

Katrin Schloffer, BSc

# **Trennflächenmodellierung, ein methodischer Vergleich**

## **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

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

### ***AFFIDAVIT***

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.

*I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.*

---

Datum / Date

---

Unterschrift / Signature

# Danksagung

Hiermit möchte mich im besonderen Maße bei Herrn Professor Dr. Qian Liu bedanken, der immer mit wichtigen Ratschlägen und konstruktiver Kritik sehr bei der Umsetzung dieser Masterarbeit geholfen hat.

# Kurzfassung

Für die verschiedensten Bauprojekte werden die typischen Trennflächenparameter und die Parameter des intakten Gesteins charakterisiert, um das gesamte Gebirge charakterisieren zu können. Dies wird durchgeführt, um eine möglichst genaue Vorhersage des Verhaltens beim Bau zu ermöglichen. Diese spezifischen Parameter können allerdings auf verschiedenste Art und Weise aufgenommen werden. Deshalb wurde im Rahmen dieser Arbeit untersucht, wie sich die unterschiedlichen Erfassungsmethoden im Detail bei der Aufnahme von Trennflächenparametern unterscheiden, und ob es bei diesen verschiedenen Erfassungsmethoden Unterschiede in den Ergebnissen gibt.

Die Untersuchungen basieren auf den Daten von einem einzigen Aufschluss. Dieser befindet sich an der Ortszufahrt zu Niederwölz in der Nähe von Murau, und das Gestein ist ein Amphibolit. Die verwendeten Erfassungsmethoden waren die Scanline-Methode und Fernerkundungsmethoden, von denen die Datenerfassung mit Photogrammetrie und LiDAR verwendet wurden.

Für diese Arbeit wurden alle Rohdaten von den verschiedenen Erfassungsmethoden ausgewertet und im Anschluss die Daten untereinander verglichen. Bei den drei verschiedenen Methoden wurden sowohl Unterschiede bei der direkten Aufnahme im Gelände als auch bei der Auswertung erkannt. So müssen die Orientierungswerte, welche von der Scanline-Methode stammen, weit aufwendiger berechnet werden, als die Orientierungswerte, welche von der Erfassung mittels LiDAR stammen, welche nicht erst ausgewertet und berechnet, sondern lediglich abgeschrieben werden mussten. Auch bei den anderen Trennflächenparametern wie etwa Abstand, Häufigkeit/ Intensität, Spurlänge, Größe, Termination und Rauigkeit, gibt es Unterschiede bei der Aufnahme wie auch bei der Auswertung unter der verschiedenen Erfassungsmethoden. Mit manchen Erfassungsmethoden, wie zum Beispiel der Scanline-Methode im Bohrloch, ist es unmöglich, Spurlänge, Termination und Größe der Trennflächen festzustellen.

Zusammenfassend lassen sich teilweise große Unterschiede zwischen den verschiedenen Erfassungsmethoden sowohl im Bereich der Aufnahme als auch bei der Auswertung erkennen. Man kann keine Unterschiede in der Genauigkeit der ermittelten Parameter mit den verschiedenen Methoden feststellen.

# Abstract

For construction projects in engineering geology it is necessary to characterize the intact rock and the discontinuities with their typical parameters, in order to characterize the whole rock mass. This is necessary to make a good forecast for the behaviour of the rock mass under construction. The typical parameters can be determined by different methods. In this study the differences between the methods of determining the typical parameters and the differences in the results of these methods should be proved.

For this research a single outcrop was investigated. This outcrop is located at the way into the small village of Niederwölz, near the town of Murau in Styria. The rock is an Amphibolite. The different methods of determining the parameters are the Scanline-method, and the Window-method. At the Window-method the photogrammetry and LiDAR are used.

The raw data by the different methods were evaluated and the results were compared. The three different methods of determining the typical parameters also show differences at the recording of the data on the spot and at the analysis of the data. For example the data of reference by the Scanline-method have to be calculated, the data of reference by the LiDAR can be used directly from the program. Also at the other parameters like distance, frequency, length, termination and roughness, there are differences between the different methods of recording and analyzing the data. By the Scanline-method in a borehole for instance it is impossible to record the length, the termination and the size of the discontinuity.

In summary it is possible to see great differences between the different methods of recording the parameters on the outcrop and the analysis of the data. Differences of the results by the different methods are not noticeable.



# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	2
1. Abbildungsverzeichnis .....	4
2. Formelverzeichnis .....	9
3. Einleitung .....	11
4. Trennflächen im Felsbau .....	12
4.1 Beispiele aus dem Felsbau .....	26
4.1.1 Bogenmauer Francisco Morazân .....	26
4.1.2 Bogenmauer Sta. Maria .....	27
4.1.3 Inntaltunnel .....	28
4.1.4 Semmering-Basis Tunnel .....	30
4.1.5 Erkundungsschurf für Gewichtsstaumauer .....	31
4.1.6 Galgenbergtunnel .....	32
4.1.7 Vajont .....	33
4.1.8 Malpasset .....	36
5. Trennflächenmodellierung .....	38
5.1 Charakteristische Trennflächenparameter im Felsbau .....	38
5.2 Strukturgeologische Signifikanz .....	50
5.3 Erfassungsmöglichkeiten .....	53
5.3.1 Scanline-Methode .....	53
5.3.1.1 Am Aufschluss .....	53
5.3.1.2 Im Bohrloch .....	55
5.3.2 Window-Sampling Methode .....	56
5.3.2.1. Am Aufschluss .....	57
5.3.2.2 Photogrammetrie .....	57
5.3.2.3 LiDAR .....	58
5.4 Verfahren für Datenauswertung .....	60
5.4.1 Das Fisher Modell für Orientierungsdatensätze .....	60
5.4.2 Scanline-Methode .....	62
5.4.2.1 Am Aufschluss .....	62
5.4.2.2 In der Bohrung .....	66
5.4.3 Window-Sampling Methode .....	70
5.4.3.1 Am Aufschluss .....	70

