



Tobias Auzinger, BSc

**Dreidimensionale Visualisierung und
Stabilitätsanalyse von potentiell instabilen Blöcken
mittels Fernerkundungsdaten am Beispiel
Feldkofel, Kärnten**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science

Masterstudium Erdwissenschaften

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer:

Ao.Univ.-Prof. Dr. Qian LIU

Technische Universität Graz
Institut für angewandte Geowissenschaften

Graz, Dezember 2014

EIDESSTÄTTLICHE 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.

Graz, am

.....

Tobias Auzinger

Danksagungen

Mein größter Dank gilt Herrn Ao.Univ.-Prof. Mag.rer.nat. Dr.rer.nat. Qian Liu für die Betreuung dieser Masterarbeit, der mir bei Fragen und Problemen stets weitergeholfen hat und jederzeit einen Termin für mich frei hatte.

Ein weiteres großes Dankeschön richtet sich an Herrn Mag.rer.nat. Peter Schreiber für die Installation von Computerprogrammen und Hilfe bei Softwareproblemen.

Bedanken möchte ich mich auch bei Frau Pendl im Sekretariat und Herrn Ao.Univ.-Prof. Dr.phil. Dietmar Klammer, die mir nicht nur einmal bei studientechnischen Problemen und Fragen rasch und unkompliziert weiterhelfen konnten.

Zuletzt möchte ich mich noch bei meinen Eltern, Schwestern und Herrn DI Michael Gasselsberger bedanken, die stets ein offenes Ohr und motivierende Worte für mich hatten.

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde auf bereits vorhandene Laserscandaten vom Feldkofel, Bad Bleiberg, zurückgegriffen. Diese Daten werden mit dem Computerprogramm "RiScanPro" bearbeitet. Nach der Georeferenzierung der Daten wird ein dreidimensionales Reliefmodell der Geländeoberfläche erstellt. In dieses Reliefmodell werden durch den Vergleich mit Fotos Trennflächen ortsbezogen eingebaut und ein Kluftmodell erstellt. Als Ergebnis des Kluftmodells erhält man Orientierungsdaten, Häufigkeit und Größe der Trennflächen. Mit Hilfe der Blocktheorie werden im Gipfelbereich des Feldkofels potentiell instabile Blöcke identifiziert und im Modell dargestellt. Mit verschiedenen DOS-Programmen wird das Volumen der Blöcke berechnet, die Form dargestellt und eine Stabilitätsanalyse durchgeführt. Diese Arbeit stellt eine Methodik vor, wie man anhand einer modernen Technologie der dreidimensionalen Datenerfassung in Kombination mit der Blocktheorie aussagekräftige Daten gewinnen und Blöcke anschaulich darstellen kann.

Abstract

For this master thesis existing laserscan data of the Feldkofel, Bad Bleiberg were used. The data are processed with the computer programme "RiScanPro". First the data are registered and a three-dimensional relief model of the land surface is created. In comparison with photos, discontinuities are fitted in the relief model and a fracture system model is characterized. The model provides orientation data as well as information about frequency and size of discontinuities. By using block theory potentially unstable blocks are identified in the peak area of the Feldkofel. These blocks are represented then in the three-dimensional model. By using several DOS computer programmes the volume of the blocks is calculated, the shape is plotted and a stability analysis is carried out. This master thesis shows a methodology how to get significant results by applying a modern technology of three-dimensional data acquisition combined with block theory.

Inhaltsverzeichnis

1.	Problemstellung - Ziel	1
2.	Arbeitsgebiet	2
2.1	Geographische Lage	2
2.2	Geologie	3
3.	Methodik	4
3.1	Terrestrisches Laserscanning	4
3.1.1	Prinzip des terrestrischen Laserscannings	4
3.1.2	Verfahren der Distanzmessung	5
3.1.3	Auswertung der Daten	6
3.1.4	Besonderheiten des terrestrischen Laserscannings	8
3.1.5	Grenzen des terrestrischen Laserscannings	9
3.2	Computerprogramme	11
3.2.1	RiScan Pro	11
3.2.2	B02HPGL.EXE	11
3.2.3	B03HPGL.EXE	11
3.2.4	B10HPGL.EXE	11
3.2.5	B11HPGL.EXE	12
3.2.6	B04HPGL.EXE	12
4.	Vorbereitung der Daten	13
4.1	Erhebung der Daten	13
4.2	Referenzierung	14
4.3	Multi Station Adjustment (MSA)	18
5.	Bearbeitung der Daten	24
5.1	Erstellen von Polydateien für ausgewählte Bereiche	24
5.2	Trennflächeneinbau	26
5.2.1	Trennflächen allgemein	26
5.2.2	Einbau der Trennflächen	32
5.3	Triangulieren	34
5.4	Erstellen von Konturlinien	37
5.5	View Types	41
6.	Ergebnisse	43
6.1	Erstellung eines Klufftmodells	43
6.2	Block Theorie	46

6.2.1	Theorie	46
6.2.2	Vorgehensweise	47
6.2.3	Identifizierung instabiler Blöcke und deren Versagensmechanismus.....	48
6.2.4	Bestimmung des JP- und EP-Codes	49
6.2.5	Berechnung des Volumens	49
6.2.6	Bestimmung der Blocktypen	50
6.2.7	Stabilitätsanalyse	51
6.3	Blöcke	53
6.3.1	Block 1.....	53
6.3.2	Block 2.....	59
6.3.3	Block 3.....	65
6.3.4	Block 4.....	71
6.3.5	Block 5.....	77
6.3.6	Block 6.....	83
6.3.7	Block 7.....	89
6.3.8	Block 8.....	95
7.	Fazit.....	101
	Literaturverzeichnis	103
	Abbildungsverzeichnis.....	105
	Tabellenverzeichnis.....	110
	Anhang.....	112

1. Problemstellung - Ziel

Aus Fernerkundungsdaten von einem Laserscanner wird zuerst ein möglichst detailgetreues 3D Oberflächenmodell erstellt werden. Durch verschiedene Bearbeitungsschritte mit dem Computerprogramm "RiScan Pro" soll das Modell anhand verschiedener Darstellungsmöglichkeiten anschaulich präsentiert werden. In dieses Oberflächenmodell werden Trennflächen eingebaut und ortsbezogen dargestellt. Aus den eingebauten Trennflächen wird ein Kluftmodell erstellt. Als nächster Schritt wird eine Stabilitätsanalyse durchgeführt, um potentiell instabile Blöcke zu identifizieren. Diese instabilen Blöcke werden anschließend im 3D Oberflächenmodell ortsbezogen dargestellt. Zusätzlich wird das Volumen der Blöcke berechnet und deren Form dreidimensional dargestellt.

Für diese Arbeit werden verschiedene Methoden eingesetzt. Zur Bearbeitung der Laserscandaten wird das Computerprogramm "RiScan Pro" verwendet, das anschließend genauer erklärt wird. Für die Berechnung des Volumens, die Darstellung der Blockformen und die Stabilitätsanalyse wird die Block Theorie nach [Goodman und Shi, 1985] angewandt. Anhand der Block Theorie können potentiell instabile Blöcke identifiziert werden.

Die verwendeten Daten für diese Arbeit stammen vom Feldkofel, der sich in Bad Bleiberg, Kärnten, befindet. Durch die Unzugänglichkeit dieses Geländes ist eine konventionelle Kartierung bzw. Trennflächenvermessung beinahe unmöglich und zu gefährlich. Daher wurde der Feldkofel mit terrestrischem Laserscan (LiDAR) erfasst. Mit den gewonnenen Daten ist eine hochpräzise Erfassung der Trennflächen möglich, ohne sich im Gefahrenbereich aufhalten zu müssen.

2. Arbeitsgebiet

2.1 Geographische Lage

Der Feldkofel befindet sich in Bad Bleiberg im Süden Kärntens, westlich von Villach. Er liegt im nordöstlichen Teil der Katastralgemeinde Bleiberg Kreuth und hat eine Erhebung von 1444 m Seehöhe [Weber 2013]. Abbildung 1 und Abbildung 2 zeigen den Feldkofel rot markiert auf Karten im Maßstab 1:50000 bzw. 1:20000 [Quelle: KAGIS - Kärnten Atlas].

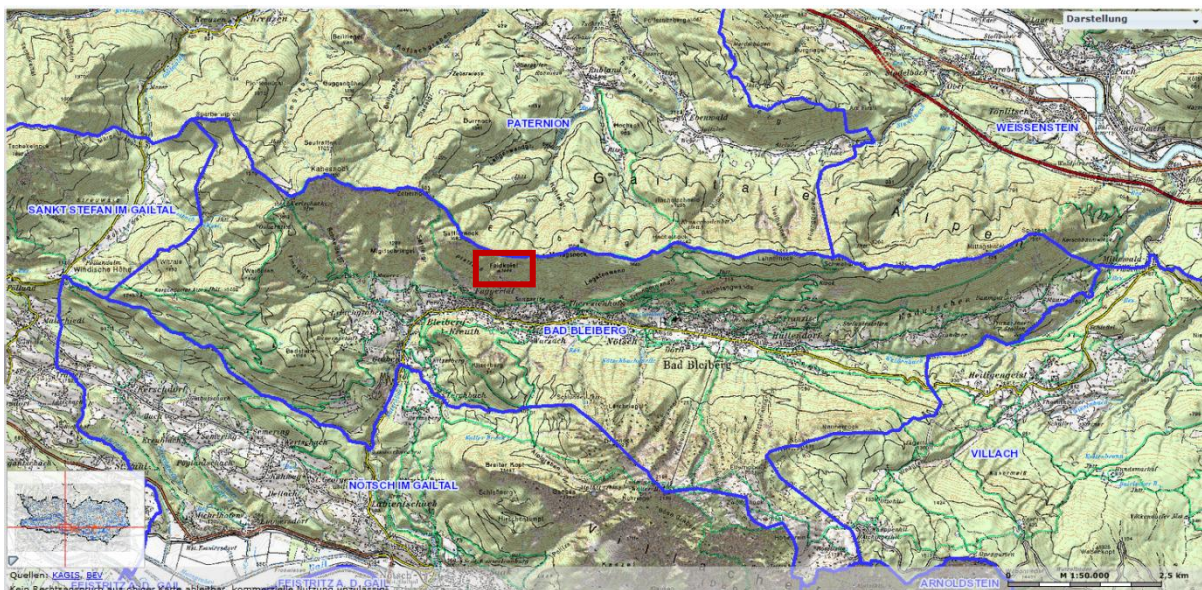


Abbildung 1: Geographische Lage des Feldkofels, Maßstab 1:50000

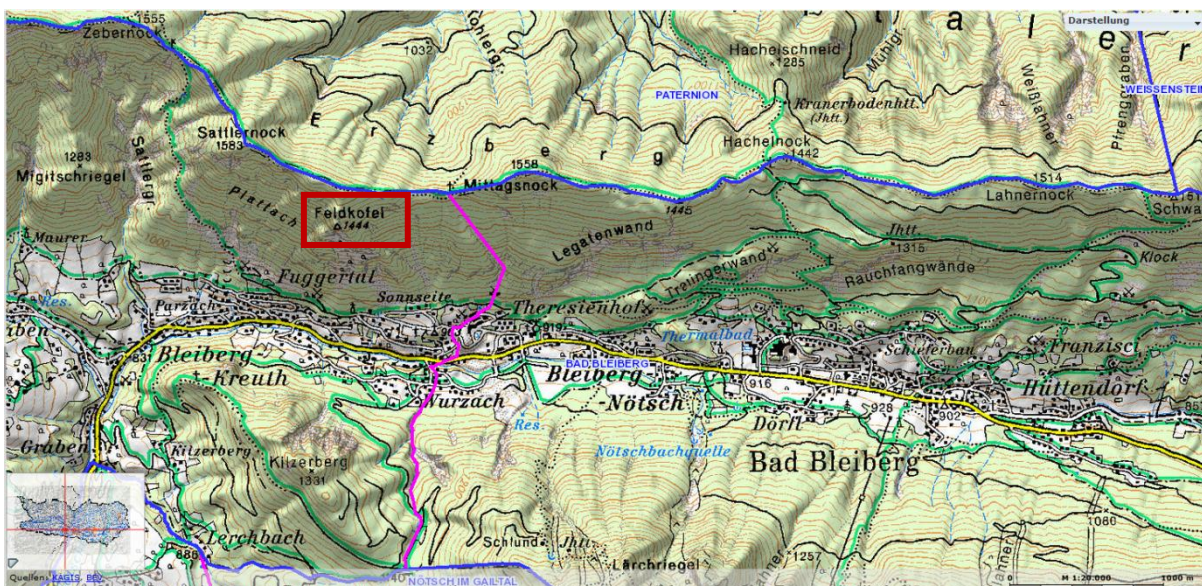


Abbildung 2: Geographische Lage des Feldkofels, Maßstab 1:20000

2.2 Geologie

Das Untersuchungsgebiet befindet sich auf der geologischen Karte Blatt 200, Arnoldstein. In Abbildung 3 ist der Feldkofel auf der Karte rot markiert [Anderle, 1977].

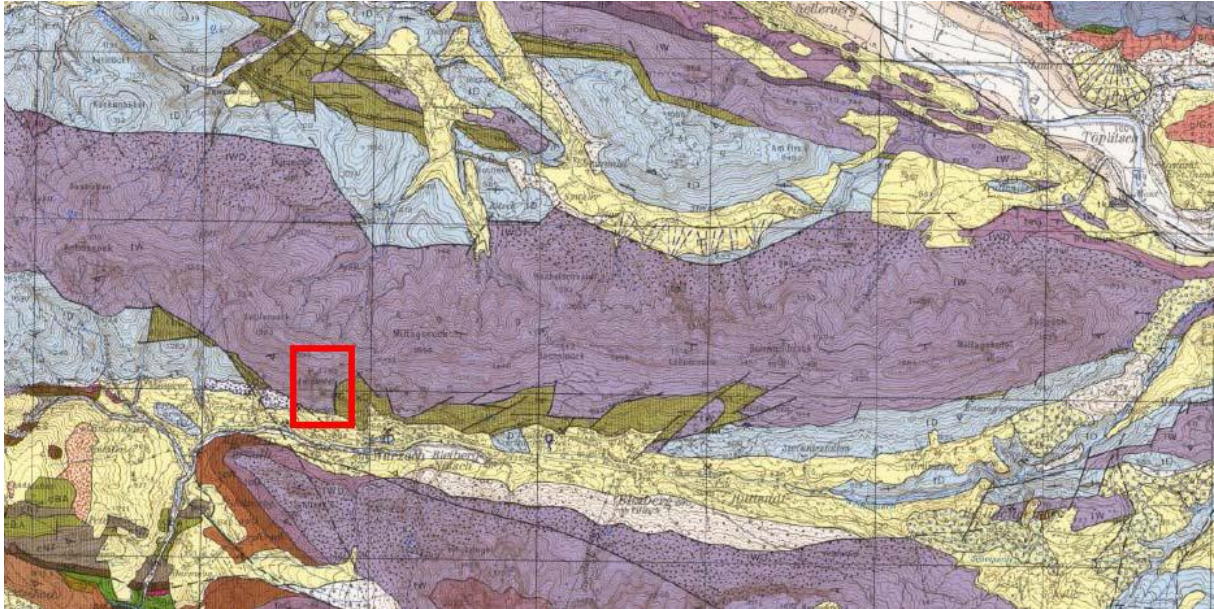


Abbildung 3: Ausschnitt aus Geologischer Karte, Maßstab 1:50000, Blatt 200 – Arnoldstein; der Feldkofel ist rot markiert [aus Anderle, 1977]

Das Arbeitsgebiet ist Teil des Drauzuges und gehört zur nordalpinen Trias des Oberostalpins. Es handelt sich um eine Wettersteinkalkformation, die im Ladin entstanden ist [Anderle, 1977].

Die Kalkbänke weisen Mächtigkeiten zwischen mehreren Dezimetern und Metern auf. Im Bereich des Gipfels weist der Wettersteinkalk eine zunehmend massige Ausbildung auf. Im unteren Bereich ist die Morphologie durch Schuttfächer gekennzeichnet, die teilweise ein Produkt des dort stattgefundenen Bergbaues sind. Die Blei-Zink-Vererzungen in der gebankten Lagunenfazies des Wettersteinkalks finden sich im hangenden Anteil der Wettersteinkalk-Abfolge [Oberhauser, 1980].

Durch Verwitterungsprozesse und Entspannung des Gebirges ist es höchstwahrscheinlich zu einer Auflockerung und damit zu einer Destabilisierung des Gesteinsverbandes gekommen, die in weiterer Folge zu Instabilitäten führt [Weber, 2013].

3. Methodik

In diesem Kapitel wird das Terrestrische Laserscanning genauer erklärt sowie die verwendeten Computerprogramme vorgestellt.

3.1 Terrestrisches Laserscanning

Das terrestrische Laserscanning (TLS) ist ein stationäres, aktives, bildgebendes 3D-Verfahren, das laserbasierte Streckenmessungen in einer automatisierten Abfolge von quasi gleichabständigen Abtastschritten in vertikaler und horizontaler Richtung erfasst und daraus geometrische Informationen über das Objekt gewinnt. Die Funktionsweise eines Laserscanners unterscheidet sich von anderen Messverfahren insofern, als dass mit dem Laserscanner über ein regelmäßiges Raster eine flächenhafte Objekterfassung erfolgt, und nicht wie sonst üblich eine Objektdiskretisierung durch repräsentative Punkte. [www.wikipedia.at, 14.07.2014].

Der Begriff "terrestrisch" dient zur Unterscheidung von flugzeuggetragenen "airborne" Laserscanning. Dieses dient vor allem zur Erfassung der Erdoberfläche aus der Luft.

3.1.1 Prinzip des terrestrischen Laserscannings

Bei einer Laserscanner-Aufnahme wird die Oberfläche des zu vermessenden Objektes durch einen Laserstrahl automatisch sukzessive abgetastet. Der Laserstrahl durchläuft dabei inkrementell ein gitterförmig angeordnetes Richtungsbündel, dessen Gitterweite durch vorgegebene, aber jeweils konstante Winkelschrittweiten in horizontaler bzw. vertikaler Richtung bestimmt ist (Abb. 4).

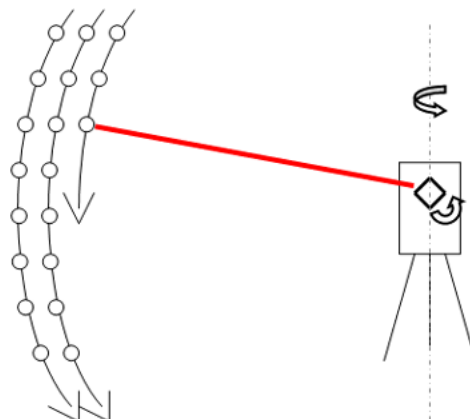


Abbildung 4: Prinzip des terrestrischen Laserscannings [Quelle: Haring, 2003]

Die Ausrichtung des Strahls in die einzelnen Richtungen erfolgt in der Regel mit Hilfe einer (i.a. optomechanischen) Ablenkungseinheit. Meist geschieht dies zeilenweise, d.h. entlang einer vertikalen Scan-Zeile wird der Vertikalwinkel um eine konstante Schrittweite so lange erhöht, bis das Ende der Zeile (des Vertikal-Scans) erreicht ist. Danach wird der Horizontalwinkel um eine konstante Schrittweite erhöht, anschließend wird der nächste Vertikal-Scan durchgeführt, usw. Der aufzunehmende Bereich kann durch einen Horizontal- und einen Vertikalwinkelbereich vorgegeben werden.

Für jede eingestellte Strahlrichtung wird die Distanz zur Objektoberfläche bestimmt sowie die tatsächlichen Ist-Werte der beiden Winkel, die i.a. geringfügig von den durch die Schrittweiten vorgegebenen Soll-Werten abweichen. Somit erhält man für jeden gemessenen Punkt 3D-Polarkoordinaten. Im Vergleich zu photographischen Aufnahmen, die ein photogrammetrisches Strahlenbündel festlegen, wird also beim Laserscanning zu jedem der Strahlen die jeweilige Distanz gemessen, d.h. das Ergebnis einer Aufnahme ist eine 3D-Punktwolke im lokalen Scanner-Koordinatensystem.

Für jeden Punkt wird zusätzlich zu den Polarkoordinaten auch noch der sogenannte Intensitätswert registriert. An retroreflektierenden Folien, wie sie zur Signalisierung von Verknüpfungspunkten verwendet werden, ist dieser Intensitätswert um ein Vielfaches größer als an diffus reflektierenden Materialien. [Haring, 2003]

3.1.2 Verfahren der Distanzmessung

Impulslaufzeit

Es wird kurzzeitig ein Lichtimpuls vom Laserscanner ausgesandt und nach dem Durchlaufen der Strecke zum Objekt und wieder zurück mit einer Zeitverzögerung, die proportional zur Streckenlänge ist, wieder vom Laserscanner empfangen. Mit dem Impulslaufzeitprinzip können größere Entfernungsbereiche von bis zu 1.000 m abgedeckt werden. Nachteilig ist die schlechtere Genauigkeit im Vergleich zum Phasenlaufzeitverfahren.

Phasenlaufzeit

Beim Phasenlaufzeitverfahren wird kontinuierlich ein moduliertes Laserlicht ausgesandt und permanent die Phasenlage der Modulationswelle des reflektierten Lichtes bestimmt. Die Phasenlage ist proportional zur Länge eines Reststückes der gesamten Objektentfernung.

Dieses Reststück kann maximal so lang sein wie die Wellenlänge der Modulationswelle. Von der Gesamtentfernung bleibt so regelmäßig ein Anteil unbestimmt, der einem ganzzahligen Vielfachen der Modulationswellenlänge entspricht. Dieses so genannte Mehrdeutigkeitsproblem wird durch die Verwendung verschiedener Modulationswellen behoben. Das Verfahren ist extrem schnell, liefert zudem sehr genaue Ergebnisse; ist aber in seiner Reichweite auf unter etwa 100 m aus Gefahrengründen für das menschliche Auge begrenzt. [Kern, 2007]

Triangulationsverfahren

Ein weiteres Verfahren ist das Triangulationsverfahren, welches z.B. bei Scannern der Firma MENSİ zum Einsatz kommt [MENSİ, 2003]. Das Gerät besitzt eine Basis, an deren einem Ende ein ausgesandter Laserstrahl von einem rotierenden Spiegel abgelenkt wird, und an deren anderem Ende sich eine CCD-(*Charged Coupled Device*-)Kamera befindet, welche die durch den Laserstrahl beleuchtete Fläche auf dem Objekt (*footprint*) aufnimmt. Durch ebenen Vorwärtsschnitt kann jeweils der 3D-Objektpunkt in einem lokalen ebenen Aufnahmekoordinatensystem bestimmt werden. Nach Vollendung eines solchen ebenen Scans dreht sich die Aufnahmeebene um einen inkrementellen Winkel weiter. Das Verfahren ist äußerst genau, besitzt jedoch je nach Gerät eine eher geringe Reichweite (z.B. MENSİ-Scanner < 25m). [Haring, 2003]

3.1.3 Auswertung der Daten

Je nach Projektanforderungen erfolgt die Objekterfassung von einem oder mehreren Standpunkten mit unterschiedlichen Blickwinkeln auf das zu erfassende Objekt. Als Ergebnis jedes einzelnen Standpunktes erhält man die Punktwolke in einem lokalen Koordinatensystem. Im weiteren Verlauf der Auswertung müssen die einzelnen lokalen Punktwolkensysteme miteinander verbunden (Co-Referenzierung) bzw. auf ein übergeordnetes Koordinatensystem (Georeferenzierung im Falle von erdbezogenen Raumbezugssystemen) referenziert werden (Abb. 5).

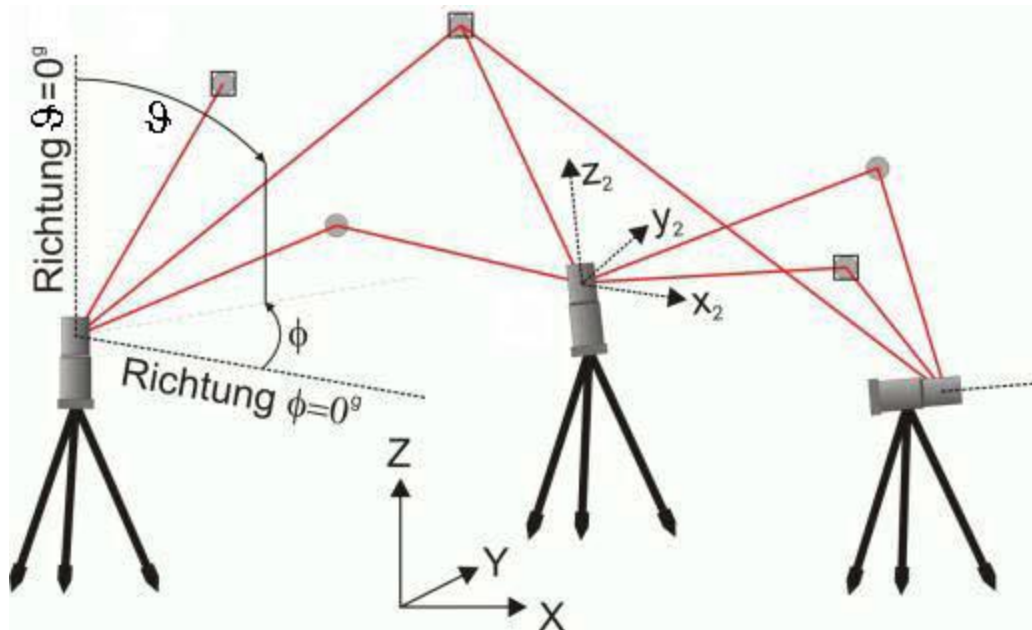


Abbildung 5: Darstellung der Objekterfassung von mehreren Standpunkten [Quelle: Pfeifer und Rottensteiner, 2001]

Dieser Schritt wird im Englischen mit *registration* bezeichnet und häufig falsch mit Registrierung statt mit Referenzierung übersetzt. Bei der Referenzierung bestehen mehrere Ansätze, wie z. B. Referenzierung über Passflächen von Regelgeometrien (Ebene, Kugel, Zylinder), über manuell ausgewählte identische Punkte der Punktwolken, über retroreflektierende Zielmarken und über flache Zielmarken mit speziellem Muster hinsichtlich der Remissionswerte (Bildmarken mit z. B. Schachbrettmuster oder Weißem Kreis auf schwarzem Grund). Als markenlose Lösung wird der ICP (iterative closest point) angewendet. Hierbei werden im Überlappungsbereich zweier Punktwolken Bereiche segmentiert, in denen dann näherungsweise identische Punkte über die Bestimmung der kürzesten Distanz ausgewählt werden. Iterativ kann dann über räumliche Ähnlichkeitstransformationen eine Annäherung der beiden Punktwolken erreicht werden. Das Referenzierungsergebnis ist eine Punktwolke, die idealerweise sämtliche Objektflächen diskretisiert und für die weitere Modellierung, Kombination mit anderen Geoinformationen und Visualisierung geeignet ist [http://de.wikipedia.org/wiki/Terrestrisches_Laserscanning; 14.07.2014].

3.1.4 Besonderheiten des terrestrischen Laserscannings

Das terrestrische Laserscanning zeichnet sich durch folgende Besonderheiten aus:

- **Berührungslose Vermessung**

Die Streckenmessung zu fast beliebigen Arten an Objektoberflächen erfolgt reflektorlos, d.h. das Messobjekt muss nicht mit Messmarken signalisiert oder sonst wie für die Vermessung präpariert werden. Von einem frei wählbaren Standpunkt aus kann aus der Ferne das Objekt optimal erfasst werden. Das Laserscanning ähnelt hier der Bildaufnahme mit einer Photokamera: Standpunkt aussuchen, Blickpunkt, Bildausschnitt und Zoom (Auflösung) auswählen und dann auf den Auslöser bzw. Startknopf drücken.

- **1:1 Maßstab**

Als Ergebnis einer Laserscanner-Vermessung erhält man eine Liste mit mehreren Millionen 3D-Punkten, die das Objekt in ihrer Summe im Maßstab 1:1 repräsentieren. Hier unterscheidet sich die Laserscanner-Technologie entscheidend von der Photogrammetrie, die das Messobjekt lediglich auf eine zweidimensionale Bildmatrix verkleinert abbildet. Zur Rückgewinnung der dritten Raumdimension (Entfernung bzw. Tiefe) aus einem Messbild sind aufwendige Verknüpfungen aus mehreren Bildern unterschiedlicher Standpunkte erforderlich.

- **Objektivität**

Durch den vollautomatischen Messprozess eines Laserscanners ist eine objektive Dokumentation eines Objektzustandes gegeben. Eine sehr wichtige Eigenschaft für alle Dokumentationsaufgaben.

- **Schnelligkeit**

Die Messgeschwindigkeit eines Laserscanners liegt weit über 1.000 Messpunkte pro Sekunde. So ist es möglich, auch hochkomplexe Objektgeometrien innerhalb weniger Minuten zu erfassen.

- **Vollständigkeit**

Auch wenn die Diskretisierung des Messobjektes nur über einzelne Messpunkte erfolgt, so wird doch das Objekt im Rahmen der gewählten Objektauflösung bzw. des gewünschten Detaillierungsgrades vollständig erfasst. Für Objekte mit Hinterschneidungen oder für Gebilde, die sich von einem Standpunkt aus nicht komplett einsehen lassen, sind mehrere

Scans von unterschiedlichen Standpunkten aus vorzunehmen. Die dabei notwendig werdende Referenzierung der Einzelscans zueinander oder in ein übergeordnetes Bezugssystem (Georeferenzierung) stellt aufgrund der hohen Punktdichte kein Hindernis dar.

- **Hohe Präzision**

Trotz der außerordentlich schnellen Messung liegen die erreichbaren Genauigkeiten bei 2-5 mm für den einzelnen 3D-Punkt. Für aus mehreren Punkten approximierte Normgeometrien wie z.B. Kugel-, oder Zylinderfläche können Millimeter-Genauigkeiten erzielt werden. Die Messgenauigkeit eines Laserscanners ist mit der eines reflektorlos messenden Tachymeters vergleichbar. Genauigkeitsbegrenzend ist bei beiden Verfahren die Definitionsunschärfe und Rauheit der natürlichen Objektoberflächen.

- **Unabhängigkeit von Umweltbedingungen**

Das Laserscanning ist ein aktives Messverfahren. Ein gleichbleibend helles Laserlicht wird ausgesandt und das vom Messobjekt reflektierte, zum Laserscanner wieder empfangene, Licht wird zur Vermessung genutzt. So ist der Laserscanner in der Lage auch bei schwierigen Lichtverhältnissen oder bei absoluter Dunkelheit zu messen.

- **Hohe Reichweite und großer Messbereich**

Moderne Laserscannersysteme können ihre Umgebung bis zu einer Entfernung von 100 m über den gesamten Sichthorizont erfassen. Mit einigen Geräten können sogar Messentfernungen von mehr als 1.000 m überbrückt werden.

- **Integrierbarkeit**

Aufgrund des Messprinzips liefert ein Laserscanner Messinformationen, die technisch gesehen denen eines Tachymeters vergleichbar sind und lassen sich daher gut in vorhandene Auswerteprozesse integrieren. Allein die ungeheuren Datenmengen erfordern mitunter, dass Spezialsoftware für die Auswertung benutzt werden muss.

3.1.5 Grenzen des terrestrischen Laserscannings

Den vielen Vorteilen des terrestrischen Laserscanning stehen nur wenige Nachteile gegenüber:

- **Stabiler Gerätestandpunkt erforderlich**

Während des Scanvorganges darf sich der Standpunkt nicht bewegen.

- **Diffus reflektierende Objekte erforderlich**

Erfolg und Misserfolg des Laserscannings hängen von den Reflektionseigenschaften des Messobjektes ab. Am besten sind Oberflächen geeignet, die diffus den Laserstrahl reflektieren. Sehr dunkle, wie z.B. Asphalt, oder spiegelnde Flächen, wie z.B. verchromte oder hochglanzlackierte Objekte, begrenzen den Einsatzbereich.

- **Keine multispektralen Farbinformationen**

Auch wenn teilweise von abbildenden Laserscannern gesprochen wird, so ist der Laserscanner an sich nicht fähig, Farbinformationen über das Objekt zu erfassen. Einzig die relativ schmalbandige Information über die Stärke des reflektierten Laserlichtes (Remission) wird miterfasst. Um gleichzeitig neben den rein geometrischen Informationen auch noch Farbinformationen zu erfassen, können die meisten Laserscanner mit einer handelsüblichen Digitalkamera ergänzt werden. Die Punktwolke kann mit diesen Digitalfotos z.B. für Visualisierungszwecke eingefärbt und texturiert werden.

- **Unstrukturierte Punktwolke kann aufwendige Nacharbeiten erfordern**

Originär erhält man aus einem Scan eine Punktwolke von unstrukturierten Einzelpunkten. Aus dieser Punktwolke gilt es im Rahmen der Auswertung markante Punkte oder Strukturen abzuleiten. Je nach Anwendungszweck muss ein Teil oder die gesamte Punktwolke in Idealgeometrien umgerechnet werden. Diese Art der Auswertung kann derzeit nur manuell durch einen Experten in einem aufwendigen Modellierungsprozess vorgenommen werden. Für Spezialanwendungen stehen teilautomatische Methoden zur Verfügung. [Kern, 2007]

3.2 Computerprogramme

Für diese Arbeit wurden neben verschiedener Bildbearbeitungssoftware vor allem folgende Computerprogramme verwendet.

3.2.1 RiScan Pro

RiScan Pro ist die Begleitsoftware zum terrestrischen 3D-Laserscanner der Firma Riegl. Mit diesem Programm werden die erfassten Daten referenziert und anschließend bearbeitet. Es lassen sich zB Meshes (triangulierte Daten) erstellen, Trennflächen einbauen und Konturlinien erstellen. Weiters können die 3D-Modelle verschieden visualisiert werden. Einige Bearbeitungsmöglichkeiten werden in den Kapiteln 4 und 5 genauer vorgestellt.

3.2.2 B02HPGL.EXE

B02HPGL.EXE ist ein DOS Programm, das von Herrn Prof. Dr. Liu programmiert wurde. Als Ergebnis erhält man zwei Plots. Im ersten Plot werden die Großkreise der Trennflächen und freien Flächen geplottet und die „Joint Pyramid Codes“ angegeben. Die Codes geben Informationen über die räumliche Begrenzung der Blöcke. Anhand des zweiten Plots können potentiell instabile Blöcke und deren Versagensmechanismus ("sliding mode") festgestellt werden. Als Eingangsparameter werden die Orientierungsdaten der Trennflächen und der freien Flächen benötigt.

3.2.3 B03HPGL.EXE

B03HPGL.EXE ist ebenfalls ein von Herrn Prof. Dr. Liu programmiertes DOS-Programm. Mit diesem Programm kann man das Volumen der Blöcke berechnen und die Form der Blöcke dreidimensional darstellen. Als Eingangsparameter werden die Orientierungsdaten der Trennflächen und freien Flächen sowie deren Abstände benötigt. Die Trennflächenabstände wurden mit dem Programm "RiScan Pro" im Bereich der Blöcke gemessen.

3.2.4 B10HPGL.EXE

Mit dem von Herrn Prof. Dr. Liu programmierten DOS-Programm B10HPGL.EXE lässt sich durch die Berechnung der "sliding force" der Blocktyp feststellen. Als Ergebnis erhält man eine ".txt"-Datei, die aus sechs Tabellen besteht. Berechnet werden u. a. "sliding direction", "sliding mode" und "sliding force" für jede "Joint Pyramid" (= durch natürliche Trennflächen abgegrenzter Block). Als Eingangsparameter werden die Orientierungsdaten der

Trennflächen und freien Flächen sowie deren Reibungswinkel benötigt. Eine positive "sliding force" zeigt einen Keyblock Typ I an, eine negative "sliding force" entspricht einen Blocktyp II. Fehlt der Versagensmechanismus, handelt es sich um einen Blocktyp III. Zur Einteilung der verschiedenen Blocktypen, siehe Kapitel 6.2.6.

3.2.5 *B11HPGL.EXE*

Mit diesem von Herrn Prof. Dr. Liu programmierten DOS-Programm lässt sich eine Stabilitätsanalyse der einzelnen Blöcke durchführen. Als Ergebnis erhält man einen Plot, der den Reibungswinkel zeigt, der notwendig ist, dass der Block stabil bzw. im Gleichgewicht ist. Dieser benötigte Reibungswinkel wird auch als mobilisierter Reibungswinkel bezeichnet. Als Eingangsparameter werden die Orientierungsdaten sowie die blockbildenden "Joint Pyramid Codes" der Trennflächen benötigt. Für dieses Programm werden mindestens drei Trennflächen benötigt, um eine Stabilitätsanalyse durchführen zu können

3.2.6 *B04HPGL.EXE*

Dieses Programm funktioniert im Prinzip gleich, wie B11HPGL.EXE, jedoch werden nur eine oder zwei Trennflächen als Inputparameter benötigt.

4. Vorbereitung der Daten

Im folgenden Kapitel wird beschrieben, wie und wo die Daten erhoben wurden. Weiters wird erklärt, wie die Laserscandaten aufbereitet wurden, um sie im Anschluss weiter bearbeiten zu können.

4.1 Erhebung der Daten

Die Daten für diese Masterarbeit wurden mir von Herrn Prof. Dr. Liu zur Verfügung gestellt. Die Aufnahme der Scans erfolgte innerhalb von zwei Tagen, nachdem bereits im Vorfeld am 5. und 7. Juli 2012 einzelne Probescans durchgeführt wurden. Für den Aufbau und die Durchführung der Scans waren zwei Personen im Einsatz. Scanlokaltät 1 und 2 wurden am 16. Juli 2012, Scanlokaltät 3, 4 und 5 am 17. Juli 2012 aufgenommen. Aufgrund verschiedener Vorgangsweisen ergeben sich daraus 10 Scanpositionen (aufrecht – geneigt) mit insgesamt 37 Scans. Im RiScan-Projekt bedeuten ungerade Scanpositionen (1, 3, 5, 7, 9), dass mit aufrechtem Scanner gearbeitet wurde, gerade Scanpositionen (2, 4, 6, 8, 10) weisen auf eine Neigung (Tilt) des Scanners von 20° hin.

Für die vollständige Erfassung des gesamten Feldkofels wurden die Scanpositionen im Gebiet von Bleiberg Kreuth und Bleiberg Nötsch verteilt. Zwischen benachbarten Scanpositionen ergeben sich Abstände zwischen ca. 100 m und mehr als 250 m. Die Entfernung zum gescannten Objekt, insbesondere im Bereich des Gipfels, liegt zwischen ca. 893 m und 1088 m (Luftlinie). In Abbildung 6 sind die Entfernungen mittels Scandaten perspektivisch dargestellt. Blickrichtung ist nach Nordwesten. [Weber, 2013]

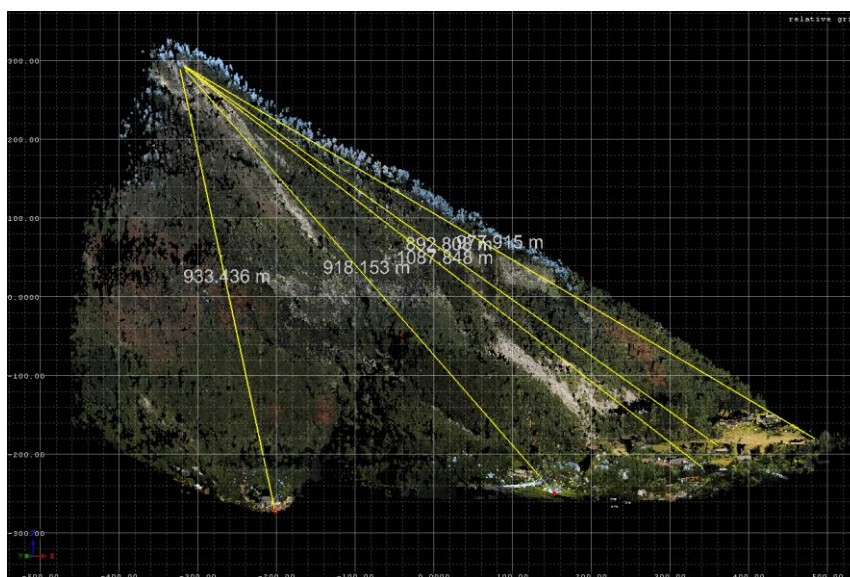


Abbildung 6: Laserscan Screenshot, Entfernungen der Scanpositionen vom Gipfelbereich des Feldkofels [Weber, 2013]

4.2 Referenzierung

Um eine erste grobe Referenzierung der Scanpositionen durchzuführen, werden die GPS-Daten der Scanpositionen und Reflektoren benötigt. Die GPS Daten der Scanpositionen und Reflektoren sind aus dem Koordinatensystem WGS84 in das Format Gauss-Krüger umgerechnet. In Tabelle 1 sind die GPS Daten der Scanpositionen und Reflektoren aufgelistet. In der Spalte "Name" steht der gemessene Punkt (Scannerposition oder Reflektor); X, Y und Z beziehen sich auf die Lage im Raum, KQ Lage und KQ Höhe beschreiben die Standardabweichungen der Messungen.

Tabelle 1: GPS Daten aller Scanpositionen; Sx – Nummer der Scanposition; Rx_Sx – Reflektornummer in Bezug auf die jeweilige Scanposition; Koordinaten in [m]; KQ Lage und Höhe gibt die Standardabweichungen der Messungen an (in [m]); Koordinatensystem: Gauss-Krüger [Quelle: Weber, 2013]

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

Arbeitsschritte:

Folgende Schritte wurden für eine erste grobe Referenzierung mit dem Programm "RiScan Pro" durchgeführt:

1. Koordinaten importieren:
TPL (GLCS) - Import tiepointlist (Abbildung 7)

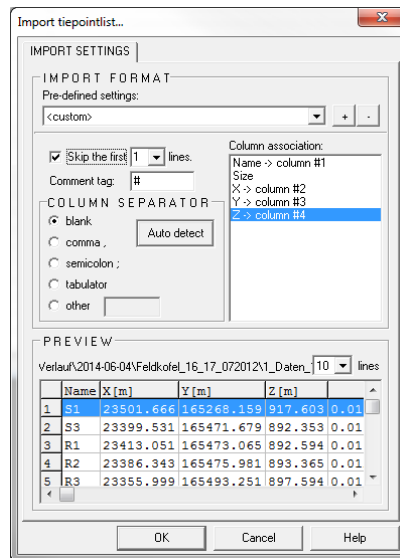


Abbildung 7: Koordinaten importieren

2. Transformation von Project Coordinate System (PCS) zu Global Coordinate System (GCS):
TPL (GLCS) - Calculate Translation for POP Matrix (Abbildung 8)

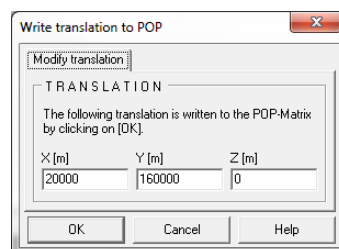


Abbildung 8: "Translation for POP Matrix"

3. TPL (GLCS) - Select all tiepoints - copy to TPL PRCS
4. SOP Matrix für ScanPos1 berechnen (funktioniert bei den restlichen Scanpositionen gleich):
ScanPos001 - TPL (SOCS) - find corresponding points (Abbildungen 9 und 10)

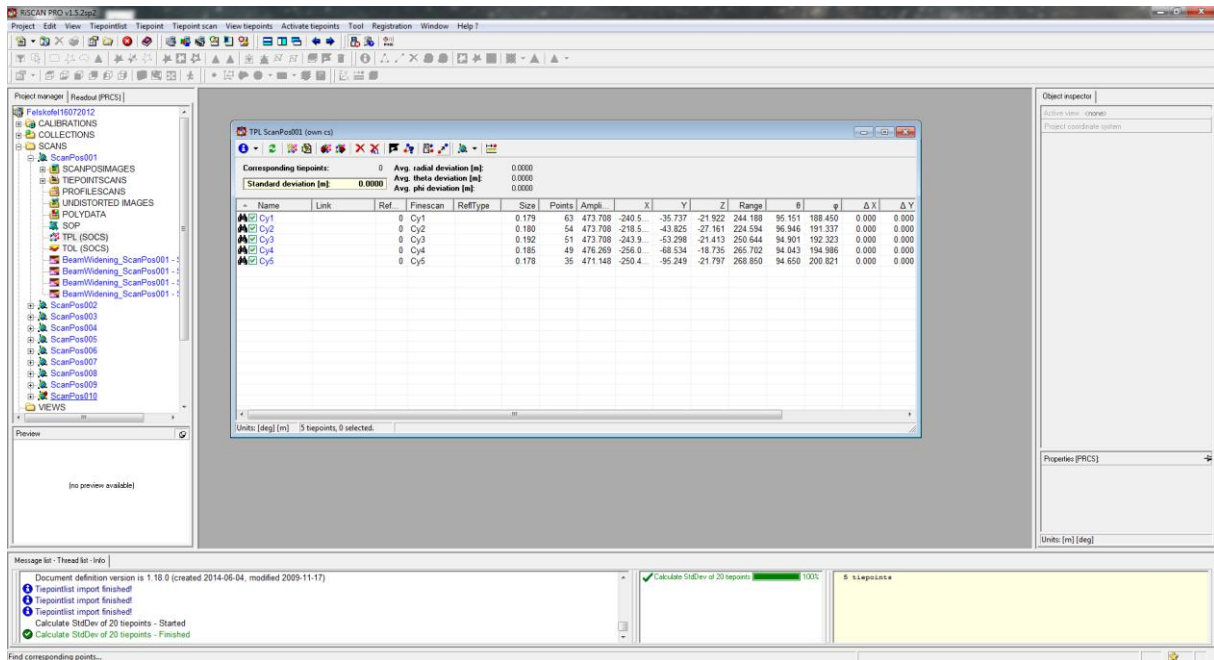


Abbildung 9: Berechnung der SOP-Matrix

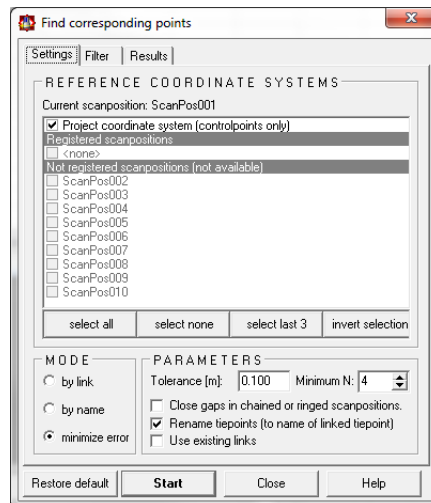


Abbildung 10: "Find corresponding points"

Nach diesen Schritten ist eine erste grobe Referenzierung der Scans erfolgt. Ein Vergleich der Scanpositionen zeigt jedoch, dass noch ein deutlicher Versatz zu erkennen ist. Abbildung 11 zeigt einen Screenshot, in dem der Versatz deutlich zu erkennen ist. Für dieses Beispiel wurden Scanposition 1 - Scan 4 (blau) mit Scanposition 2 - Scan 3 (grün) übereinandergelegt.

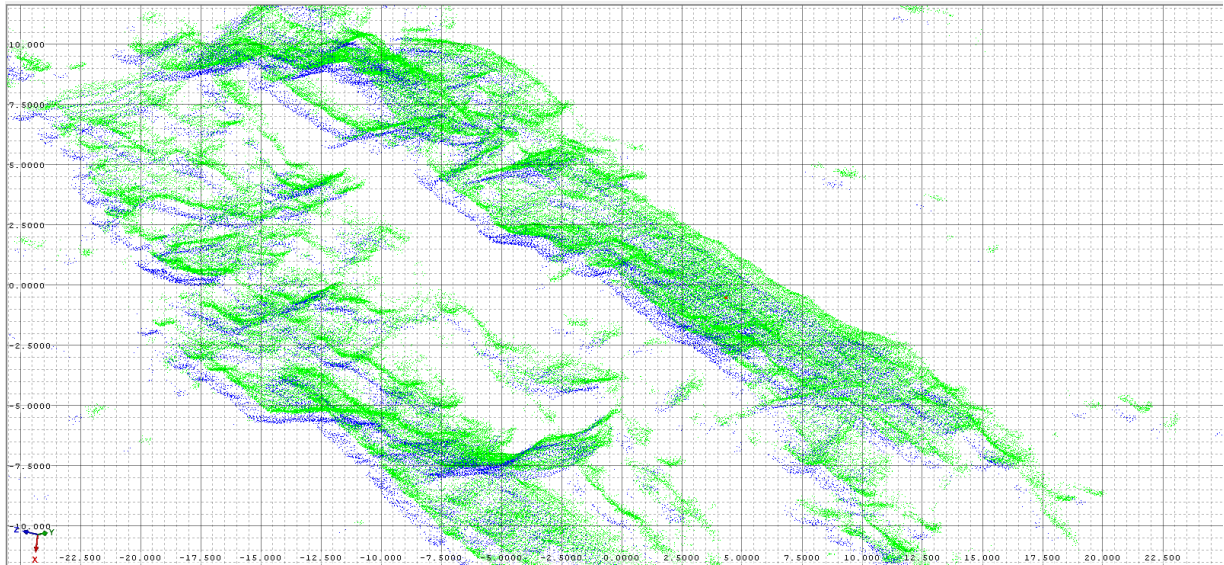


Abbildung 11: Vergleich Scanposition 1 - Scan 4 (blau) mit Scanposition 2 - Scan 3 (grün)

Um diesen Versatz zu verdeutlichen, wurde ein kleiner Bereich ausgeschnitten (Abbildung 12). Der Screenshot zeigt wieder Scanposition 1 - Scan 4 (blau) und Scanposition 2 - Scan 3 (grün).

