

Philipp Danzl, BSc

**Georeferenzierte, photogrammetrische Erfassung von
Trennflächengefügen mittels freier SfM-Software**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science

Masterstudium Erdwissenschaften

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Ao. Univ.-Prof. Dr. Qian Liu

Institut für Angewandte Geowissenschaften

Graz, Juli 2019

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Gleichheitsgrundsatz

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

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all meinen Lehrern und Professoren danken, die mir im Laufe dieses Masterstudiums die angewandten Aspekte der Geologie mit viel Leidenschaft und Engagement nähergebracht haben. Ein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Ao. Univ.-Prof. Dr. Qian Liu. Seine Motivation, Ratschläge und Ideen haben diese Masterarbeit überhaupt erst möglich gemacht.

Unendlich dankbar bin ich auch meiner Familie, die mir diesen Bildungsweg ermöglicht und mich in sämtlichen Situationen unterstützt hat.

Auch möchte ich meinen Freunden und Studienkollegen danken, die mich in den letzten Jahren in Innsbruck und Graz begleitet und diese Zeit unvergesslich gemacht haben.

Kurzfassung

Im unzugänglichen Gelände, sowie in potentiell gefährlichen Bereichen finden Fernerkundungsmethoden in den Geowissenschaften häufig ihre Anwendungen. Jedoch sind diese Methoden oft mit einem hohen Kostenaufwand verbunden. Deshalb soll durch diese Masterarbeit ein Arbeitsablauf zur dreidimensionalen und georeferenzierten Erfassung von Trennflächengefügen mittels freier *Structure-from-Motion* Software erarbeitet werden. Mit Hilfe der vorgestellten Methodik sollen die Trennflächen in einem Bereich eines Steinbruchs erfasst werden. Des Weiteren sollen scharbezogene Werte wie die Orientierung der Schwerpunktsflächen und der Trennflächennormalabstand erhoben werden.

Aus zweidimensionalen Bildern sollen mit den Programmen *VisualSFM* und *SfM_Georef* dreidimensionale, georeferenzierte Punktwolken erstellt werden. Diese werden in weiterer Folge mit dem Programm *CloudCompare* und den darin enthaltenen Plugins analysiert und somit das Trennflächengefüge erfasst. Zudem sollen die Ergebnisse mit jenen eines *Scanline Mappings* verglichen werden. Zusätzlich wird die Punktwolke noch mit dem Programm *Discontinuity Set Extractor* untersucht.

Im Zuge der Untersuchungen sind Werte für vier Trennflächenscharen ermittelt worden. Zum einen für die Schichtflächen der aufgeschlossenen Karbonate der Gutenstein-Formation. Zum anderen für drei Kluftscharen. Der Vergleich der Ergebnisse der unterschiedlichen Methoden hat gezeigt, dass die Orientierungen der Trennflächen meist ähnlich sind. Jedoch können die Trennflächennormalabstände deutlich variieren. Mit einer Zunahme der Messungen haben die mittleren Trennflächennormalabstände und das daraus resultierende Blockvolumen sukzessive abgenommen.

Mit der hier vorgestellten Methode wird gezeigt, dass die Erfassung des Trennflächengefüges anhand von dreidimensionalen Punktwolken auch ohne teure Hard- und Software auskommt. Vor Allem bei Aufschlüssen in der Größenordnung von 100 m² kann die Methode zu einer schnellen, kostengünstigen und objektiveren Gebirgscharakterisierung dienen.

Abstract

In inaccessible terrain and potentially dangerous areas, remote sensing techniques are frequently applied in geosciences. However, these methods are often causing high costs. Throughout this master thesis a work procedure for three-dimensional and geo-referenced detection of fracture networks with free *Structure-from-Motion* Software should be worked out. With the presented method the fractures of a quarry are captured. Furthermore, parameters such as the orientation of the discontinuity sets and the mean normal distance are calculated.

With the computer programmes *VisualSFM* and *SfM_Georef*, three-dimensional point clouds are generated out of two-dimensional pictures. These point clouds are analysed with *CloudCompare* to extract the structure of discontinuities. To validate the results, a comparison to those of a *scanline mapping* should be made. Additionally, the point clouds are investigated with the program *Discontinuity Set Extractor*.

During the investigations values for the bedding planes of the carbonates of the Gutenberg-Formation as well as for three joint sets were determined. A comparison of the results using these different methods indicated that the orientations of the discontinuities are mostly similar whereas the normal distances can show significant differences. With an increase of the measurements a decrease of the mean distance and the resulting block volume was obtained.

The presented method proves that the detection of the fracture network from three-dimensional point clouds is also possible without expensive hard- and software. Especially for outcrops with a size of a few 100 m², this method can lead to a fast, cheap and objective rock mass characterization.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	13
2. Arbeitsgebiet – Steinbruch von Moosen	15
2.1 Geographischer Überblick.....	15
2.2 Geologischer Überblick	16
3. Methodik	18
3.1 Structure from Motion - Multi View Stereo (SfM-MVS).....	18
3.1.1 Bildliche Erfassung von Gesteinsaufschlüssen.....	18
3.1.2 VisualSFM v.0.5.26	19
3.1.3 SfM_Georef v. 3.1	19
3.1.4 CloudCompare v. 2.10.2.....	20
3.1.5 Discontinuity Set Extractor v. 2.08.....	21
3.2 Berechnung der Schwerpunktsflächen.....	22
3.3 Stereographische Projektionen	22
3.4 Scanline Mapping.....	23
3.5 Trennflächen	24
4. SfM-MVS Datenerhebung	27
4.1 Referenzpunkte und Koordinatensystem.....	27
4.2 Mapit GIS v. 7.2.1Core.....	28
4.3 Kameraeinstellung	29
4.4 Bildaufnahme	30
5. SfM-MVS Datenverarbeitung	32
5.1 VisualSFM v.0.5.26	32
5.1.1 Feature Detection.....	32
5.1.2 Structure from Motion.....	33
5.1.3 Skalieren und Georeferenzieren in einem lokalen Koordinatensystem	34
5.1.4 Multi View Stereo	35
5.2 SfM_Georef v.3.1	36
5.3 Erfassung des Trennflächengefüges mit CloudCompare.....	37
5.3.1 Hough-Transformation.....	38
5.3.2 Konvertieren der Normalvektoren.....	39

5.3.3	Extrahieren von Trennflächen.....	42
5.3.4	Erhebung strukturgeologischer Daten mit dem Compass Plugin	43
6.	Ergebnisse	45
6.1	Datenaufnahme.....	45
6.2	Datenverarbeitung.....	46
6.2.1	Großräumige Punktwolke	46
6.2.2	Punktwolken des westlichen Bereichs	47
6.3	Vergleich der Punktwolken des ersten Bereichs.....	48
6.3.1	Vergleich Agisoft Metashape – VisualSFM, SfM_Georef	50
6.4	Trennflächenerfassung mit CloudCompare – westlicher Bereich.....	52
6.4.1	Schichtflächen (Ss)	54
6.4.2	Kluftschar 1 (Kf 1).....	56
6.4.3	Kluftschar 2 (Kf2).....	57
6.4.4	Kluftfläche 3 (Kf3).....	59
6.4.5	Blockvolumen nach Palmström (1997)	60
6.5	Trennflächenerfassung mit CloudCompare – östlicher Bereich	61
6.5.1	Schichtflächen (Ss)	63
6.5.2	Kluftschar 1 (Kf1).....	65
6.5.3	Kluftschar 2 (Kf2).....	66
6.5.4	Kluftschar 3 (Kf3).....	68
6.5.5	Blockvolumen nach Palmström (1997)	69
6.6	Trennflächenerfassung mit der Scanline – westlicher Bereich.....	70
6.6.1	Trennflächenorientierung.....	71
6.6.2	Trennflächennormalabstand.....	71
6.6.3	Terminationsindex.....	72
6.6.4	Rauigkeit (JRC).....	72
6.6.5	Blockvolumen nach Palmström (1997)	73
6.7	Trennflächenerfassung mit dem DSE – gesamter Bereich	74
7.	Vergleich der Ergebnisse	78
7.1	Scanline Mapping und CloudCompare-Daten des westlichen Bereichs.....	78
7.1.1	Vergleich der Trennflächenscharen	78
7.1.2	Vergleich von direkten und digitalen Messungen.....	80
7.2	Vergleich der CloudCompare Daten mit denen des DSE	82
8.	Interpretation der Ergebnisse	84
8.1	Blockvolumen V_b	84

8.2	Hangstabilitätsanalyse	85
9.	Fazit	87
9.1	Vergleich mit kommerziellen Methoden und Softwares	87
9.2	Bildanzahl – Qualität der Punktwolke	88
9.3	Trennflächenerfassung im CloudCompare	88
9.4	Trennflächenerfassung mit dem DSE	89
10.	Ausblick	90
	Literatur	91
	Anhang A	93

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Ausschnitt aus der ÖK50 Blatt 122 Kitzbühel, des erweiterten Untersuchungsgebiets. Der Standort des Steinbruchs ist mit einem roten Kreuz markiert. Quelle: (Bundesamt für Eich-und Vermessungswesen, 2014)	15
Abbildung 2.2: Digitales Geländemodell der Umgebung um den Steinbruch. Die Untersuchungen wurden auf der ersten Stufe des Steinbruchs durchgeführt. Quelle: (Land Tirol, 2019)	16
Abbildung 2.3: Ausschnitt aus der geologischen Karte des Blattes 91 Sankt Johann in Tirol. Quelle: (Geologische Bundesanstalt, 2008)	17
Abbildung 3.1: Ausschnitt der graphischen Benutzeroberfläche von VisualSFM. Die einzelnen Schritte zur Erstellung einer georeferenzierten Punktwolke sind in chronologischer Reihenfolge angeführt.....	19
Abbildung 3.2: Ansicht der graphischen Benutzeroberfläche des Programms SfM_Georef v.3.1.....	20
Abbildung 3.3: Ansicht der Software CloudCompare v. 2.10.2.....	21
Abbildung 3.4: Ansicht des Programms Discontinuity Set Extractor (DSE) v. 2.08.....	22
Abbildung 3.5: Schematische Darstellung der Trennflächeneigenschaften und einer horizontal verlaufenden Scanline oder einem Bohrloch. Quelle: (Hudson, 1989)	23
Abbildung 3.6: Beziehung zwischen der Klüftigkeitsziffer k (Stiny, 1922) und dem Blockvolumen V_b (Palmström, 1997). Quelle: (Dachroth, 2017)	26
Abbildung 4.1: Anordnung der Referenzpunkte in einem lokalen Koordinatensystem. In den eckigen Klammern ist die Nummer der Punkte zu lesen. Dahinter folgen die x-, y- und z-Koordinaten in Metern. Die Pfeile symbolisieren die Orientierung des Koordinatensystems. Der Pfeil in Richtung des gelben Punktes stellt die y-Achse, mit Richtung Norden dar. Der Pfeil in Richtung des grünen Punktes stellt die x-Achse, mit Richtung Osten dar. Abgeändert nach García-Luna, et al. (2019).	28
Abbildung 4.2: Mögliche Anordnung von Kamerapositionen zur bildlichen Erfassung eines Aufschlusses. An jeder Position wurden mehrere Fotos mit unterschiedlichen Winkeln zum Aufschluss hin gemacht.	31
Abbildung 5.1: Pfade zwischen den "keypoints" zweier Bildpaare, die mit Hilfe des Algorithmus von (Lowe, 2004) erkannt wurden.	33

Abbildung 5.2: In der Abbildung ist zu erkennen, wie unterschiedliche "keypoints" in den Bildern von unterschiedlichen Kamerapositionen aus, erfasst werden. Dadurch ist es möglich, dass die dreidimensionale Geometrie eines Objekts rekonstruiert werden kann. Quelle: http://theia-sfm.org/sfm.html (letzter Abruf: 15.05.2019)	34
Abbildung 5.3: In VisualSFM wird jeder Referenzpunkt mit [ID] X Y Z bezeichnet. Wobei für "ID" die Nummer des Punktes und für X Y Z seine x-, y- und z-Koordinaten eingesetzt werden.....	35
Abbildung 5.4: Darstellung des Prinzips des CMVS-Algorithmus von (Furukawa, et al., 2010). Quelle: (Furukawa, et al., 2010).....	36
Abbildung 5.5: Koordinatentransformation beim Öffnen einer Punktwolke durch das Programm CloudCompare.	37
Abbildung 5.6: Fenster im CloudCompare wo die Punktwolke als ASCII-Datei im .txt-Format abgespeichert wird.....	38
Abbildung 5.7: Öffnungsmenü für ASCII-Dateien in CloudCompare.....	38
Abbildung 5.8: Dialogfenster für die Berechnung der Normalvektoren durch das Plugin Hough Normals Computation.....	39
Abbildung 5.9: Fallrichtungen der Hough-Normale in einem HSV-Farbraum dargestellt. An der Farbskala am rechten Bildrand lassen sich die Farben der jeweiligen Fallrichtungen und Häufigkeiten erkennen.	40
Abbildung 5.10: Dichteverteilung der Fallwerte des Modells von Abbildung 5.9. Die Dichte nimmt von blau, über grün und gelb, bis rot stetig zu. Das rote Streichen-Fallzeichen zeigt die mittlere Orientierung an. Am Rand des Stereonetzes sind die HSV-Farbwerte dargestellt.	41
Abbildung 5.11: Darstellung der Fallwinkel als Farben nach der Skala am rechten Bildrand. An der Farbskala lassen sich die jeweiligen Werte der Fallwinkel sowie die Häufigkeiten erkennen.....	42
Abbildung 5.12: Extrahierte Punktwolke mit Fallrichtungen von 155° bis 200°. Die extrahierten Punkte stammen vom selben Model wie Abbildung 5.9.....	43
Abbildung 5.13: Erstellung von Flächen mit dem Compass Plugin. Die Auswahl erfolgt über einen roten Kreis. In der Bildmitte ist eine Fläche mit einer Orientierung von 186/52 zu sehen.	44
Abbildung 5.14: Messung der wahren Abstände zwischen zwei Trennflächen mit der Funktion "Measure one-point thickness". Die blauen Pfeile symbolisieren die gemessenen	

Abstände der Fläche, im rechten Winkel zu den Punkten. Die Zahlen in den weißen Boxen geben den Abstand in Metern an.	44
Abbildung 6.1: Bildausschnitt des westlichen Bereichs. In der linken unteren Bildhälfte sind die Referenzpunkte zu erkennen. In der Bildmitte sind die roten Punkte zu sehen, mit denen die Punktwolken im CloudCompare zusammengefügt werden können.	45
Abbildung 6.2: Verbundene Punktwolke der drei Bereiche des Steinbruchs von Moosen. Die roten Quader zeigen die Ausdehnung und Position der einzelnen Bereiche.	46
Abbildung 6.3: Punktwolke des westlichen Bereichs in Echtfarben. Generiert mit einer Bildanzahl von 200.	47
Abbildung 6.4: Diagramm der Abhängigkeit der Konstruktionsdauer von der Bildanzahl..	49
Abbildung 6.5: Diagramm der unterschiedlichen Punktzahlen im Vergleich mit unterschiedlicher Bildanzahl.	50
Abbildung 6.6: Distanz zwischen der Agisoft Metashape-Punktwolke und der VisualSFM-Punktwolke. Die Werte in der Legende und der Maßstab sind in Meter angegeben.....	51
Abbildung 6.7: Punktwolke des westlichen Bereichs. Der Maßstab ist in Metern angegeben.	52
Abbildung 6.8: Punktwolke mit HSV-Farben des westlichen Bereichs. Die Punkte, die den Blockschutt im Vordergrund darstellen, sind ausgeschnitten. Der Maßstab ist in Metern angegeben. Die Legende zeigt die jeweilige HSV-Farbe für die unterschiedlichen Fallrichtungen an.	53
Abbildung 6.9: Darstellung der Polpunkte und der Schwerpunktsflächen der jeweiligen Trennflächenschar des westlichen Bereichs in einem Schmidt'schen Netz. Der schwarze Großkreis repräsentiert die Orientierung des Aufschlusses.....	54
Abbildung 6.10: Schichtflächen mit einer Fallrichtung von 160° bis 210°. Der Maßstab ist in Metern angegeben.....	55
Abbildung 6.11: Schichtflächenschar mit eingemessenen Trennflächen in schwarz. Die schwarzen Linien zeigen die gemessenen Trennflächennormalabstände. Der Maßstab ist in Metern angegeben.....	55
Abbildung 6.12: Räumliche Ausdehnung der Kluftschar 1. Der Maßstab ist in Metern angegeben.....	56
Abbildung 6.13: Kluftschar 1 mit eingemessenen Kluffflächen in schwarz und Trennflächennormalabständen als schwarze Linien. Der Maßstab ist in Metern angegeben.	57

Abbildung 6.14: Räumliche Ausdehnung der Kluftschar 2. Der Maßstab ist in Metern angegeben.....	58
Abbildung 6.15: Kluftschar 2 mit eingemessenen Kluffflächen als schwarze Flächen und Trennflächennormalabständen als schwarze Linien. Der Maßstab ist in Metern angegeben.	58
Abbildung 6.16: Räumliche Ausdehnung der Kluftschar 3. Der Maßstab ist in Metern angegeben.....	59
Abbildung 6.17: Kluftschar 3 mit eingemessenen schwarzen Kluffflächen und Trennflächenabständen als schwarze Linien. Der Maßstab ist in Metern angegeben.	60
Abbildung 6.18: Räumliche Ausdehnung des östlichen Bereichs. Die Punkte sind in Echtfarben dargestellt. Der Maßstab ist in Metern angegeben.....	61
Abbildung 6.19: Die Punktwolke mit HSV-Farben des östlichen Bereichs. Die Legende zeigt die jeweilige HSV-Farbe für die unterschiedlichen Fallrichtungen an. Der Maßstab ist in Metern angegeben.....	62
Abbildung 6.20: Darstellung der Polpunkte und der Schwerpunktsflächen der jeweiligen Trennflächenschar des östlichen Bereichs in einem Schmidt'schen Netz. Der schwarze Großkreis repräsentiert die Orientierung des Aufschlusses.....	63
Abbildung 6.21: Räumliche Ausdehnung der Schichtflächen. Der Maßstab ist in Metern angegeben.....	64
Abbildung 6.22: Definierte Trennflächen und Trennflächennormalabstände innerhalb der Schichtflächenschar. Der Maßstab ist in Metern angegeben.....	64
Abbildung 6.23: Räumliche Ausdehnung der Kluffflächen 1. Der Maßstab ist in Metern angegeben.....	65
Abbildung 6.24: Mit dem Compass Plugin eingemessene graue Trennflächen und Trennflächennormalabstände. Der Maßstab ist in Metern angegeben.	66
Abbildung 6.25: Räumliche Ausdehnung der Kluffflächen 2. Der Maßstab ist in Metern angegeben.....	67
Abbildung 6.26: Punktwolke der Kluffflächen 2 mit eingemessenen schwarzen Trennflächen und Trennflächennormalabständen durch das Compass Plugin. Der Maßstab ist in Metern angegeben.....	67
Abbildung 6.27: Räumliche Ausdehnung der Kluffflächen 3. Der Maßstab ist in Metern angegeben.....	68

Abbildung 6.28: Ausschnitt aus der Punktwolke der Kluffflächen 3 mit schwarzen Kluffflächen und Trennflächennormalabständen durch das Compass Plugin. Der Maßstab ist in Metern angegeben.	69
Abbildung 6.29: Verlauf der Scanline entlang des westlichen Bereichs.....	70
Abbildung 6.30: Darstellung der Polpunkte der jeweiligen Trennflächen. Zusätzlich sind noch die Schwerpunktsflächen der Trennflächenscharen und die Orientierung des Aufschlusses als Großkreise dargestellt.	71
Abbildung 6.31: Histogramm zur Darstellung des Joint Roughness Coefficient JRC im westlichen Bereich.....	73
Abbildung 6.32: Gesamter erfasster Bereich des Steinbruchs der mit dem DSE untersucht wurde.....	74
Abbildung 6.33: Darstellung der Polpunkte in einem Stereonetz mit Dichteverteilung. Der Abstand zwischen den Isolinien beträgt 1,25 %. Zusätzlich sind noch die mittleren Orientierungen der Schwerpunktsflächen dargestellt.	75
Abbildung 6.34: Die Punkte der Punktwolke sind einer Trennflächenschar mit jeweiliger Farbe zugeordnet worden. Blau entspricht der Trennflächenschar 1, grün der Trennflächenschar 2, gelb der Trennflächenschar 3 und rot der Trennflächenschar 4.	76
Abbildung 7.1: Darstellung der gemessenen Orientierungen der Schichtflächen im Zuge des Scanline Mappings. Der Durchmesser der roten Scheibe am rechten Bildrand beträgt 16 cm.	81
Abbildung 7.2: Orientierungen der zu Abbildung 7.1 äquivalenten Schichtflächen. Die Flächen wurden mit dem Compass Plugin eingemessen.	81
Abbildung 8.1: Die Hangstabilitätsanalyse hinsichtlich eines Keilversagen ist positiv für die Schwerpunktsflächen der Schichtfläche (türkise Linie) und der Kluffschar 2 (violette Linie). Die dicke schwarze Linie gibt die Orientierung des Aufschlusses an. Der innere Kreis stellt einen Reibungswinkel von 35° dar. Das Intersektionslinear der beiden Trennflächenscharen hat eine Orientierung von 204/49.	86

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Auflistung der Trennflächenarten, ihrer Merkmale und Entstehung.....	24
Tabelle 3.2: Zehn Parameter zur Beschreibung von Trennflächen (International Society for Rock Mechanics, 1978)	25
Tabelle 4.1: Gegenüberstellung der lokalen Koordinaten und der kartesischen Koordinaten, im vorliegende Fall Koordinaten des Bundesmeldenetzes der Zone M28. Alle Koordinaten sind in Meter angegeben.	29
Tabelle 6.1: Auflistung des mittleren Root-mean-square Error der Referenzpunkte für die jeweiligen Bereich. Zusätzlich ist noch der RMSE der georeferenzierten Koordinaten aufgelistet.	47
Tabelle 6.2: Vergleich des mittleren Root-mean-square Errors der Punktwolken mit den unterschiedlichen Bildanzahlen. Zusätzlich ist noch der RMSE der georeferenzierten Koordinaten aufgelistet.	48
Tabelle 6.3: Auswirkungen unterschiedlicher Bildanzahl auf die Konstruktionszeit der spärlichen (sparse Reconstruction) und der dichten (dense Pointcloud).	48
Tabelle 6.4: Auswirkungen der Bildanzahl auf die Punktzahl der gesamten Punktwolke und einer Klufffläche im Zentrum der Punktwolken.	49
Tabelle 6.5: Erfasste Eigenschaften der Trennflächenschar, anhand der Orientierung der Normalvektoren der Punkte und der erhobenen Compass-Daten.	56
Tabelle 6.6: Erfasste Eigenschaften der Kluffschar 1, anhand der Orientierung der Normalvektoren der Punkte und der erhobenen Compass-Daten.	57
Tabelle 6.7: Erfasste Eigenschaften der Kluffschar 2, anhand der Orientierung der Normalvektoren der Punkte und der erhobenen Compass-Daten.	59
Tabelle 6.8: Erfasste Eigenschaften der Kluffschar 3, anhand der Orientierung der Normalvektoren und der erhobenen Compass-Daten.	60
Tabelle 6.9: Erfasste Eigenschaften der Schichtflächen, anhand der Orientierung der Normalvektoren der Punkte und der erhobenen Compass-Daten.	65
Tabelle 6.10: Erfasste Eigenschaften der Kluffschar 1, anhand der Orientierung der Normalvektoren der Punkte und der erhobenen Compass-Daten.	66
Tabelle 6.11: Erfasste Eigenschaften der Kluffschar 2, anhand der Orientierung der Normalvektoren der Punkte und der erhobenen Compass-Daten.	68

Tabelle 6.12: Erfasste Eigenschaften der Kluftschar 3, anhand der Orientierung der Normalvektoren der Punkte und der erhobenen Compass-Daten.	69
Tabelle 6.13: Aufstellung der erhobenen Orientierungsdaten in Form von Schwerpunktsflächen.	71
Tabelle 6.14: Trennflächennormalabstände der Trennflächenscharen im westlichen Bereich.	72
Tabelle 6.15: Ergebniss der Untersuchung hinsichtlich der Endungen der Trennflächen.	72
Tabelle 6.16: Mittlere Orientierungen der Trennflächenscharen. Alle Punkte deren Fallrichtung und Fallwinkel des Normalvektors innerhalb eines Kegels mit einem Radius von 35° liegen, werden der jeweiligen Trennfläche zugeordnet.	76
Tabelle 6.17: Orientierung der Schwerpunktsfläche, Grad der bevorzugten Orientierung und Konzentrationsparameter k der jeweiligen Trennflächenschar.	76
Tabelle 6.18: Trennflächennormalabstände der einzelnen Trennflächenscharen unter der Annahme von nicht persistenten und persistenten Trennflächen.	77
Tabelle 6.19: Mittlere Spurlänge und mittlere Trennflächengröße der einzelnen Trennflächen.	77
Tabelle 7.1: Gegenüberstellung der Orientierung der Schwerpunktsflächen und des Trennflächennormalabstands aus den Normalvektoren der Punkte, den Compass Daten und den Scanline Daten der Schichtflächen.	79
Tabelle 7.2: Gegenüberstellung der Orientierung der Schwerpunktsflächen und des Trennflächennormalabstands aus den Normalvektoren der Punkte, den Compass Daten und den Scanline Daten der Kluftschar 1.	79
Tabelle 7.3: Gegenüberstellung der Orientierung der Schwerpunktsflächen und des Trennflächennormalabstands aus den Normalvektoren der Punkte, den Compass Daten und den Scanline Daten der Kluftschar 2.	79
Tabelle 7.4: Gegenüberstellung der Orientierung der Schwerpunktsflächen und des Trennflächennormalabstands aus den Normalvektoren der Punkte, den Compass Daten und den Scanline Daten der Kluftschar 3.	80
Tabelle 7.5: Gegenüberstellung der Orientierung der Schwerpunktsflächen und des Trennflächennormalabstands aus den Normalvektoren der Punkte, den Compass Daten und den DSE Daten der Schichtfläche.	82
Tabelle 7.6: Gegenüberstellung der Orientierung der Schwerpunktsflächen und des Trennflächennormalabstands aus den Normalvektoren der Punkte, den Compass Daten	

und den DSE Daten der Klufffläche 1.	82
Tabelle 7.7: Gegenüberstellung der Orientierung der Schwerpunktsflächen und des Trennflächennormalabstands aus den Normalvektoren der Punkte, den Compass Daten und den DSE Daten der Klufffläche 2.	83
Tabelle 7.8: Gegenüberstellung der Orientierung der Schwerpunktsflächen und des Trennflächennormalabstands aus den Normalvektoren der Punkte, den Compass Daten und den DSE Daten der Klufffläche 3.	83
Tabelle 8.1: Vergleich der Klüftigkeitsziffer k (Stiny, 1922) und des Blockvolumens V_b (Palmström, 1997) nach der Methode und dem untersuchten Bereich.	85

Abkürzungen

DSE	Discontinuity Set Extractor
DSLR.....	Digital single-lens reflex
Kf.....	Kluffflächen
MVS.....	Multi View Stereo
RMSE	Root-mean-square Error
SfM.....	Structure from Motion
SPF	Schwerpunktsflächen
Ss	Schichtflächen

1. Einleitung

In den vorangegangenen Jahrzehnten haben sich in den Geowissenschaften einige Fernerkundungsmethoden wie *Terrestrial Laser Scanning* (TLS), *Airbourne Laser Scanning* (ALS), *Photogrammetrie* oder *Interferometric Synthetic Aperture Radar* (InSAR) zur Untersuchung unterschiedlichster Problemstellungen etabliert. Im Kontrast zu den meist guten Ergebnissen stehen dabei oft die hohen Kosten der Geräte und Softwares, die dafür nötig sind. Eine weitere Methode ist *Structure from Motion – Multi View Stereo* (SfM-MVS), die sich aus der traditionellen Photogrammetrie heraus entwickelt, und insbesondere in den letzten Jahren vermehrt Anwendung gefunden hat (Carrivick, et al., 2016, p. 5). Die leichte Datenaufnahme im Gelände mit Kameras, eine benutzerfreundliche Datenverarbeitung und ein vergleichbar niedriger Kostenaufwand kann SfM-MVS zu einer guten Alternative machen.

Mit dem Buch *Structure from Motion in the Geosciences* von Carrivick, Smith, & Quincey (2016) wurde ein umfassendes Werk zu der hier behandelten Methodik geschaffen. In der Geologie und der Geotechnik findet SfM-MVS seine Verwendung in Projekten unterschiedlichster Größenordnungen. Relativ kleinräumige Anwendungen sind die Erfassung des Trennflächengefüges in Tunneln (García-Luna, et al., 2019). Eine großräumigere Anwendung wäre die Untersuchung von Massenbewegungen oder eine Hangstabilitätsanalyse einer Felsböschung (Liu, et al., 2019). Vor allem die dreidimensionale Betrachtung und Erfassung des Trennflächengefüges ist ein wesentlicher Vorteil, verglichen mit traditionellen Methoden wie *Scanline und Window Mapping*.

Bei den in der Literatur beschriebenen Forschungsprojekten kommen je nach Anwendung, oft kommerzielle Softwares, differentielle globale Positionierungssysteme oder auch Drohnen zum Einsatz. Trotz aller Steigerung der Qualität führt dies auch zu einer deutlichen Zunahme der Kosten. Deshalb soll in dieser Arbeit untersucht werden, ob mit freier, kostenloser Software und einer herkömmlichen digitalen Spiegelreflexkamera (DSLR-Kamera) auch ausreichend gute Resultate erzielt werden können. Zudem sollen die Ergebnisse mittels *Scanline Mapping* verifiziert werden.

Die gesamte Daten- und Bildaufnahme findet im Steinbruch von Moosen in der Gemeinde Kirchdorf in Tirol statt. Bei den vorliegenden Gesteinen handelt es sich um Karbonate der Reichenhall Formation. Am Steinbruch selbst findet derzeit kein Abbau statt. Die aufgenommenen Bilder, sowie die Referenzpunkte werden mit den Programmen *VisualSfM* (Wu, 2013; Wu, et al. 2011; Wu, 2007) und *SfM_Georef* (James & Robson, 2012) zu einer dreidimensionalen, georeferenzierten Punktwolke verarbeitet. Im nächsten Schritt erfolgt die

Erfassung des Trennflächengefüges mit *CloudCompare* und den darin enthaltenen Plugins (CloudCompare Version 2.10.2, 2019). Erfasst werden dabei die Orientierungen einzelner Trennflächen, die Schwerpunktsflächen der Trennflächenscharen und die Trennflächennormalabstände. Das Trennflächengefüge wird zudem mittels *Scanline* Methode für einen Teilbereich, und mit dem Programm *Discontinuity Set Extractor* (DSE) von Riquelme et al. (2014) für den gesamten Bereich erfasst. Anschließend erfolgt der Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Methoden untereinander.

2. Arbeitsgebiet – Steinbruch von Moosen

Die im Zuge der Masterarbeit erzeugten Punktwolken und erhobenen Daten stammen alleamt aus dem Steinbruch von Moosen. In den nachfolgenden Kapiteln 2.1 und 2.2 soll ein geographischer und geologischer Überblick über das Projektgebiet gegeben werden.

2.1 Geographischer Überblick

Der untersuchte Steinbruch befindet sich nördlich des Gemeindegebiets von Sankt Johann in Tirol, auf der orographisch rechten Seite der Großsache. Der Steinbruch befindet sich im Ortsteil Moosen der Gemeinde Kirchdorf in Tirol. Der genaue Standort des Steinbruchs kann der Abbildung 2.1 anhand des roten Kreuzes entnommen werden.

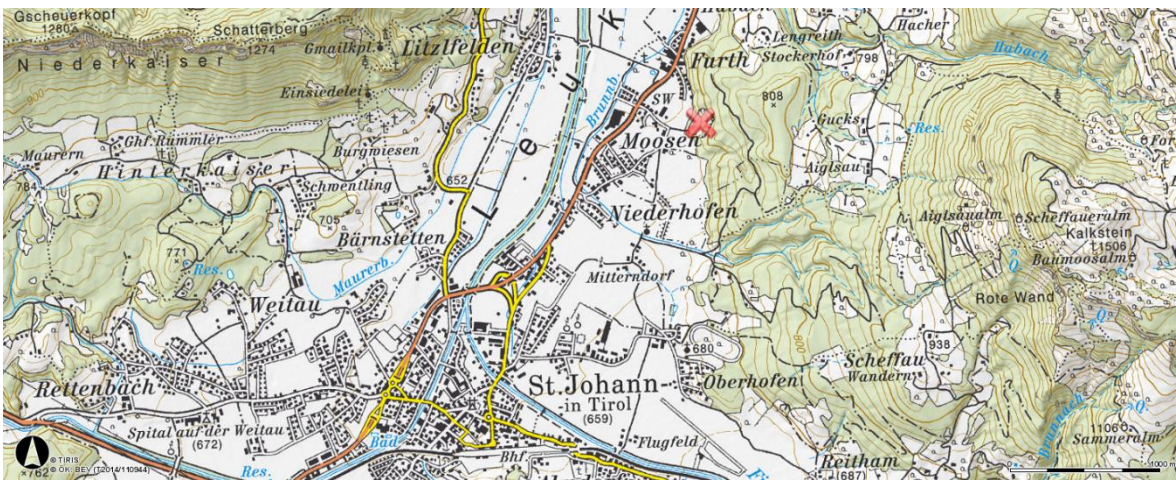


Abbildung 2.1: Ausschnitt aus der ÖK50 Blatt 122 Kitzbühel, des erweiterten Untersuchungsgebiets. Der Standort des Steinbruchs ist mit einem roten Kreuz markiert. Quelle: (Bundesamt für Eich-und Vermessungswesen, 2014)

In Abbildung 2.2 ist ein digitales Geländemodell des Steinbruchs und seiner Umgebung zu betrachten.



Abbildung 2.2: Digitales Geländemodell der Umgebung um den Steinbruch. Die Untersuchungen wurden auf der ersten Stufe des Steinbruchs durchgeführt. Quelle: (Land Tirol, 2019)

2.2 Geologischer Überblick

Der Steinbruch von Moosen befindet sich geologisch gesehen im eoalpidischen Deckenstapel des Oberostalpins. Innerhalb dieser Deckenstapels ist die Lokalität in der Staufen-Höllengebirge-Decke des Tirolisch-Norischen Deckensystem angesiedelt.