5.4.3.2 Photogrammetrie.....	73
5.4.3.3 LiDAR .....	75
6. Praktische Beispiele .....	79
6.1 Der Aufschluss.....	79
6.2 Scanline .....	82
6.3 Photogrammetrie .....	86
6.4 LiDAR .....	89
7. Methodenvergleich .....	92
8. Zusammenfassung .....	96
9. Literaturverzeichnis .....	97
10. Anhang.....	100
A. Daten aus der Scanline Analyse .....	100
Spurlängen von den Scanline- Daten .....	107
Abstände von den Scanline-Daten .....	120
B. Daten von der Photogrammetrie .....	131
Spurlängen von Photogrammetrie- Daten.....	145
C. Daten aus der LiDAR Analyse .....	150
Bereich M.....	151
Bereich W.....	155
Statistische Werte der Orientierungsdaten.....	159

# 1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Schematische Darstellung der Normal- und Scherkraft an einer beliebigen Fläche (Hudson& Harrison, 1997) .....	13
Abbildung 2 Schematische Darstellung der neun Spannungskomponenten an einem Würfel (Hudson & Harrison, 1997).....	14
Abbildung 3 Darstellung von lateraler und axialer Deformation, (Hudson& Harrison, 1997)..	15
Abbildung 4 Spannung- Deformationskurve (Hudson& Harrison, 1997) .....	16
Abbildung 5 Elastizitätsmodulus auf einer Spannungs-Deformationskurve (Hudson& Harrison, 1997).....	17
Abbildung 6 Mohr-Coloumb Fehlerkriterium mit Spannungskreis (Hudson& Harrison, 1997)	18
Abbildung 7 Experimentell ermittelte Kurve des Hoek-Brown Fehlerkriteriums (Hudson& Harrison, 1997).....	19
Abbildung 8 Bestimmung des GSI (Liu, 2014a) .....	20
Abbildung 9 Darstellung der verschiedenen Parameter von Trennflächen in einer schematischen Abbildung (Hudson& Harrison, 1997).....	21
Abbildung 10 Darstellung von Druck-, Zug- und Scherspannung auf einer Trennfläche (Hudson& Harrison, 1997).....	23
Abbildung 11 Plan der Bogenmauer mit der gesamten Anlage Francisco Morazán (Kreuzer,1997) .....	27
Abbildung 12 Druckverhältnisse unter der Staumauer bei den unterschiedlichen Staukoten (Otto& Moor, 1997).....	28
Abbildung 13 Teilabschnitt mit eingezeichneten Trennflächen, (Leimser& Köhler, 1994) .....	29
Abbildung 14 Ausschnitt der geologischen Kartierung, Graßberg-Schlagl Störungssystem (Reidl u.a. 2011).....	30
Abbildung 15 Störungssystem im Bereich des Portals Mürzzuschlag des Semmering-Basis Tunnel in der Version von 1989-1999 (Pölsler, 2000).....	31
Abbildung 16 Der Großschurf von der gegenüberliegenden Talseite (Meister u.a. 1997) .....	32
Abbildung 17 Darstellung der markanten Störungen (Meister u.a. 1997).....	32
Abbildung 18 Geologischer Längenschnitt durch den Galgenbergtunnel (Bergmair u.a.1996) .....	33

Abbildung 19 Das Flusstal mit Colle Isolato (gestrichelte Linie) (Semenza& Ghirotti, 2000)	.34
Abbildung 20 Südseite des Flusstales mit Bereich der Rutschung (gestrichelte Linie) (Genevois& Ghirotti, 2005)	.....35
Abbildung 21 Südseite der Flusseite, nach der Rutschung (2014)	.....35
Abbildung 22 Staumauer von Malpasset nach der Fertigstellung (Londe, 1987)	.....36
Abbildung 23 Darstellung des Keiles (Liu, 2014a)	.....37
Abbildung 24 Staumauer von Malpasset nach dem Versagen (2014)	.....37
Abbildung 25 Zuordnung von maßgebenden Parametern im Tunnelbau zu Gesteinsarten (ÖGG, 2001)	.....38
Abbildung 26 Die drei verschiedenen Arten von Persistenz	.....39
Abbildung 27 Darstellung der Zusammenhänge von den Dimensionen von $P_{ba}$ (Liu, 2014b)	41
Abbildung 28 zweidimensionale Verteilung bei einen $k_1$ -Wert von 50 und $k_2$ -Wert von 25 (300 Trennflächen und Orientierungswerten von $45^\circ/45^\circ$ )(Liu, 2014b)	.....43
Abbildung 29 eindimensionale Verteilung bei einen $k$ -Wert von 50 (300 Trennflächen und Orientierungswerten von $45^\circ/45^\circ$ )(Liu, 2014b)	.....43
Abbildung 30 zweidimensionale Verteilung bei einen $k_1$ -Wert von 25 und $k_2$ -Wert von 50 (300 Trennflächen und Orientierungswerten von $45^\circ/45^\circ$ )(Liu, 2014b)	.....43
Abbildung 31 eindimensionale Normalverteilung bei 300 Trennflächen und unterschiedlichen $k_1$ und $k_2$ Werten und unterschiedliche $k_{12}$ Werte (Liu, 2014b)	.....44
Abbildung 32 zweidimensionale Bingham Verteilung, wobei $k_1$ einen Wert von 100 und $k_2$ einen Wert von 25 haben (300 Trennflächen und Orientierungswerten von $45^\circ/45^\circ$ )(Liu, 2014b)	.....45
Abbildung 33 zweidimensionale Bingham Verteilung, wobei $k_1$ und $k_2$ den gleichen Wert haben (300 Trennflächen und Orientierungswerten von $45^\circ/45^\circ$ )(Liu, 2014b)	.....45
Abbildung 34 zweidimensionale Bingham Verteilung, wobei $k_1$ einen Wert von 25 und $k_2$ einen Wert von 100 haben (300 Trennflächen und Orientierungswerten von $45^\circ/45^\circ$ )(Liu, 2014b)	.....45
Abbildung 35 Darstellung des Äquivalentradius (Liu, 2014b)	.....47
Abbildung 36 Schematische Darstellung von den drei verschiedenen Termination Varianten	.....48
Abbildung 37 Definition von Trennflächenöffnung, ISRM (Liu, 2014b)	.....49