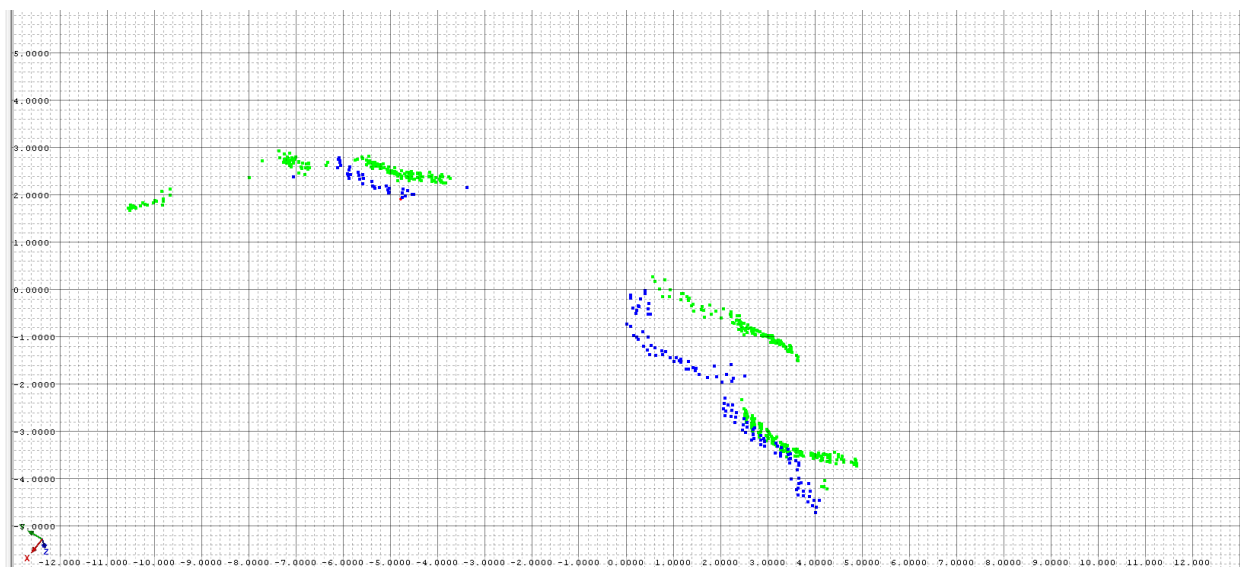


Abbildung 12: Vergleich Scanposition 1 - Scan 4 (blau) mit Scanposition 2 - Scan 3 (grün)

Für eine weitere Bearbeitung der Daten ist dieser Versatz eindeutig zu groß. Um den Versatz zu verringern bzw. zu beseitigen, wurde das Plugin "Multi Station Adjustment" (MSA) angewandt.

4.3 Multi Station Adjustment (MSA)

Die normale Referenzierung in RiSCAN PRO basiert auf übereinstimmende "tiepoints" (feingescannte Reflektoren). Dadurch erhält man eine schnelle Referenzierung. Trotz guter Übereinstimmung dieser "tiepoints" ist es jedoch möglich, dass die Scandaten Ausrichtungsfehler zeigen und nicht optimal zusammenpassen. Hauptgründe dafür können zB unstabiles Reflektorensetup, eine suboptimale Positionierung der Reflektoren oder Messfehler sein. Um diese Fehler zu minimieren, gibt es in RiSCAN PRO das Plugin "Multi Station Adjustment" (MSA). Dieses Plugin versucht die Referenzierung der Scanpositionen zu verbessern. Dafür wird die Orientierung und Position jeder Scanposition in mehreren Durchläufen verändert, um die beste Gesamtübereinstimmung zu berechnen. Um die Scanpositionen miteinander zu vergleichen, werden "tiepoints", "tieobjects" und Polydateien (reduzierte Punktwolken) verwendet [RiSCAN PRO Help, version: 1.5.2sp2].

Folgende Arbeitsschritte sind notwendig:

1. Registration - Multi Station Adjustment - Prepare data

Aus jeder Punktwolke der Scans wird zuerst eine Polydatei erstellt (Abb. 13). Der "plane surface filter" reduziert die Anzahl der Punkte, indem sie durch Ebenen dargestellt werden (Abb. 14).

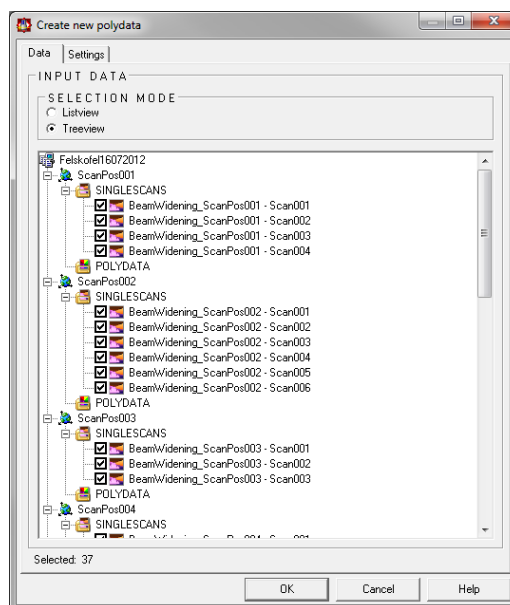


Abbildung 13: Erstellung einer Polydatei

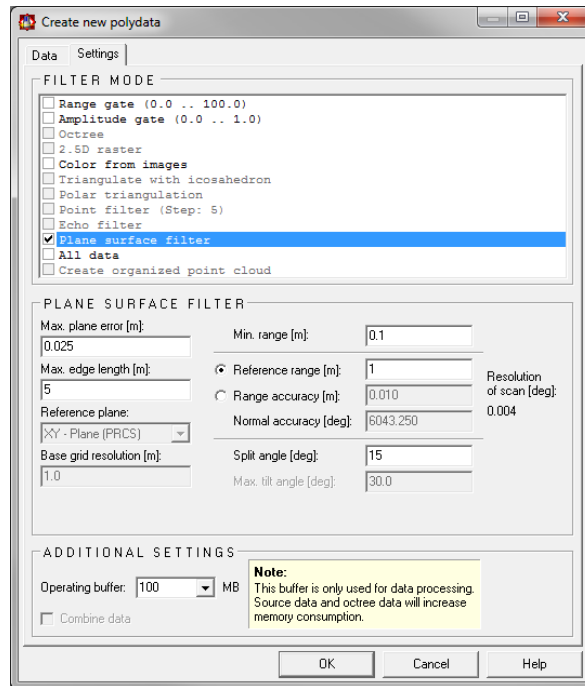


Abbildung 14: Erstellung einer Polydatei, "Plane Surface Filter"

2. Registration - Multi Station Adjustment - Start adjustment

Um eine Adjustierung durchzuführen, wird eine Scanposition fixiert. Diese Scanposition dient als Referenz für die anderen Scanpositionen. In diesem Beispiel ist Scanposition 1 fixiert - Scanposition 2 - 9 werden darauf ausgerichtet. Die verschiedenen Parameter werden eingegeben und anschließend eine Analyse durchgeführt (Abb. 15). Dabei wird die Standardabweichung berechnet und zusammengehörende Punkte gesucht, jedoch wird noch keine Änderung der Position und Orientierung der Scanpositionen durchgeführt. Diese Werte werden im Bereich "Statistics" angezeigt. Erst durch Anklicken des Buttons "Calculate" startet die endgültige Berechnung und die Parameter werden verändert.

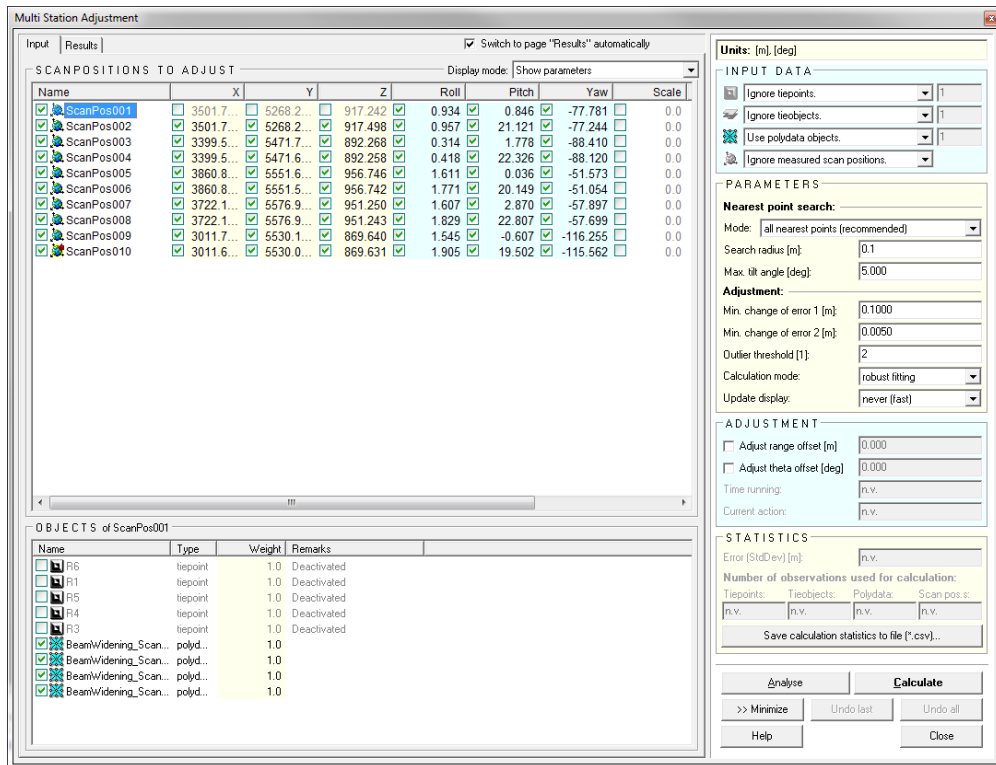


Abbildung 15: Plugin "Multi Station Adjustment"

Durch Verringerung des Parameters "search radius" kann die Standardabweichung reduziert werden (Abb. 16, 17, 18).

search radius = 2 m; Standardabweichung = 0,5280 m

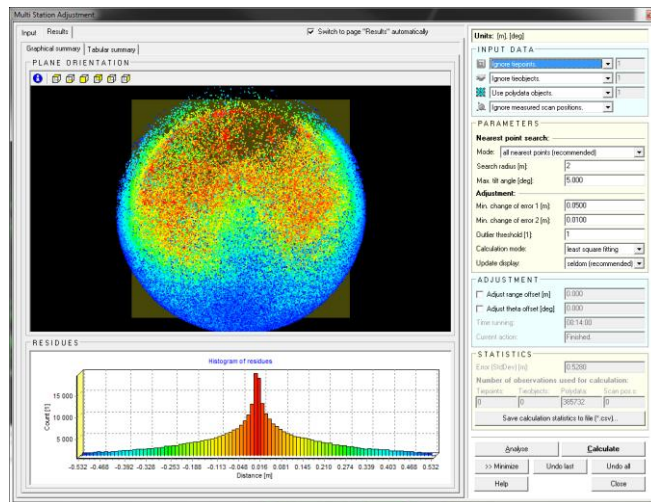


Abbildung 16: Ergebnis nach ersten Analysedurchgang

search radius = 0,1 m; Standardabweichung = 0,0345 m

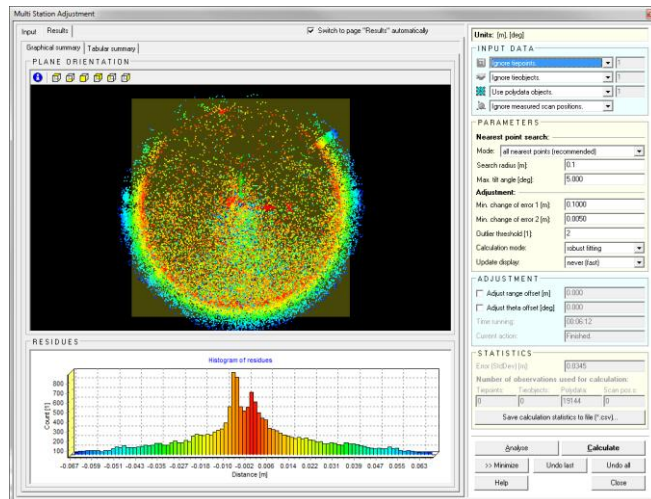


Abbildung 17: Ergebnis nach zweitem Analysedurchgang

search radius = 0,03 m; Standardabweichung = 0.0108 m

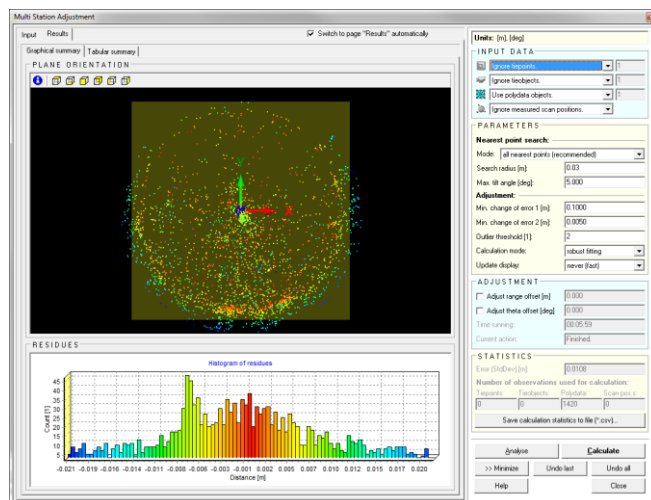


Abbildung 18: Ergebnis nach drittem Analysedurchgang

Nach Ausführung der Berechnung werden anstatt der Positions- und Orientierungsdaten in den sechs Spalten der Scanpositionstabelle die Änderungen der Parameter (= Differenz nach Adjustierung - vor Adjustierung) ausgewiesen (Abb. 19).

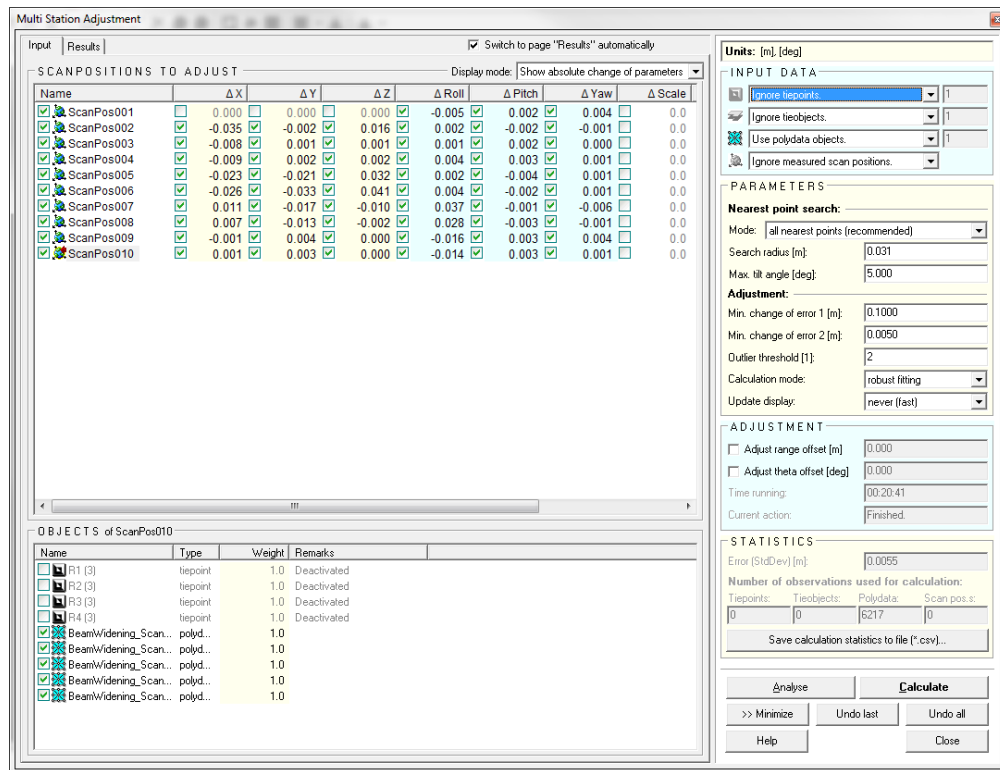


Abbildung 19: Veränderung der Scanpositionen

Nach der endgültigen Berechnung wird bei einem search radius von 0,031 m eine Standardabweichung von 0,0054 m ausgewiesen.

Wie in Abbildung 20 zu sehen ist, liegen die Punkte jetzt exakt übereinander. Die Abbildung zeigt den selben Ausschnitt wie Abbildung 11. Verglichen werden wieder Scanposition 1 - Scan 4 (blau) mit Scanposition 2 - Scan 3 (grün).

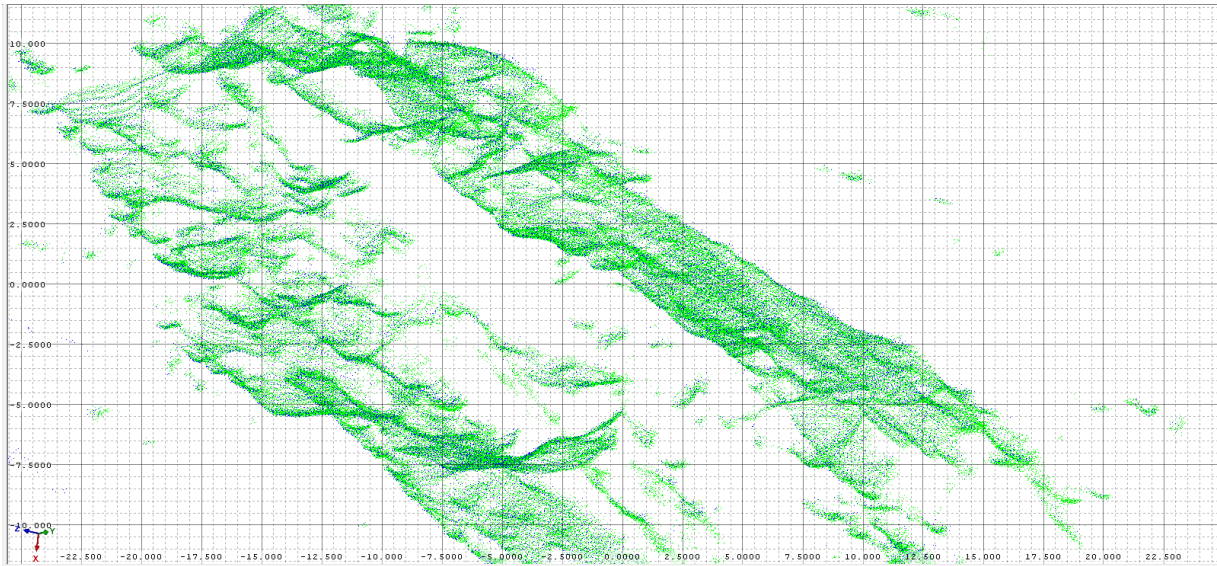


Abbildung 20: Vergleich nach Anwendung von "MSA"; Scanposition 1 - Scan 4 (blau), Scanposition 2 - Scan 3 (grün)

Die Punktdaten sind jetzt referenziert und liegen exakt übereinander. Nun kann mit der weiteren Bearbeitung der Daten begonnen werden.

5. Bearbeitung der Daten

Im folgenden Kapitel werden mehrere Bearbeitungsmöglichkeiten, die mit dem Programm "RISCAN Pro" möglich sind, Schritt für Schritt erklärt.

5.1 Erstellen von Polydateien für ausgewählte Bereiche

Zuerst werden für ausgewählte Bereiche jeweils eine Polydatei erstellt. Eine Polydatei ist eine reduzierte Punktwolke. Eine Unterteilung in einzelne Bereiche ist sinnvoll, um eine schnellere Bearbeitung der Datenmengen zu ermöglichen. Das Erstellen solcher Polydateien funktioniert folgendermaßen:

1. Selection Mode - Markieren des Bereiches (Abb. 21)
2. Create new polydata object (Abb. 22)

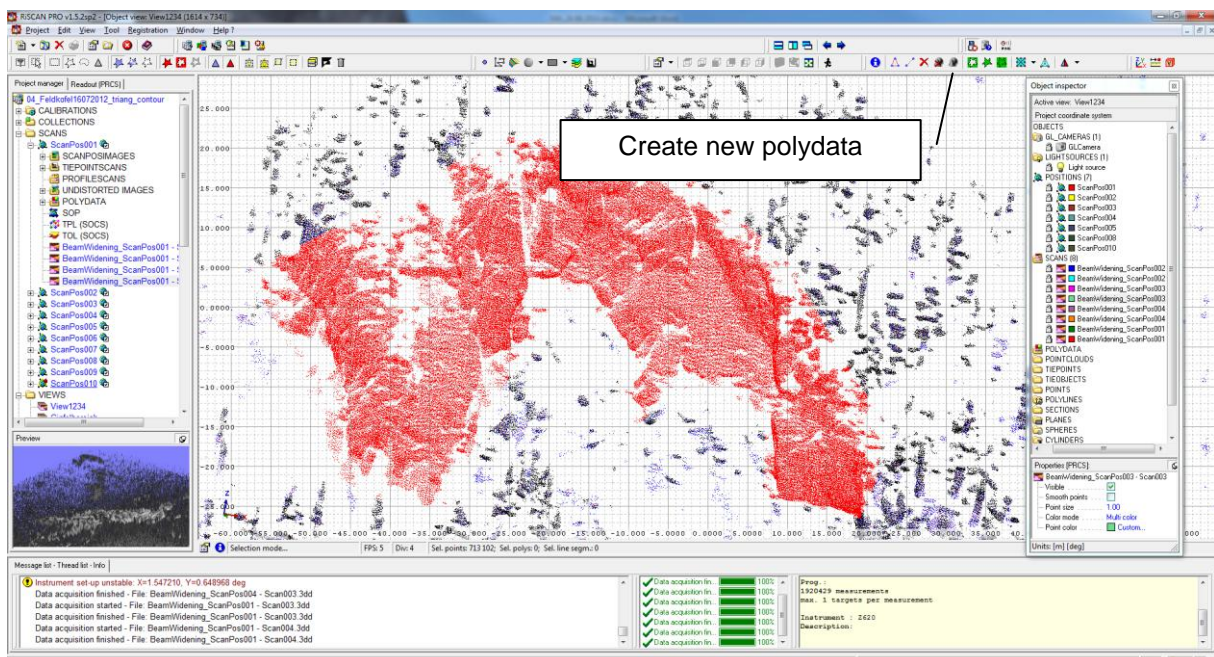


Abbildung 21: Erstellung einer Polydatei

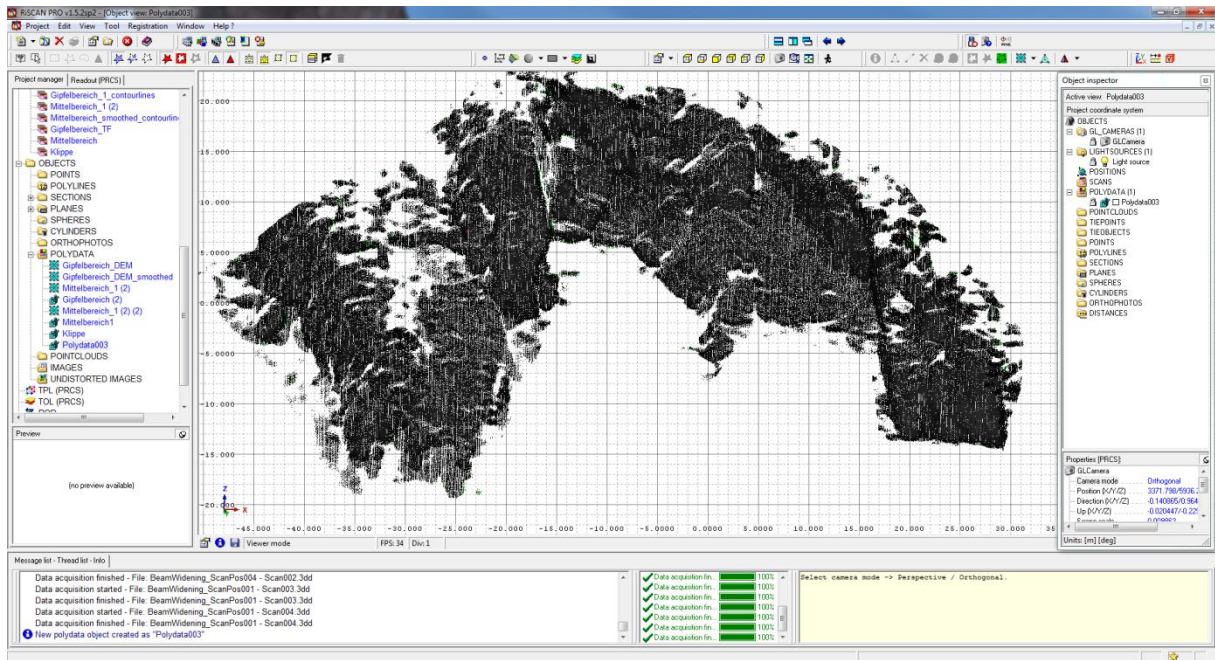


Abbildung 22: Erstellte Polydatei

5.2 Trennflächeneinbau

5.2.1 Trennflächen allgemein

Eine Trennfläche bezeichnet in der Geologie und speziell der Ingenieurgeologie die Fläche einer Diskontinuität innerhalb eines Gebirges. Trennflächen unterbrechen daher die Kontinuität des Felskörpers und sind ein wesentliches Merkmal zu dessen Beschreibung. Es handelt sich dabei um einen Sammelbegriff für verschiedene Arten von Diskontinuitätsflächen, wie in Tabelle 2 dargestellt. Die Gesamtheit der Trennflächen im Gebirgsgefüge bezeichnet man als Trennflächengefüge. Eine Gruppe von Trennflächen, welche sich in Art und Ausrichtung gleichen, wird Trennflächenschar genannt [www.wikipedia.org, 12.07.2014].

Tabelle 2: Einteilung der Trennflächen [Quelle: www.wikipedia.org, 12.07.2014]

Trennflächenart	Diskontinuität	Kennzeichen	Entstehung
Kluffflächen	Kluft	ohne Dislokation	Tektonik, Schollenbewegungen, Druck-, Spannungs- und Temperaturunterschiede
Störungsflächen	Störung	mit Dislokation	Tektonik
Schichtflächen	Schichtung	meist parallel	Sedimentation
Schieferungsflächen	Schieferung	parallel, engständig	Tektonik, Metamorphose

Laut International Society for Rock Mechanics (ISRM, 1978) werden Trennflächen durch zehn Parameter beschrieben: Orientierung, Abstand, Persistenz, Rauigkeit, Festigkeit der TF-Oberfläche, Öffnungsweite, Füllmaterial, Wasserverhältnisse, Anzahl der TF-Scharen und Blockgröße.

- **Typ (type of discontinuity)**

Schieferungsflächen, Kluffflächen, Harnischflächen, Störungsflächen, Schichtflächen

- **Anzahl der TF-Scharen (number of discontinuity sets)**

Das Erscheinungsbild eines Gebirges wird dominiert durch die Anzahl von TF-Scharen, die sich gegenseitig durchkreuzen. Die Form eines Blockes wird durch die Schnittpunkte der TF bestimmt.

- **Termination (termination)**

Die Termination beschreibt, ob die TF im intakten Gestein oder in einer anderen TF endet.

- **Öffnungsweite (aperture)**

Die Öffnungsweite ist die senkrechte Distanz zwischen den benachbarten Gesteinsflächen einer TF. Dieser dazwischenliegende Raum ist mit Wasser oder Luft gefüllt. Die Öffnungsweite variiert oft sehr stark im Verlauf einer Trennfläche. Diese Variation ist sehr schwierig zu messen. Die Öffnungsweite ist wichtig für die Permeabilität und hydraulische Leitfähigkeit der TF und des Gebirges. Tabelle 3 zeigt die Einteilung und Benennung der Öffnungsweiten.

Tabelle 3: Kluftöffnungsweiten, Gegenüberstellung der Benennung und Einteilung, ISRM: International Society for Rock Mechanics, IAEG: International Association for Engineering Geology and the Environment [Quelle: Eichler et al., 2007]

ISRM 1978 [3]		Öffnungsweite	IAEG 1981 [5]	Öffnungsweite
offene Formen	kavernös	> 1000 mm		
	extrem weit	100 - 1000 mm	sehr groß	>200 mm
	sehr weit	10 - 100 mm	groß	60 - 200 mm
klaffende Formen	weit	> 10 mm	mittelgroß	20 - 60 mm
	mittelweit	2,5 - 10 mm	mittelklein	6 - 20 mm
	offen	0,5 - 2,5 mm	klein	2 - 6 mm
geschlossene Formen	teilweise offen	0,25 - 0,5 mm	sehr klein	0 - 2 mm
	dicht	0,1 - 0,25 mm	geschlossen	0 mm
	sehr dicht	< 0,1 mm		

- **Abstand (spacing)**

Der Abstand beschreibt die senkrechte Distanz benachbarter Trennflächen und bestimmt die Größe der Blöcke. Die Blockgröße ist ein sehr wichtiger Faktor bei der Stabilitätsanalyse und der Konstruktion. Tabelle 4 listet die Kategorien der Trennflächenabstände auf.

Tabelle 4: Kategorien der Trennflächenabstände, IAEG: International Association for Engineering Geology and the Environment [Quelle: Eichler et al. 2007]

Abstände	Schichtung	Klüftung	IAEG-Term
größer 200 cm	massig	kompakt (k)	very widely spaced
60 - 200 cm	dickbankig	weitständig (ws)	widely spaced
20 - 60 cm	mittelbankig	mittelständig (ms)	medium spaced
6 - 20 cm	dünnbankig	engständig (es)	closely spaced
2 - 6 cm	dickplattig	dichtständig (ds)	very closely spaced
0,6 - 2 cm	dünnplattig	sehr dichtständig (sds)	---
kleiner 0,6 cm	blättrig	Störungszone	---

- **Füllmaterial (filling)**

Das Füllmaterial beschreibt das Material, das zwei benachbarte Gesteinsflächen einer TF voneinander trennt. Dabei kann es sich zB um Calcit, Chlorit, Ton, Silt, fault gouge, Breckzie, Quarz oder Pyrit handeln. Das Material hat einen wesentlichen Einfluss auf die

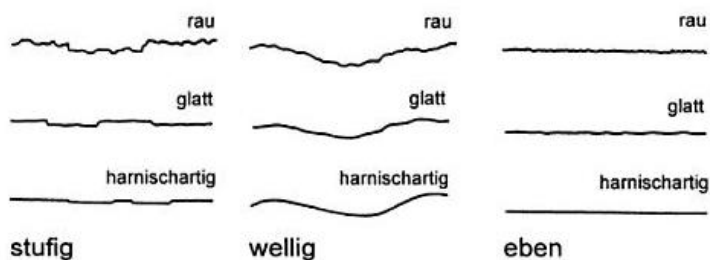
Scherfestigkeit der TF. Verfüllte TF haben meist eine geringere Scherfestigkeit als saubere, geschlossene TF.

- **Rauigkeit (roughness)**

Die Rauigkeit ist ein Maß für die Unebenheit und Welligkeit der TF relativ zur ihrer durchschnittlichen Ebene. Sie hat einen großen Einfluss auf die Scherfestigkeit. Die Bedeutung der Rauigkeit nimmt mit zunehmender Öffnungsweite, zunehmender Mächtigkeit des Füllmaterials und vorherigen Scherversatz ab. Die Rauigkeit beeinflusst auch die Wasserbewegungen entlang einzelner Trennflächen und in klüftigen Gebirge. Tabelle 5 listet eine Beschreibung der Oberflächenbeschaffenheiten auf.

Tabelle 5: Beschreibung der Oberflächenbeschaffenheiten [Quelle: Eichler, 2000]

Rauhigkeit	Ebenheit	Schichtoberflächen
rau	getrept	wellig
gestriemt	gebogen	wulstig
glatt	gewellt	knollig
poliert (harnischartig)	wulstig	eben
	eben/flach	
	gefaltet	



- **Länge (length)**

- **Orientierung (orientation)**

Die Orientierung von Trennflächen wird meist durch Einfallsrichtung und Einfallswinkel definiert (Abb. 23). Sie bestimmt die Form der Blöcke und Versagensart (Gleiten, Keilversagen, Kippen). Die Orientierung der TF kann durch sphärische Projektionsmethoden (zB Lambert, Schmidt, Wulf) dargestellt werden.

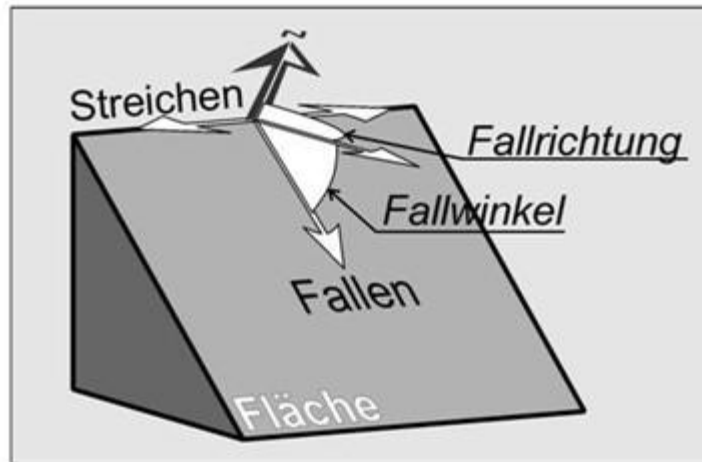


Abbildung 23: Darstellung von Einfallswinkel und Einfallsrichtung [Quelle: Plan, 2006]

- **Persistenz (persistence)**

Trennflächen sind nicht unendlich zusammenhängend im Gebirge, sondern werden von Bereichen mit intaktem Gestein gekreuzt. Die Persistenz beschreibt die Flächenausdehnung einer TF bzw. die Größe einer TF in einer Fläche (Abb. 24). Sie ist einer der wichtigsten TF-Parameter, aber gleichzeitig sehr schwierig zu bestimmen. Die Persistenz hat einen großen Einfluss auf die Scherfestigkeit der Diskontinuitätsflächen sowie auf die Zerlegungscharakteristik und Permeabilität des Gebirges. Die Persistenz kann man mit LiDAR nicht direkt messen; sie kann mit deterministischen Modellen geschätzt werden.

Die Anzahl der instabilen Blöcke steigt mit steigender Persistenz. [Fekete, 2013]

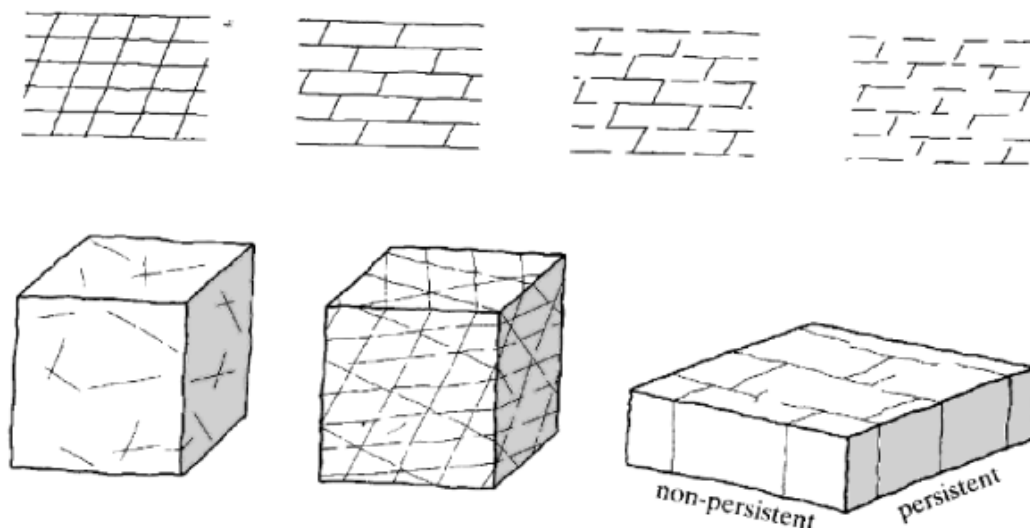


Abbildung 24: Darstellung der Persistenz von Trennflächen [Quelle: Brady, 2004]

- **Verwitterung / Festigkeit der Trennflächenoberflächen (wall strength)**

Die Festigkeit der TF-Oberfläche wird durch die äquivalente Druckfestigkeit der angrenzenden Felswände definiert. Sie spielt eine sehr wichtige Rolle für die Scherfestigkeit und Verformbarkeit, vor allem bei unverfüllten Klüften, bei denen direkter Gesteinskontakt vorherrscht. Die Festigkeit der TF-Oberfläche ist aufgrund von Verwitterung oder Alteration meist geringer als die Festigkeit des Gesteins.

Mit zunehmender Verwitterung sinkt die Festigkeit bzw. steigt die Möglichkeit eines Abscherens von Unebenheiten, wobei das Ausmaß vom Korngefüge abhängt: Gesteine mit einer kompakten Textur (zB Tiefengesteine) verwittern weniger als solche mit einer porösen Struktur (zB Klastische Sedimente) [Bergamin, 2010]. Tabelle 6 listet die verschiedenen Verwitterungsgrade auf.

Tabelle 6: Verwitterungsgrade nach Empfehlungen von ISRM (International Society for Rock Mechanics) und IAEG (International Association for Engineering Geology) [Quelle: Eichler, 2000]

W	ISRM – IAEG	V	Bezeichnung
I	Fresh	1	Frisch und unverwittert (Fels) Es sind keine farblichen, mikro- oder makroskopischen Veränderungen erkennbar.
II	Slightly	2	Angewittert Erste Verfärbungen sind durch mikroskopische Zersetzung von Mineralen erkennbar, die in einer verringerten Druckfestigkeit des Gesteins resultieren.
---	---	3	Leicht verwittert Deutlich rotbraune Verfärbung an den Oberflächen von Klüften (und anderen Trennflächen); bis zu 15% des Gesteins sind deutlich entfestigt.
III	Moderately	4	Mittelstark verwittert Entlang von Klüften tritt starke Verwitterung auf, es entstehen dadurch tonig-schluffige Beläge (Kluffüllungen); die Reibung entlang dieser Trennflächen ist deutlich herabgesetzt; bis zu 40-50% des Gesteins sind zersetzt; alle niedrigeren Verwitterungsstufen treten nebeneinander auf. Typische Steinkerne als Reste von Kluffkörpern entstehen. Wegen der Gefährdung durch Herausgleiten von solchen Kluffkörpern ist dies ein für das Baugeschehen besonders kritischer Zustand.
IV	Highly	5	Stark verwittert Mehr als 40-50% des Gesteins sind zersetzt, die ursprüngliche Struktur ist aber noch gut erkennbar, die Klüfte bestimmen noch das Gesamtverhalten des Gesteins, obwohl die Reibung entlang der Klüfte stark herabgesetzt ist. Steinkerne schwimmen als Reste von Kluffkörpern in einer zersetzten Matrix aus Lockermaterial.
V	Extremly	6	Sehr stark verwittert Die Trennflächen sind nun wirkungslos, der ursprüngliche Zusammenhalt des Gesteins ist kaum noch vorhanden, aber die ursprüngliche Gesteinsstruktur ist noch in großen Bereichen erkennbar.
VI	Residual soil	7	Völlig verwittert (Boden) Die ursprünglichen Strukturen und die Gesteinszusammensetzung sind restlos aufgelöst, es ist eine deutliche Volumenänderung feststellbar, aber der Boden ist nicht wesentlich transportiert worden.

- **Wasserverhältnisse (seepage)**

Beschreibt den Wasserfluss und die Feuchtigkeit, die in den TF oder an der gesamten Gebirgsmasse zu sehen sind.

- **Blockgröße (block size)**

Die Blockgröße wird durch den TF-Abstand, die Anzahl der TF-Sets und der TF-Persistenz bestimmt. Aus der Orientierung (Einfallswinkel, Einfallsrichtung), dem Abstand, der Häufigkeit und der Persistenz der Trennflächensets kann man auf die Größe und Form von Felsblöcken schließen.

Zur Berechnung des Volumens werden benötigt:

- Orientierung, Größe und Häufigkeit der Trennflächenscharen
- Persistenz, Termination und 3D-Trennflächennetzwerk

Das Blockvolumen V_b kann durch die drei Haupttrennflächenscharen mit folgender Formel berechnet werden:

$$V_b = S1 * S2 * S3 / (\sin\alpha * \sin\beta * \sin\gamma)$$

wobei $S1$, $S2$, $S3$ der TF-Abstand der TF-Scharen sind und α , β , γ die Winkel zwischen den TF-Scharen. Oft sind diese Winkeln ca. 90° , daher kann man in der Praxis meistens mit der vereinfachten Formel $V_b = S1 * S2 * S3$ rechnen. In den beiden Formeln ist die Blockform stets ein schiefer Quader. Im Zuge dieser Arbeit wurde das Volumen jedoch mit Hilfe der Blocktheorie bzw. dem Programm "B10HGPL.EXE" berechnet. Dabei wird das Volumen von echten Polyedern bestimmt. Diese Methode liefert daher wesentlich genauere Ergebnisse.

5.2.2 Einbau der Trennflächen

Der Einbau von Trennflächen erfolgt in mehreren Schritten:

1. Markieren eines Bereiches auf der Trennfläche (Abb. 25):
Selection Mode - Polyline Selection

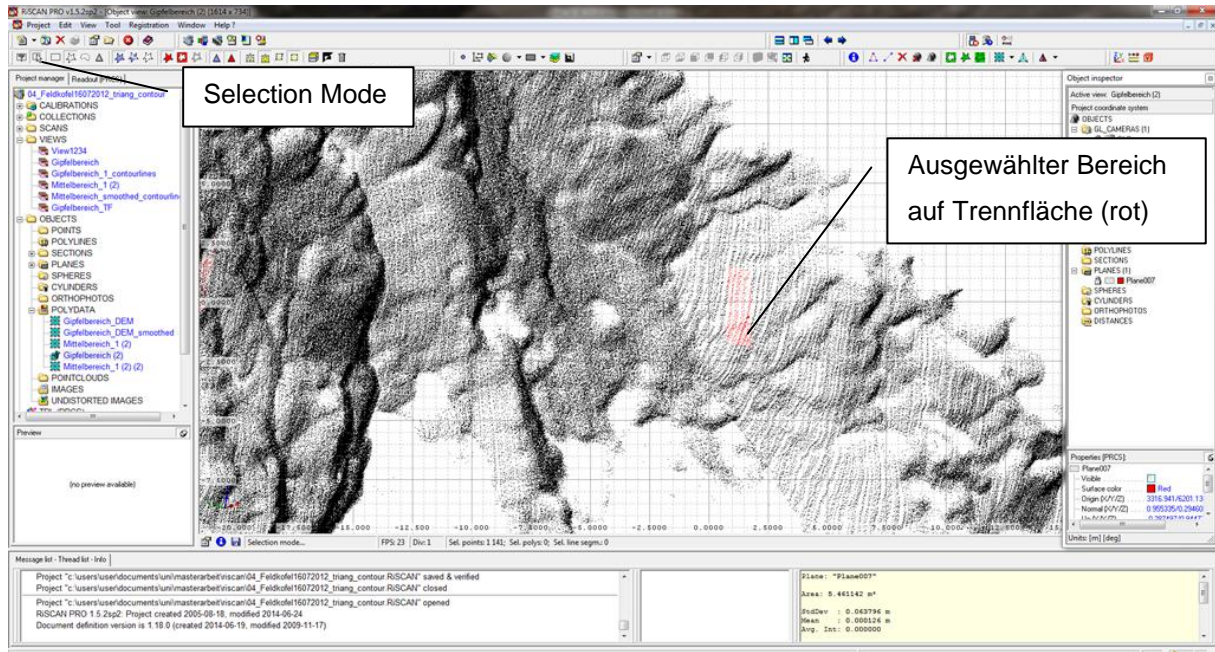


Abbildung 25: Markieren eines Bereiches der Trennfläche

2. Erstellen der Fläche:
Create new plane object from selected area - From selected area (limited)... (Abb.26)

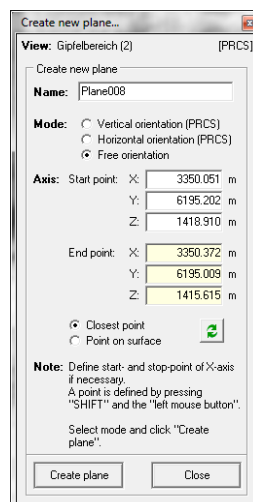


Abbildung 26: Erstellen der Trennfläche

3. Start- und Endpunkt mit gedrückter Shift-Taste wählen - Create plane (Abb. 27)

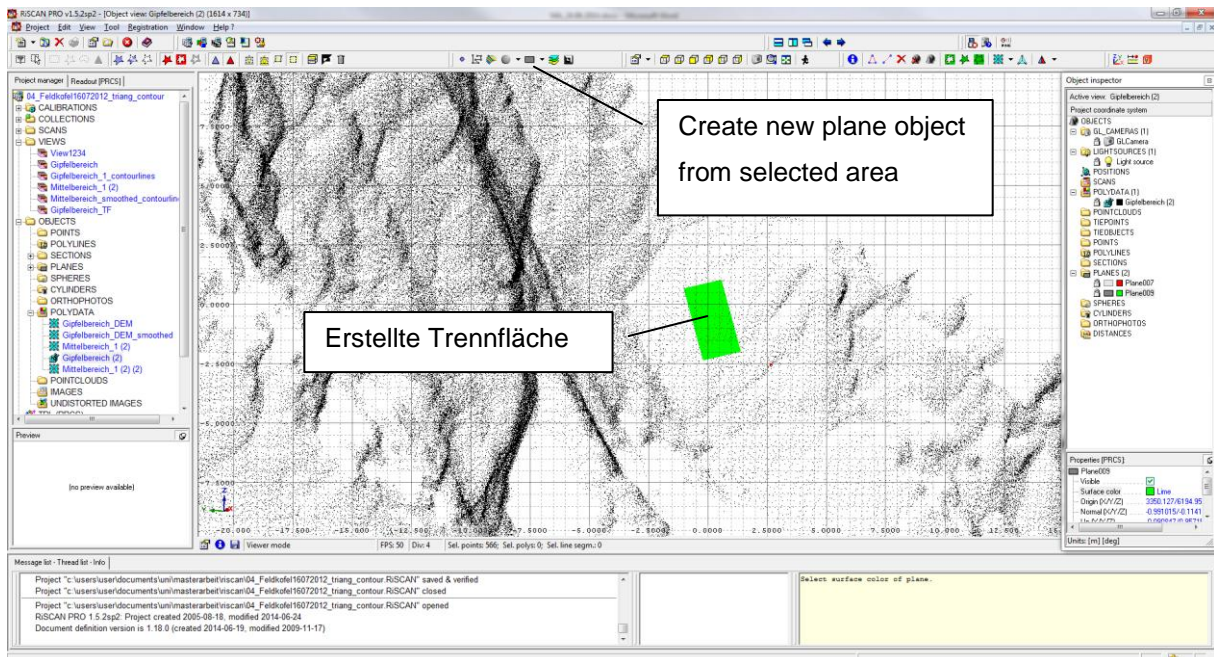


Abbildung 27: Erstellte Trennfläche

Die erstellten Trennflächen lassen sich beliebig einfärben und können mittels rechten Mausklick auf die Fläche durch die Funktion "Modify orientation and position..." (Abb.28) durch Translation und Rotation in ihrer Position und Orientierung verändert werden. Weiters können verschiedene Eigenschaften der Trennfläche, wie zB Einfallswinkel und Einfallrichtung, abgelesen werden.

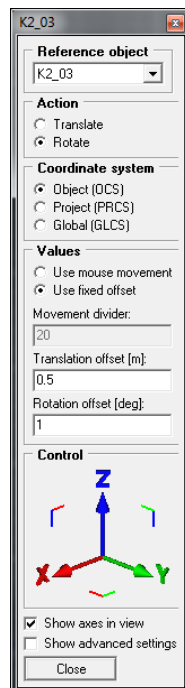


Abbildung 28: Veränderung von Position und Orientierung

5.3 Triangulieren

Durch die Operation Triangulieren wird aus einer Punktwolke ein "Mesh" erstellt. Dadurch werden Punkte miteinander verbunden und Löcher geschlossen. Durch das Triangulieren entsteht aus einer Punktwolke eine Oberfläche, bei der die Punktdaten durch Dreiecke miteinander verbunden werden. Triangulierte Daten (sogenannte "Meshs") zeigen eine bessere Darstellung des gescannten Objekts [RiSCAN PRO Help, version: 1.5.2sp2].

Um ein besseres Ergebnis zu erhalten, wird auf die Polydatei vorher die Filteroperation "Octree" angewandt. Dadurch wird die Anzahl der Punkte verringert. Anschließend wird eine Fläche erstellt, die etwa der Hangneigung entspricht. Danach wird die Operation "Plane triangulation" ausgeführt.

1. Auswahl der zu bearbeitenden Polydatei
2. Filter Data... - Octree (Abb.29)

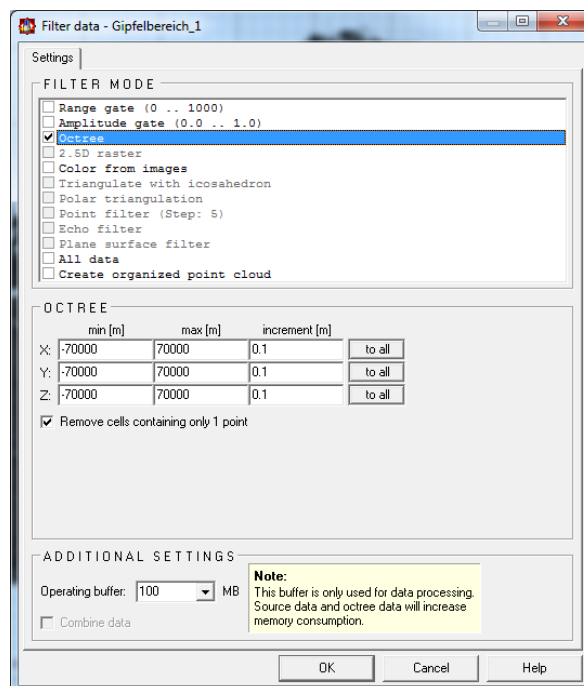


Abbildung 29: Filteroperation "Octree"

3. Fläche erstellen (ca. parallel Hangneigung) (Abb. 30)

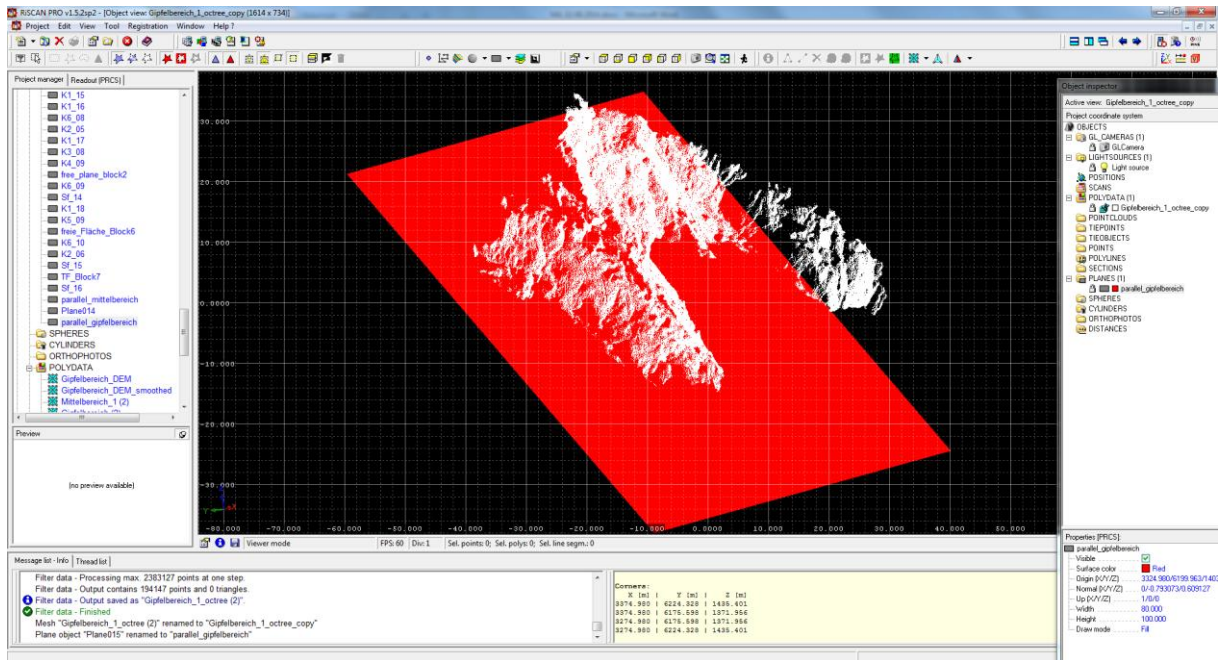


Abbildung 30: Erstellte Fläche

4. Alles markieren - Plane triangulation (Abb. 31)

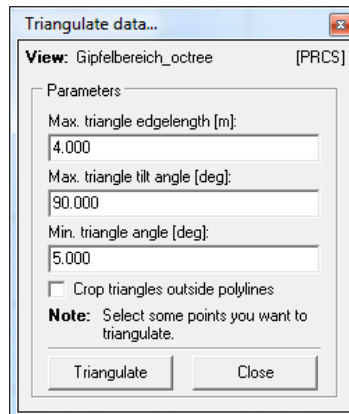


Abbildung 31: Punktwolke triangulieren

Abbildung 32 zeigt das Ergebnis nach der Triangulierung.