Die in der weiteren Umgebung des Steinbruchs aufgeschlossenen Festgesteine sind allesamt dem Tirolikum der Nördlichen Kalkalpen zuzuordnen. Deren liegende Gesteine werden von der permischen Basisbrekzie der Gröden Formation gebildet. Weiter im Hangenden folgen untertriassische Quarzsandsteine des alpinen Buntsandsteines, welche in Abbildung 2.3 in der Mitte der unteren Bildhälfte zu erkennen sind. Diese Sandsteine werden von Gesteinen der unteren Mitteltrias durch die Reichenhall-Formation und die Gutenstein-Formation überlagert. Südlich des Steinbruchs grenzen Rauhwacken und Dolomitbrekzien der Reichenhall-Formation an. Die cm- bis dm-gebankten Kalke und Dolomite des Steinbruchs werden hingegen der Gutenstein-Formation zugeordnet. Weiter im Norden sind noch karbonatische Gesteine der Steinalm-Formation und des Wettersteinkalks aufgeschlossen.

Quartäre Sedimente sind vor allem in Form der fluviatilen Ablagerungen der Großache im Osten des Steinbruchs, sowie durch glaziale Ablagerungen in Form von Grundmoränen vorzufinden. Wie in Abbildung 2.3 zu erkennen ist, befinden sich oberhalb der Geländekante des Steinbruchs in östlicher Richtung ausgedehnte Grundmoränenablagerungen. Diese sind auch im digitalen Geländemodell der Abbildung 2.2, aufgrund der Geländemorphologie, zu erkennen. Die Matrix weist eine rötlich graue Färbung auf. Das Geschiebe besteht aus lokalen Klusten in Form von Karbonaten,

Sandsteinen und Porphyroiden. Zudem sind erratische Klaster durch Gesteine des Tauernfensters in der Grundmoräne vorzufinden.

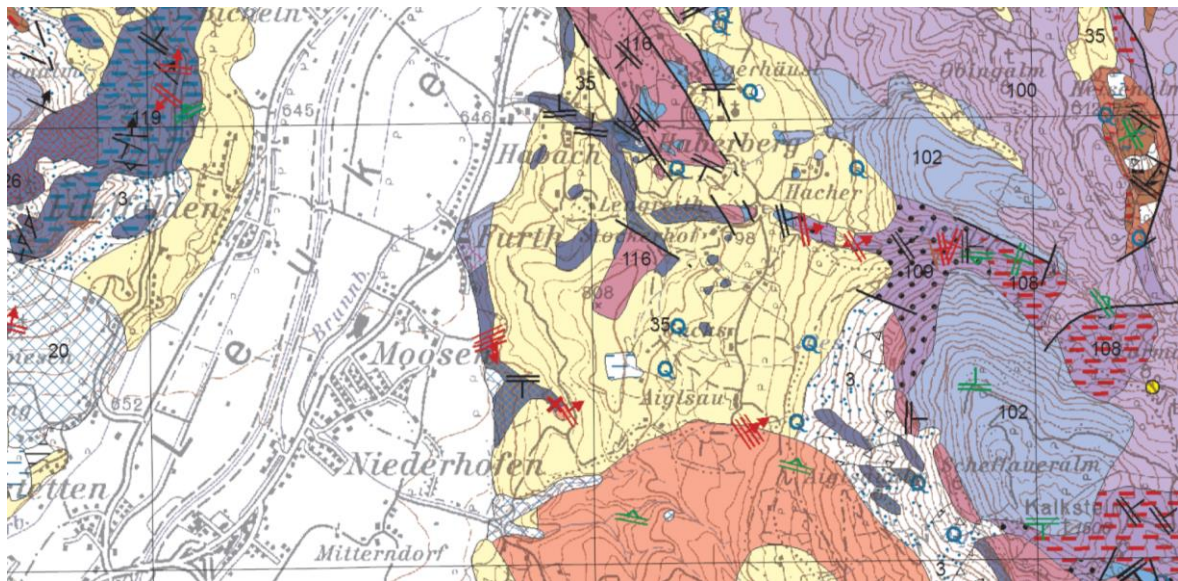


Abbildung 2.3: Ausschnitt aus der geologischen Karte des Blattes 91 Sankt Johann in Tirol. Quelle: (Geologische Bundesanstalt, 2008)

3. Methodik

Im Zuge dieser Arbeit wird ein Ablauf zur Erstellung einer dreidimensionalen, georeferenzierten Punktwolke, und der anschließenden ingenieurgeologischen Untersuchung mit freier Software erarbeitet.

In diesem Kapitel werden nun die Methode *Structure from Motion – Multi View Stereo*, die bildliche Erfassung mit der DSLR-Kamera, die verwendeten Programme und die theoretischen Grundlagen zur Erfassung von Trennflächen kurz erläutert.

3.1 Structure from Motion - Multi View Stereo (SfM-MVS)

Mit den starken Entwicklungen der letzten Jahrzehnte im Bereich der digitalen Fotografie und den Fortschritten in Bezug auf 3D Computervision Algorithmen hat sich SfM-MVS als Teilgebiet der Photogrammetrie etabliert (Carrivick, et al., 2016).

Durch entsprechende SfM-MVS Software werden digitale, sich überlappende Bilder zu dreidimensionalen, georeferenzierten Punktwolken verarbeitet. Neben der Punktwolke werden zusätzlich noch die unterschiedlichen Kameraposition rekonstruiert.

Die Genauigkeiten der einzelnen Punkte können dabei jene von Laserscandaten erreichen. Jedoch kann durch die Vielzahl der Verarbeitungsschritte die Kontrolle über die Genauigkeit verloren gehen. Dies wirft wiederum die Frage nach der Reproduzierbarkeit auf (Carrivick, et al., 2016). Jedoch sprechen ein geringerer Kostenaufwand, eine Punktwolke mit Echtfarben und hoher Genauigkeit und eine einfache und flexible Handhabung für SfM-MVS im Vergleich zu anderen Fernerkundungsmethoden.

3.1.1 Bildliche Erfassung von Gesteinsaufschlüssen

Die Basis für die Erstellung von georeferenzierten, dreidimensionalen Punktwolken von Gesteinsaufschlüssen bildet die Bildaufnahme. Aufgrund der Art der bildlichen Erfassung und der geringen Aufnahmeentfernung von wenigen Metern, wird diese Form der Fernerkundung auch als Nahbereichsphotogrammetrie bezeichnet. Vergleicht man die Aufnahmemethode mit anderen Fernerkundungsmethoden zu Erstellung von Punktwolken, werden einige Verschiedenheiten sichtbar. Ein wesentlicher Unterschied der Photogrammetrie ist die passive Aufnahme von Strahlung mit einer DSLR-Kamera. Wohingegen beim Laserscanning aktiv Laserstrahlen ausgesendet und so die Entfernung gemessen wird. Dadurch

können externe Faktoren, wie die Belichtung oder die Oberflächenbeschaffenheit eines Objekts, bei der Nahbereichsphotogrammetrie deutlich mehr Probleme verursachen.

3.1.2 VisualSFM v.0.5.26

Bei dem Programm *VisualSFM* handelt es sich um eine frei verwendbare Software von Changchang Wu. Das Programm vereint unterschiedliche SfM und MVS Algorithmen, die von Dr. Wu selber stammen (Wu 2007; Wu, Agarwal, Curless, & Seitz 2011; Wu 2013), und welche, die von anderen Autoren wie Yasutaka Furukawa (Furukawa & Ponce, 2010; Furukawa, Curless, Seitz, & Szeliski, 2010) geschrieben wurden.

Um *VisualSfM* verwenden zu können, muss unter <http://ccwu.me/vsfm/> (letzter Abruf: 04.04.2019) die geeignete Version des Programms heruntergeladen werden. Zusätzlich müssen noch die Dateien *cmvs.exe*, *genOption.exe* und *pmvs2.exe* von der GitHub-Seite von Pierre Moulon (<https://github.com/pmoulon/CMVS-PMVS/tree/master/binariesWin-Linux>, letzter Abruf: 14.05.2019) heruntergeladen und in einem Ordner mit der Datei *VisualSfM.exe* gespeichert werden. Wird *VisualSfM* das erste Mal ausgeführt, wird eine Datei mit der Programmkonfiguration und dem Namen *nv.ini* erstellt. Um Arbeitsspeicher und Zeit zu sparen, sollte in dieser Datei die Variable *param_less_visualization_data* von 0 auf 1 geändert werden (Morgen & Brogan, 2016).

Das Erscheinungsbild der graphischen Benutzeroberfläche sowie die einzelnen Schritte zur Erstellung einer georeferenzierten Punktwolke können der Abbildung 3.1 entnommen werden.

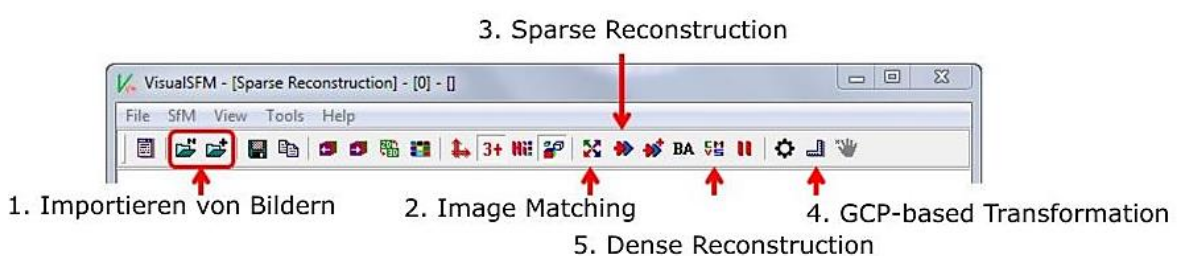


Abbildung 3.1: Ausschnitt der graphischen Benutzeroberfläche von VisualSfM. Die einzelnen Schritte zur Erstellung einer georeferenzierten Punktwolke sind in chronologischer Reihenfolge angeführt.

3.1.3 SfM_Georef v. 3.1

Bei diesem Programm handelt es sich um eine graphische Benutzeroberfläche zur Georeferenzierung von Punktwolken. Die *Matlab*-Software wurde von James & Robson (2012) entwickelt, und ist kostenlos verfügbar. Für eine vollständige Georeferenzierung und dreidimensionale Skalierung mit der Software, müssen mindestens drei Referenzpunkte in

zwei Bildern zu erkennen sein.

In Abbildung 3.2 kann die graphische Benutzeroberfläche des Programms betrachtet werden.

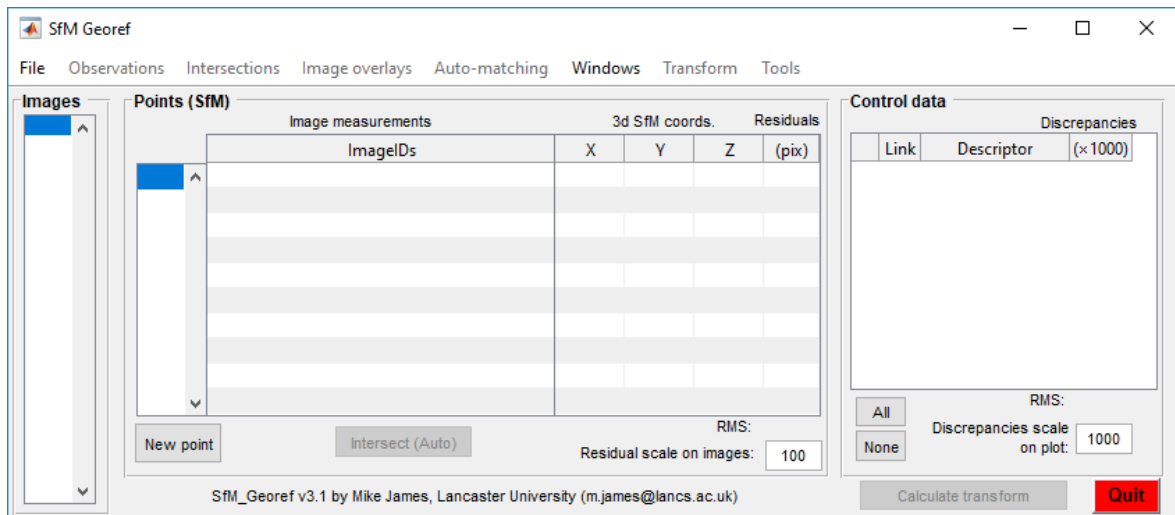


Abbildung 3.2: Ansicht der graphischen Benutzeroberfläche des Programms SfM_Georef v.3.1.

3.1.4 CloudCompare v. 2.10.2

Bei diesem Programm handelt es sich um eine freie Software und ein Open Source Projekt zur Bearbeitung von Punktwolken. Die Zuweisung von Skalarfeldern, die Erstellung von dreidimensionalen Geometrien sowie von Flächen und Linien sind grundlegende Funktionen. Innerhalb der Software sind noch eine Vielzahl an Plugins und Algorithmen integriert, die eine weitere Bearbeitung der Punktwolke ermöglichen.

In Abbildung 3.3 kann die Ansicht der Software betrachtet werden.

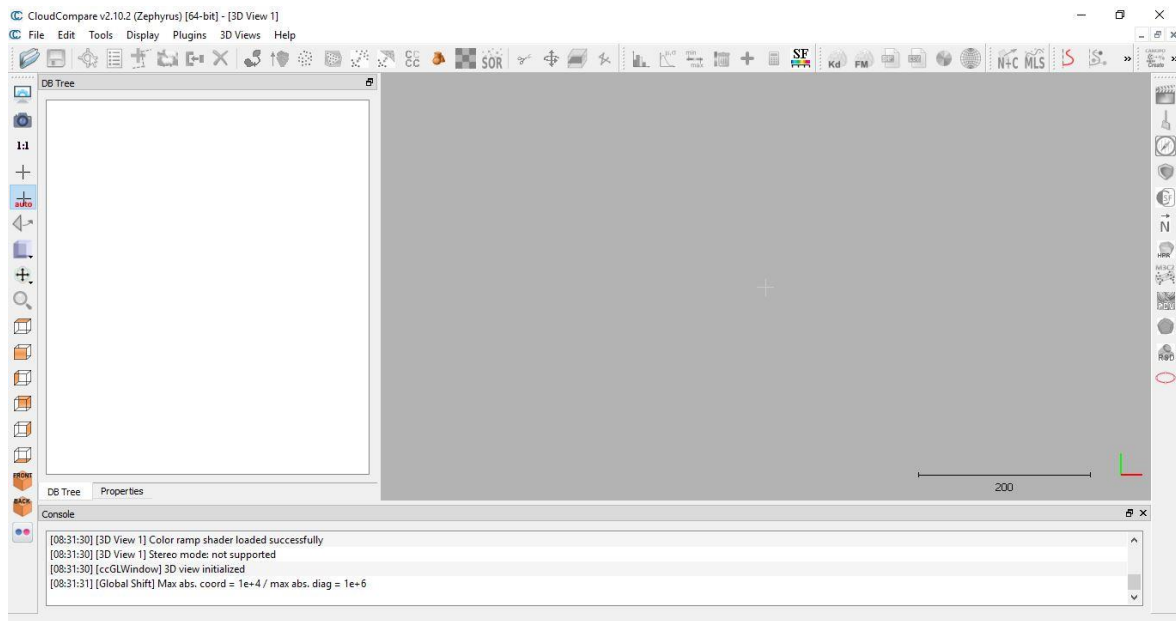


Abbildung 3.3: Ansicht der Software CloudCompare v. 2.10.2.

3.1.5 Discontinuity Set Extractor v. 2.08

Discontinuity Set Extractor (DSE) ist eine Open Source Software von Riquelme, et al. (2014) zur semi-automatischen Charakterisierung von Trennflächen in dreidimensionalen Punktwolken. Das Programm identifiziert die algebraischen Gleichungen von verschiedenen Flächen in Gesteinsaufschlüssen. Dies geschieht durch die Anwendung von Analysen auf Basis von Koplanaritätstests für Nachbarschaftspunkte, der Ermittlung der Hauptorientierungen durch eine Kernel-Dichteschätzung und der Identifikation von Clustern durch einen dichte-basierten Scan-Algorithmus mit *Noise* (Riquelme, et al., 2014).

Zusätzlich können mit *DSE* noch die Trennflächenabstände der charakterisierten Punktwolke (Riquelme, et al., 2015), sowie die Persistenz (Riquelme, et al., 2018) ermittelt werden.

In Abbildung 3.4 kann eine Ansicht des Programms betrachtet werden.

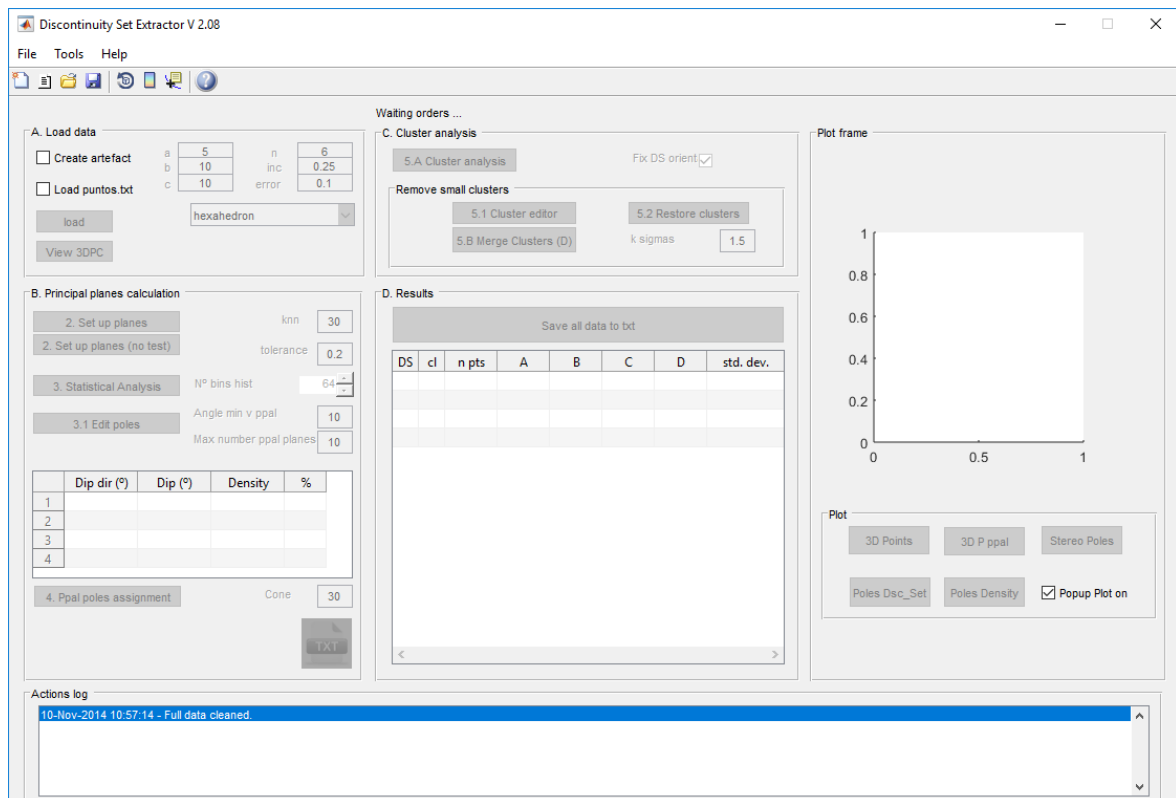


Abbildung 3.4: Ansicht des Programms Discontinuity Set Extractor (DSE) v. 2.08.

3.2 Berechnung der Schwerpunktsflächen

Die Berechnung der Orientierung der Schwerpunktsflächen erfolgt nach Wallbrecher (1986). Zusätzlich zu Orientierung der Schwerpunktsflächen werden noch der Grad der bevorzugten Orientierung $R\%$ und der Konzentrationsparameter k berechnet.

Aufgrund der hohen Punkteanzahl der Punktwolken können diese Berechnungen nicht mehr in Microsoft Excel durchgeführt werden. Deshalb wird dafür die integrierte Entwicklungsumgebung *Spyder* der *Anaconda Distribution* verwendet. Hierbei handelt es sich um eine graphische Benutzeroberfläche in der eine Vielzahl an Python-Module bereits mitinstalliert sind.

Der programmierte Python-Code kann dem Anhang A entnommen werden.

3.3 Stereographische Projektionen

Zur Darstellung von struktur- und ingenieurgeologischen Daten wie Trennflächen und deren Polpunkte, und zur Hangstabilitätsanalyse werden zwei verschiedene Programme verwendet. Zum einen das *open-source* Programm *InnStereo Beta 6*, zum anderen wird das von

Richard W. Allmendinger geschriebene Programm *Stereonet 10* (Allmendinger, et al., 2012; Cardozo & Allmendinger, 2013) verwendet.

3.4 Scanline Mapping

Eine gängige Praxis zur Untersuchung des Trennflächengefüges von Gesteinsaufschlüssen ist das *Scanline Mapping*. Hierfür wird ein Maßband entlang eines Aufschlusses gespannt, und anschließend werden die Trennflächen, die mit der *Scanline* verschneiden, systematisch aufgenommen. Dabei werden vor allem die in Tabelle 3.2 aufgelisteten Parameter erhoben. Zusätzlich werden noch die *Semi-Trace Length* und die Art der Endungen der Klüfte notiert. Die Berechnung des Terminationsindex T_i erfolgt nach Priest (1985). Die Bestimmung der Rauigkeit erfolgt nach Barton & Choubey (1977).

In Abbildung 3.5: Schematische Darstellung der Trennflächeneigenschaften und einer horizontal verlaufenden *Scanline* oder einem Bohrloch. Quelle: Abbildung 3.5 ist eine schematische Darstellung der Trennflächeneigenschaften und einer horizontalen *Scanline* oder einem Bohrloch zu sehen.

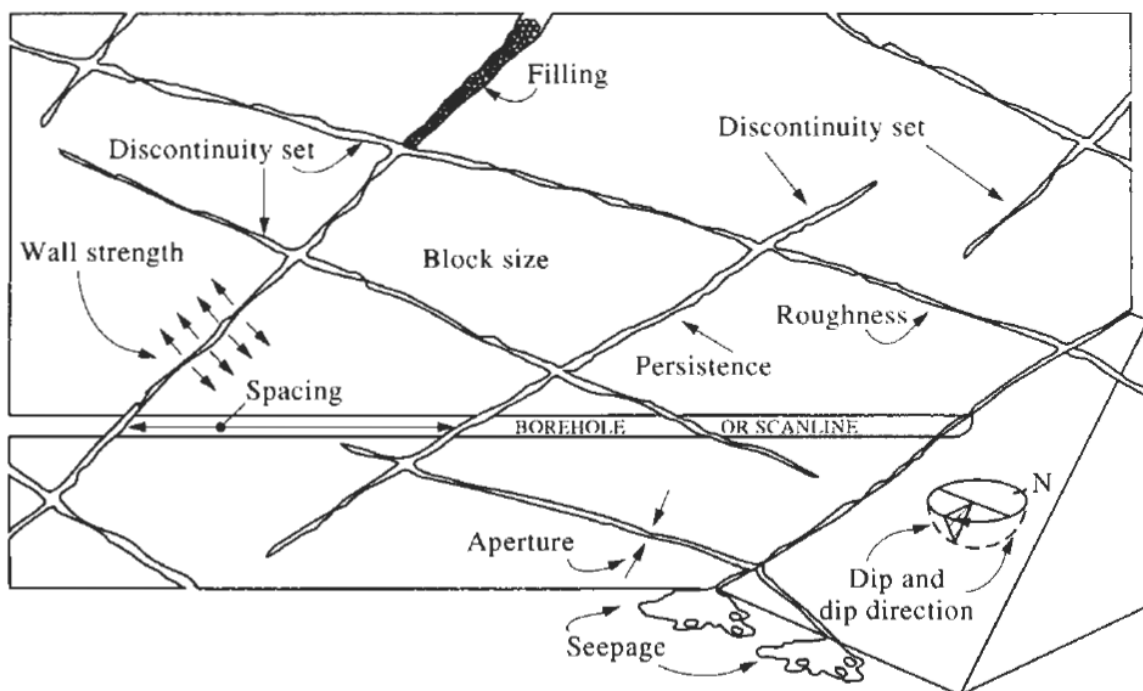


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung der Trennflächeneigenschaften und einer horizontal verlaufenden *Scanline* oder einem Bohrloch. Quelle: (Hudson, 1989)

3.5 Trennflächen

Das mechanische Verhalten des oberflächennahen Gebirges und der Gesteine wird Großteiles von der Geometrie sowie den Eigenschaften der Trennflächen beeinflusst. Häufig vorkommende Arten von Trennflächen, deren Ursprung und Eigenschaften sollen in Tabelle 3.1 erläutert werden.

Tabelle 3.1: Auflistung der Trennflächenarten, ihrer Merkmale und Entstehung.

Trennflächenart (Abk.)	Merkmale	Entstehung
Kluftfläche (Kf)	Brüche ohne deutlichen Versatz	Faltung, tektonische Entlastung, thermische Spannungen
Schichtfläche (Ss)	parallel – subparallel	Sedimentation
Schieferungsfläche (Sf)	parallel – subparallel	Metamorphose und Tektonik
Störung (St)	Brüche mit deutlichem Versatz	Tektonik, Erdbeben

Zusätzlich zu den lithologischen Eigenschaften sind die in Tabelle 3.2 angeführten Trennflächeneigenschaften grundlegend, um das Verhalten und die Stabilität von Gesteinsmassen analysieren und beschreiben zu können (International Society for Rock Mechanics, 1978).

Tabelle 3.2: Zehn Parameter zur Beschreibung von Trennflächen (International Society for Rock Mechanics, 1978)

Parameter	Beschreibung
Orientierung	Ausrichtung der Fläche im Raum, die durch die Fallrichtung und den Fallwinkel beschrieben wird.
Trennflächenabstand	Normalabstand zwischen zwei benachbarten Trennflächen.
Persistenz	Gemessene Spurlänge in einem Aufschluss.
Rauigkeit	Oberflächenrauigkeit und Welligkeit einer Trennfläche.
Wandstärke	Druckfestigkeit der benachbarten Gesteinsoberflächen einer Trennfläche.
Öffnungsweite	Normalabstand zwischen zwei benachbarten Gesteinsoberflächen einer Trennfläche.
Klufffüllung	Das Material, das die beiden benachbarten Gesteinsoberflächen trennt, und für gewöhnlich weicher als das Muttergestein ist.
Wasserfluss	Wasserfluss und Feuchtigkeit innerhalb einer Trennfläche oder der gesamten Gesteinsmasse.
Anzahl der Trennflächenscharen	Anzahl der Scharen, die das gesamte Trennflächensystem umfassen. Die Gesteinsmasse kann noch von weiteren individuellen Trennflächen durchtrennt sein.
Blockvolumen	Dimension der einzelnen Gesteinsblöcke, aufgrund von sich gegenseitig überschneidenden Trennflächen und ihrem Trennflächenabstand.

Um aus den erhobenen Daten Aussagen über die Blockgröße treffen zu können, werden die Klüftigkeitsziffer k (Stiny, 1922) und die Ermittlung des Blockvolumens V_b (Palmström, 1997) verwendet. In Abbildung 3.6 kann die Beziehung zwischen diesen beiden Parametern betrachtet werden.

Die Teilklüftigkeitsziffer k_- nach Stiny (1922) ergibt sich aus dem reziproken Wert des Trennflächennormalabstands d_n der jeweiligen Schar. Die Berechnung erfolgt durch die Formel 3.1. Zur Berechnung der Klüftigkeitsziffer k werden die einzelnen Teilklüftigkeitsziffern eines Aufschlusses addiert.

$$k_- = \frac{1}{d_n} \quad (3.1)$$

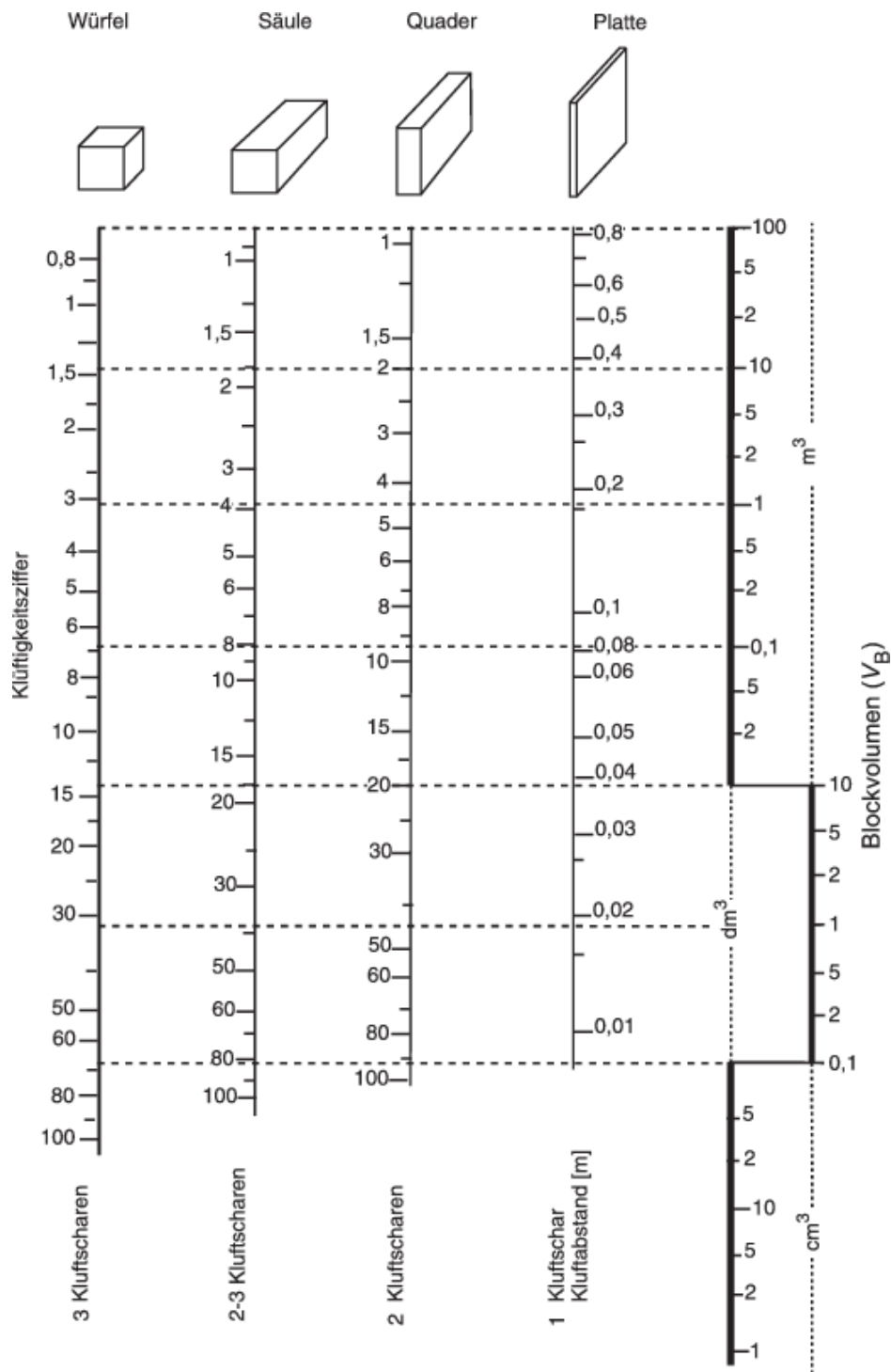


Abbildung 3.6: Beziehung zwischen der Klüftigkeitsziffer k (Stiny, 1922) und dem Blockvolumen V_B (Palmström, 1997). Quelle: (Dachroth, 2017)

4. SfM-MVS Datenerhebung

In folgendem Kapitel soll die Erhebung der notwendigen Daten zur Erstellung einer dreidimensionalen, georeferenzierten Punktwolke erläutert werden. Grundlegende Punkte, die beachtet werden müssen, sind die Positionierung der Referenzpunkte, die Ermittlung der Koordinaten, die Kameraeinstellungen und die Aufnahme der Bilder.

4.1 Referenzpunkte und Koordinatensystem

Mit Hilfe von Referenzpunkten ist es möglich, dass ein Model eines realen Objektes richtig skaliert werden kann. Zudem können diese Punkte in einem lokalen, geographischen oder kartesischen Koordinatensystem eingemessen werden. Dadurch erhält man ein Model, an dem Eigenschaften wie Länge, Fläche und Volumen sowie die Orientierung von Flächen gemessen werden können.

Aufgrund dessen, dass sich in der Literatur keine eindeutigen Empfehlungen zur Auslegung der Referenzpunkte finden lassen, wird die hier verwendete Methode aus einer Reihe von Varianten kombiniert. Als Material werden 3 mm dicke, kreisförmige Platten aus Polyvinylchlorid (PVC) verwendet. Mit den Punkten wird nun bei den jeweiligen Aufschlüssen ein lokales Koordinatensystem definiert, wo die positive y-Achse die Nordrichtung und die positive x-Achse die Ostrichtung darstellt. Eine mögliche Anordnung der Referenzpunkte kann der Abbildung 4.1 entnommen werden.

