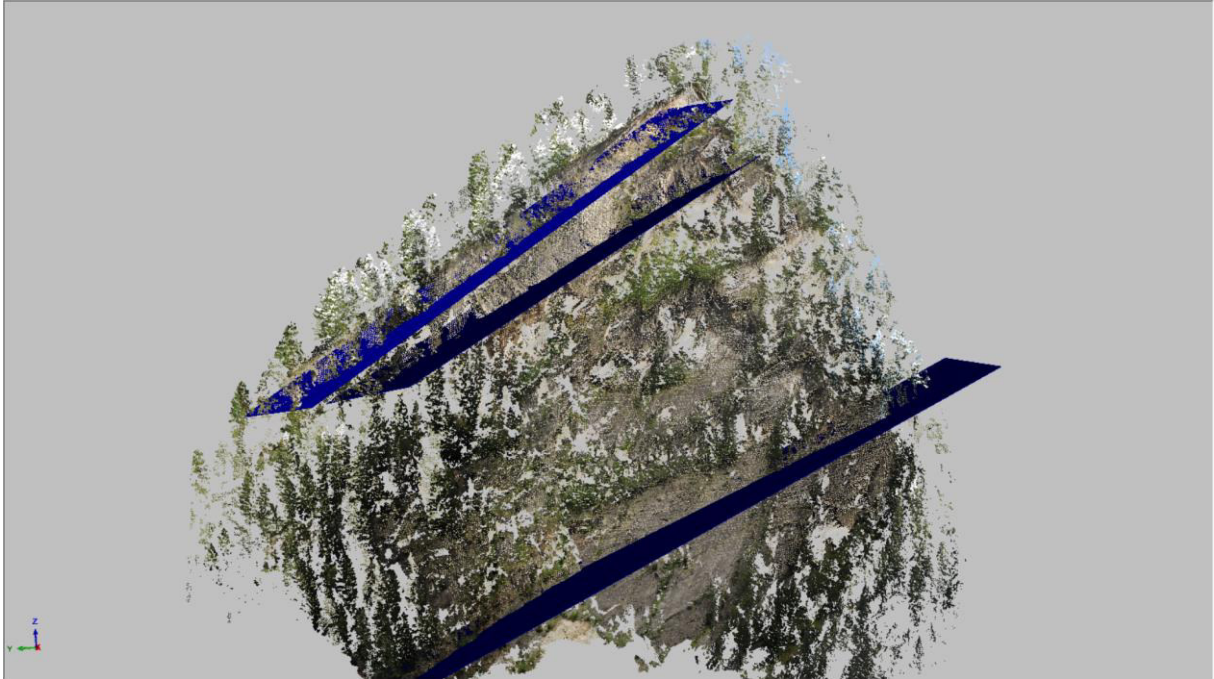


Blick vom top der Felswand nach unten, links oben im Bild die Ortschaft Moos in Passeier

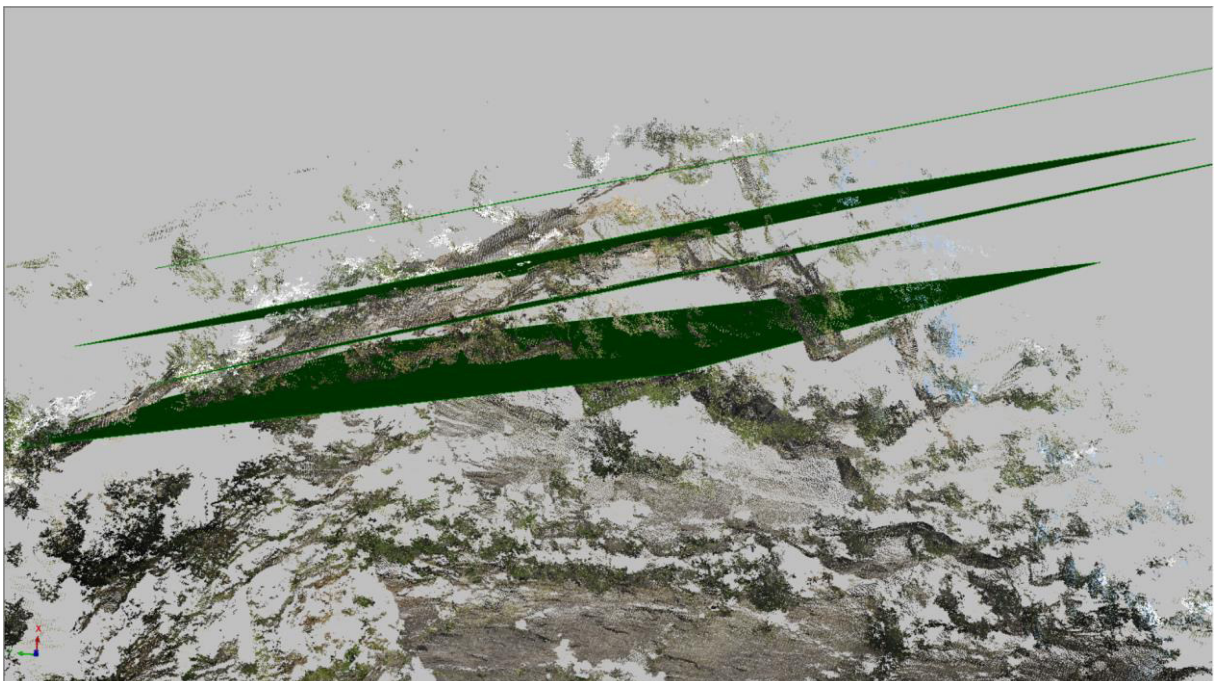


Tiefe Klüfte verlaufen auf der Schieferungsfläche Richtung NW (340° Streichrichtung)