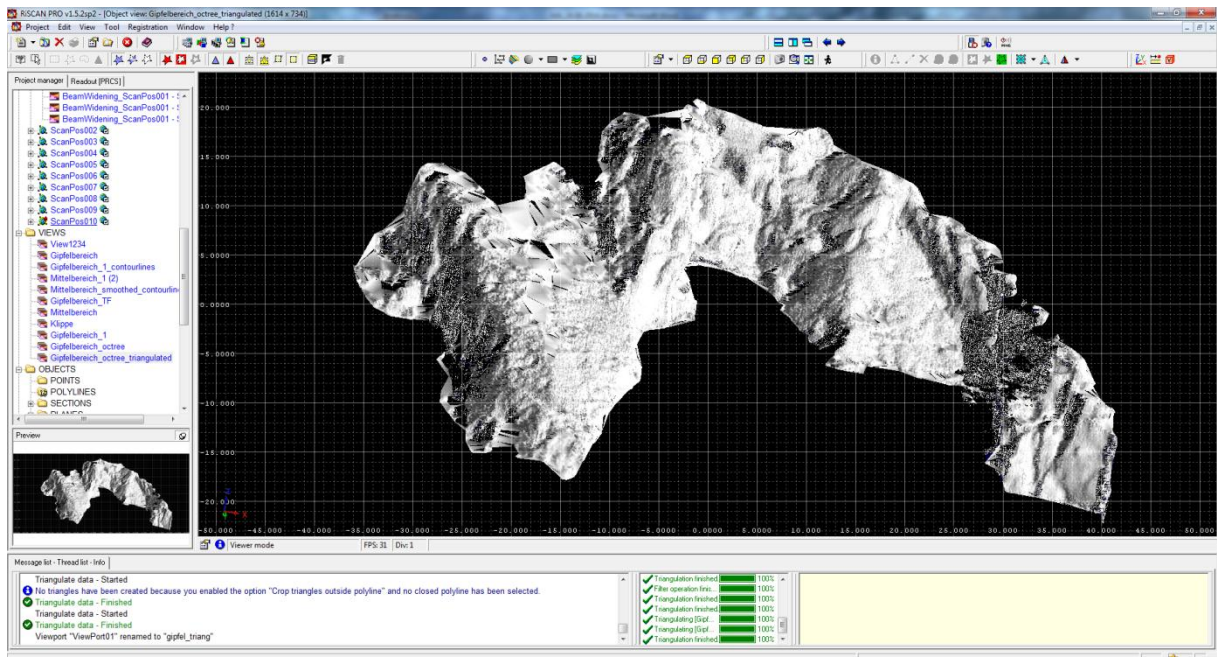


Abbildung 32: triangulierte Punktwolke

Zum Vergleich die Polydatei vor dem Triangulieren (Abb. 33)

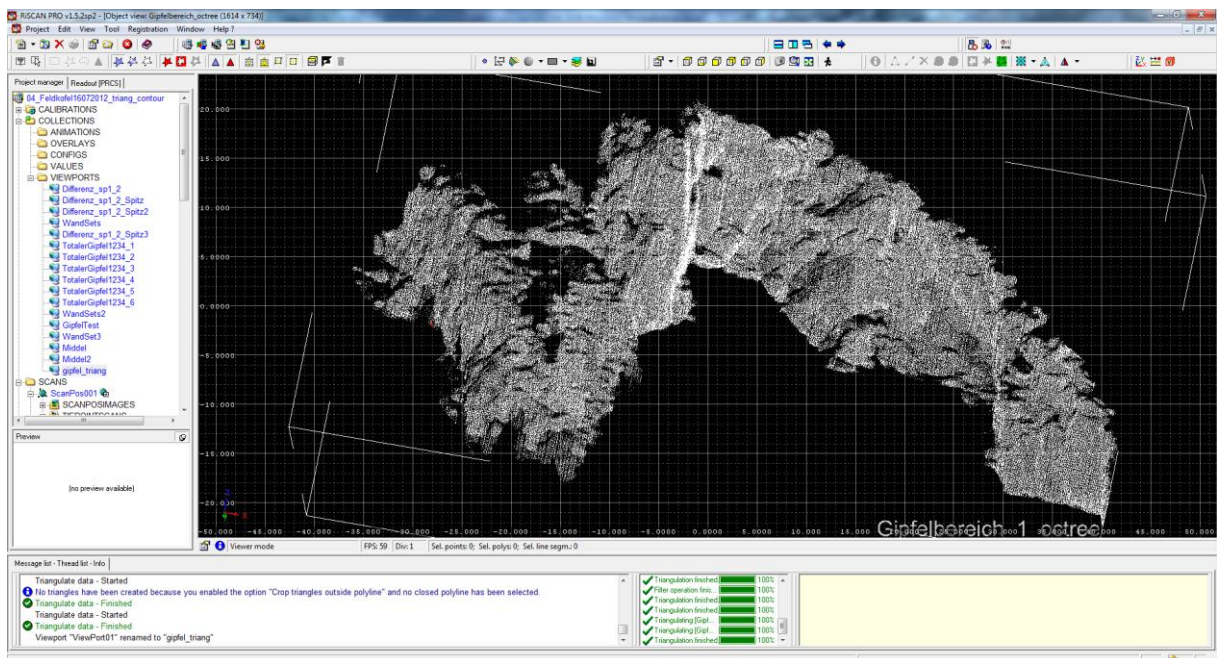


Abbildung 33: Punktwolke vor dem Triangulieren

5.4 Erstellen von Konturlinien

Um Konturlinien zu erstellen, benötigt man triangulierte Daten. Um ein besseres Ergebnis zu erhalten, wird vorher die Operation "smooth" ausgeführt. Vor dem Erstellen der Konturlinien werden zwei XY-Planes erstellt, die den gewünschten Bereich eingrenzen:

1. Rechter Mausklick auf das "Mesh" - Smooth and decimate (Abb.34)

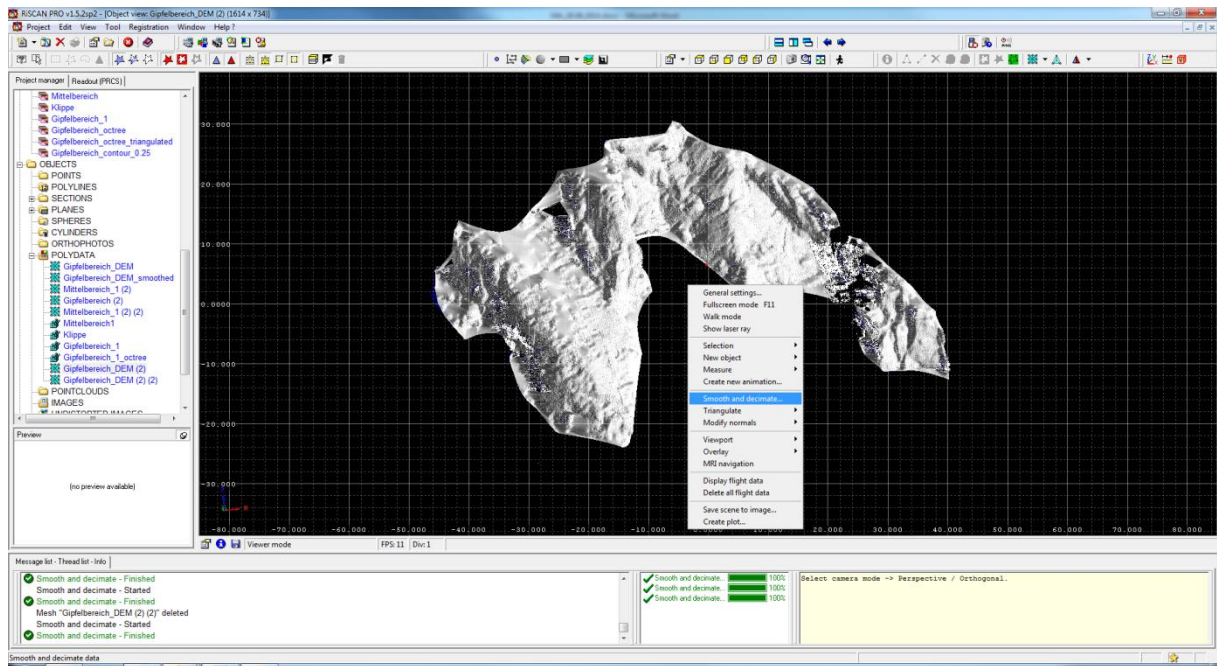


Abbildung 34: "Smooth and decimate" der triangulierten Daten

2. Die verschiedenen Parameter werden eingestellt (Abb.35):

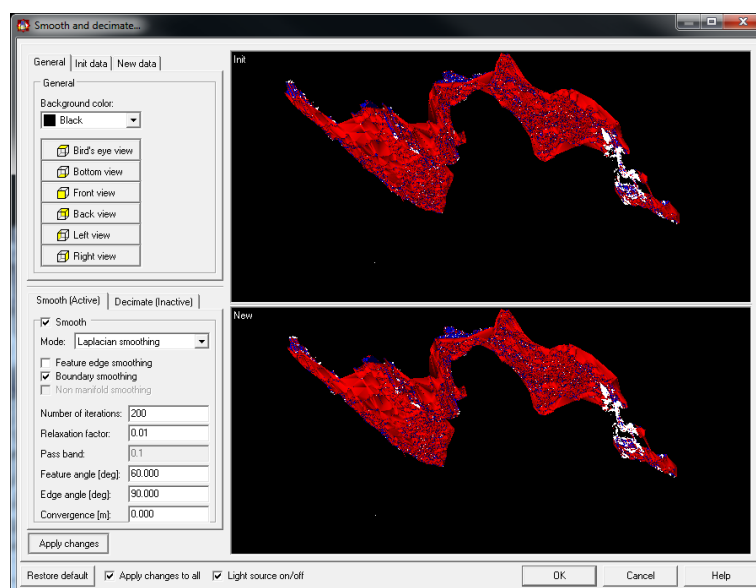


Abbildung 35: Einstellung der Parameter

3. Erstellen der Planes

Create new plane object - Co-planar with the xy-plane

Die z-Koordinate wird im Bereich "Readout" abgelesen (Abb. 36) und im Bereich "Object Inspector" eingestellt (Abb.37).

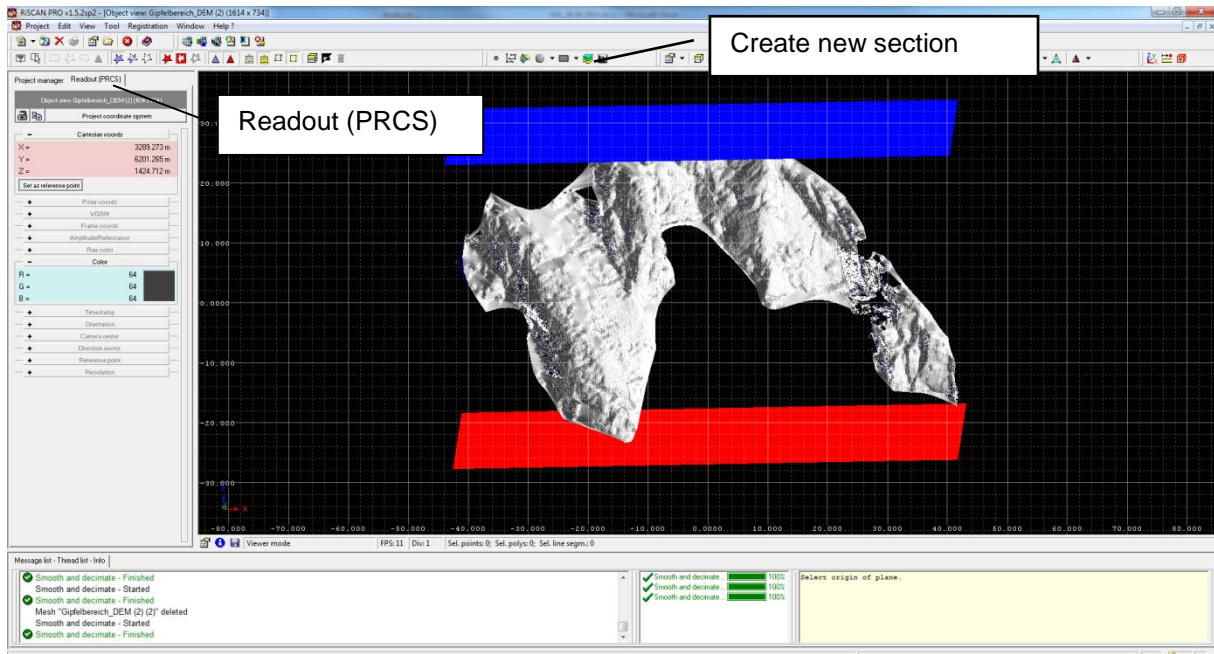


Abbildung 36: Erstellung der Flächen

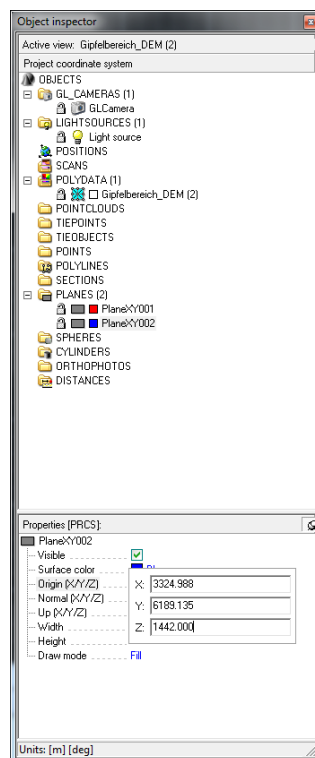


Abbildung 37: Eingabe der Koordinaten im "Object Inspector"

4. Create new section object (Abb.38)

Die zwei erstellten Planes werden markiert und die verschiedenen Parameter eingestellt.

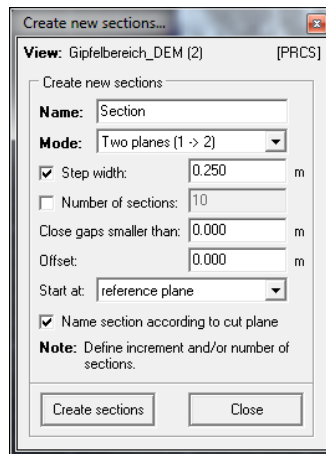


Abbildung 38: Erstellung der Höhenlinien

Abbildung 39 und Abbildung 40 zeigen den Gipfelbereich des Feldkofels mit Konturlinien in einem Abstand von 0,25 m. Abbildung 41 zeigt den Gipfelbereich mit Konturlinien in einem Abstand von 0,50 m.

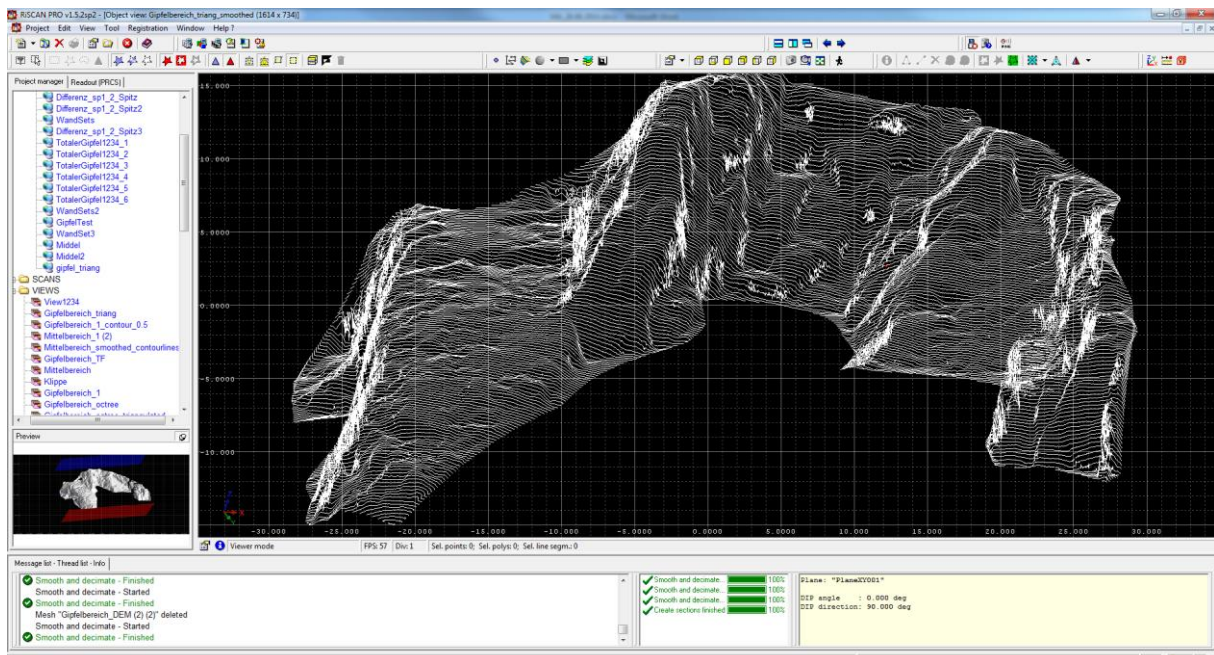


Abbildung 39: Gipfelbereich mit Konturlinien, Abstand: 0,25 m

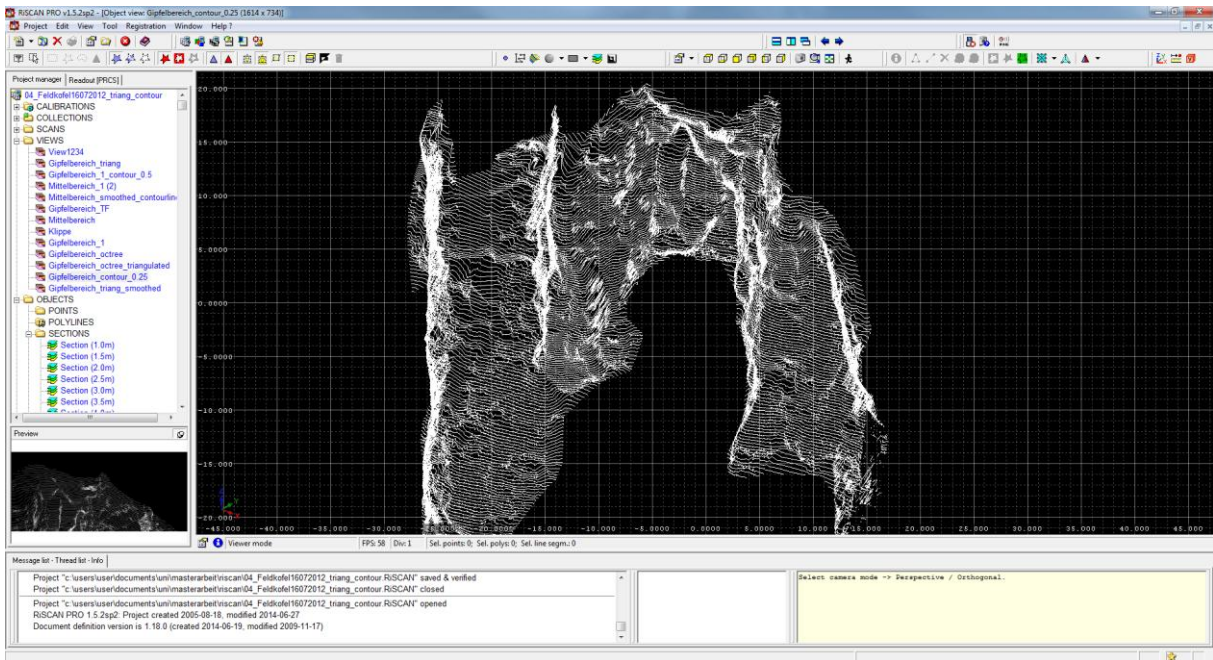


Abbildung 40: Gipfelbereich mit Konturlinien, Abstand 0,25 m

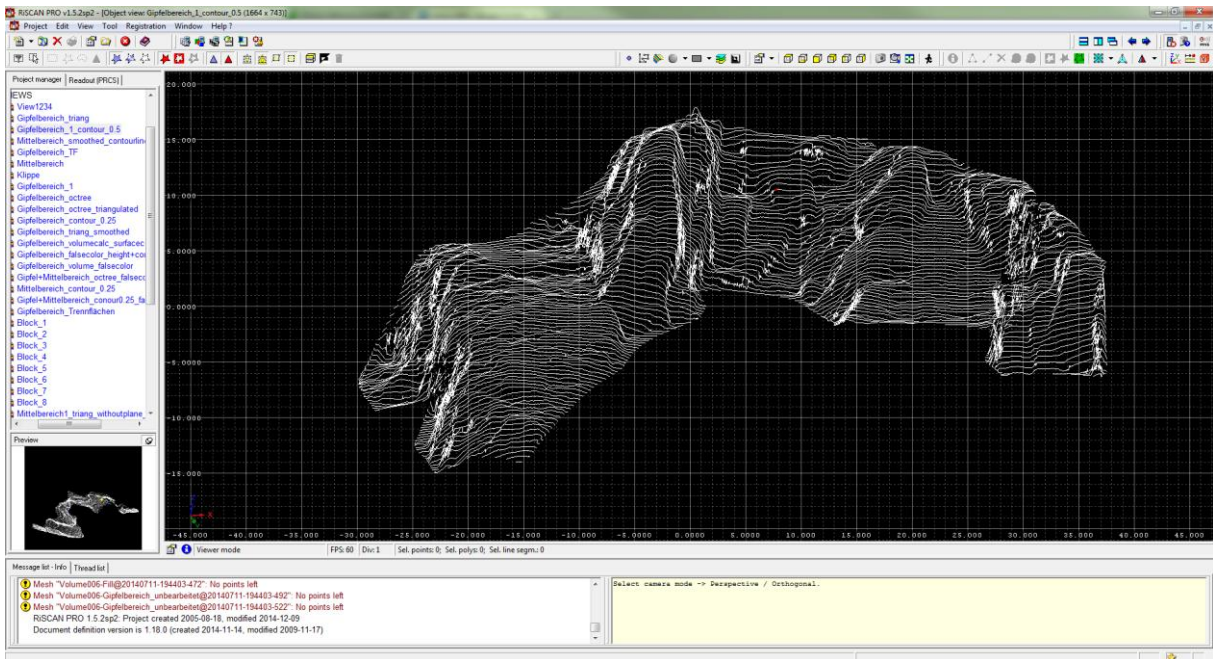


Abbildung 41: Gipfelbereich mit Konturlinien, Abstand 0,50 m

5.5 View Types

Punktwolken und Meshes lassen sich durch verschiedene Ansichtseinstellungen unterschiedlich darstellen. Durch "drag and drop" des Meshes oder der Punktwolke in den Object view -Bereich öffnet sich das Fenster "Edit view type..." (Abb. 42).

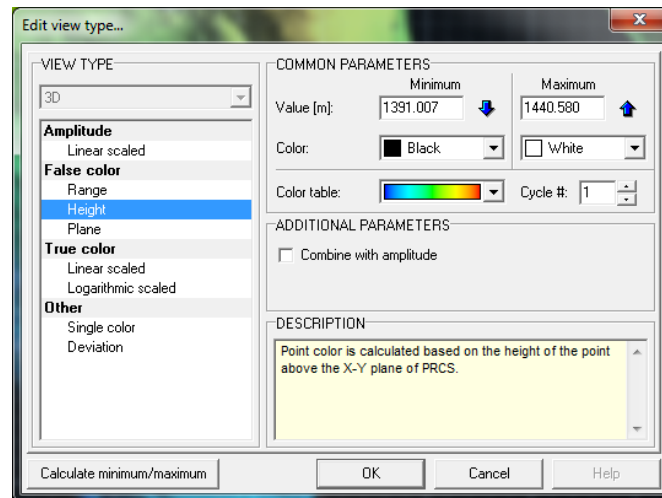


Abbildung 42: Auswahl der verschiedenen Ansichtseinstellungen

In Abbildung 43 wurde ein Mesh ausgewählt und die Ansicht False Color - Height gewählt.

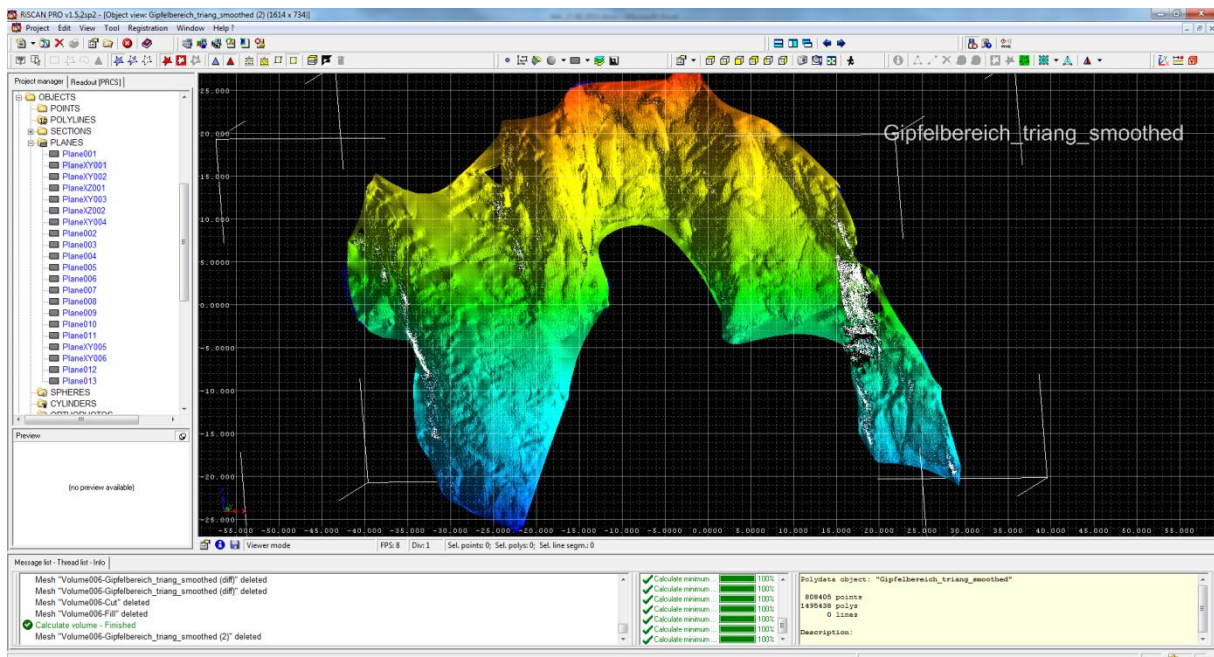


Abbildung 43: Darstellung "False Color - Height"

Abbildung 44 zeigt die Konturlinien mit dem Ansichtstyp "False Color - Height" kombiniert:

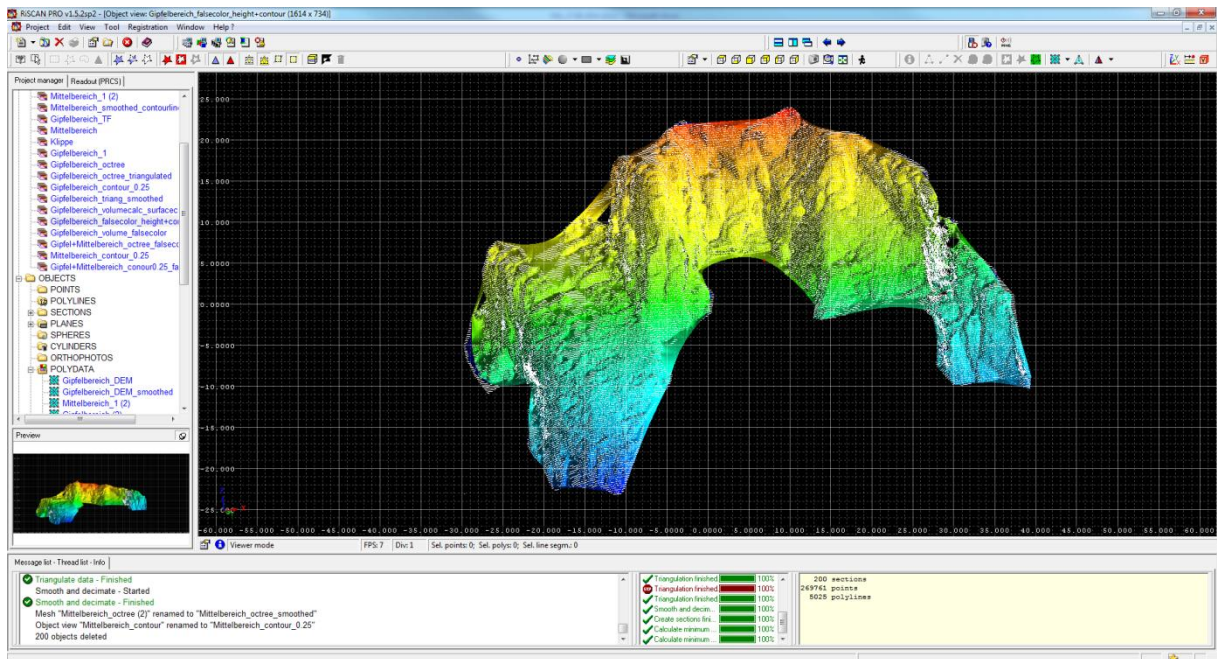


Abbildung 44: Darstellung "False Color - Height" kombiniert mit den Konturlinien (Abstand: 0,25 m)

6. Ergebnisse

6.1 Erstellung eines Kluffmodells

Durch den Einbau von Trennflächen lässt sich ein dreidimensionales Kluffmodell erstellen. Die Trennflächen werden in die unbearbeitete Punktwolke eingebaut. Um die Trennflächen eindeutig zu identifizieren, wird der Bereich mit Fotos abgeglichen.

Die einzelnen Kluffscharen können anschließend verschieden eingefärbt und somit sehr übersichtlich dargestellt werden. Weiters können einzelne Trennflächen bzw. ganze Kluffscharen ausgeblendet werden (Abb. 47).

Im Gipfelbereich des Feldkofels wurden neben der Bankung sechs verschiedene Kluffscharen identifiziert. Die Orientierungsdaten der Kluffscharen sind in Tabelle 7 aufgelistet.

Tabelle 7: Orientierungsdaten der Schieferung (Sf) und der sechs Kluffscharen (K1 - K6). (EW...Einfallswinkel; ER...Einfallsrichtung)

Sf			K1			K2			K3			K4			K5			K6		
	EW	ER		EW	ER		EW	ER		EW	ER		EW	ER		EW	ER		EW	ER
1	173	56	1	55	87	1	70	72	1	9	70	1	354	84	1	85	86	1	352	48
2	172	61	2	222	89	2	79	71	2	18	80	2	334	89	2	92	84	2	338	52
3	169	65	3	218	56	3	86	77	3	353	63	3	359	90	3	83	82	3	328	68
4	161	50	4	47	73	4	63	73	4	7	78	4	5	86	4	290	90	4	333	69
5	163	41	5	39	63	5	252	71	5	166	82	5	1	86	5	92	81	5	342	66
6	176	42	6	232	88	6	95	69	6	324	75	6	340	87	6	286	75	6	334	55
7	179	57	7	217	84				7	15	70	7	348	68	7	88	79	7	336	64
8	168	55	8	216	70				8	7	76	8	352	86	8	86	87	8	327	62
9	159	61	9	211	82							9	8	88	9	282	76	9	360	34
10	165	70	10	224	87							10	350	88				10	343	31
11	161	56	11	26	82													11	18	36
12	180	73	12	40	87													12	348	63
13	170	64	13	237	88													13	324	45
14	152	66	14	24	67															
15	148	71	15	21	80															
16	172	48	16	213	67															
17	157	39	17	235	88															
18	174	56	18	213	87															
19	168	35	19	236	54															
20	168	28	20	199	79															
21	167	27																		
22	156	59																		

Abbildung 45 und Abbildung 46 zeigen den Gipfelbereich mit den eingebauten Trennflächen.

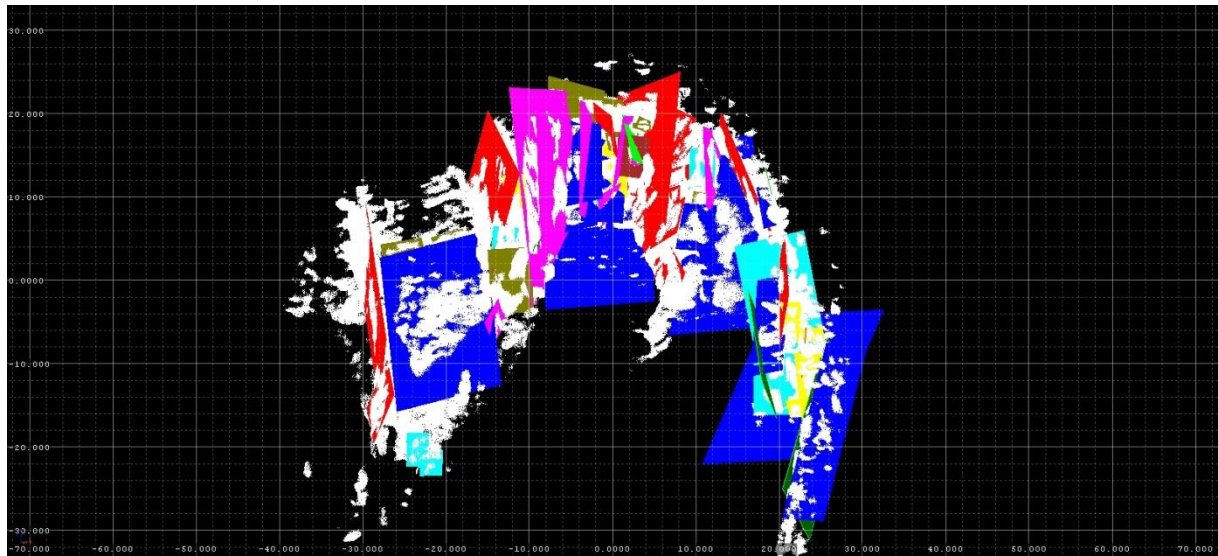


Abbildung 45: Gipfelbereich mit den eingebauten Trennflächen. Sf...blau, K1...rot, K2...grün, K3...gelb, K4...türkis, K5...rosa, K6...olivgrün

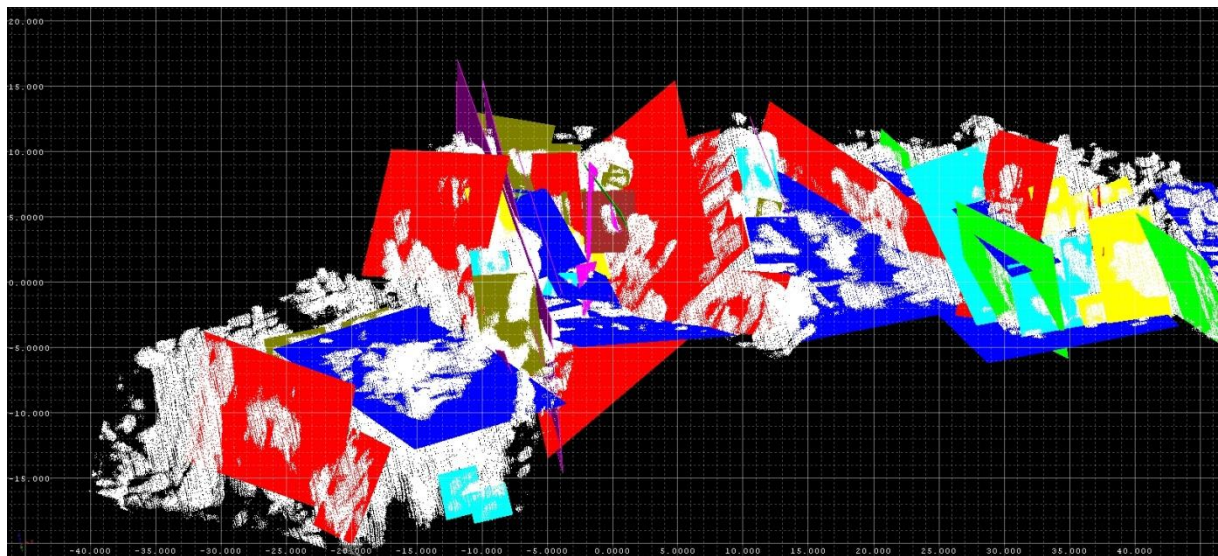


Abbildung 46: Gipfelbereich mit den eingebauten Trennflächen. Sf...blau, K1...rot, K2...grün, K3...gelb, K4...türkis, K5...rosa, K6...olivgrün

Abbildung 47 zeigt den Gipfelbereich mit Kluftschar 1.

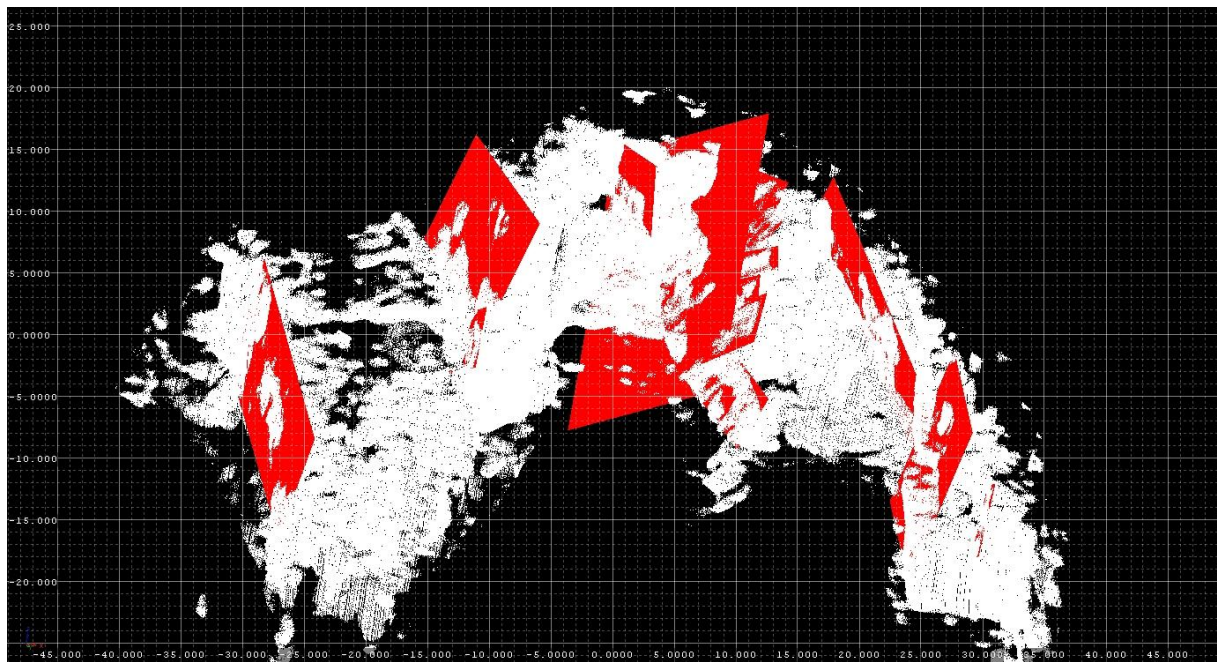


Abbildung 47: Gipfelbereich mit K1

Weitere Abbildungen des Kluftmodells und der einzelnen Kluftscharen befinden sich im Anhang.

6.2 Block Theorie

6.2.1 Theorie

Die Block Theorie [nach Goodman & Shi] stellt eine Methode dar, um ablösbare Blöcke (removable blocks) zu identifizieren, mögliche Versagensmechanismen festzustellen und die Blockstabilität abzuschätzen. Blöcke, die am ehesten ablösbar sind, werden als „key blocks“ bezeichnet [George, 2012].

Die grundlegenden Annahmen bei der Block Theorie sind folgende:

- Alle Trennflächen sind komplett planar.
- Die Trennflächen sind komplett durchgehend und erstrecken sich über das gesamte betrachtete Gebiet.
- Die Blöcke werden als starr angenommen. Das heißt, Blockdeformation bzw. Blockverzerrung werden nicht berücksichtigt.
- Die Trennflächen und freien Flächen werden als Inputparameter festgelegt.

[Goodman, Shi, 1985]

Bei n Trennflächen existieren 2^n Blöcke [Liu, 2012]. Zum Beispiel existieren bei drei unterschiedlich orientierten Trennflächen (J1, J2, J3) acht verschiedene Blockformen ($2^3 = 8$). Die durch natürliche Trennflächen abgegrenzten Blöcke werden als „Joint Pyramids“ bezeichnet und werden durch einen Code identifiziert. Der Code gibt an, auf welcher Seite der Trennfläche sich der Block befindet, d.h. ob ein Block über oder unter einer Trennfläche liegt. Zum Beispiel bedeutet der Code 001, dass der Block über Trennfläche 1, über Trennfläche 2 und unter Trennfläche 3 liegt. Mit Hilfe der stereographischen Projektion können die Großkreise der Trennflächenscharen geplottet werden. Dadurch wird das Stereonetz in Bereiche unterteilt, die die einzelnen "Joint Pyramids" anzeigen. Bei einer "lower hemisphere" Projektion liegt alles, das innerhalb eines Großkreises einer bestimmten Trennfläche plottet, unter der Trennfläche, während ein Plot außerhalb des Großkreises oberhalb liegt.

Die "Joint Pyramid (JP)" eines ablösbaren Blocks liegt zur Gänze in der "Space Pyramid (SP)", die durch eine oder mehrere freie Flächen definiert wird. Die freie Fläche ist im Grunde die Gesteins/Wasser oder Gesteins/Luft Grenzfläche, die die SP (der Raum, in den sich ein ablösbarer Block bewegt) von der "Excavation Pyramid (EP)" (der Raum, in dem der

Block liegt) trennt. Dabei wird angenommen, dass die freie Fläche sich planar über den gesamten betrachteten Bereich erstreckt [George, 2012].

Es werden mindestens vier Flächen benötigt, um einen potentiell instabilen Block zu formen. Dieser Block wird von Trennflächen und freien Flächen begrenzt. In der Blocktheorie werden folgende Begriffe verwendet:

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

[Weber, 2013]

Zusammenfassend lassen sich folgende Beziehungen aufstellen:

- BP ist die Schnittmenge von JP und EP:
 $BP = JP \cap EP$
- Ein Block ist nur finit, wenn gilt:
 $JP \cap EP = \emptyset$ ("JP ist kein Teil von EP")
- SP ist der Komplementärbereich zur EP:
 $SP = \sim EP$
- Daraus folgt, dass ein Block nur finit ist, wenn er komplett in der SP liegt:
 $JP \subset SP$

[Liu, 2012]

6.2.2 Vorgehensweise

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Block Theorie [nach Goodman & Shi] mit Hilfe verschiedener DOS-Programme, die von Herrn Prof. Dr. Liu programmiert wurden, angewandt (siehe Kapitel 3.2). Um mit diesen Programmen arbeiten zu können, wird Windows XP oder Windows 7 (32-bit) benötigt.

6.2.3 Identifizierung instabiler Blöcke und deren Versagensmechanismus

Zur Identifizierung instabiler Blöcke wurde das Programm "B02HPGL.EXE" benutzt. Zuerst wurde das Laserscanmodell mit den Fotos des Gipfelbereiches verglichen und potentiell instabile Blöcke gesucht. Anschließend wurden die Orientierungsdaten der Trennflächen und freien Flächen, die den Block begrenzen, notiert. Diese Orientierungsdaten (Einfallrichtung und Einfallswinkel) werden bei der Anwendung des Programms benötigt. Als Ergebnis werden die Großkreise der Trennflächen und freien Flächen geplottet und die „Joint Pyramid Codes“ angegeben. Anhand dieses Plots können potentiell instabile Blöcke und deren Versagensmechanismen festgestellt werden. Potentiell instabile Blöcke können daran erkannt werden, dass die "Joint Pyramid" komplett in der "Space Pyramid" enthalten ist.

Die identifizierten potentiell instabilen Blöcke wurden anschließend in das 3D-Laserscanmodell eingebaut und ortsgetreu dargestellt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden im Gipfelbereich des Feldkofels acht Blöcke anhand der Fotos und dem Laserscanmodell ausgewählt. Bei den Blöcken 1 bis 3 handelt es sich um bereits herausgebrochene Blöcke. Die Block Theorie wurde hier zu Testzwecken angewandt. Die Blöcke 4 bis 8 sind potentiell instabile Blöcke, die sich noch in der Felswand befinden.

Die identifizierten Blöcke wurden mit dem oben erwähnten DOS-Programm B02HPGL.EXE geplottet. Bei den Plots handelt es sich um .plt - Dateien, die anschließend mit dem Programm "SPLOT" als .hpg - Dateien exportiert werden. Danach können sie mit "Corel Draw" weiterbearbeitet und zB als .jpg - Datei exportiert werden.

Als Ergebnis erhält man Aussagen über Stabilität und Versagensmechanismen (zB Gleiten an einer Fläche, Keilversagen). Im Kapitel 6.3 werden diese Blöcke näher erläutert.

Der erste Plot zeigt die Großkreise der Trennflächen und der freien Fläche mit den zugehörigen "Joint Pyramid Codes". Der zweite Plot zeigt die Großkreise der Trennflächen und der freien Flächen, wobei die Zahlen Aufschluss über den Versagensmechanismus geben. So bedeutet zB die Zahl 23, dass beim Versagen (zB Keilversagen) die Trennflächen 2 und 3 beteiligt sind. Die Zahlen zwei und drei beziehen sich auf die Reihenfolge, in der die Orientierungsdaten der Trennflächen ins Programm eingegeben wurden.

Die "Joint Pyramids", die komplett innerhalb der "Space Pyramid" liegen und farblich markiert sind, stellen potentiell instabile Blöcke dar. Der violette Kreis in der Mitte des Plots stellt den Referenzkreis dar. Die unterbrochenen Kreise repräsentieren die freien Flächen, während die durchgezogenen Kreise die Trennflächen anzeigen. Der rote markierte Bereich zeigt die "Excavation Pyramid" (vgl. zB Abb. 50).

6.2.4 Bestimmung des JP- und EP-Codes

Ein Block wird durch Trennflächen und freien Flächen begrenzt. Der "half-space-code" setzt sich aus dem JP- und dem EP-Code zusammen. Der JP-Code zeigt die Position des Blockes in Bezug auf die Trennflächen, während sich der EP-Code auf die freien Flächen bezieht. Anhand von Block 7 (siehe Seite 89 ff.) möchte ich die Bestimmung des Codes näher erklären:

Block 7 besteht aus vier Trennflächen und einer freien Fläche. Die Form und Lage des Blockes bzw. der Trennflächen und der freien Fläche sind im Laserscanmodell und im Foto ersichtlich. Nun wird jede Trennfläche einzeln betrachtet und notiert, ob der Block über oder unter der Trennfläche liegt. Dazu muss auch die Einfallsrichtung der Trennflächen beachtet werden. Da für diese Arbeit die "lower hemisphere" Projektion herangezogen wird, bedeutet die Zahl 0, dass der Block über der Trennfläche liegt und die Zahl 1, dass der Block unter der Trennfläche liegt.

Für Block 7 ergibt sich daher folgender JP-Code:

- Block 7 liegt unter Trennfläche 1 ($039^{\circ}/63^{\circ}$) → 1
- Block 7 liegt über Trennfläche 2 ($172^{\circ}/45^{\circ}$) → 0
- Block 7 liegt unter Trennfläche 3 ($360^{\circ}/34^{\circ}$) → 1
- Block 7 liegt über Trennfläche 4 ($328^{\circ}/86^{\circ}$) → 0

Der JP-Code lautet daher 1010.

Um den EP-Code zu bestimmen, betrachtet man die freie Fläche:

- Block 7 liegt über der freien Fläche ($328^{\circ}/68^{\circ}$) → 0

Der EP-Code lautet daher 0.

Der Block im Laserscanmodell bzw. im Foto ist daher mit dem Code 1010 0 eindeutig identifiziert. Die Bestimmung der Codes für die anderen Blöcke funktioniert nach dem selben System.

6.2.5 Berechnung des Volumens

Die Berechnung des Volumens erfolgte mit dem DOS-Programm "B03HPGL.EXE", das von Herrn Prof. Dr. Liu programmiert wurde. Mit diesem Programm lässt sich zusätzlich die Form der Blöcke darstellen. Für die Volumsberechnung wurden die Trennflächenabstände im

Bereich der betreffenden Blöcke herangezogen. Die Trennflächenabstände wurden mit dem Programm "RiScan Pro" gemessen.

6.2.6 Bestimmung der Blocktypen

In der Blocktheorie werden fünf verschiedene Blocktypen unterschieden (Abb. 48 und Abb. 49). Ein "keyblock" ist ein potentiell instabiler, finiter und ablösbarer Block. Ein infiniter Block (Typ V) stellt keine Gefahr dar, solange er keine internen Brüche ausbildet. Er kann nicht vom Gebirge gelöst werden. Finite Blöcke werden unterteilt in ablösbare (Typ I, II, III) und nicht ablösbare Blöcke (Typ IV). Ein finiter Block, der eingeschlossen ist, ist nicht ablösbar (Typ IV). Die ablösbaren Blöcke werden in drei Klassen unterteilt. Ein Block Typ III hat im Bezug auf die resultierenden Kräfte eine vorteilhafte Orientierung - er bleibt auch ohne Reibungskräfte stabil. Ein Typ II - Block wird als potentiell instabil bzw. als "potentieller keyblock" bezeichnet. Er ist nur bei extrem geringen Reibungswiderständen auf den potentiellen Gleitebenen oder durch zu viel Auflast instabil. Ein richtiger "Keyblock" (Typ I) ist so ungünstig orientiert, dass er sich ohne Stützmaßnahmen sehr wahrscheinlich vom Gebirge lösen wird.