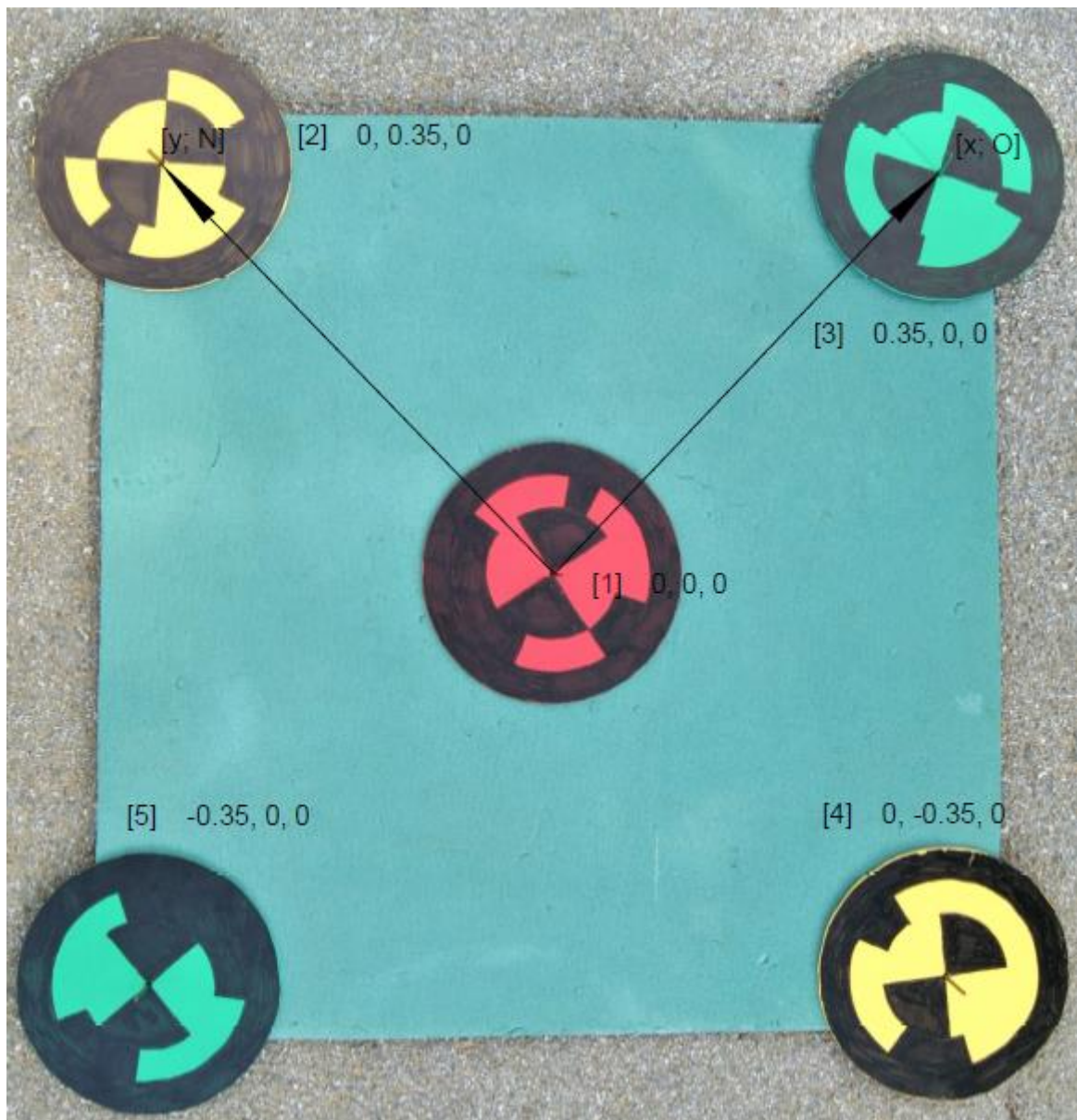


Abbildung 4.1: Anordnung der Referenzpunkte in einem lokalen Koordinatensystem. In den eckigen Klammern ist die Nummer der Punkte zu lesen. Dahinter folgen die x -, y - und z -Koordinaten in Metern. Die Pfeile symbolisieren die Orientierung des Koordinatensystems. Der Pfeil in Richtung des gelben Punktes stellt die y -Achse, mit Richtung Norden dar. Der Pfeil in Richtung des grünen Punktes stellt die x -Achse, mit Richtung Osten dar. Abgeändert nach García-Luna, et al. (2019).

4.2 Mapit GIS v. 7.2.1Core

Der Nullpunkt (Punkt [1] in Abbildung 4.1) wird zusätzlich mit der Funktion der Standortermittlung eines Smartphones (Huawei Mate 10 lite) und der App *Mapit GIS* eingemessen. Die Messung erfolgt in WGS84-Koordinaten mit einer Genauigkeit von ± 3 -5 m bei gutem Signal. Um die geographischen Koordinaten in kartesische zu transformieren, wird die Funktion der Koordinatenabfrage in den geographischen Informationssystemen der jeweiligen Bundesländer verwendet.

Für eine vollständige Georeferenzierung müssen die Koordinaten der restlichen Punkte, basierend auf der Nullpunktmessung umgerechnet werden. Eine Gegenüberstellung von lokalen und kartesischen Koordinaten kann in Tabelle 4.1 betrachtet werden.

Tabelle 4.1: Gegenüberstellung der lokalen Koordinaten und der kartesischen Koordinaten, im vorliegende Fall Koordinaten des Bundesmeldenetzes der Zone M28. Alle Koordinaten sind in Meter angegeben.

Punktnummer	Lokale Koordinaten (x; y; z) [m]	MGI Austria M28 (Rechtswert; Hochwert; Höhe) [m]
1	0; 0; 0	159423,42; 268923,7; 665,5
2	0; 0,35; 0	159423,42; 268924,05; 665,5
3	0,35; 0; 0	159423,77; 268923,7; 665,5
4	0; -0,35; 0	159423,42; 268923,35; 665,5
5	-0,35; 0; 0	159423,07; 268923,7; 665,5

Durch diese Form der Georeferenzierung soll später jeder Punkt der Punktwolke kartesische Koordinaten mit einer allgemeinen Standortgenauigkeit von einigen Metern besitzen. Die Genauigkeit hinsichtlich der dreidimensionalen Punktgenauigkeit sollte im Zentimeterbereich liegen (Carrivick, et al., 2016).

4.3 Kameraeinstellung

Die Art der Bildaufnahme sowie die Wahl einer geeigneten Kamera ist stark abhängig vom jeweiligen Objekt, das fotografiert werden soll. So kann eine Kamera mit einer geringen Auflösung bei ebenfalls geringem Abstand zum Objekt eine ausreichende Bildqualität liefern. Für geowissenschaftliche Anwendungen erweisen sich DSLR-Kameras mit Objektiven mit einer fixen Brennweite am geeignetsten. Wobei Weitwinkelobjektive mit Brennweiten um 35 mm am besten für die Erstellung von dreidimensionalen Modellen geeignet sind (James & Robson, 2012).

Im Zuge dieser Arbeit werden alle Bilder mit einer Sony A390 DSLR-Kamera mit einer Bildauflösung von 14 Megapixel aufgenommen. Das verwendete Objektiv hat eine Brennweite von 18-55 mm, wobei die Brennweite konstant auf 18 mm eingestellt ist. Um möglichst viele Ebenen eines Bildausschnitts scharf darstellen zu können, werden die Aufnahmen der Aufschlüsse mit kleinen Blenden um $f16$ gemacht. Je nach Helligkeit wird zusätzlich noch die Lichtempfindlichkeit des Sensors über den ISO Wert und die Belichtungszeit eingestellt.

4.4 Bildaufnahme

Externe Faktoren, die das Fotografieren beeinflussen sind die Sonneneinstrahlung, die Vegetation und die Bewölkung. Eine sich wechselnde Beleuchtung des Aufschlusses durch vorbeiziehende Wolken, sich verändernde Schatten bei schrägeinfallendem Licht oder Schatten, die durch Vegetation verursacht werden, können bei der späteren Bildverarbeitung Probleme bereiten. Als ideale Bedingungen für die Bildaufnahme gelten ein bedeckter Himmel, bei dennoch hellen Lichtverhältnissen (James & Robson, 2012).

Damit im Gelände genügend Aufnahmen für das Model gemacht werden, sollte man sich im Vorhinein überlegen, welchen Bildbereich man mit der jeweiligen Kameraposition und der Brennweite des Objektivs abdeckt.

Bei der hier verwendeten Brennweite von 18 mm hat man einen Bildwinkel von 100° . Fotografiert man den Aufschluss in einer Distanz von 10 m, können 12 m in horizontaler Richtung erfasst werden. Wird das nächste Bild um ein Viertel (2,5 m) des Abstands zum Aufschluss (10 m) seitlich versetzt zum ersten Bild aufgenommen, ergibt sich eine Überlapung der beiden Bilder von fast 80 %. Um die einzelnen Strukturen bestmöglich darstellen zu können, sollten die abgebildeten Lichtpfade zweier unterschiedlicher Bilder und eines Objekts einen Winkel von 90° einnehmen (Wolf, et al., 2014, p. 455). Dies wird dadurch erreicht, dass an jeder Kameraposition mindestens drei Bilder aufgenommen werden. Eines parallel zum Aufschluss, eines um 45° nach rechts und eines um 45° nach links geschwenkt. In Abbildung 4.2 ist eine mögliche Anordnung der Kamerapositionen, zur Erfassung eines Gesteinsaufschlusses zu erkennen.

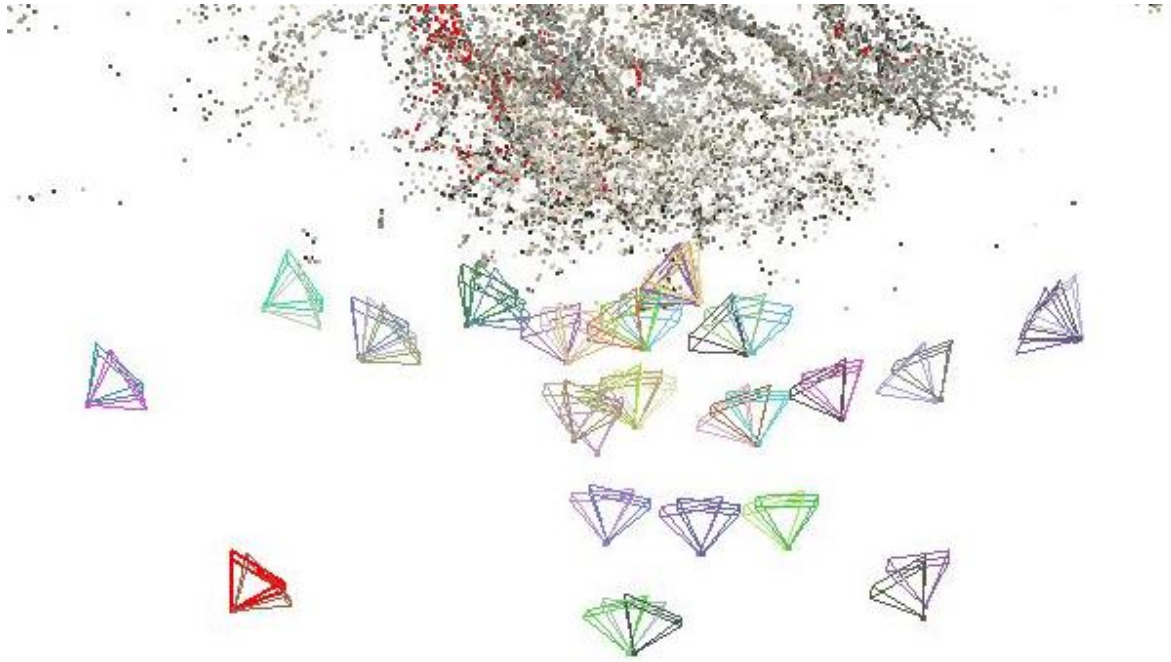


Abbildung 4.2: Mögliche Anordnung von Kamerapositionen zur bildlichen Erfassung eines Aufschlusses. An jeder Position wurden mehrere Fotos mit unterschiedlichen Winkeln zum Aufschluss hin gemacht.

Generell kann gesagt werden, dass immer mehr Bilder als nötig gemacht werden sollten. Um im späteren Modell eine zufriedenstellende Auflösung zu erreichen, ist eine Bildanzahl von 100 oder mehr empfehlenswert.

5. SfM-MVS Datenverarbeitung

Mit Hilfe der hier vorgestellten Programme und Arbeitsschritte werden die unter Kapitel 4 erhobenen Daten zu dreidimensionalen, georeferenzierten Punktwolken verarbeitet. In einem weiteren Arbeitsschritt erfolgt die Erfassung des Trennflächengefüges.

Die Punktwolken in dieser Arbeit werden ausschließlich mit einem Lenovo V110 Laptop, mit Windows 10 Betriebssystem, Intel Core i3 Prozessor mit Intel HD-Grafik 520 Grafiktreiber und 8 GB RAM erstellt.

5.1 VisualSFM v.0.5.26

In diesem Kapitel erfolgt eine Beschreibung der einzelnen Schritte, die für die Erstellung einer dreidimensionalen Punktwolke mit dem Programm *VisualSFM* erforderlich sind. Die Unterteilung gliedert sich in *Feature Detection*, *Structure from Motion*, *Skalieren und Georeferenzieren* in einem lokalen Koordinatensystem und *Multi View Stereo*.

5.1.1 Feature Detection

Um eine Punktwolke eines Objekts zu erstellen, werden zu Beginn die ausgewählten Bilder in das Programm geladen. Mit der Funktion „*Compute Missing Matches*“ werden in den Bildern charakteristische Punkte, sogenannte *keypoints* identifiziert, und diese anschließend zwischen allen möglichen Bildpaaren verglichen. Bei der verwendeten Methode handelt es sich um eine „*scale invariant feature transform*“ (*SIFT*) Objekterkennung (Lowe, 2004). In Abbildung 5.1 sind die daraus resultierenden Pfade zwischen den *keypoints* eines Bildpaares zu erkennen.

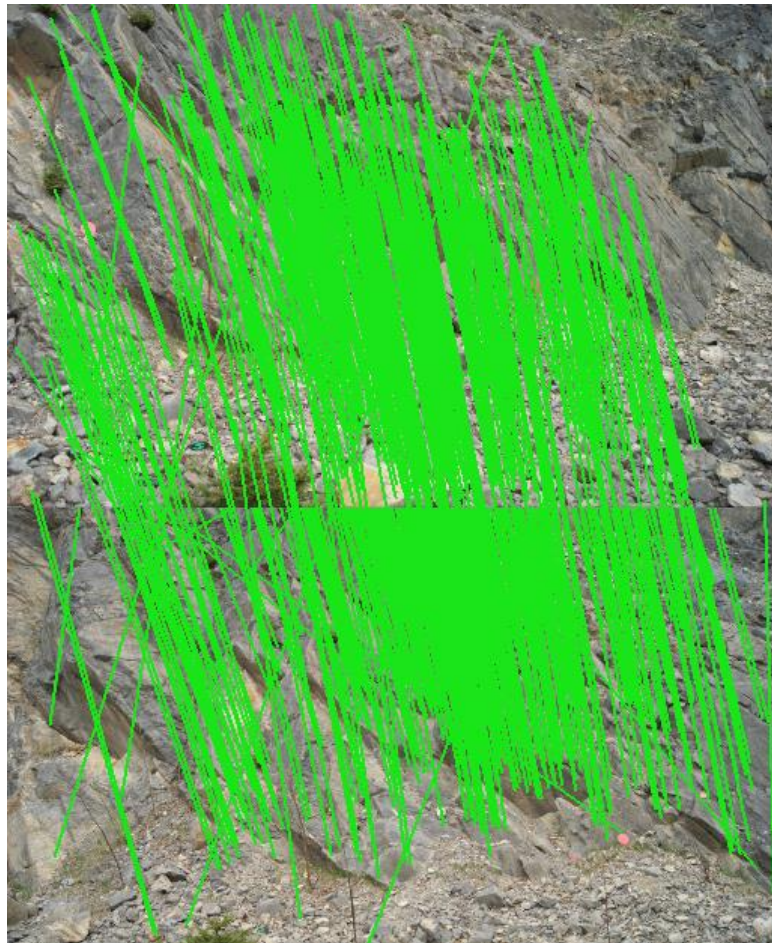


Abbildung 5.1: Pfade zwischen den "keypoints" zweier Bildpaare, die mit Hilfe des Algorithmus von (Lowe, 2004) erkannt wurden.

5.1.2 Structure from Motion

Anschließend erfolgt die Konstruktion der spärlichen Punktwolke (engl. *sparse pointcloud*) mit der Funktion „*Reconstruct Sparse*“. Durch die sogenannte „*bundle adjustment*“ werden aus den unterschiedlichen Positionen eines *keypoints* in den unterschiedlichen Bildern, die dreidimensionale Position des Punktes und die Kameraeigenschaften ermittelt (Wu, et al., 2011). Eine schematische Darstellung dieses Arbeitsschrittes kann aus Abbildung 5.2 entnommen werden.

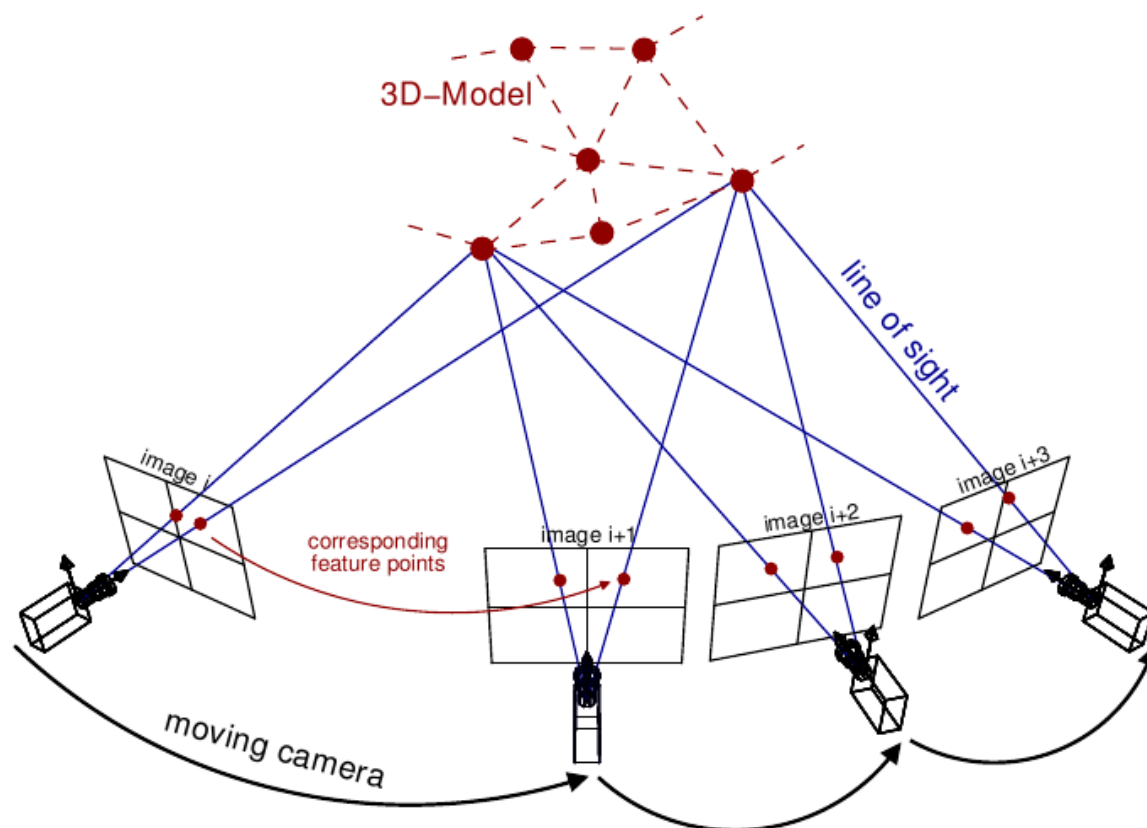


Abbildung 5.2: In der Abbildung ist zu erkennen, wie unterschiedliche "keypoints" in den Bildern von unterschiedlichen Kamerapositionen aus, erfasst werden. Dadurch ist es möglich, dass die dreidimensionale Geometrie eines Objekts rekonstruiert werden kann. Quelle: <http://theia-sfm.org/sfm.html> (letzter Abruf: 15.05.2019)

5.1.3 Skalieren und Georeferenzieren in einem lokalen Koordinatensystem

Die Positionen der zuvor konstruierten Punkte und Kamerapositionen wurden bis jetzt nur aufgrund der unterschiedlichen Orientierung der Bilder in einem eigenen Koordinatensystem ermittelt. Absolute Koordinaten und Distanzen zwischen Punkten können daher erst nach einer Skalierung und Georeferenzierung der Punktwolke gemessen werden (Szeliski, 2011). Unter der Funktion „*GCP-based Transformation*“ wird die Auswahlmöglichkeit der sogenannten Referenzpunkte (engl. *Ground Control Points*) eingeschaltet. Die Referenzpunkte werden in jedem Bild einzeln ausgewählt, und in einem lokalen Koordinatensystem referenziert. In Abbildung 5.3 ist in einem Ausschnitt aus *VisualSFM* zu sehen, wie den Referenzpunkten Koordinaten zugewiesen werden.

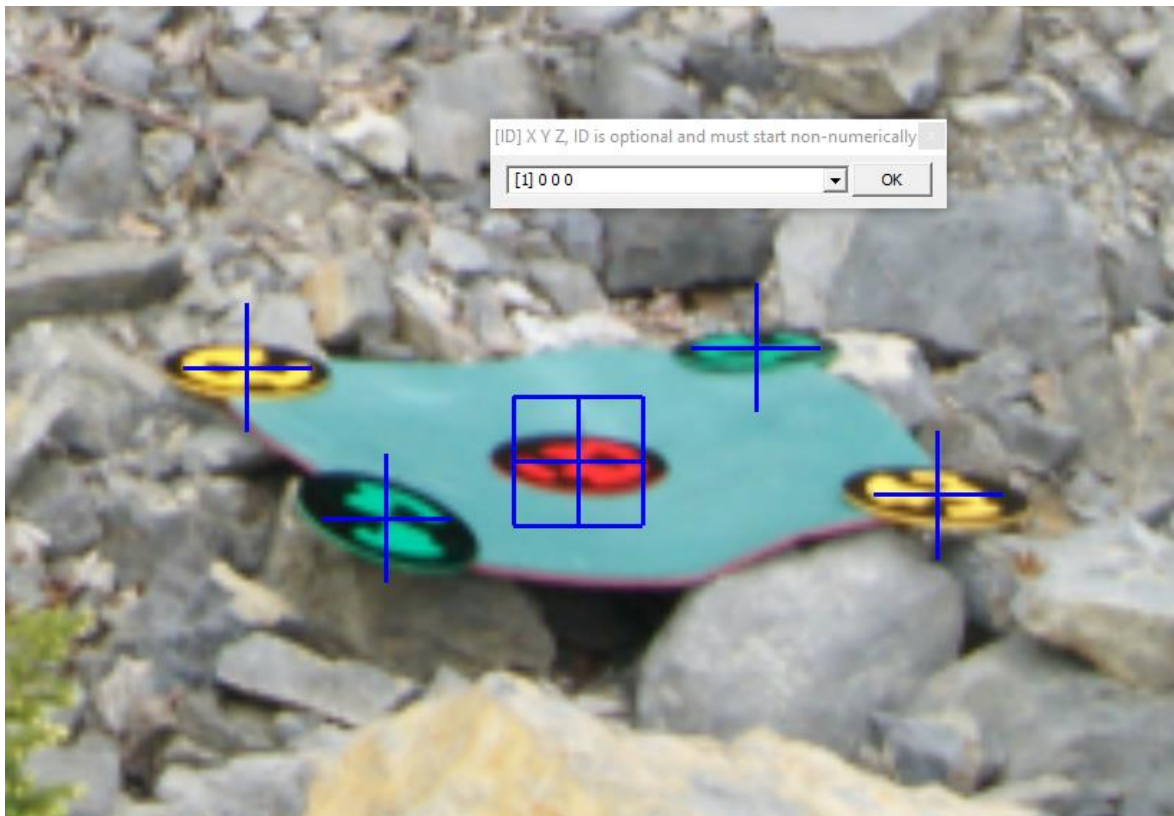


Abbildung 5.3: In VisualSFM wird jeder Referenzpunkt mit $[ID] X Y Z$ bezeichnet. Wobei für "ID" die Nummer des Punktes und für $X Y Z$ seine x -, y - und z -Koordinaten eingesetzt werden.

Die Georeferenzierung mit kartesischen Koordinaten findet später, mit dem unter Kapitel 5.2 vorgestellten Programm statt.

5.1.4 Multi View Stereo

Im letzten Schritt erfolgt die Konstruktion der dichten Punktwolke (engl. *dense pointcloud*) durch MVS-Algorithmen. Dafür wird zum einen der *PMVS2-Algorithmus* (Furukawa & Ponce, 2010), und zum anderen der *CMVS-Algorithmus* (Furukawa, et al., 2010) verwendet. In Abbildung 5.4 ist zu sehen, wie mit Hilfe des *CMVS-Algorithmus* Bilder mit den gleichen SfM-Punkten in Clustern zusammengefasst werden. Die Konstruktion der dichten Punktwolke wird so für jeden Cluster, und nicht für das gesamte Model gleichzeitig, durchgeführt. Dadurch wird das Problem der sonst benötigten hohen Rechenleistung des Programms gelöst.

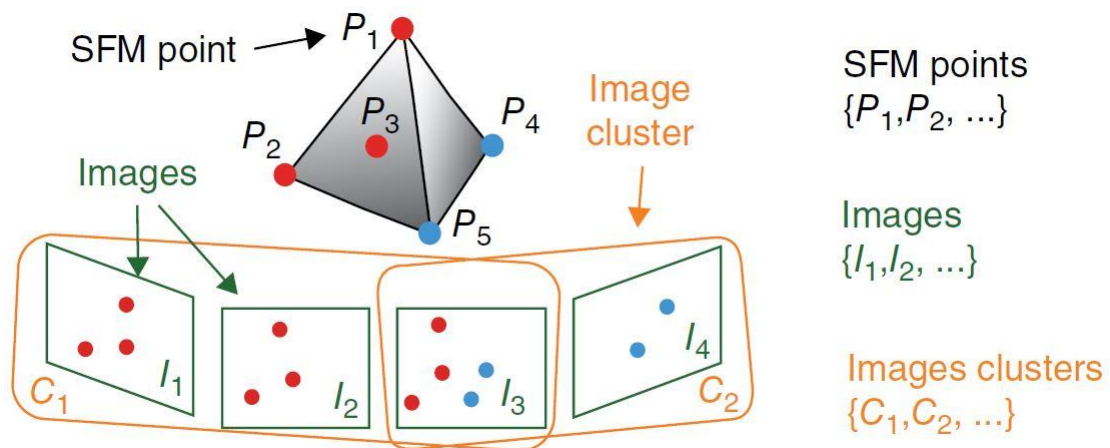


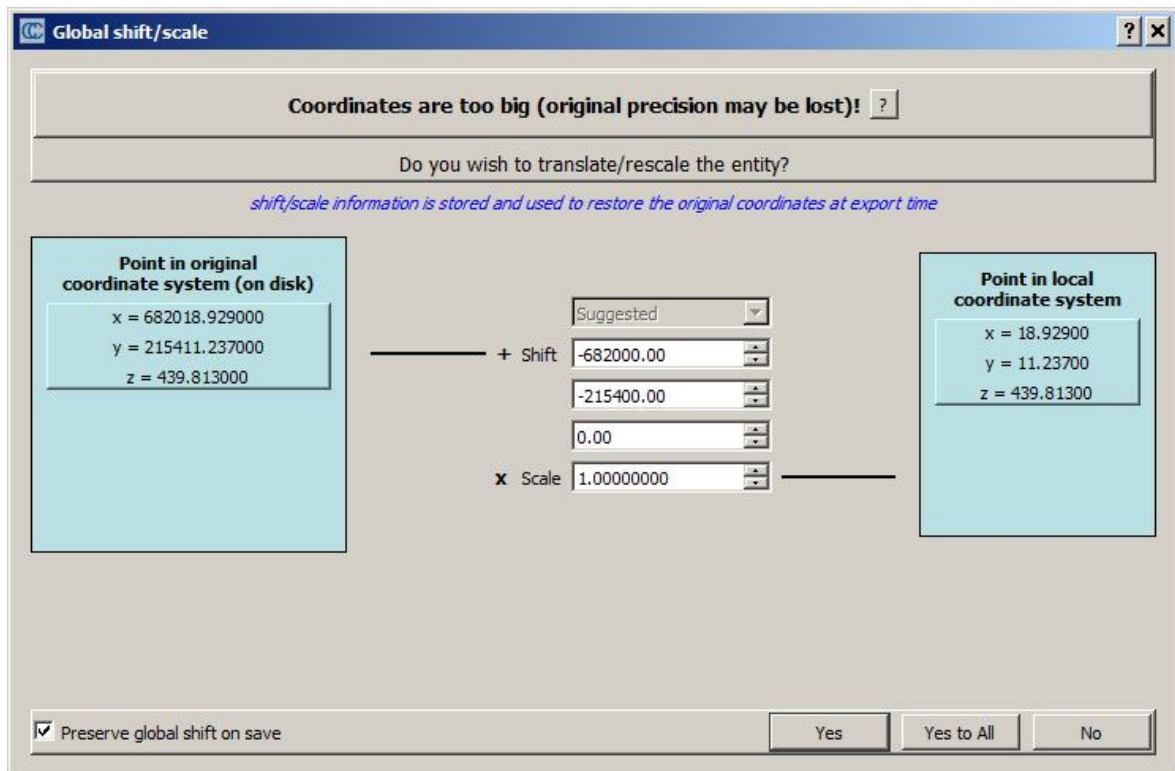
Abbildung 5.4: Darstellung des Prinzips des CMVS-Algorithmus von (Furukawa, et al., 2010). Quelle: (Furukawa, et al., 2010)

5.2 SfM_Georef v.3.1

Zur Georeferenzierung wird die von *VisualSfM* erstellte, dichte Punktwolke in das Programm geladen. In dieser Datei sind die gesamten Bilder, Kamerapositionen und Koordinaten der Punkte gespeichert und können somit auch vom Programm erkannt werden. Im nächsten Schritt werden in jedem Bild die Referenzpunkte ausgewählt, wodurch die Software die dreidimensionalen SfM-Koordinaten jedes Punktes berechnet. Zusätzlich werden noch die *Residuals* von jedem Punkt berechnet, indem die SfM-Koordinaten in die Bildebene projiziert werden. Daraus wird in weiterer Folge der Root-mean-square Error (RMSE) berechnet. Dieser Wert gibt die Genauigkeit der Punkte an und sollte ungefähr 1 Pixel oder weniger betragen. Um die SfM-Koordinaten zu transformieren, müssen noch die sogenannten Kontrolldaten (*Control Data*) ins Programm geladen werden. Hierin sind die Koordinaten eines kartesischen Koordinatensystems wie UTM oder BMN, wie in Tabelle 4.1 zu sehen, als Textdatei gespeichert. Durch die Verknüpfung der SfM-Koordinaten mit jenen der Kontrolldaten, wird eine Transformation durchgeführt. Zusätzlich wird noch die Differenz zwischen den SfM-Koordinaten und den kartesischen Koordinaten berechnet und wiederum der RSME ermittelt.

5.3 Erfassung des Trennflächengefüges mit CloudCompare

Die Erfassung des Trennflächengefüges anhand der dreidimensionalen, georeferenzierten Punktwolken erfolgt unter anderem mit der Software *CloudCompare* (Version 2.10.2). Bevor die eigentliche Erfassung der Trennflächen beginnen kann, muss die Punktwolken noch vorbereitet werden. Die mit den Programmen *VisualSfM* und *SfM_Georef* erstellten Punktwolken werden im *Polygon File Format* in *CloudCompare* geöffnet. Dabei erfolgte eine temporäre Koordinatentransformation der Punktwolke in ein lokales Koordinatensystem durch das Programm (siehe Abbildung 5.5). Für die weitere Bearbeitung muss nun die Punktwolke als Textdatei abgespeichert werden (siehe Abbildung 5.6). Wobei dies immer mit den originalen Koordinaten der ursprünglichen Datei geschieht.



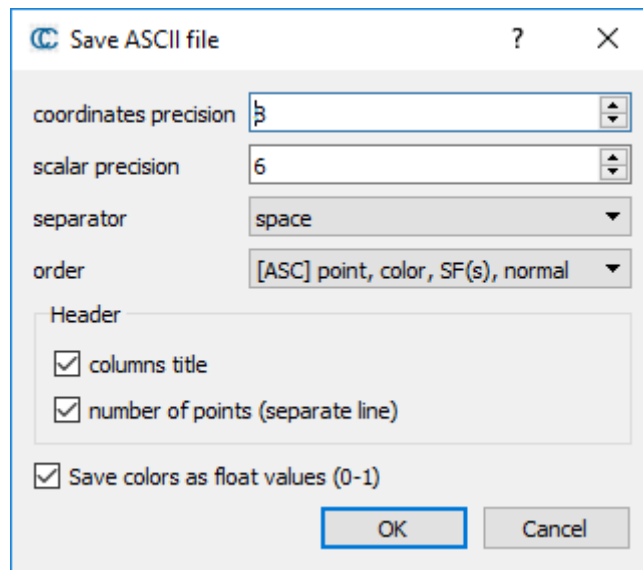


Abbildung 5.6: Fenster im CloudCompare wo die Punktwolke als ASCII-Datei im .txt-Format abgespeichert wird.

5.3.1 Hough-Transformation

Im nächsten Schritt werden von allen Punkten der Punktwolke die Normalvektoren berechnet. Dafür muss die zuvor abgespeicherte Textdatei geöffnet werden. Wobei im Öffnungsmenü für ASCII-Dateien beachtet werden muss, dass die erste Zeile ausgelassen (Skip lines „1“) und die Reihen 4 bis 9 ignoriert werden (siehe Abbildung 5.7).