Abbildung 38 Abschiebung mit den typischen Erscheinungsformen (Liu, 2014a) .....	50
Abbildung 39 Überschiebung mit typischen Erscheinungsformen (Liu, 2014a).....	51
Abbildung 40 Seitlicher Versatz mit typischen Erscheinungsformen (Liu, 2014a) .....	51
Abbildung 41 Scanline über den Aufschluss.....	53
Abbildung 42 Aufnahmeprotokoll für die Scanline- Methode am Aufschluss (Liu, 2014a).....	54
Abbildung 43 Schematische Darstellung der typischen Parameter bei einer Scanline- Methode am Aufschluss .....	55
Abbildung 44 Beispielbild von einen Borehole Digital Optical Televiever mit einer schneidenden Trennfläche (Li u.a. 2013) .....	56
Abbildung 45 Anordnung für eine Aufnahme für die Photogrammetrie (Liu, 2013).....	57
Abbildung 46 Aufnahme von Daten mittels Scanner und RTK-GPS (Liu, 2014b).....	58
Abbildung 47 LiDAR Model eines Aufschlusses, a) reflektiertes Histogramm b) Punktwolke mit realen Farben c) netzartiges kontinuierliches Model d) strukturiertes kontinuierliches Model (Liu& Kieffer, 2011).....	59
Abbildung 48 Automatisch berechnete spezifischen Parameter der Orientierungsdaten, Sphaira.....	60
Abbildung 49 Darstellung des sphärischen Öffnungsgrades (Liu, 2014a).....	61
Abbildung 50 Darstellung des Vertrauenskegels für einige Trennflächen (Liu, 2014a).....	62
Abbildung 51 Schematische Darstellung einer Scanline-Datenaufnahme.....	64
Abbildung 52 Spurlänge bei einer Aufnahme durch eine Scanline a) idealisierte Darstellung b) wahre Darstellung (Priest, 1993) .....	65
Abbildung 53 Darstellung einer Trennfläche im Bohrloch und die "entrollte" Trennfläche zur Bestimmung der Orientierung (Li u.a. 2013).....	67
Abbildung 54 Abnahme der Rauigkeit in einen Bohrloch (Bae u.a. 2011).....	69
Abbildung 55 Entrollte Trennfläche und das Rauigkeitsprofil (Bae u.a. 2011).....	70
Abbildung 56 Darstellung der verschiedenen Trennflächen für die Berechnung der Spurlänge mittels der Methode von Zhang und Einstein (1998) (Liu, 2014a).....	71
Abbildung 57 Darstellung der verschiedenen Trennflächen für die Berechnung der Spurlänge eines rechteckigen Bereiches mittels der Methode von Maldon (1998) .....	72
Abbildung 58 Darstellung der verschiedenen Trennflächen für die Berechnung der Spurlänge für einen unregelmäßigen Bereich mittels der Methode von Maldon (1998) .....	73

Abbildung 59 Georeferenzierung der Referenzpunkte (3G Software & Measurement GmbH (2006)) .....	74
Abbildung 60 3D Bild eines Teiles des Aufschlusses.....	74
Abbildung 61 Schematische Darstellung der Analyse der Daten mit der Software (3G Software & Measurement GmbH (2006)).....	75
Abbildung 62 Modell eines Aufschlusses mit den erzeugten Flächen für die Orientierung (Liu& Kieffer, 2011) .....	76
Abbildung 63 Screenshot von Bereich M und Bestimmung der Orientierung .....	76
Abbildung 64 Screenshot von der Messung der Abstände im Bereich W .....	77
Abbildung 65 Screenshot von Bereich M mit Bestimmung der Größe.....	77
Abbildung 66 Screenshot von der Messung der Spurlänge im Bereich W .....	78
Abbildung 67 Punktwolke mit angepasste Trennflächen, trianguliertes Modell .....	78
Abbildung 68 Lage des Aufschlusses in der Steiermark, erstellt mittels Google Maps.....	79
Abbildung 70 Ansicht des Aufschlusses, (October 2014, courtesy of Volker Reinprecht) .....	80
Abbildung 69 Lage des Aufschlusses zur Ortschaft Niederwölz, erstellt mittels Google Maps .....	80
Abbildung 71 Schematische Darstellung der 4 Haupttrennflächen des Aufschlusses .....	81
Abbildung 72 Datensatz 5, relativ genauer Datensatz .....	82
Abbildung 73 Datensatz 10, relativ ungenauer Datensatz .....	83
Abbildung 74 Histogramm der Abstände der Schieferungsflächen, Datensatz 7.....	84
Abbildung 75 Histogramm der Abstände der Kluffflächen, Datensatz 6 .....	84
Abbildung 76 Spurlänge des Datensatzes 10, Kluffflächen.....	85
Abbildung 77 Spurlänge des Datensatzes 15, Schieferungsfläche .....	85
Abbildung 78 Geplottete Daten von Datensatz 14 aus der ShapeMetrix Auswertung .....	87
Abbildung 79 Spurlänge des Datensatzes 12, Schieferungsfläche .....	88
Abbildung 80 Spurlänge des Datensatzes 13, Klufffläche 1.....	88
Abbildung 81 Abstand der Klufffläche 1, Bereich W.....	89
Abbildung 82 Abstand der Klufffläche 2 Bereich M.....	89
Abbildung 83 Spurlänge der Klufffläche 4, Bereich W.....	90

Abbildung 84 Spurlänge der Kluffläche 1, Bereich M.....	90
Abbildung 85 Trennflächengröße Schieferungsfläche, Bereich W .....	90
Abbildung 86 Trennflächengröße der Kluffläche 3, Bereich M .....	91
Abbildung 87 Trennflächengröße der Kluffläche 3, Bereich W.....	91
Abbildung 88 Mögliche Erfassungsmethoden und ihre Eignung zur Bestimmung der Parameter .....	95