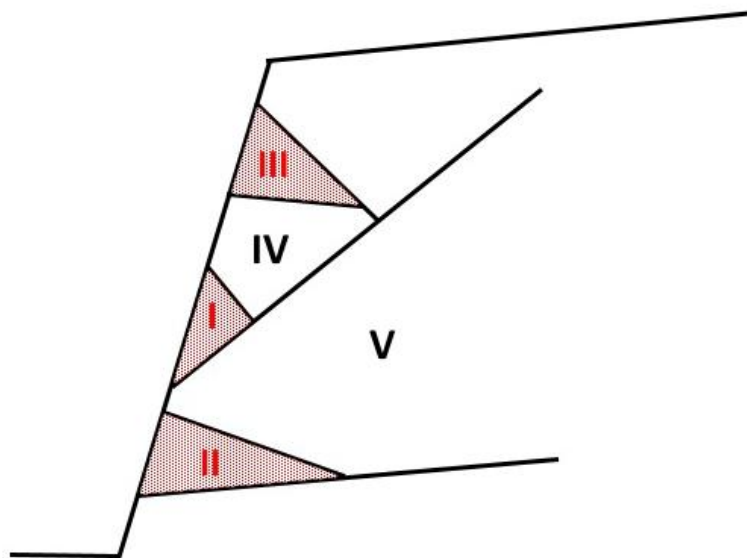


Abbildung 48: Darstellung der Blocktypen, nach [Liu, 2012]

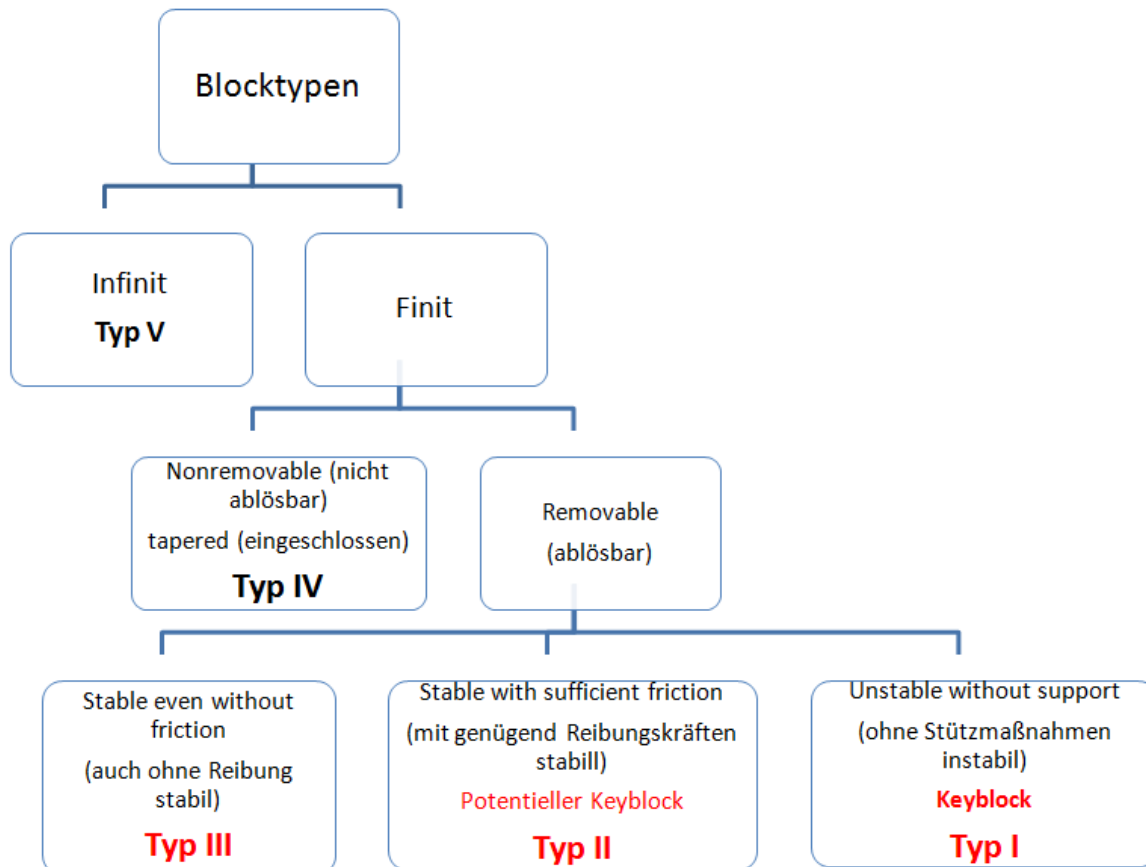


Abbildung 49: Einteilung der Blocktypen, nach [Liu, 2012]

Die Blocktypen werden mit dem DOS-Programm "B10HPGL.EXE" festgestellt. Durch die Berechnung der "sliding forces" werden mit diesem Programm die ablösbaren Blocktypen I, II und III unterschieden. Positive "sliding forces" kennzeichnen einen "Keyblock" (Typ I), der ohne Stützmaßnahmen instabil ist. Ein "potentieller Keyblock" (Typ II) wird durch negative "sliding forces" angezeigt. Bei einem Block Typ III fehlt der "movement mode".

Als Eingangsparameter werden neben den Orientierungsdaten der Trennflächen und freien Flächen auch die Reibungswinkel benötigt. Hier wurde ein Wert von 30° angenommen. Die Ergebnisse werden in Tabellen dargestellt, die sich im Anhang befinden.

6.2.7 Stabilitätsanalyse

Für eine Stabilitätsanalyse der Blocktypen I und II wurden die DOS - Programme "B11HPGL.EXE" und "B04HPGL.EXE" verwendet. Da die Blocktypen bereits bestimmt wurden, geht es bei dieser Stabilitätsanalyse vor allem darum, die Stabilität der Blöcke durch das Sicherheitsfaktorkonzept ("Factor of Safety") in Bezug auf den Reibungswinkel zu beurteilen.

Als Inputparameter werden die Orientierungsdaten der Trennflächen sowie der "Joint Pyramid Code" (= räumlicher Code eines Blockes, der ihn abgrenzt) benötigt. Als Ergebnis erhält man einen Plot, aus dem man den Reibungswinkel ablesen kann, der für die Stabilität des jeweiligen Blockes notwendig ist. Dieser Reibungswinkel wird auch als mobilisierter Reibungswinkel bezeichnet. Die Zahlen in der Projektion geben Aufschluss über den Versagensmechanismus, der bereits mit dem Programm "B02HPGL.EXE" bestimmt wurde. Der Reibungswinkel wird mit schwarzen unterbrochenen Linien dargestellt, wobei der Abstand zwischen zwei Linien 10° entspricht. Die äußerste Linie zeigt somit 10° an, die zweite 20° usw. Die Verschneidung zwischen dieser Linie mit einem roten Kreuz "+" markiert den mobilisierten Reibungswinkel. Das rote Kreuz zeigt die Richtung der resultierenden Kraft.

Der Sichterheitsfaktor (SF) wird mit der Formel $SF = \frac{\tan(\theta_a)}{\tan(\theta_m)}$ berechnet.

(θ_a = Angenommener Reibungswinkel; θ_m = Benötigter bzw. mobilisierter Reibungswinkel)

Für die Berechnung des Sicherheitsfaktor wurde ein Reibungswinkel von 30° angenommen. Daraus folgt: ist der benötigte Reibungswinkel für die Stabilität des Blockes größer als 30°, ist der Block instabil (FS < 1, Blocktyp I), ist der benötigte Reibungswinkel kleiner als 30°, befindet sich der Block in einem stabilen Zustand (FS > 1, Blocktyp II). Da der Reibungswinkel von 30° nicht im Labor gemessen wurde, sondern nur für die Berechnung angenommen wurde, weisen einige Keyblöcke einen SF > 1 auf. Für eine exakte Berechnung müsste man den Reibungswinkel der jeweiligen Gleitflächen im Labor bestimmen.

6.3 Blöcke

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse, Darstellungen und Grafiken der acht Blöcke behandelt. Für die bereits herausgebrochenen Blöcke 1 bis 3 liegen die freien Flächen sozusagen in der Luft und stellen eine gedachte Begrenzung dar. Die Trennflächen und freien Flächen der restlichen Blöcke konnten eindeutig anhand von Fotos und im Laserscanmodell identifiziert werden. Als Ergebnis der Blocktheorie erhält man meist mehrere "half-space-codes", die potentiell instabile Blöcke darstellen. Um den Code für den im Laserscan bzw. Foto dargestellten Block zu erhalten, muss man den richtigen JP- und EP-Code bestimmen. Zur Bestimmung der JP- und EP-Codes, siehe Kapitel 6.2.4.

6.3.1 Block 1

Tabelle 8 zeigt die Orientierungsdaten der beteiligten Trennflächen und freien Flächen:

Tabelle 8: Orientierungsdaten der Trennflächen und freien Flächen

Nr.	Name	Farbe	Einfallsrichtung	Einfallswinkel
1	Sf_08	Rot	168	55
2	K4_09	Gelb	008	88
3	K3_06	Blau	324	75
4	K5_01 (freie Fläche 1)	Grün	085	86
5	Sf_22 (freie Fläche 2)	Rosa	156	59
6	K6_13 (freie Fläche 3)	Olivgrün	324	45

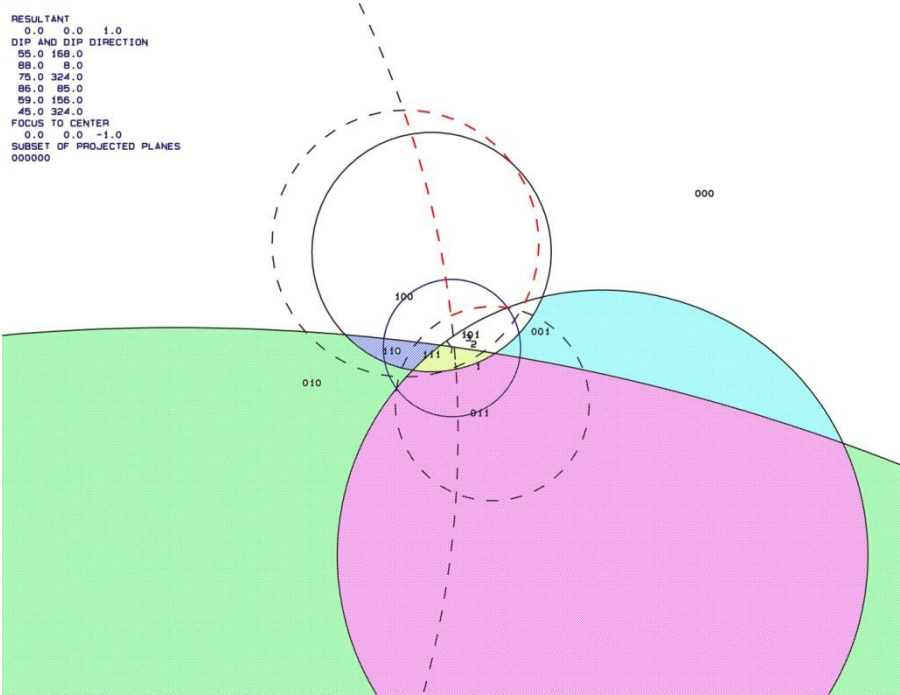
Tabelle 9 listet die "Joint Pyramid Codes" der Blöcke, die in der "Space Pyramid" (= außerhalb des rot markierten Bereiches) liegen, sowie deren "Sliding Mode" und Blocktyp auf.

Tabelle 9: JP-Codes, Sliding Mode und Blocktyp

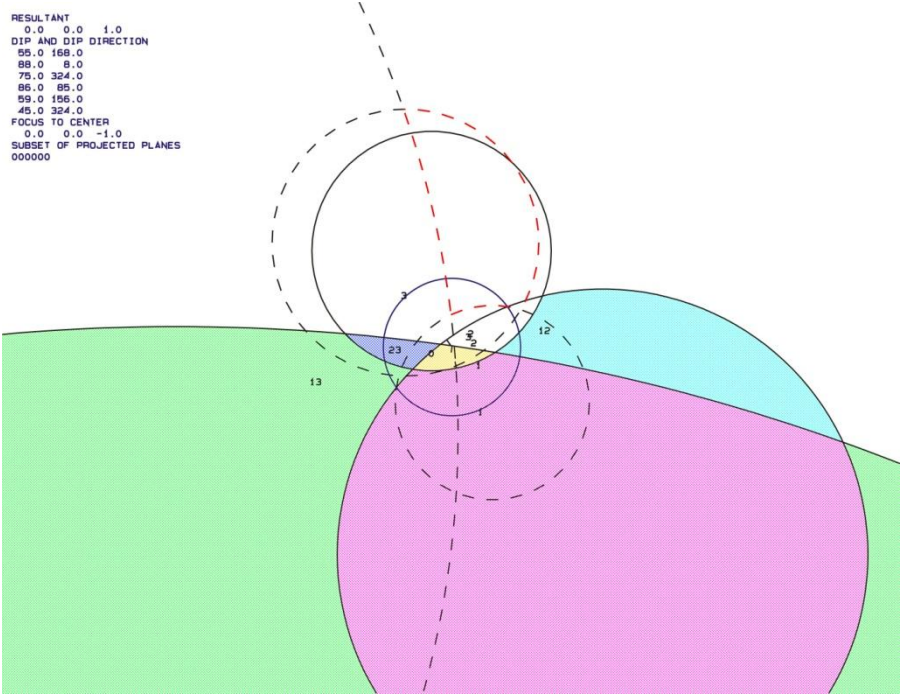
JP-Code	Sliding Mode	Blocktyp
010	13	II
110	23	I
111	0	I
001	12	II
011	1	I

EP-Code: 010

Die folgenden zwei Plots (Abb. 50 a und b), die mit dem Programm "B02HPGL.EXE" erstellt wurden, zeigen die Großkreise der Trennflächen und freien Flächen. Die farblich markierten Bereiche stellen potentiell instabile Blöcke dar.



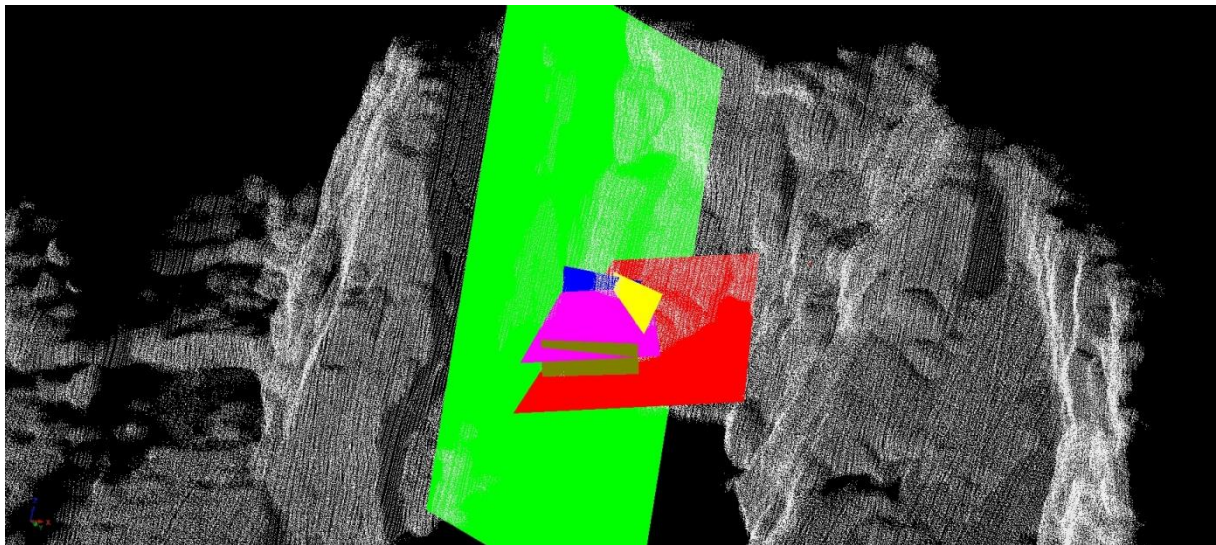
a)



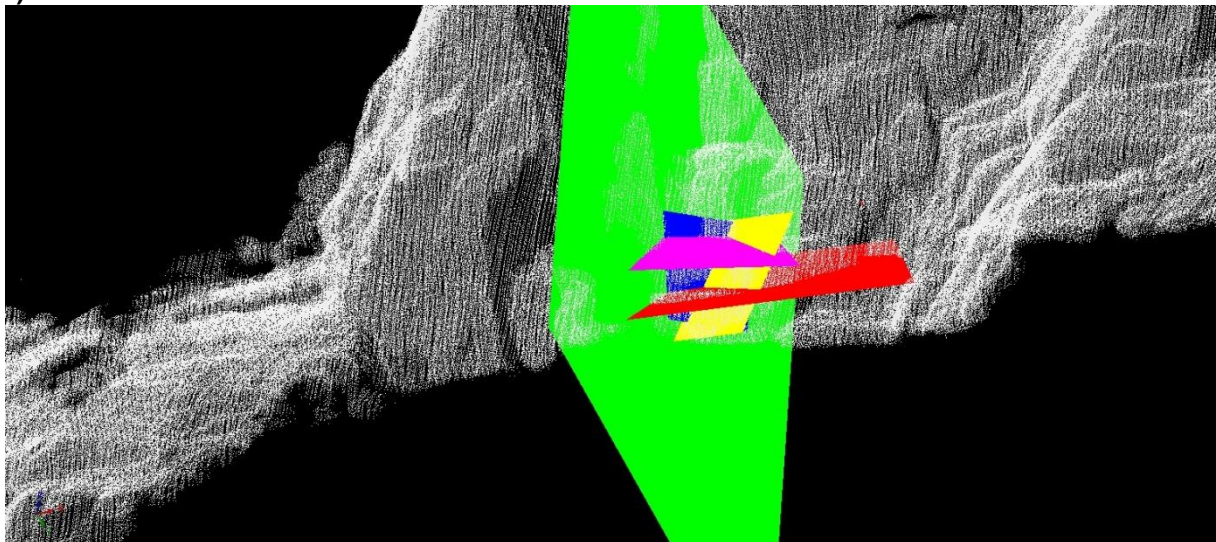
b)

Abbildung 50 a und b: Großkreise der Trennflächen und freien Flächen; a) mit den "JP Codes" b) mit den Versagensmechanismen

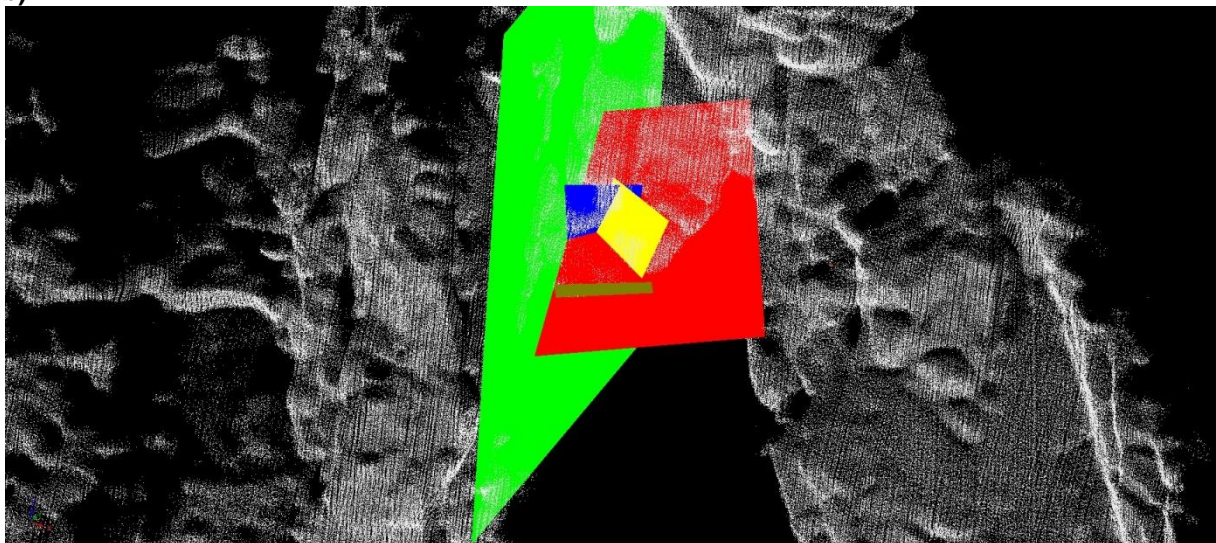
Abbildung 51 a bis c zeigen den Block "011∩010" im Laserscanmodell. Abbildung 52 zeigt den Block eingezeichnet in einem Foto.



a)



b)



c)

Abbildung 51 a bis c: Darstellung des Blockes "011∩010" im Laserscanmodell



Abbildung 52: Darstellung des Blockes "0110010" anhand eines Fotos. Die Trennflächen sind farblich markiert.

Berechnung des Volumens:

Die Berechnung des Volumens erfolgte mit dem Programm "B03HPGL.EXE". Tabelle 10 listet die Trennflächenabstände im Bereich des Blockes sowie das berechnete Volumen auf.

Tabelle 10: Trennflächenabstände und berechnetes Volumen des Blockes

Trennflächenabstände:		
Trennfläche 1	Rot	1,0 m
Trennfläche 2	Gelb	1,0 m
Trennfläche 3	Blau	1,5 m
Freie Fläche 1	Grün	1,5 m
Freie Fläche 2	Rosa	1,0 m
Freie Fläche 3	Olivgrün	1,5 m
Volumen: 22,4 m³		

Abbildung 53 a bis c zeigen die Form des Blockes "011∩010", die mit dem Programm "B03HPGL.EXE" erstellt wurde.

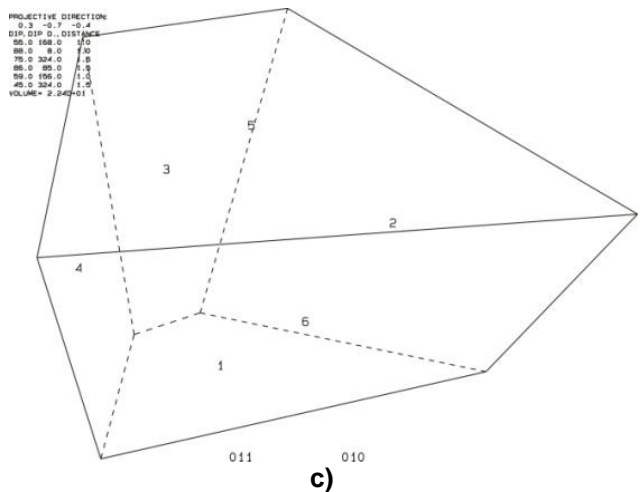
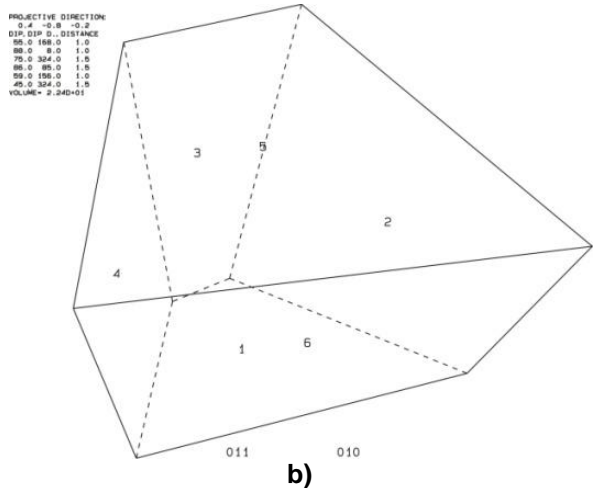
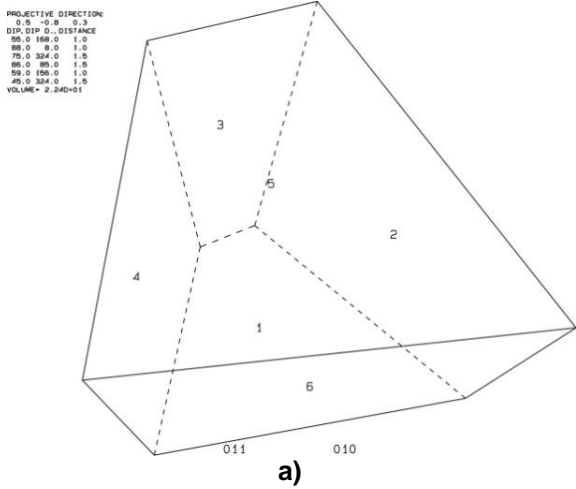


Abbildung 53 a bis c: dreidimensionale Darstellung des Blockes "011∩010"

Stabilitätsanalyse:

Abbildung 54 zeigt die dreidimensionale Stabilitätsanalyse für den Block "011". Die schwarz unterbrochenen Linien stellen den Reibungswinkel im Abstand von 10° dar; das rote Plus "+" markiert den benötigten Reibungswinkel, bei dem sich der Block in einem Gleichgewichtszustand befindet bzw. ab dem der Block stabil ist. Die Resultate für die restlichen Blöcke befinden sich im Anhang. Tabelle 11 listet die Ergebnisse der Stabilitätsanalyse auf. Zur Berechnung des Sicherheitsfaktors, siehe Kapitel 6.2.7.

Tabelle 11: Ergebnisse der Stabilitätsanalyse

JP - Code	Blocktyp	Benötigter Reibungswinkel	Angenommener Reibungswinkel	Sicherheitsfaktor
011	I	50°	30°	0,48

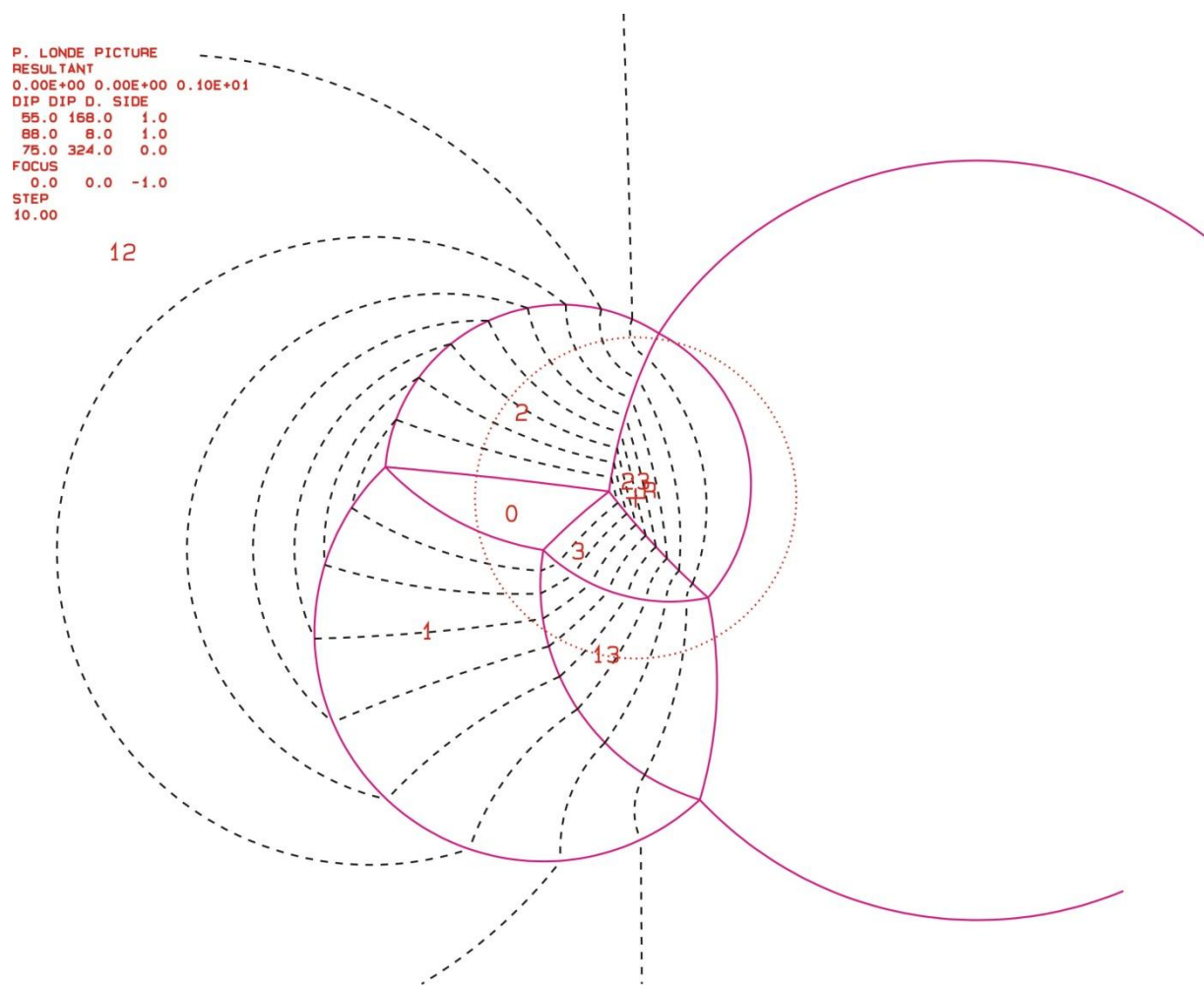


Abbildung 54: Projektion für JP "011"; der benötigte Reibungswinkel für einen Gleichgewichtszustand ist mit einem roten + markiert

6.3.2 Block 2

Tabelle 12 zeigt die Orientierungsdaten der beteiligten Trennflächen und freien Flächen:

Tabelle 12: Orientierungsdaten der Trennflächen und freien Flächen

Nr.	Name	Farbe	Einfallsrichtung	Einfallswinkel
1	K1_04	Rot	047	73
2	Sf_03	Grün	169	65
3	K6_12	gelb	348	63
4	K4_02 (freie Fläche 1)	Türkis	334	89
5	Sf_21 (freie Fläche 2)	Rosa	167	67
6	K5_05 (freie Fläche 3)	Blau	092	81

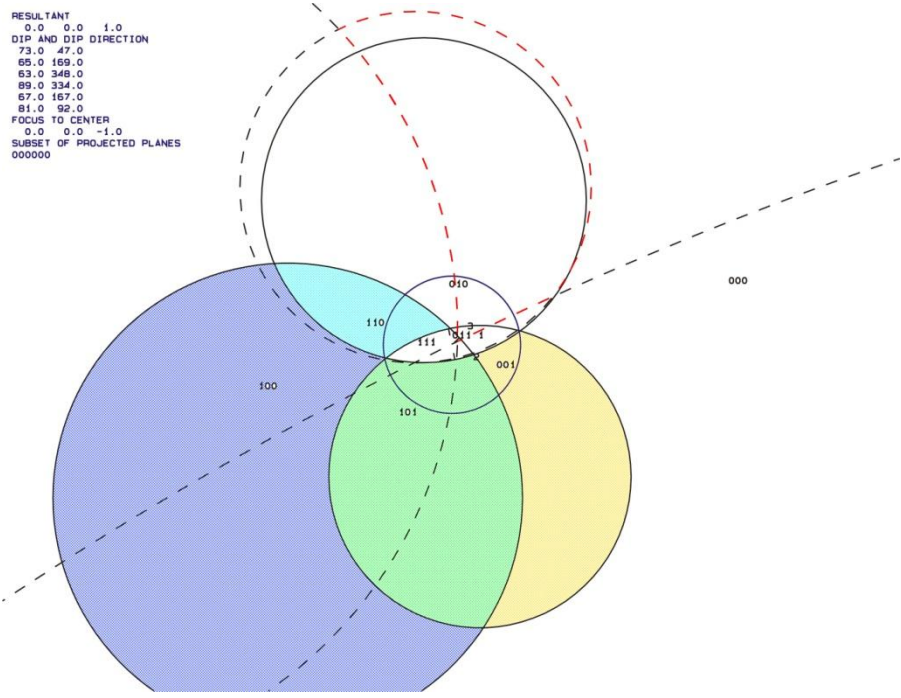
Tabelle 13 listet die "Joint Pyramid Codes" der Blöcke, die in der "Space Pyramid" (= außerhalb des rot markierten Bereiches) liegen, sowie deren "Sliding Mode" und Blocktyp auf.

Tabelle 13: JP-Codes, Sliding Mode und Blocktyp

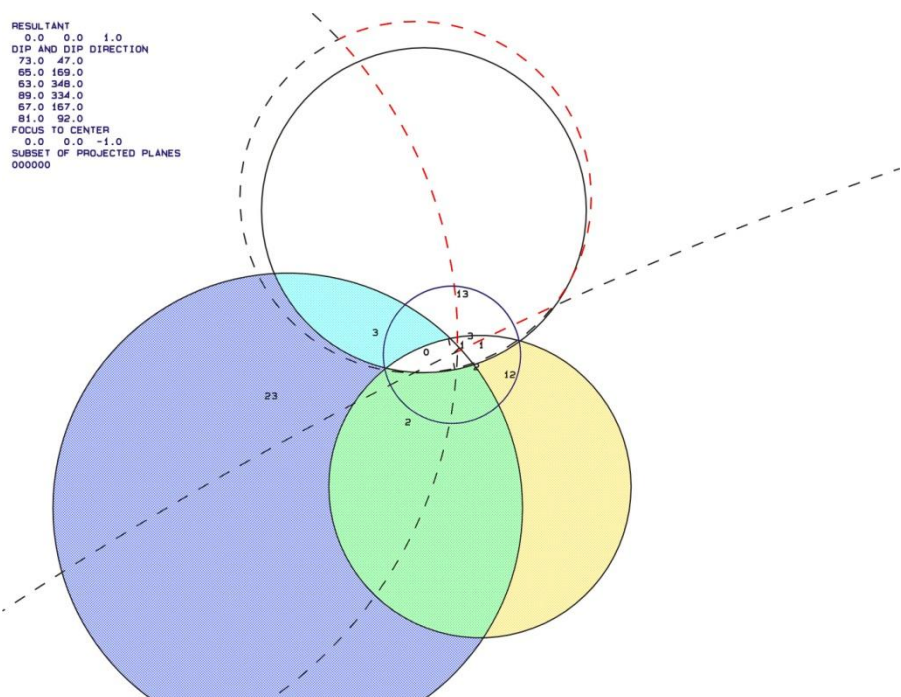
JP-Code	Sliding Mode	Blocktyp
001	12	I
100	23	II
110	3	I
101	2	I

EP - Code: 010

Die folgenden zwei Plots (Abb. 55 a und b), die mit dem Programm "B02HPGL.EXE" erstellt wurden, zeigen die Großkreise der Trennflächen und freien Flächen. Die farblich markierten Bereiche stellen potentiell instabile Blöcke dar.



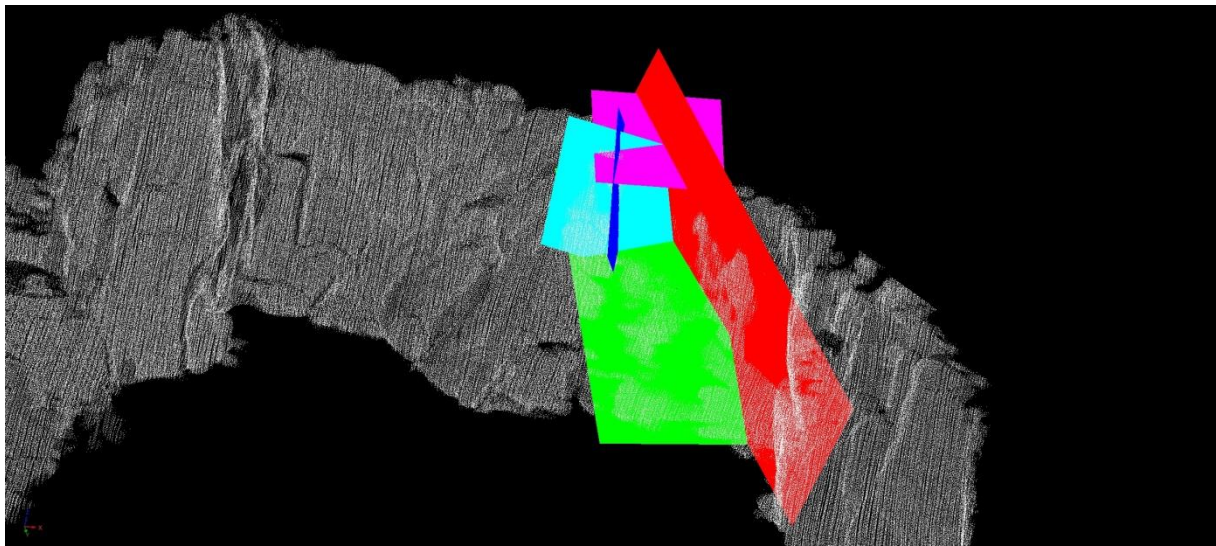
a)



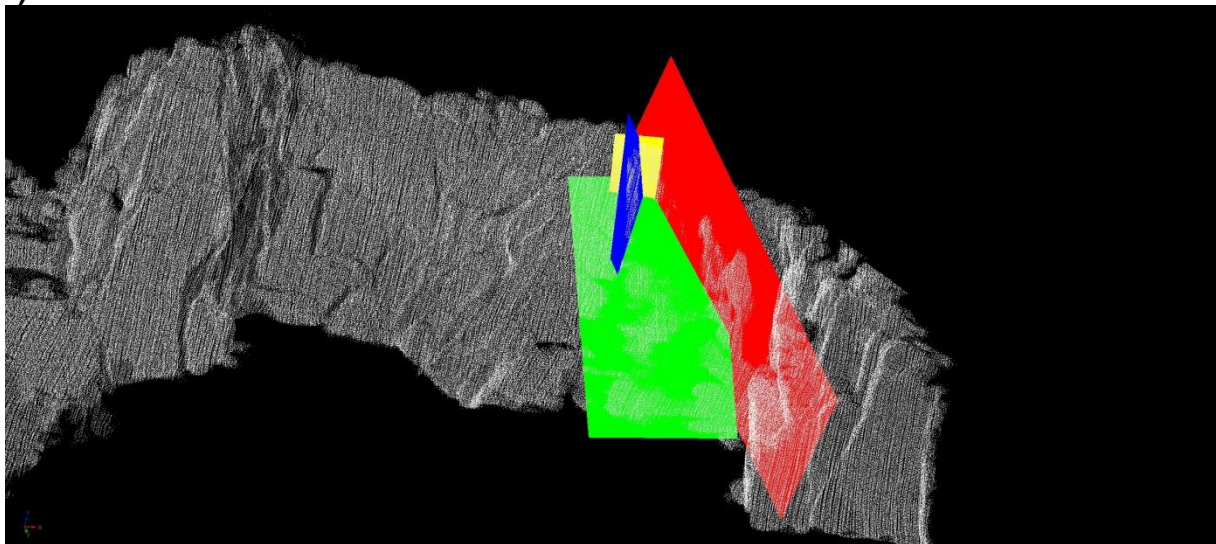
b)

Abbildung 55 a und b: Großkreise der Trennflächen und freien Flächen; a) mit den "JP Codes" b) mit den Versagensmechanismen

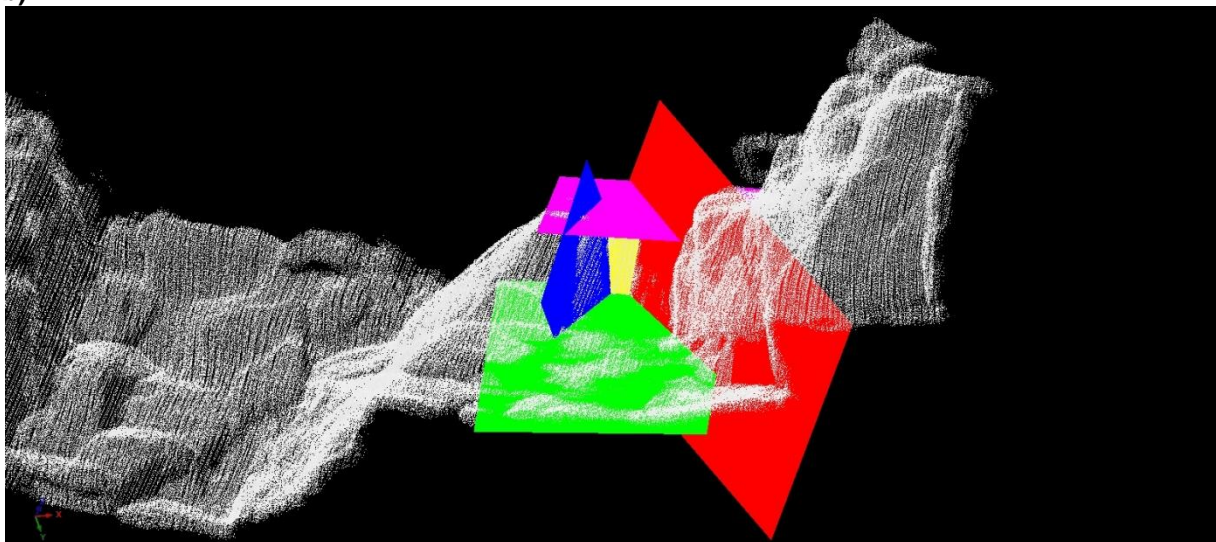
Abbildung 56 a bis c zeigen den Block "101∩010" im Laserscanmodell. Abbildung 57 zeigt den Block eingezeichnet in einem Foto.



a)



b)



c)

Abbildung 56 a bis c: Darstellung des Blockes "101∩010" im Laserscanmodell



Abbildung 57: Darstellung des Blockes "1010010" anhand eines Fotos. Die Trennflächen sind farblich markiert.

Berechnung des Volumens:

Die Berechnung des Volumens erfolgte mit dem Programm "B03HPGL.EXE". Tabelle 14 listet die Trennflächenabstände im Bereich des Blockes sowie das berechnete Volumen auf.

Tabelle 14: Trennflächenabstände und berechnetes Volumen des Blockes

Trennflächenabstände:		
Trennfläche 1	Rot	1,3 m
Trennfläche 2	Grün	1,0 m
Trennfläche 3	Gelb	1,8 m
Freie Fläche 1	Türkis	1,8 m
Freie Fläche 2	Rosa	1,0 m
Freie Fläche 3	Blau	1,2 m
Volumen: 37,3 m³		

Abbildung 58 a bis c zeigen die Form des Blockes "101∩010", die mit dem Programm "B03HPGL.EXE" erstellt wurde.

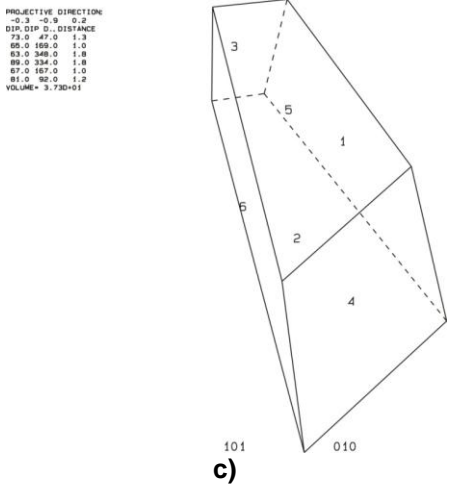
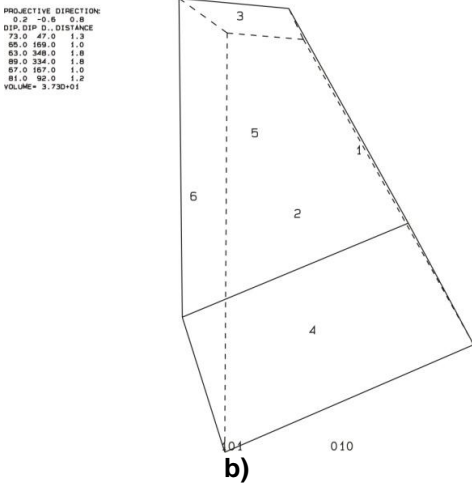
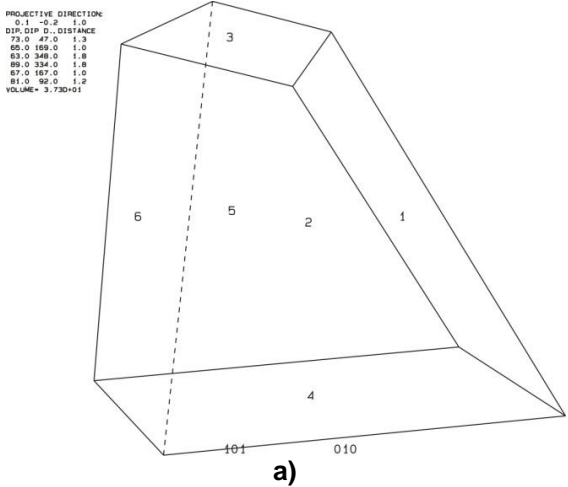


Abbildung 58 a bis c: dreidimensionale Darstellung des Blockes "101∩010"

Stabilitätsanalyse:

Abbildung 59 zeigt die dreidimensionale Stabilitätsanalyse für den Block "001". Die schwarz unterbrochenen Linien stellen den Reibungswinkel im Abstand von 10° dar; das rote Plus "+" markiert den benötigten Reibungswinkel, bei dem sich der Block in einem Gleichgewichtszustand befindet bzw. ab dem der Block stabil ist. Die Resultate für die restlichen Blöcke befinden sich im Anhang. Tabelle 15 listet die Ergebnisse der Stabilitätsanalyse auf.

Tabelle 15: Ergebnisse der Stabilitätsanalyse

JP - Code	Blocktyp	Benötigter Reibungswinkel	Angenommener Reibungswinkel	Sicherheitsfaktor
001	I	55°	30°	0,40

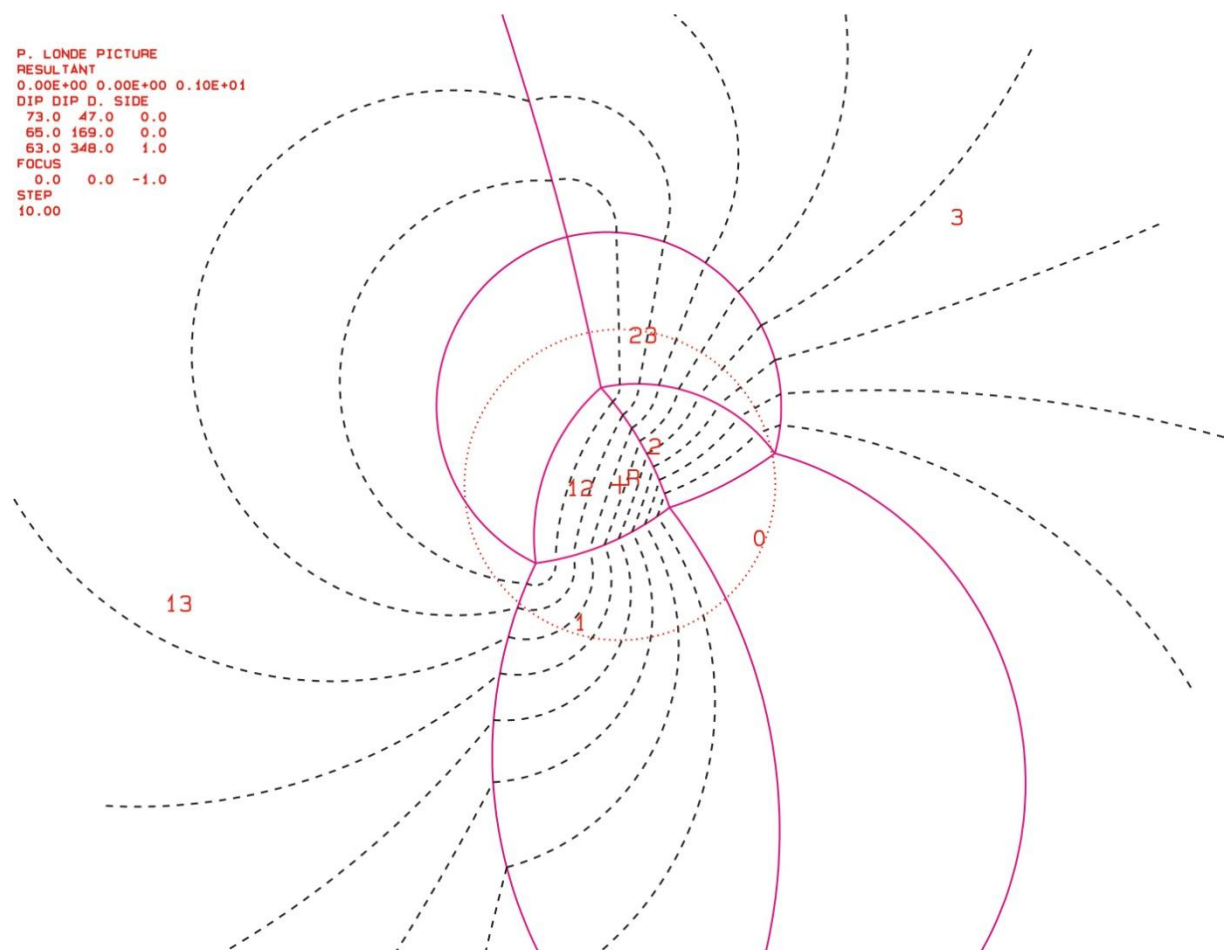


Abbildung 59: Projektion für JP "001"; der benötigte Reibungswinkel für einen Gleichgewichtszustand ist mit einem roten + markiert

6.3.3 Block 3

Tabelle 16 zeigt die Orientierungsdaten der beteiligten Trennflächen und freien Flächen:

Tabelle 16: Orientierungsdaten der Trennflächen und freien Flächen

Nr.	Name	Farbe	Einfallsrichtung	Einfallswinkel
1	Sf_07	Rot	179	57
2	K1_17	Grün	235	88
3	K4_08	Blau	352	86
4	K4_01 (freie Fläche 1)	gelb	354	84
5	K2_01 (freie Fläche 2)	Türkis	70	72
6	Sf_18 (freie Fläche 3)	Rosa	174	56

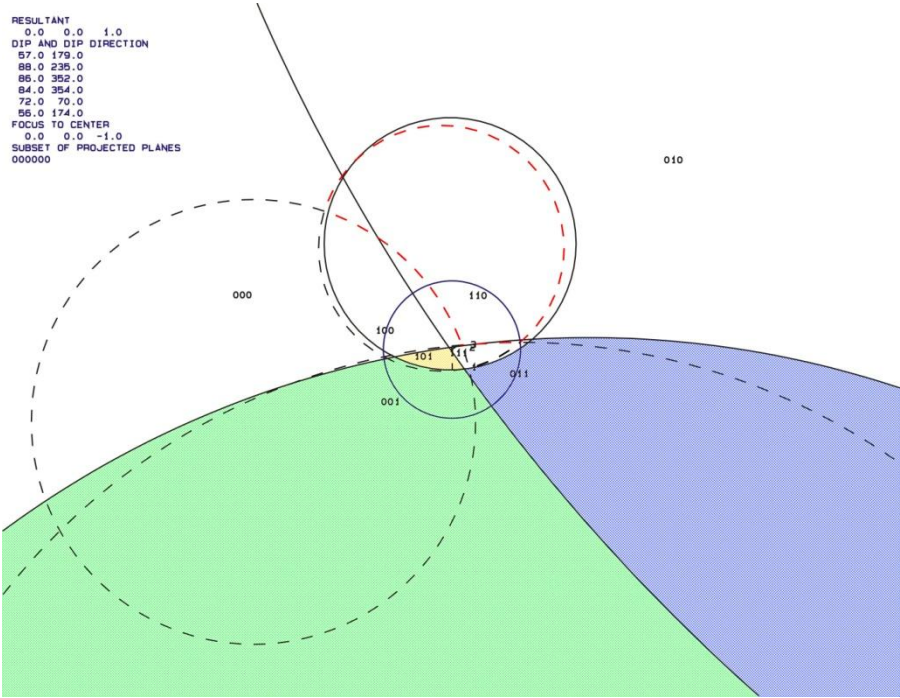
Tabelle 17 listet die "Joint Pyramid Codes" der Blöcke, die in der "Space Pyramid" (= außerhalb des rot markierten Bereich) liegen, sowie deren "Sliding Mode" und Blocktyp auf.