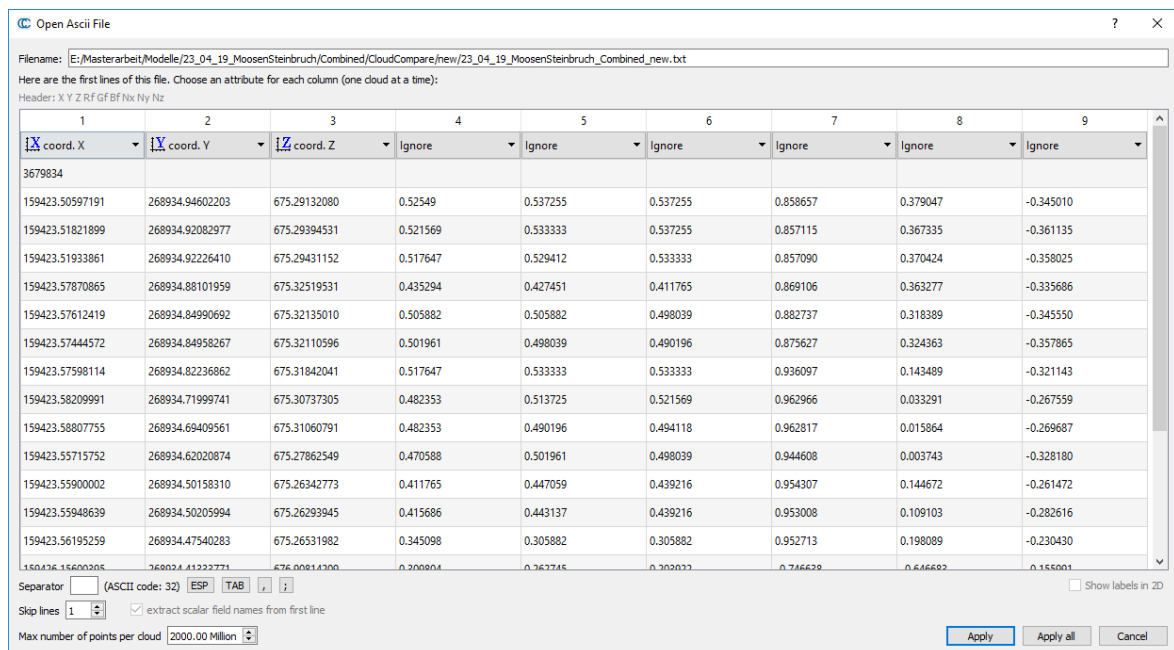


Abbildung 5.7: Öffnungsmenü für ASCII-Dateien in CloudCompare.

Dadurch wird in CloudCompare eine Punktwolke geöffnet, deren Punkte nur x-, y-, und z-Koordinaten und keine weiteren Eigenschaften oder Farbwerte besitzen. Anschließend

werden die Normalvektoren jedes einzelnen Punktes mit dem Plugin *Hough Normals Computation*, nach dem Algorithmus von (Boulch & Marlet, 2016), berechnet. Dabei wird die Normale einer Fläche ermittelt, die ein Punkt mit seinen nächsten Nachbarn bildet. Bis auf die *Neighborhood size (K)* werden die Standardeinstellungen für die Berechnung übernommen. Anstatt von 100, wird ein Wert von 20 für *K* genommen (siehe Abbildung 5.8)

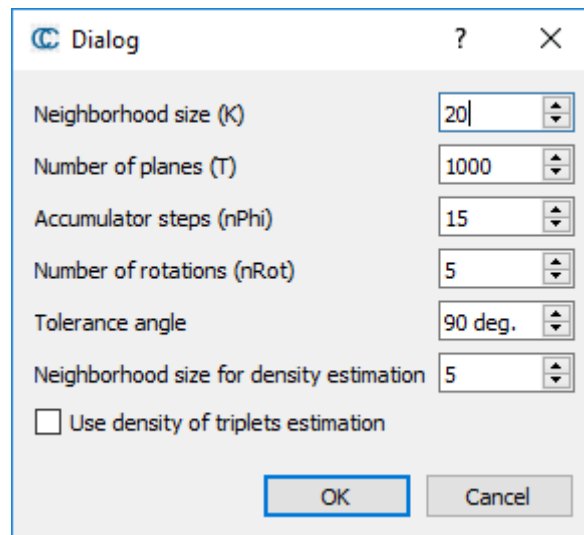


Abbildung 5.8: Dialogfenster für die Berechnung der Normalvektoren durch das Plugin *Hough Normals Computation*.

Die daraus hervorgegangene Punktwolke wird wiederum abgespeichert. Diesmal als standardmäßige Binärdatei.

5.3.2 Konvertieren der Normalvektoren

Um aus den zuvor berechneten Normalvektoren Orientierungsdaten wie Fallwinkel und Fallrichtung gewinnen zu können, müssen diese noch konvertiert werden. Dafür muss die Punktwolke mit den *Hough-Normalen* geöffnet und in der Datenbank markiert werden. Über die Funktion *Edit > Normals > Convert to > Dip and dip direction SFs* werden für jeden Punkt die Fallrichtung und der Fallwinkel berechnet, und diese Werte dann in Form zweier Skalarfelder dargestellt. Diese können separat dargestellt und betrachtet werden. Die Darstellung der Fallrichtung erfolgt durch eine Farbskala auf dem HSV-Farbraum basierend, indem die Fallrichtungen den Farbwinkeln der Farbwerte entsprechen und so dargestellt werden (siehe Abbildung 5.9 und Abbildung 5.10). Somit ergibt eine Fallrichtung von 0°/360° eine rote Farbe, eine Fallrichtung von 120° eine grüne Farbe und eine Fallrichtung von 240° eine blaue Farbe. Die Farben der Fallrichtungen dazwischen werden von Mischfarben gebildet.

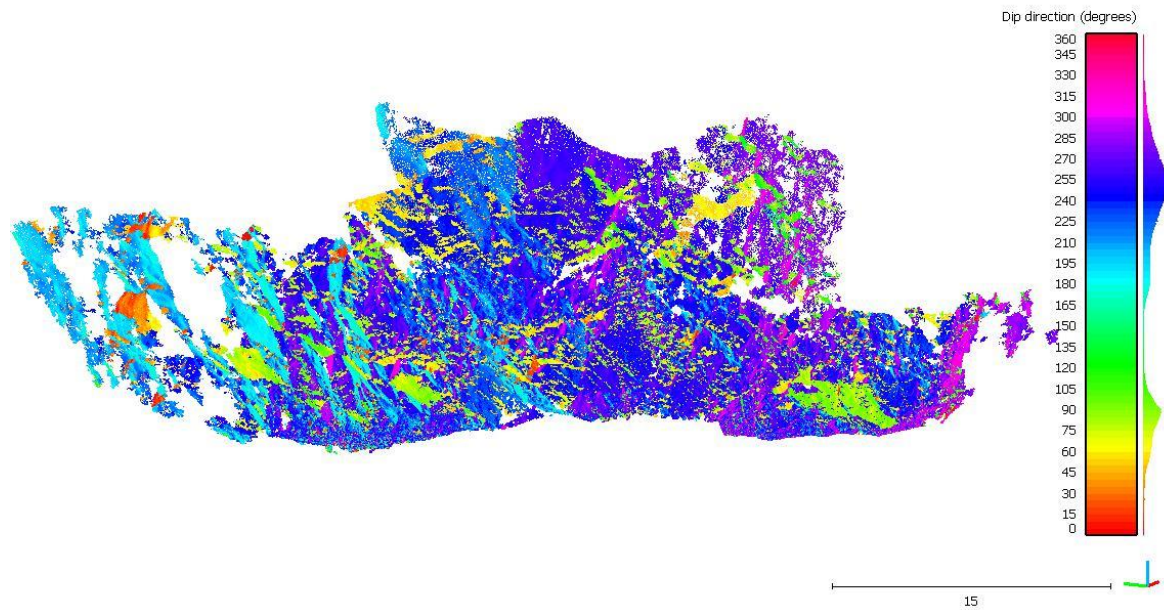


Abbildung 5.9: Fallrichtungen der Hough-Normale in einem HSV-Farbraum dargestellt. An der Farbskala am rechten Bildrand lassen sich die Farben der jeweiligen Fallrichtungen und Häufigkeiten erkennen.

In Abbildung 5.10 sind die Fallwerte des Modells von Abbildung 5.9 als Dichteverteilung dargestellt, wobei am Rand des Stereonetzes die Farben des HSV-Farbraums dargestellt sind. Die Dichte nimmt von blau über grün und gelb bis hin zu rot stetig zu.

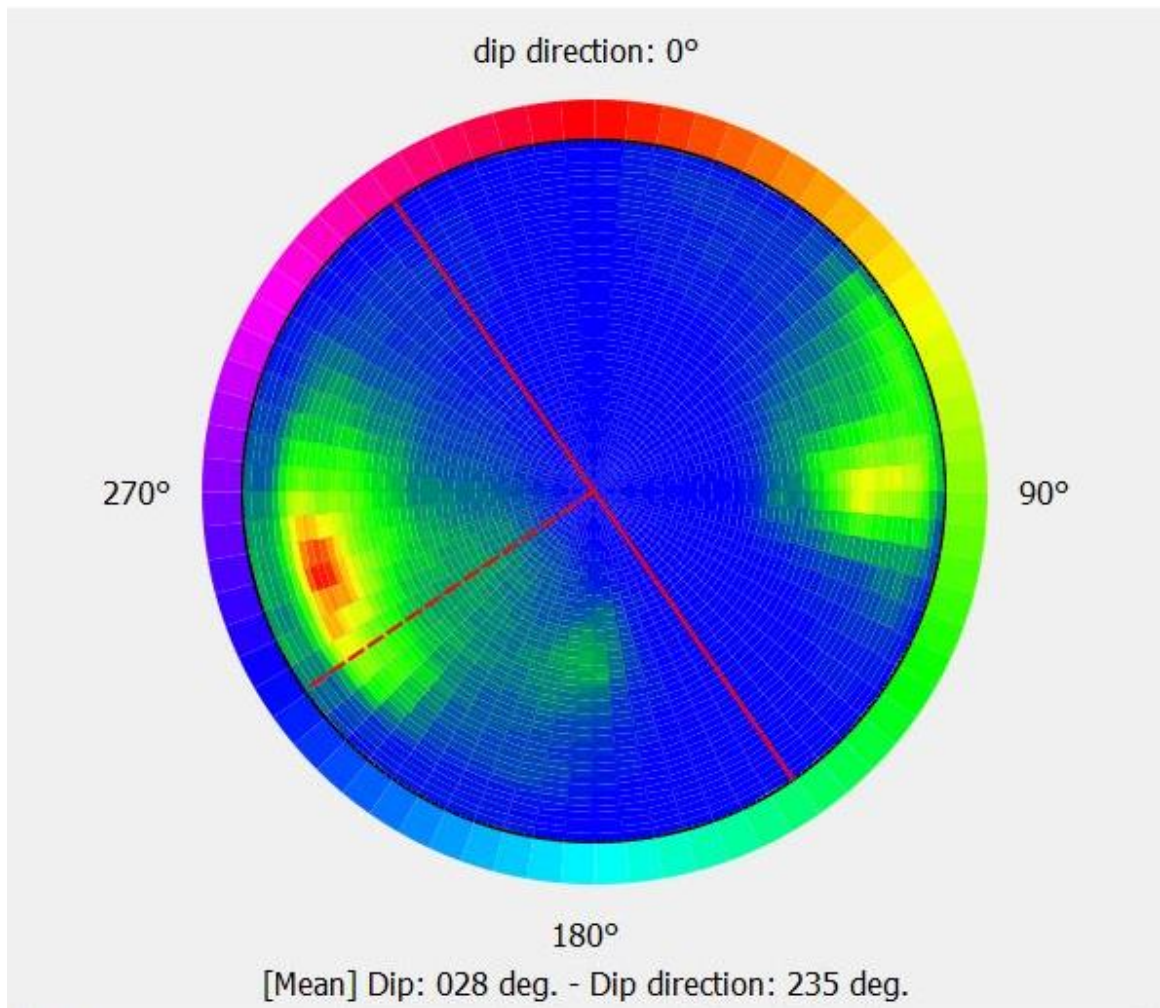


Abbildung 5.10: Dichteverteilung der Fallwerte des Modells von Abbildung 5.9. Die Dichte nimmt von blau, über grün und gelb, bis rot stetig zu. Das rote Streichen-Fallzeichen zeigt die mittlere Orientierung an. Am Rand des Stereonetzes sind die HSV-Farbwerte dargestellt.

Die Darstellung der Fallwinkel (siehe Abbildung 5.11) erfolgt durch eine Farbskala im Bereich von 0° (dunkelrot) bis 90° (weiß). Die Skala ist in 18 Intervalle von 5° unterteilt.

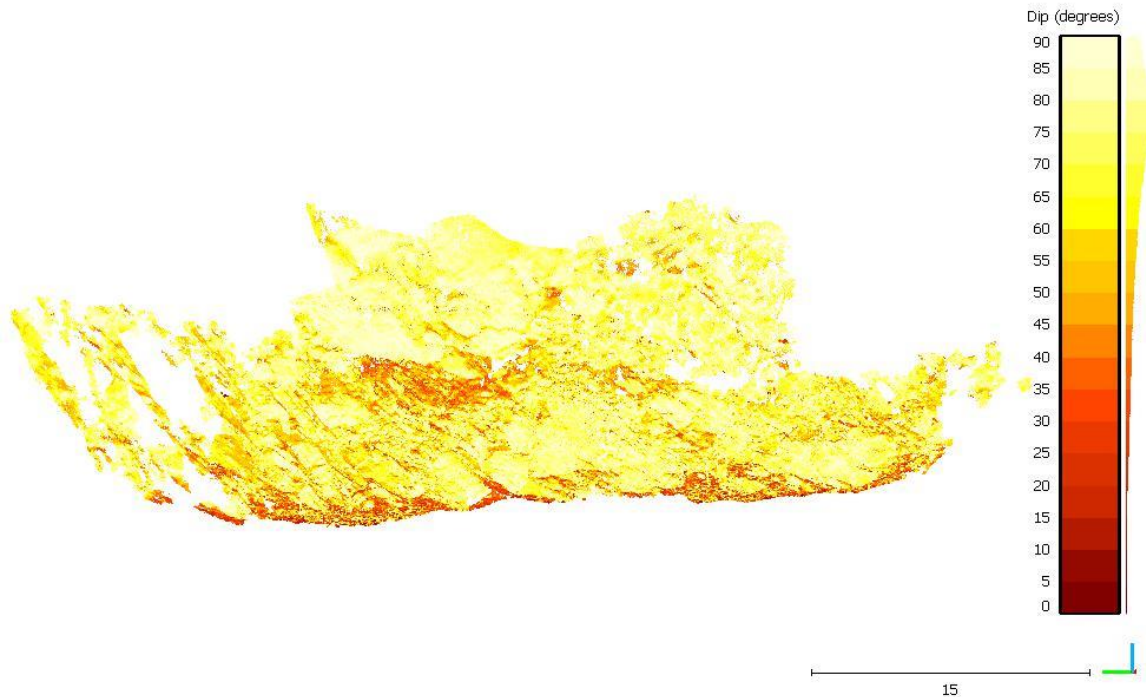


Abbildung 5.11: Darstellung der Fallwinkel als Farben nach der Skala am rechten Bildrand. An der Farbskala lassen sich die jeweiligen Werte der Fallwinkel sowie die Häufigkeiten erkennen.

5.3.3 Extrahieren von Trennflächen

Um nun die Trennflächen eines Aufschlusses besser untersuchen zu können, werden die Skalarfelder in beliebige Bereiche untergliedert. Das heißt, dass Strukturen mit ähnlichen Fallrichtungen oder Fallwinkeln separat dargestellt werden. Unter der Funktion *Edit > Scalar fields > Filter By Value* können dadurch Winkelbereiche definiert werden, wo nur Punkte, die innerhalb dieses Bereiches liegen, dargestellt werden. Mit diesem Schritt wird erreicht, dass sich wiederholende Strukturen wie Schichtflächen, Schieferungsflächen und Kluftscharen deutlich hervortreten und Trennflächen mit der gleichen Orientierung gut erkannt werden können. In Abbildung 5.12 ist ein extrahierter Bereich mit Fallrichtungen von 155° bis 200° dargestellt.

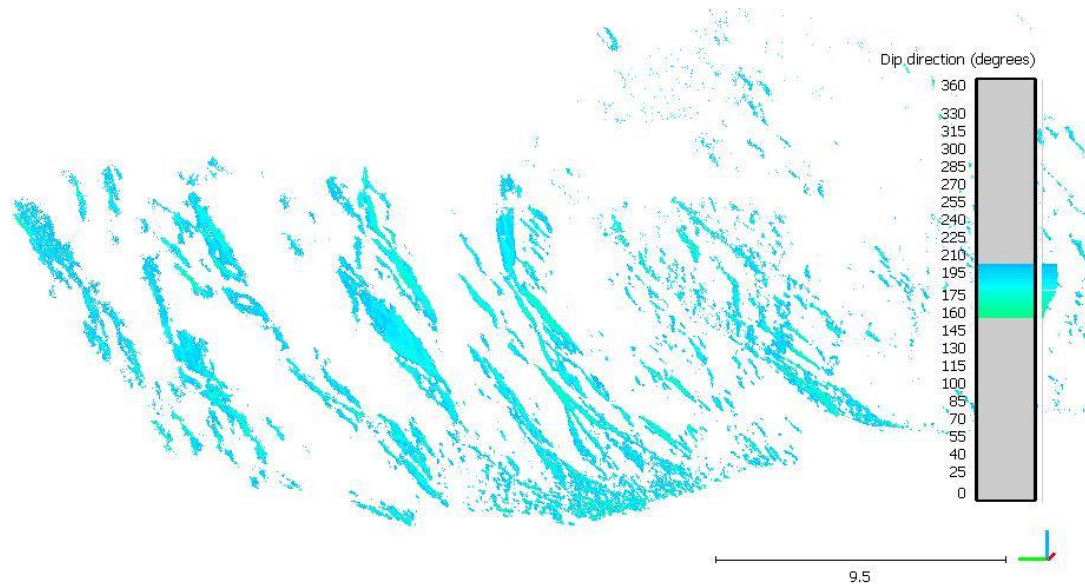


Abbildung 5.12: Extrahierte Punktwolke mit Fallrichtungen von 155° bis 200°. Die extrahierten Punkte stammen vom selben Model wie Abbildung 5.9.

5.3.4 Erhebung struktureologischer Daten mit dem Compass Plugin

Mit Hilfe des *Compass* Plugins von (Thiele, et al., 2017) werden anhand der extrahierten Punktwolken mit den ähnlichen Orientierungen struktureologische Daten erhoben. Im Wesentlichen kommen dabei zwei unterschiedliche Werkzeuge zur Anwendung. Zum einen das *Plane Tool*, womit Flächen in der Punktwolke definiert und deren Orientierung so gemessen wird. Die Definition der Fläche erfolgt dabei über einen Kreis, dessen Radius über die *Strg*-Taste und das Mausrad verändert werden kann. Die Fläche ergibt sich dann aus der mittleren Orientierung aller im Kreis erfassten Punkte.

In Abbildung 5.13 ist zu erkennen, wie die Auswahl der Flächen durchgeführt wird.

Zum anderen wird die Funktion *Measure one-point thickness* verwendet. Womit der wahre Abstand zwischen zwei Trennflächen gemessen werden kann. Dabei wird im rechten Winkel die Distanz zwischen einer zuvor definierten Fläche und einem Punkt gemessen. In Abbildung 5.14 ist zu sehen, wie der Abstand zwischen der Fläche und einem Punkt gemessen werden kann.

Für weitere Untersuchungen werden die Messungen als Textdatei exportiert.

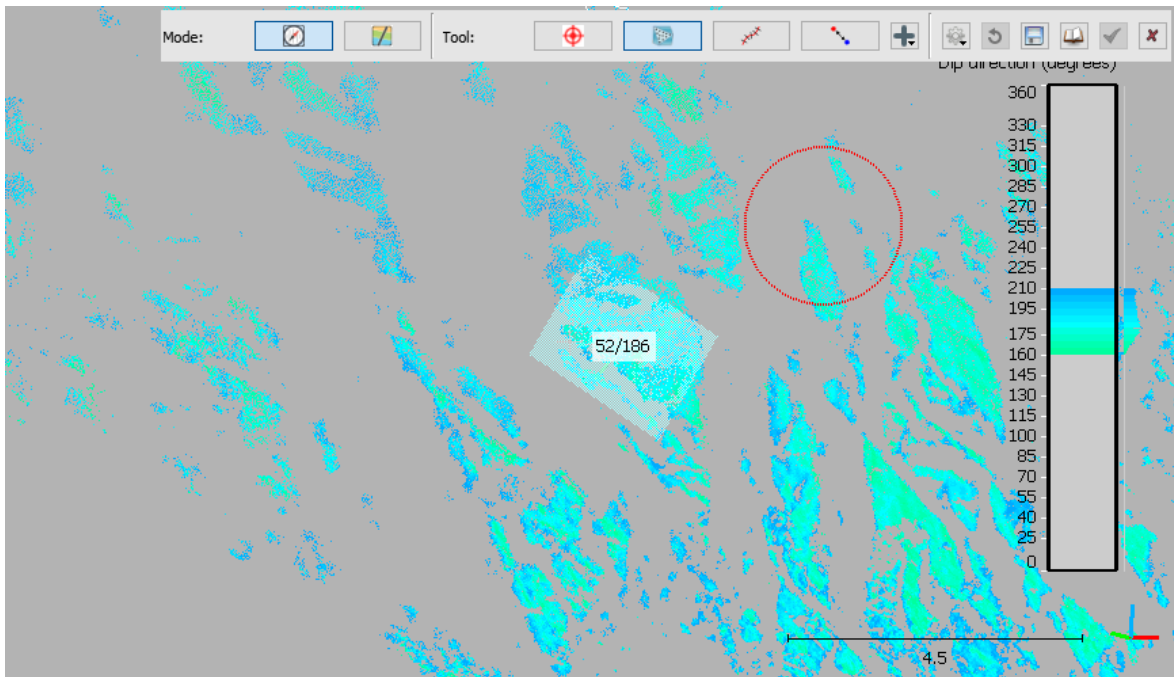


Abbildung 5.13: Erstellung von Flächen mit dem Compass Plugin. Die Auswahl erfolgt über einen roten Kreis. In der Bildmitte ist eine Fläche mit einer Orientierung von 186/52 zu sehen.

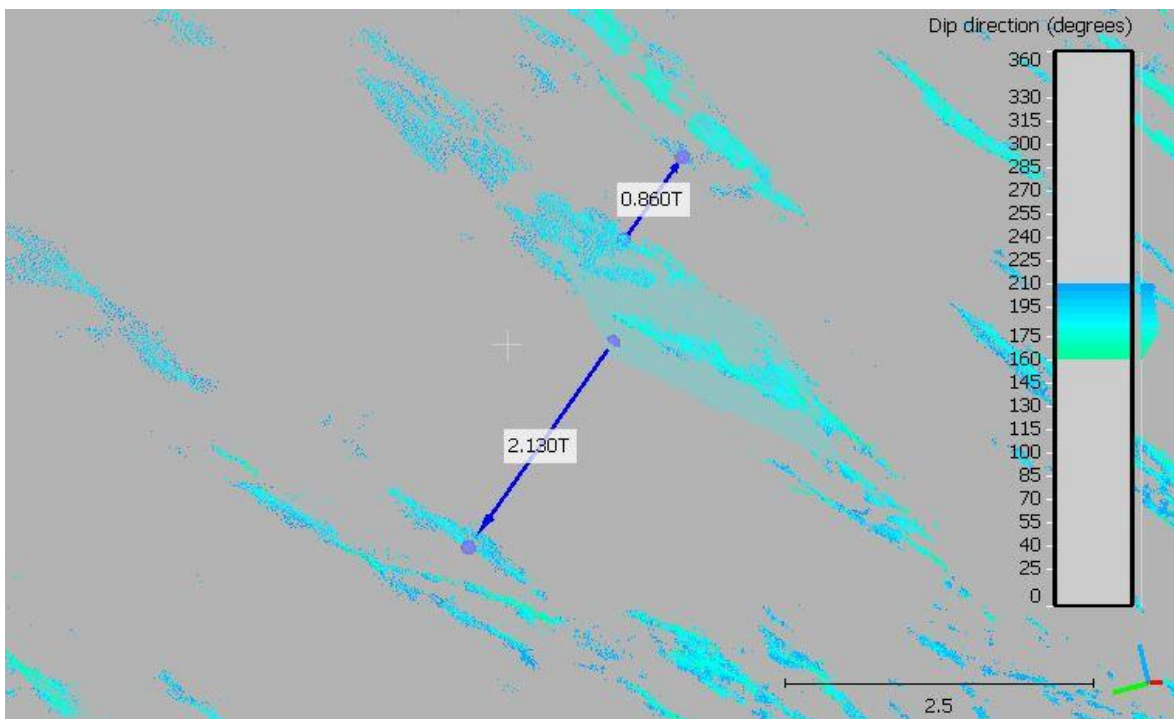


Abbildung 5.14: Messung der wahren Abstände zwischen zwei Trennflächen mit der Funktion "Measure one-point thickness". Die blauen Pfeile symbolisieren die gemessenen Abstände der Fläche, im rechten Winkel zu den Punkten. Die Zahlen in den weißen Boxen geben den Abstand in Metern an.

6. Ergebnisse

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der Untersuchungen der Punktwolken mit den Programmen *CloudCompare* und *DSE*, sowie die Ergebnisse des *Scanline Mappings* präsentiert.

6.1 Datenaufnahme

Im Zuge der Datenaufnahme ist ein Abschnitt der ersten Stufe des Steinbruchs aufgenommen worden. Aufgrund der geringen Breite der Stufe und der vorhandenen Vegetation wurde der zu untersuchende Abschnitt in drei kleinere Bereiche unterteilt. In jedem Bereich wurde dabei ein eigenes Koordinatensystem definiert und mit dem Handy der Standort ermittelt. Zusätzlich sind noch weitere Punkte im Bildausschnitt platziert worden, anhand dieser können die Punktwolken mit *CloudCompare* verbunden werden. In Abbildung 6.1 ist ein solches Szenario dargestellt.



Abbildung 6.1: Bildausschnitt des westlichen Bereichs. In der linken unteren Bildhälfte sind die Referenzpunkte zu erkennen. In der Bildmitte sind die roten Punkte zu sehen, mit denen die Punktwolken im *CloudCompare* zusammengefügt werden können.

6.2 Datenverarbeitung

Von der ersten Stufe des Steinbruchs wurden mehrere verschiedene Punktwolken generiert. Zum einen wurden drei kleinere Punktwolken von nebeneinander liegenden Bereichen erzeugt, und mit *CloudCompare* über gemeinsame Punkte verbunden. Zum anderen wurden vom westlichsten Bereich Punktwolken mit 200, 100, 50, 25 und 10 Bildern erzeugt, um die Abhängigkeit der Qualität der Punktwolke von der Anzahl der Bilder zu untersuchen.

6.2.1 Großräumige Punktwolke

Für die Konstruktion der großräumigen Punktwolke, bestehend aus drei einzelnen Teilen, wurden insgesamt 172 Bilder verwendet. Wobei die Punktwolken des ersten und zweiten Bereichs mit 53 Bildern und die Punktwolke des dritten Bereichs mit 66 Bildern erstellt worden sind. Die drei separaten Punktwolken sind anschließend in *CloudCompare* zu einer gemeinsamen Punktwolke mit 3.679.834 Punkten verbunden worden. Die Ausdehnung beträgt ca. 40 m in der Länge, und zwischen 5 m und 15 m in der Höhe. Die räumliche Ausdehnung kann in Abbildung 6.2 betrachtet werden.

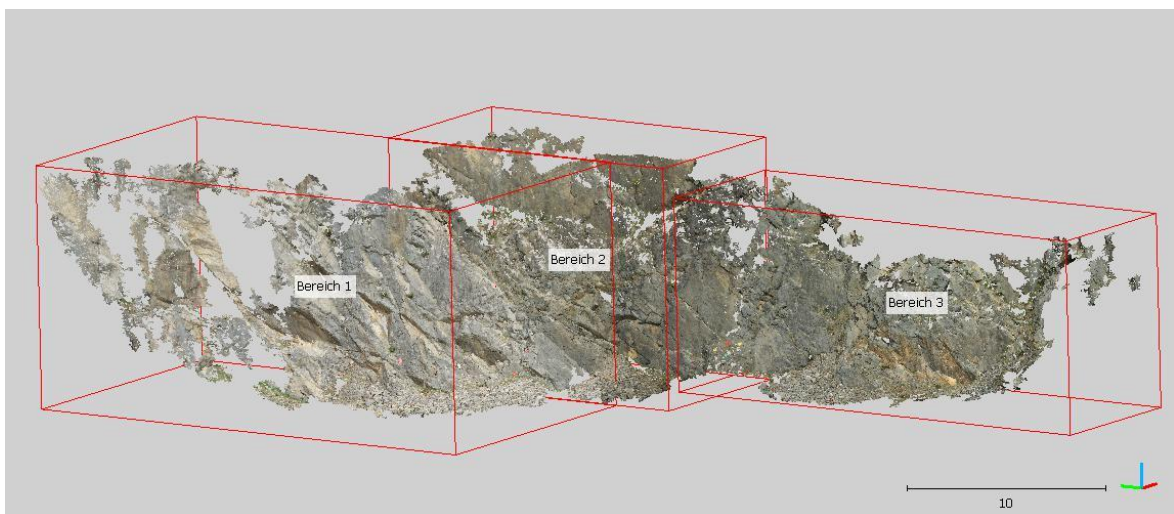


Abbildung 6.2: Verbundene Punktwolke der drei Bereiche des Steinbruchs von Moosen. Die roten Quader zeigen die Ausdehnung und Position der einzelnen Bereiche.

In Tabelle 6.1 ist der Root-mean-square Error für den jeweiligen Bereich der großräumigen Punktwolke angeführt. Die Größe der Pixel entspricht, je nach Bild, wenige Millimeter im realen Bildausschnitt. Somit kann bei den Referenzpunkten von einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern ausgegangen werden.

Der RMSE der georeferenzierten Koordinaten ist deutlich größer, und zeigt, dass die Orientierungen der Referenzpunkte nicht genau dem definierten Koordinatensystem

entsprechen.

Tabelle 6.1: Auflistung des mittleren Root-mean-square Error der Referenzpunkte für die jeweiligen Bereich. Zusätzlich ist noch der RMSE der georeferenzierten Koordinaten aufgelistet.

Bereich	RMSE [Pixel]	RMSE Koordinaten [Pixel]
1	2,20	4,29
2	1,69	28,03
3	3,17	11,19

6.2.2 Punktwolken des westlichen Bereichs

Die Punktwolken des westlichen Bereichs unterscheiden sich im Großen und Ganzen kaum von jener des ersten Bereichs der großräumigen Punktwolke. Jedoch wurde die Datenaufnahme an einem anderen Tag durchgeführt. In Abbildung 6.3 kann die Punktwolke, die aus 200 Bildern generiert wurde, betrachtet werden. Zusätzlich sind noch Punktwolken des gleichen Bereichs mit 100, 50, 25 und 10 Bildern erstellt worden. Zu Vergleichszwecken wurde die Punktwolke mit 25 Bildern auch noch mit dem Programm Agisoft Metashape erstellt.

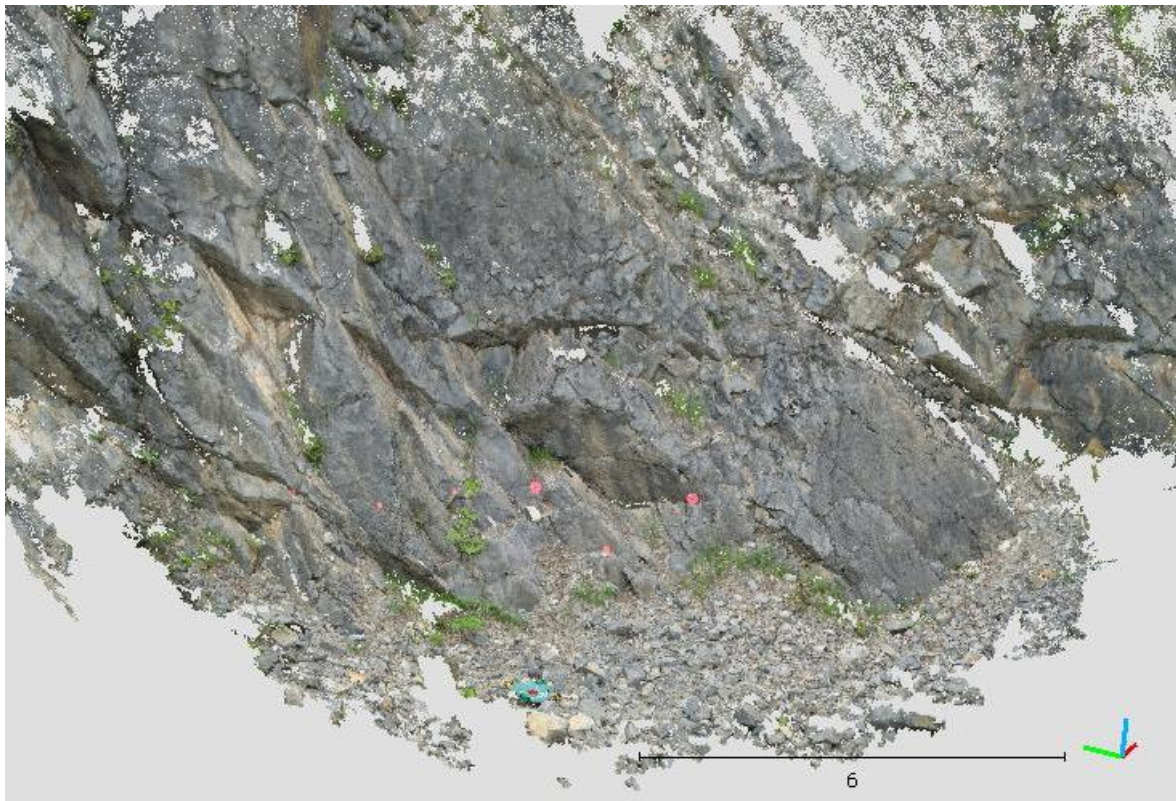


Abbildung 6.3: Punktwolke des westlichen Bereichs in Echtfarben. Generiert mit einer Bildanzahl von 200.

In der Tabelle 6.2 werden die Werte für den RMSE der Referenzpunkte für die unterschiedlichen Punktwolken verglichen. Wobei die Veränderungen aufgrund der Bildanzahl marginal sind. In diesem Fall kann bei einer realen Größe der Pixel von wenigen Millimetern, von einer Genauigkeit um einen Zentimeter ausgegangen werden. Auch hier zeigt sich, dass die Referenzpunkte nicht genau dem definierten Koordinatensystem entsprechen und eine Abweichung von 13 bis 14 Pixel auftritt.

Tabelle 6.2: Vergleich des mittleren Root-mean-square Errors der Punktwolken mit den unterschiedlichen Bildanzahlen. Zusätzlich ist noch der RMSE der georeferenzierten Koordinaten aufgelistet.

Bildanzahl	RMSE [Pixel]	RMSE Koordinaten [Pixel]
10	1,51	13,57
25	1,57	13,26
50	1,61	13,51
100	1,59	13,04
200	1,59	13,16

6.3 Vergleich der Punktwolken des ersten Bereichs

Um die Auswirkung der Bildanzahl auf die Qualität der Punktwolke zu testen, wurden fünf Punktwolken des westlichen Bereichs mit unterschiedlicher Bildanzahl generiert. In Tabelle 6.3 sind die Konstruktionszeiten für die *Sparse Reconstruction* und die *Dense Reconstruction* aufgelistet.