## 2. Formelverzeichnis

Formel 1 Formelle Darstellung zur Berechnung der Normalspannung und der Scherspannung, als Eigenschaft an einem beliebigen Punkt im Körper .....	13
Formel 2 Darstellung des Spannungstensors als Matrix.....	13
Formel 3 Darstellung der Hauptspannungen als Matrix .....	14
Formel 4 Darstellung des Deformationstensor als Matrix.....	15
Formel 5 Berechnung des Elastizitätsmoduls und der Poissonzahl .....	15
Formel 6 Hoek-Brown-Kriterium zur Ermittlung von möglichem Versagen von Gestein .....	19
Formel 7 Berechnungen für das Hoek-Brown Fehlerkriterium mittels des GSI .....	20
Formel 8 Berechnung der Häufigkeit der Trennflächen unter der Annahme einer gespannten Länge über den Aufschluss .....	21
Formel 9 Berechnung des Abstandes der Trennflächen unter der Annahme einer gespannten Länge über den Aufschluss .....	22
Formel 10 Berechnung des Q-Wertes mittels sechs Parameter .....	24
Formel 11 Berechnung von $P_{32}$ mittels der eindimensionalen Trennflächenhäufigkeit .....	41
Formel 12 Berechnung der wahren Häufigkeit mittels $P_{10}$ .....	42
Formel 13 Berechnung für den Äquivalentradius .....	46
Formel 14 Berechnung der Termination in Prozenten.....	48
Formel 15 Berechnung der Termination für die Window-Methode .....	48
Formel 16 Berechnung des prozentuale Regelungsgrad .....	61
Formel 17 Berechnung des Konzentrationsparameters .....	61
Formel 18 Berechnung desr sphärischen Öffnungsgrades .....	61
Formel 19 Berechnung des Vertrauenskegel.....	62
Formel 20 Berechnung der Koordinaten der Trennfläche, Scanline-Methode am Aufschluss .....	63
Formel 21 Berechnung des Vektorbetrags von R .....	63
Formel 22 Berechnung der Koordinaten der Trennfläche verrechnet mit R .....	63
Formel 23 Berechnung von $A_R$ und $\Phi$ .....	63

Formel 24 Berechnung von $\alpha_n$ und $\beta_n$ .....	64
Formel 25 Berechnung von $\delta$ .....	64
Formel 26 Berechnung des Abstandes an der Scanline .....	64
Formel 27 Berechnung des Abstandes an die Normale auf die Fläche.....	65
Formel 28 Berechnung der Häufigkeit .....	65
Formel 29 Allgemeine Formel zur Bestimmung der theoretischen Spurlängenverteilung.....	66
Formel 30 Berechnung der mittleren Spurlänge bei einer triangulären Verteilung .....	66
Formel 31 Berechnung der mittleren Spurlänge bei einer uniformen Verteilung .....	66
Formel 32 Berechnung der mittleren Spurlänge bei einer negativen Exponentialverteilung ..	66
Formel 33 Vektoren zur Bestimmung der Orientierung einer Trennfläche im Bohrloch.....	67
Formel 34 Berechnung Normalvektor der Trennfläche .....	67
Formel 35 Einheitsvektor der Trennfläche .....	68
Formel 36 Darstellung des Gegenvektor mittels des Einheitsvektors.....	68
Formel 37 Berechnung des Einfallswinkels .....	68
Formel 38 Formel zur Berechnung des Einfallswinkels.....	68
Formel 39 Berechnung der Häufigkeit mittel Umformungsfaktor nach Wang .....	69
Formel 40 Berechnung der Umformungsfaktoren nach Wang .....	69
Formel 41 Gesamtanzahl der Trennflächen im Bereich .....	71
Formel 42 Berechnung der Spurlänge bei Window- Sampling nach Zhang und Einstein (1998).....	71
Formel 43 Formel zur Berechnung der mittleren Spurlänge nach Maldon (1998).....	72
Formel 44 Berechnung der mittleren Spurlänge für einen unregelmäßigen Bereich .....	72

### **3. Einleitung**

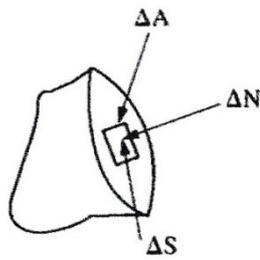
Die charakterisierenden Parameter von Trennflächen sind sehr komplex und sind nicht leicht zu ermitteln, außerdem können sie sich mit der Tiefe in beliebiger Richtung verändern. Doch genau diese Änderungen mit der Tiefe sind es, die entscheidend für die verschiedenen Bauprojekte sein können. Um genau diese Änderungen vorauszusagen und somit auch Unsicherheiten möglichst gering zu halten, werden die geotechnischen Eigenschaften von Trennflächen charakterisiert. In dieser Arbeit soll anhand typischer Trennflächenparameter auf die Unterschiede eingegangen werden, die durch die Erfassung der Rohdaten aus dem Gebirgskörper bei der Modellierung von Eigenschaften auftreten.

## 4. Trennflächen im Felsbau

Gesteine unterscheiden sich in vielen Dingen von anderen Werkstoffen, wie z. B. Beton oder Stahl. Dies geht ganz klar darauf zurück, dass Gestein ein natürlicher und kein künstlicher Werkstoff ist. Auch reicht es nicht aus rein ein Gestein zu betrachten, man muss sich den ganzen komplexen Gesteinsverband, etwa das Gebirge, ansehen. Da das Verhalten des gesamten Gesteinsverbandes Einfluss auf die ingenieurgeologischen Projekte haben kann. Ein wichtiger Punkt bei der Beschreibung von Gesteinen, aber auch ihrer Trennflächen, ist zu wissen, ob und wenn ja, welche tektonischen Prozesse das Gestein bereits erlebt hat. So kann es durch eine frühere Scherbewegung im Gestein zu einem sehr niedrigen Widerstand der Trennflächen gegen eine Scherung kommen und somit zu einer Beeinflussung der Gesamteigenschaften des Gesteins bzw. des Gebirges. Ein weiterer allgemein wichtiger Einflussfaktor ist das tektonische Setting, so kann es etwa in einem tektonisch aktiveren Bereich der Erde zu einer massiven Beeinflussung des Gesteinsverbandes kommen. Ein anderer allgemeiner Faktor ist etwa das Wasser, sowohl das Porenwasser, als auch der Durchfluss von Wasser. Denn beides kann einen Einfluss auf das Spannungsverhältnis im Gestein und somit auch auf die gesamte Stabilität haben.

Ein sehr wichtiger Faktor bei ingenieurgeologischen Projekten, etwa wie Tunnelprojekte, sind die verschiedenen Spannungen und deren Zusammenspiel, die Spannungsverhältnisse. Der Grund, warum das Spannungsverhältnis so wichtig ist, ist das es durch eine Ausgrabung zu einer immensen Änderung der Spannungsverhältnisse kommen kann, da Material entfernt wird, was zuvor noch einen Teil der Spannung getragen hat und diese Spannung dann auf andere Bereich umgelagert wird. Ein weiterer Grund, warum die Spannung im Gestein so wichtig ist, ist dass alle Versagensmechanismen von Gestein durch eine Funktion der Spannung dargestellt werden.