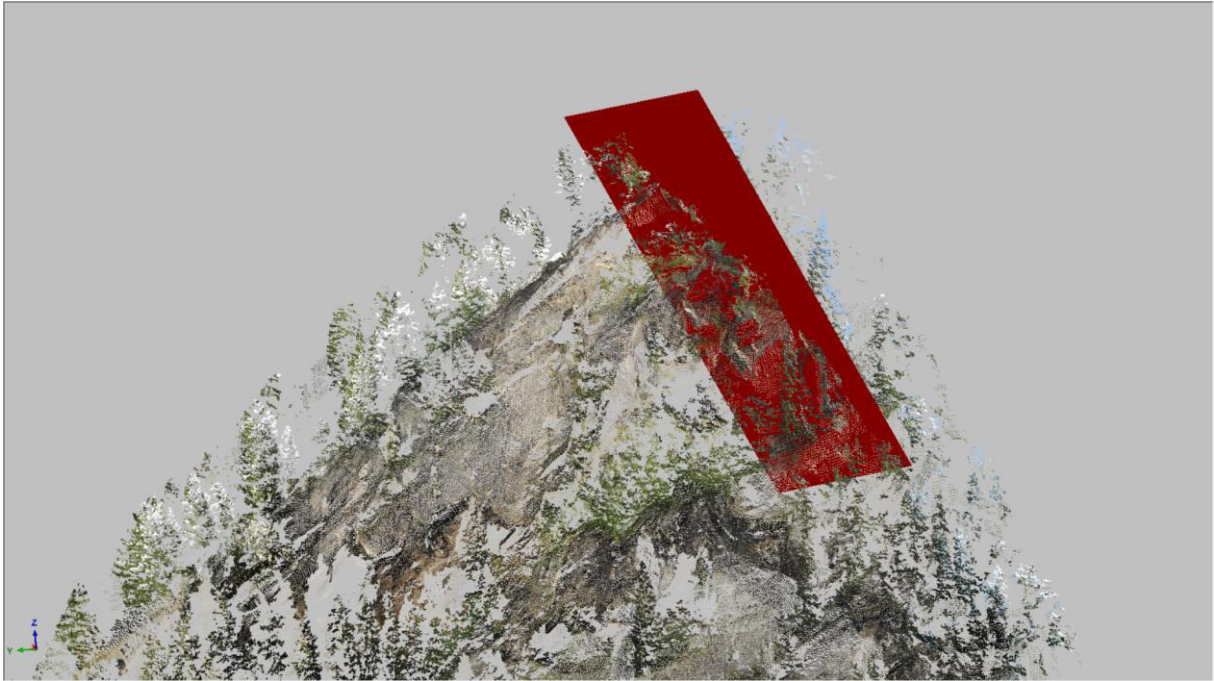
B) RiScan – Laserscanmodell



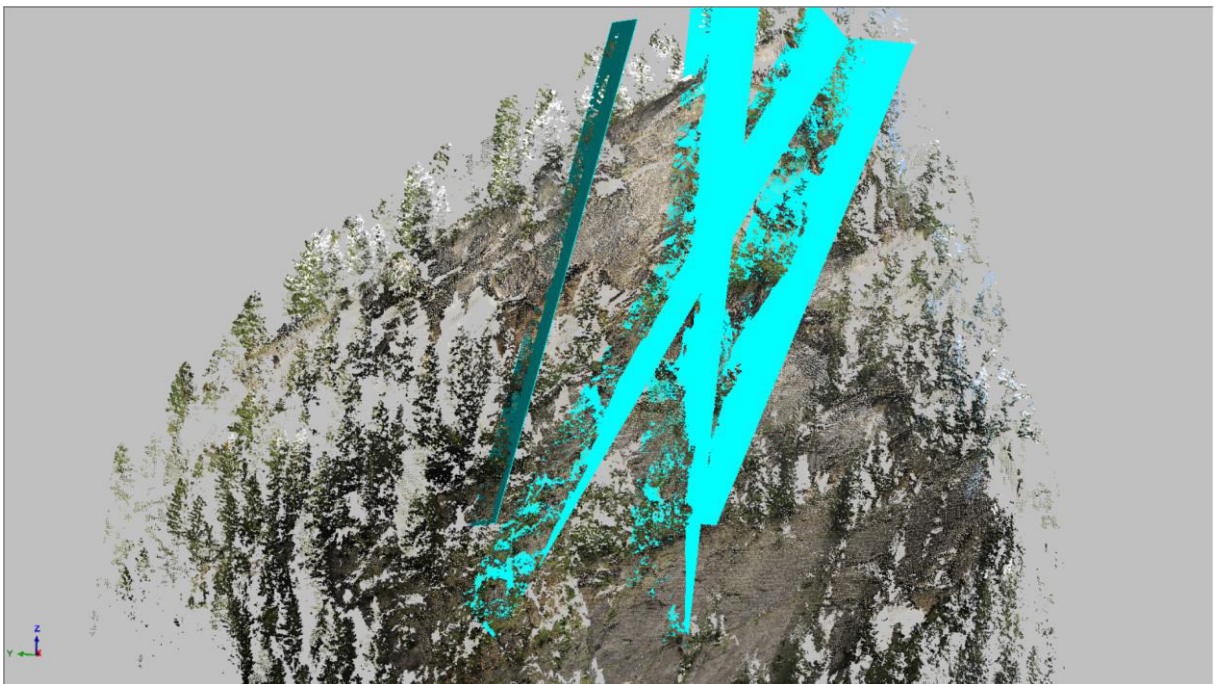
Blick auf die Schieferungsflächen SF 1 im virtuellen Kluftmodell



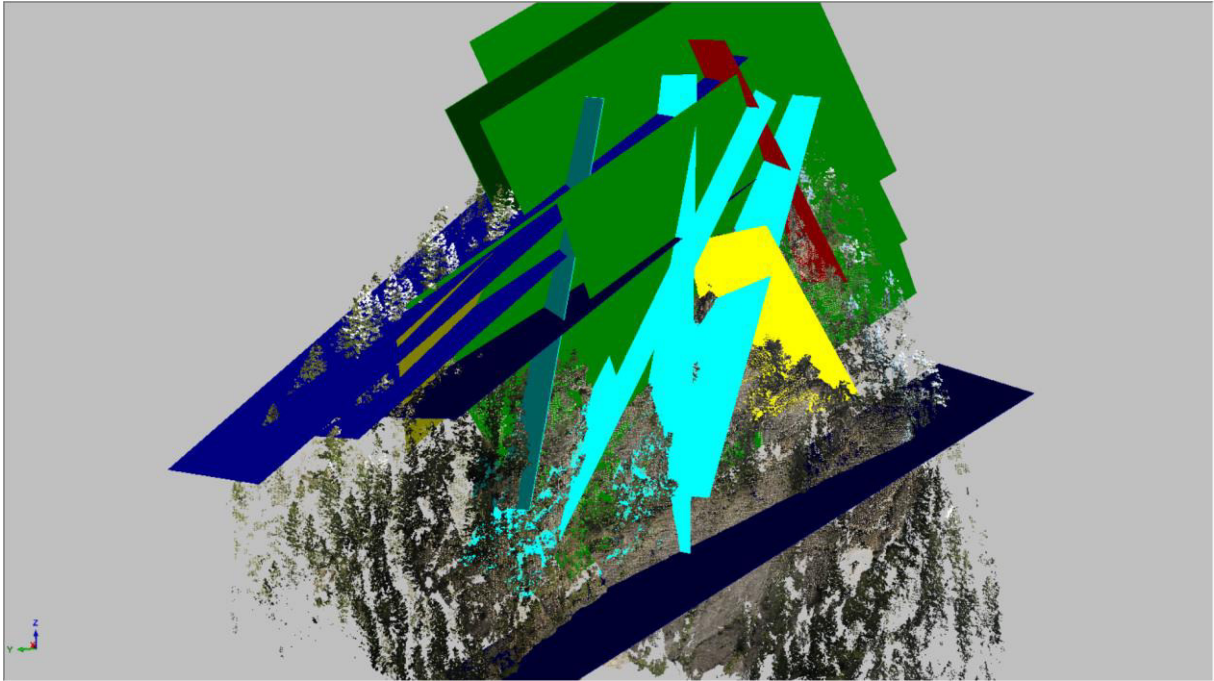
Blick auf die Kluftflächen KF 1 im virtuellen Kluftmodell