Tabelle 6.3: Auswirkungen unterschiedlicher Bildanzahl auf die Konstruktionszeit der spärlichen (*sparse Reconstruction*) und der dichten (*dense Pointcloud*).

Bildanzahl	Sparse Reconstruction [s]	Dense Reconstruction [s]
10	45	475
25	293	1.999
50	1.060	3.171
100	3.628	9.131
200	17.289	129.109

In Abbildung 6.4 sind die gesamten Konstruktionsdauern für die unterschiedlichen Modelle in einem Diagramm dargestellt. Mit einer Steigerung der Bildanzahl von 10 auf 25, nimmt im vorliegenden Fall die Konstruktionsdauer um das 4,4-fache zu. Bei einer Verdoppelung von 25 auf 50 nimmt die Dauer um das 1,9-fache zu. Bei 100 Bildern beträgt die Konstruktionsdauer 12759 Sekunden und somit das 3-fache wie bei 50 Bildern. Bei der Verarbeitung von 200 Bildern nimmt die Dauer im Vergleich zu 100 Bildern um den Faktor 11,5 zu.

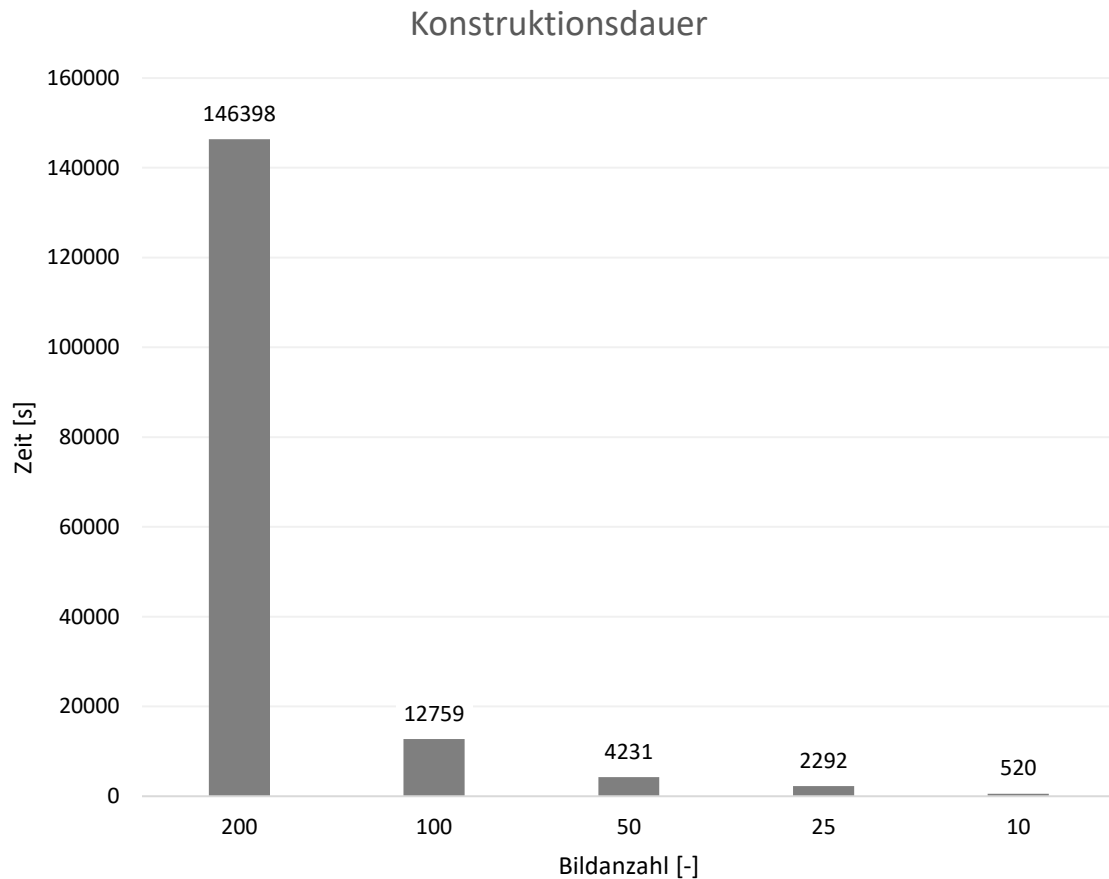


Abbildung 6.4: Diagramm der Abhängigkeit der Konstruktionsdauer von der Bildanzahl.

In Tabelle 6.4 und in Abbildung 6.5 sind die unterschiedlichen Punktzahlen in Abhängigkeit von der Bildanzahl aufgelistet. Im vorliegenden Fall nimmt die Punktzahl bei einer Steigerung von 10 auf 25 Bildern um das 2,9-fache zu. Verdoppelt man die Bildanzahl von 25 auf 50, steigert sich die Punktzahl um das 1,3-fache. Bei 100 Bildern nimmt im Vergleich zu 50 Bildern die Punktzahl um das 2-fache zu. Verdoppelt man die Bildanzahl wiederum auf 200 Bilder, nimmt die Punktzahl um das 1,7-fache zu. Zudem sind in Tabelle 6.4 noch die Punktzahlen für eine in allen Modellen vorhandene Kluftfläche angeführt.

Tabelle 6.4: Auswirkungen der Bildanzahl auf die Punktzahl der gesamten Punktwolke und einer Kluftfläche im Zentrum der Punktwolken.

Bildanzahl	Punktzahl	Punktzahl Kluftfläche
10	497.575	29.996
25	1.430.966	84.555
50	1.903.780	99.413
100	3.785.311	222.022
200	6.338.195	464.455

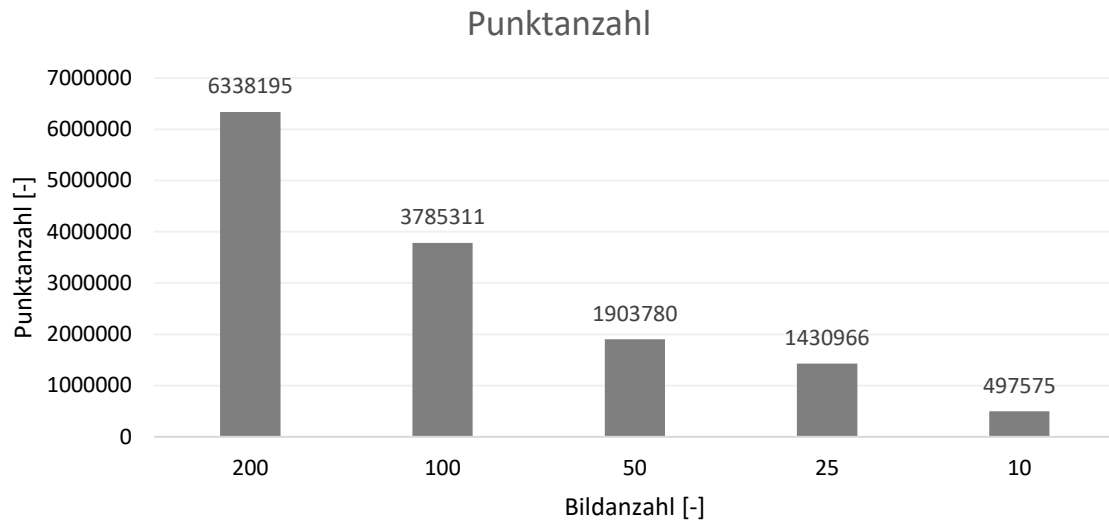


Abbildung 6.5: Diagramm der unterschiedlichen Punktzahlen im Vergleich mit unterschiedlicher Bildanzahl.

6.3.1 Vergleich Agisoft Metashape – VisualSFM, SfM_Georef

Für Vergleichszwecke wurde zusätzlich mit den gleichen 25 Bildern, wie bei der Punktwolke in Kapitel 0, eine Punktwolke mit dem kommerziellen Programm *Agisoft Metashape* erstellt. Der größte Unterschied macht sich bei der Punkteanzahl bemerkbar. Die *Agisoft Metashape*-Punktwolke hat eine Punkteanzahl von 17.466.902, während die *VisualSFM*-Punktwolke eine Punkteanzahl von 1.430.966 hat.

Für einen definierten Bereich wurde die Distanz zwischen den beiden Punktwolken berechnet. Das Ergebnis kann in Abbildung 6.6 betrachtet werden. Die Berechnung lieferte eine mittlere Distanz von 1,2 cm, bei einer Standardabweichung von 0,7 cm.

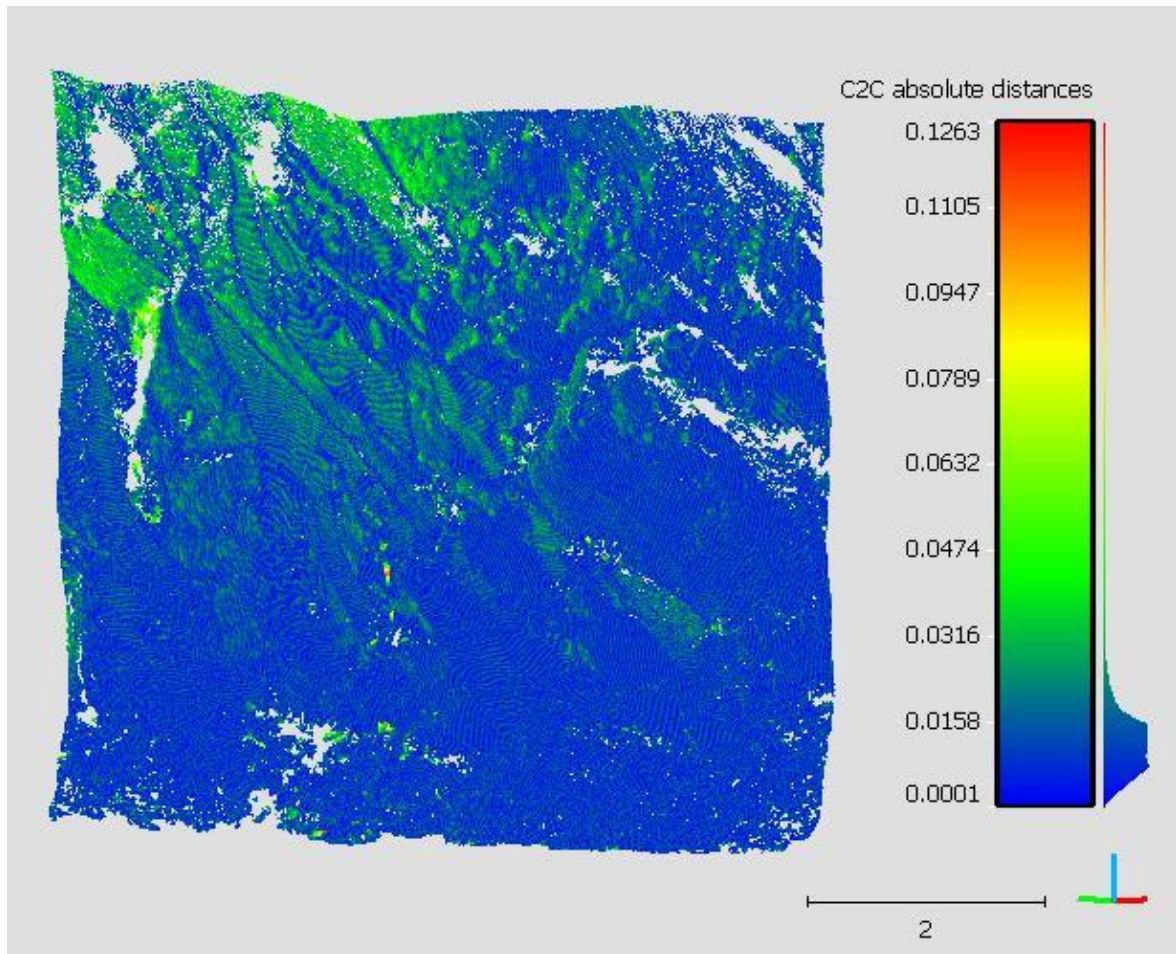


Abbildung 6.6: Distanz zwischen der Agisoft Metashape-Punktwolke und der VisualSFM-Punktwolke. Die Werte in der Legende und der Maßstab sind in Meter angegeben.

6.4 Trennflächenerfassung mit CloudCompare – westlicher Bereich

Im Zuge der Untersuchungen der Punktwolke sind vier verschiedene Trennflächenscharen erfasst worden. Wobei es sich bei einer Schar um Schichtflächen der Karbonate der Gutenstein Formation handelt. Wohingegen die drei anderen Trennflächenscharen als Kluftflächen zu bezeichnen sind. Die Trennflächenscharen wurden zusätzlich noch mit dem *Compass* Plugin vermessen.

Die untersuchte Punktwolke wurde aus 200 Bildern generiert und hat eine Gesamtpunktzahl von 6.338.195. Sie kann in Abbildung 6.7 betrachtet werden.

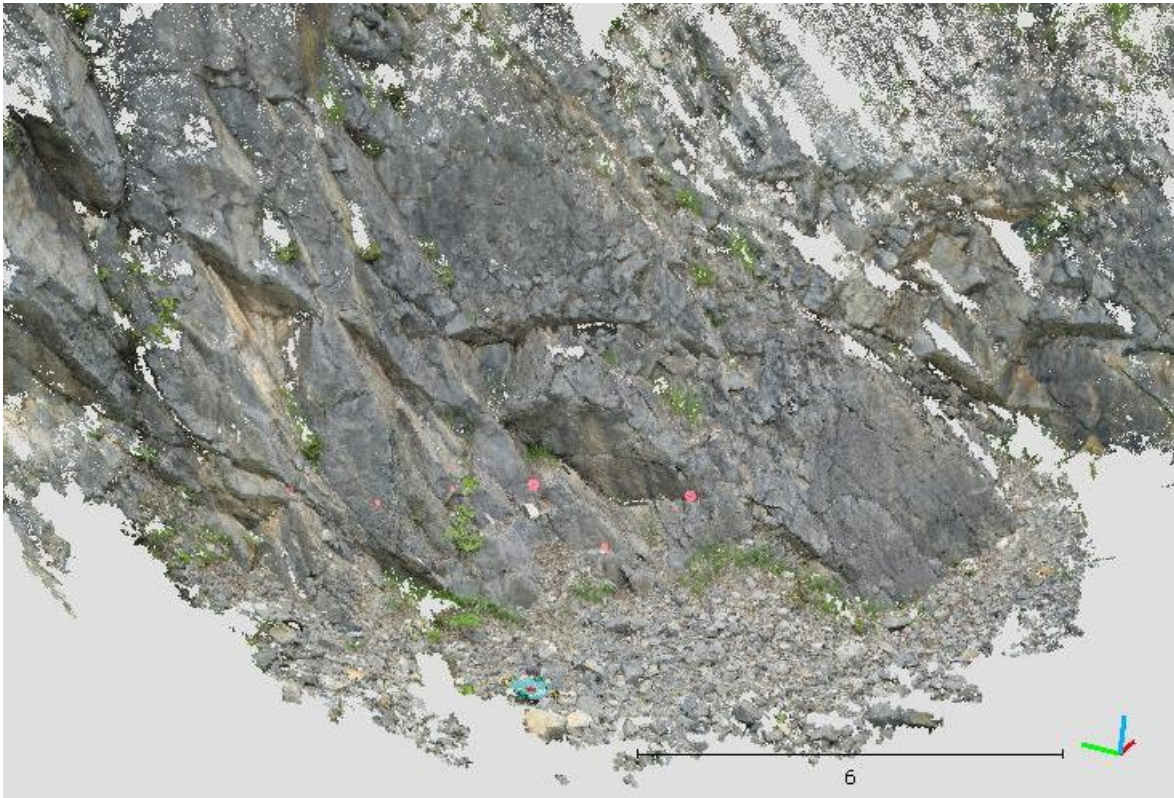


Abbildung 6.7: Punktwolke des westlichen Bereichs. Der Maßstab ist in Metern angegeben.

In Abbildung 6.8 ist die Punktwolke in HSV-Farben dargestellt. Die Punkte, die den Blockschutt im Vordergrund darstellen, sind ausgeschnitten.

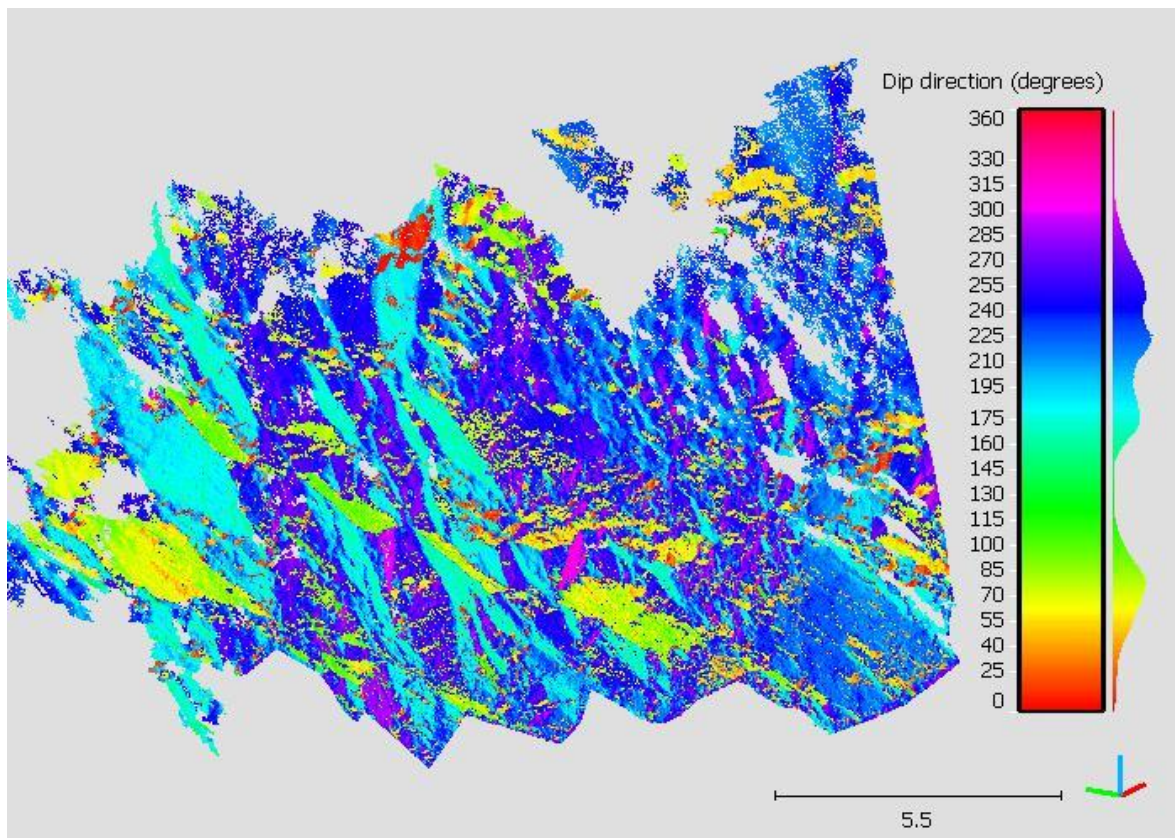


Abbildung 6.8: Punktwolke mit HSV-Farben des westlichen Bereichs. Die Punkte, die den Blockschutt im Vordergrund darstellen, sind ausgeschnitten. Der Maßstab ist in Metern angegeben. Die Legende zeigt die jeweilige HSV-Farbe für die unterschiedlichen Fallrichtungen an.

In Abbildung 6.9 sind die Polpunkte der mit dem *Compass* Plugin eingemessenen Flächen, sowie die Schwerpunktsflächen der jeweiligen Trennflächenscharen und die Orientierung des Aufschlusses als Großkreise dargestellt.

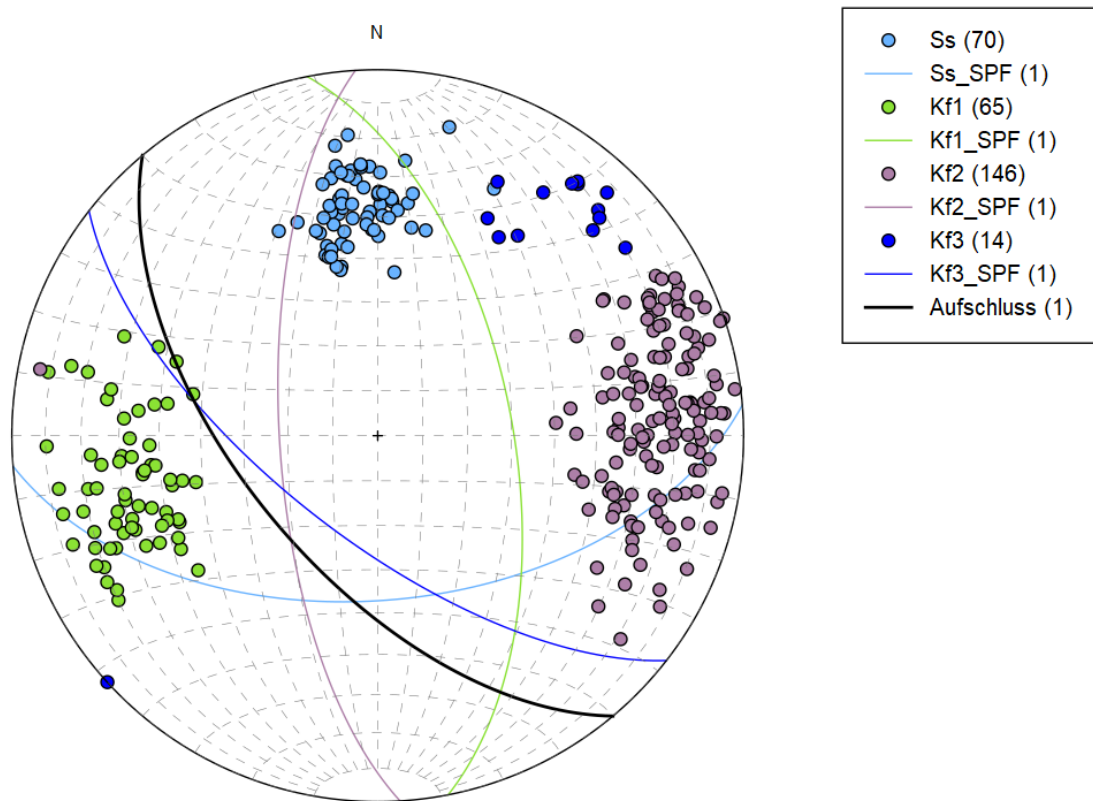


Abbildung 6.9: Darstellung der Polpunkte und der Schwerpunktsflächen der jeweiligen Trennflächenschar des westlichen Bereichs in einem Schmidt'schen Netz. Der schwarze Großkreis repräsentiert die Orientierung des Aufschlusses.

6.4.1 Schichtflächen (Ss)

Der Winkelbereich, in dem die Schichtflächen einfallen, wurde mit 150° bis 200° definiert. In Abbildung 6.10 ist die extrahierte Trennflächenschar zu sehen. Besonders im linken Bildbereich ist das parallele Einfallen der Schichten deutlich zu erkennen. Die Schichtflächen sind persistent und die Endungen sind meist nicht erkennbar.

Die Punkteanzahl der extrahierten Trennflächenschar beträgt 903.256.

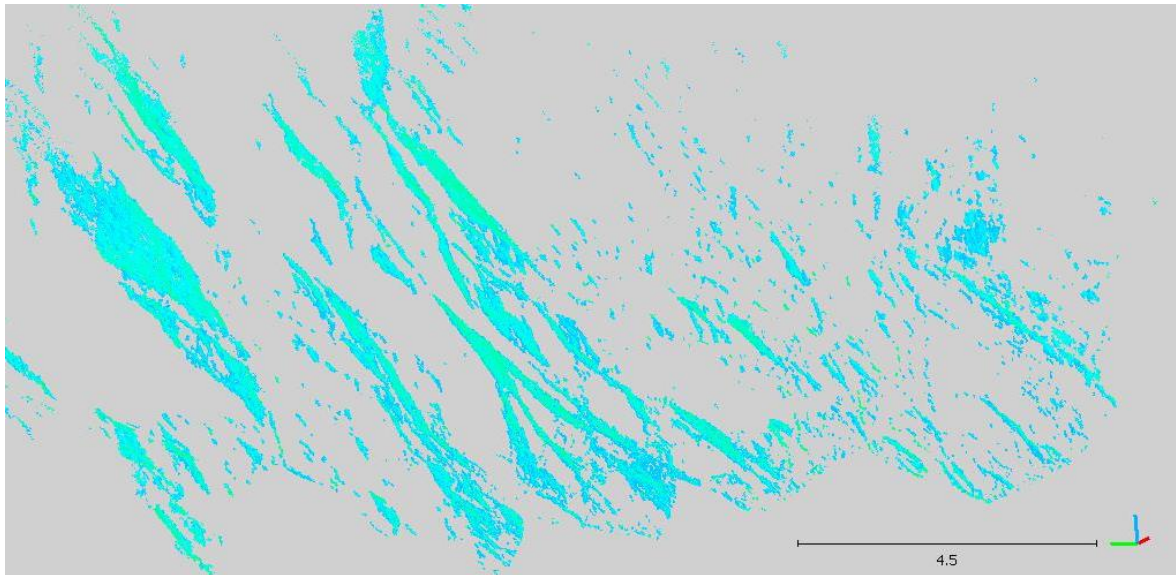


Abbildung 6.10: Schichtflächen mit einer Fallrichtung von 160° bis 210°. Der Maßstab ist in Metern angegeben.

Mit Hilfe des *Compass* Plugin sind 70 Trennflächen eingemessen worden. Zusätzlich wurden noch 73 Messungen des Normalabstands der Trennflächen durchgeführt. In Abbildung 6.11 ist ein Ausschnitt der mittels *Compass* vermessenen Schichtflächenschar zu sehen.

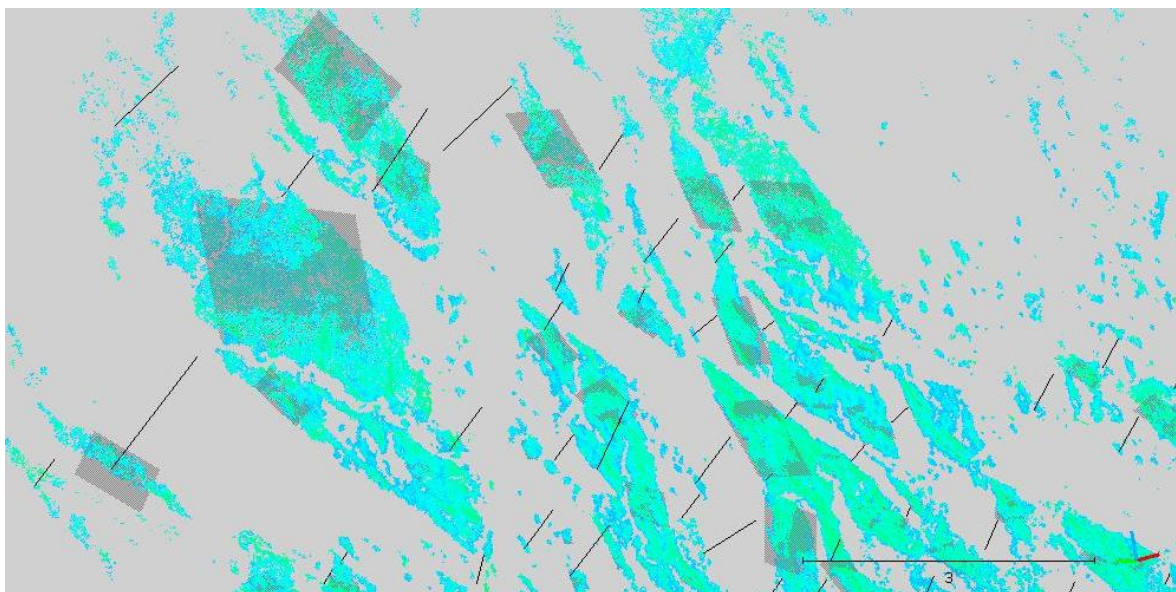


Abbildung 6.11: Schichtflächenschar mit eingemessenen Trennflächen in schwarz. Die schwarzen Linien zeigen die gemessenen Trennflächennormalabstände. Der Maßstab ist in Metern angegeben.

In Tabelle 6.5 sind die erhobenen Eigenschaften aus den Daten der Normalvektoren und des *Compass* Plugins gegenübergestellt. Die Teilklüftigkeitsziffer der Schichtfläche k_{Ss} ist 2,2.

Tabelle 6.5: Erfasste Eigenschaften der Trennflächenschar, anhand der Orientierung der Normalvektoren der Punkte und der erhobenen Compass-Daten.

	Normalvektoren der Punkte	Compass-Plugin
Fallrichtung der Schwerpunktsfläche [°]	178,5	175,2
Fallwinkel der Schwerpunktsfläche [°]	54,6	52,9
Grad der bevorzugten Orientierung [-]	91,0	96,6
k-Wert [-]	22,3	58,4
Trennflächennormalabstand [m]	-	0,45

6.4.2 Kluftschar 1 (Kf 1)

Die Kluftschar der Kluffflächen 1 fällt in einem Winkelbereich von 60° bis 140° ein. In Abbildung 6.12 ist die räumliche Ausdehnung dieser Kluftschar zu erkennen. Die Klüfte mit den größten Trennflächenlängen sind im linken Bereich des Aufschlusses angesiedelt. Diese sind als mittlere bis lange Klüfte nach Palmström (1997) zu bezeichnen.

Die Punktwolke besteht aus 780.790 Punkten.

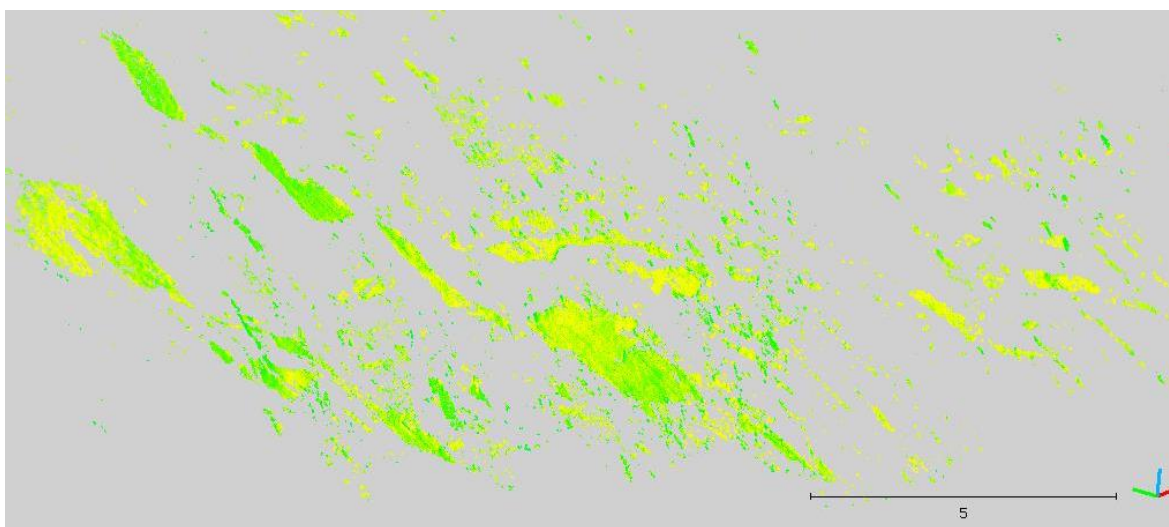


Abbildung 6.12: Räumliche Ausdehnung der Kluftschar 1. Der Maßstab ist in Metern angegeben.

Im Zuge der Untersuchung mit dem Compass Plugin sind 65 Kluffflächen definiert und 42 Trennflächennormalabstände eingemessen worden. In Abbildung 6.13 können die erhobenen Strukturen betrachtet werden.

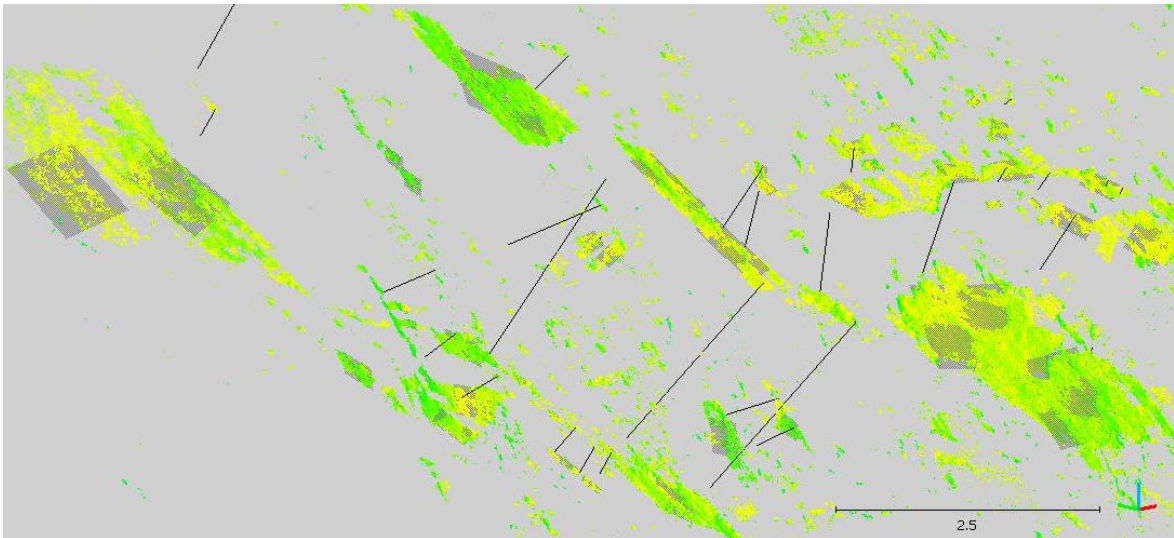


Abbildung 6.13: Kluftchar 1 mit eingemessenen Kluftflächen in schwarz und Trennflächennormalabständen als schwarze Linien. Der Maßstab ist in Metern angegeben.