Wichtige Annahme bei Spannung ist, dass Spannung ein Tensor und nicht mit Druck gleichzusetzen ist. Der Begriff Druck sollte nur verwendet werden um Spannungen auszudrücken, bei denen es keine Scherkomponenten gibt. Spannungen werden in Normalspannung und Scherspannung unterteilt. Hierbei wird angenommen, dass die Normalkraft ( $\Delta N$ ) und die Scherkraft ( $\Delta S$ ) an einer beliebigen Fläche ( $\Delta A$ ) anliegen (Abbildung 1).



**Abbildung 1 Schematische Darstellung der Normal- und Scherkraft an einer beliebigen Fläche (Hudson& Harrison, 1997)**

Allerdings variieren diese mit der Orientierung von  $\Delta A$ , wodurch die Normalspannung ( $\Delta N/\Delta A$ ) und Scherspannung ( $\Delta S/\Delta A$ ) definiert werden. Wenn man weiter annimmt, dass die Fläche  $\Delta A$  gegen Null geht, kann man die Normalspannung  $\sigma$  und die Scherspannung  $\tau$  als Eigenschaft an einem Punkt im Körper ansehen. Dadurch kann man diese beiden Spannungen formell folgend darstellen

$$\sigma_n = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta A}$$

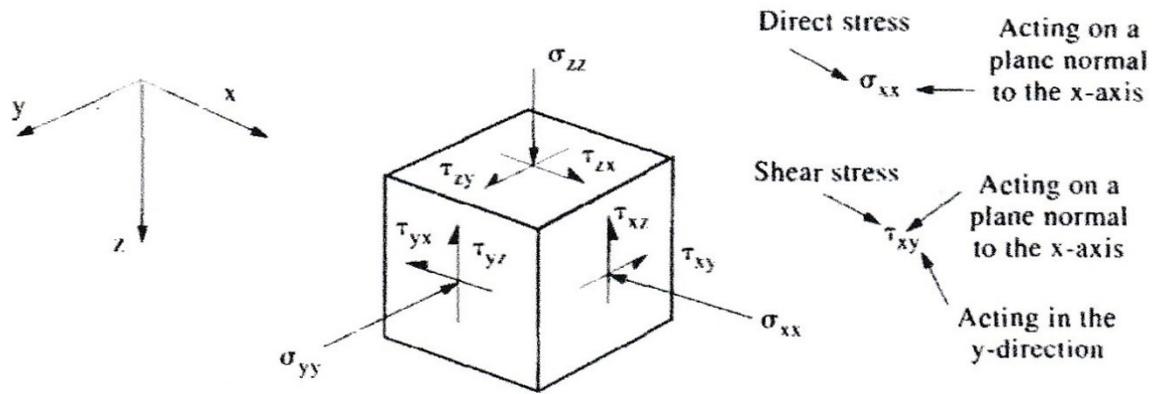
$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta A}$$

**Formel 1 Formelle Darstellung zur Berechnung der Normalspannung und der Scherspannung, als Eigenschaft an einem beliebigen Punkt im Körper**

Wenn man anschließend die eben getroffenen Annahmen an einen hypothetischen Würfel anlegt ergibt sich, dass es neun einzelne Spannungskomponenten gibt, welche sich aus drei Normalspannungen und sechs Scherspannungen ergeben (Formel 2). Wenn man die Annahme trifft, dass  $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ,  $\tau_{yz} = \tau_{zy}$  und  $\tau_{xz} = \tau_{zx}$  ist, ergibt sich, dass jede Spannung in einem Punkt in einem Körper mit sechs unabhängigen Spannungskomponenten ( $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yz}$  und  $\tau_{xz}$ ) beschrieben werden kann, dadurch ergibt sich wiederum, dass der Spannungstensor aus sechs Werten besteht (Abbildung 2).

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

**Formel 2 Darstellung des Spannungstensors als Matrix**



**Abbildung 2 Schematische Darstellung der neun Spannungskomponenten an einem Würfel (Hudson & Harrison, 1997)**

Diese Tatsache hat direkte Auswirkungen auf die Spannungs-Messtechniken. Wobei es unabhängig von der Methode sechs untereinander unabhängige Spannungen/Informationen geben muss. Die sogenannten Hauptspannungen treten dann auf, wenn im Bereich des Körpers nur Normalspannungen auftreten, also keine Scherspannungen anliegen. Hierbei ist die übliche Einteilung  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  (Formel 3).

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix}$$

**Formel 3 Darstellung der Hauptspannungen als Matrix**

Ein wichtiger Einflussfaktor in der ingenieurgeologischen Beurteilung ist die in-situ Spannung. Ein Grund, warum der in-situ Spannung eine besondere Bedeutung zugemessen wird ist, dass man mit dem Wissen über diese Aussagen darüber treffen kann, in welcher Richtung das Gestein am ehesten brechen kann. Es gibt verschiedene Methoden um die in-situ Spannung zu ermitteln, Beispiele hierfür sind etwa der Flatjack Test oder der hydraulische Rissbildungstest.

Bei dem Begriff der Deformation handelt es sich genau genommen um die relative Änderung der Position eines Punktes in einem z.B. Gestein. Die Deformation ist ein dreidimensionales Phänomen, welches sehr komplex sein kann. Man kann die Normaldeformation, hierbei ist nur eine Achse (kartesisch) betroffen und Scherdeformation unterscheiden. Bei einer Scherdeformation können alle drei kartesischen Achsen betroffen sein. Üblich wird die Deformation mit  $\epsilon$  dargestellt. Ein Deformationstensor kann gleich wie ein Spannungstensor dargestellt werden (Formel 4). Auch bei einem Deformationstensor müssen sechs voneinander unabhängige Komponenten vorhanden sein.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix}$$