Tabelle 17: JP-Codes, Sliding Mode und Blocktyp

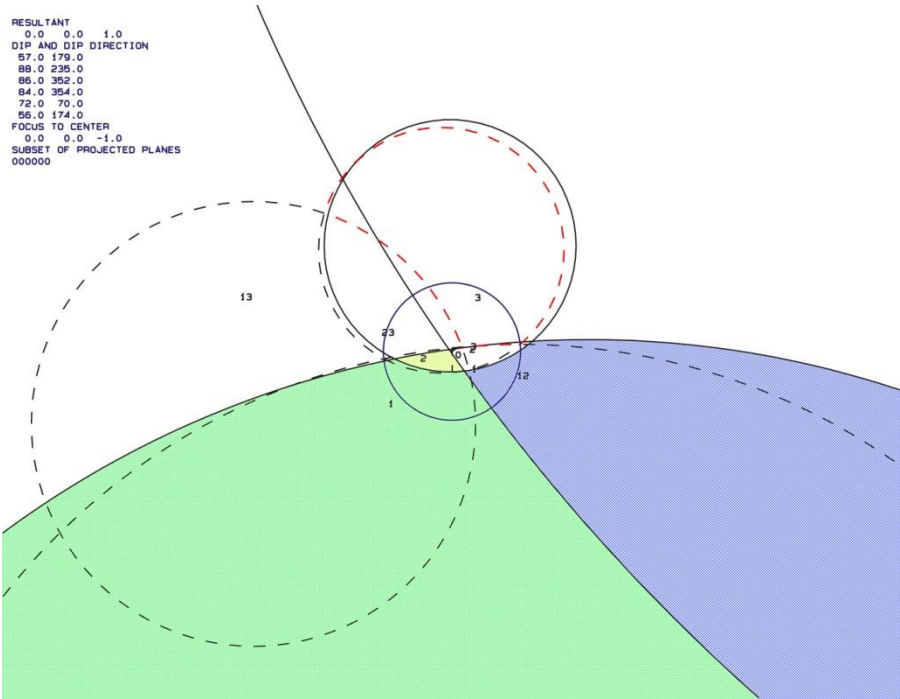
JP-Code	Sliding Mode	Blocktyp
001	1	I
011	12	I
101	2	I

EP-Code: 001

Die folgenden zwei Plots (Abb. 60 a und b), die mit dem Programm "B02HPGL.EXE" erstellt wurden, zeigen die Großkreise der Trennflächen und freien Flächen. Die farblich markierten Bereiche stellen potentiell instabile Blöcke dar.



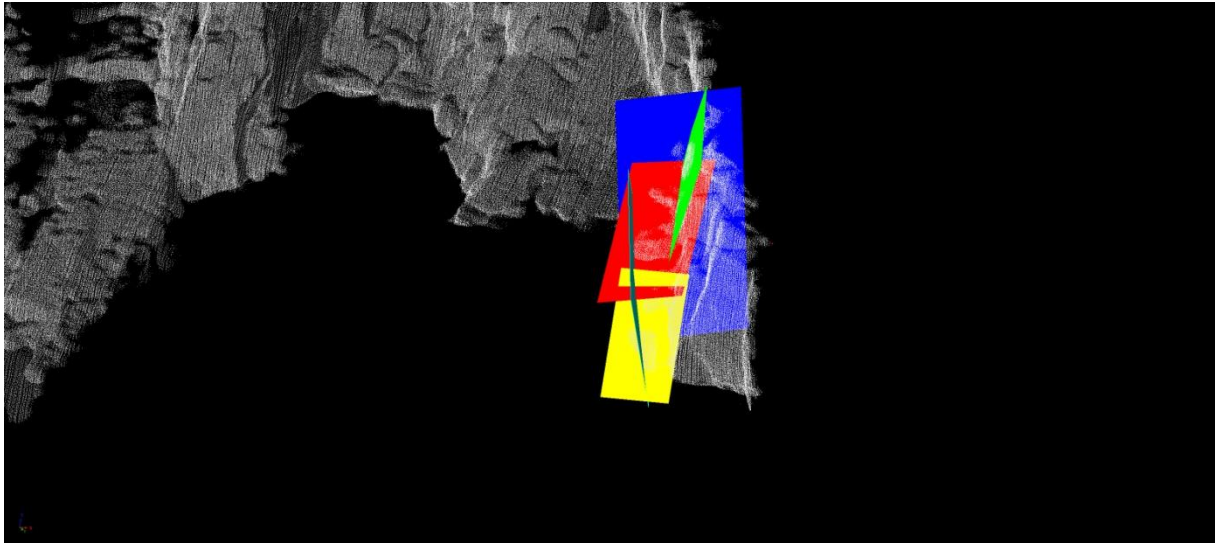
a)



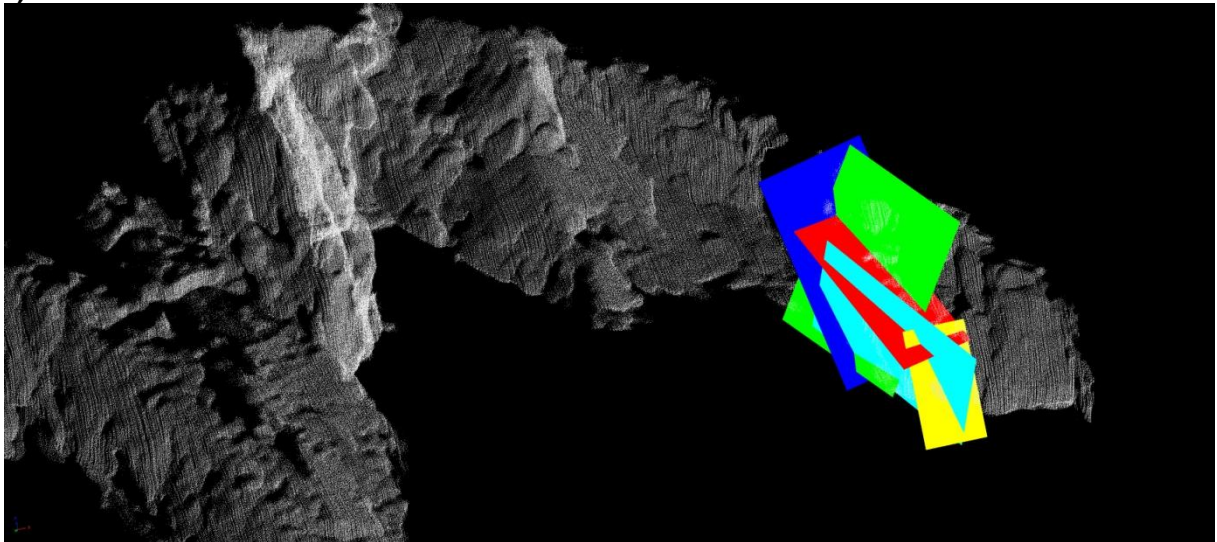
b)

Abbildung 60 a und b: Großkreise der Trennflächen und freien Flächen; a) mit den "JP Codes" b) mit den Versagensmechanismen

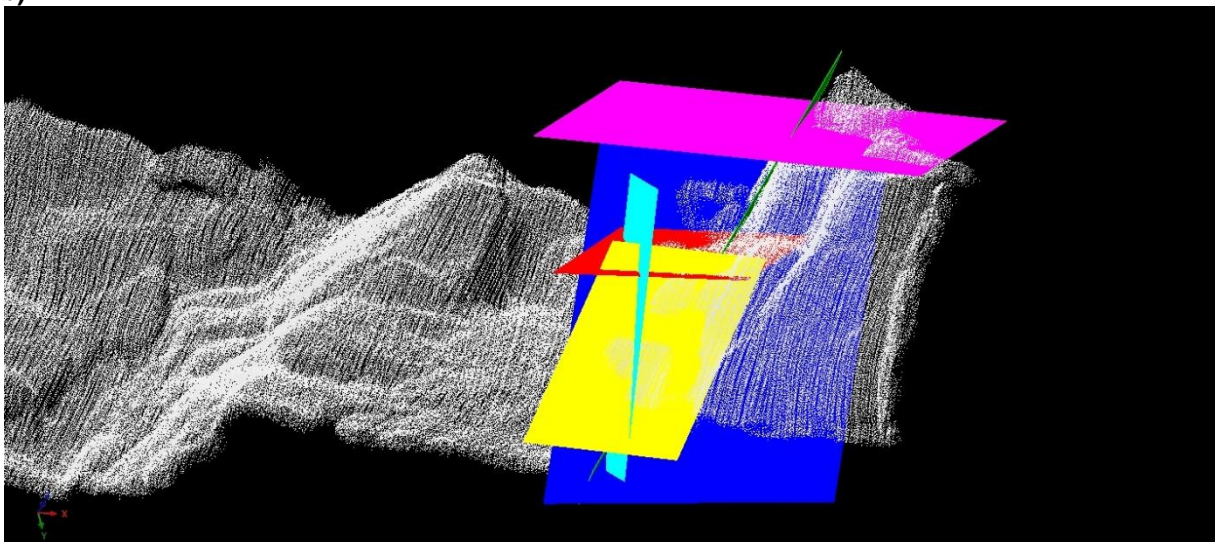
Abbildung 61 a bis c zeigen den Block "001∩001" im Laserscanmodell. Abbildung 62 zeigt den Block eingezeichnet in einem Foto.



a)



b)



c)

Abbildung 61 a bis c: Darstellung des Blockes "001∩001" im Laserscanmodell



Abbildung 62: Darstellung des Blockes "001001" anhand eines Fotos. Die Trennflächen sind farblich markiert.

Berechnung des Volumens:

Die Berechnung des Volumens erfolgte mit dem Programm "B03HPGL.EXE". Tabelle 18 listet die Trennflächenabstände im Bereich des Blockes sowie das berechnete Volumen auf.

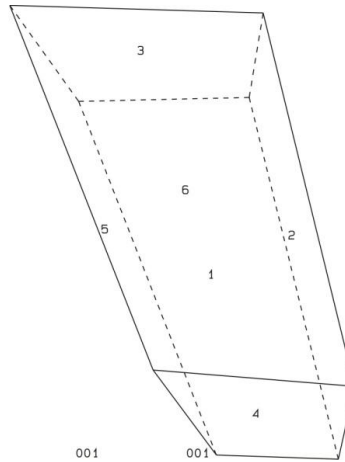
Tabelle 18: Trennflächenabstände und berechnetes Volumen des Blockes

Trennflächenabstände:		
Trennfläche 1	Rot	1,4 m
Trennfläche 2	Grün	1,9 m
Trennfläche 3	Blau	2,8 m
Freie Fläche 1	Gelb	2,8 m
Freie Fläche 2	Türkis	1,9 m
Freie Fläche 3	Rosa	1,4 m
Volumen: 105 m³		

Abbildung 63 a bis c zeigen die Form des Blockes "001∩001", die mit dem Programm "B03HPGL.EXE" erstellt wurde.

```

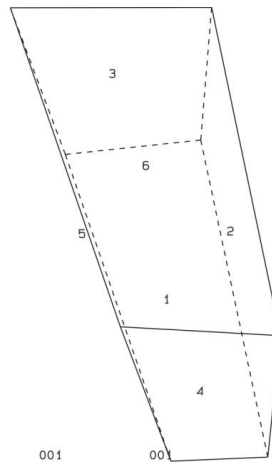
PROJECTIVE DIRECTION:
 0.1 -0.5 0.9
DIP, DIP D., DISTANCE
57.0 179.0 1.4
88.0 235.0 1.9
86.0 352.0 2.8
84.0 354.0 2.8
72.0 70.0 1.9
56.0 174.0 1.4
VOLUME= 1.050E+02
    
```



a)

```

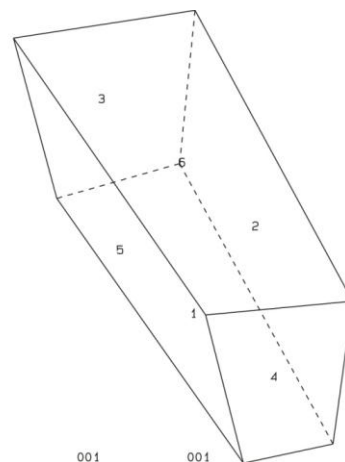
PROJECTIVE DIRECTION:
 0.2 -0.6 0.6
DIP, DIP D., DISTANCE
57.0 179.0 1.4
88.0 235.0 1.9
86.0 352.0 2.8
84.0 354.0 2.8
72.0 70.0 1.9
56.0 174.0 1.4
VOLUME= 1.050E+02
    
```



b)

```

PROJECTIVE DIRECTION:
-0.2 -0.9 0.2
DIP, DIP D., DISTANCE
57.0 179.0 1.4
88.0 235.0 1.9
86.0 352.0 2.8
84.0 354.0 2.8
72.0 70.0 1.9
56.0 174.0 1.4
VOLUME= 1.050E+02
    
```



c)

Abbildung 63 a bis c: dreidimensionale Darstellung des Blockes "001∩001"

Stabilitätsanalyse:

Abbildung 64 zeigt die dreidimensionale Stabilitätsanalyse für den Block "011". Die schwarz unterbrochenen Linien stellen den Reibungswinkel im Abstand von 10° dar; das rote Plus "+" markiert den benötigten Reibungswinkel, bei dem sich der Block in einem Gleichgewichtszustand befindet bzw. ab dem der Block stabil ist. Die Resultate für die restlichen Blöcke befinden sich im Anhang. Tabelle 19 listet die Ergebnisse der Stabilitätsanalyse auf.

Tabelle 19: Ergebnisse der Stabilitätsanalyse

JP - Code	Blocktyp	Benötigter Reibungswinkel	Angenommener Reibungswinkel	Sicherheitsfaktor
011	I	50°	30°	0,48

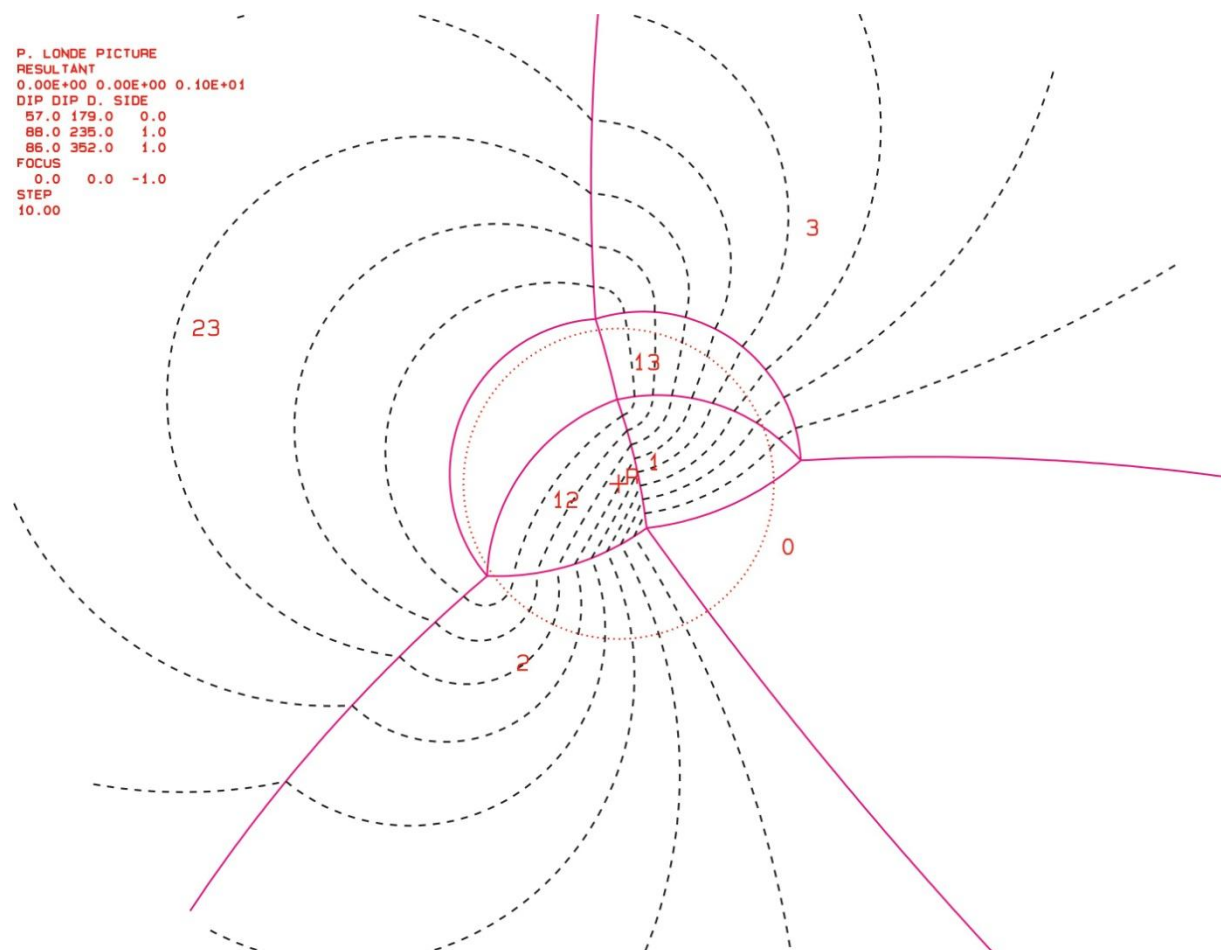


Abbildung 64: Projektion für JP "011"; der benötigte Reibungswinkel für einen Gleichgewichtszustand ist mit einem roten + markiert

6.3.4 Block 4

Tabelle 20 zeigt die Orientierungsdaten der beteiligten Trennflächen und freien Flächen:

Tabelle 20 : Orientierungsdaten der Trennflächen und freien Flächen

Nr.	Name	Farbe	Einfallsrichtung	Einfallswinkel
1	K5_03	Rot	083	82
2	K1_20	Türkis	199	79
3	K1_19 (freie Fläche 1)	Rosa	236	54
4	Sf_19 (freie Fläche 2)	Olivgrün	168	35
5	K4_10 (freie Fläche 3)	Gelb	169	88
6	K5_01 (freie Fläche 4)	Grün	085	86

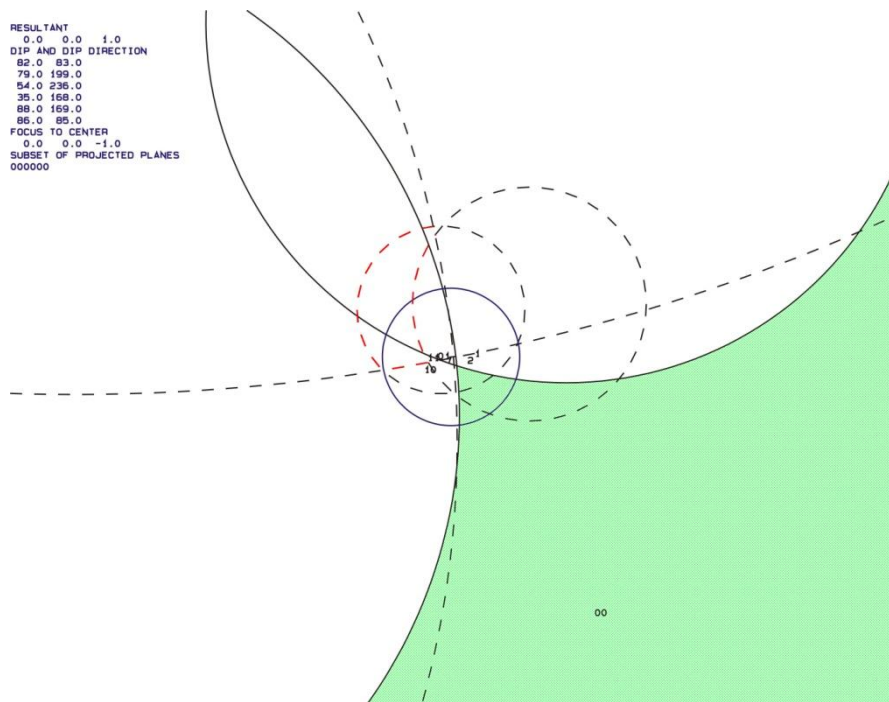
Tabelle 21 listet den "Joint Pyramid Code" des Blockes, der in der "Space Pyramid" (= außerhalb des rot markierten Bereiches) liegt, sowie dessen "Sliding Mode" und Blocktyp auf.

Tabelle 21: JP-Code, Sliding Mode und Blocktyp

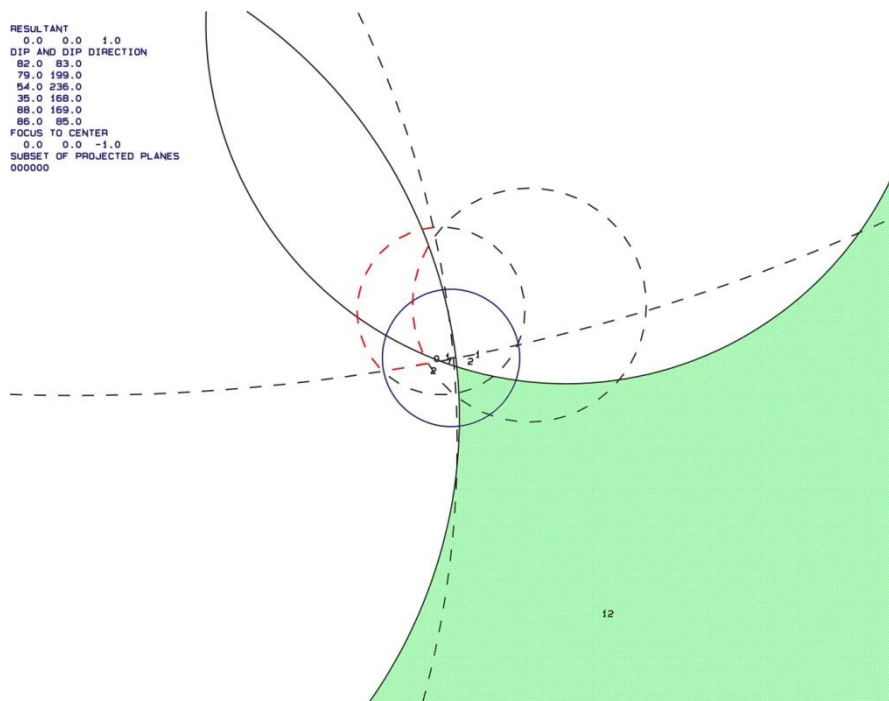
JP-Code	Sliding Mode	Blocktyp
00	12	I

EP-Code: 0111

Die folgenden zwei Plots (Abb. 65 a und b), die mit dem Programm "B02HPGL.EXE" erstellt wurden, zeigen die Großkreise der Trennflächen und freien Flächen. Die farblich markierten Bereiche stellen potentiell instabile Blöcke dar.



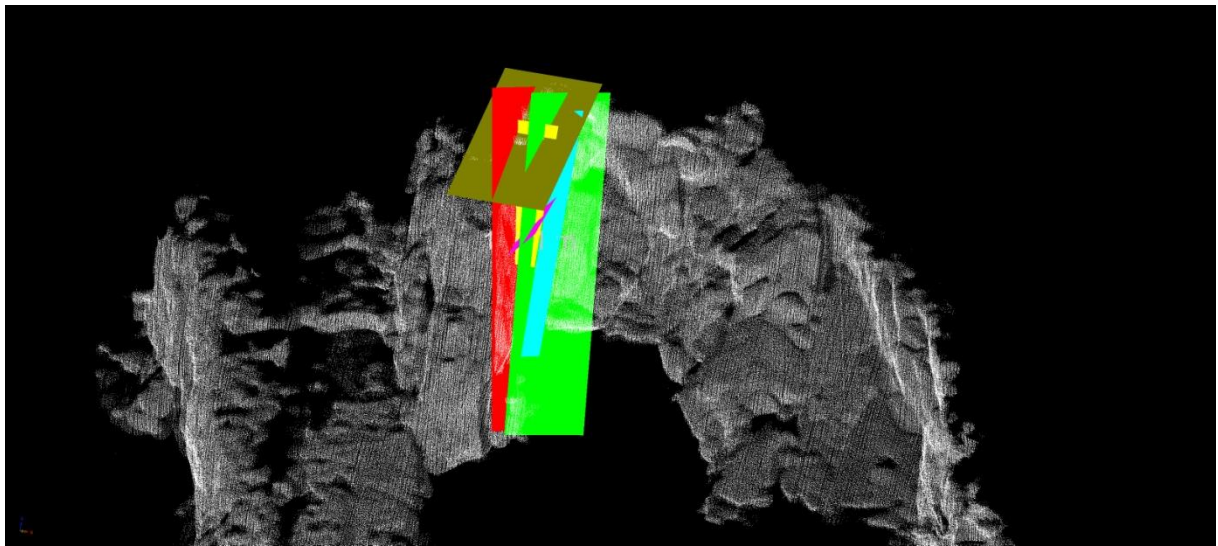
a)



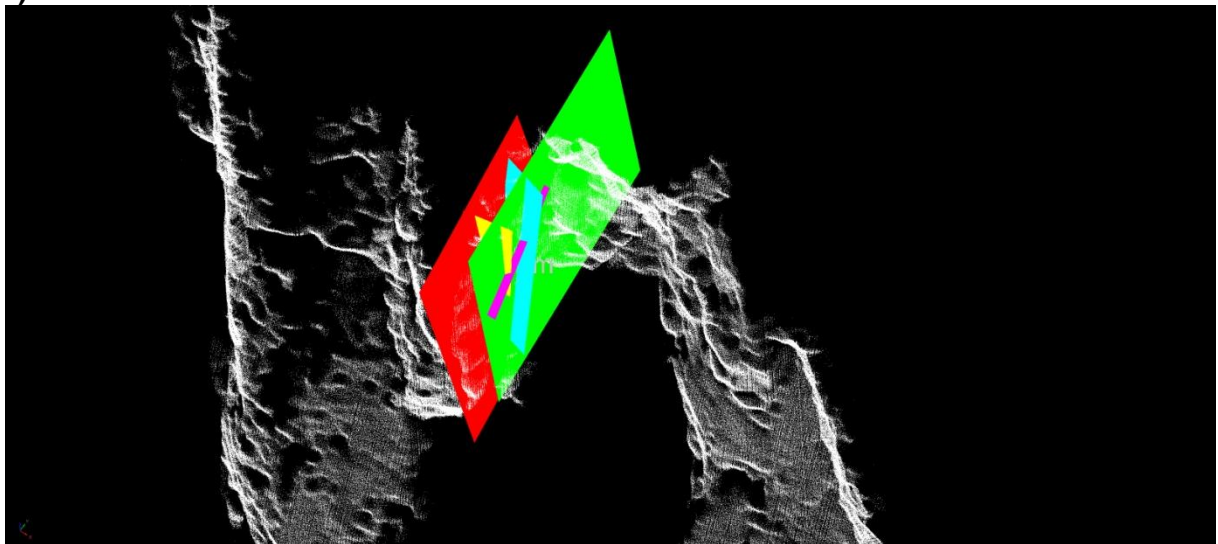
b)

Abbildung 65 a und b: Großkreise der Trennflächen und freien Flächen; a) mit den "JP Codes" b) mit den Versagensmechanismen

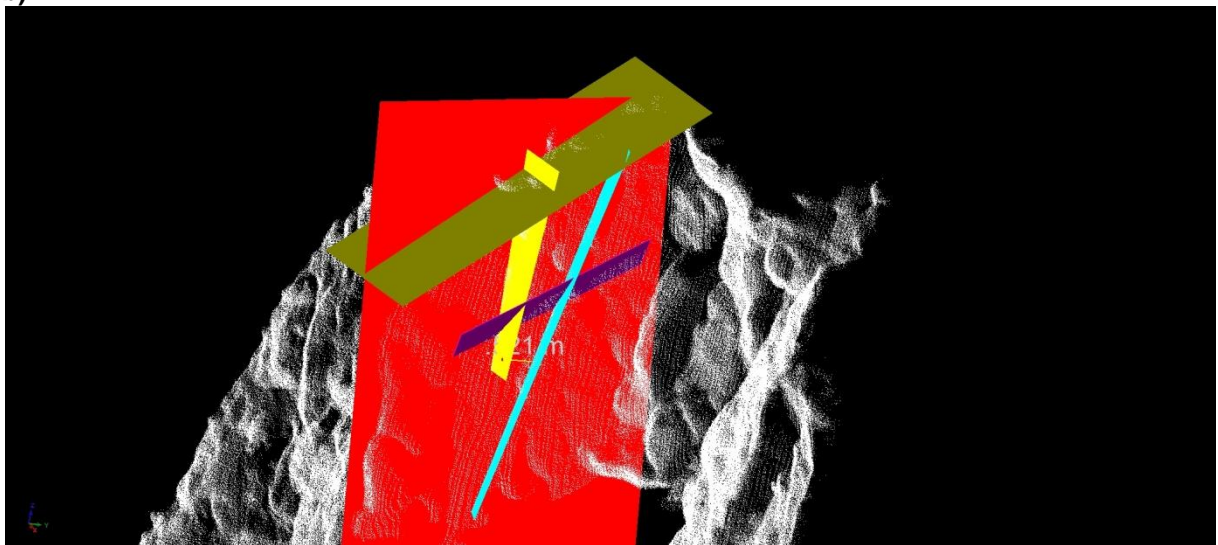
Abbildung 66 a bis c zeigen den Block "0000111" im Laserscanmodell. Abbildung 67 zeigt den Block eingezeichnet in einem Foto.



a)



b)



c)

Abbildung 66 a bis c: Darstellung des Blockes "0000111" im Laserscanmodell



Abbildung 67: Darstellung des Blockes "000111" anhand eines Fotos. Die Trennflächen sind farblich markiert.

Berechnung des Volumens:

Die Berechnung des Volumens erfolgte mit dem Programm "B03HPGL.EXE". Tabelle 22 listet die Trennflächenabstände im Bereich des Blockes sowie das berechnete Volumen auf.

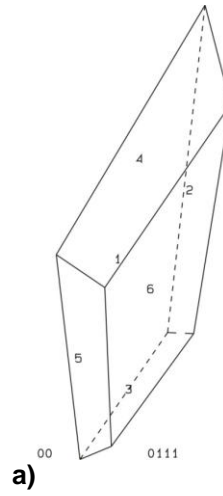
Tabelle 22: Trennflächenabstände und berechnetes Volumen des Blockes

Trennflächenabstände:		
Trennfläche 1	Rot	0,7 m
Trennfläche 2	Türkis	1,8 m
Freie Fläche 1	Rosa	2 m
Freie Fläche 2	Olivgrün	2,7 m
Freie Fläche 3	Gelb	1,5 m
Freie Fläche 4	Grün	0,7 m
Volumen: 38,3 m³		

Abbildung 68 a bis c zeigen die Form des Blockes "00∩0111", die mit dem Programm "B03HPGL.EXE" erstellt wurde.

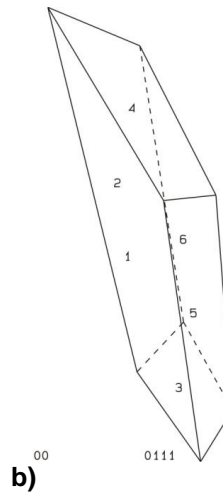
```

PROJECTIVE DIRECTION
0.5 -0.4 0.8
DIP, DIP, D., DISTANCE
82.0 83.0 0.7
79.0 199.0 1.8
54.0 236.0 2.0
35.0 168.0 2.7
88.0 169.0 1.5
86.0 85.0 0.7
VOLUME= 3.83D+01
    
```



```

PROJECTIVE DIRECTION
-0.3 -0.9 0.2
DIP, DIP, D., DISTANCE
82.0 83.0 0.7
79.0 199.0 1.8
54.0 236.0 2.0
35.0 168.0 2.7
88.0 169.0 1.5
86.0 85.0 0.7
VOLUME= 3.83D+01
    
```



```

PROJECTIVE DIRECTION
0.8 -0.8 0.2
DIP, DIP, D., DISTANCE
82.0 83.0 0.7
79.0 199.0 1.8
54.0 236.0 2.0
35.0 168.0 2.7
88.0 169.0 1.5
86.0 85.0 0.7
VOLUME= 3.83D+01
    
```

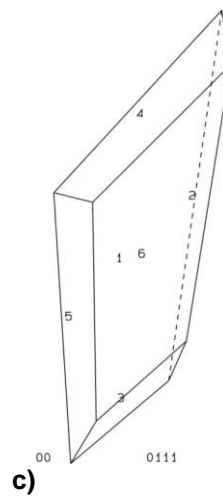


Abbildung 68 a bis c: dreidimensionale Darstellung des Blockes "00∩0111"

Stabilitätsanalyse:

Abbildung 69 zeigt die dreidimensionale Stabilitätsanalyse für den Block "00". Die schwarz unterbrochenen Linien stellen den Reibungswinkel im Abstand von 10° dar; das rote Plus "+" markiert den benötigten Reibungswinkel, bei dem sich der Block in einem Gleichgewichtszustand befindet bzw. ab dem der Block stabil ist. Tabelle 23 listet die Ergebnisse der Stabilitätsanalyse auf.

Tabelle 23: Ergebnisse der Stabilitätsanalyse

JP - Code	Blocktyp	Benötigter Reibungswinkel	Angenommener Reibungswinkel	Sicherheitsfaktor
00	I	30°	30°	1

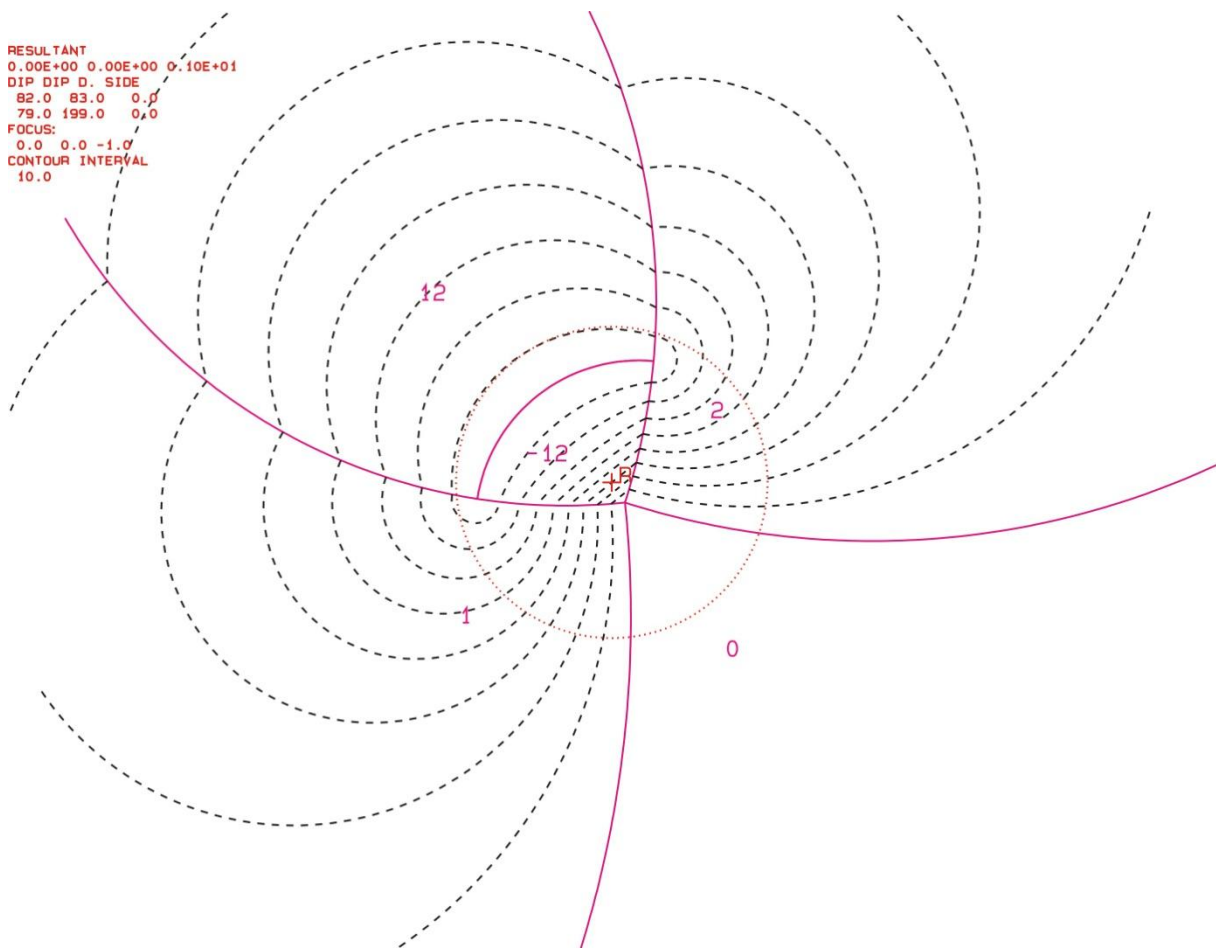


Abbildung 69: Projektion für JP "00"; der benötigte Reibungswinkel für einen Gleichgewichtszustand ist mit einem roten + markiert

6.3.5 Block 5

Tabelle 24 zeigt die Orientierungsdaten der beteiligten Trennflächen und freien Flächen:

Tabelle 24: Orientierungsdaten der Trennflächen und freien Flächen

Nr.	Name	Farbe	Einfallsrichtung	Einfallswinkel
1	K1_05	rot	039	63
2	K5_02	grün	092	84
3	Sf_08	blau	168	55
4	K3_05 (freie Fläche)	gelb	166	82

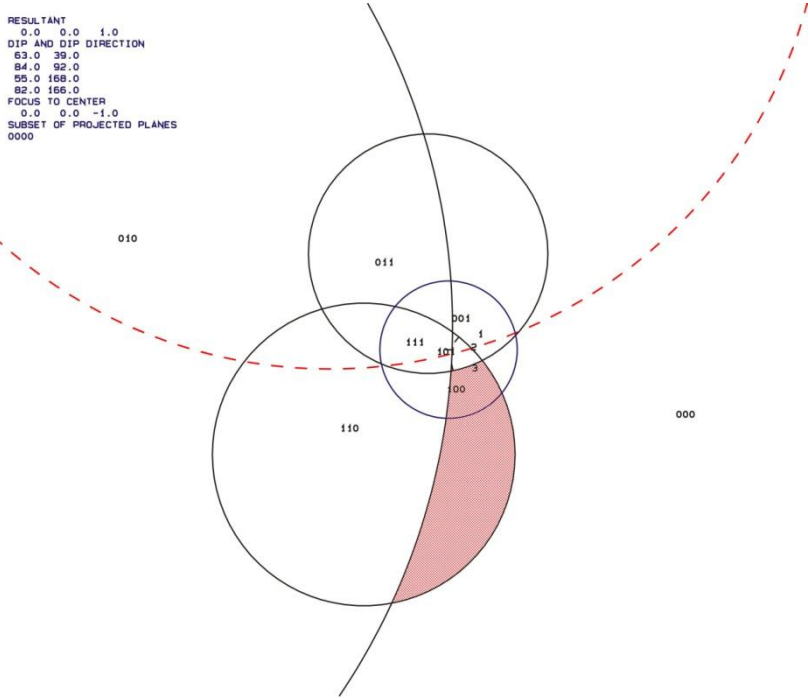
Tabelle 25 listet den "Joint Pyramid Code" des Blockes, der in der "Space Pyramid" (= außerhalb des rot markierten Bereiches) liegt, sowie dessen "Sliding Mode" und Blocktyp auf.

Tabelle 25: JP-Code, Sliding Mode und Blocktyp

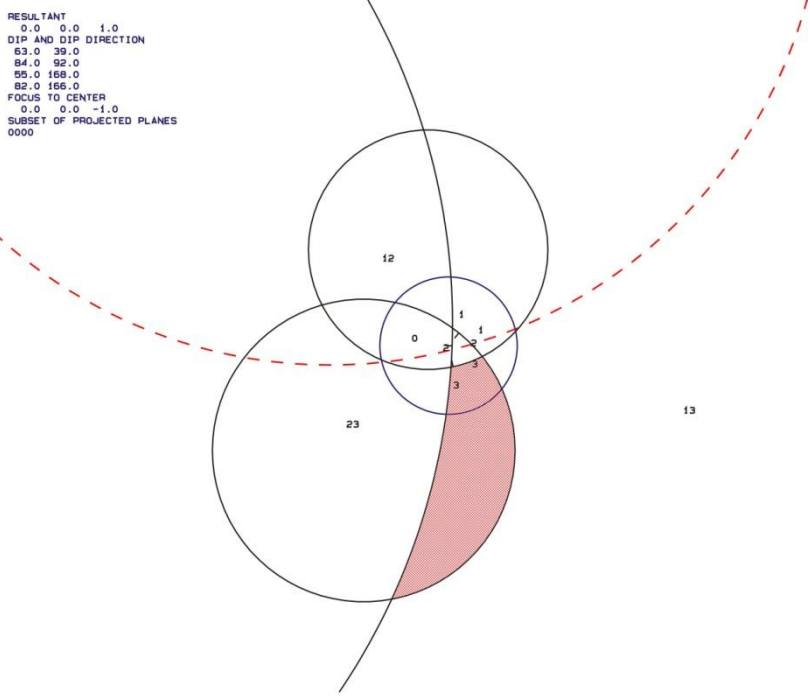
JP-Code	Sliding Mode	Blocktyp
100	3	I

EP-Code: 1

Die folgenden zwei Plots (Abb. 70.a und b), die mit dem Programm "B02HPGL.EXE" erstellt wurden, zeigen die Großkreise der Trennflächen und freien Flächen. Die farblich markierten Bereiche stellen potentiell instabile Blöcke dar.



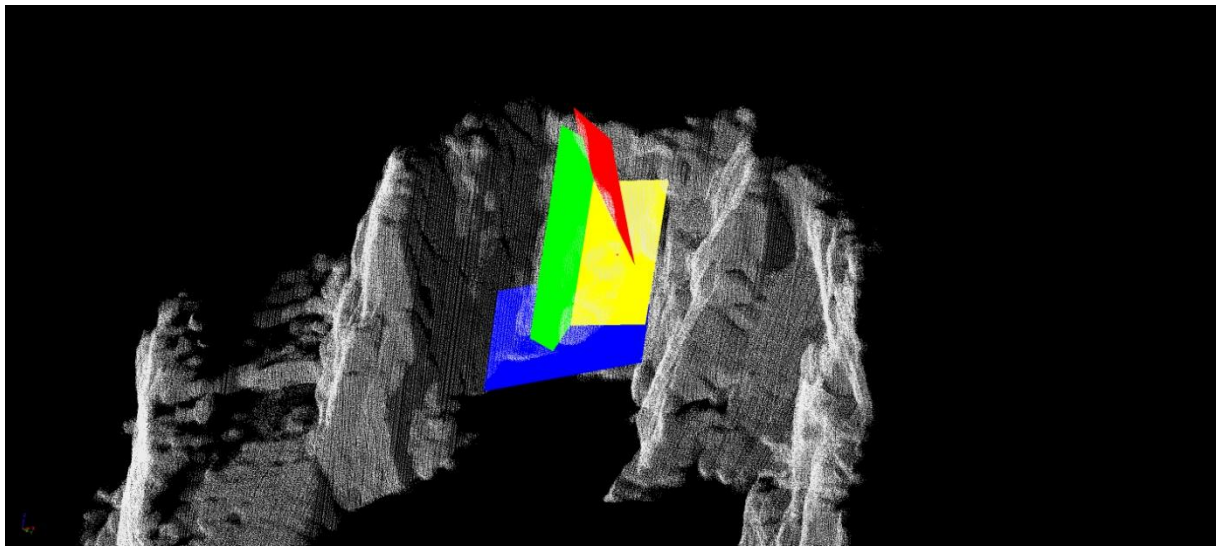
a)



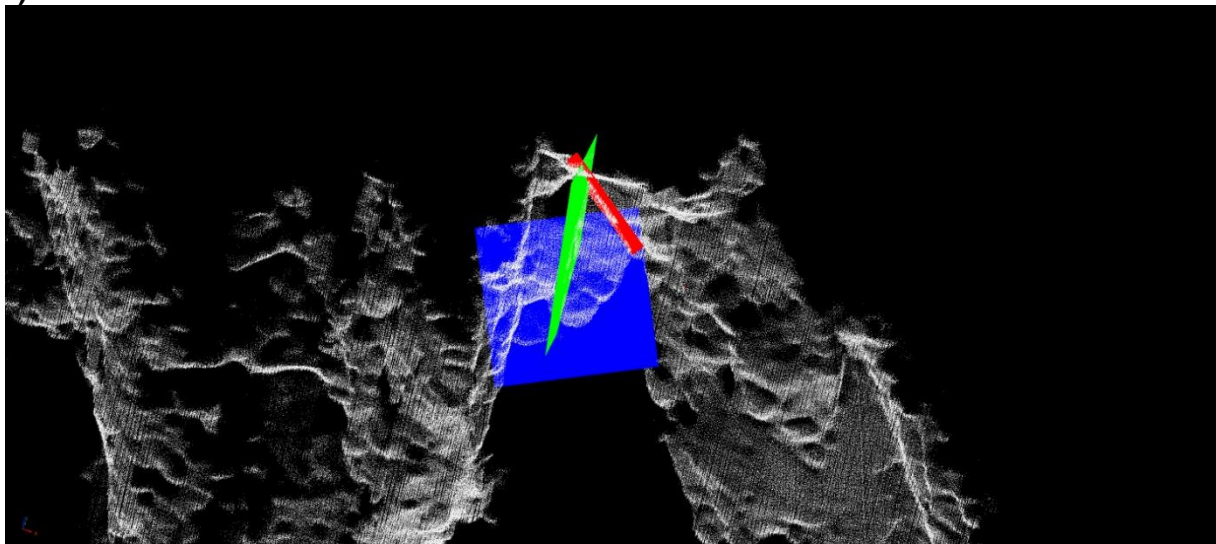
b)

Abbildung 70 a und b: Großkreise der Trennflächen und freien Flächen; a) mit den "JP Codes" b) mit den Versagensmechanismen

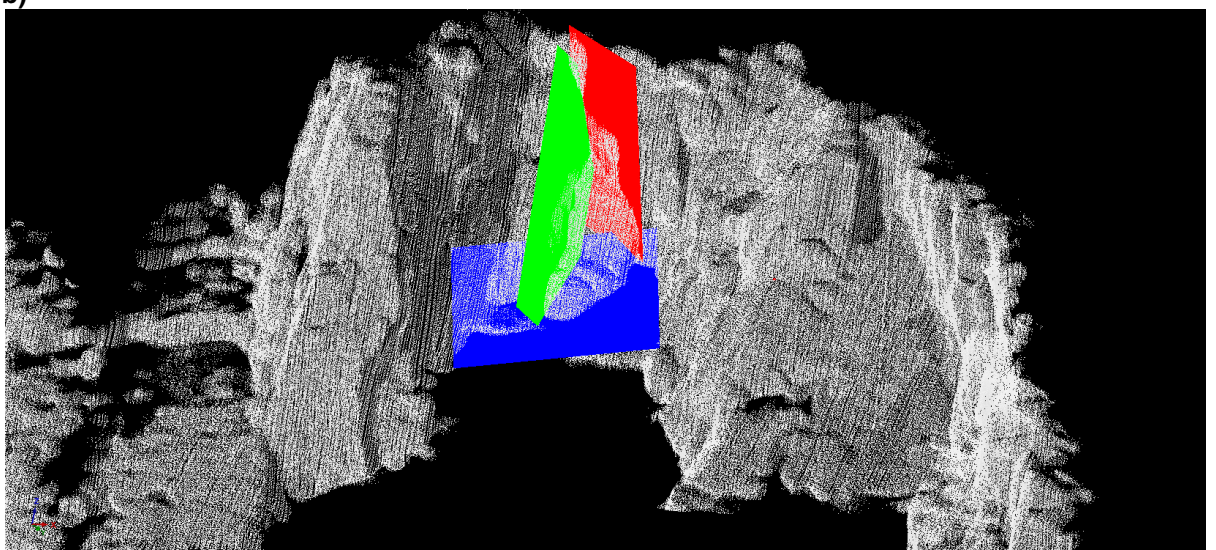
Abbildung 71 a bis c zeigen den Block "100 \cap 1" im Laserscanmodell. Abbildung 72 zeigt den Block eingezeichnet in einem Foto.



a)



b)



c)

Abbildung 71 a bis c: Darstellung des Blockes "100 \cap 1" im Laserscanmodell



Abbildung 72: Darstellung des Blockes "100n1" anhand eines Fotos. Die Trennflächen sind farblich markiert.

Berechnung des Volumens:

Die Berechnung des Volumens erfolgte mit dem Programm "B03HPGL.EXE". Tabelle 26 listet die Trennflächenabstände im Bereich des Blockes sowie das berechnete Volumen auf.

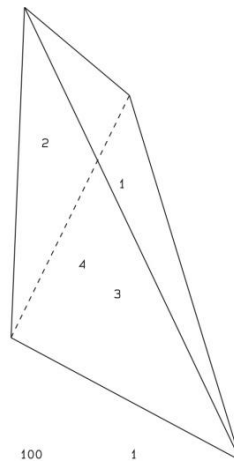
Tabelle 26: Trennflächenabstände und berechnetes Volumen des Blockes

Trennflächenabstände:		
Trennfläche 1	Rot	0,8 m
Trennfläche 2	Grün	2,3 m
Trennfläche 3	Blau	0,9 m
Freie Fläche 1	Gelb	0,6 m
Volumen: 26,5 m³		

Abbildung 73 a bis c zeigen die Form des Blockes "100∩1", die mit dem Programm "B03HPGL.EXE" erstellt wurde.

```

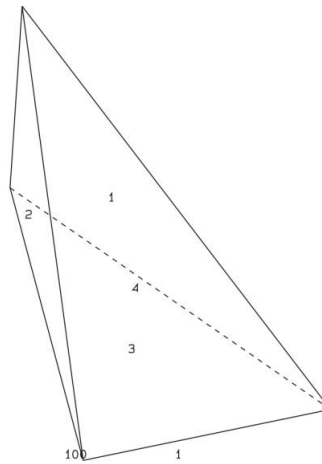
PROJECTIVE DIRECTION:
0.5 -0.4 0.8
DIP, DIP, D., DISTANCE
63.0 39.0 0.8
64.0 92.0 2.3
65.0 166.0 0.9
62.0 166.0 0.6
VOLUME= 2.650+01
    
```



a)

```

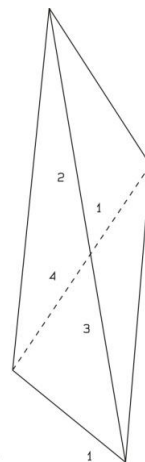
PROJECTIVE DIRECTION:
-0.3 -0.9 0.2
DIP, DIP, D., DISTANCE
63.0 39.0 0.8
64.0 92.0 2.3
65.0 166.0 0.9
62.0 166.0 0.6
VOLUME= 2.650+01
    
```



b)

```

PROJECTIVE DIRECTION:
0.9 -0.2 0.5
DIP, DIP, D., DISTANCE
63.0 39.0 0.8
64.0 92.0 2.3
65.0 166.0 0.9
62.0 166.0 0.6
VOLUME= 2.650+01
    
```



c)

Abbildung 73 a bis c: dreidimensionale Darstellung des Blockes "100∩1"

Stabilitätsanalyse:

Abbildung 74 zeigt die dreidimensionale Stabilitätsanalyse für den Block "100". Die schwarz unterbrochenen Linien stellen den Reibungswinkel im Abstand von 10° dar; das rote Plus "+" markiert den benötigten Reibungswinkel, bei dem sich der Block in einem Gleichgewichtszustand befindet bzw. ab dem der Block stabil ist. Tabelle 27 listet die Ergebnisse der Stabilitätsanalyse auf.