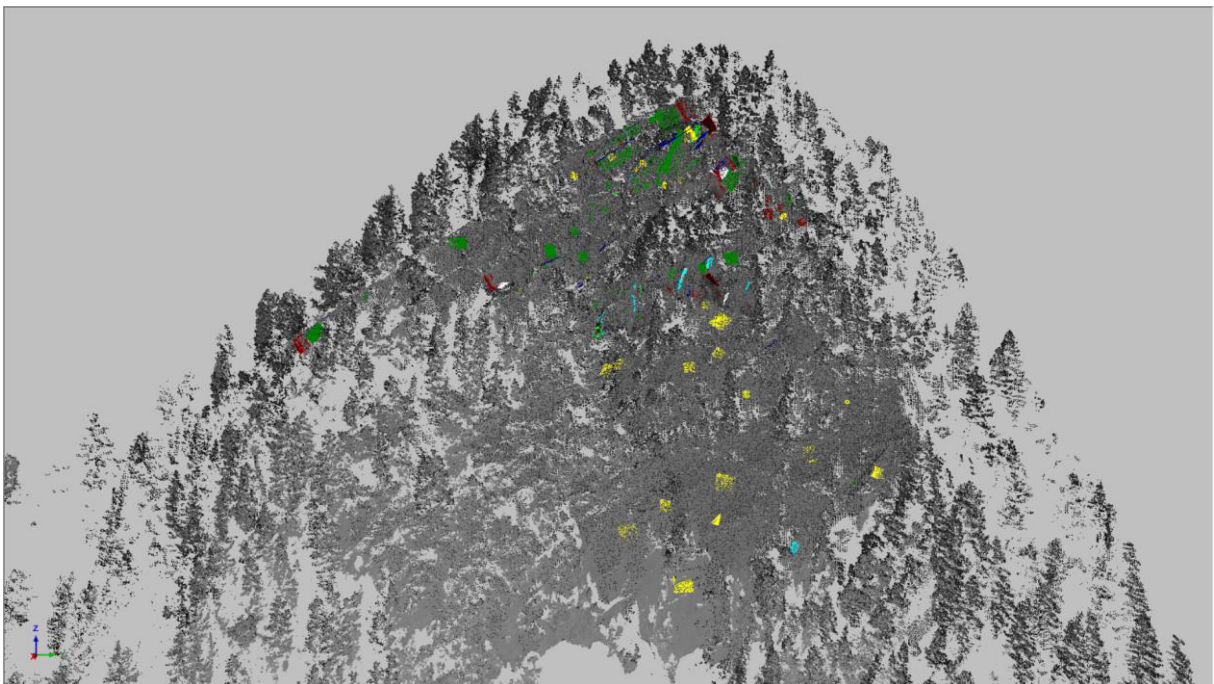
Blick auf die Kluftfläche KF 2 im virtuellen Kluftmodell



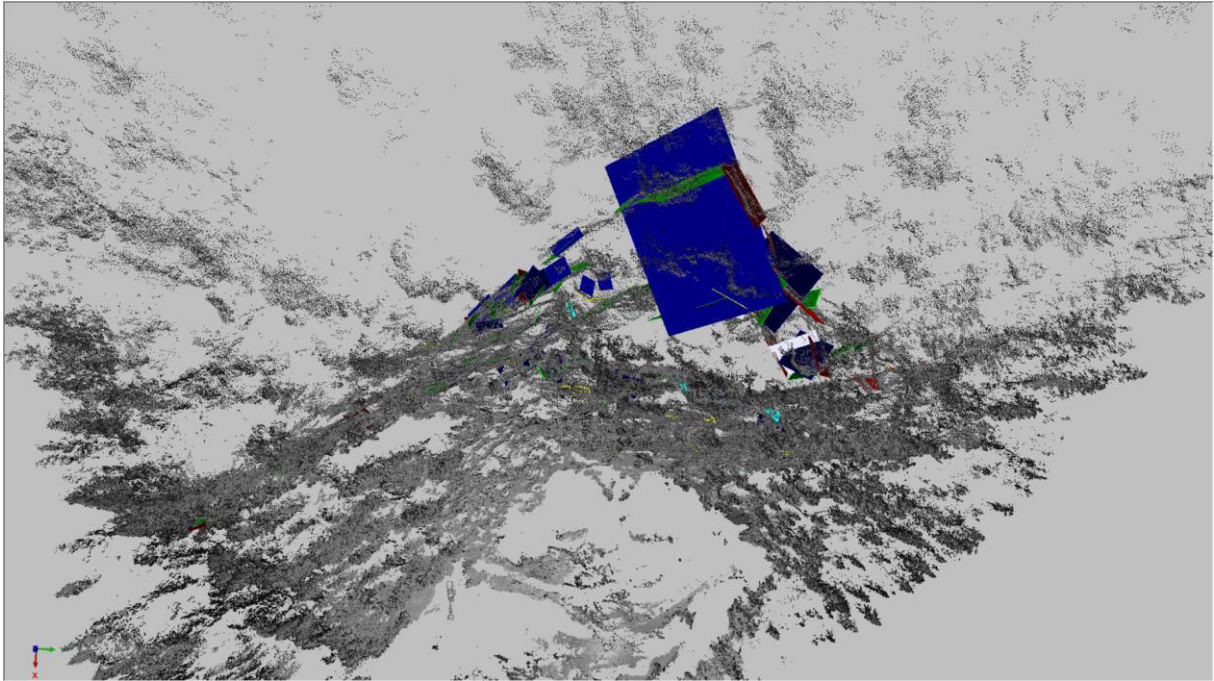
Blick auf die Kluftflächen KF 4 die die Felswand durchkreuzen im virtuellen Kluftmodell



Das virtuelle Trennflächenmodell im RiSCAN



Das Trennflächenmodell mit allen Trennflächen im RiSCAN



Blick von oben auf das Ablagerungsareal

Keyblock Theorie

Block 1

Ergebnisse "B10HPGL.EXE"

B10_B1.txt

TABLE 1: Sets and Free Planes

No.	Dip	Dip Direction	Friction Angle
1	87	74	40
2	66	156	40
3	33	336	40
1	85	76	
2	64	153	
3	31	334	

Resultant force:

0.00D+00 0.00D+00 -1.00D+00

Free plane code for the block:

010101

Bearing and rise of tunnel:

0 0

Table 2: Sign of dot product of edge and normal

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
+0	-1	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+1	+0	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+2	+1	+0	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+3	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+12	+0	+0	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+13	+0	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+23	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0

Table 3: Half spaces intersecting cutting pyramid

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
+0	-1	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+1	+1	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+2	+1	+1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+3	-1	-1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0

+12	-1	+1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+13	+1	-1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+23	-1	+1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0

Table 4: Edges of cutting pyramids

+0	+12	+13	+23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+1	+12	+13	-23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+2	+12	-13	-23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+3	-12	+13	+23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+12	+12	-13	+23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+13	-12	+13	-23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+23	-12	-13	+23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0

Table 5: Key blocks of free plane and concave slope

PYRAMID	PLANE 1	PLANE 2	CONCAVE SLOPE
0	1	0	0
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
12	0	0	0
13	0	0	0
23	0	0	0

Table 6

SLIDING PLANE	SLIDING FORCE	SLIDING INTERVAL	OF TUNNEL
+0.00	+1.00	+279.77	+0.01
+1.00	+0.95	+0.01	+69.18
+2.00	+0.57	+69.18	+99.77
+3.00	-0.16	+249.18	+279.77
+12.00	+0.56	+0.00	+0.00
+13.00	-0.23	+0.00	+0.00
+23.00	-1.24	+180.01	+249.18
RESULTANT FORCE			
0	0	-1	
AXIS OF TUNNEL			
0	1	0	

Block 2

Ergebnisse "B10HPGL.EXE"

B10_B2.txt

TABLE 1: Sets and Free Planes

No.	Dip	Dip Direction	Friction Angle
1	88	73	35
2	74	136	35
1	85	32	
2	87	125	
3	43	12	
4	33	336	

Resultant force:

0.00D+00 0.00D+00 -1.00D+00

Free plane code for the block:

111010

Bearing and rise of tunnel:

0 0

Table 2: Sign of dot product of edge and normal

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
+0	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+1	+0	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+2	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+12	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0

Table 3: Half spaces intersecting cutting pyramid

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
+0	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+1	+1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+2	+1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+12	-1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0

Table 4: Edges of cutting pyramids

+0	+12	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+1	+12	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+2	+12	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+12	+12	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0

Table 5:Key blocks of free plane and concave slope

PYRAMID	PLANE 1	PLANE 2	CONCAVE SLOPE
0	0	1	0
1	0	1	0
2	0	1	0
12	0	1	0

Table 6

SLIDING PLANE	SLIDING FORCE	SLIDING INTERVAL OF TUNNEL
+0.00	+1.00	+276.97
+1.00	+0.97	+0.00
+2.00	+0.77	+276.97
+12.00	+0.65	+0.00
RESULTANT FORCE		
0	0	-1
AXIS OF TUNNEL		
0	1	0

Block 3

B10_B3.TXT

TABLE 1: Sets and Free Planes

No.	Dip	Dip Direction	Friction Angle
1	45	282	40
2	61	162	40
3	43	41	40
1	76	159	
2	80	56	

Resultant force:

0.00D+00 0.00D+00 -1.00D+00

Free plane code for the block:

01100

Bearing and rise of tunnel:

0 0

Table 2: Sign of dot product of edge and normal

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	+0	-1	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
	+1	+0	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0

+2	-1	+0	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+3	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+12	+0	+0	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+13	+0	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+23	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0

Table 3: Half spaces intersecting cutting pyramid

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
+0	-1	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+1	+1	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+2	-1	+1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+3	-1	-1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+12	+1	+1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+13	+1	-1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+23	-1	+1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0

Table 4: Edges of cutting pyramids

+0	+12	+13	+23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+1	+12	+13	-23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+2	+12	-13	+23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+3	-12	+13	+23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+12	+12	-13	-23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+13	-12	+13	-23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+23	-12	-13	+23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0

Table 5:Key blocks of free plane and concave slope

PYRAMID	PLANE 1	PLANE 2	CONCAVE SLOPE
0	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	1	0
12	0	0	0
13	1	0	0
23	0	0	0

Table 6

SLIDING PLANE	SLIDING FORCE	SLIDING INTERVAL OF TUNNEL
+0.00	+1.00	+329.21 +39.08
+1.00	+0.11	+238.70 +329.21

+2.00	+0.47	+0.00	+0.00
+3.00	+0.07	+39.08	+58.70
+12.00	-0.43	+219.08	+238.70
+13.00	-0.50	+0.00	+0.00
+23.00	-0.46	+58.70	+149.21

RESULTANT FORCE

0	0	-1
---	---	----

AXIS OF TUNNEL

0	1	0
---	---	---

Block 4

Ergebnisse "B10HPGL.EXE"

B10_B4.txt

TABLE 1: Sets and Free Planes

No.	Dip	Dip Direction	Friction Angle
1	62	341	40
2	86	89	40
1	16	346	
2	79	247	

Resultant force:

0.00D+00	0.00D+00	-1.00D+00
----------	----------	-----------

Free plane code for the block:

1101

Bearing and rise of tunnel:

0	0
---	---

Table 2: Sign of dot product of edge and normal

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
+0	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+1	+0	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+2	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+12	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0

Table 3: Half spaces intersecting cutting pyramid

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
+0	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0

+1	+1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+2	-1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+12	+1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0

Table 4: Edges of cutting pyramids

+0	+12	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+1	+12	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+2	+12	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+12	+12	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0

Table 5: Key blocks of free plane and concave slope

PYRAMID	PLANE 1	PLANE 2	CONCAVE SLOPE
0	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0	0
12	0	0	0

Table 6

SLIDING PLANE	SLIDING FORCE	SLIDING INTERVAL	OF TUNNEL
+0.00	+1.00	+0.00	+0.00
+1.00	+0.49	+273.42	+93.42
+2.00	+0.94	+273.42	+93.42
+12.00	+0.27	+0.00	+0.00
RESULTANT FORCE			
0	0	-1	
AXIS OF TUNNEL			
0	1	0	

Block 5

Ergebnisse "B10HPGL.EXE"

B10B8.TXT

TABLE 1: Sets and Free Planes

No.	Dip	Dip Direction	Friction Angle
1	85	344	35
2	89	245	35
1	14	152	
2	63	340	
3	85	255	

Resultant force:

0.00D+00 0.00D+00 -1.00D+00

Free plane code for the block:

00011

Bearing and rise of tunnel:

0 0

Table 2: Sign of dot product of edge and normal

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
+0	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+1	+0	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+2	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+12	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0

Table 3: Half spaces intersecting cutting pyramid

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
+0	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+1	+1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+2	-1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+12	+1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0

Table 4: Edges of cutting pyramids

+0	+12	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+1	+12	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+2	+12	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+12	+12	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0

Table 5:Key blocks of free plane and concave slope

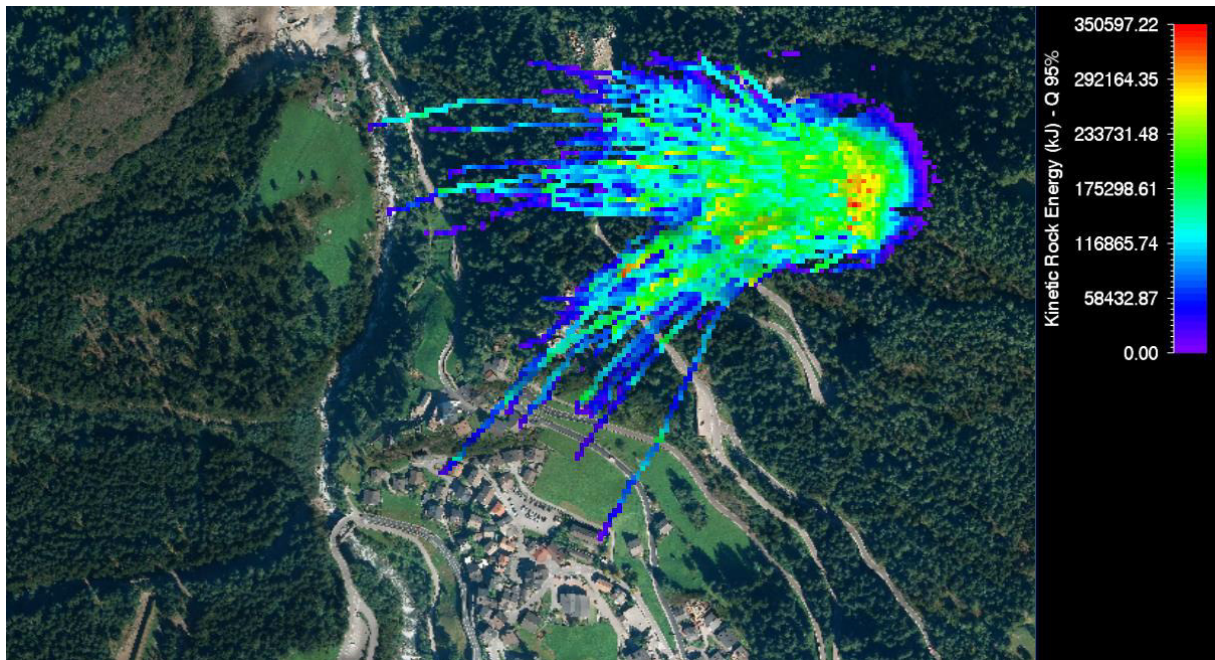
PYRAMID	PLANE 1	PLANE 2	CONCAVE SLOPE
0	1	1	1
1	1	1	1
2	1	1	1
12	1	1	1