In Tabelle 6.6: Erfasste Eigenschaften der Kluftchar 1, anhand der Orientierung der Normalvektoren der Punkte und der erhobenen Compass-Daten. Tabelle 6.6 sind die erfassten Orientierungsdaten der Normalvektoren und des *Compass* Plugins sowie der Trennflächennormalabstand gegenübergestellt. Die Teilklüftigkeitsziffer k_{Kf1} der Kluftchar 1 beträgt 1,5.

Tabelle 6.6: Erfasste Eigenschaften der Kluftchar 1, anhand der Orientierung der Normalvektoren der Punkte und der erhobenen Compass-Daten.

	Normalvektoren der Punkte	Compass-Plugin
Fallrichtung der Schwerpunktsfläche [°]	81,7	78,9
Fallwinkel der Schwerpunktsfläche [°]	60,9	59,9
Grad der bevorzugten Orientierung [-]	92,1	92,8
k-Wert [-]	25,4	27,3
Trennflächennormalabstand [m]	-	0,67

6.4.3 Kluftchar 2 (Kf2)

Die Kluftflächen der in Abbildung 6.14 dargestellten Kluftchar 2 fallen in einem definierten Winkelbereich von 235° bis 300° ein. Nach Palmström (1997) weisen die Klüfte eine mittlere Trennflächenlänge auf. Wobei nach Osten hin die Tendenz zu kurzen Klüften geht. Die extrahierte Punktwolke hat eine Punktzahl von 1.514.850.

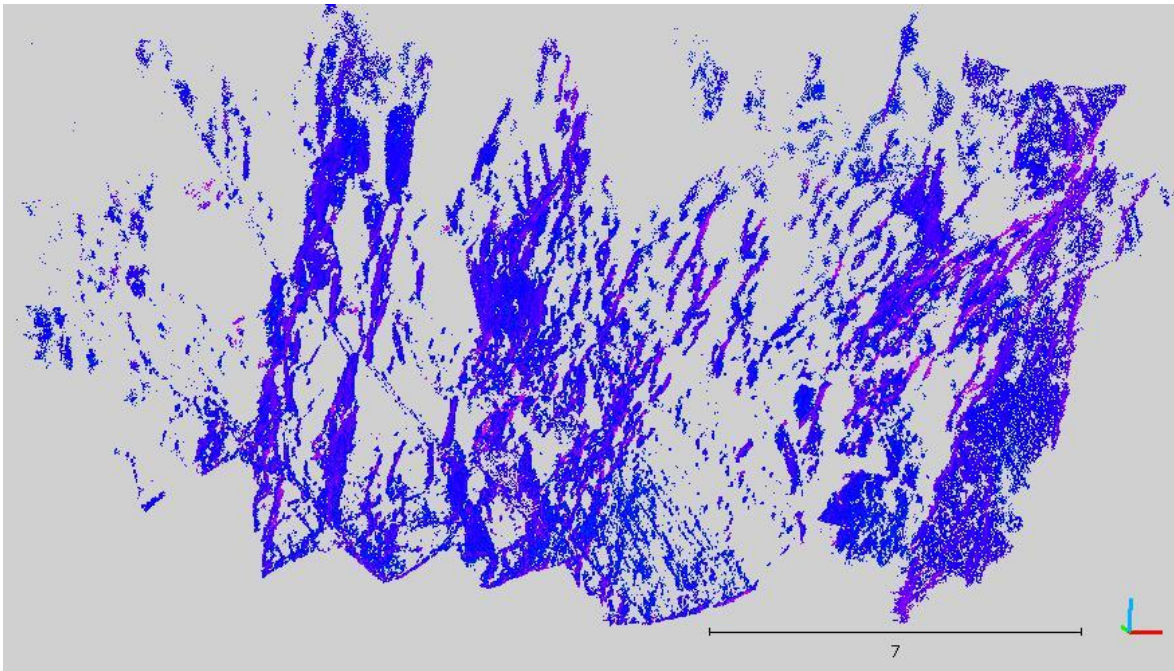


Abbildung 6.14: Räumliche Ausdehnung der Kluftschar 2. Der Maßstab ist in Metern angegeben.

Mit dem *Compass* Plugin sind 146 Flächen und 110 Trennflächenabstände gemessen worden. In Abbildung 6.15 sind die gemessenen Kluffflächen und Trennflächenabstände zu erkennen.

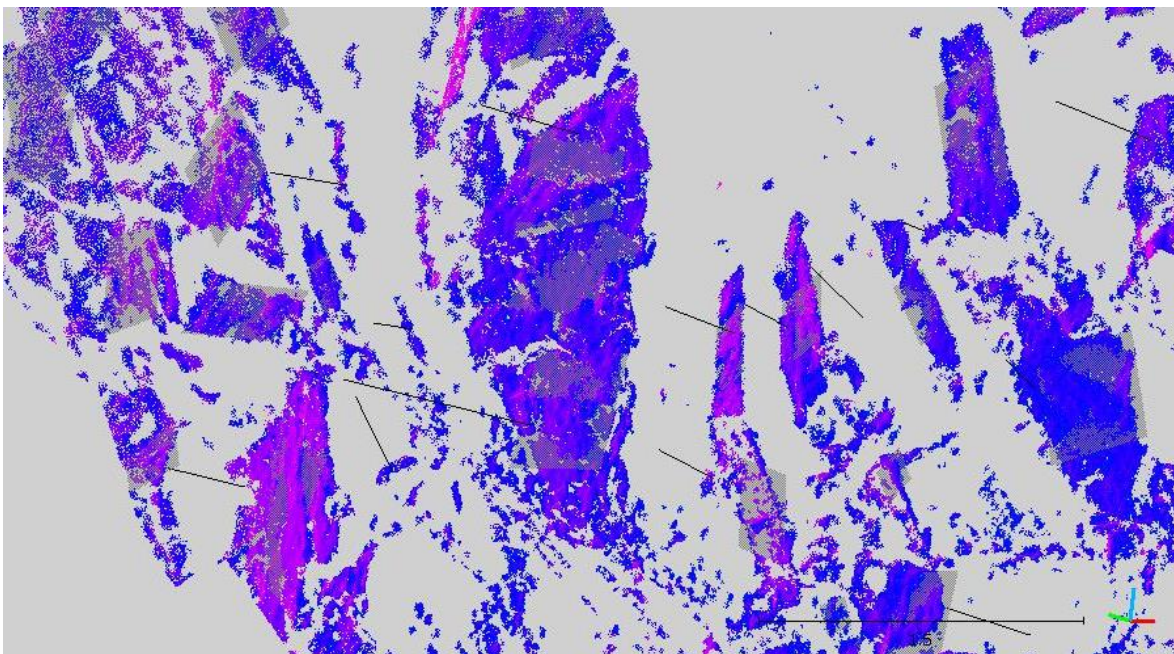


Abbildung 6.15: Kluftschar 2 mit eingemessenen Kluffflächen als schwarze Flächen und Trennflächennormalabständen als schwarze Linien. Der Maßstab ist in Metern angegeben.

In Tabelle 6.7 sind die erfassten Orientierungsdaten der Normalvektoren und des *Compass* Plugins sowie der Trennflächennormalabstand gegenübergestellt. Die Teilklüftigkeitsziffer

k_{Kf2} der Kluftschar 2 ist 4,0.

Tabelle 6.7: Erfasste Eigenschaften der Kluftschar 2, anhand der Orientierung der Normalvektoren der Punkte und der erhobenen Compass-Daten.

	Normalvektoren der Punkte	Compass-Plugin
Fallrichtung der Schwerpunktsfläche [°]	259,4	266,5
Fallwinkel der Schwerpunktsfläche [°]	67,2	68,1
Grad der bevorzugten Orientierung [-]	87,1	87,6
k-Wert [-]	15,6	16,1
Trennflächennormalabstand [m]	-	0,25

6.4.4 Kluffläche 3 (Kf3)

Die Klufflächen 3 der in Abbildung 6.16 abgebildeten Schar fallen in einem Winkelbereich von 200° bis 235° ein. Nach Palmström (1997) sind die Trennflächen überwiegend kurz. Jedoch wird der Aufschluss in seiner erweiterten Umgebung von Großklüften mit der gleichen Orientierung durchtrennt (Kluffläche in der linken Bildhälfte von Abbildung 6.16). Die Klufflächen weisen eine annähernd parallele Orientierung zum Aufschluss, der mit 230/60 einfällt, auf.

Die Punktzahl der extrahierten Punktwolke beträgt 868.169.

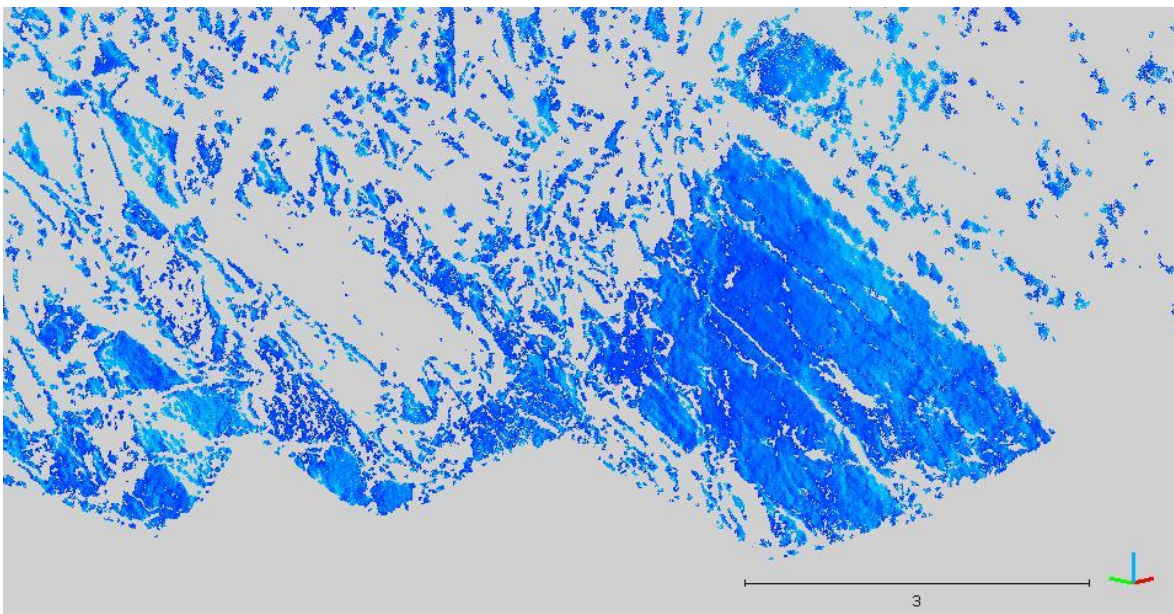


Abbildung 6.16: Räumliche Ausdehnung der Kluftschar 3. Der Maßstab ist in Metern angegeben.

In Abbildung 6.17 können, die mit dem *Compass* Plugin eingemessenen Trennflächen und Trennflächennormalabstände, betrachtet werden. In Summe wurden 14 Klufflächen und 8 Normalabstände definiert.

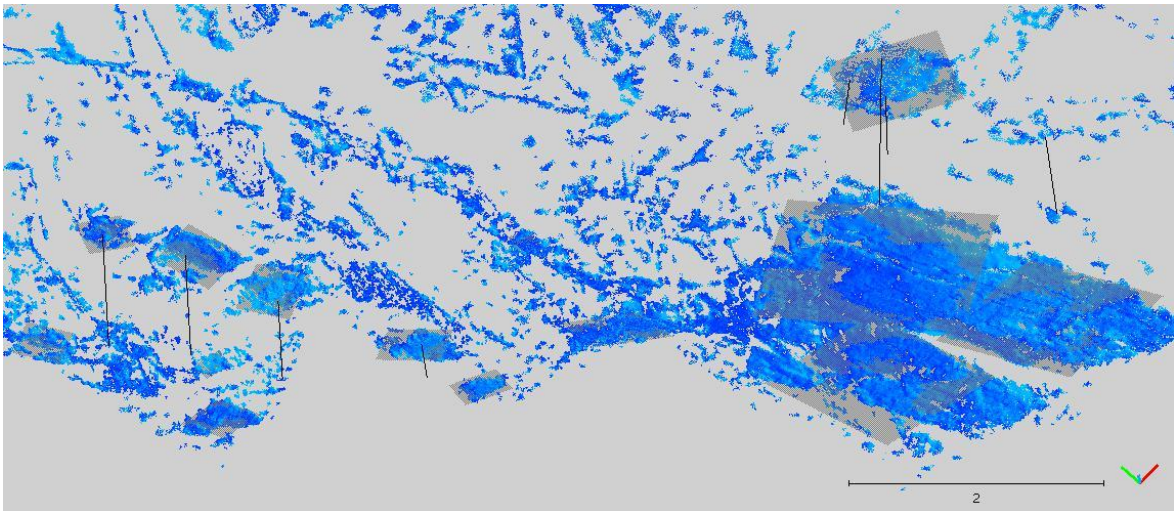


Abbildung 6.17: Kluftschar 3 mit eingemessenen schwarzen Klufflächen und Trennflächenabständen als schwarze Linien. Der Maßstab ist in Metern angegeben.

In Tabelle 6.8 sind die erhobenen Eigenschaften anhand der Normalvektoren und der mit dem *Compass* Plugin eingemessenen Flächen und Abständen aufgelistet. Die Teilklüftigkeitsziffer k_{Kf3} der Kluftschar 3 ist 1,4.

Tabelle 6.8: Erfasste Eigenschaften der Kluftschar 3, anhand der Orientierung der Normalvektoren und der erhobenen *Compass*-Daten.

	Normalvektoren der Punkte	Compass-Plugin
Fallrichtung der Schwerpunktsfläche [°]	219,5	217,9
Fallwinkel der Schwerpunktsfläche [°]	68,9	67,4
Grad der bevorzugten Orientierung [-]	94,2	69,1
k-Wert [-]	34,7	6,0
Trennflächennormalabstand [m]	-	0,73

6.4.5 Blockvolumen nach Palmström (1997)

Für den westlichen Bereich ergibt sich aus den Teilklüftigkeitsziffern eine Klüftigkeitsziffer k von 9,1. Daraus resultiert eine würfelige Klüftkörperform mit einem Blockvolumen V_b von 0,03 m³.

6.5 Trennflächenerfassung mit CloudCompare – östlicher Bereich

Im östlichen Bereich sind, wie zuvor im westlichen Bereich unter Kapitel 6.4, vier Trennflächenscharen erfasst worden. Jedoch unterscheiden sich die beiden Bereiche hinsichtlich der Orientierung der Trennflächen. Die verwendete Punktwolke ist dem großräumigen Modell unter Kapitel 6.2.1 entnommen. Dabei wurden die Punkte des Bereichs 3 und zum Teil auch des Bereichs 2 verwendet. Die Punktzahl beträgt 1.911.485. In Abbildung 6.18 kann die räumliche Ausdehnung des östlichen Bereichs betrachtet werden.

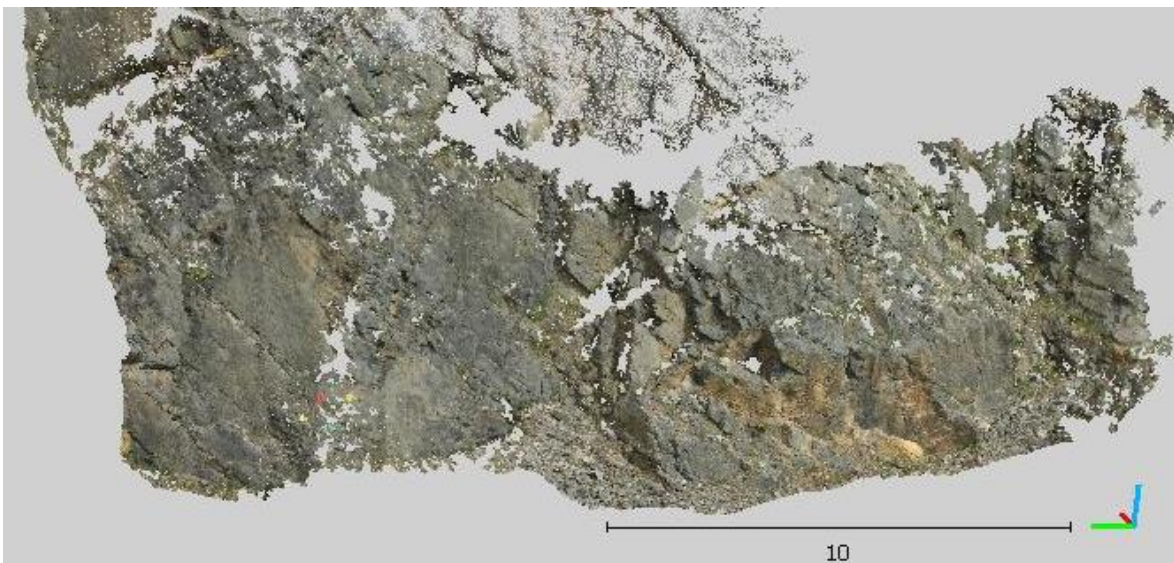


Abbildung 6.18: Räumliche Ausdehnung des östlichen Bereichs. Die Punkte sind in Echtfarben dargestellt. Der Maßstab ist in Metern angegeben.

In Abbildung 6.19 kann die Punktwolke mit den zugewiesenen HSV-Farbwerten betrachtet werden, mit welcher die Erfassung des Trennflächengefüges durchgeführt wurde.

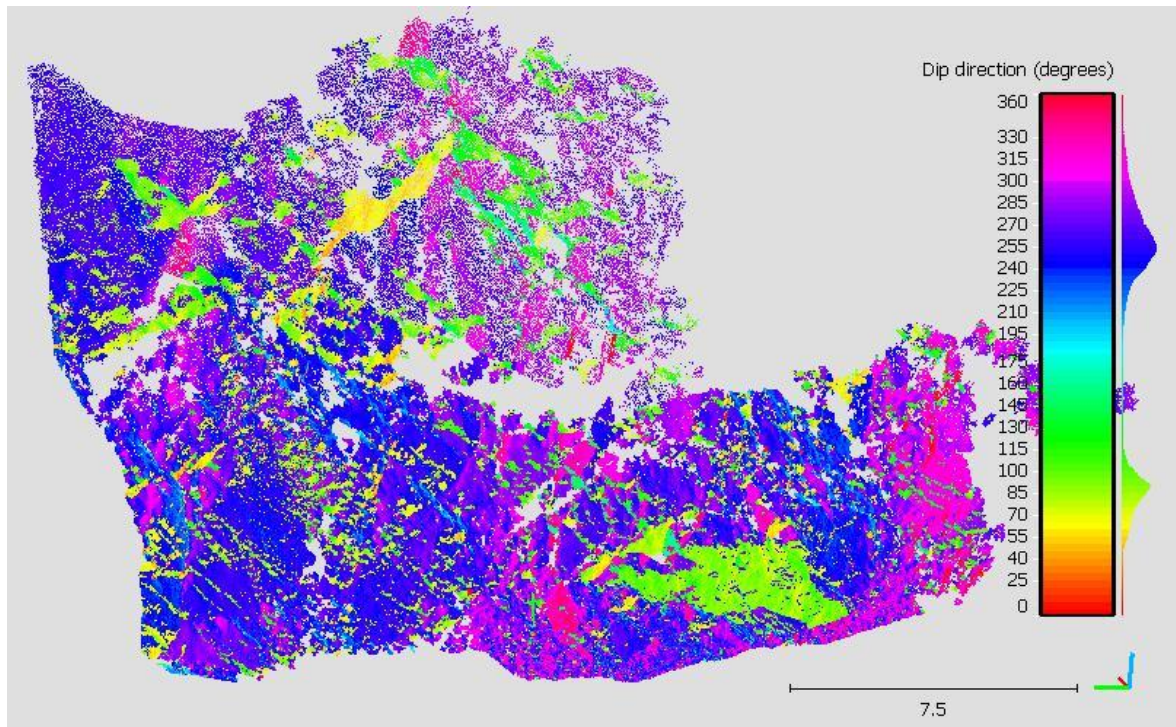


Abbildung 6.19: Die Punktwolke mit HSV-Farben des östlichen Bereichs. Die Legende zeigt die jeweilige HSV-Farbe für die unterschiedlichen Fallrichtungen an. Der Maßstab ist in Metern angegeben.

In der Abbildung 6.20 können die Polpunkte der *Compass* Flächen, die Schwerpunktsflächen der jeweiligen Trennflächenschar und die Orientierung des Aufschlusses als Großkreise betrachtet werden.

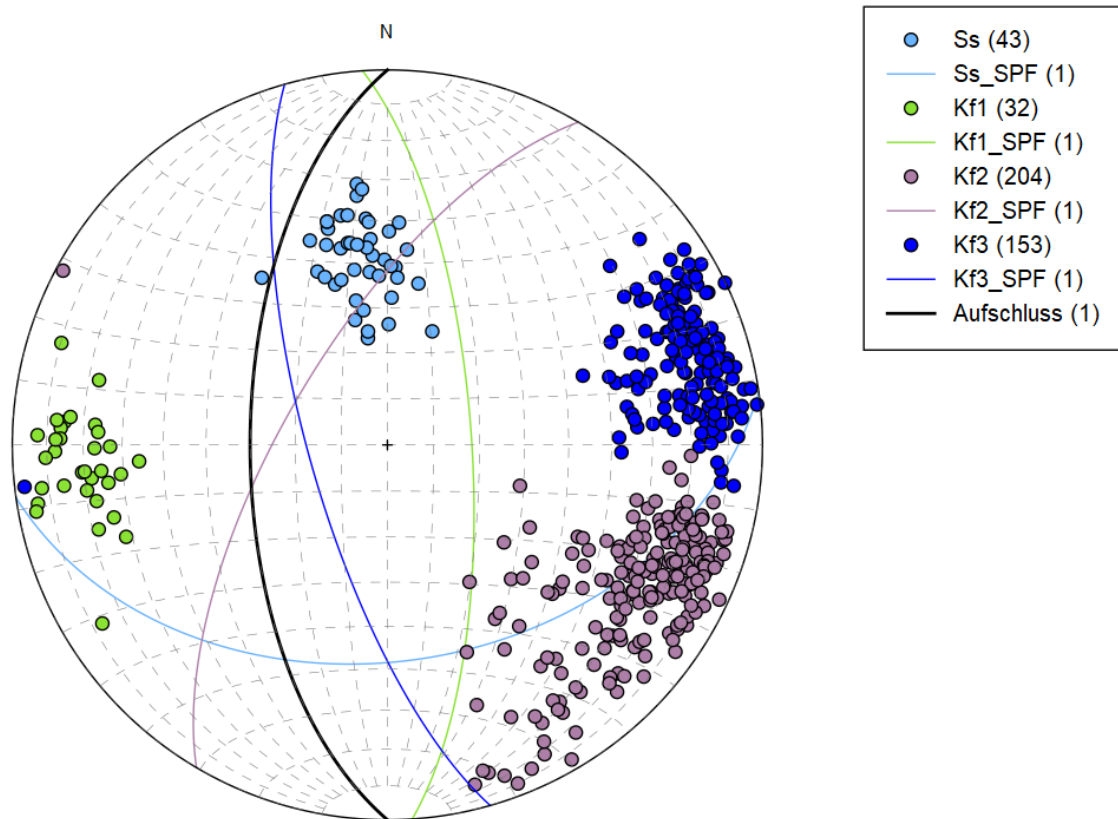


Abbildung 6.20: Darstellung der Polpunkte und der Schwerpunktsflächen der jeweiligen Trennflächenschar des östlichen Bereichs in einem Schmidt'schen Netz. Der schwarze Großkreis repräsentiert die Orientierung des Aufschlusses.

6.5.1 Schichtflächen (Ss)

Die Schichtflächen des östlichen Bereichs fallen in einem definierten Bereich von 150° bis 200° ein. Extrahierte Punktwolke hat eine Punktzahl von 19.751. In Abbildung 6.21 kann die räumliche Ausdehnung der Schichtflächen betrachtet werden.

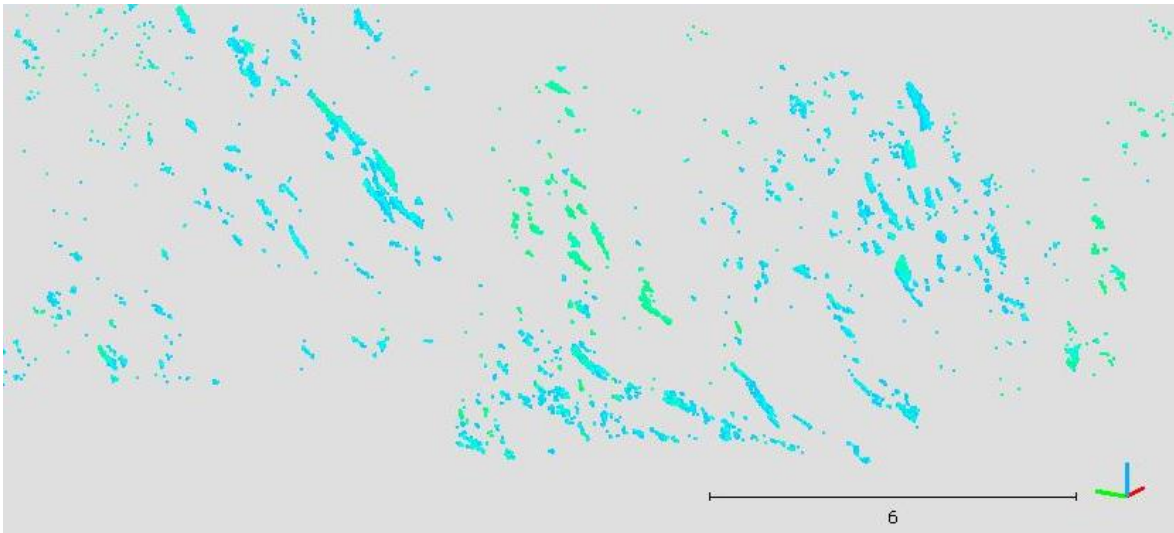


Abbildung 6.21: Räumliche Ausdehnung der Schichtflächen. Der Maßstab ist in Metern angegeben.

Mit Hilfe des *Compass* Plugins sind innerhalb der Schichtflächen 43 Trennflächen und 34 Trennflächennormalabstände eingemessen worden. In Abbildung 6.22 können die definierten schwarzen Trennflächen und schwarzen Trennflächennormalabstände betrachtet werden.

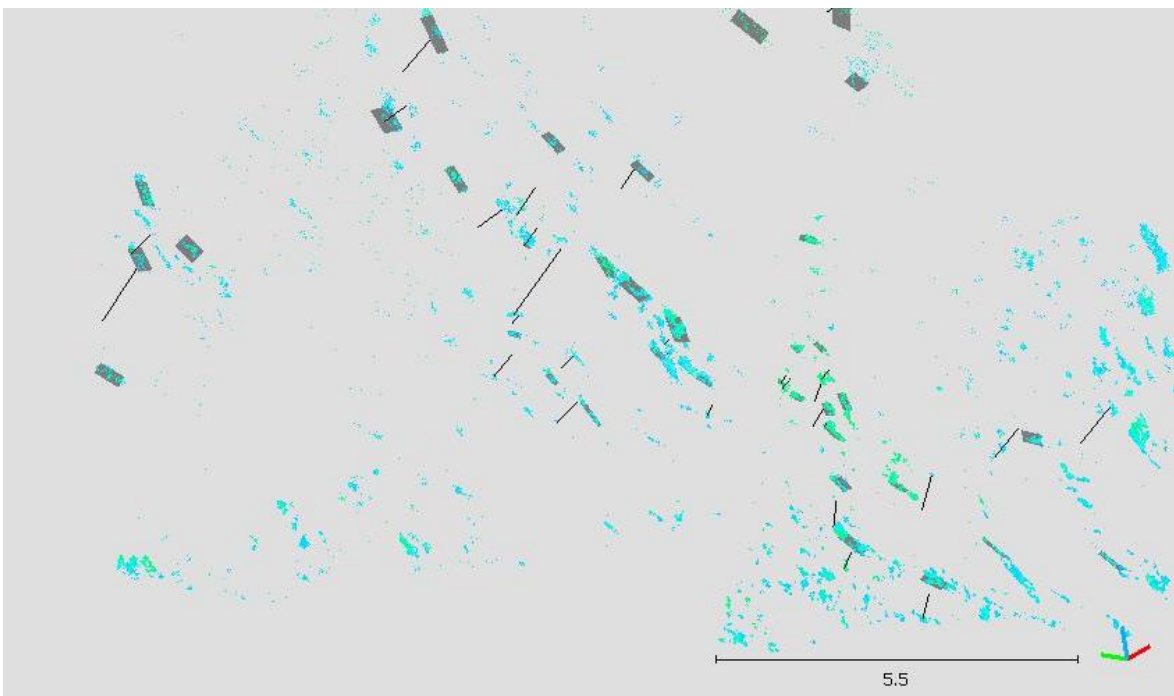


Abbildung 6.22: Definierte Trennflächen und Trennflächennormalabstände innerhalb der Schichtflächenschar. Der Maßstab ist in Metern angegeben.

In Tabelle 6.9 sind die erfassten Eigenschaften der Schichtflächen anhand der Normalvektoren und der mit dem *Compass* Plugin eingemessenen Flächen aufgelistet. Die Teilklüftigkeitsziffer k_{Ss} der Schichtfläche ist 2,0.

Tabelle 6.9: Erfasste Eigenschaften der Schichtflächen, anhand der Orientierung der Normalvektoren der Punkte und der erhobenen Compass-Daten.

	Normalvektoren der Punkte	Compass-Plugin
Fallrichtung der Schwerpunktsfläche [°]	182,1	171,9
Fallwinkel der Schwerpunktsfläche [°]	44,8	41,8
Grad der bevorzugten Orientierung [-]	92,1	96,4
k-Wert [-]	25,2	54,2
Trennflächennormalabstand [m]	-	0,51

6.5.2 Kluftschar 1 (Kf1)

Die Trennflächen der Kluftschar 1 fallen in einem Winkelbereich zwischen 70° und 140° ein. Die Trennflächenlängen sind überwiegend kurz (Palmström, 1997). Wobei auch einzelne mittellange Trennflächen auftreten.

Die extrahierte Punktwolke weist eine Punktzahl von 469.573 auf. Die räumliche Ausdehnung der Klufflächen kann in Abbildung 6.23 betrachtet werden.

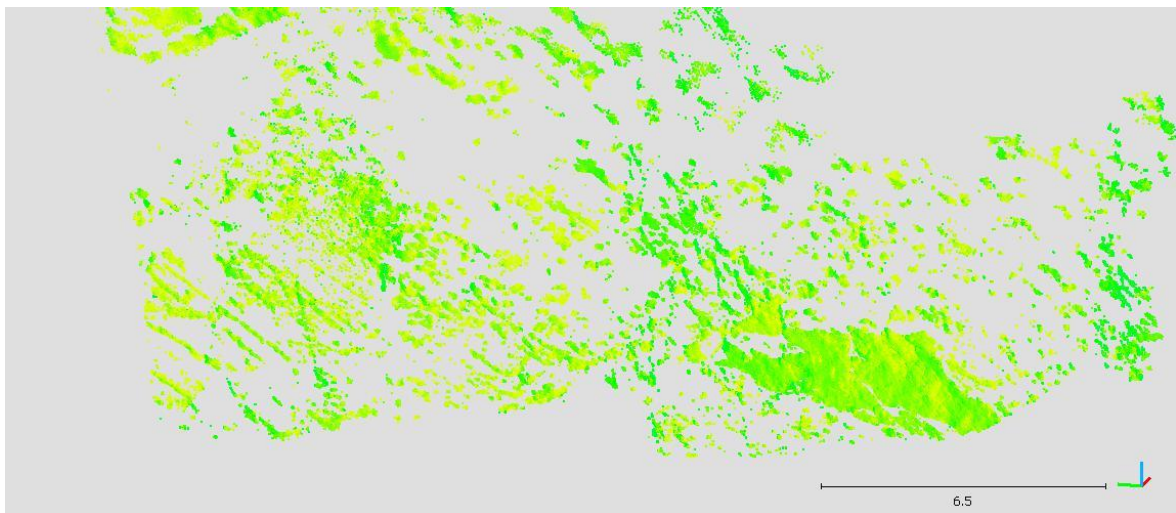


Abbildung 6.23: Räumliche Ausdehnung der Klufflächen 1. Der Maßstab ist in Metern angegeben.

Durch die Untersuchung der Punktwolke mit dem *Compass* Plugin sind 32 Trennflächen und 22 Trennflächennormalabstände gemessen worden. In Abbildung 6.24 sind die gemessenen Orientierungsdaten zu erkennen.

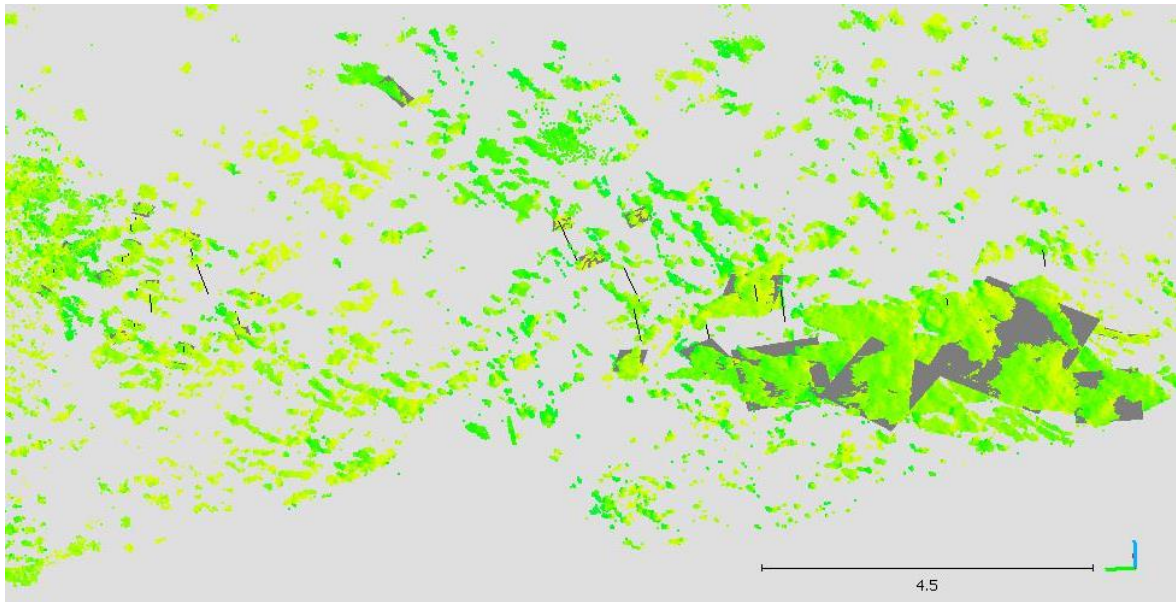


Abbildung 6.24: Mit dem Compass Plugin eingemessene graue Trennflächen und Trennflächennormalabstände. Der Maßstab ist in Metern angegeben.