**Formel 4 Darstellung des Deformationstensor als Matrix**

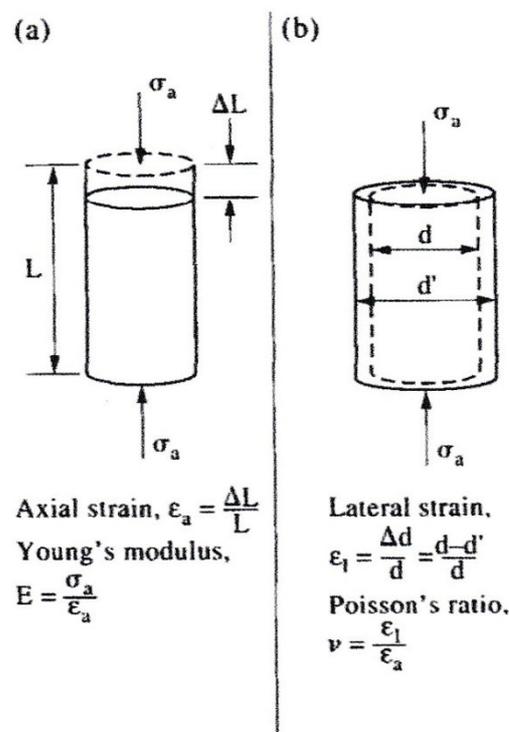
Auch sind die Hauptdeformationen, gleich wie die Hauptspannungen, jene Deformationswerte, welche nur Normaldeformation und keine Scherdeformation aufweisen.

Sowohl die Spannung, als auch die Deformation wirken bei den Elastizitätsmodulen (E) und bei der Poissonzahl (ν) zusammen (Abbildung 3). Wobei diese Werte, welche zwei der typischen gesteinsbeschreibenden Parameter darstellen, wie folgend berechnet werden

$$E = \frac{\sigma_a}{\varepsilon_a} = \frac{\text{axial\_Spannung}}{\text{axial\_Deformation}}$$

$$\nu = \frac{\varepsilon_l}{\sigma_a} = \frac{\text{laterale\_Deformation}}{\text{axiale\_Deformation}}$$

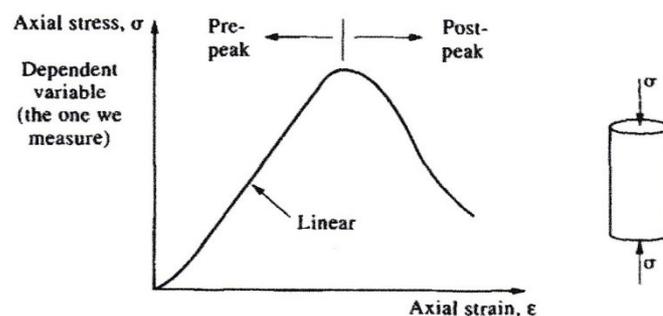
**Formel 5 Berechnung des Elastizitätsmoduls und der Poissonzahl**



**Abbildung 3 Darstellung von lateraler und axialer Deformation, (Hudson & Harrison, 1997)**

Bei Spannung und Deformation ist noch zu erwähnen, dass sowohl Scherspannung, als auch Scherdeformation nicht direkt gemessen werden können.

Bei der Bestimmung von den Parametern eines Gebirges müssen zuerst die charakteristischen Parameter des intakten Gesteins bestimmt werden. Die Festigkeit eines intakten Gesteins kann bei den Bauarbeiten, etwa für einen Tunnel, so sehr beansprucht werden, dass das Gestein in den sogenannten Nachbruch-Bereich kommt, hierbei kann der gesamte Ausgrabungsbereich oder aber nur bestimmte Areale des Bereiches betroffen sein. Dies ist ein Grund warum bei einer Charakterisierung eines Gebirges nicht nur die Trennflächen, sondern auch das intakte Gestein untersucht werden sollten. Eine Möglichkeit die Festigkeit eines Gesteins zu ermitteln, ist mittels eines einaxialen Druckversuches. Hierbei wird an einer Probe des Gesteins Druck angelegt bis die Probe "bricht", wobei der Druck axial an die Probe angelegt wird. Durch genaue Messung während der Belastung kann die uniaxiale Spannung-Deformationskurve erzeugt werden. Für jedes Gestein treten hierbei unterschiedliche Spannung-Deformationskurven auf (Abbildung 4).

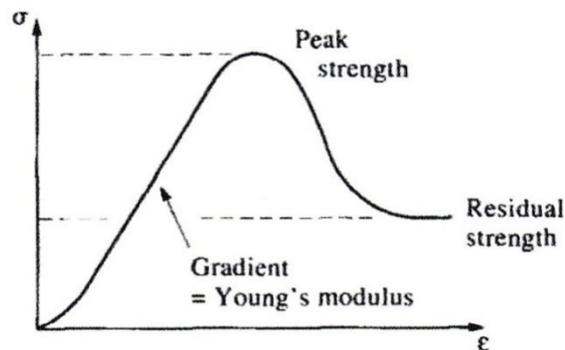


**Abbildung 4 Spannung- Deformationskurve (Hudson& Harrison, 1997)**

Bei einer Spannung-Deformationskurve gibt es einen Vorbruch-Bereich und einen Nachbruch-Bereich. Die Festigkeit eines Gesteins ist in dem Vorbruch-Bereich hoch, im Bereich des Bruches kommt es dann zum "Brechen" des Gesteins, wobei dieser Bereich die maximale Festigkeit des Gesteins anzeigt, im Fall eines einaxialen Tests die sogenannte uniaxiale Druckfestigkeit  $\sigma_c$ . Diese Druckfestigkeit ist allerdings von der Geometrie der Probe abhängig, etwas was unbedingt berücksichtigt werden muss. Der Nachbruch-Bereich zeigt die Festigkeit des Gesteins nach dem "Brechen", wobei hier trotz der Überschreitung der maximalen Spannung noch eine Festigkeit vorhanden ist. Eben diese Restfestigkeit des Gesteins ist ein großer Unterschied zu anderen Werkstoffen, wie etwa Stahl, welcher nach Überschreiten der Maximalspannung bricht und keinerlei Restfestigkeit mehr aufweist.

Am Beginn einer Spannung-Deformationskurve gibt es einen kleinen Bereich, wo die Kurve eine konkave aufwärts Bewegung aufweist, der Grund hierfür ist, dass der eingespannte

Zylinder keine komplett ebene Oberfläche aufweist und dass sich Mikrorisse schließen. Im Anschluss an diesen Bereich verläuft die Kurve linear, in diesem Bereich spiegelt sich auch der Elastizitätsmodulus wieder, welcher in zwei Arten bestimmt werden kann. Entweder durch Annehmen der Neigung der Spannung-Deformationskurve in einem Punkt oder durch Bestimmung der Neigung einer Linie, welche zwei Punkte im linearen Bereich der Kurve verbindet (Abbildung 5).