Tabelle 27: Ergebnisse der Stabilitätsanalyse

JP - Code	Blocktyp	Benötigter Reibungswinkel	Angenommener Reibungswinkel	Sicherheitsfaktor
100	I	35°	30°	0,82

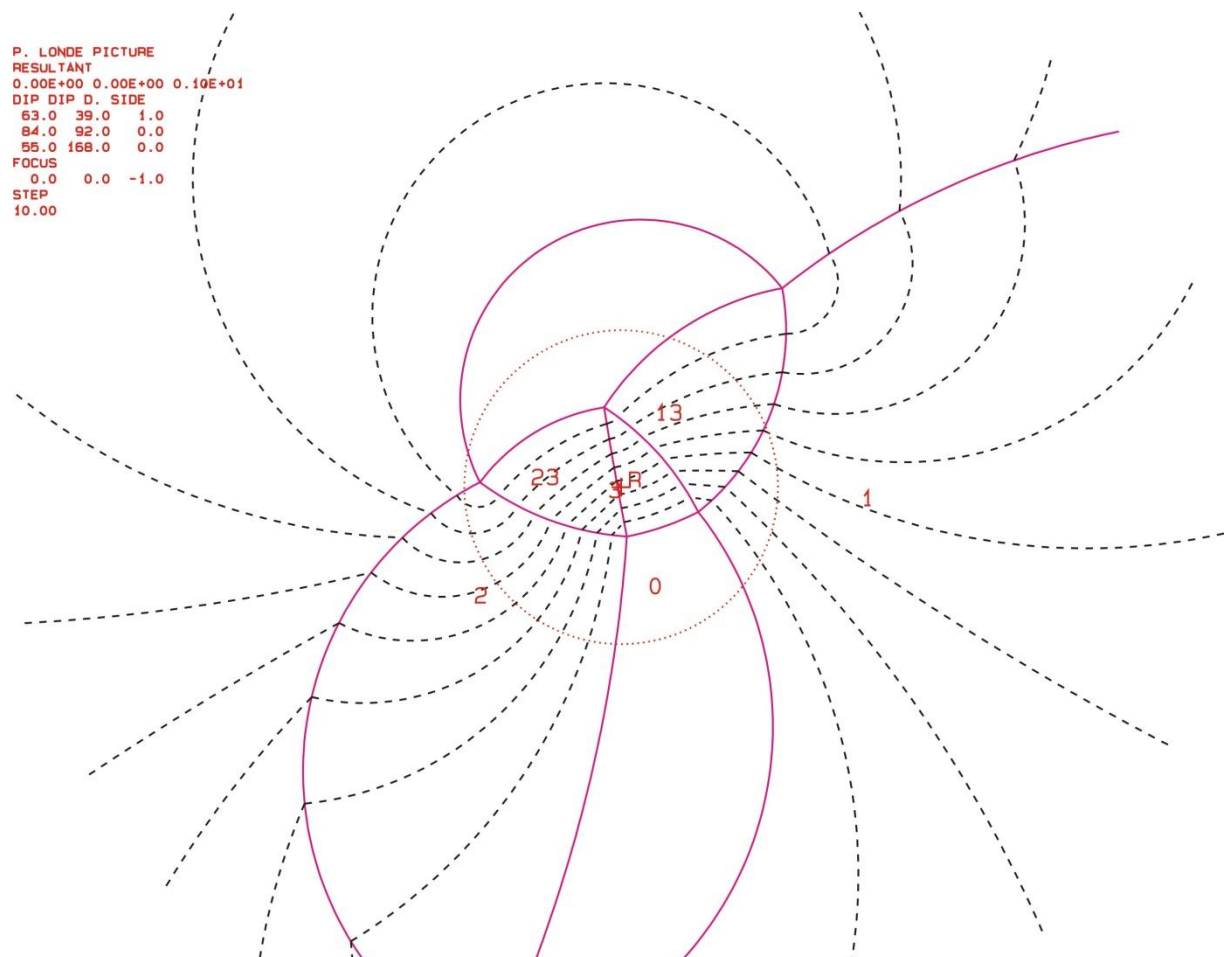


Abbildung 74: Projektion für JP "100"; der benötigte Reibungswinkel für einen Gleichgewichtszustand ist mit einem roten + markiert

6.3.6 Block 6

Tabelle 28 zeigt die Orientierungsdaten der beteiligten Trennflächen und freien Flächen:

Tabelle 28: Orientierungsdaten der Trennflächen und freien Flächen

Nr.	Name	Farbe	Einfallsrichtung	Einfallswinkel
1	K1_18	Gelb	213	87
2	K5_09	Grün	282	76
3	K2_06 (Freie Fläche 1)	Rot	095	69
4	K6_11 (Freie Fläche 2)	Türkis	018	36
5	K4_11 (Freie Fläche 3)	Blau	352	77

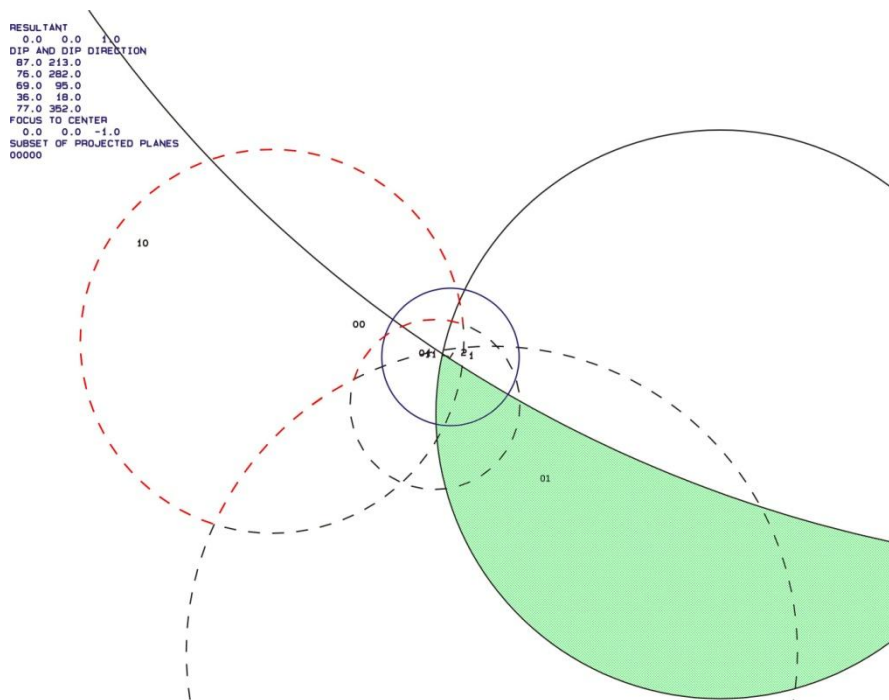
Tabelle 29 listet den "Joint Pyramid Code" des Blockes, der in der "Space Pyramid" (= außerhalb des rot markierten Bereiches) liegt, sowie dessen "Sliding Mode" und Blocktyp auf.

Tabelle 29: JP-Code, Sliding Mode und Blocktyp

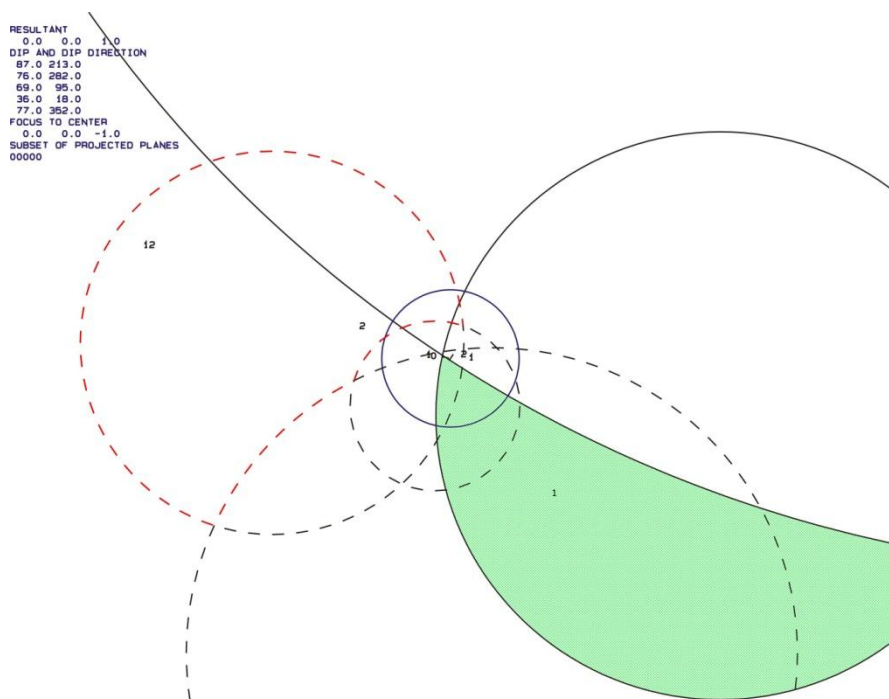
JP-Code	Sliding Mode	Blocktyp
01	1	I

EP-Code: 100

Die folgenden zwei Plots (Abb. 75 a und b), die mit dem Programm "B02HPGL.EXE" erstellt wurden, zeigen die Großkreise der Trennflächen und freien Flächen. Die farblich markierten Bereiche stellen potentiell instabile Blöcke dar.



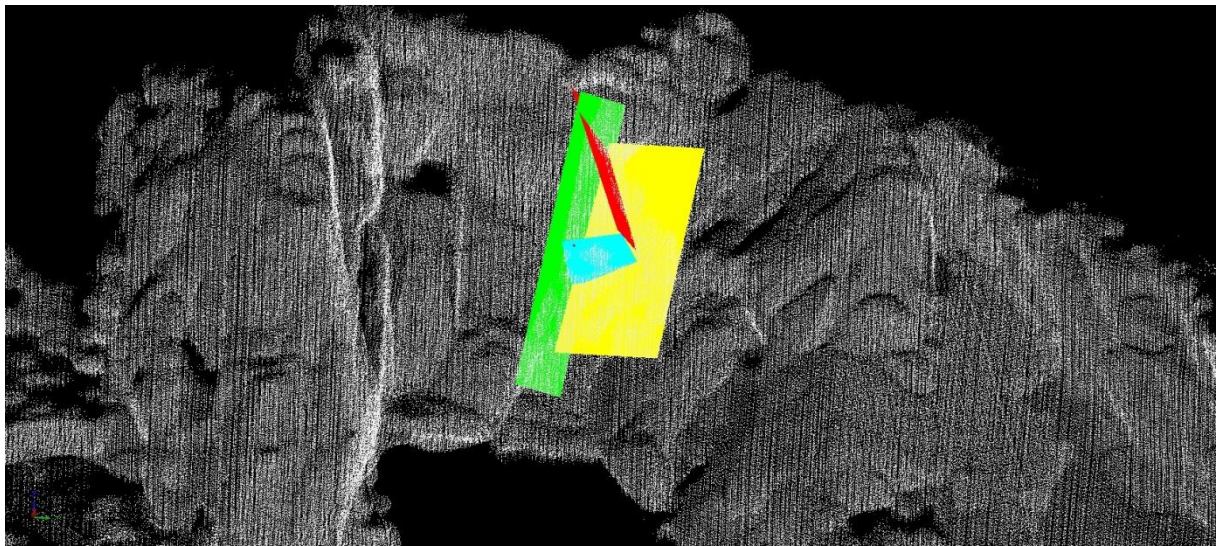
a)



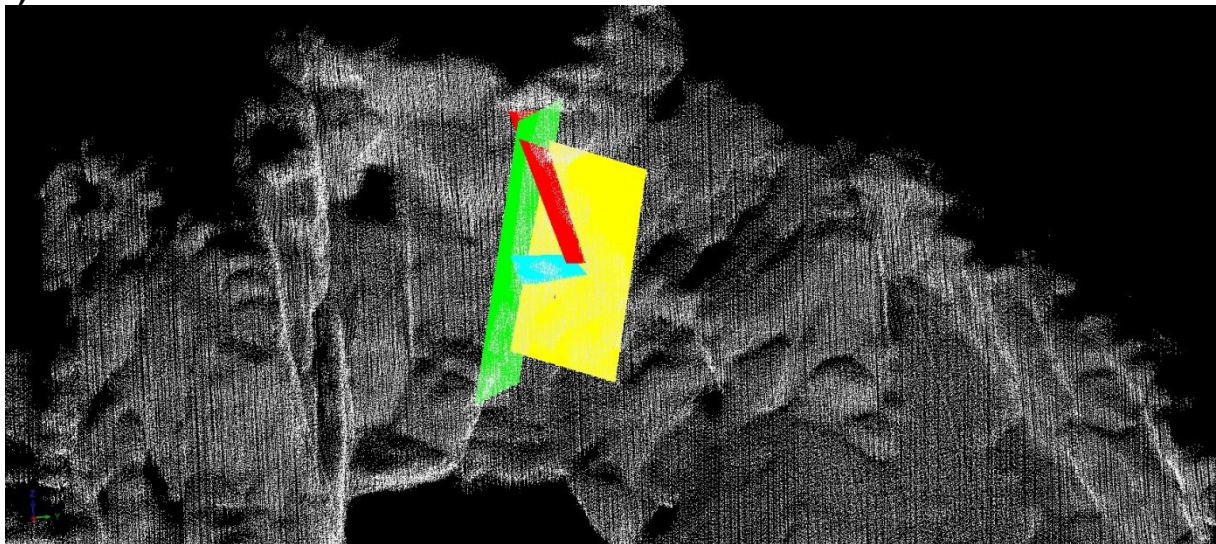
b)

Abbildung 75 a und b: Großkreise der Trennflächen und freien Flächen; a) mit den "JP Codes" b) mit den Versagensmechanismen

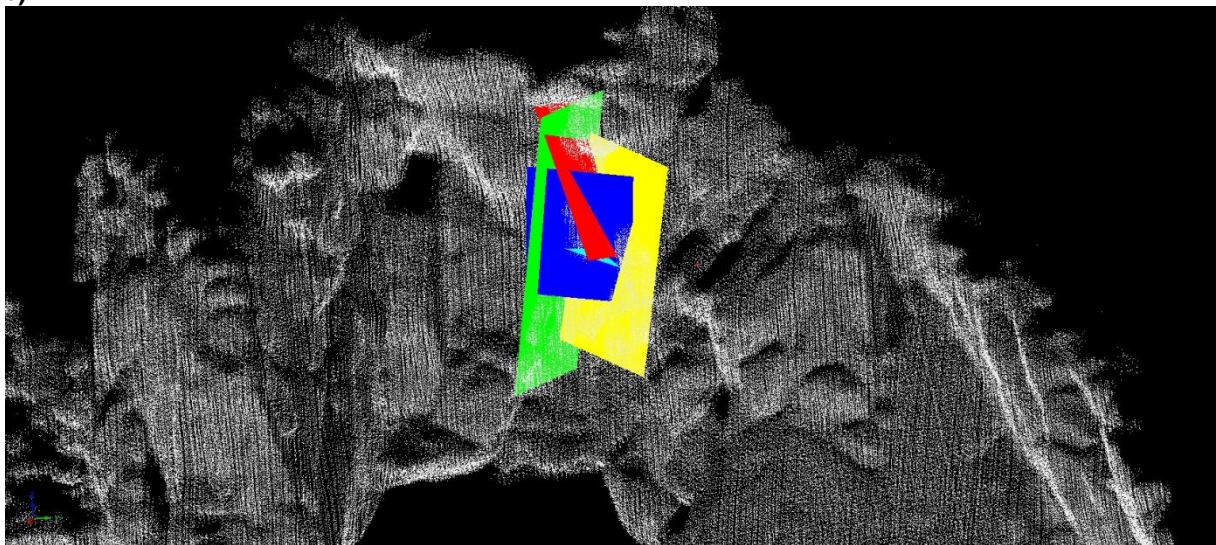
Abbildung 76 a bis c zeigen den Block "01∩100" im Laserscanmodell. Abbildung 77 zeigt den Block eingezeichnet in einem Foto.



a)



b)



c)

Abbildung 76 a bis c: Darstellung des Blockes "01∩100" im Laserscanmodell



Abbildung 77: Darstellung des Blockes "010100" anhand eines Fotos. Die Trennflächen sind farblich markiert.

Berechnung des Volumens:

Die Berechnung des Volumens erfolgte mit dem Programm "B03HPGL.EXE". Tabelle 30 listet die Trennflächenabstände im Bereich des Blockes sowie das berechnete Volumen auf.

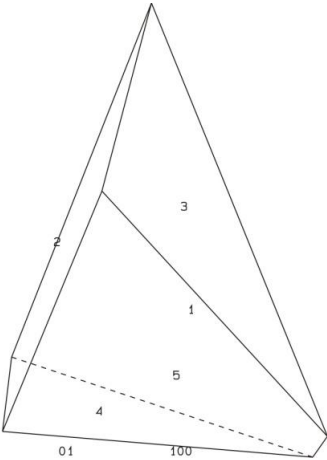
Tabelle 30: Trennflächenabstände und berechnetes Volumen des Blockes

Trennflächenabstände:		
Trennfläche 1	Gelb	1,1 m
Trennfläche 2	Grün	1,5 m
Freie Fläche 1	Rot	1,6 m
Freie Fläche 2	Türkis	1,0 m
Freie Fläche 3	Blau	0,7 m
Volumen: 29,6 m³		

Abbildung 78 a bis c zeigen die Form des Blockes "01∩100", die mit dem Programm "B03HPGL.EXE" erstellt wurde.

```

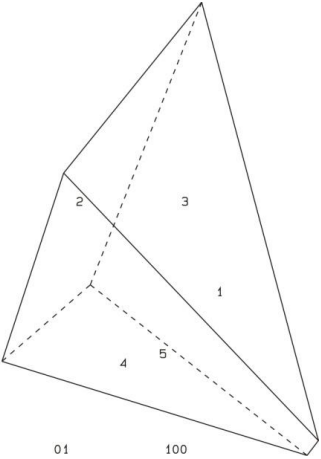
PROJECTIVE DIRECTION
0.0 -0.8 0.9
DIP, DIP D., DISTANCE
87.0 213.0 1.1
76.0 282.0 1.6
69.0 95.0 1.6
35.0 18.0 1.0
77.0 352.0 0.7
VOLUME= 2.960+01
    
```



a)

```

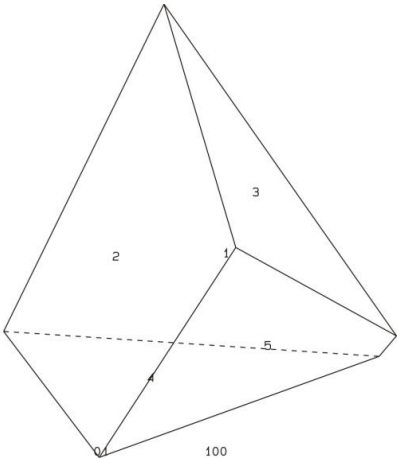
PROJECTIVE DIRECTION
0.2 -0.8 0.8
DIP, DIP D., DISTANCE
87.0 213.0 1.1
76.0 282.0 1.6
69.0 95.0 1.6
35.0 18.0 1.0
77.0 352.0 0.7
VOLUME= 2.960+01
    
```



b)

```

PROJECTIVE DIRECTION
-0.2 -0.8 0.8
DIP, DIP D., DISTANCE
87.0 213.0 1.1
76.0 282.0 1.6
69.0 95.0 1.6
35.0 18.0 1.0
77.0 352.0 0.7
VOLUME= 2.960+01
    
```



c)

Abbildung 78 a bis c: dreidimensionale Darstellung des Blockes "01∩100"

Stabilitätsanalyse:

Abbildung 79 zeigt die dreidimensionale Stabilitätsanalyse für den Block "01". Die schwarz unterbrochenen Linien stellen den Reibungswinkel im Abstand von 10° dar; das rote Plus "+" markiert den benötigten Reibungswinkel, bei dem sich der Block in einem Gleichgewichtszustand befindet bzw. ab dem der Block stabil ist. Tabelle 31 listet die Ergebnisse der Stabilitätsanalyse auf.

Tabelle 31: Ergebnisse der Stabilitätsanalyse

JP - Code	Blocktyp	Benötigter Reibungswinkel	Angenommener Reibungswinkel	Sicherheitsfaktor
01	I	5°	30°	6,60

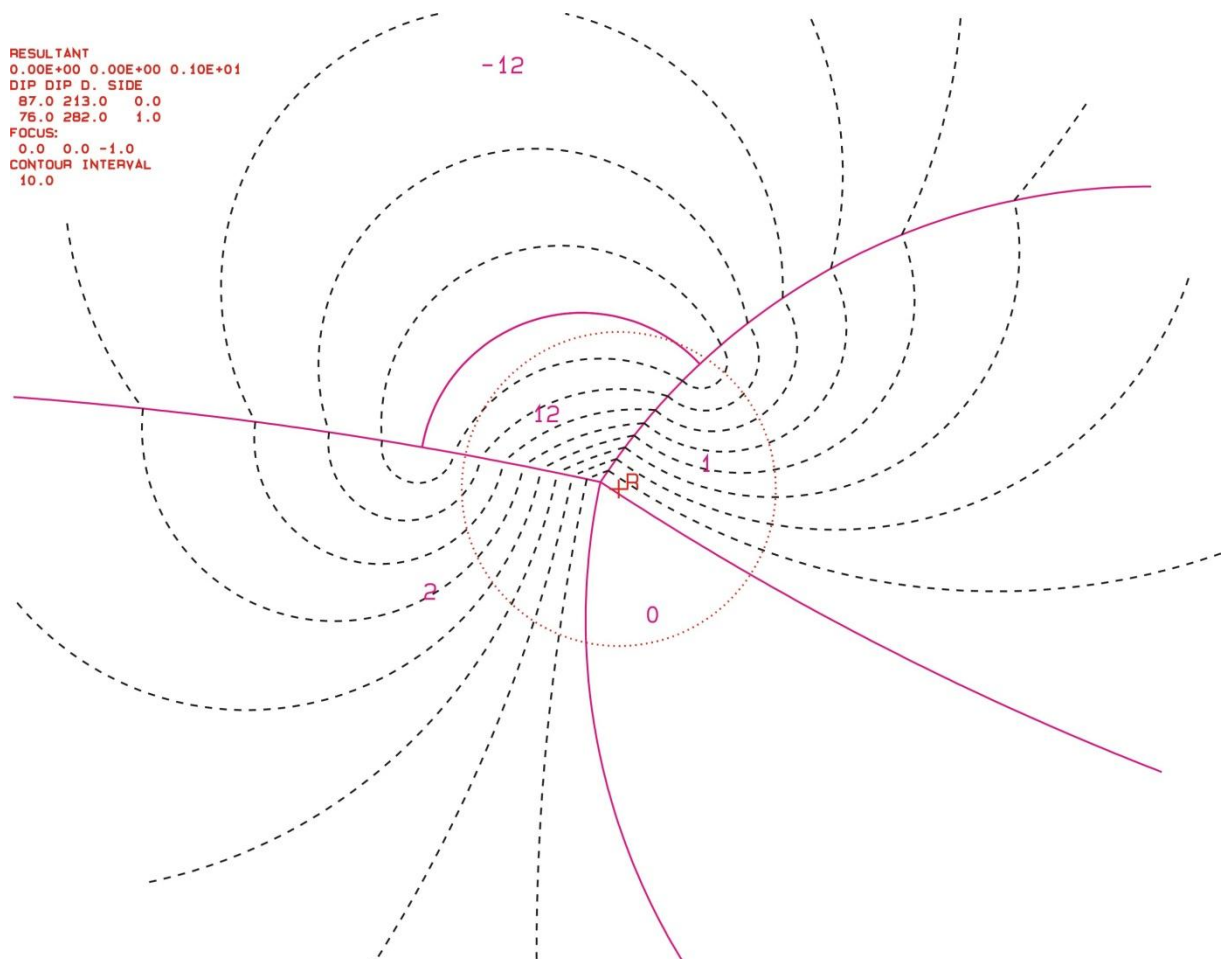


Abbildung 79: Projektion für JP "01"; der benötigte Reibungswinkel für einen Gleichgewichtszustand ist mit einem roten + markiert

6.3.7 Block 7

Tabelle 32 zeigt die Orientierungsdaten der beteiligten Trennflächen und freien Flächen:

Tabelle 32: Orientierungsdaten der Trennflächen und freien Flächen

Nr.	Name	Farbe	Einfallsrichtung	Einfallswinkel
1	K1_05	Rot	039	63
2	Sf_16	Grün	172	48
3	K6_09	Blau	360	34
4	K5_01	Gelb	085	86
5	K6_03 (freie Fläche)	Türkis	328	68

Tabelle 33 listet die "Joint Pyramid Codes" der Blöcke, die in der "Space Pyramid" (= innerhalb des rot markierten Bereiches) liegen, sowie deren "Sliding Mode" und Blocktyp auf.

Tabelle 33: JP-Codes, Sliding Mode und Blocktyp

JP-Code	Sliding Mode	Blocktyp
1010	24	I
0010	12	II
1000	---	III

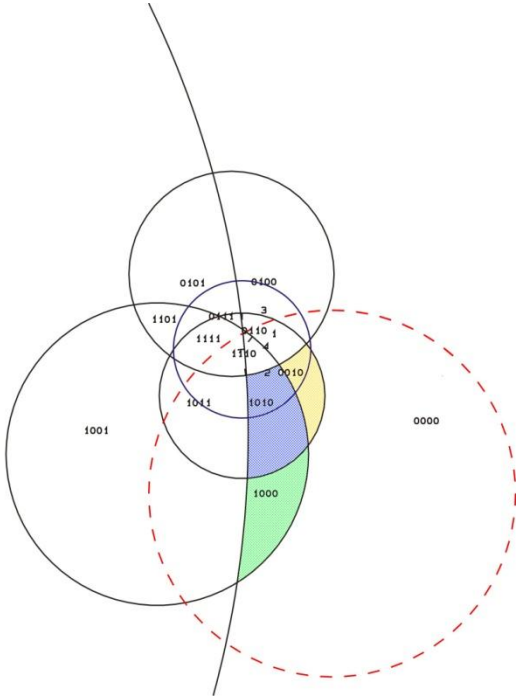
EP-Code: 0

Die folgenden zwei Plots (Abb. 80 a und b), die mit dem Programm "B02HPGL.EXE" erstellt wurden, zeigen die Großkreise der Trennflächen und freien Flächen. Die farblich markierten Bereiche stellen potentiell instabile Blöcke dar.

```

RESULTANT
0.0 0.0 1.0
DIP AND DIP DIRECTION
63.0 39.0
48.0 172.0
34.0 350.0
86.0 85.0
68.0 328.0
FOCUS TO CENTER
0.0 0.0 -1.0
SUBSET OF PROJECTED PLANES
00000
    
```

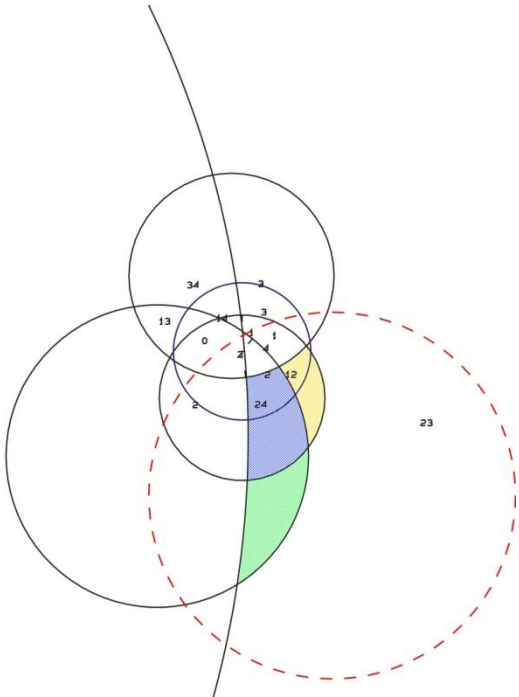
0001



a)

```

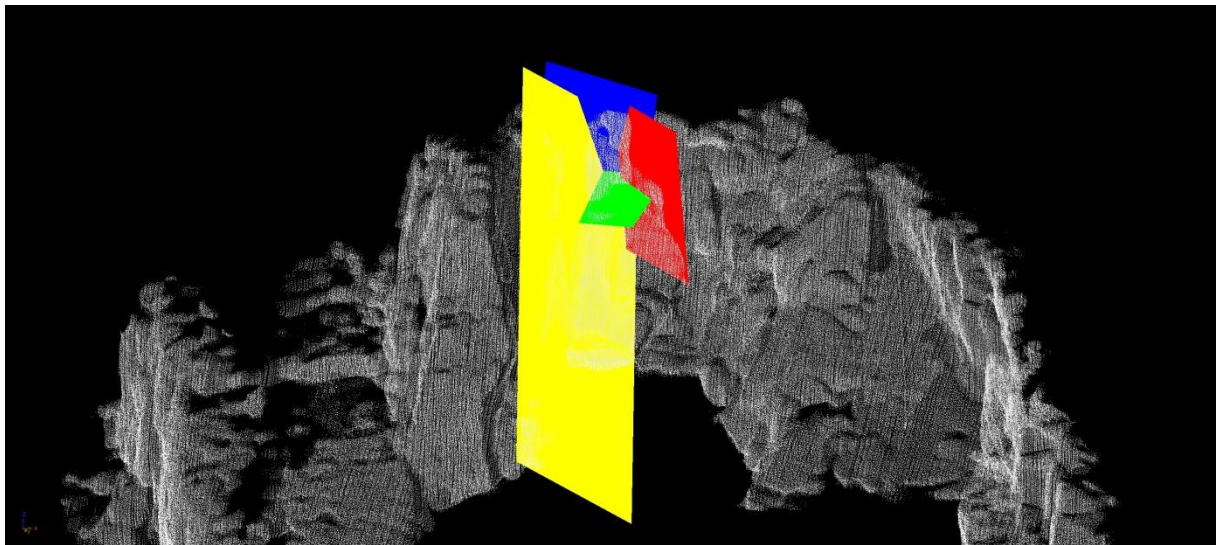
RESULTANT
0.0 0.0 1.0
DIP AND DIP DIRECTION
63.0 39.0
48.0 172.0
34.0 350.0
86.0 85.0
68.0 328.0
FOCUS TO CENTER
0.0 0.0 -1.0
SUBSET OF PROJECTED PLANES
00000
    
```



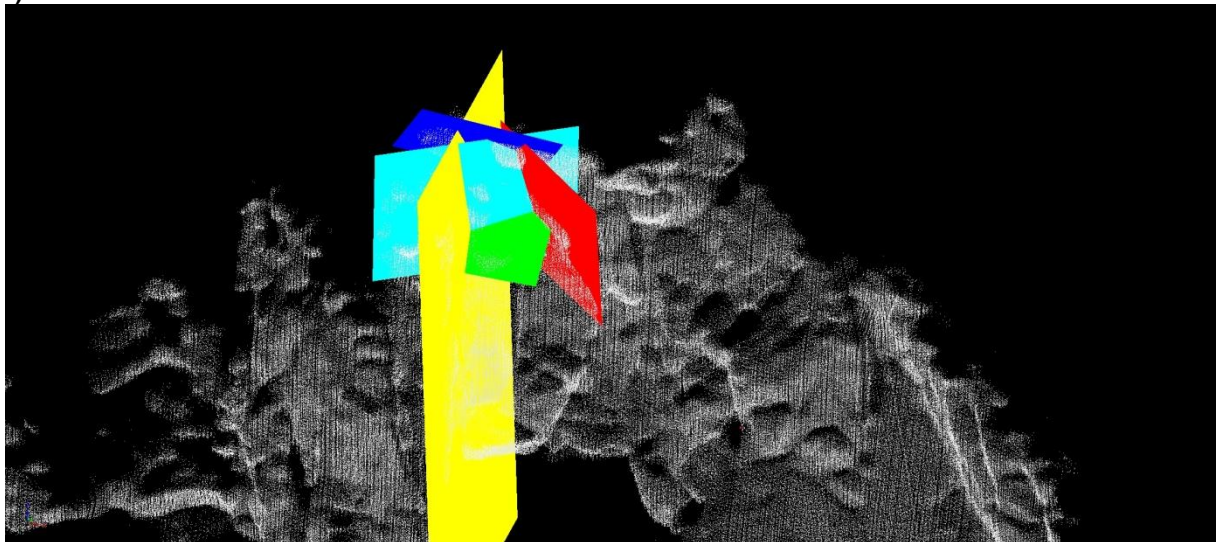
b)

Abbildung 80 a und b: Großkreise der Trennflächen und freien Flächen; a) mit den "JP Codes" b) mit den Versagensmechanismen

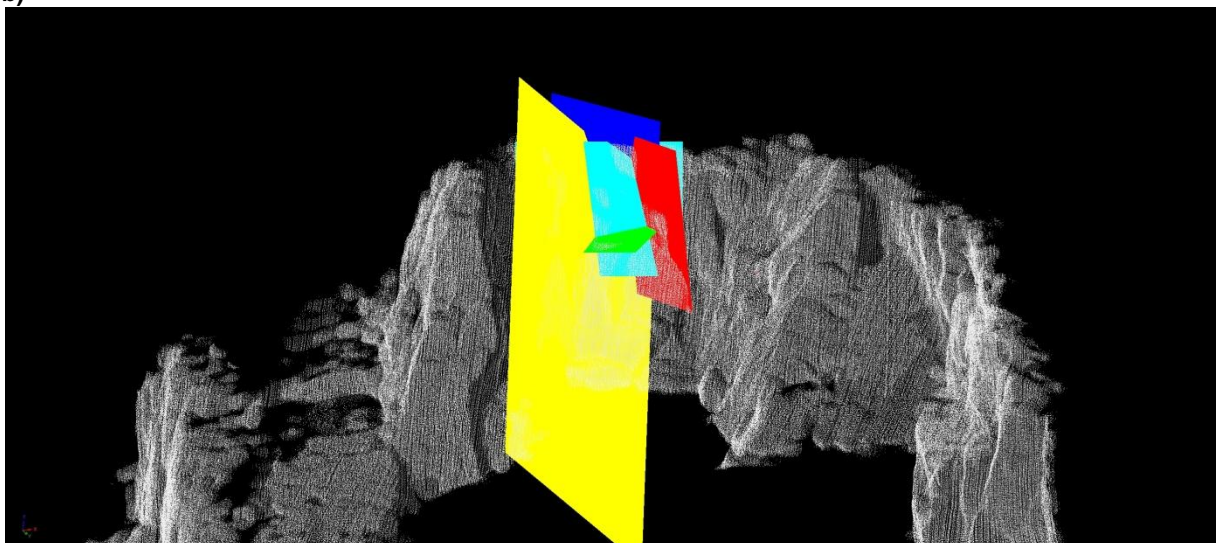
Abbildung 81 a bis c zeigen den Block "101000" im Laserscanmodell. Abbildung 82 zeigt den Block eingezeichnet in einem Foto.



a)



b)



c)

Abbildung 81 a bis c: Darstellung des Blockes "101000" im Laserscanmodell



Abbildung 82: Darstellung des Blockes "101000" anhand eines Fotos. Die Trennflächen sind farblich markiert.

Berechnung des Volumens:

Die Berechnung des Volumens erfolgte mit dem Programm "B03HPGL.EXE". Tabelle 34 listet die Trennflächenabstände im Bereich des Blockes sowie das berechnete Volumen auf.

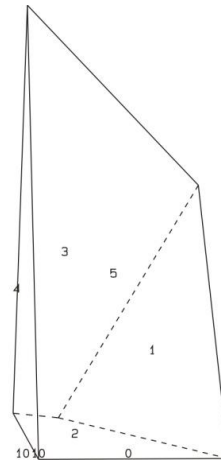
Tabelle 34: Trennflächenabstände und berechnetes Volumen des Blockes

Trennflächenabstände:		
Trennfläche 1	Rot	0,7 m
Trennfläche 2	Grün	1,2 m
Trennfläche 3	Blau	0,7 m
Trennfläche 4	Gelb	0,9 m
Freie Fläche 1	Türkis	1,0 m
Volumen: 11,3 m³		

Abbildung 83 a bis c zeigen die Form des Blockes "1010∩0", die mit dem Programm "B03HPGL.EXE" erstellt wurde.

```

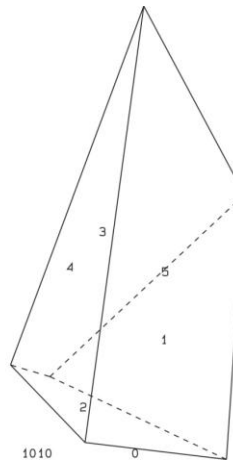
PROJECTIVE DIRECTION:
0.0 -0.8 -0.6
DIP, DIP D., DISTANCE
63.0 39.0 0.7
49.0 172.0 1.2
34.0 360.0 0.7
86.0 86.0 0.9
88.0 328.0 1.0
VOLUME= 1.130+01
    
```



a)

```

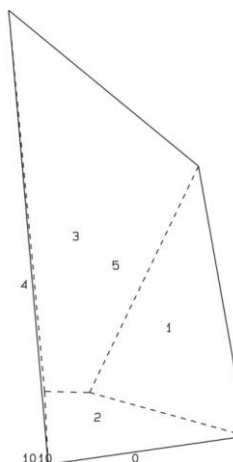
PROJECTIVE DIRECTION:
-0.3 -0.8 -0.9
DIP, DIP D., DISTANCE
63.0 39.0 0.7
49.0 172.0 1.2
34.0 360.0 0.7
86.0 86.0 0.9
88.0 328.0 1.0
VOLUME= 1.130+01
    
```



b)

```

PROJECTIVE DIRECTION:
0.1 -0.7 -0.2
DIP, DIP D., DISTANCE
63.0 39.0 0.7
49.0 172.0 1.2
34.0 360.0 0.7
86.0 86.0 0.9
88.0 328.0 1.0
VOLUME= 1.130+01
    
```



c)

Abbildung 83 a bis c: dreidimensionale Darstellung des Blockes "1010∩0"

Stabilitätsanalyse:

Abbildung 84 zeigt die dreidimensionale Stabilitätsanalyse für den Block "0010". Die schwarz unterbrochenen Linien stellen den Reibungswinkel im Abstand von 10° dar; das rote Plus "+" markiert den benötigten Reibungswinkel, bei dem sich der Block in einem Gleichgewichtszustand befindet bzw. ab dem der Block stabil ist. Die Resultate für die restlichen Blöcke befinden sich im Anhang. Tabelle 35 listet die Ergebnisse der Stabilitätsanalyse auf.

Tabelle 35: Ergebnisse der Stabilitätsanalyse

JP - Code	Blocktyp	Benötigter Reibungswinkel	Angenommener Reibungswinkel	Sicherheitsfaktor
0010	II	20°	30°	1,59

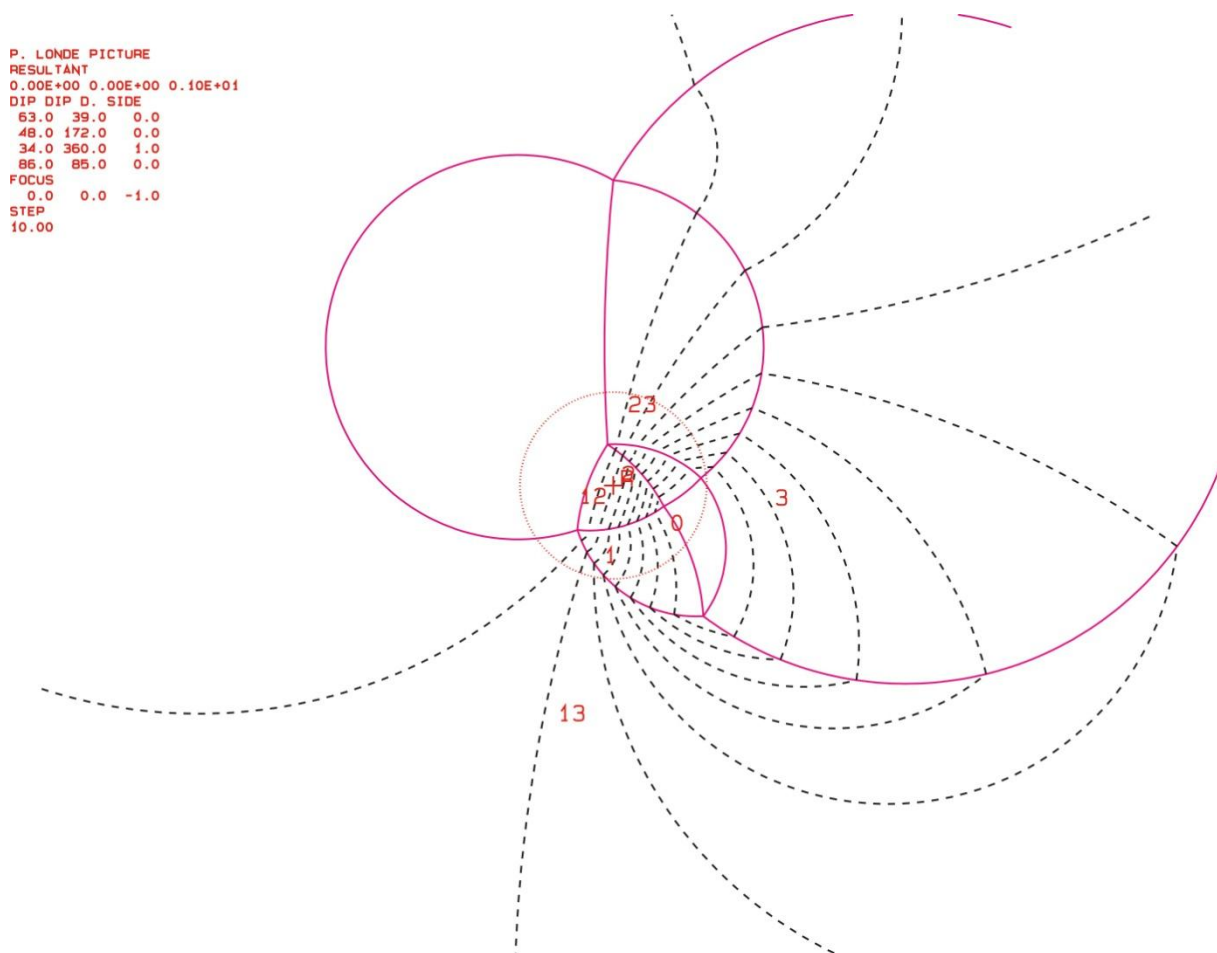


Abbildung 84: Projektion für JP "0010"; der benötigte Reibungswinkel für einen Gleichgewichtszustand ist mit einem roten + markiert

6.3.8 Block 8

Tabelle 36 zeigt die Orientierungsdaten der beteiligten Trennflächen und freien Flächen:

Tabelle 36: Orientierungsdaten der Trennflächen und freien Flächen

Nr.	Name	Farbe	Einfallsrichtung	Einfallswinkel
1	Sf_05	Rot	163	41
2	K5_01	Grün	85	86
3	K1_07	Blau	217	84
4	K3_05 (freie Fläche 1)	Gelb	166	82
5	Sf_20 (freie Fläche 2)	Rosa	168	28

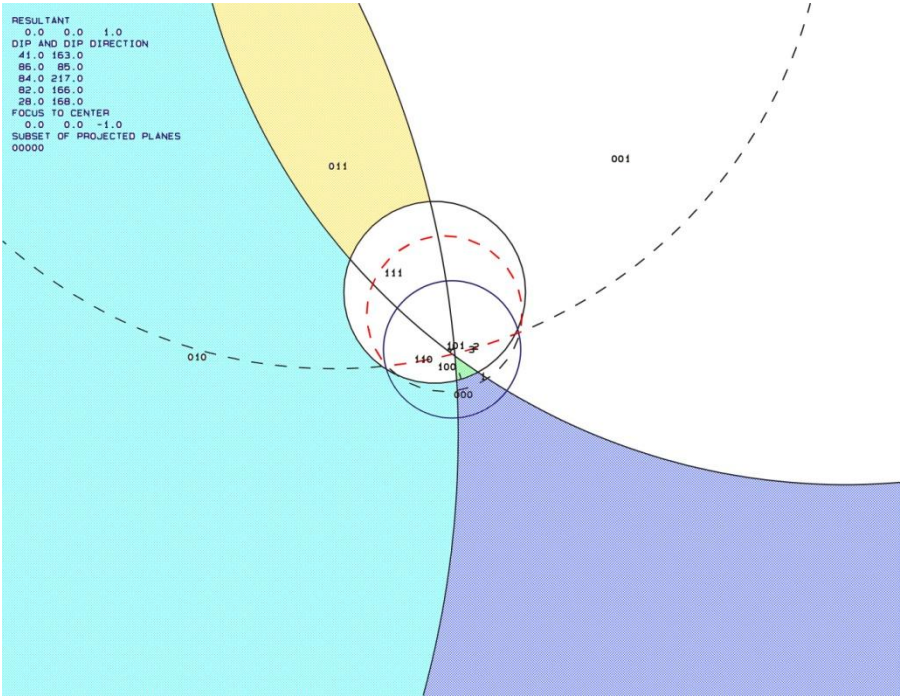
Tabelle 37 listet die "Joint Pyramid Codes" der Blöcke, die in der "Space Pyramid" (= außerhalb des rot markierten Bereiches) liegen, sowie deren "Sliding Mode" und Blocktyp auf.

Tabelle 37: JP-Codes, Sliding Mode und Blocktyp

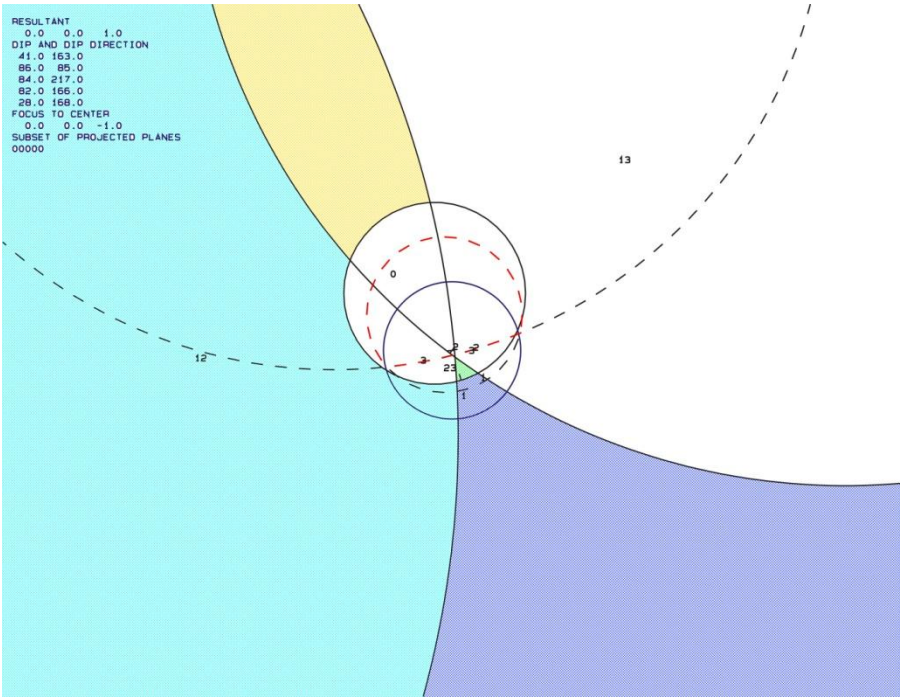
JP-Code	Sliding Mode	Blocktyp
100	23	I
000	1	I
010	12	I
011	---	III

EP-Code: 11

Die folgenden zwei Plots (Abb. 85 a und b), die mit dem Programm "B02HPGL.EXE" erstellt wurden, zeigen die Großkreise der Trennflächen und freien Flächen. Die farblich markierten Bereiche stellen potentiell instabile Blöcke dar.