Table 6

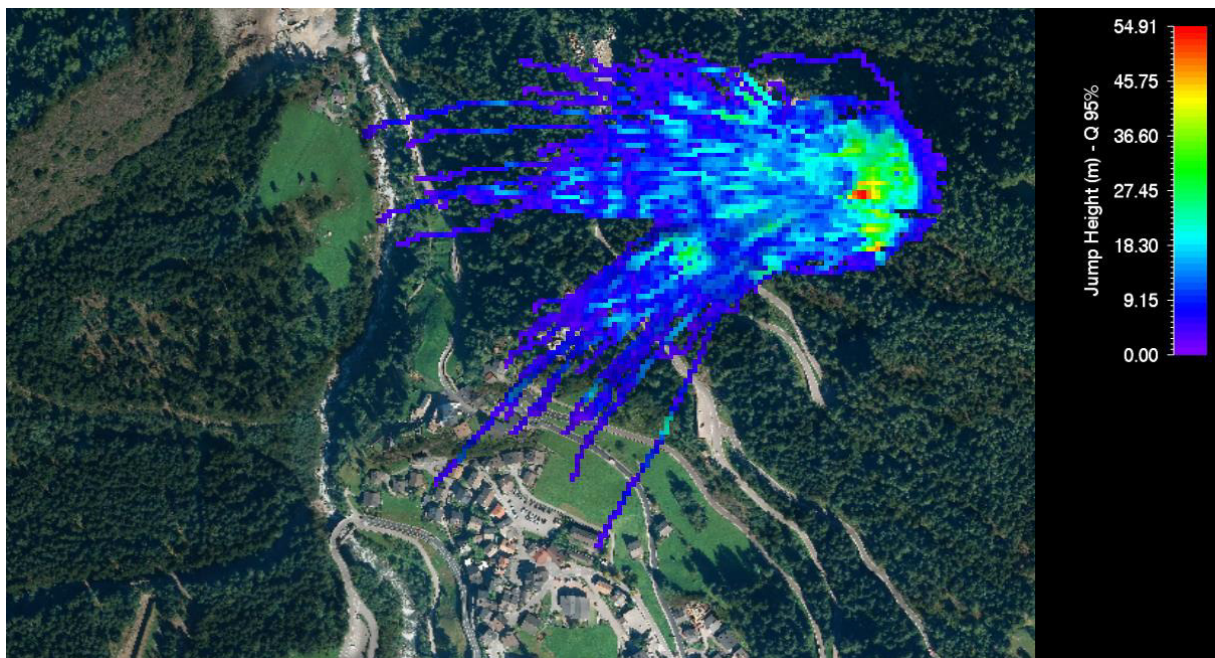
SLIDING PLANE	SLIDING FORCE	SLIDING INTERVAL OF TUNNEL
+0.00	+1.00	+266.88
+1.00	+0.94	+0.00
+2.00	+0.99	+0.00
+12.00	+0.91	+266.88
RESULTANT FORCE		
0	0	-1
AXIS OF TUNNEL		
0	1	0

RAMMS :: Rockfall Resultate

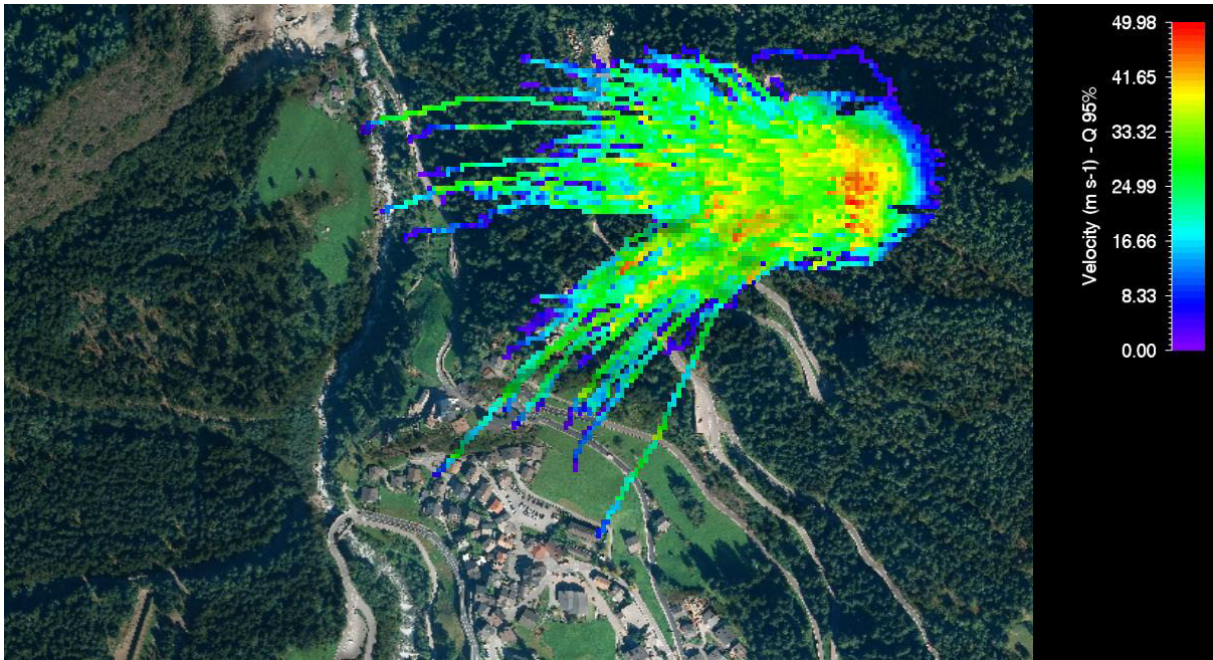
Simulation mit 100 m³ und der Blockform „real flat“