**Abbildung 5** Elastizitätsmodulus auf einer Spannungs-Deformationskurve (Hudson & Harrison, 1997)

Bei einem Test der Druckfestigkeit ist es häufig der Fall, dass mehrere Schleifen gefahren werden. Hierbei wird die Probe mehrfach belastet und wieder entlastet und anschließend die Spannung-Deformationskurve ermittelt. Bei der Spannung-Deformationskurve ist es üblich, dass auf der X-Achse die kontrollierte Variable ist und auf der Y-Achse die unkontrollierte Variable. Bei einer Spannung-Deformationskurve ist Deformation auf der X-Achse, wodurch man automatisch weiß, dass der Versuch deformationskontrolliert war.

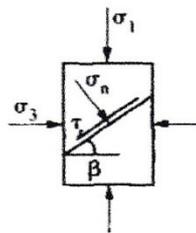
Es gibt verschiedene Möglichkeiten die Versagensmechanismen, also jene Einflussfaktoren, welche das Gestein maximal aushält ohne in den Nachbruch Bereich zu kommen, zu ermitteln. Ein Versagensmechanismus ist hierbei das Mohr-Coulomb Kriterium. Dieses Kriterium befasst sich mit der Druckfestigkeit eines Gesteins und zeigt besonders gute Ergebnisse bei hohem Druck, bei denen es zur Bildung von Scherflächen kommt. Bei diesem Kriterium werden die maximalen und minimalen Hauptspannungen auf einem Diagramm, Normalspannung gegen die Scherspannung geplottet und anschließend ein Kreis durch diese beiden Punkte gelegt. Die Mohr-Linie ist jene Line, welche durch die Einwirkung des Reibungswinkels und der Kohäsion definiert wird (Abbildung 6).

Hierbei kann es dazu kommen,

- (I) dass sich der Kreis und die Linie nicht treffen; hierbei ist das Gestein im stabilen Bereich
- (II) dass sich der Kreis und die Linie in einem Punkt, also tangential treffen; hierbei ist das Gestein noch im stabilen Bereich
- (III) dass sich der Kreis und die Linie in zwei Punkten treffen; hierbei kommt es zu einem Versagen des Gesteins.

Liegt nun auch ein Wasserdruck vor, so wird der Kreis um den Wert des Wasserdruckes nach links verschoben. Hierbei ist es möglich, dass sich aufgrund dieses Druckes ein Versagen einstellt.

**BASIC EQUATIONS**      Rock fails at a critical combination of normal and shear stresses:



$$|\tau| = \tau_0 + \mu \sigma_n$$

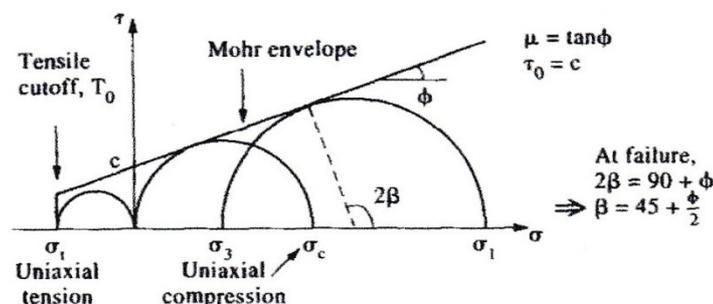
$\tau_0 =$  cohesion     $\mu =$  coeff. of friction

$$|\tau| = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta$$

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta$$

The equation for  $|\tau|$  and  $\sigma_n$  are the equations of a circle in  $(\sigma, \tau)$  space:

**FUNDAMENTAL GEOMETRY**



**Abbildung 6 Mohr-Coloumb Fehlerkriterium mit Spannungskreis (Hudson & Harrison, 1997)**

Ein weiterer Versagensmechanismus ist das Griffith-Kriterium. Bei diesem Kriterium beschäftigt man sich mit der Annahme, dass für einen Bruch aufgrund von Zug bereits existierende Mikrobrüche und eine neue Oberflächenenergie vorhanden sein müssen. Hierbei gibt es eine Formel zur Berechnung Zugversagen.

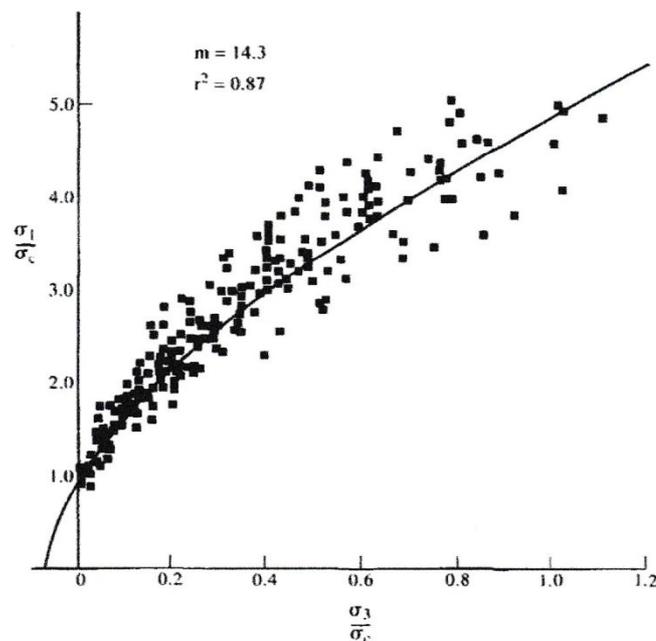
Der dritte Versagensmechanismus ist das Hoek-Brown-Kriterium. Dieses Kriterium ist ein empirisches, welches aus den Kurvendaten von experimentellen Versuchen abgeleitet wurde (Abbildung 7).