In Tabelle 6.10 werden die erhobenen Daten der Normalvektoren und jene des Compass Plugins miteinander verglichen. Die Teilklüftigkeitsziffer k_{Kf1} der Kluffläche 1 ist 3,3.

Tabelle 6.10: Erfasste Eigenschaften der Kluffschar 1, anhand der Orientierung der Normalvektoren der Punkte und der erhobenen Compass-Daten.

	Normalvektoren der Punkte	Compass-Plugin
Fallrichtung der Schwerpunktsfläche [°]	90,5	86,2
Fallwinkel der Schwerpunktsfläche [°]	76,6	71,7
Grad der bevorzugten Orientierung [-]	93,3	96,1
k-Wert [-]	29,7	49,2
Trennflächennormalabstand [m]	-	0,30

6.5.3 Kluffschar 2 (Kf2)

Die Trennflächen der Kluffschar 2 fallen in einem Winkelbereich von 280° bis 350° ein. Nach Palmström (1997) sind die Trennflächen als mittellang zu bezeichnen. Die räumliche Ausdehnung der Klüfte ist in Abbildung 6.25 zu sehen.

Die Punktwolke der Klufflächen 2 weist eine Punktzahl von 220.268 auf.

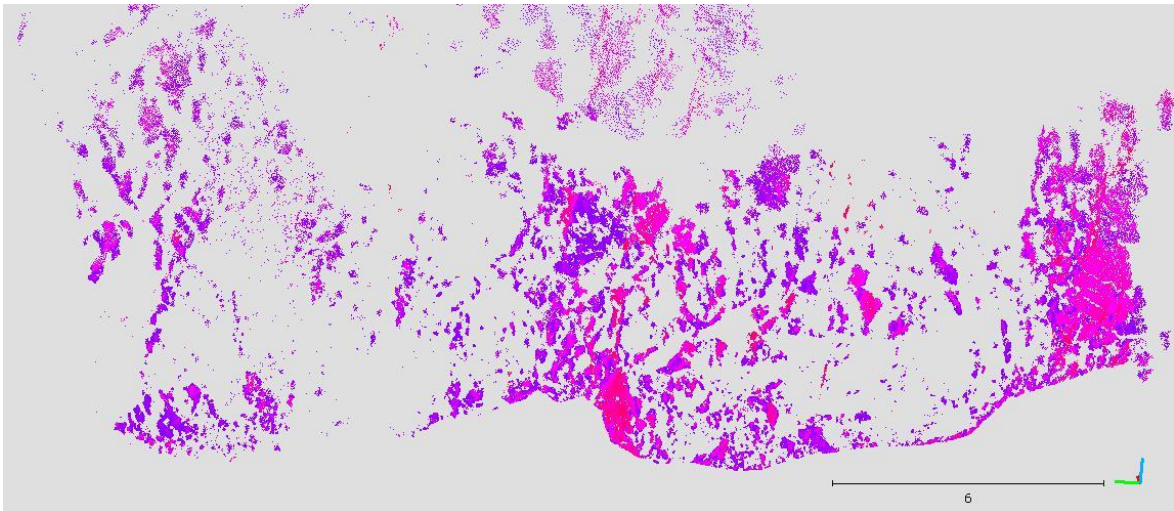


Abbildung 6.25: Räumliche Ausdehnung der Klufflächen 2. Der Maßstab ist in Metern angegeben.

Mit dem *Compass* Plugin sind 204 Klufflächen und 144 Trennflächennormalabstände eingemessen worden. In Abbildung 6.26 können die eingemessenen schwarzen Flächen und Abstände betrachtet werden.

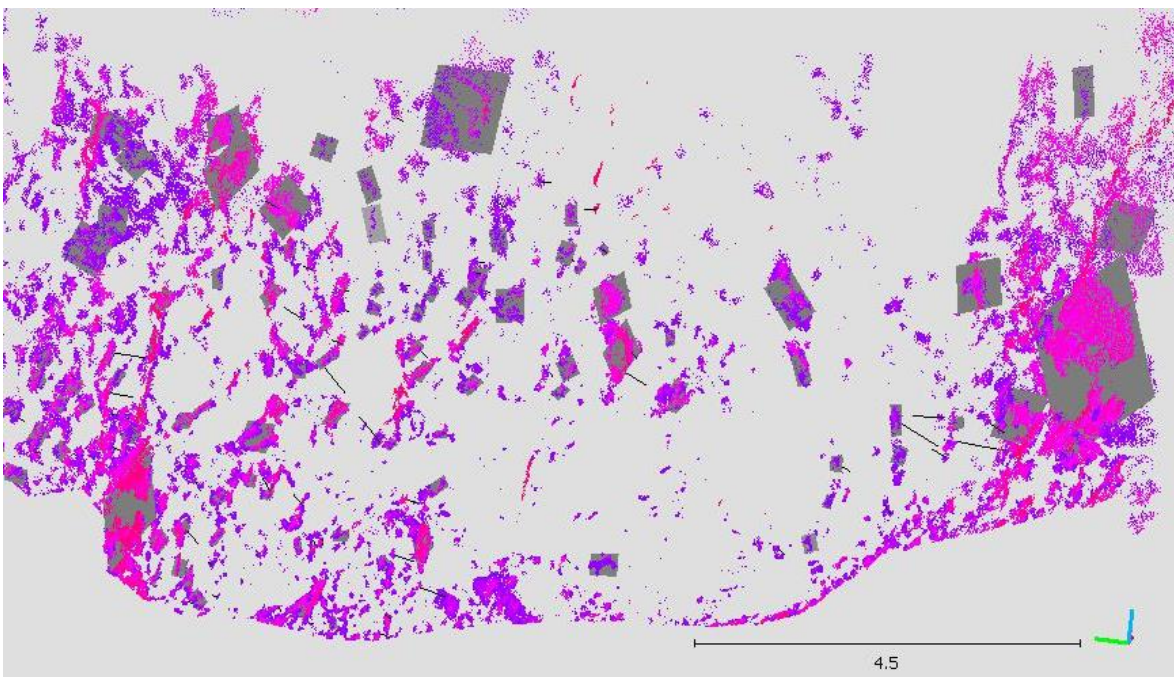


Abbildung 6.26: Punktwolke der Klufflächen 2 mit eingemessenen schwarzen Trennflächen und Trennflächennormalabständen durch das *Compass* Plugin. Der Maßstab ist in Metern angegeben.

In Tabelle 6.11 sind die erhobenen Orientierungsdaten der Normalvektoren und des *Compass* Plugins gegenübergestellt. Die Teilklüftigkeitsziffer k_{K12} der Kluffschar 2 ist 3,9.

Tabelle 6.11: Erfasste Eigenschaften der Kluftschar 2, anhand der Orientierung der Normalvektoren der Punkte und der erhobenen Compass-Daten.

	Normalvektoren der Punkte	Compass-Plugin
Fallrichtung der Schwerpunktsfläche [°]	287,5	300,6
Fallwinkel der Schwerpunktsfläche [°]	67,1	68,0
Grad der bevorzugten Orientierung [-]	84,2	88,3
k-Wert [-]	12,7	17,0
Trennflächennormalabstand [m]	-	0,26

6.5.4 Kluftschar 3 (Kf3)

Die Klufflächen der Kluftschar 3 fallen in einem Winkelbereich von 230° bis 280° ein. Vor allem mittlere und lange Klüfte nach Palmström (1997), die parallel zur Orientierung des Aufschlusses einfallen, sind charakteristisch für die Klufflächen 3.

Die extrahierte Punktwolke hat eine Punktzahl von 759.678. In Abbildung 6.27 ist die räumliche Ausdehnung der Klufflächen dargestellt.

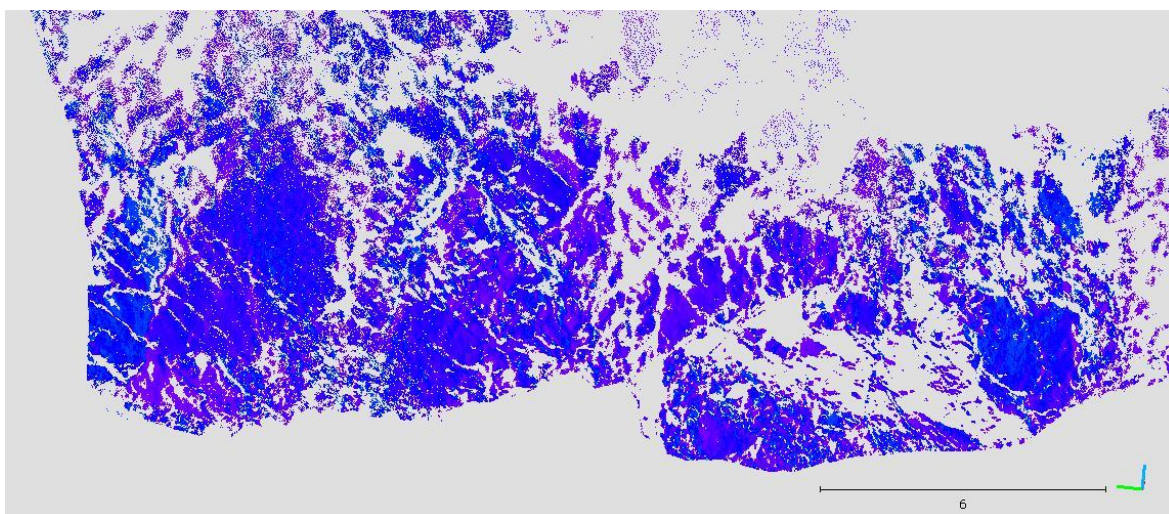


Abbildung 6.27: Räumliche Ausdehnung der Klufflächen 3. Der Maßstab ist in Metern angegeben.

Durch die Untersuchung mit dem *Compass* Plugin sind 153 Trennflächen und 121 Trennflächennormalabstände gemessen worden. Die räumliche Orientierung der eingemessenen schwarzen Flächen und Trennflächennormalabständen kann in Abbildung 6.28 betrachtet werden.

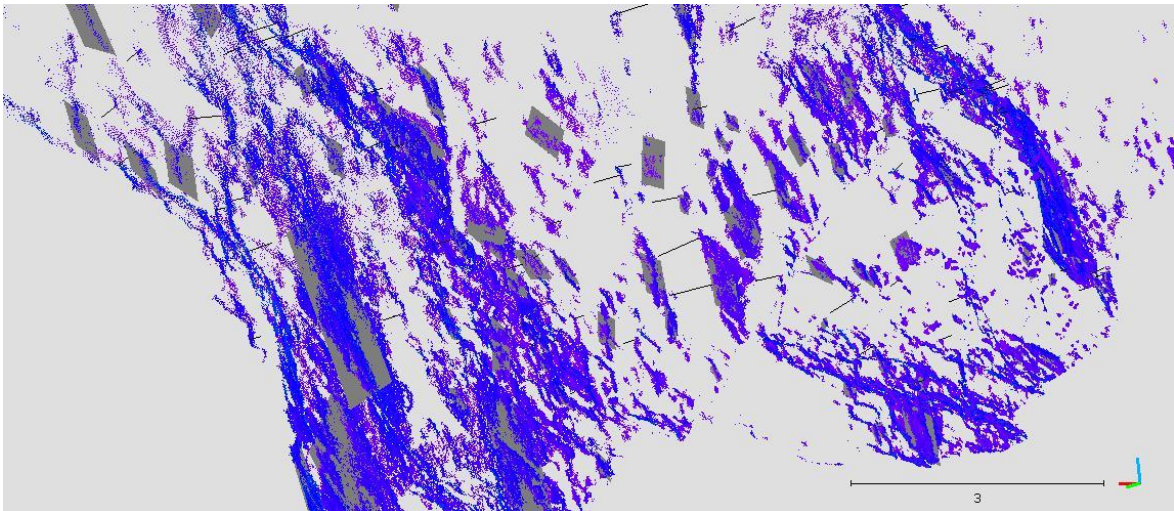


Abbildung 6.28: Ausschnitt aus der Punktwolke der Klüftflächen 3 mit schwarzen Klüftflächen und Trennflächen-normalabständen durch das Compass Plugin. Der Maßstab ist in Metern angegeben.

In Tabelle 6.12 kann eine Gegenüberstellung der erhobenen Daten aus den Normalvektoren und des *Compass* Plugins betrachtet werden. Die Teilklüftigkeitsziffer der Klüftschar 3 k_{Kf3} ist 5,0.

Tabelle 6.12: Erfasste Eigenschaften der Klüftschar 3, anhand der Orientierung der Normalvektoren der Punkte und der erhobenen *Compass*-Daten.

	Normalvektoren der Punkte	Compass-Plugin
Fallrichtung der Schwerpunktsfläche [°]	242,9	254,1
Fallwinkel der Schwerpunktsfläche [°]	66,0	73,0
Grad der bevorzugten Orientierung [-]	86,9	92,7
k-Wert [-]	15,2	27,4
Trennflächennormalabstand [m]	-	0,20

6.5.5 Blockvolumen nach Palmström (1997)

Für den östlichen Bereich ergibt sich aus den Teilklüftigkeitsziffern eine Klüftigkeitsziffer k von 14,2. Aufgrund der Anzahl an verschiedenen Trennflächenscharen ergibt sich eine würfelige Klüftkörperform mit einem Blockvolumen V_b von 0,01 m³.

6.6 Trennflächenerfassung mit der Scanline – westlicher Bereich

Im westlichen Bereich wurde zu Vergleichszwecken ein *Scanline Mapping* über eine Länge von 10,4 m durchgeführt. Der Streichwert der *Scanline* beträgt 320/00 NW. Der Aufschluss hat eine Einfallrichtung von 230/60. In Abbildung 6.29 kann der Verlauf der *Scanline* betrachtet werden.



Abbildung 6.29: Verlauf der *Scanline* entlang des westlichen Bereichs.

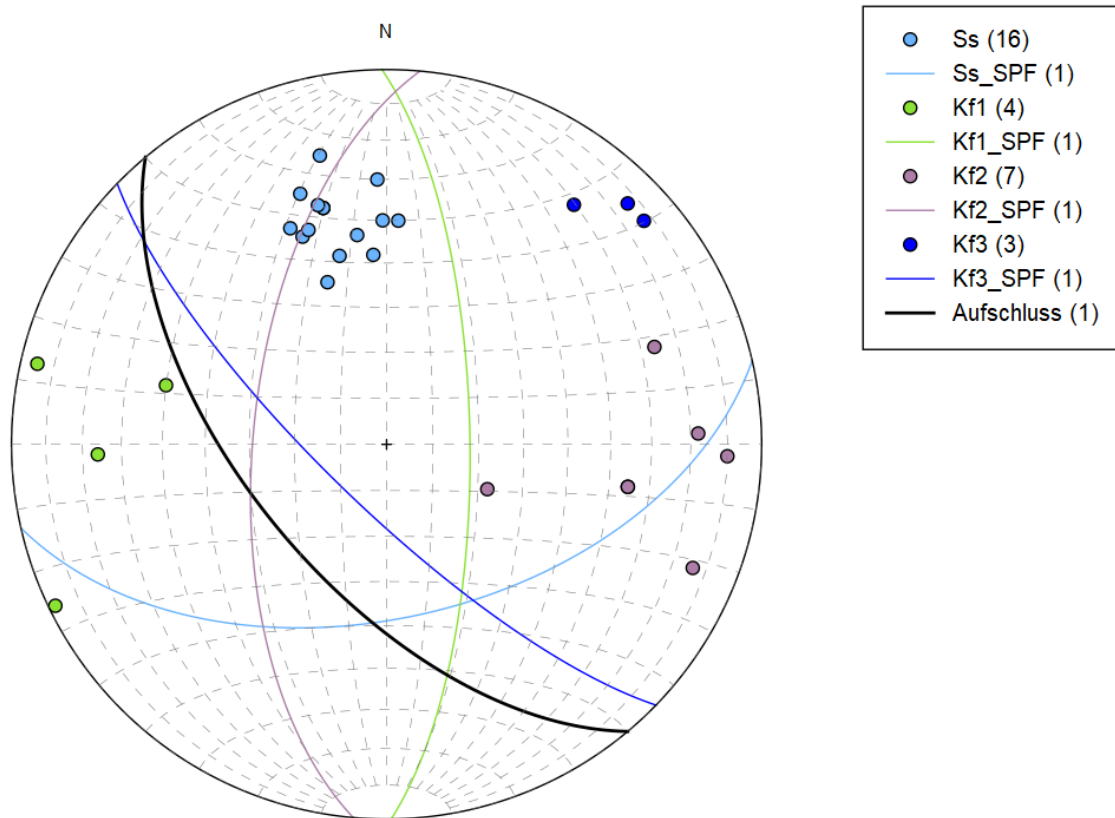


Abbildung 6.30: Darstellung der Polpunkte der jeweiligen Trennflächen. Zusätzlich sind noch die Schwerpunktsflächen der Trennflächenscharen und die Orientierung des Aufschlusses als Großkreise dargestellt.

6.6.1 Trennflächenorientierung

Entlang der 10,4 m langen *Scanline* sind in Summe 35 Trennflächen gemessen worden. Bei fünf gemessenen Trennflächen handelt es sich um willkürlich vorkommende. Alle 30 anderen Trennflächen sind einer der Trennflächenarten in Tabelle 6.13 zugeordnet worden. In weiterer Folge wurden die Schwerpunktsflächen, der Grad der bevorzugten Orientierung R% und der Konzentrationsparameter k berechnet.

Tabelle 6.13: Aufstellung der erhobenen Orientierungsdaten in Form von Schwerpunktsflächen.

Trennflächenart	Fallrichtung [°]	Fallwinkel [°]	R% [%]	K [-]
Schichtfläche	167,1	51,8	97,3	68,6
Kluftschar 1	89,3	71,9	85,9	10,6
Kluftschar 2	275,1	60,8	86,6	12,8
Kluftschar 3	224,1	76,6	98,7	105,6

6.6.2 Trennflächennormalabstand

In Tabelle 6.14 sind die Trennflächennormalabstände des westlichen Bereichs aufgelistet.

Der Trennflächennormalabstand der Schichtfläche kann als dickbankig bezeichnet werden. Die Trennflächen der Kluftchar 1 sind als weitständig, während jene der Kluftchar 2 und 3 als mittelständig zu bezeichnen sind. Des Weiteren sind die Teilklüftigkeitsziffern k der jeweiligen Trennflächenart nach Stiny (1922) angeführt.

Tabelle 6.14: Trennflächennormalabstände der Trennflächenscharen im westlichen Bereich.

Trennflächenart	Trennflächennormalabstand d_n [m]	Teilklüftigkeitsziffer k (Stiny, 1922)
Schichtfläche	0,55	1,8
Kluftchar 1	0,77	1,3
Kluftchar 2	0,48	2,1
Kluftchar 3	0,60	1,7

6.6.3 Terminationsindex

In Tabelle 6.15 können die Ergebnisse des *Scanline Mappings* hinsichtlich der Endungen der Trennflächen betrachtet werden. Für die vorliegenden Werte ergibt sich ein Terminationsindex T_i von 8,6 %.

Tabelle 6.15: Ergebniss der Untersuchung hinsichtlich der Endungen der Trennflächen.

Art der Endung	Anzahl
Endung nicht sichtbar - O	18 (N_o)
Endung an einer anderen Trennfläche - A	14 (N_a)
Endung im intakten Gestein - I	3 (N_i)

6.6.4 Rauigkeit (JRC)

In Abbildung 6.31 kann die Häufigkeit der unterschiedlichen JRC-Werte betrachtet werden. Mit einer Häufigkeit von 16, weisen 46 % der Trennflächen einen JRC von 14-16 auf. Trennflächen mit einem JRC von 12-14 treten mit einer prozentuellen Häufigkeit von 26 % auf.

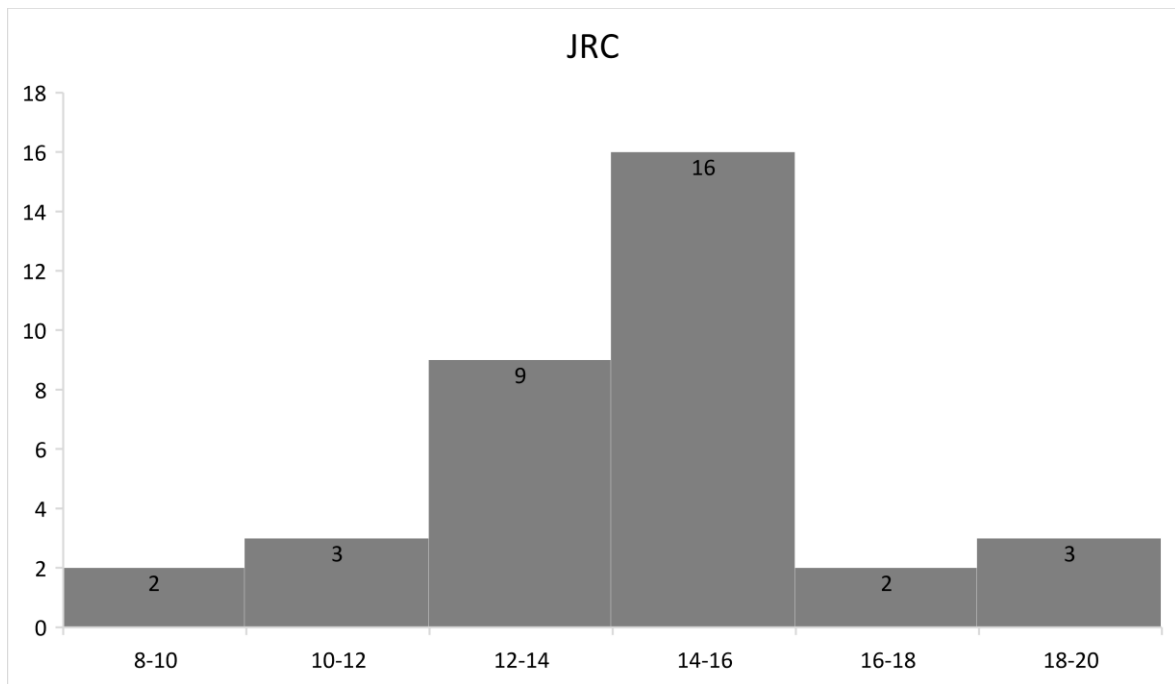


Abbildung 6.31: Histogramm zur Darstellung des Joint Roughness Coefficient JRC im westlichen Bereich.

6.6.5 Blockvolumen nach Palmström (1997)

Für den westlichen Bereich ergibt sich im Zuge des *Scanline Mappings* aus den Teilklüftigkeitsziffern eine Klüftigkeitsziffer k von 6,9. Aufgrund der Anzahl an verschiedenen Trennflächenscharen ergibt sich eine würfelige Klüftkörperform mit einem Blockvolumen V_b von $0,1 \text{ m}^3$.

6.7 Trennflächenerfassung mit dem DSE – gesamter Bereich

Mit Hilfe des DSE ist das Trennflächengefüge des gesamten erfassten Bereichs, mit einer Längserstreckung von 40 m, erfasst worden. In Abbildung 6.32 ist die verwendete Punktwolke zu sehen. Bevor sie mit dem *DSE* untersucht wurde, sind die Punkte des Blockschutts im Vordergrund mit *CloudCompare* ausgeschnitten worden. Da ansonsten auch die Punkte des Blockschutts als Trennflächen klassifiziert werden.

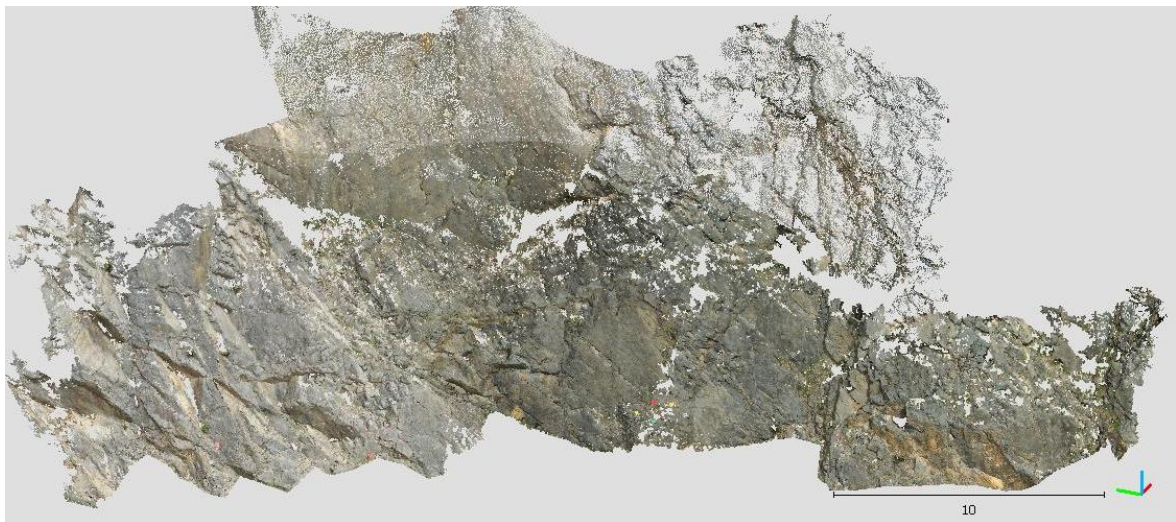


Abbildung 6.32: Gesamter erfasster Bereich des Steinbruchs der mit dem DSE untersucht wurde.

Für die Erfassung des Trennflächengefüges sind vier Trennflächenscharen definiert worden. Die Dichteverteilung der Polpunkte und die definierten mittlere Orientierungen der Trennflächenscharen sind in Abbildung 6.33 dargestellt.

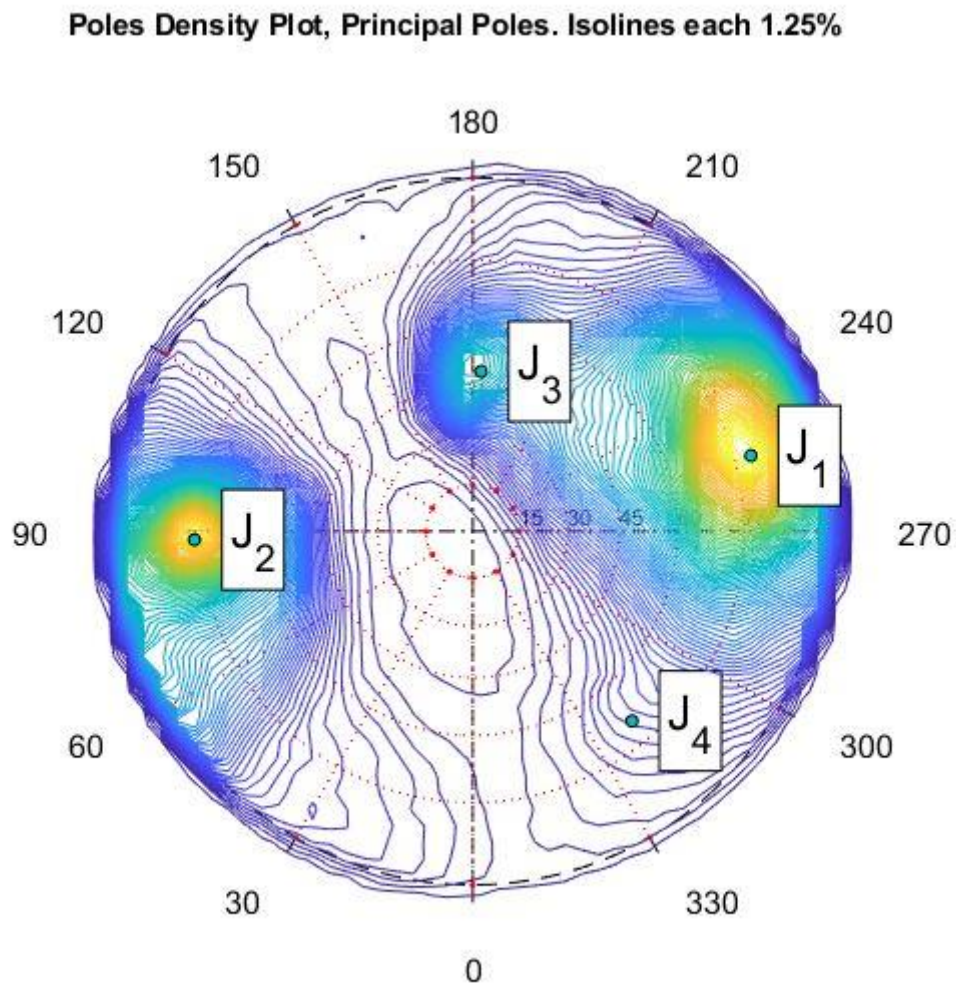


Abbildung 6.33: Darstellung der Polpunkte in einem Stereonez mit Dichteverteilung. Der Abstand zwischen den Isolinien beträgt 1,25 %. Zusätzlich sind noch die mittleren Orientierungen der Schwerpunktsflächen dargestellt.

In Tabelle 6.16 sind mittleren Orientierungen aufgelistet. Die Werte für die Trennflächenscharen 1 bis 3 wurden vom Programm selbst definiert. Die Orientierung für die Trennflächenschar 4 erfolgte manuell. Für den Radius des Kegels, innerhalb dem alle Punkte einer Trennflächenschar zugeordnet werden, wurde ein Wert von 35° gewählt. Der Anteil gibt an, wieviel Punkte eine Trennfläche an der gesamten Punktwolke besitzt. Die dabei entstandene klassifizierte Punktwolke kann in Abbildung 6.34 betrachtet werden.

Tabelle 6.16: Mittlere Orientierungen der Trennflächenscharen. Alle Punkte deren Fallrichtung und Fallwinkel des Normalvektors innerhalb eines Kegels mit einem Radius von 35° liegen, werden der jeweiligen Trennfläche zugeordnet.

Trennflächenschar	Fallrichtung [°]	Fallwinkel [°]	Anteil [%]
1 (Kf 3)	255	78	38,63
2 (Kf 1)	88	76	24,29
3 (Ss)	183	49	10,89
4 (Kf 2)	320	70	6,41

In Tabelle 6.16 sind den Trennflächenscharen zusätzlich noch die Bezeichnungen aus den Untersuchungen mit *CloudCompare* und der *Scanline* beigefügt. So repräsentiert die Trennflächenschar 3 die Schichtflächen, die Trennflächenschar 1 die Kluftschar 3, die Trennflächenschar 2 die Kluftschar 1 und die Trennflächenschar 4 die Kluftschar 2.

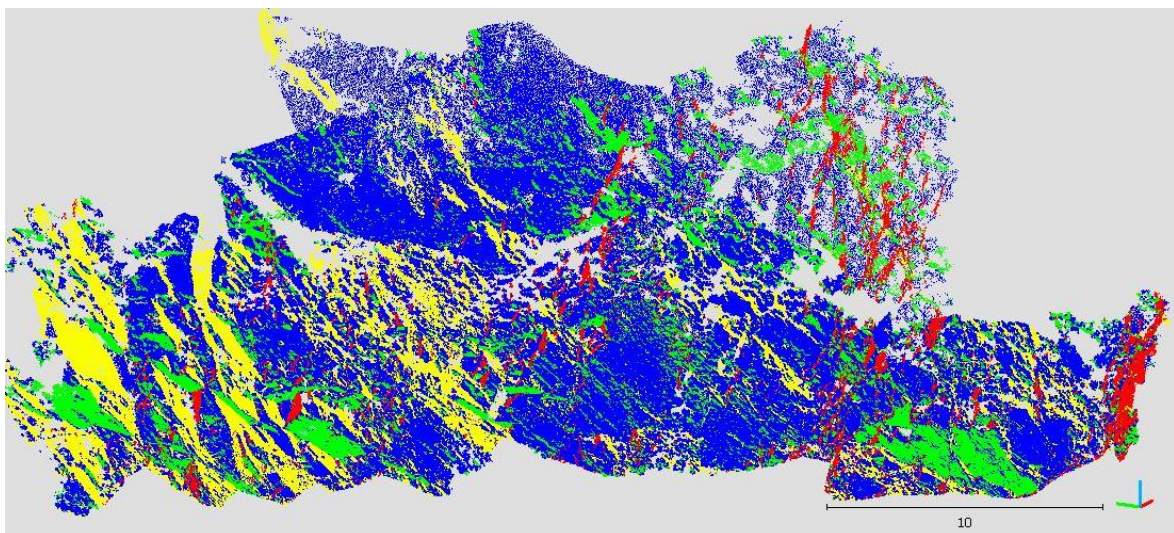


Abbildung 6.34: Die Punkte der Punktwolke sind einer Trennflächenschar mit jeweiliger Farbe zugeordnet worden. Blau entspricht der Trennflächenschar 1, grün der Trennflächenschar 2, gelb der Trennflächenschar 3 und rot der Trennflächenschar 4.

In Tabelle 6.17 sind die Orientierungen der Schwerpunktsflächen der jeweiligen Trennflächenscharen aufgelistet.

Tabelle 6.17: Orientierung der Schwerpunktsfläche, Grad der bezugten Orientierung und Konzentrationsparameter k der jeweiligen Trennflächenschar.