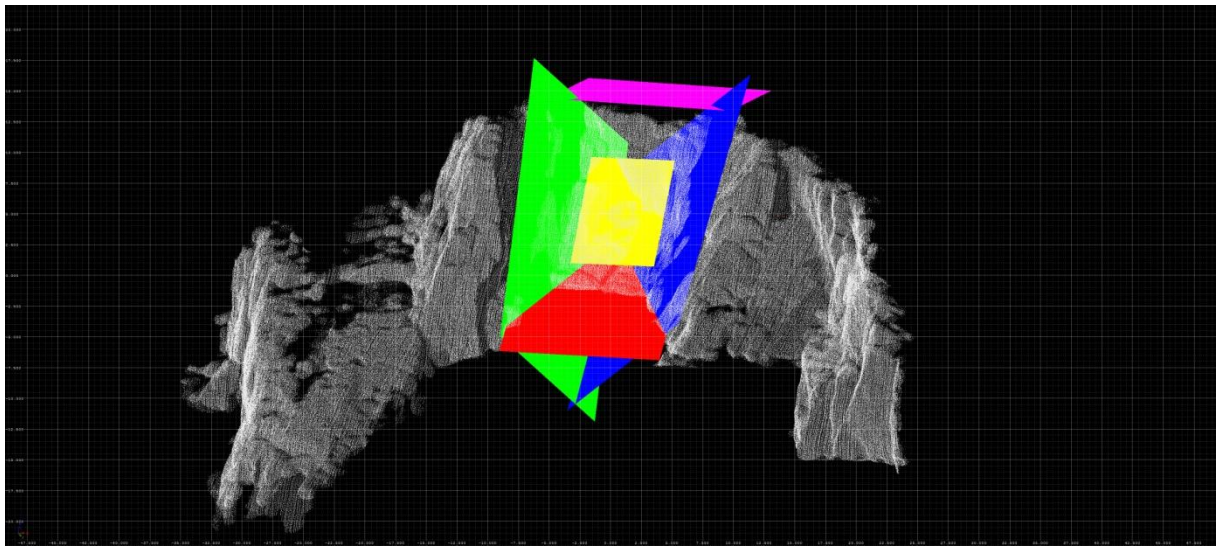
a)



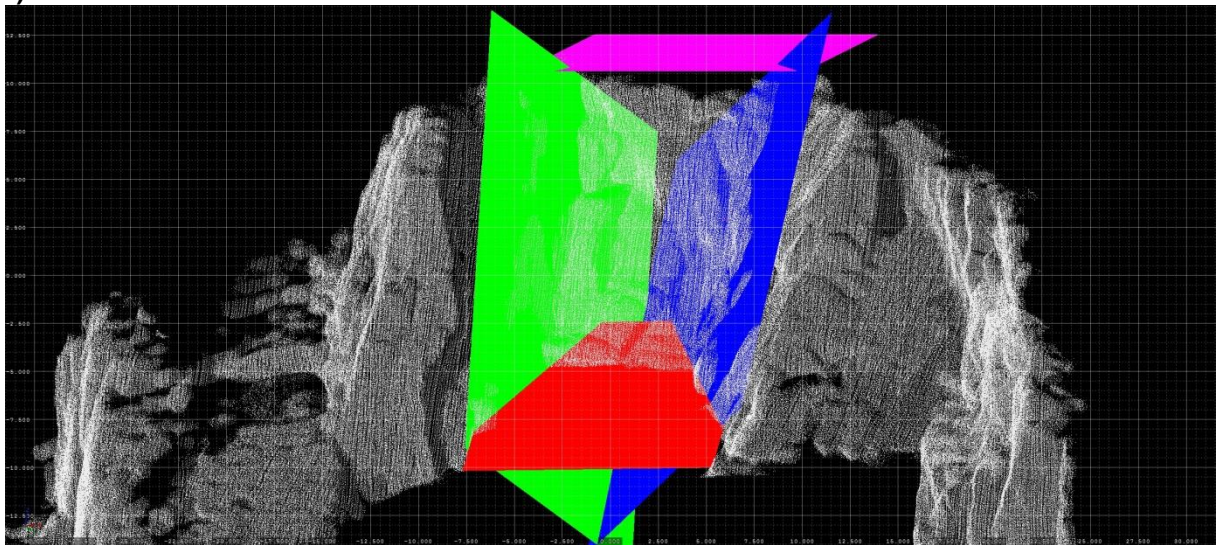
b)

Abbildung 85 a und b: Großkreise der Trennflächen und freien Flächen; a) mit den "JP Codes" b) mit den Versagensmechanismen

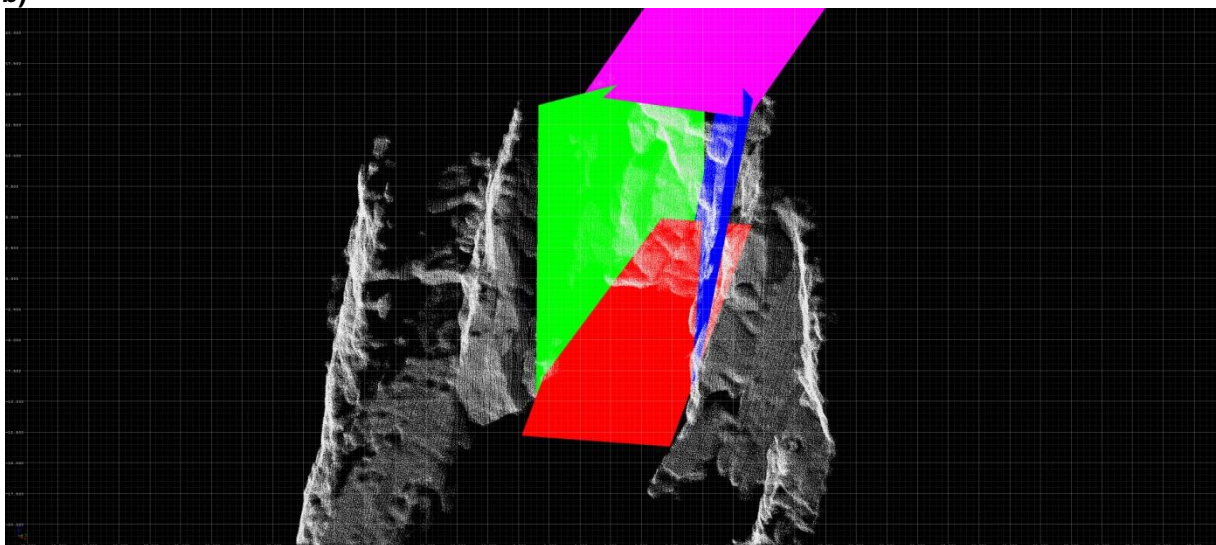
Abbildung 86 a bis c zeigen den Block "000 \cap 11" im Laserscanmodell. Abbildung 87 zeigt den Block eingezeichnet in einem Foto.



a)



b)



c)

Abbildung 86 a bis c: Darstellung des Blockes "000 \cap 11" im Laserscanmodell



Abbildung 87: Darstellung des Blockes "000011" anhand eines Fotos. Die Trennflächen sind farblich markiert.

Berechnung des Volumens:

Die Berechnung des Volumens erfolgte mit dem Programm "B03HPGL.EXE". Tabelle 38 listet die Trennflächenabstände im Bereich des Blockes sowie das berechnete Volumen auf.

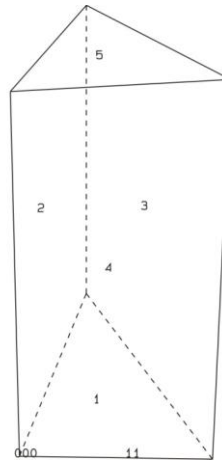
Tabelle 38: Trennflächenabstände und berechnetes Volumen des Blockes

Trennflächenabstände:		
Trennfläche 1	Rot	6,7 m
Trennfläche 2	Grün	2,4 m
Trennfläche 3	Blau	3,1 m
Trennfläche 1	Gelb	5,1 m
Freie Fläche 2	Rosa	6,7 m
Volumen: 1270 m³		

Abbildung 88 a bis c zeigen die Form des Blockes "000∩11", die mit dem Programm "B03HPGL.EXE" erstellt wurde.

```

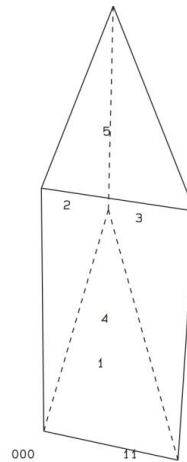
PROJECTIVE DIRECTION:
0.4 -0.9 -0.2
DIP,DIP D.,DISTANCE
41.0 163.0 6.7
86.0 85.0 2.4
84.0 217.0 3.1
82.0 166.0 5.1
28.0 166.0 6.7
VOLUME= 1.27D+03
    
```



a)

```

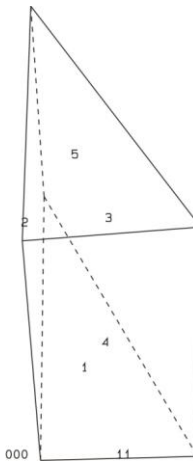
PROJECTIVE DIRECTION:
0.4 -0.7 0.6
DIP,DIP D.,DISTANCE
41.0 163.0 6.7
86.0 85.0 2.4
84.0 217.0 3.1
82.0 166.0 5.1
28.0 166.0 6.7
VOLUME= 1.27D+03
    
```



b)

```

PROJECTIVE DIRECTION:
0.1 -0.8 0.6
DIP,DIP D.,DISTANCE
41.0 163.0 6.7
86.0 85.0 2.4
84.0 217.0 3.1
82.0 166.0 5.1
28.0 166.0 6.7
VOLUME= 1.27D+03
    
```



c)

Abbildung 88 a bis c: dreidimensionale Darstellung des Blockes "000∩11"

Stabilitätsanalyse:

Abbildung 89 zeigt die dreidimensionale Stabilitätsanalyse für den Block "011". Die schwarz unterbrochenen Linien stellen den Reibungswinkel im Abstand von 10° dar; das rote Plus "+" markiert den benötigten Reibungswinkel, bei dem sich der Block in einem Gleichgewichtszustand befindet bzw. ab dem der Block stabil ist. Die Resultate für die restlichen Blöcke befinden sich im Anhang. Tabelle 39 listet die Ergebnisse der Stabilitätsanalyse auf.

Tabelle 39 : Ergebnisse der Stabilitätsanalyse

JP - Code	Blocktyp	Benötigter Reibungswinkel	Angenommener Reibungswinkel	Sicherheitsfaktor
000	I	50°	30°	0,48

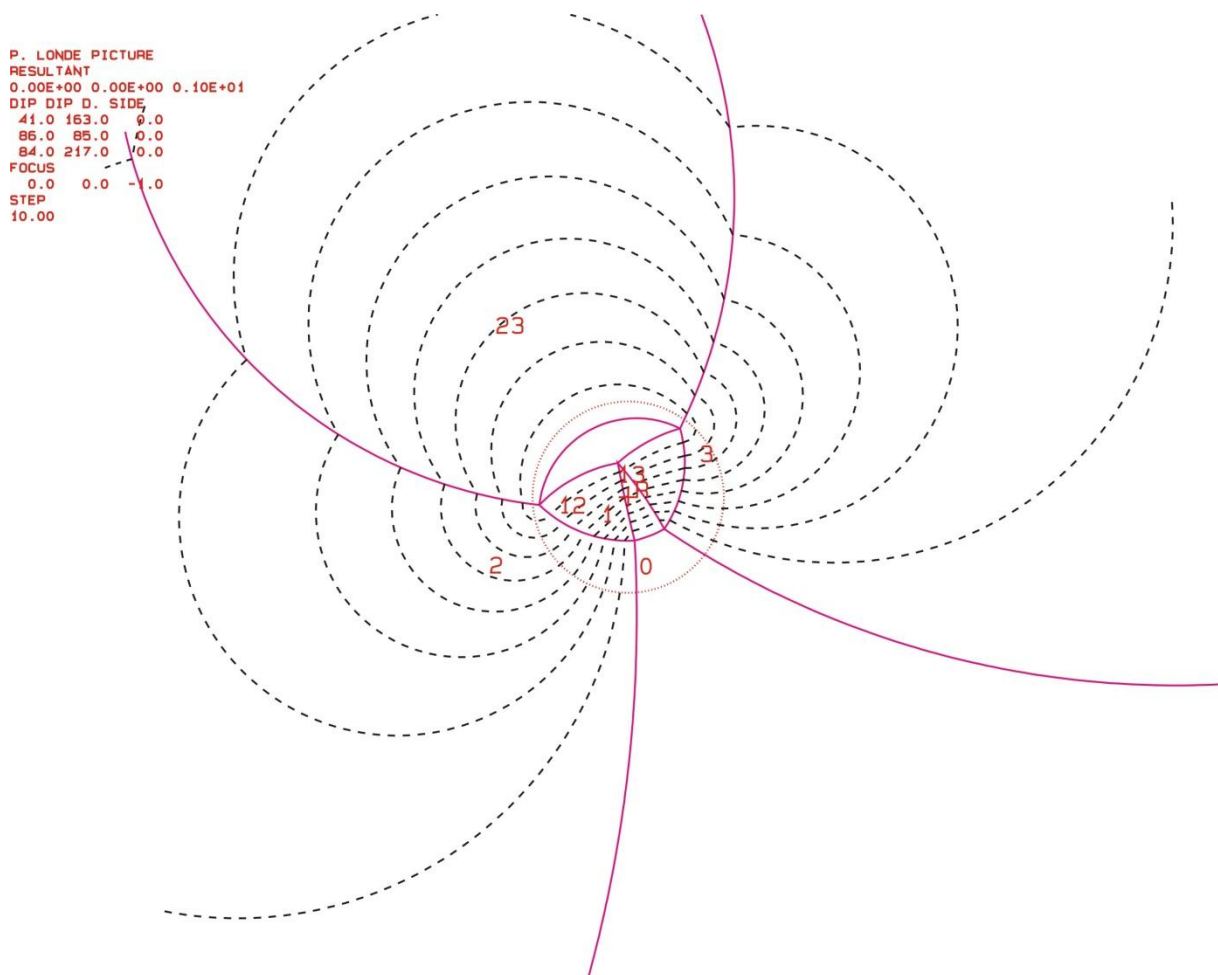


Abbildung 89: Projektion für JP "000"; der benötigte Reibungswinkel für einen Gleichgewichtszustand ist mit einem roten + markiert

7. Fazit

Diese Arbeit zeigt eine Methodik, wie man aus Fernerkundungsdaten aussagekräftige Ergebnisse erzielen kann. Durch die räumliche und hochgenaue Darstellung des Feldkofels mittels Laserscan können Strukturen, die in der Natur oft nur sehr schwierig zu erkennen sind, sehr genau beobachtet und verfolgt werden. Vor allem durch den Vergleich mit Fotos lassen sich Trennflächen und Blöcke sehr gut identifizieren. Da jeder Punkt des Laserscandatensatzes einer x-, y- und z- Koordinate zugeordnet werden kann und georeferenziert ist, lassen sich diese identifizierten Blöcke und Trennflächen ortsbezogen und eindeutig im dreidimensionalen Reliefmodell darstellen. Im Zuge dieser Arbeit wurde eine Arbeitsweise gefunden, wie man geologische Gefüge und Strukturen in Bezug auf die Morphologie in einem dreidimensionalen Computermodell präsentieren kann.

In Kombination mit der Blocktheorie stellt diese Methodik eine sehr effektive und moderne Möglichkeit dar, um Aussagen über Stabilität, Volumen und Form der Blöcke zu tätigen. Im Vergleich zu anderen Arbeiten werden die Trennflächen und Blöcke nicht durch statistische Methoden ermittelt, sondern im dreidimensionalen Reliefmodell ortsbezogen bestimmt. Dadurch erhält man ein wesentlich realistischeres Abbild der Geologie.

Ein wichtiger Punkt ist, dass man Stabilität, Volumen und Form für jeden identifizierten Block spezifisch bestimmen kann und dabei hochgenaue Ergebnisse erhält. Diese Ergebnisse können in weiterer Folge für mögliche Sicherungs- oder Baumaßnahmen herangezogen werden.

Vor allem für unzugängliche und gefährliche Gebiete stellt diese moderne Art der Trennflächenkartierung und Stabilitätsanalyse eine wesentliche Erleichterung dar. Die Messungen können aus mehreren Hundert Metern erfolgen. Ein weiterer Vorteil dieser Technologie sind die Zeitersparnis im Vergleich zu einer konventionellen Trennflächenkartierung und die hohe Präzision der Messungen, die im mm-Bereich liegt. Des Weiteren erhält man durch den vollautomatischen Messprozess eines Laserscanners eine objektive Dokumentation des Objektzustandes.

Im Gipfelbereich des Feldkofels wurden hauptsächlich "Keyblöcke" (Blocktyp I) und "potentielle Keyblöcke" (Blocktyp II) identifiziert. Diese Resultate zeigen ein hohes Steinschlagpotential bzw. große Instabilitäten des Gipfelbereiches an und decken sich mit den Ergebnissen mehrerer bereits durchgeführter Untersuchungen des Gebietes. Die Stabilitätsanalyse durch die Bestimmung des Sicherheitsfaktors bestätigen diese Aussagen.

Die berechneten Blockvolumina bewegen sich meist in einem Bereich von etwa 10 m³ bis 40 m³. Aufgrund der geologischen Gegebenheiten und der starken Zerklüftung des Kalksteins im Gipfelbereich ist es jedoch unwahrscheinlich, dass sich diese Felsmassen auf einmal von der Wand lösen. Wahrscheinlicher ist es, dass sich kontinuierlich kleinere Blöcke lösen.

Diese Masterarbeit zeigt eine moderne und schlüssige Vorgangsweise, wie man auf der Basis von hochgenauen Laserscandaten Aussagen über die geologischen Verhältnisse, wie zB Stabilitäten, Blockvolumina usw. treffen und die Ergebnisse sehr anschaulich und verständlich in einem dreidimensionalen Reliefmodel präsentieren kann.

Literaturverzeichnis

Anderle, N.; Geologische Karte der Republik Österreich 1:50.000, Blatt 200 Arnoldstein; GBA Wien; 1977

Bergamin S.; Die Stabilität der Felsfundamente von Staumauern; vdf Hochschulverlag AG; 2010

Brady B. H. G., Brown E.T.; Rock; Mechanics For Underground Mining; Springer; 2004

Eichler et al.; Fels- und Tunnelbau II; expert verlag; 2007

Eichler et al.; Fels- und Tunnelbau; expert verlag; 2000

Fekete S., Diederichs M.; Integration of three-dimensional laserscanning with discontinuum modelling for stability analysis of tunnels in blocky rockmasses; International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 57; 2013; S. 11-23

George, Michael F, Sitar N.; Block Theory Application to Scour Assessment of Unlined Rock Spillways; Department of Civil & Environmental Engineering; University of California, Berkeley, California. Report No. UCB GT 12 02; Mai 2012

Goodman, R. E. & Shi, G. H.; Block Theory and Its Application to Rock Engineering; University of California, Berkeley; 1985

Grün, A. und Kahmen, H. (Hrsg.); Optical 3-D Measurement Techniques V; Wichmann; Heidelberg; 2001; S. 571- 578.

Haring A.; Diplomarbeit "Modellierung terrestrischer Laserscan-Daten"; Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung; TU Wien; 2003

Kern F.; Terrestrisches Laserscanning kurz & bündig; i3mainz – Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik; FH Mainz. 2007

Liu Q.; Modelling in Engineering Geology; Skript GEO.941; TU Graz; Master curriculum; 2012

Pfeifer, N., Rottensteiner, G.; The Riegl Laser Scanner for the Survey of the Interiors of Schönbrunn Palace; 2001

RiSCAN PRO Help, version: 1.5.2sp2. RIEGL LMS GmbH. 2009

Weber S.; Masterarbeit "Stabilitätsanalyse mittels terrestrischem Laserscan am Feldkofel in Bad Bleiberg, Kärnten"; Institut für angewandte Geowissenschaften; TU Graz. 2013

Webseiten:

KAGIS der Kärntner Landesregierung; Stand: 13.10.2014

<http://gis.ktn.gv.at>

Wikipedia.org - Terrestrisches Laserscanning; Stand: 14.07.2014

http://de.wikipedia.org/wiki/Terrestrisches_Laserscanning

Plan L. Präsentation "Tektonik". Wildalpen. VÖH. 2006; Stand: 28.10.2014

<http://slideplayer.de/slide/875/>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Geographische Lage des Feldkofels, Maßstab 1:50000	2
Abbildung 2: Geographische Lage des Feldkofels, Maßstab 1:20000.....	2
Abbildung 3: Ausschnitt aus Geologischer Karte, Maßstab 1:50000, Blatt 200 – Arnoldstein; der Feldkofel ist rot markiert [aus Anderle; 1977].....	3
Abbildung 4: Prinzip des terrestrischen Laserscannings [Quelle: Haring, 2003].....	4
Abbildung 5: Darstellung der Objekterfassung von mehreren Standpunkten [Quelle: Pfeifer und Rottensteiner, 2001]	7
Abbildung 6: Laserscan Screenshot, Entfernungen der Scanpositionen vom Gipfelbereich des Feldkofel [Weber, 2013].....	13
Abbildung 7: Koordinaten importieren.....	15
Abbildung 8: "Translation for POP Matrix"	15
Abbildung 9: Berechnung SOP-Matrix	16
Abbildung 10: "Find corresponding points"	16
Abbildung 11: Vergleich Scanpos. 1 - Scan 4 (blau) mit Scanpos. 2 - Scan 3 (grün)	17
Abbildung 12: Vergleich Scanpos. 1 - Scan 4 (blau) mit Scanpos. 2 - Scan 3 (grün)	17
Abbildung 13: Erstellung einer Polydatei	18
Abbildung 14: Erstellung einer Polydatei, "Plane Surface Filter"	19
Abbildung 15: Plugin "Multi Station Adjustment"	20
Abbildung 16: Ergebnis nach ersten Analysedurchgang.....	21
Abbildung 17: Ergebnis nach zweitem Analysedurchgang.....	21
Abbildung 18: Ergebnis nach drittem Analysedurchgang.....	21
Abbildung 19: Veränderung der Scanpostionen.....	22

Abbildung 20: Vergleich nach Anwendung von "MSA"; Scanposition 1 - Scan 4 (blau), Scanposition 2 - Scan 3 (grün)	23
Abbildung 21: Erstellung einer Polydatei	24
Abbildung 22: Erstellte Polydatei	25
Abbildung 23: Darstellung von Einfallswinkel und Einfallrichtung [Quelle: Plan, 2006]	29
Abbildung 24: Darstellung der Persistenz von Trennflächen [Quelle: Brady, 2004].....	29
Abbildung 25: Markieren eines Bereiches der Trennfläche	32
Abbildung 26: Erstellen der Trennfläche	32
Abbildung 27: Erstellte Trennfläche	33
Abbildung 28: Veränderung von Position und Orientierung.....	33
Abbildung 29: Filteroperation "Octree"	34
Abbildung 30: Erstellte Fläche	35
Abbildung 31: Punktwolke triangulieren.....	35
Abbildung 32: triangulierte Punktwolke	36
Abbildung 33: Punktwolke vor dem Triangulieren	36
Abbildung 34: "Smooth and decimate" der triangulierten Daten.....	37
Abbildung 35: Einstellung der Parameter.....	37
Abbildung 36: Erstellung der Flächen	38
Abbildung 37: Eingabe der Koordinaten im "Object Inspector".....	38
Abbildung 38: Erstellung der Höhenlinien	39
Abbildung 39: Gipfelbereich mit Konturlinien, Abstand: 0,25 m.....	39
Abbildung 40: Gipfelbereich mit Konturlinien, Abstand 0,25 m.....	40
Abbildung 41: Gipfelbereich mit Konturlinien, Abstand 0,5 m.....	40

Abbildung 42: Auswahl der verschiedenen Ansichtseinstellungen	41
Abbildung 43: Darstellung "False Color - Height"	41
Abbildung 44: Darstellung "False Color - Height" kombiniert mit den Konturlinien (Abstand: 0,25 m)	42
Abbildung 45: Gipfelbereich mit den eingebauten Trennflächen	44
Abbildung 46: Gipfelbereich mit den eingebauten Trennflächen. Sf...blau, K1...rot, K2...grün, K3...gelb, K4...türkis, K5...rosa, K6...olivgrün.....	44
Abbildung 47: Gipfelbereich mit K1	45
Abbildung 48: Darstellung der Blocktypen, nach [Liu, 2012]	50
Abbildung 49: Einteilung der Blocktypen, nach [Liu, 2012]	51
Abbildung 50 a und b: Großkreise der Trennflächen und freien Flächen; a) mit den "JP Codes" b) mit den Versagensmechanismen	54
Abbildung 51 a bis c: Darstellung des Blockes "011∩010" im Laserscanmodell	55
Abbildung 52: Darstellung des Blockes "011∩010" anhand eines Fotos. Die Trennflächen sind farblich markiert.	56
Abbildung 53 a bis c: dreidimensionale Darstellung des Blockes"011∩010"	57
Abbildung 54: Projektion für JP "011"; der benötigte Reibungswinkel für einen Gleichgewichtszustand ist mit einem roten + markiert	58
Abbildung 55 a und b: Großkreise der Trennflächen und freien Flächen; a) mit den "JP Codes" b) mit den Versagensmechanismen	60
Abbildung 56 a bis c: Darstellung des Blockes "101∩010" im Laserscanmodell	61
Abbildung 57: Darstellung des Blockes "101∩010" anhand eines Fotos. Die Trennflächen sind farblich markiert.	62
Abbildung 58 a bis c: dreidimensionale Darstellung des Blockes"101∩010"	63
Abbildung 59: Projektion für JP "001"; der benötigte Reibungswinkel für einen Gleichgewichtszustand ist mit einem roten + markiert	64

Abbildung 60 a und b: Großkreise der Trennflächen und freien Flächen; a) mit den "JP Codes" b) mit den Versagensmechanismen.....	66
Abbildung 61 a bis c: Darstellung des Blockes "001∩001" im Laserscanmodell	67
Abbildung 62: Darstellung des Blockes "001∩001" anhand eines Fotos. Die Trennflächen sind farblich markiert.	68
Abbildung 63 a bis c: dreidimensionale Darstellung des Blockes"001∩001"	69
Abbildung 64: Projektion für JP "011"; der benötigte Reibungswinkel für einen Gleichgewichtszustand ist mit einem roten + markiert	70
Abbildung 65 a und b: Großkreise der Trennflächen und freien Flächen; a) mit den "JP Codes" b) mit den Versagensmechanismen.....	72
Abbildung 66 a bis c: Darstellung des Blockes "00∩0111" im Laserscanmodell	73
Abbildung 67: Darstellung des Blockes "00∩0111" anhand eines Fotos. Die Trennflächen sind farblich markiert.	74
Abbildung 68 a bis c: dreidimensionale Darstellung des Blockes "00∩0111"	75
Abbildung 69: Projektion für JP "00"; der benötigte Reibungswinkel für einen Gleichgewichtszustand ist mit einem roten + markiert	76
Abbildung 70 a und b: Großkreise der Trennflächen und freien Flächen; a) mit den "JP Codes" b) mit den Versagenmechanismen.....	78
Abbildung 71 a bis c: Darstellung des Blockes "100∩1" im Laserscanmodell	79
Abbildung 72: Darstellung des Blockes "100∩1" anhand eines Fotos. Die Trennflächen sind farblich markiert.....	80
Abbildung 73 a bis c: dreidimensionale Darstellung des Blockes "100∩1"	81
Abbildung 74: Projektion für JP "100"; der benötigte Reibungswinkel für einen Gleichgewichtszustand ist mit einem roten + markiert	82
Abbildung 75 a und b: Großkreise der Trennflächen und freien Flächen; a) mit den "JP Codes" b) mit den Versagensmechanismen.....	84
Abbildung 76 a bis c: Darstellung des Blockes 01∩100" im Laserscanmodell	85

Abbildung 77: Darstellung des Blockes "01∩100" anhand eines Fotos. Die Trennflächen sind farblich markiert.....	86
Abbildung 78 a bis c: dreidimensionale Darstellung des Blockes "01∩100"	87
Abbildung 79: Projektion für JP "01"; der benötigte Reibungswinkel für einen Gleichgewichtszustand ist mit einem roten + markiert	88
Abbildung 80 a und b: Großkreise der Trennflächen und freien Flächen; a) mit den "JP Codes" b) mit den Versagensmechanismen.....	90
Abbildung 81 a bis c: Darstellung des Blockes "1010∩0" im Laserscanmodell	91
Abbildung 82: Darstellung des Blockes "1010∩0" anhand eines Fotos. Die Trennflächen sind farblich markiert.	92
Abbildung 83 a bis c: dreidimensionale Darstellung des Blockes "1010∩0"	93
Abbildung 84: Projektion für JP "0010"; der benötigte Reibungswinkel für eine Gleichgewichtszustand ist mit einem roten + markiert	94
Abbildung 85 a und b: Großkreise der Trennflächen und freien Flächen; a) mit den "JP Codes" b) mit den Versagensmechanismen.....	96
Abbildung 86 a bis c: Darstellung des Blockes "000∩11" im Laserscanmodell	97
Abbildung 87: Darstellung des Blockes "000∩11" anhand eines Fotos. Die Trennflächen sind farblich markiert.	98
Abbildung 88 a bis c: dreidimensionale Darstellung des Blockes "000∩11"	99
Abbildung 89: Projektion für JP "000"; der benötigte Reibungswinkel für einen Gleichgewichtszustand ist mit einem roten + markiert	100

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: GPS Daten aller Scanpositionen; Sx – Nummer der Scanposition; Rx_Sx – Reflektornummer in Bezug auf die jeweilige Scanposition; Koordinaten in [m]; KQ Lage und Höhe gibt die Standardabweichungen der Messungen an (in [m]); Koordinatensystem: Gauss-Krüger [Quelle: Weber, 2013].....	14
Tabelle 2: Einteilung der Trennflächen [Quelle: www.wikipedia.org, 12.07.2014].....	26
Tabelle 3: Kluftöffnungsweiten, Gegenüberstellung der Benennung und Einteilung, ISRM: International Society for Rock Mechanics, IAEG: International Association for Engineering Geology and the Environment [Quelle: Eichler et al., 2007].....	27
Tabelle 4: Kategorien der Trennflächenabstände, IAEG: International Association for Engineering Geology and the Environment [Quelle: Eichler et al. 2007].....	27
Tabelle 5: Beschreibung der Oberflächenbeschaffenheiten [Quelle: Eichler, 2000].....	28
Tabelle 6: Verwitterungsgrade nach Empfehlungen von ISRM (International Society for Rock Mechanics) und IAEG (International Association for Engineering Geology) [Quelle: Eichler, 2000].....	30
Tabelle 7: Orientierungsdaten der Schieferung (Sf) und der sechs Kluftscharen (K1 - K6). (EW...Einfallswinkel; ER...Einfallsrichtung).....	43
Tabelle 8: Orientierungsdaten der Trennflächen und freien Flächen.....	53
Tabelle 9: Joint-Pyramid Codes, Sliding Mode und Blocktyp.....	53
Tabelle 10: Trennflächenabstände und berechnetes Volumen des Blockes	56
Tabelle 11: Ergebnisse der Stabilitätsanalyse.....	58
Tabelle 12: Orientierungsdaten der Trennflächen und freien Flächen.....	59
Tabelle 13: Joint-Pyramid Codes, Sliding Mode und Blocktyp.....	59
Tabelle 14: Trennflächenabstände und berechnetes Volumen des Blockes	62
Tabelle 15: Ergebnisse der Stabilitätsanalyse.....	64
Tabelle 16: Orientierungsdaten der Trennflächen und freien Flächen.....	65

Tabelle 17: Joint-Pyramid Codes, Sliding Mode und Blocktyp	65
Tabelle 18: Trennflächenabstände und berechnetes Volumen des Blockes	68
Tabelle 19: Ergebnisse der Stabilitätsanalyse.....	70
Tabelle 20 : Orientierungsdaten der Trennflächen und freien Flächen.....	71
Tabelle 21 : Joint-Pyramid Codes, Sliding Mode und Blocktyp.....	71
Tabelle 22: Trennflächenabstände und berechnetes Volumen des Blockes	74
Tabelle 23: Ergebnisse der Stabilitätsanalyse.....	76
Tabelle 24: Orientierungsdaten der Trennflächen und freien Flächen.....	77
Tabelle 25: Joint-Pyramid Codes, Sliding Mode und Blocktyp	77
Tabelle 26: Trennflächenabstände und berechnetes Volumen des Blockes	80
Tabelle 27: Ergebnisse der Stabilitätsanalyse.....	82
Tabelle 28: Orientierungsdaten der Trennflächen und freien Flächen.....	83
Tabelle 29: Joint-Pyramid Codes, Sliding Mode und Blocktyp	83
Tabelle 30: Trennflächenabstände und berechnetes Volumen des Blockes	86
Tabelle 31: Ergebnisse der Stabilitätsanalyse.....	88
Tabelle 32: Orientierungsdaten der Trennflächen und freien Flächen.....	89
Tabelle 33: Joint-Pyramid Codes, Sliding Mode und Blocktyp	89
Tabelle 34: Trennflächenabstände und berechnetes Volumen des Blockes	92
Tabelle 35: Ergebnisse der Stabilitätsanalyse.....	94
Tabelle 36: Orientierungsdaten der Trennflächen und freien Flächen.....	95
Tabelle 37: Joint-Pyramid Codes, Sliding Mode und Blocktyp	95
Tabelle 38: Trennflächenabstände und berechnetes Volumen des Blockes	98
Tabelle 39 : Ergebnisse der Stabilitätsanalyse.....	100

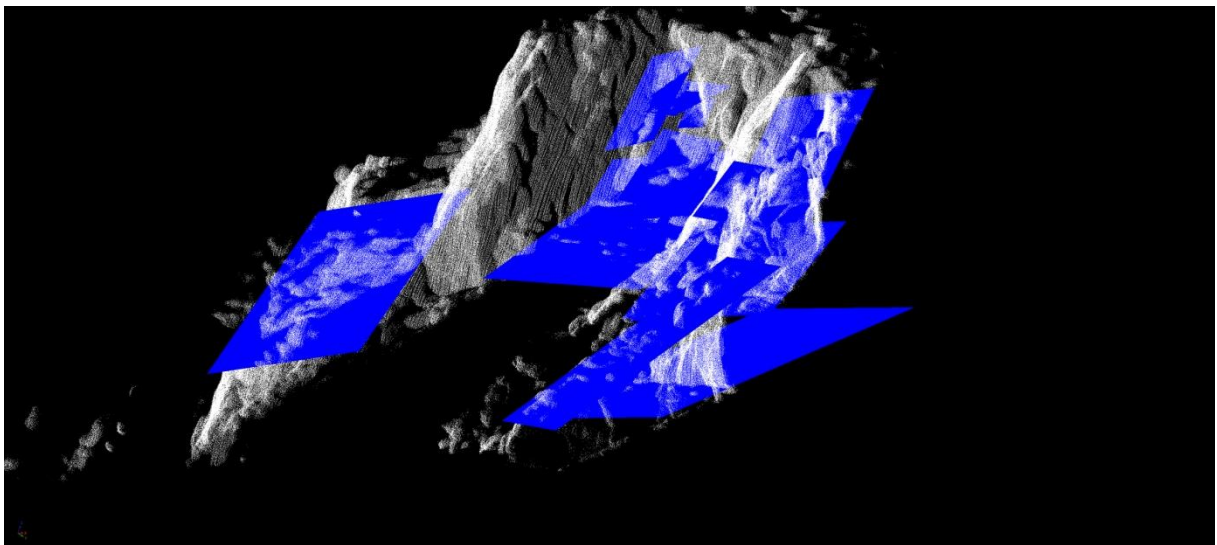
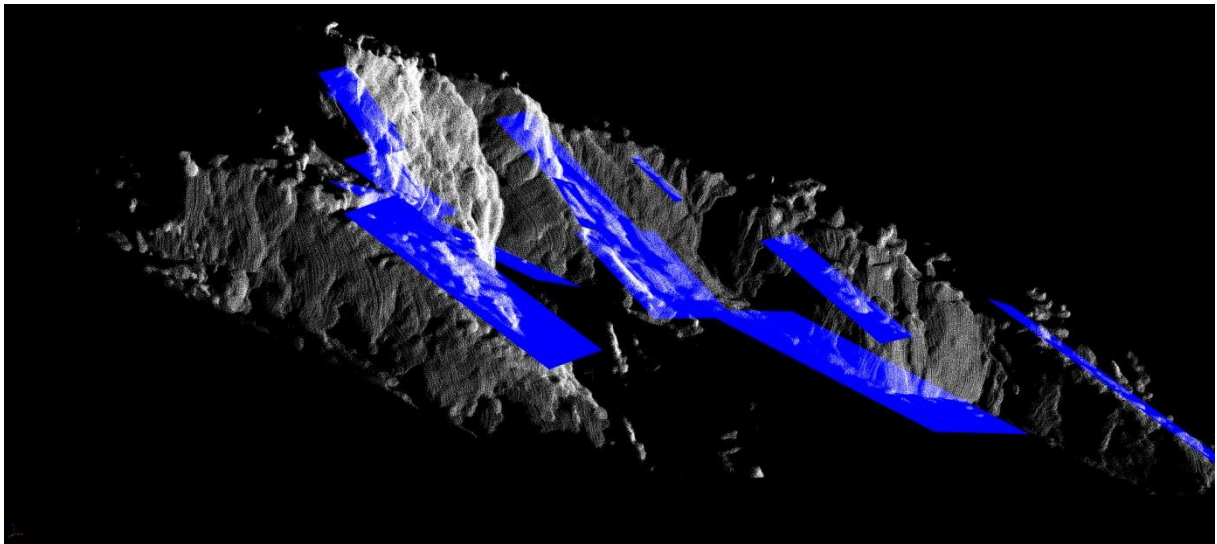
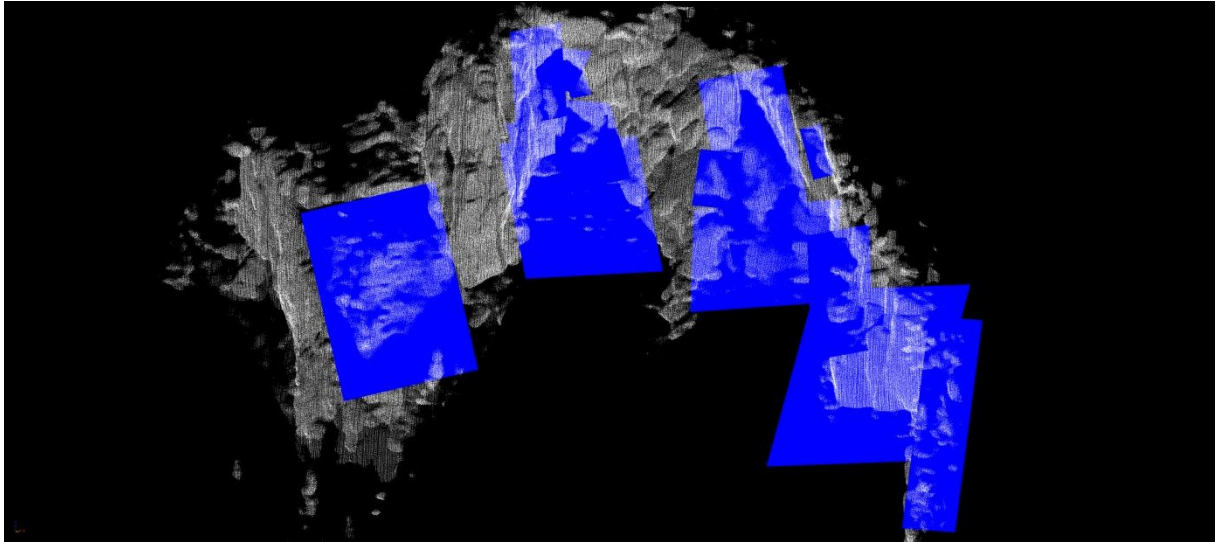
Anhang

Der Anhang ist in folgende Teilbereiche gegliedert:

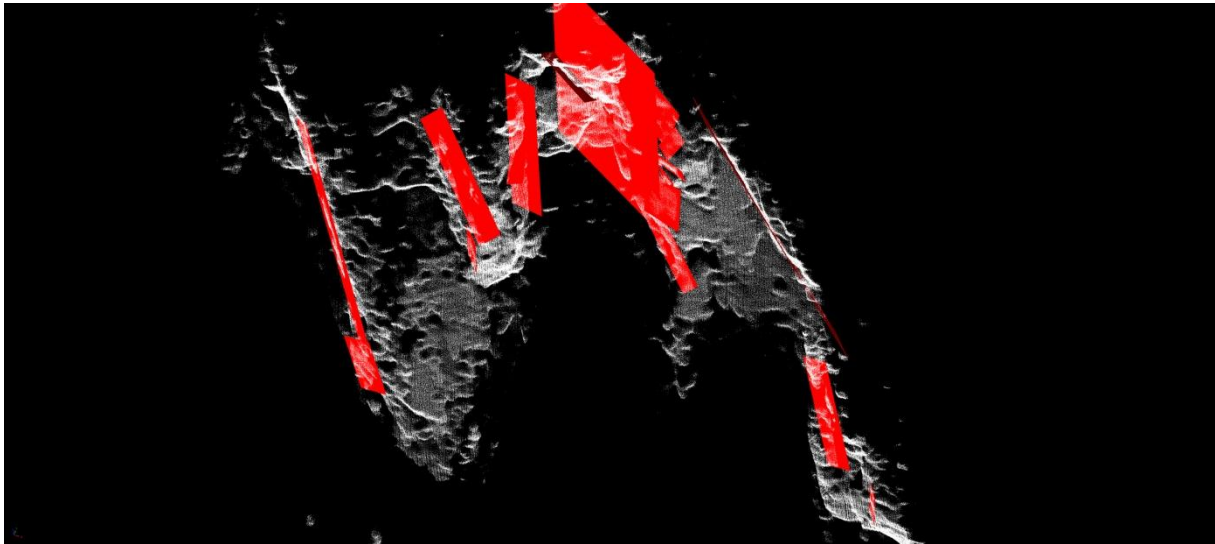
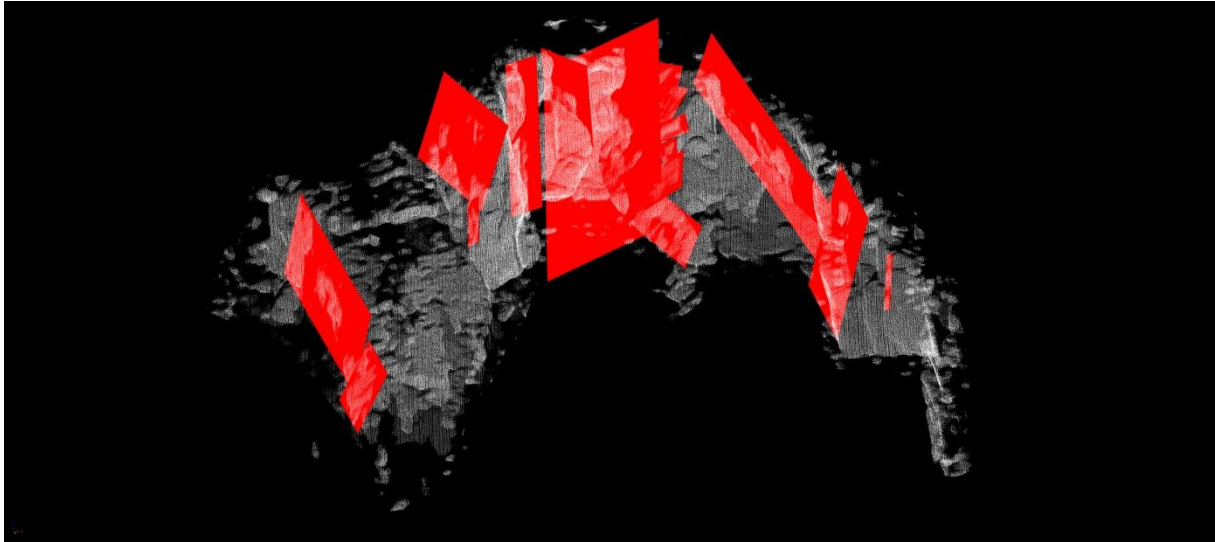
A) RiSCAN Pro - Laserscanmodell	113
B) Ergebnisse Blocktheorie	121
I. Block 1	122
II. Block 2	125
III. Block 3	128
IV. Block 4	130
V. Block 5	131
VI. Block 6	132
VII. Block 7	133
VIII. Block 8	136

A) RiScan Pro - Laserscanmodell

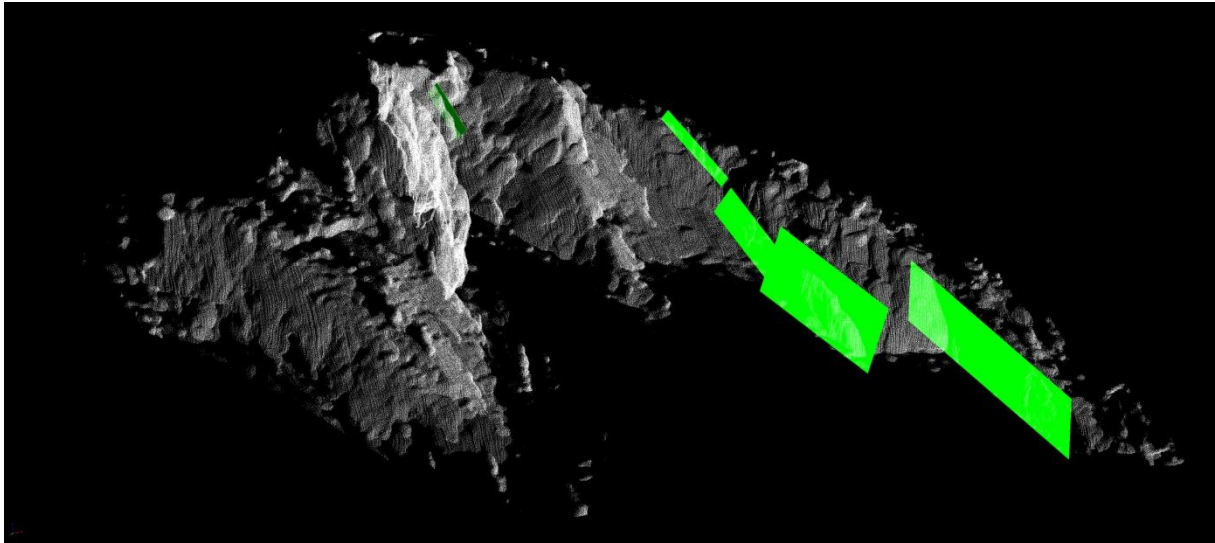
In den folgenden Seiten sind mehrere Ausschnitte des dreidimensionalen Reliefmodells, das mit dem Programm "RiScan Pro" erstellt wurde, abgebildet. Es werden Ansichten des gesamten Kluftmodells sowie der einzelnen Kluftscharen gezeigt.