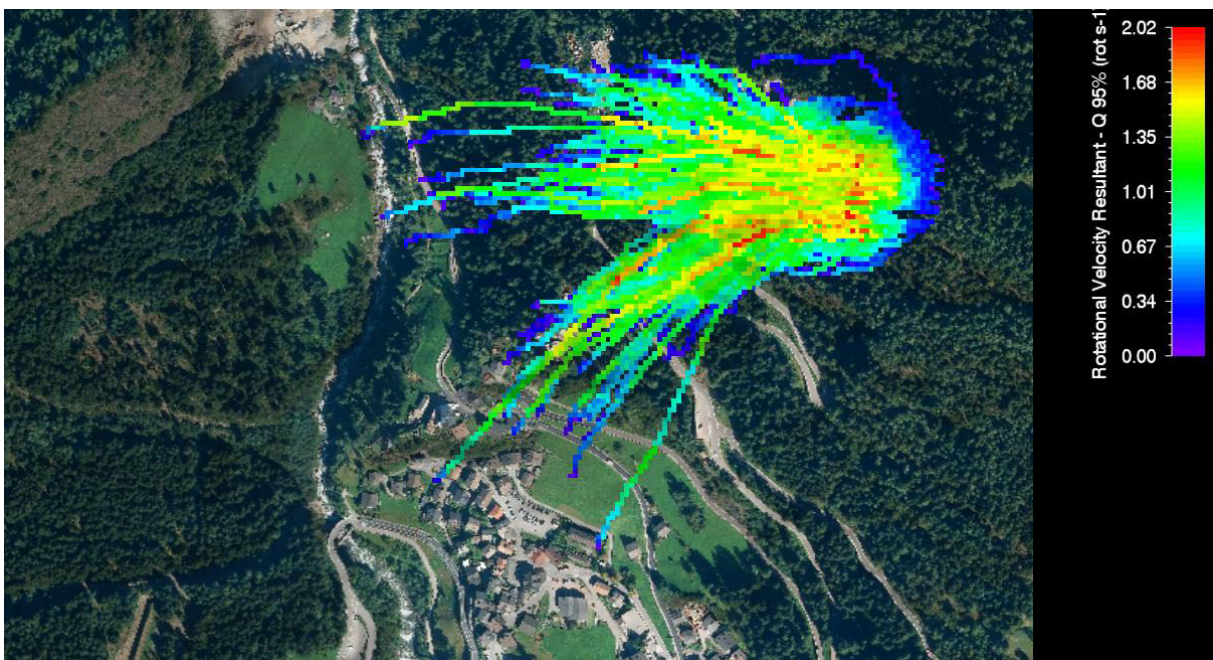
Kinetische Energie der Blöcke



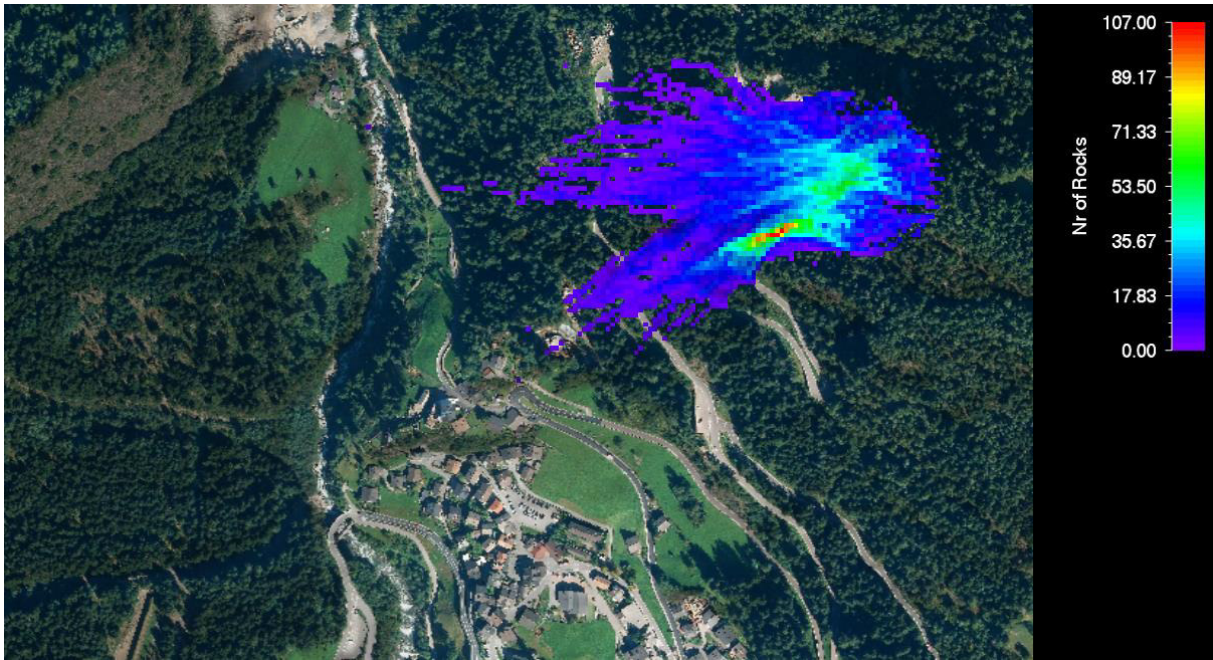
Sprunghöhe der Blöcke



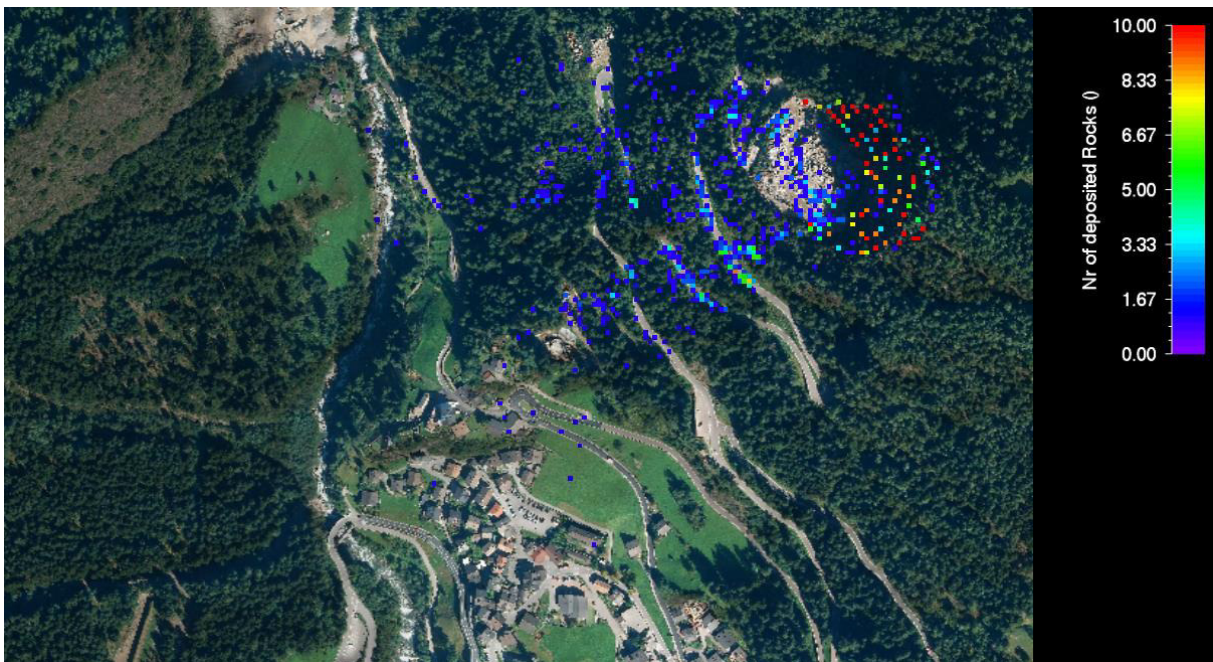
Geschwindigkeit der Blöcke



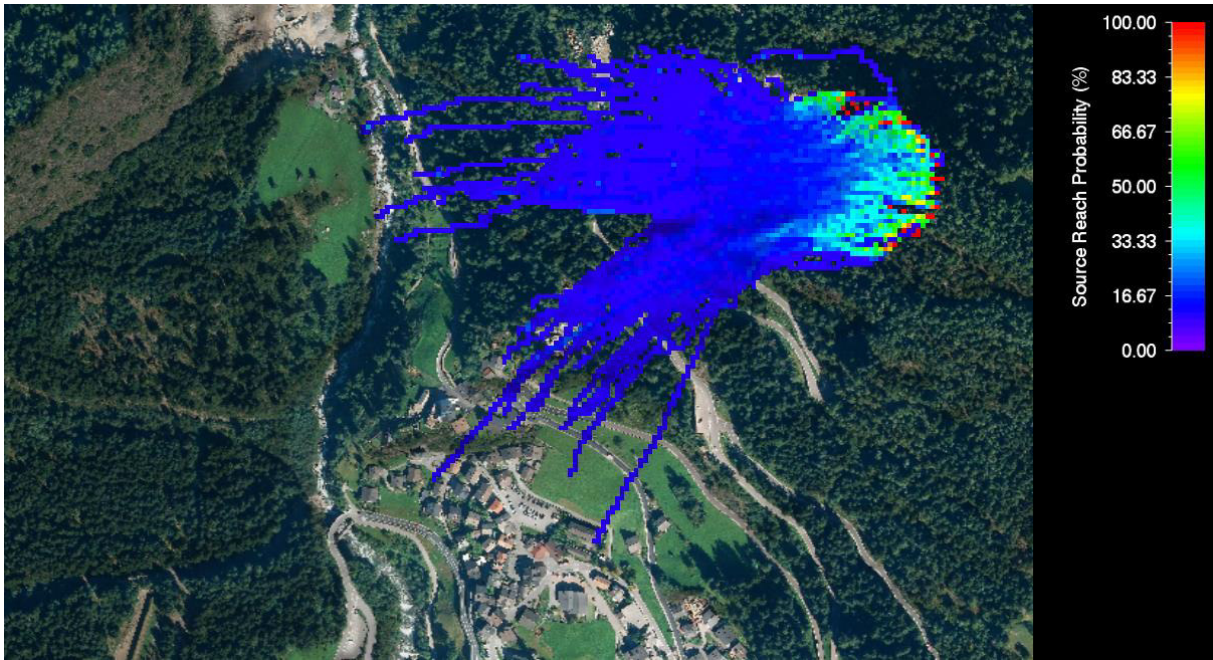
Rotationsgeschwindigkeit der Blöcke



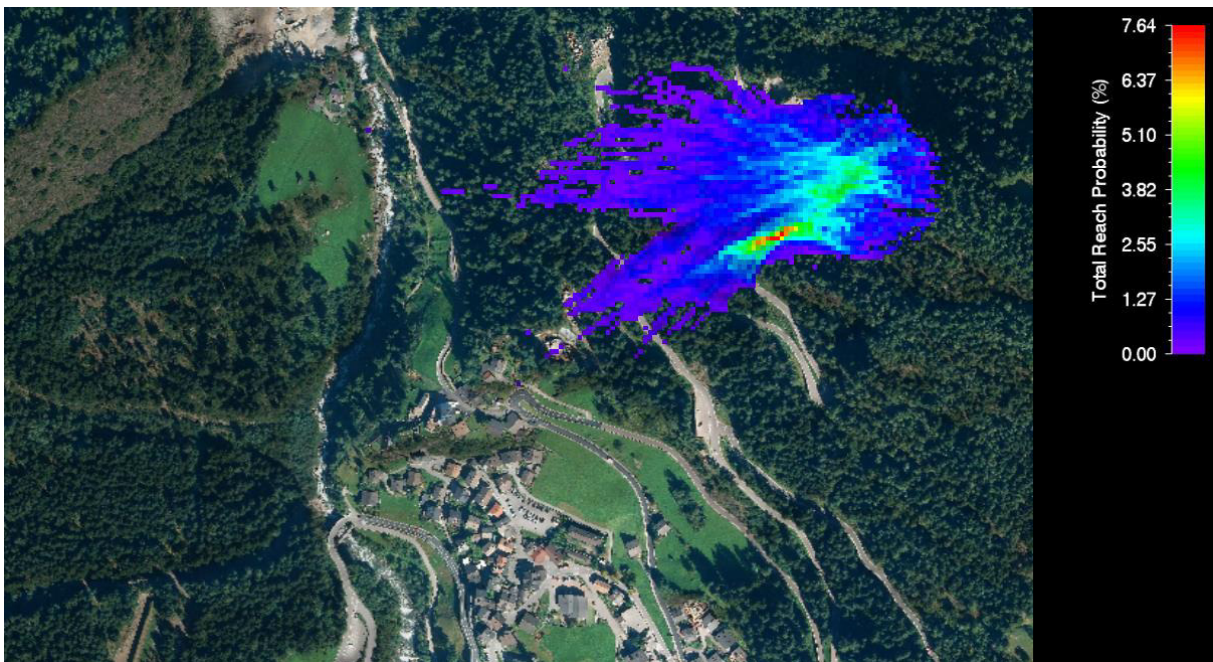
Anzahl der Blöcke



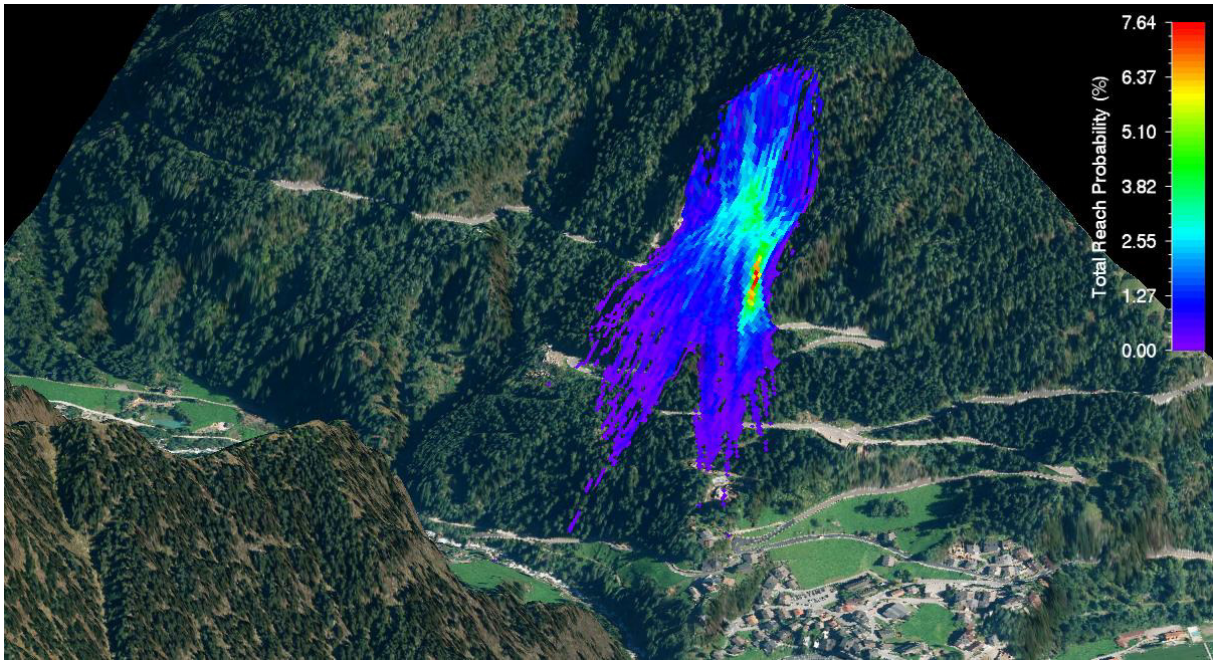
Anzahl der abgelagerten Blöcke



Wahrscheinliche Reichweite der Blöcke von den Startpositionen



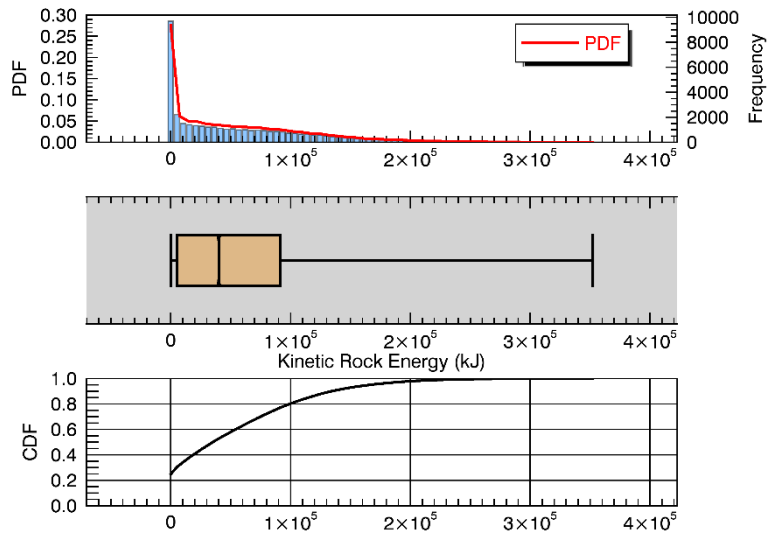
Wahrscheinliche Gesamtreichweite



Dreidimensionale Ansicht mit der wahrscheinlichen Gesamtreichweite

Kinetic Rock Energy (kJ) - Statistics Summary:

Parameter: Kinetic Rock Energy (kJ)
 Min / Max: 0.00 / 352224.88 Nr of data values: 39166
 Mean / Median: 56951.52 / 40143.63 Histogram bin size: 5104.71
 Std Dev: 57808.55
 Q1 / Q3 / IQR: 5313.91 / 91525.85 / 86211.94
 Q90 / Q95 / Q99: 139448.00 / 171250.70 / 231945.98



Statistische Auswertung der kinetischen Gesteinsenergie

Jump Height (m) - Statistics Summary:

Parameter: Jump Height (m)

Min / Max: 0.42 / 54.91

Nr of data values: 39191

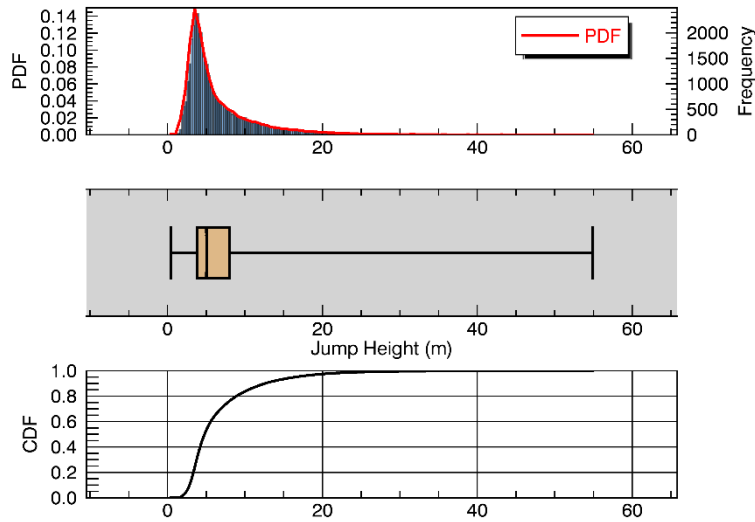
Mean / Median: 6.78 / 5.03

Histogram bin size: 0.25

Std Dev: 4.86

Q1 / Q3 / IQR: 3.80 / 8.01 / 4.22

Q90 / Q95 / Q99: 12.85 / 16.73 / 25.59



Statistische Auswertung der Sprunghöhe

Velocity (m s⁻¹) - Statistics Summary:

Parameter: Velocity (m s⁻¹)

Min / Max: 0.00 / 49.98

Nr of data values: 39166

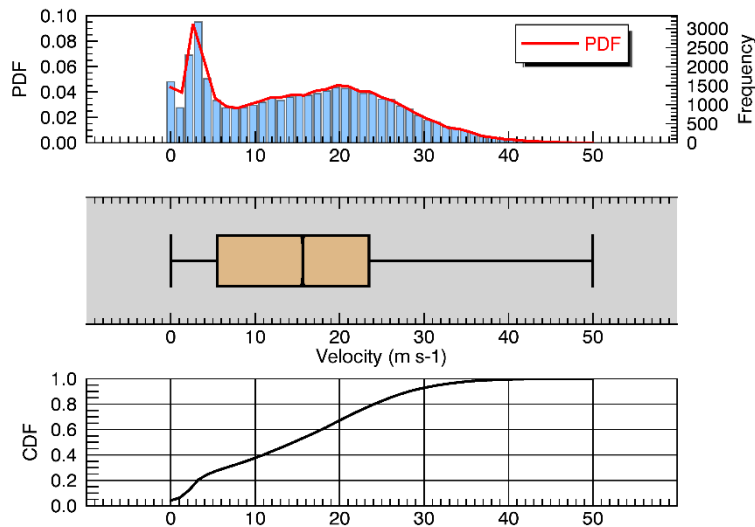
Mean / Median: 15.65 / 15.61

Histogram bin size: 1.06

Std Dev: 10.26

Q1 / Q3 / IQR: 5.52 / 23.48 / 17.96

Q90 / Q95 / Q99: 29.30 / 32.81 / 39.07



Rotational Velocity Resultant (rot s-1) - Statistics Summary:

Parameter: Rotational Velocity Resultant (rot s-1)

Min / Max: 0.00 / 2.02

Nr of data values: 39120

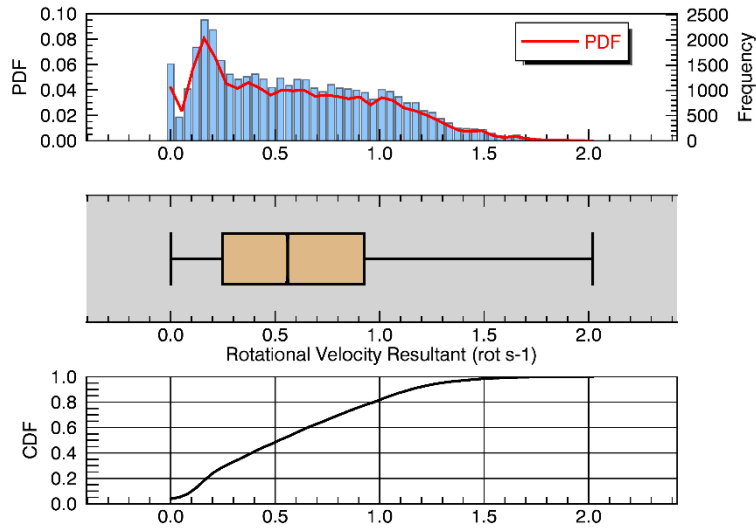
Mean / Median: 0.62 / 0.56

Histogram bin size: 0.04

Std Dev: 0.41

Q1 / Q3 / IQR: 0.25 / 0.93 / 0.68

Q90 / Q95 / Q99: 1.19 / 1.33 / 1.61



Statistische Auswertung der resultierenden Rotationsgeschwindigkeit