Trennflächenschar	Fallrichtung [°]	Fallwinkel [°]	R% [%]	k [-]
1 (Kf 3)	252,5	69,0	51,0	4,1
2 (Kf 1)	87,6	70,7	76,4	8,5
3 (Ss)	189,2	50,0	90,5	21,0
4 (Kf 2)	310,6	67,2	65,5	5,8

Im Zuge der Untersuchungen mit dem *DSE* sind auch die Trennflächennormalabstände unter der Annahme von persistenten und nicht persistenten Trennflächen ermittelt worden. Die Ergebnisse können in Tabelle 6.18 betrachtet werden. Die Schichtfläche ist aufgrund ihrer persistenten Eigenschaften als dünnbankig zu bezeichnen. Sie weist eine Teilklüftigkeitsziffer k_{Ss} von 10,0 auf. Die Klufffläche 1 ist nicht persistent und hat eine mittelständige Schichtdicke bei einer Teilklüftigkeitsziffer k_{Kf1} von 5. Die Klufffläche 2 ist ebenfalls nicht persistent und mittelständig. Sie weist eine Teilklüftigkeitsziffer k_{Kf2} von 3,1 auf. Für die Klufffläche 3, kann bei nicht persistenten Verhältnissen, eine engständige Schichtdicke mit einer Teilklüftigkeitsziffer k_{Kf3} von 5,6 angegeben werden. Für den gesamten Aufschluss ergibt sich eine Klüftigkeitsziffer k von 23,7 (Stiny, 1922). Nach Palmström (1997) ergibt sich dadurch eine würfelige Kluffkörperform mit einem Blockvolumen V_b von 2 dm³.

Auffällig ist, dass mit einer Abnahme der Cluster die Trennflächenabstände zunehmen.

Tabelle 6.18: Trennflächennormalabstände der einzelnen Trennflächenscharen unter der Annahme von nicht persistenten und persistenten Trennflächen.

Trennflächenschar	Trennflächenabstand (nicht persistent) [m]	Trennflächenabstand (persistent) [m]	Anzahl der Cluster
1 (Kf 3)	0,18	0,03	642
2 (Kf 1)	0,2	0,05	607
3 (Ss)	0,28	0,1	354
4 (Kf 2)	0,32	0,13	274

Nach Palmström (1997) sind die Trennflächen aufgrund ihrer mittleren Spurlänge als kurze Klüfte zu bezeichnen.

Tabelle 6.19: Mittlere Spurlänge und mittlere Trennflächengröße der einzelnen Trennflächen.

Trennflächenschar	Mittlere Spurlänge [m]	Trennflächengröße [m ²]	Anzahl der Cluster
1 (Kf 3)	0,65	0,42	642
2 (Kf 1)	0,48	0,13	607
3 (Ss)	0,64	0,27	354
4 (Kf 2)	0,48	0,14	274

7. Vergleich der Ergebnisse

Der Vergleich der Ergebnisse, der in Kapitel 6 angeführten unterschiedlichen Methoden, dient einerseits zur Verifikation von Messungen und der erhobenen Daten. Andererseits ergeben sich daraus die deutlichen Unterschiede und Vor- und Nachteile der jeweiligen Methoden.

7.1 Scanline Mapping und CloudCompare-Daten des westlichen Bereichs

Die größten Unterschiede zwischen der konventionellen *Scanline* Methode und den Methoden mit digitalen Punktwolken sind die Anzahl der Messungen bei gleich großen Aufschlüssen. So wurden die unterschiedlichen Schwerpunktsflächen der Normalvektoren mit insgesamt 4.067.065 Werten berechnet. Für die Berechnung der Schwerpunktsflächen aus den *Compass* Daten sind 295 Messungen verwendet worden. Wohingegen für die Berechnung der Schwerpunktsflächen aus den *Scanline* Daten nur 30 Werte verwendet wurden. Somit sind die Berechnungen mit den *Compass* Daten mit fast 10-mal so vielen Werten, verglichen mit der *Scanline* Methode durchgeführt worden.

Bei der Berechnung der mittleren Trennflächennormalabstände d_n aus den *Compass* Daten wurden insgesamt 233 Messungen verwendet. Dem gegenüber steht die Berechnung der mittleren Trennflächennormalabstände d_n aus den *Scanline* Daten mit 30 Messungen.

7.1.1 Vergleich der Trennflächenscharen

In Tabelle 7.1 sind die berechneten Parameter der Schichtfläche gegenübergestellt. Zwischen der Orientierung der *Compass* Daten und der *Scanline* Daten besteht eine Differenz von $6,5^\circ$. Die jeweiligen Trennflächennormalabstände d_n unterscheiden sich mit 0,1 m voneinander.

Tabelle 7.1: Gegenüberstellung der Orientierung der Schwerpunktsflächen und des Trennflächennormalabstands aus den Normalvektoren der Punkte, den Compass Daten und den Scanline Daten der Schichtflächen.

Schichtfläche	Normalvektoren der Punkte	Compass-Plugin	Scanline
Fallrichtung [°]	178,5	175,2	167,1
Fallwinkel [°]	54,6	52,9	51,8
Trennflächennormalabstand [m]	-	0,45	0,55

Die berechneten Orientierungen und Abstände aus den unterschiedlichen Daten sind der Tabelle 7.2 zu entnehmen. Die Orientierungen der *Compass* Daten und der *Scanline* Daten unterscheiden sich mit 15,3°. Der Trennflächennormalabstand d_n unterscheidet sich mit 0,1 m.

Der teilweise große Unterschied der Messungen ist auf die Welligkeit der Trennflächen zurückzuführen. Mit dem *Compass* Plugin kann die Orientierung der sichtbaren Schicht- oder Klufffläche für den gesamten Aufschluss lückenlos erfasst werden. Wohingegen bei der *Scanline* Methode, die Orientierungen der Trennflächen nur für einen Teilbereich und nur mit einer Flächengröße eines Kompassdeckels gemessen werden.

Tabelle 7.2: Gegenüberstellung der Orientierung der Schwerpunktsflächen und des Trennflächennormalabstands aus den Normalvektoren der Punkte, den Compass Daten und den Scanline Daten der Kluffschar 1.

Kluffschar 1	Normalvektoren der Punkte	Compass-Plugin	Scanline
Fallrichtung [°]	81,7	78,9	89,3
Fallwinkel [°]	60,9	59,9	71,9
Trennflächennormalabstand [m]	-	0,67	0,77

Die Orientierungen und Trennflächennormalabstände der unterschiedlichen Daten für die Kluffschar 2 können in Tabelle 7.3 betrachtet werden. Die Differenzen zwischen den *Compass* und den *Scanline* Daten beträgt 10,6°. Der Trennflächennormalabstand d_n der *Scanline* Daten ist mit 0,48 m fast doppelt so groß.

Tabelle 7.3: Gegenüberstellung der Orientierung der Schwerpunktsflächen und des Trennflächennormalabstands aus den Normalvektoren der Punkte, den Compass Daten und den Scanline Daten der Kluffschar 2.

Kluffschar 2	Normalvektoren der Punkte	Compass-Plugin	Scanline
Fallrichtung [°]	259,4	266,5	275,1
Fallwinkel [°]	67,2	68,1	60,8
Trennflächennormalabstand [m]	-	0,25	0,48

In der Tabelle 7.4 sind die berechneten Parameter der Kluffschar 3 angeführt. Der Winkel

zwischen der Schwerpunktsfläche der *Scanline* Daten und jener der *Compass* Daten beträgt $10,9^\circ$. Mit $0,73$ m ist der Trennflächennormalabstand der *Compass* Daten um $0,13$ m größer.

Tabelle 7.4: Gegenüberstellung der Orientierung der Schwerpunktsflächen und des Trennflächennormalabstands aus den Normalvektoren der Punkte, den Compass Daten und den Scanline Daten der Kluftschar 3.

Kluftschar 3	Normalvektoren der Punkte	Compass-Plugin	Scanline
Fallrichtung [°]	219,5	217,9	224,1
Fallwinkel [°]	68,9	67,4	76,6
Trennflächennormalabstand [m]	-	0,73	0,6

Die Unterschiede hinsichtlich der Trennflächennormalabstände spiegeln sich auch in den jeweiligen Blockgrößen nach Palmström (1997) wieder. Die ermittelte Blockgröße der *Scanline* Daten ist mit $0,1$ m³ rund dreimal so groß als jene der *Compass* Daten mit $0,03$ m³.

7.1.2 Vergleich von direkten und digitalen Messungen

Anhand der Abbildung 7.1 und der Abbildung 7.2 können die mit dem Gefügekompas gemessenen Orientierungen der *Scanline* Methode mit jenen des *Compass* Plugins im *CloudCompare* verglichen werden. Die Unterschiede zwischen den mit dem *Compass* Plugin und mit dem Gefügekompas gemessenen sechs Flächen liegen zwischen $0,7^\circ$ und 11° . Wobei nur ein Wert eine Abweichung von über 10° aufweist.



Abbildung 7.1: Darstellung der gemessenen Orientierungen der Schichtflächen im Zuge des Scanline Mappings. Der Durchmesser der roten Scheibe am rechten Bildrand beträgt 16 cm.



Abbildung 7.2: Orientierungen der zu Abbildung 7.1 äquivalenten Schichtflächen. Die Flächen wurden mit dem Compass Plugin eingemessen.

7.2 Vergleich der CloudCompare Daten mit denen des DSE

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse der manuellen Untersuchung der Punktwolke im *CloudCompare* und die Ergebnisse der halbautomatischen Untersuchung mit dem *DSE* verglichen werden. Die Ergebnisse für die Methode im *CloudCompare* setzen sich aus jenen des westlichen (siehe Kapitel 6.4) und östlichen Bereich (siehe Kapitel 6.5) zusammen. Die Orientierungen der Schwerpunktsflächen der *DSE* und der *Compass* Plugin Daten unterscheiden sich um bis zu 22,2°. Bis auf den Trennflächennormalabstand der Kluftschar 2 sind die aus den *Compass* Daten erhobenen Abstände größer.

In Tabelle 7.5 sind die erhobenen Orientierungen und Trennflächennormalabstände der Schichtflächen gegenübergestellt. Die Orientierungen der Schwerpunktsflächen der *Compass* Daten und jener der *DSE* Daten unterschieden sich um 11,6°. Der berechnete Trennflächennormalabstand der *Compass* Daten ist um 0,38 m größer als der mit dem *DSE* berechnete.

Tabelle 7.5: Gegenüberstellung der Orientierung der Schwerpunktsflächen und des Trennflächennormalabstands aus den Normalvektoren der Punkte, den *Compass* Daten und den *DSE* Daten der Schichtfläche.

Schichtfläche	Normalvektoren der Punkte	Compass-Plugin	DSE
Fallrichtung [°]	178,6	174,0	189,2
Fallwinkel [°]	54,4	48,7	50,0
Trennflächennormalabstand [m]	-	0,48	0,1

In Tabelle 7.6 werden die Ergebnisse für die Kluftschar 1 der *Compass* und der *DSE* Daten miteinander verglichen. Der Unterschied der Schwerpunktsflächen aus den Daten des *Compass* Plugins und der *DSE* Untersuchung beträgt 8,9°. Der Trennflächennormalabstand der *Compass* Daten ist mit 0,49 m um 0,29 m größer als jener der *DSE* Daten.

Tabelle 7.6: Gegenüberstellung der Orientierung der Schwerpunktsflächen und des Trennflächennormalabstands aus den Normalvektoren der Punkte, den *Compass* Daten und den *DSE* Daten der Klufffläche 1.

Klufffläche 1	Normalvektoren der Punkte	Compass-Plugin	DSE
Fallrichtung [°]	85,3	81,5	87,6
Fallwinkel [°]	66,7	63,8	70,7
Trennflächennormalabstand [m]	-	0,49	0,2

Die erhobenen Daten der Kluftschar 2 sind in Tabelle 7.7 zu betrachten. Die Orientierungen

der beiden Schwerpunktsflächen unterscheiden sich um $22,2^\circ$. Die Trennflächennormalabstände unterscheiden sich nur minimal um 6 cm.

Tabelle 7.7: Gegenüberstellung der Orientierung der Schwerpunktsflächen und des Trennflächennormalabstands aus den Normalvektoren der Punkte, den Compass Daten und den DSE Daten der Kluffläche 2.

Kluffläche 2	Normalvektoren der Punkte	Compass-Plugin	DSE
Fallrichtung [°]	266,0	286,5	310,6
Fallwinkel [°]	66,4	67,2	67,2
Trennflächennormalabstand [m]	-	0,26	0,32

Die in der Tabelle 7.8 angeführten Schwerpunktsflächen des *Compass* Plugin und der *DSE* Daten unterscheiden sich um $3,5^\circ$. Der Trennflächennormalabstand der *Compass* Daten ist mit einem Wert von 0,47 m rund 2,6-mal so groß als jener der *DSE* Daten.

Tabelle 7.8: Gegenüberstellung der Orientierung der Schwerpunktsflächen und des Trennflächennormalabstands aus den Normalvektoren der Punkte, den Compass Daten und den DSE Daten der Kluffläche 3.

Kluffläche 3	Normalvektoren der Punkte	Compass-Plugin	DSE
Fallrichtung [°]	236,0	251,6	252,5
Fallwinkel [°]	68,3	72,4	69,0
Trennflächennormalabstand [m]	-	0,47	0,18

Aus den *Compass* Daten ergibt sich eine Klüftigkeitsziffer k von 10,1 und ein Blockvolumen V_b von $0,02 \text{ m}^3$. Im Vergleich dazu stehen die berechneten Werte der *DSE* Daten mit einer Klüftigkeitsziffer k von 23,7 und einem Blockvolumen V_b von $0,002 \text{ m}^3$. Somit ist das berechnete Blockvolumen V_b aus den *Compass* Daten um das Zehnfache größer.

8. Interpretation der Ergebnisse

Aus den in Kapitel 6 vorgestellten Ergebnissen geht hervor, dass im Steinbruch von Moosen vier Trennflächenscharen vorliegen. Die Schichtflächen (Ss) der Karbonate der Gutenberg-Formation fallen mit rund 50° nach Süden ein. Für die Schichtdicke ist ein Wert von 0,4 – 0,5 m anzunehmen. Die 0,1 m aus den Untersuchungen mit dem *DSE* stimmen mit den Beobachtungen im Gelände nicht überein.

Die Kluftschar 1 (Kf1) fällt steil nach Osten hin ein. Im westlichen Bereich hat der Trennflächennormalabstand d_n einen Wert um 0,6 m. Im östlichen Bereich kann ein Wert von 0,3 m angegeben werden. Aus den Untersuchungen mit dem *DSE* geht ein Wert von 0,2 m für den gesamten Bereich hervor.

Die Kluftschar 2 (Kf2) fällt steil nach Westen ein. Der geringe Unterschied zur Orientierung der Kluftschar 3 (Kf3) und die kleinere Trennflächengröße machen die Erfassung dieser Trennflächenschar schwierig. Die Ergebnisse des Trennflächennormalabstands d_n aus den *Compass* und den *DSE* Daten stimmen relativ gut überein. Somit wird ein Wert von 0,3 m angegeben. Die Klüfte der Kf2 sind zu jenen der Kf1 konjugiert und enden auch meist an ebendiesen.

Die Kluftschar 3 (Kf3) fällt steil nach Südwesten ein. Aufgrund ihrer parallelen Orientierung zum Aufschluss, sind die Klüfte mit der *Scanline* Methode schwer zu erfassen. Zudem ist das Erscheinungsbild dieser Trennflächenschar von wenigen großen Klüften mit mehreren Metern Länge und einer Vielzahl von kleinen Klüften geprägt. Die Werte für den Trennflächennormalabstand d_n schwanken zwischen 0,18 und 0,73 m.

8.1 Blockvolumen V_b

In Tabelle 8.1 werden die Klüftigkeitsziffer k (Stiny, 1922) und das Blockvolumen V_b (Palmström, 1997) der unterschiedlichen Methoden miteinander verglichen.

Das kleinste Blockvolumen ergibt sich mit dem *DSE* und ist um eine Zehnerpotenz kleiner als die vergleichbare Untersuchung mit *CloudCompare*. Vergleicht man die Ergebnisse der *Scanline* und der *CloudCompare* Methode für den westlichen Bereich, so ist der Wert für das ermittelte Blockvolumen mit den *CloudCompare* Daten nur ein Drittel des Wertes für die *Scanline* Methode. Eine Erklärung für die deutlichen Unterschiede der Klüftigkeitsziffer k und des Blockvolumens V_b kann bei der zur Berechnung des Trennflächennormalabstands d_n verwendeten Datenmenge gefunden werden. Da das größte Volumen durch die *Scanline* Daten mit 30 Messungen ermittelt wurden. Gefolgt von der *CloudCompare* Methode mit einer Datenmenge von 233 für den westlichen und 554 für den gesamten Bereich.

Das kleinste Volumen wurde durch die Untersuchungen des *DSE* anhand von 1873 Messungen ermittelt. Im vorliegenden Fall nimmt somit die Klüftigkeitsziffer k und das Blockvolumen V_b mit der Zunahme der Messungen ab. Im direkten Vergleich zwischen der *Scanline* und der *CloudCompare* Methode ist es die großflächigere Betrachtung, die zur Zunahme der Messungen führt. Während bei der *DSE* Methode kleinere Trennflächen definiert und in die Berechnung des Trennflächennormalabstands d_n miteinbezogen werden.

Tabelle 8.1: Vergleich der Klüftigkeitsziffer k (Stiny, 1922) und des Blockvolumens V_b (Palmström, 1997) nach der Methode und dem untersuchten Bereich.

Methode	Bereich	Klüftigkeitsziffer k [-]	Blockvolumen V_b [m ³]
CloudCompare	westl. Bereich	9,1	0,03
CloudCompare	östl. Bereich	14,2	0,01
Scanline	westl. Bereich	6,9	0,1
DSE	gesamter Bereich	23,7	0,002
CloudCompare	gesamter Bereich	10,1	0,02

8.2 Hangstabilitätsanalyse

Im Zuge einer Hangstabilitätsanalyse konnte ein Versagensmechanismus, der im Untersuchungsgebiet auftritt, ermittelt werden. Für den Reibungswinkel φ wurde ein Wert von 35° angenommen.

In Abbildung 8.1 ist ersichtlich, dass sich das Intersektionslinear der Schichtfläche und der Klufffläche 2 (204/49) innerhalb des Kleinkreises für den Reibungswinkel und außerhalb des Großkreises für die freie Hangfläche (230/60) befindet. Somit werden die kinematischen Anforderungen für ein Keilversagen erfüllt.

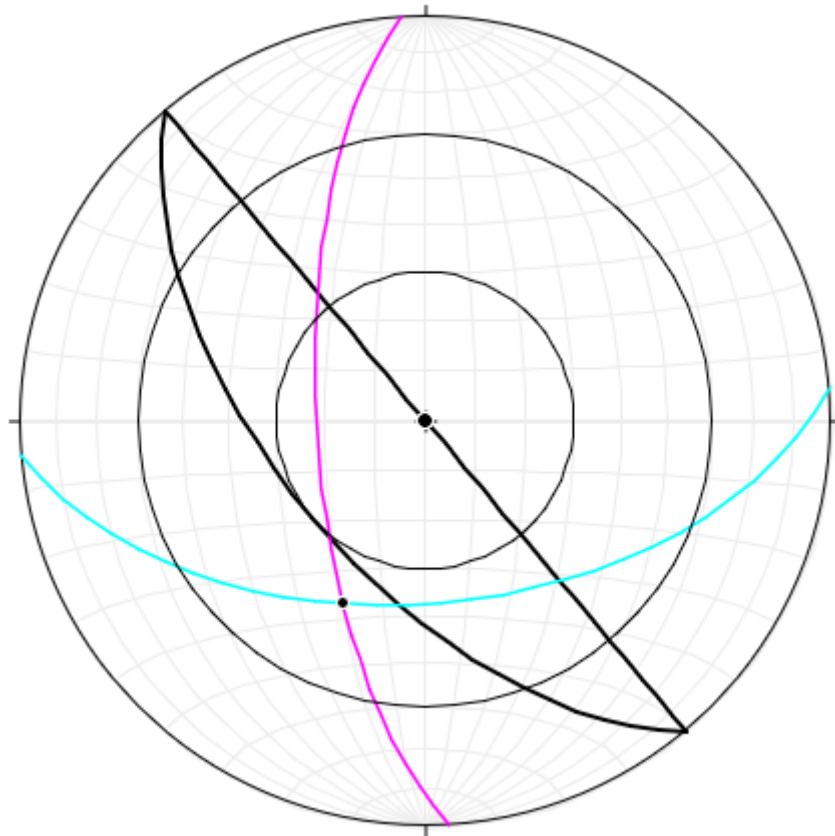


Abbildung 8.1: Die Hangstabilitätsanalyse hinsichtlich eines Keilversagen ist positiv für die Schwerpunktsflächen der Schichtfläche (türkise Linie) und der Kluftschar 2 (violette Linie). Die dicke schwarze Linie gibt die Orientierung des Aufschlusses an. Der innere Kreis stellt einen Reibungswinkel von 35° dar. Das Intersektionslinear der beiden Trennflächenscharen hat eine Orientierung von 204/49.

9. Fazit

Die im Zuge dieser Masterarbeit vorgestellte Methode zur Erstellung dreidimensionaler, georeferenzierter Punktwolken mittels SfM-MVS, wurde vor allem an kleinräumigen Aufschlüssen mit einer Größe von mehreren Metern bis Zehnermetern angewandt. Die Erzeugung von mehreren Teilpunktwolken anstelle einer großen Punktwolke, ist eine Notwendigkeit, um einerseits die Verzerrung der Punkte mit zunehmender Entfernung von den Referenzpunkten so gering wie möglich zu halten. Und um andererseits großräumigere Punktwolken erstellen zu können. Zudem kann gesagt werden, dass mit zunehmender Höhe und Ausdehnung der Aufschlüsse, die Verwendung von Kameradrohnen in Betracht gezogen werden sollte. Da von der Kamera abgewandte Flächen und Formen nicht erfasst werden. Aufgrund der vielen unterschiedlichen Arbeitsschritte ist es schwierig, genaue Aussagen über die Genauigkeit der Punktwolke zu treffen. Jedoch kann gesagt werden, dass in den generierten Punktwolken, die Genauigkeit der Referenzpunkte und ihrer näheren Umgebung im Zentimeterbereich lag. Für einen direkten Vergleich mit anderen etablierten Methoden bietet sich das *Terrestrial Laser Scanning* an. Hierfür können die Abstände zwischen den beiden Punktwolken im *CloudCompare* berechnet werden.

9.1 Vergleich mit kommerziellen Methoden und Softwares

Ein wesentlicher Vorteil der vorgestellten Methodik gegenüber kommerzieller Software ist der geringe Kostenaufwand. Die verwendete Software ist im Internet frei herunterladbar und somit kostenlos. Das verwendete Kameramodel kann im Internet für ca. 100 – 200 € gebraucht erstanden werden. Für sonstige Teile wie Referenzpunkte wurden wenige Euro ausgegeben. Die Vermessung der Referenzpunkte kann mit jedem, dem Stand der Technik entsprechenden, mittelklassigen Smartphone durchgeführt werden. Im Vergleich dazu stehen kommerzielle Produkte wie *Agisoft Metashape* (Agisoft LLC, 2019). Diese Software dient zur Erstellung von dreidimensionalen, georeferenzierten Punktwolken und kostet umgerechnet 157,16 € (Standard Edition) bzw. 3072,12 € (Professional Edition) (Stand: 28.06.19). Oder auch die Software *ShapeMetriX 3D*, welche zur Erstellung von Punktwolken und zur Erfassung des Trennflächengefüges verwendet wird. Hierfür sind Kosten von mehreren tausend Euro zu veranschlagen.

Zu Vergleichszwecken wurde auch eine Punktwolke des westlichen Bereichs mit *Agisoft Metashape* erstellt. Im direkten Vergleich mit der Punktwolke, die mit der vorgestellten

Methode generiert wurden, können kaum Unterschiede hinsichtlich der Lage der Punkte ausgemacht werden. Jedoch kann die Anzahl der Punkte enorm variieren. Bereiche, wo nur wenige oder gar keine Punkte vorliegen, kommen in den Punktwolken, die mit *VisualSFM* erstellt werden, deutlich öfter vor.

9.2 Bildanzahl – Qualität der Punktwolke

Hinsichtlich der Bildanzahl und der späteren Qualität der Punktwolke ist anzumerken, dass keine pauschalen Empfehlungen für unterschiedlichste Anwendungen gemacht werden können. Zum einen, weil die äußeren Einflüsse wie Lichtverhältnisse und Schattenbildung bei der Datenaufnahme stark variieren können. Und zum anderen, weil die notwendige Bildanzahl auch stark von der Individualität der Aufschlüsse und Objekte abhängt, die erfasst werden sollen.

Im vorliegenden Fall zeigte sich jedoch, dass eine Bildanzahl von 100 Bildern ausreichend für die zur Anwendung kommenden Methoden ist. Mit dieser Bildanzahl konnte die Qualität der Punktwolke, gegenüber einer mit 50 Bildern, deutlich gesteigert werden. Und eine enorme Zunahme der Verarbeitungszeit, zu der es bei einer Bildanzahl von 200 kommen könnte, wurde vermieden.

9.3 Trennflächenerfassung im CloudCompare

Im Laufe der Erfassung des Trennflächengefüges mit *CloudCompare* und dem darin enthaltenen *Compass* Plugin zeigte sich, dass vor allem die intuitive Art der Trennflächenaufnahme und die gute Kontrolle über die gesammelten Daten für diese Methode sprechen. Die Steigerung der Anzahl an Messungen gegenüber herkömmlichen Methoden wie *Scanline Mapping* und die Möglichkeit Trennflächen in allen Raumlagen zu betrachten, machen diese Methode zu einem guten Werkzeug, um dreidimensionale Trennflächengefüge zu erfassen.

Jedoch muss gesagt werden, dass hauptsächlich die Orientierung von Trennflächen und Trennflächenscharen und der Trennflächennormalabstand d_n vernünftig in den Punktwolken erfasst werden können. Werte zur Trennflächengröße, Termination und Rauigkeit lassen sich hingegen deutlich schwieriger ermitteln.

9.4 Trennflächenerfassung mit dem DSE

Die Erfassung der Trennflächenscharen mit dem Computerprogramm *DSE* funktionierte im vorliegenden Fall relativ gut. Es zeigte sich aber, dass die automatische Zuweisung von Trennflächenscharen, die einen geringen Anteil an der Punktwolke einnehmen, versagen kann. Dieses Problem ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass Trennflächenscharen mit einem großen Anteil an der Punktwolke, den Anteil der weniger präsenten Trennflächenschar überdecken. Damit das Trennflächengefüge richtig erfasst wird, sollte bereits im Gelände bei der Datenaufnahme darauf geachtet werden, welche und wie viele Trennflächenscharen man später untersuchen möchte.

Weitere nützliche Werkzeuge des *DSE* sind die *Spacing* (Trennflächennormalabstand) und *Persistence Tools* (Spurlänge). Für beide Funktionen liefert das Programm eine Auswahl an Werten für die jeweilige Trennflächenschar.

10. Ausblick

Die Ingenieurgeologie und die Geotechnik sind über viele Jahrzehnte hinweg von händischen Messungen und oftmals auch von subjektiven Einschätzungen der Situation geprägt gewesen. Vor allem im unzugänglichen Gelände oder auch im Tunnelbau, musste auf direkte Messmethoden verzichtet werden, wodurch ein Mangel an verlässlichen Daten und Messungen entsteht.

Mit einigen Fernerkundungsmethoden, speziell mit der Methode SfM-MVS, hat sich in den letzten Jahren eine vielversprechende Technologie entwickelt, die dieses Defizit an Messungen ausgleichen kann. Zumal mit der vorgestellten Methode kostengünstig und mit geringem Aufwand dreidimensionale, georeferenzierte Modelle generiert werden können. Und dadurch die dreidimensionale Erfassung des Trennflächengefüges möglich ist.

Mit der zunehmenden Größe der Projekte steigen auch die Anforderungen an die Technik. Insbesondere wenn Punktwolken über eine größere Höhe erstellt werden, ist der Einsatz von Kameradrohnen unerlässlich. Auch kann der Einsatz von differentielltem GPS zur Vermessung der Referenzpunkte eine Erleichterung bringen, da über weite Strecken die Punkte mit einer hohen Genauigkeit eingemessen werden.

Es ist zu erwarten, dass sich diese Methode in den nächsten Jahren aufgrund des stetigen technischen Fortschritts weiterentwickelt. Durch die Zunahme der Genauigkeit und der Anzahl an Messungen, wird man immer mehr mit enormen Datenmengen konfrontiert werden. Diese gilt es mit den Methoden der Datenverarbeitung und der Statistik auszuwerten.

Literatur

- Agisoft LLC, 2019. *Agisoft*. [Online]
Available at: <https://www.agisoft.com/>
- Allmendinger, R., Cardozo, N. & Fisher, D., 2012. *Structural geology algorithms: Vectors and tensors in structural geology*. s.l.:Cambridge University Press.
- Barton, A. & Choubey, V., 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, Issue 12, pp. 1-54.
- Boulch, A. & Marlet, R., 2016. *Deep Learning for Robust Normal Estimation in Unstructured Point Clouds*. s.l., Computer Graphics Forum.
- Bundesamt für Eich-und Vermessungswesen, 2014. *Österreichische Karte (1:50.000)*. Wien: s.n.
- Cardozo, N. & Allmendinger, R., 2013. Spherical projections with OSXStereonet. *Computers & Geosciences*, Issue 51, pp. 193-205.
- Carrivick, J. L., Smith, M. W. & Quincey, D. J., 2016. *Structure from Motion in the Geosciences*. Chichester: John Wiley & Sons.
- CloudCompare (Version 2.10.2), [s.], 2019. <http://www.cloudcompare.org/>. [Online].
- Dachroth, W., 2017. *Handbuch der Baugeologie und Geotechnik*. 4. ed. Berlin: Springer Spektrum.
- Furukawa, Y., Curless, B., Seitz, S. M. & Szeliski, R., 2010. *CVPR: Towards Internet-scale Multi-view Stereo*. s.l.:s.n.
- Furukawa, Y. & Ponce, J., 2010. Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(8), pp. 1362-1376.
- García-Luna, R., Senent, S., Jurado-Piña, R. & Jimenez, R., 2019. Structure from Motion photogrammetry to characterize underground rock masses: Experiences from two real tunnels. *Tunneling and Underground Space Technology*, pp. 262-273.
- Geologische Bundesanstalt, 2008. *Geofast 1:50.000 - Blatt 91 St. Johann in Tirol*, Wien: s.n.
- Hudson, J., 1989. *Rock Mechanics Principles in Engineering Practice*. London: Butterworths.
- International Society for Rock Mechanics, 1978. International Society for Rock Mechanics Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests: Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Issue 15, pp. 319-368.
- James, M. R. & Robson, S., 2012. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and

topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research*, Issue 117.

Land Tirol, 2019. *tirisMaps*. [Online] Available at:

https://maps.tirol.gv.at/tirisMaps/login_pvp.jsp?user=guest&project=tmap_master

Liu, Q., Kieffer, D. S. & Bitenc, M., 2019. *Three-Dimensional UAV-Based Photogrammetric Structural Models for Rock Slope Engineering: Slope Stability: Case Histories, Landslide Mapping, Emerging Technologies*. Cham, Springer Nature Switzerland, pp. 283-287.

Lowe, D. G., 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*, p. 91–110.

Morgen, J. A. & Brogan, D. J., 2016. *How to VisualSFM*. Colorado State University(Fort Collins, Colorado): Department of Civil & Environmental Engineering.

Palmström, A., 1997. Collection and use of geological data in rock engineering. *ISRM News Journal*, pp. 21-25.

Priest, S., 1985. *Hemispherical Projection Methods in Rock Mechanics*. London: Allen & Unwin.

Riquelme, A., Abellán, A. & Tomás, R., 2015. Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds. *Engineering Geology*, Issue 195, pp. 185-195.

Riquelme, A., Abellán, A., Tomás, R. & Jaboyedoff, M., 2014. A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. *Computers & Geosciences*, Issue 68, pp. 38-52.

Riquelme, A. et al., 2018. Automatic Mapping of Discontinuity Persistence on Rock Masses Using 3D Point Clouds. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Issue 51, pp. 3005-3028.

Stiny, J., 1922. *Technische Geologie*. Stuttgart: Enke.

Szeliski, R., 2011. *Computer Vision: Algorithms and Applications*. London: Springer.

Thiele, S. et al., 2017. Rapid, semi-automatic fracture and contact mapping for point clouds, images and geophysical data. *Solid Earth*, Issue 8, pp. 1241-1253.

Wallbrecher, E., 1986. *Tektonische und gefügeanalytische Arbeitsweisen*. Stuttgart: Enke.

Wolf, P. R., Dewitt, B. A. & Wilkinson, B. E., 2014. *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*. New York: McGraw-Hill Education.

Wu, C., 2007. *SiftGPU: A GPU implementation of Scale Invariant Feature Transform (SIFT)*. [Online]

Available at: <http://cs.unc.edu/~ccwu/siftgpu>

Wu, C., 2013. *Towards Linear-time Incremental Structure From*. Seattle, IEEE Computer Society, pp. 127-134.

Wu, C., Agarwal, S., Curless, B. & Seitz, S. M., 2011. *Multicore Bundle Adjustment*. s.l., s.n., pp. 3057-3064.

Anhang A

```

#Schwerpunktsflächenberechner
#Entwickler: Danzl Philipp, BSc

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

data = np.genfromtxt('fname.txt', skip_header=1)

count = np.shape(data)
dip_dir = data[:, 4]
dip = data[:, 3]
#####
alpha = dip_dir - 180
theta = 90 - dip
#####
a = np.pi/180
b = 180/np.pi
#####
x = np.cos(alpha * a) * np.cos(theta * a)
y = np.sin(alpha * a) * np.cos(theta * a)
z = np.sin(theta * a)
#####
sum_x = np.sum(x)
sum_y = np.sum(y)
sum_z = np.sum(z)
#####
R = np.sqrt((sum_x)**2 + (sum_y)**2 + (sum_z)**2)
#####
xR = sum_x/R
yR = sum_y/R
zR = sum_z/R
#####
AlphaR = np.arctan(yR/xR) * b
ThetaR = np.arcsin(zR) * b

Fallrichtung = AlphaR - 180
Fallwinkel = 90 - ThetaR

D = ((2 * R - count[0]) / count[0]) * 100
k = (count[0] - 1) / (count[0] - R)
#####

def print_val(x):
    print(f'\t Fallrichtung: {Fallrichtung}°')
    print(f'\t Fallwinkel: {Fallwinkel}°')
    print(f'\t R%: {D}%')
    print(f'\t k: {k}')

print(print_val(x))

def val(x):
    file = open('fname.txt', "a")
    file.write(f'\t Fallrichtung: {Fallrichtung}°\n'\
              f'\t Fallwinkel: {Fallwinkel}°\n'\
              f'\t R%: {D}%\n'\
              f'\t k: {k}\n')
    file.close()

val(x)

```