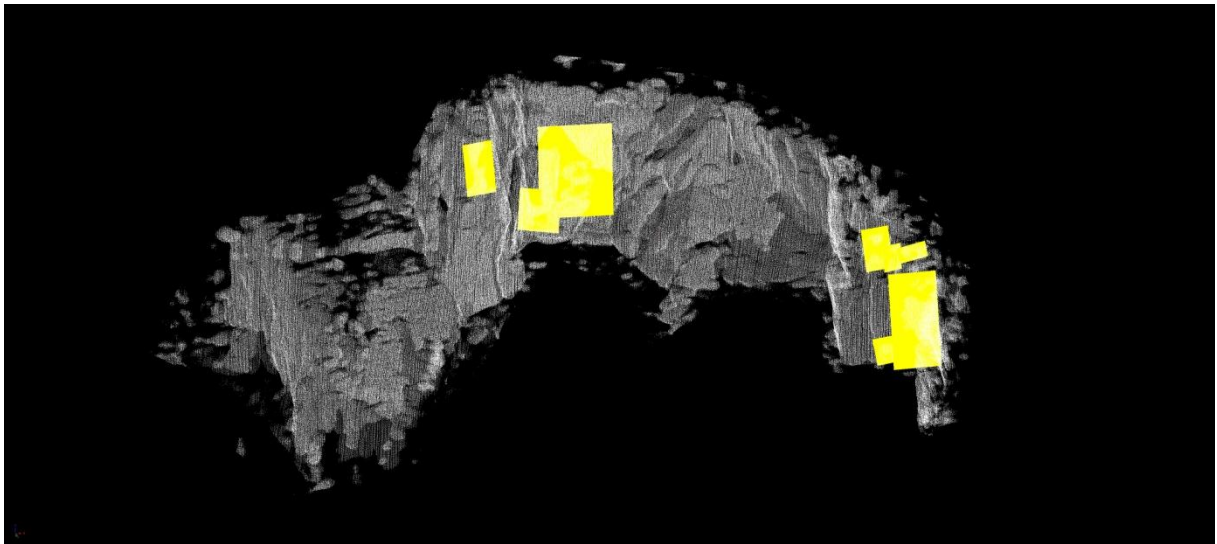
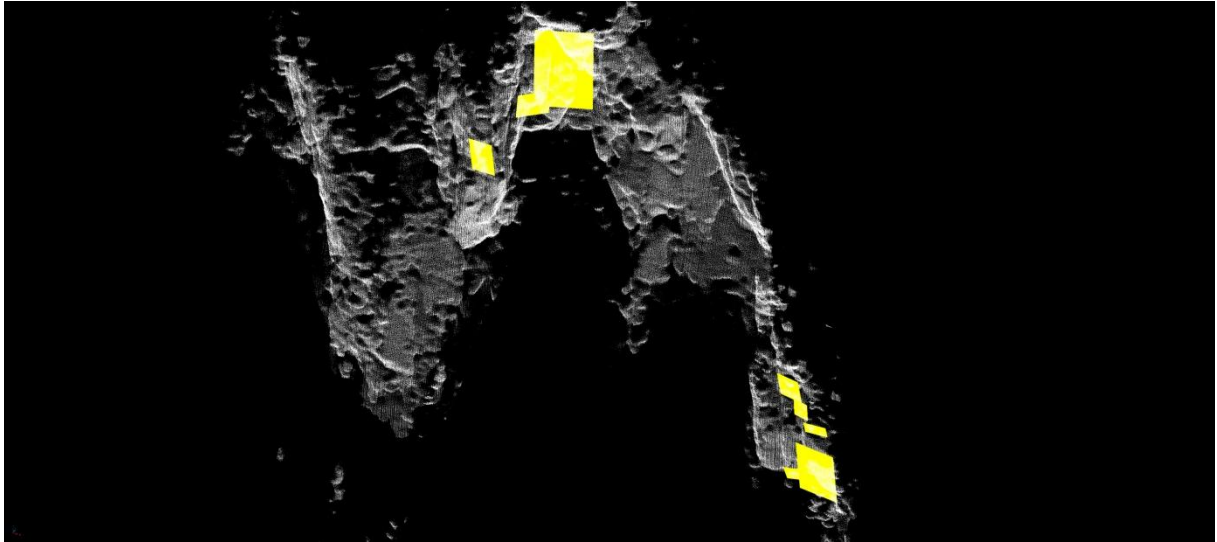
Gipfelbereich mit Bankung



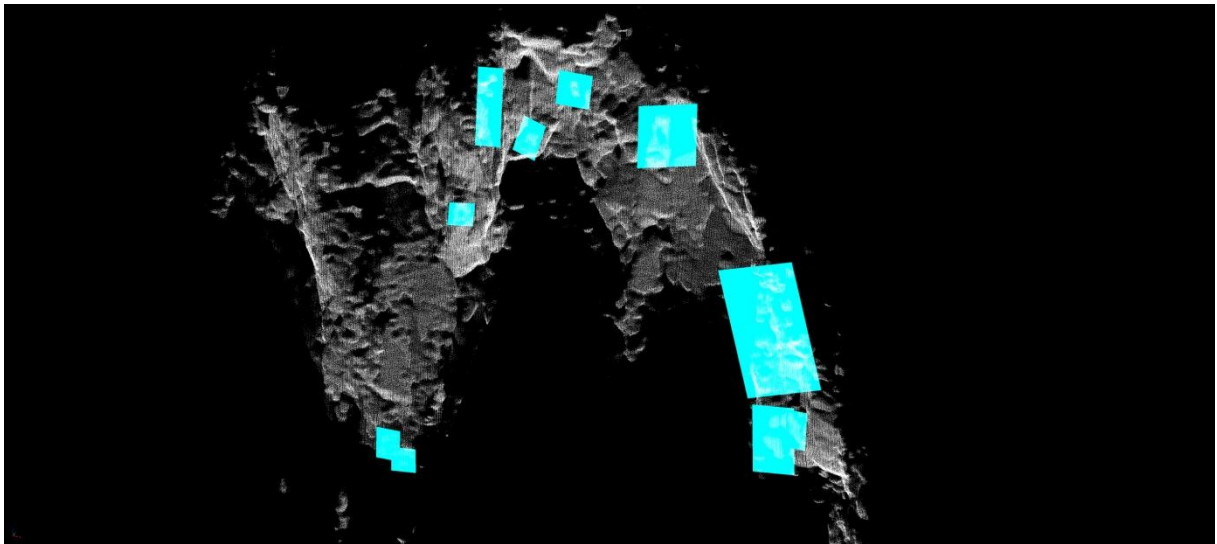
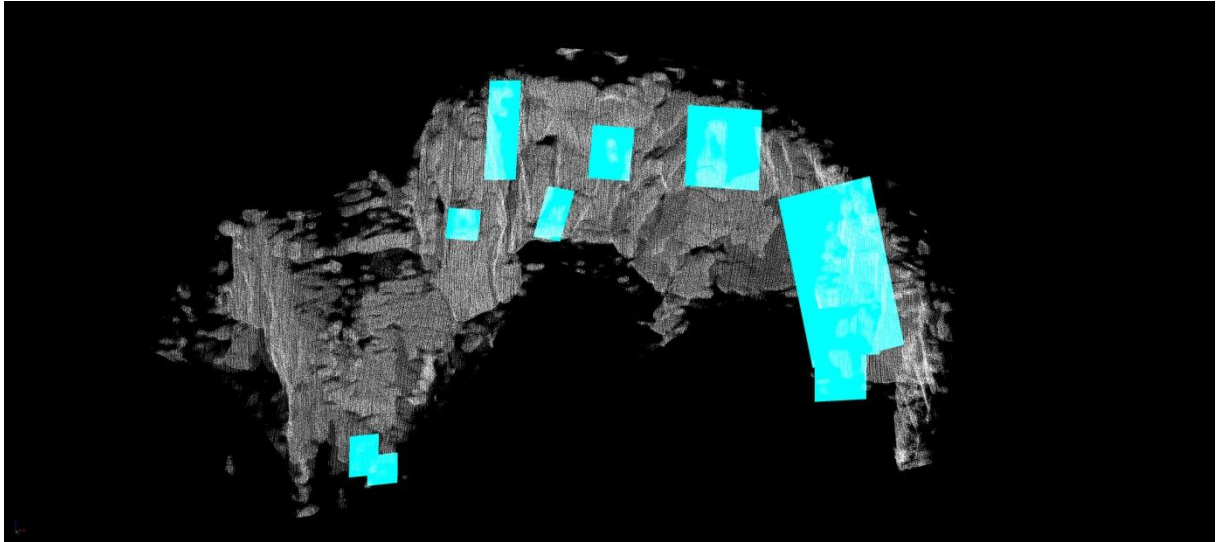
Gipfelbereich mit Kluftschar 1 (rot)



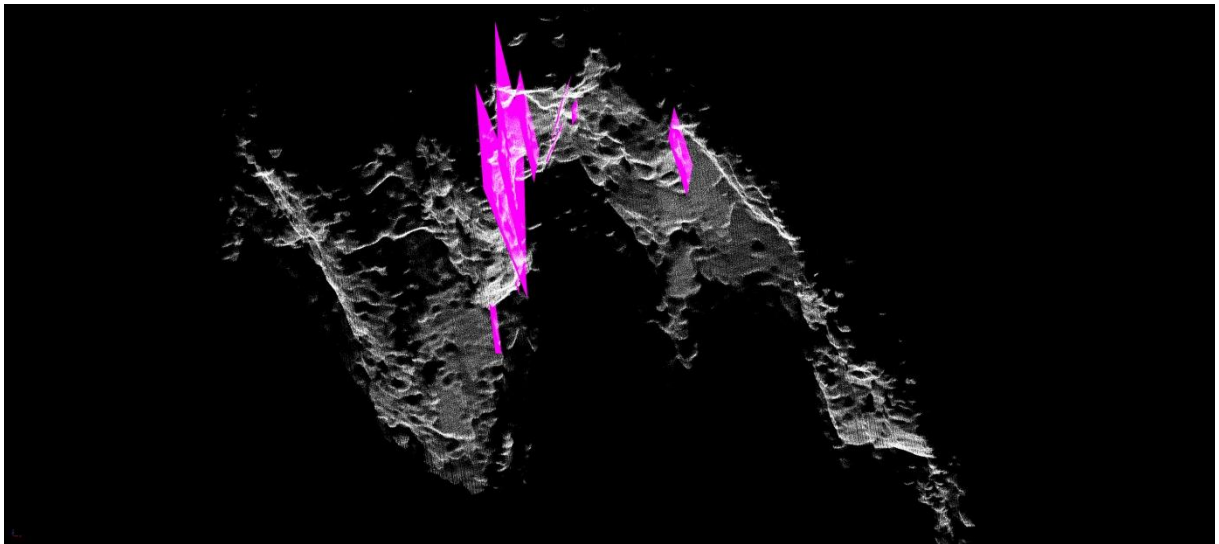
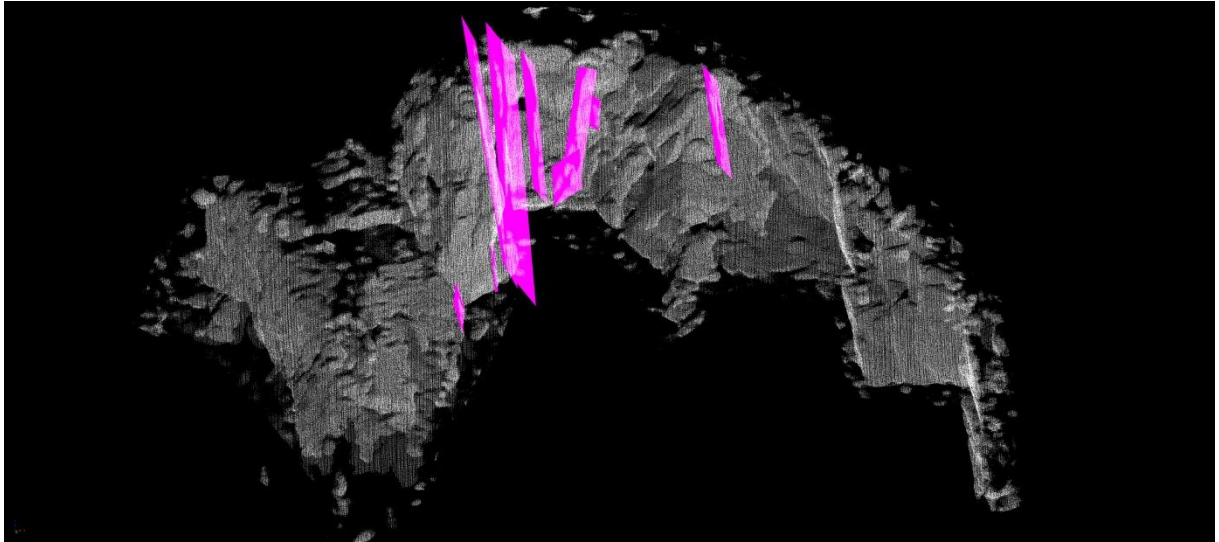
Gipfelbereich mit Kluftschar 2 (grün)



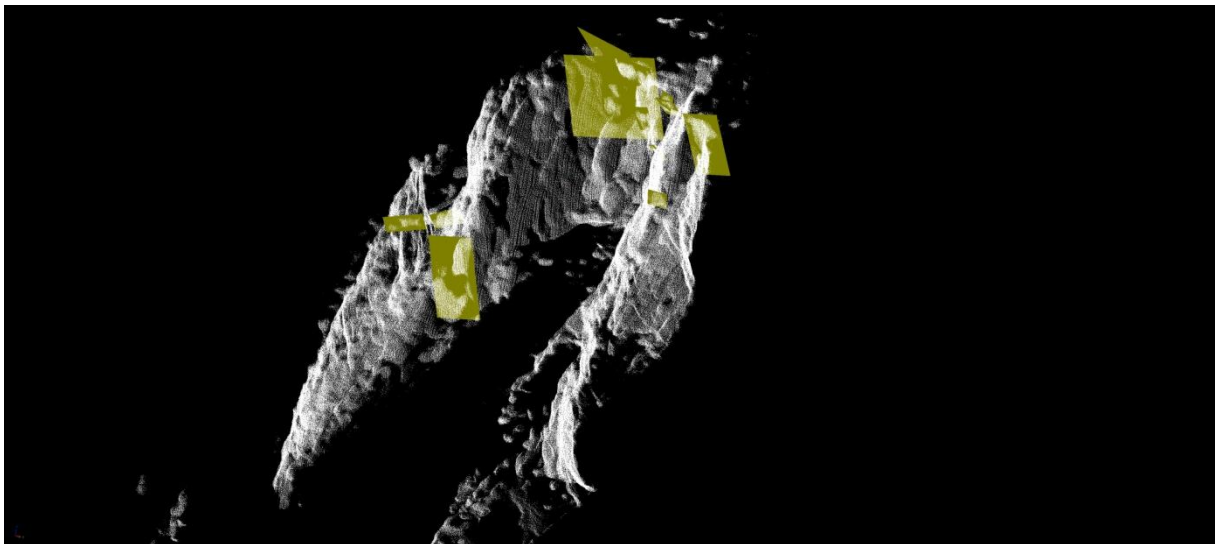
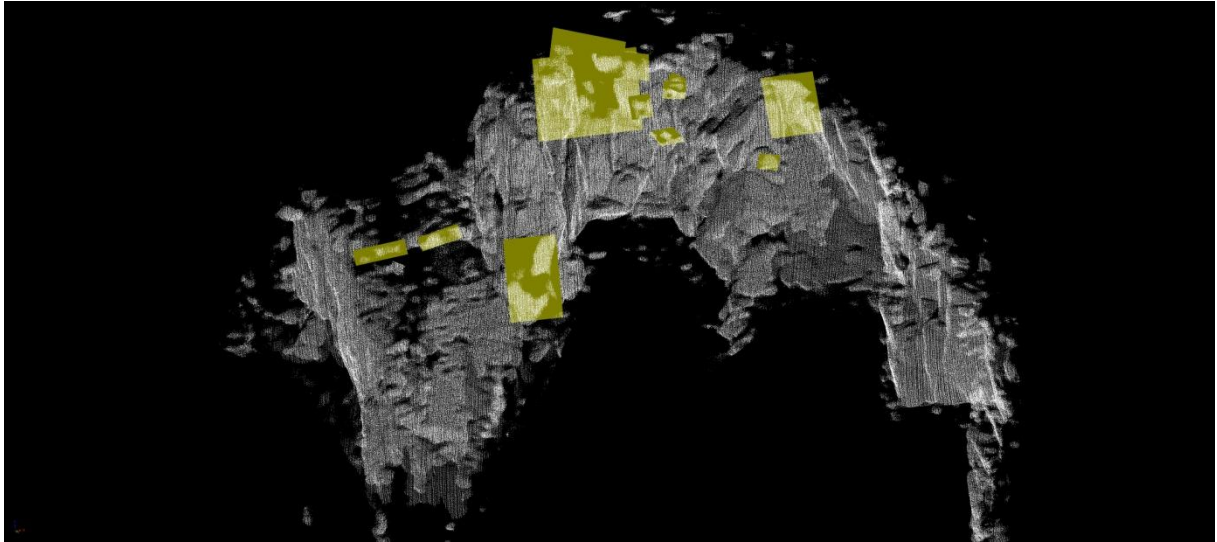
Gipfelbereich mit Kluftschar 3 (gelb)



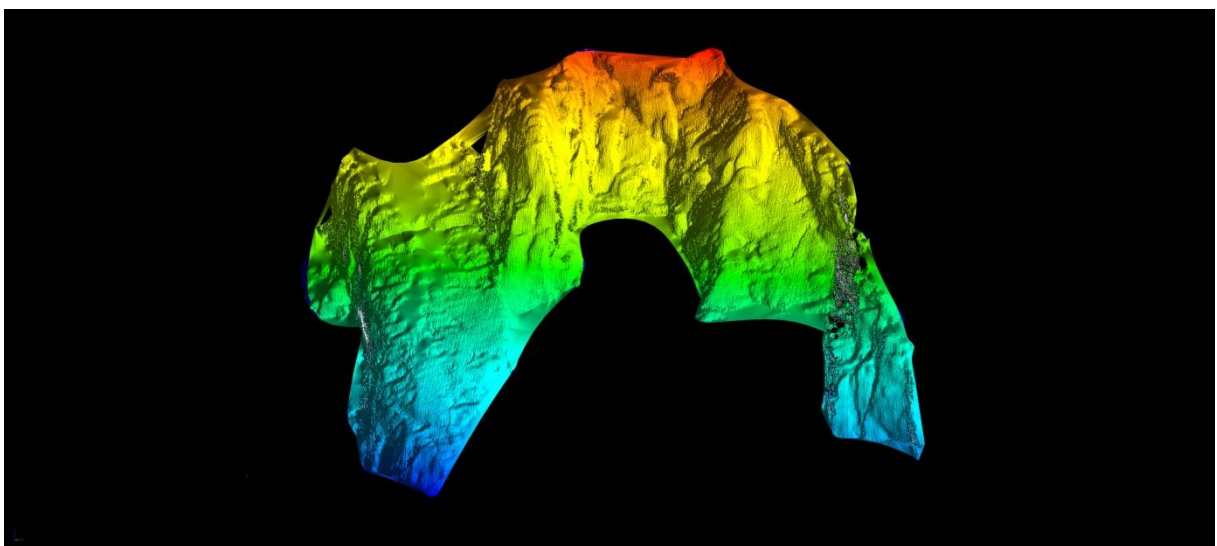
Gipfelbereich mit Kluftschar 4 (türkis)



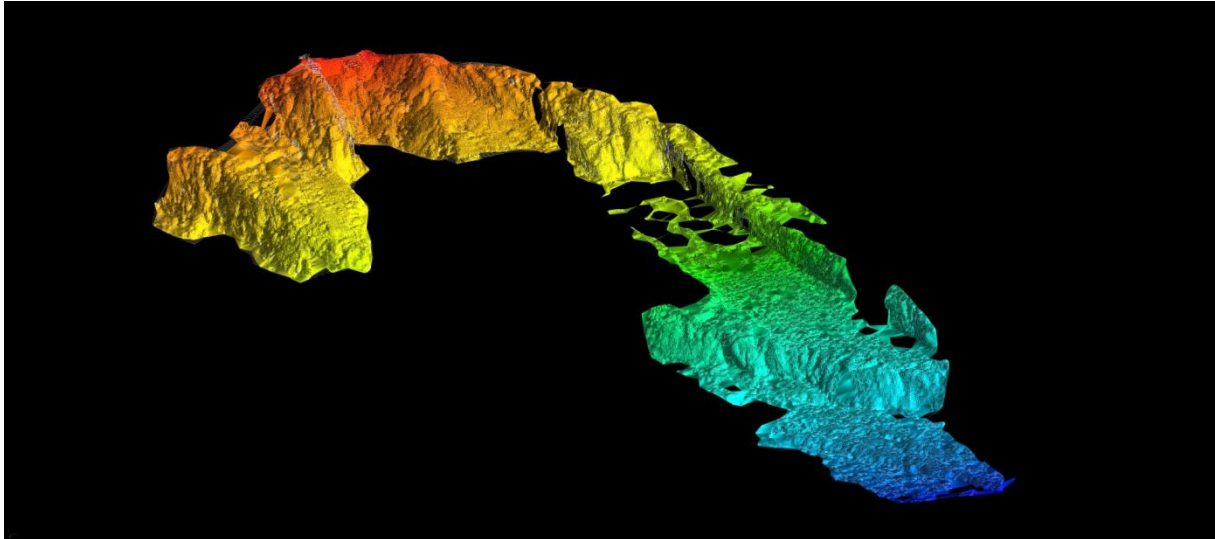
Gipfelbereich mit Kluftschar 5 (rosa)



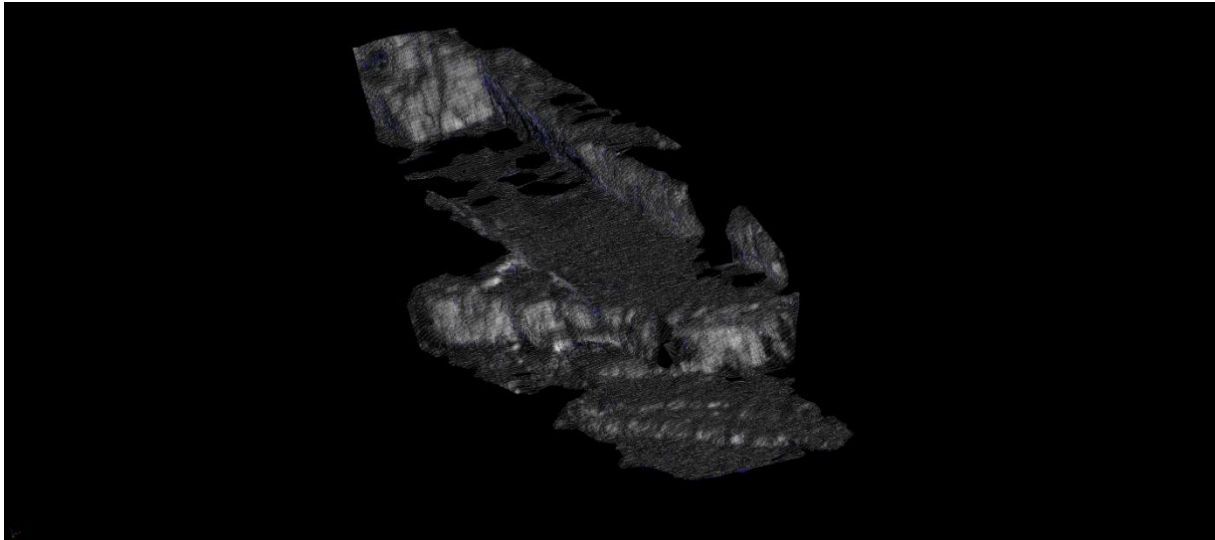
Gipfelbereich mit Kluftschar 6 (olivgrün)



Gipfelbereich, trianguliert, Ansicht "False Color"



Gipfel- und Mittelbereich, trianguliert, Ansicht "False Color", Konturlinien mit Abstand 0,25 m



Mittelbereich, Konturlinien mit Abstand 0,5 m

B) Ergebnisse Blocktheorie

Auf den folgenden Seiten sind die Ergebnisse der Programme "B10HGPL.EXE" und "B11HPGL.EXE" aufgelistet. Die Ergebnisse werden dabei für jeden Block dargestellt.

Die Listen des Programms "B10HGPL.EXE" bestehen jeweils aus sechs Tabellen und geben Aufschluss über den Blocktyp. Die relevanten Werte sind rot markiert.

I. Block 1

Ergebnisse "B10HPGL.EXE"

b1_b10.txt

TABLE 1: Sets and Free Planes

No.	Dip	Dip Direction	Friction Angle
1	55	168	30
2	88	8	30
3	75	324	30
1	86	85	
2	59	156	
3	45	324	

Resultant force:

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

Free plane code for the block:

010

Bearing and rise of tunnel:

90 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	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+1	+0	-1	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+2	-1	+0	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+3	-1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+12	+0	+0	-1	-1	+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	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+1	+1	-1	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+2	-1	+1	+1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+3	-1	+1	+1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+12	+1	+1	+1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+13	+1	-1	-1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+23	-1	-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	+0
+1	+12	+13	-23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+2	+12	-13	+23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+3	-12	-13	+23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+12	+12	-13	-23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+13	-12	+13	-23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+23	-12	+13	+23	+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
3	0	0	0
12	0	1	0
13	0	0	0
23	1	0	0

Table 6

SLIDING PLANE SLIDING FORCE SLIDING INTERVAL OF TUNNEL

+0.00	+1.00	+318.96	+85.24
+1.00	+0.49	+85.24	+104.77
+2.00	+0.98	+284.77	+318.96
+3.00	+0.82	+265.24	+284.77
+12.00	-0.98	+0.00	+0.00
+13.00	-0.74	+104.77	+138.96
+23.00	+0.51	+0.00	+0.00

RESULTANT FORCE

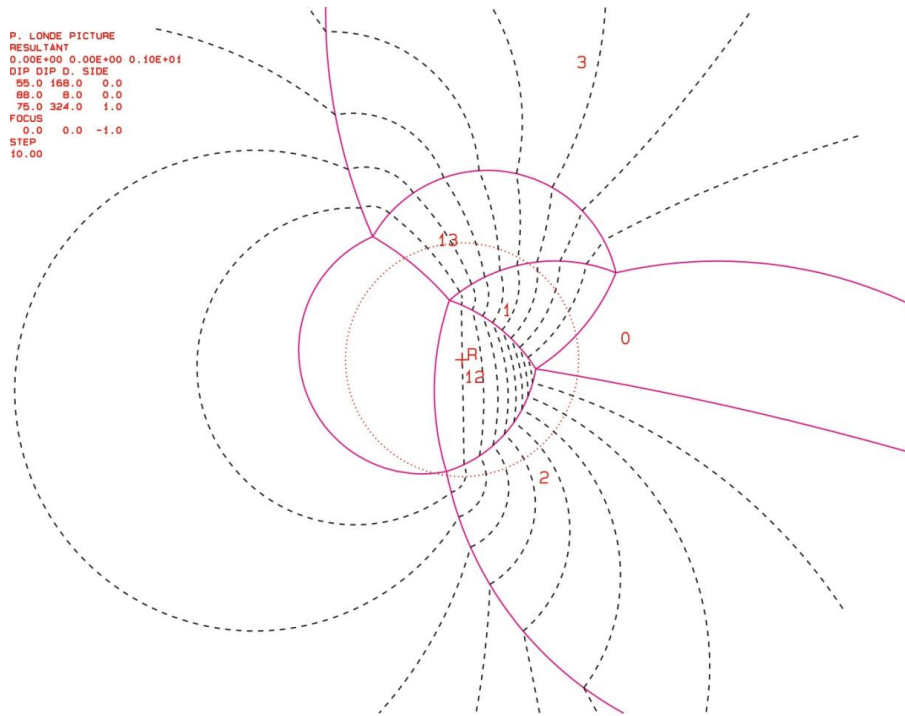
0 0 -1

AXIS OF TUNNEL

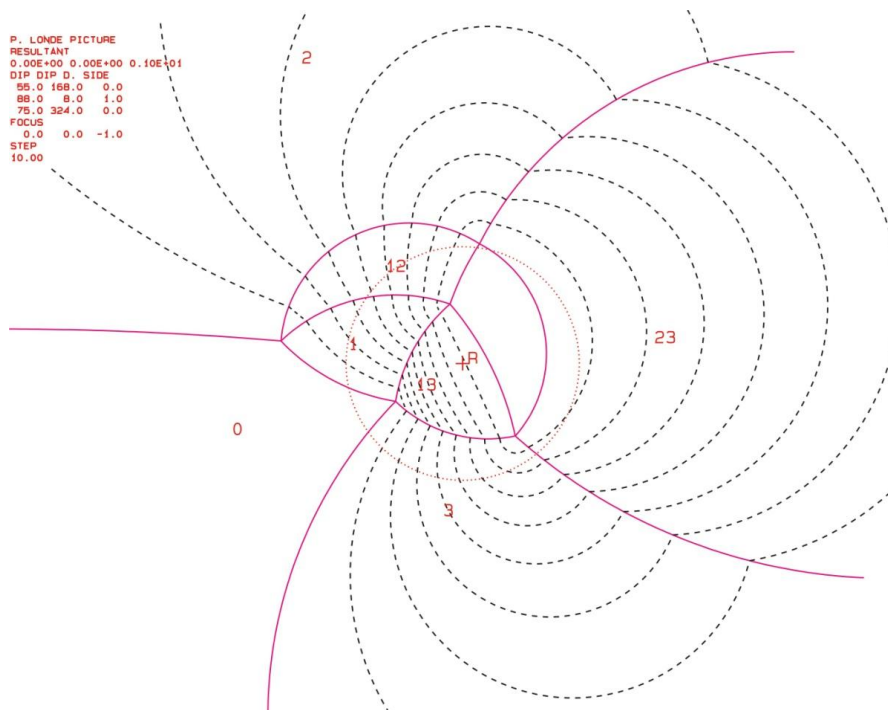
.9999999999999999 2.679489661077588D-08 0

Ergebnisse "B11HPGL.EXE"

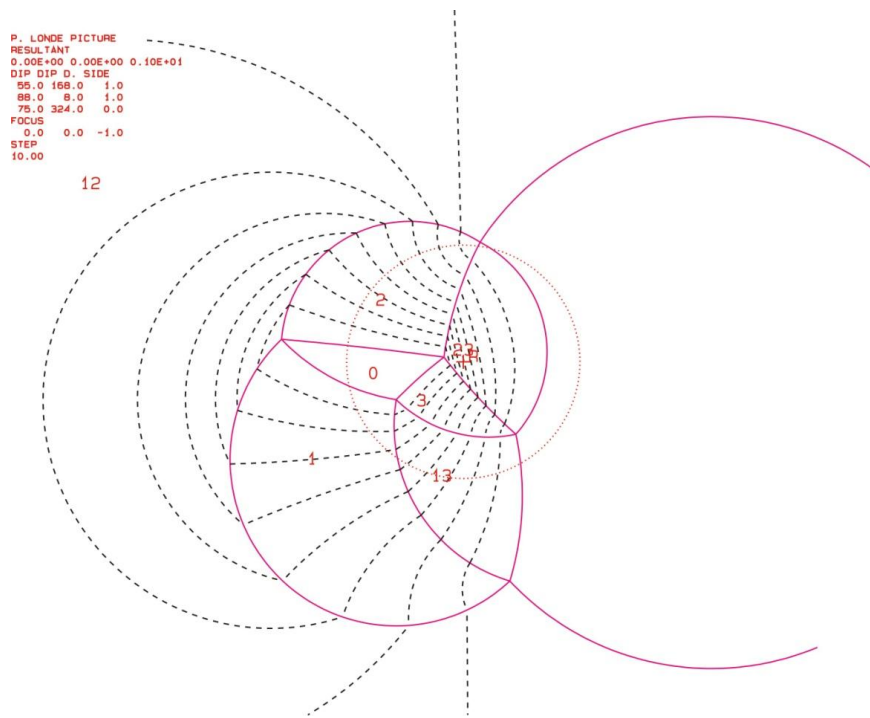
JP - Code	Blocktyp	Benötigter Reibungswinkel	Angenommener Reibungswinkel	Sicherheitsfaktor
001	I	80°	30°	0,10



JP - Code	Blocktyp	Benötigter Reibungswinkel	Angenommener Reibungswinkel	Sicherheitsfaktor
010	I	78°	30°	0,12



JP - Code	Blocktyp	Benötigter Reibungswinkel	Angenommener Reibungswinkel	Sicherheitsfaktor
110	I	50°	30°	0,48



II. Block 2

Ergebnisse "B10HPGL.EXE"

b2_b10.txt

TABLE 1: Sets and Free Planes

No.	Dip	Dip Direction	Friction Angle
1	73	47	30
2	65	169	30
3	63	348	30
1	89	334	
2	67	167	
3	81	92	

Resultant force:

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

Free plane code for the block:

010

Bearing and rise of tunnel:

90 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	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+1	+0	-1	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+2	-1	+0	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+3	-1	-1	+0	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+12	+0	+0	+0	-1	+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	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+1	+1	-1	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+2	-1	+1	+1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+3	-1	-1	+1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+12	+1	+1	+1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+13	+1	-1	-1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+23	-1	+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	+0
+1	+12	+13	-23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+2	+12	-13	+23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+3	-12	+13	+23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+12	+12	-13	-23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+13	-12	+13	-23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+23	-12	-13	+23	+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
3	0	0	0
12	1	1	1
13	0	0	0
23	0	0	0

Table 6

SLIDING PLANE SLIDING FORCE SLIDING INTERVAL OF TUNNEL

+0.00	+1.00	+354.86	+63.03
+1.00	+0.79	+288.44	+354.86
+2.00	+0.66	+63.03	+108.44
+3.00	+0.63	+0.00	+0.00
+12.00	+0.16	+0.00	+0.00
+13.00	+0.62	+243.03	+288.44
+23.00	-1.30	+108.44	+174.86

RESULTANT FORCE

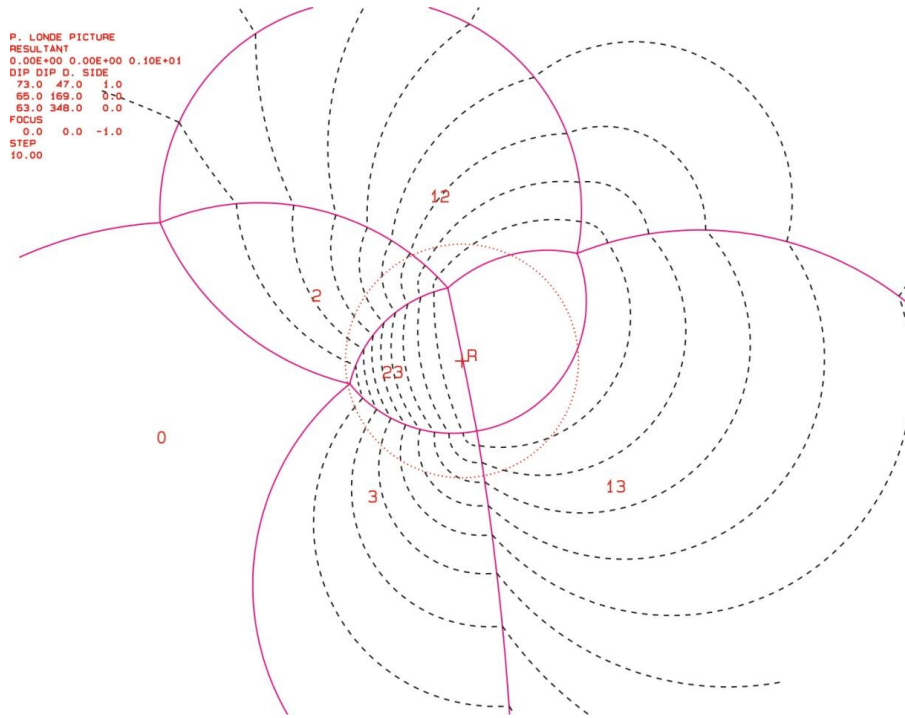
0 0 -1

AXIS OF TUNNEL

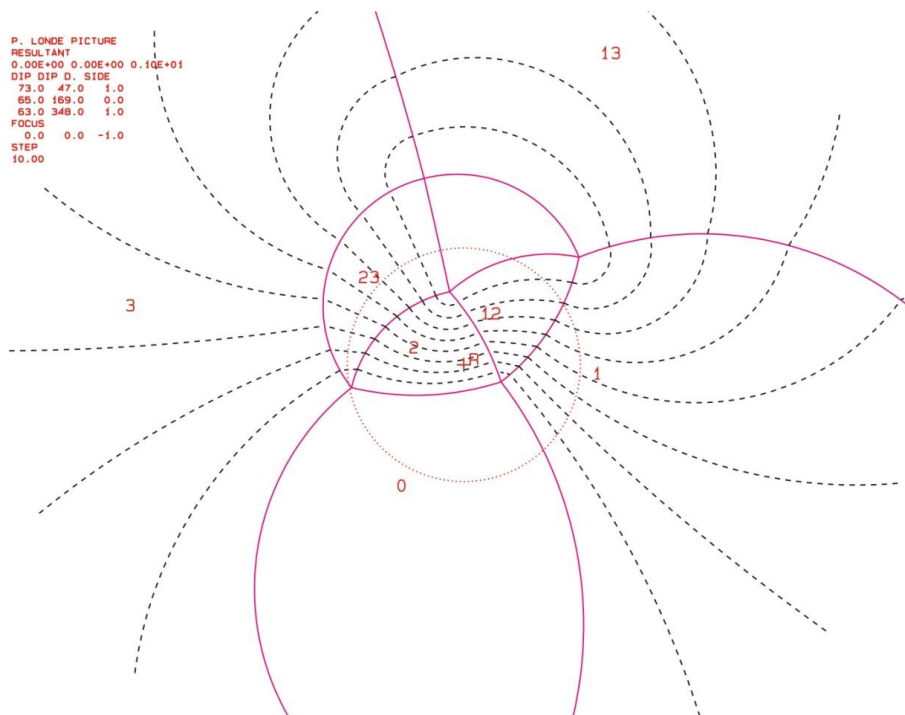
.9999999999999999 2.679489661077588D-08 0

Ergebnisse "B11HPGL.EXE"

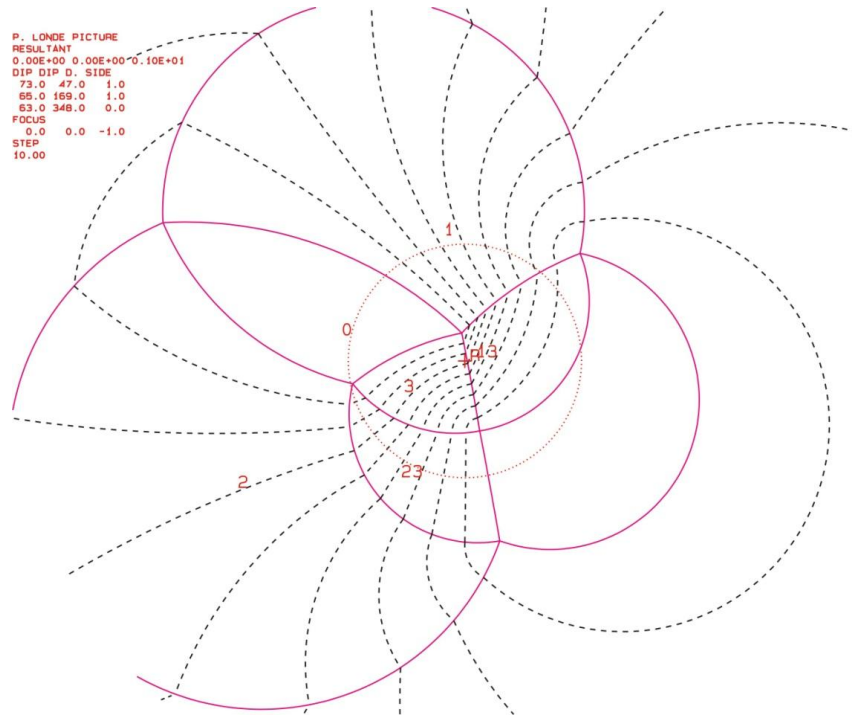
JP - Code	Blocktyp	Benötigter Reibungswinkel	Angenommener Reibungswinkel	Sicherheitsfaktor
100	I	~83°	30°	0,07



JP - Code	Blocktyp	Benötigter Reibungswinkel	Angenommener Reibungswinkel	Sicherheitsfaktor
101	I	25°	30°	1,24



JP - Code	Blocktyp	Benötigter Reibungswinkel	Angenommener Reibungswinkel	Sicherheitsfaktor
110	I	55°	30°	0,40



III. Block 3

Ergebnisse "B10HPGL.EXE"

b3_b10.txt

TABLE 1: Sets and Free Planes

No.	Dip	Dip Direction	Friction Angle
1	57	179	30
2	88	235	30
3	86	352	30
1	84	354	
2	72	70	
3	56	174	

Resultant force:

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

Free plane code for the block:

001

Bearing and rise of tunnel:

90 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	+0
+13	+1	+1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+23	-1	+1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0

Table 4: Edges of cutting pyramids

+0	+12	-13	+23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+1	+12	+13	-23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+2	+12	+13	+23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+3	-12	-13	+23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+12	+12	-13	-23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+13	-12	+13	-23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+23	-12	+13	+23	+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	1	1	1
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	+302.72	+306.93
+1.00	+0.52	+86.63	+122.72
+2.00	+0.98	+306.93	+86.63
+3.00	+0.96	+266.63	+302.72
+12.00	+0.22	+0.00	+0.00
+13.00	-1.54	+122.72	+126.93
+23.00	+0.88	+0.00	+0.00

RESULTANT FORCE

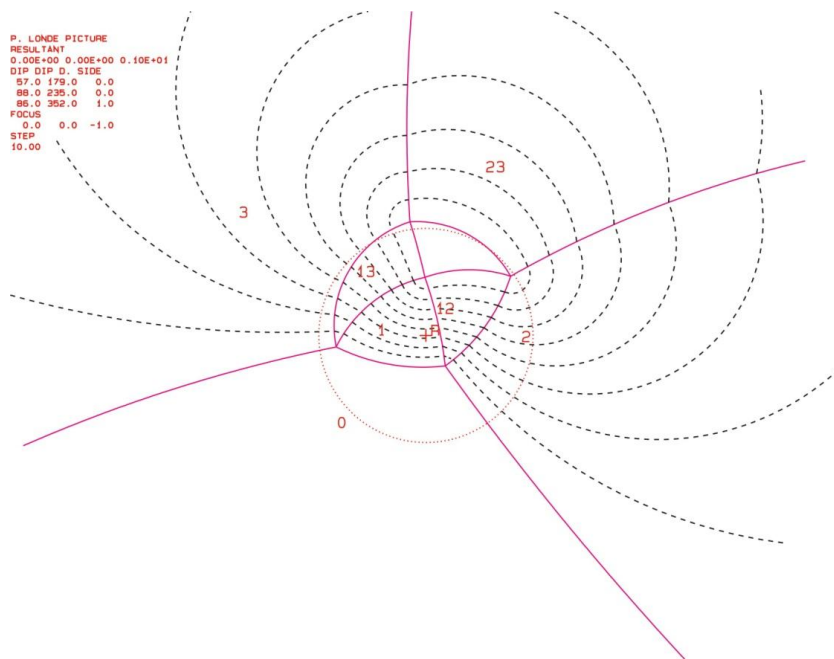
0 0 -1

AXIS OF TUNNEL

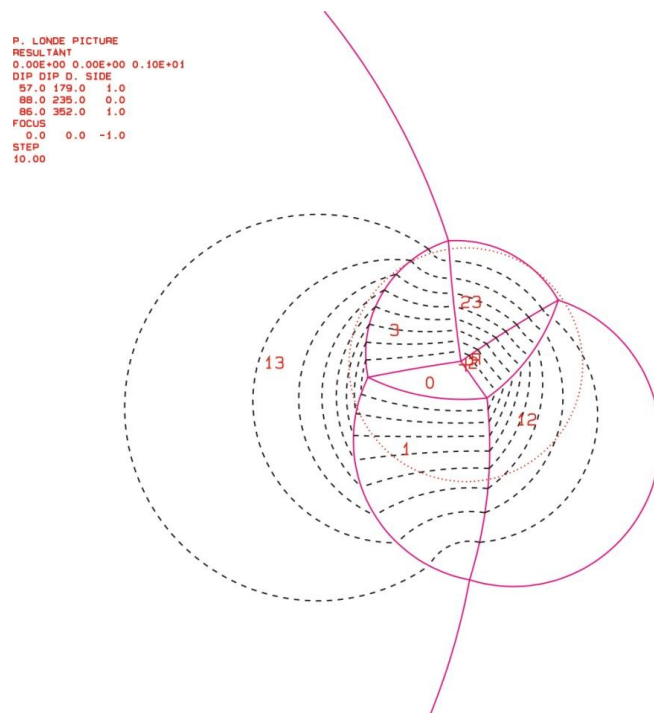
.9999999999999999 2.679489661077588D-08 0

Ergebnisse "B11HPGL.EXE"

JP - Code	Blocktyp	Benötigter Reibungswinkel	Angenommener Reibungswinkel	Sicherheitsfaktor
001	I	~32°	30°	0,92



JP - Code	Blocktyp	Benötigter Reibungswinkel	Angenommener Reibungswinkel	Sicherheitsfaktor
101	I	~82°	30°	0,08



IV. Block 4

Ergebnisse "B10HPGL.EXE"

b4_b10.txt

TABLE 1: Sets and Free Planes

No.	Dip	Dip Direction	Friction Angle
1	82	83	30
2	79	199	30
1	54	236	
2	35	168	
3	88	169	
4	86	85	

Resultant force:

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

Free plane code for the block:

0111

Bearing and rise of tunnel:

90 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	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
+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	0	0
1	1	0	0
2	1	0	0
12	1	0	0

Table 6

SLIDING PLANE SLIDING FORCE SLIDING INTERVAL OF TUNNEL

+0.00	+1.00	+284.87	+104.87
+1.00	+0.91	+0.00	+0.00
+2.00	+0.87	+0.00	+0.00
+12.00	+0.64	+284.87	+104.87

RESULTANT FORCE

0 0 -1

AXIS OF TUNNEL

.9999999999999996 2.679489661077588D-08 0

V. Block 5

Ergebnisse "B10HPGL.EXE"

b5_b10.txt

TABLE 1: Sets and Free Planes

No.	Dip	Dip Direction	Friction Angle
1	63	39	30
2	84	92	30
3	55	168	30
1	82	166	
2	0	0	

Resultant force:

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

Free plane code for the block:

1

Bearing and rise of tunnel:

90 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	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+1	+0	+1	-1	-1	+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	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+1	+1	+1	-1	-1	+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	+0
+13	+1	+1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+23	-1	-1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0

Table 4: Edges of cutting pyramids

+0	+12	-13	+23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+1	+12	+13	-23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+2	+12	+13	+23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+3	-12	+13	+23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+12	+12	-13	-23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+13	-12	+13	-23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+23	-12	-13	+23	+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	1	0
3	1	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	+0.00	+0.00
+1.00	+0.63	+293.30	+304.94
+2.00	+0.93	+304.94	+60.98
+3.00	+0.49	+60.98	+113.30
+12.00	+0.39	+240.98	+293.30
+13.00	-0.16	+0.00	+0.00
+23.00	+0.45	+113.30	+124.94

RESULTANT FORCE

0 0 -1

AXIS OF TUNNEL

.9999999999999999 2.679489661077588D-08 0

VI. Block 6

Ergebnisse "B10HPGL.EXE"

b6_b10.txt

TABLE 1: Sets and Free Planes

No.	Dip	Dip Direction	Friction Angle
1	87	213	30
2	76	282	30
1	69	95	
2	36	18	
3	77	352	

Resultant force:

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

Free plane code for the block:

100

Bearing and rise of tunnel:

90 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	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	+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	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 +0.00 +0.00

+1.00 +0.97 +264.83 +84.83

+2.00 +0.83 +0.00 +0.00

+12.00 +0.80 +264.83 +84.83

RESULTANT FORCE

0 0 -1

AXIS OF TUNNEL

.9999999999999999 2.679489661077588D-08 0

VII. Block 7

Ergebnisse "B10HPGL.EXE"

b7_b10.txt

TABLE 1: Sets and Free Planes

No.	Dip	Dip Direction	Friction Angle
1	63	39	30
2	48	172	30
3	34	360	30
4	86	85	30
1	68	328	
2	0	0	

Resultant force:

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

Free plane code for the block:

0

Bearing and rise of tunnel:

90 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	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+1	+0	-1	-1	-1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+2	-1	+0	-1	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+3	+1	-1	+0	+1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+4	-1	-1	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+12	+0	+0	-1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+13	+0	-1	+0	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+14	+0	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+23	+1	+0	+0	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+24	-1	+0	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+34	+1	-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	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+1	+1	-1	-1	-1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+2	-1	+1	-1	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+3	+1	-1	+1	+1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+4	-1	-1	-1	-1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+12	+1	+1	-1	-1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+13	-1	-1	+1	+1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+14	+1	-1	-1	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+23	+1	+1	+1	+1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+24	-1	+1	-1	-1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+34	+1	-1	+1	+1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0

Table 4: Edges of cutting pyramids

+0	+13	+14	-23	+24	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+1	+12	+14	+23	+34	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+2	-23	+24	-34	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+3	+23	-24	+34	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+4	+12	+14	+24	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+12	+12	-13	+23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+13	-12	+13	-23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+14	+13	+14	+34	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+23	-13	-14	+23	-24	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+24	+12	-13	+24	-34	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+34	-12	+13	-24	+34	+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	1	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	1	0
12	1	0	0
13	0	0	0
14	0	1	0
23	0	0	0
24	1	0	0

34 0 0 0

Table 6

SLIDING PLANE SLIDING FORCE SLIDING INTERVAL OF TUNNEL

+0.00	+1.00	+34.00	+34.00
+1.00	+0.63	+304.13	+34.00
+2.00	+0.36	+34.00	+131.62
+3.00	+0.08	+214.00	+311.62
+4.00	+0.96	+311.62	+57.20
+12.00	-0.27	+0.00	+0.00
+13.00	-0.43	+0.00	+0.00
+14.00	+0.21	+237.20	+34.00
+23.00	-0.70	+214.00	+214.00
+24.00	+0.35	+34.00	+124.13
+34.00	+0.07	+214.00	+304.13

RESULTANT FORCE

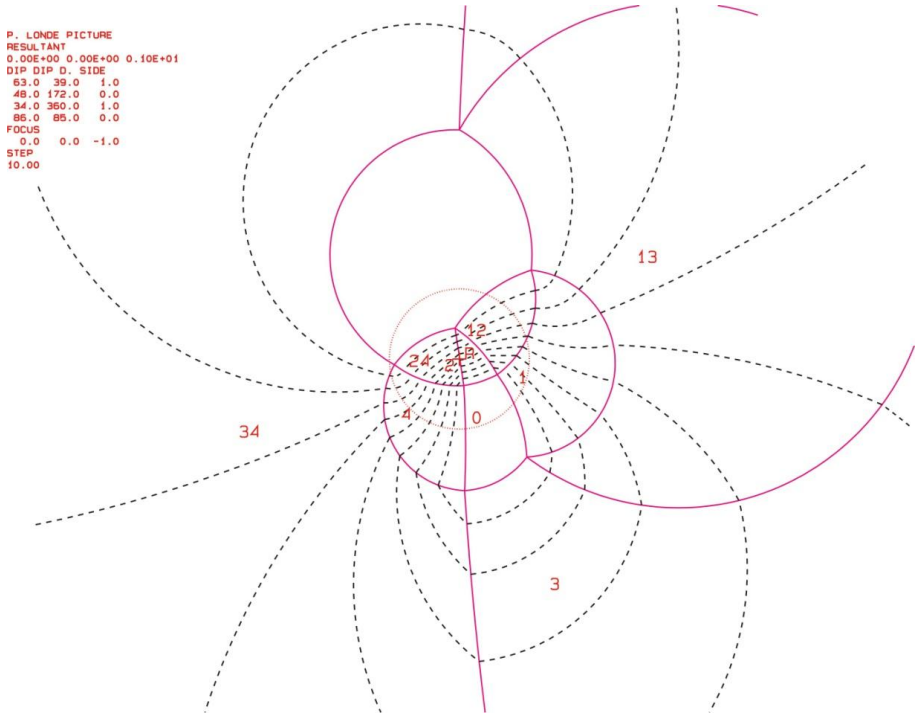
0 0 -1

AXIS OF TUNNEL

.9999999999999996 2.679489661077588D-08 0

Ergebnisse "B11HPGL.EXE"

JP - Code	Blocktyp	Benötigter Reibungswinkel	Angenommener Reibungswinkel	Sicherheitsfaktor
1010	I	45°	30°	0,58



VIII. Block 8

Ergebnisse "B10HPGL.EXE"

b8_10.txt

TABLE 1: Sets and Free Planes

No.	Dip	Dip Direction	Friction Angle
1	41	163	30
2	86	85	30
3	84	217	30
1	82	166	
2	28	168	

Resultant force:

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

Free plane code for the block:

11

Bearing and rise of tunnel:

90 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	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+1	+0	+1	+1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+2	-1	+0	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+3	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+12	+0	+0	+1	+1	+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	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+1	+1	+1	+1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+2	-1	+1	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+3	-1	-1	+1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+12	+1	-1	+1	+1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+13	+1	+1	-1	-1	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+23	-1	+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	+0
+1	+12	+13	-23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+2	-12	+13	+23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+3	+12	-13	+23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+12	+12	-13	-23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+13	-12	+13	-23	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0	+0
+23	+12	+13	+23	+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
3	0	0	0
12	0	0	0
13	0	0	0
23	1	0	0

Table 6

SLIDING PLANE SLIDING FORCE SLIDING INTERVAL OF TUNNEL

+0.00	+1.00	+281.17	+311.79
+1.00	+0.22	+101.17	+131.79
+2.00	+0.96	+311.79	+319.01
+3.00	+0.93	+0.00	+0.00
+12.00	+0.16	+131.79	+139.01
+13.00	-0.10	+0.00	+0.00
+23.00	+0.68	+319.01	+101.17

RESULTANT FORCE

0 0 -1

AXIS OF TUNNEL

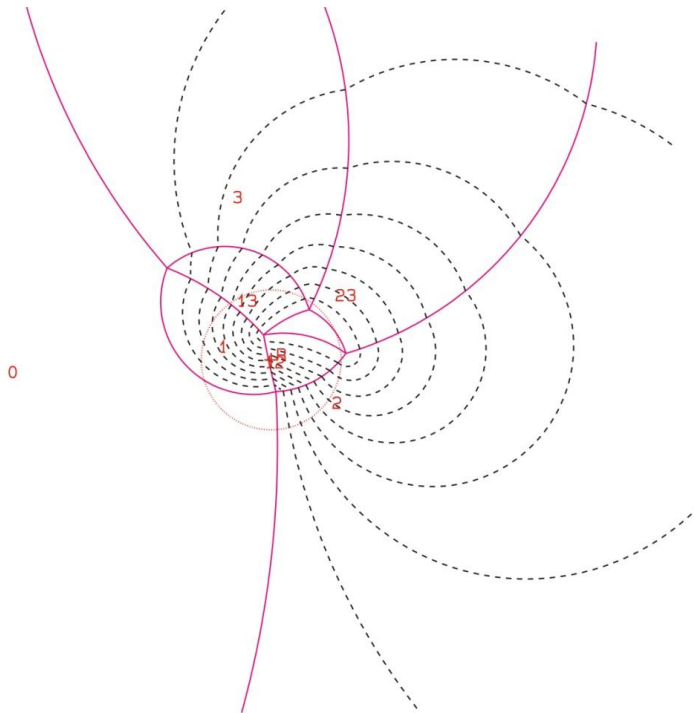
.9999999999999999 2.679489661077588D-08 0

Ergebnisse "B11HPGL.EXE"

JP - Code	Blocktyp	Benötigter Reibungswinkel	Angenommener Reibungswinkel	Sicherheitsfaktor
010	I	50°	30°	0,48

```

P. LONDE PICTURE
RESULTANT
0.00E+00 0.00E+00 0.10E+01
DIP DIP D. SIDE
41.0 163.0 0.0
86.0 85.0 1.0
84.0 217.0 0.0
FOCUS
0.0 0.0 -1.0
STEP
10.00
    
```



JP - Code	Blocktyp	Benötigter Reibungswinkel	Angenommener Reibungswinkel	Sicherheitsfaktor
100	I	60°	30°	0,33

```

P. LONDE PICTURE
RESULTANT
0.00E+00 0.00E+00 0.10E+01
DIP DIP D. SIDE
41.0 163.0 1.0
86.0 85.0 0.0
84.0 217.0 0.0
FOCUS
0.0 0.0 -1.0
STEP
10.00
    
```