Diese Formel ist folgende

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \left( m \sigma_c \sigma_3 + s \sigma_c^2 \right)^{0.5}.$$

**Formel 6 Hoek-Brown-Kriterium zur Ermittlung von möglichem Versagen von Gestein**

In dieser Formel repräsentiert der Parameter s den Grad der Zerstückelung im Gestein und dadurch die Kohäsion. Der Parameter m stellt den Grad der Verzahnung der Partikel dar. Ein Vorteil dieses Kriteriums ist, dass es eine Relation zwischen Zug- und Druckfestigkeit ermöglicht, weiteres kann eine Verbindung zwischen den Hoek-Brown und Mohr Coloumb-Kriterium durch das Ersetzen von m und s mit c und  $\Phi$  erkannt werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass bei der Quantifizierung von Gebirgsfestigkeitsparameter m und s die ingenieurgeologischen, insbesondere die Trennflächeneigenschaften, durch den "Geological Strength Index" (GSI), direkt berücksichtigt werden können.



**Abbildung 7 Experimentell ermittelte Kurve des Hoek-Brown Fehlerkriteriums (Hudson & Harrison, 1997)**

Der GSI ist eine Darstellung des durchschnittlichen Gebirgszerlegungsgrades und ist durch Trennflächenintensität, -größe und Trennflächenoberflächeneigenschaften zu bestimmen (Abbildung 8).

Auch ist es möglich mittels folgenden Formeln m und s des Hoek-Brown Fehlerkriteriums, mit Hilfe des GSI, zu berechnen (Formel 7).

$$m_b = m_i * \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right)$$

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Formel 7 Berechnungen für das Hoek-Brown Fehlerkriterium mittels des GSI

Geological Strength Index GSI	Discontinuity Surface Condition				
	Very Good	Good	Fair	Poor	Very Poor
 Intact Massive	90	80	na	na	na
 Blocky		70	60		
 Very Blocky			50	40	
 Blocky Disturbed Deformed				30	
 Highly Disturbed					20
 Highly Foliated Sheared	na	na			10

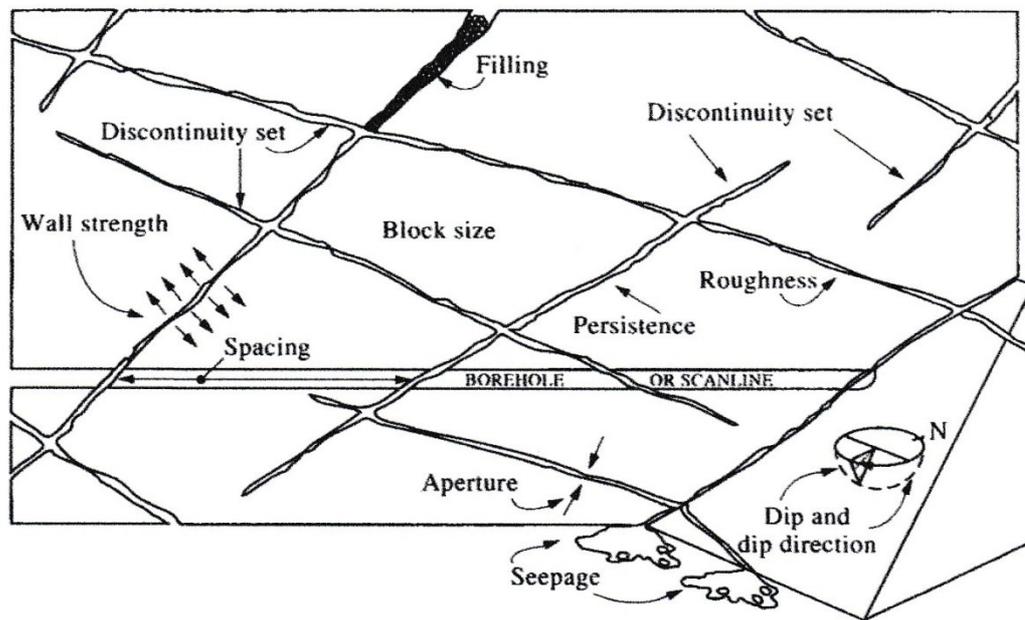
  

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX	SURFACE CONDITIONS				
	VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
 INTACT/MASSIVE	90		NA	NA	NA
 BLOCKY		70			
 VERY BLOCKY			50		
 BLOCKY/DISTURBED				40	
 DISINTEGRATED					20
 FOLIATED/LAMINATED SHEARED	NA	NA			10

Abbildung 8 Bestimmung des GSI (Liu, 2014a)

Dazu ist ein weiterer wichtiger Schritt in der Charakterisierung eines Gebirges, nämlich die Beschreibung der Trennflächen notwendig. Trennflächen kommen hierbei in allen Arten von Gebirgen vor, wobei sie in der Natur nur 2-dimensional erfassbar sind, allerdings ein 3-dimensionales Auftreten haben. Die meisten Parameter für Trennflächen können sowohl bei natürlichen Aufschlüssen, als auch in Bohrlöchern aufgenommen werden. Bei der Aufnahme in Bohrlöchern ist es möglich die Trennflächenhäufigkeit sehr gut zu bestimmen, allerdings gibt ein Bohrloch wenig bis gar keine Informationen über die laterale Ausbreitung und die Verschneidung der Trennflächen.

Wichtige Parameter von Trennflächen sind der Abstand, die Orientierung, die Rauigkeit, die Persistenz, die Öffnung, die Größe und die Trennflächencluster (Abbildung 9).



**Abbildung 9 Darstellung der verschiedenen Parameter von Trennflächen in einer schematischen  
Abbildung (Hudson & Harrison, 1997)**

Hierbei ist der Abstand jener zwischen den einzelnen Trennflächen. In diesem Zusammenhang gibt es auch die Frequenz oder Häufigkeit. Diese Häufigkeit wird dadurch ermittelt, dass die Anzahl der schneidenden Trennflächen durch die Länge der Linie, dies natürlich unter der Annahme einer gespannten Länge, etwa ein Maßband, über den Aufschluss oder einen gewählten Bereich dividiert wird (Formel 8).

$$\lambda = \frac{N}{L} m^{-1}$$

**Formel 8 Berechnung der Häufigkeit der Trennflächen unter der Annahme einer gespannten Länge über  
den Aufschluss**

Der mittlere Abstand wird mittels der Länge der Linie durch die Anzahl der schneidenden Trennflächen dividiert (Formel 9).

$$\bar{x} = \frac{L}{N} m$$

**Formel 9 Berechnung des Abstandes der Trennflächen unter der Annahme einer gespannten Länge über den Aufschluss**

Hierbei ist die Häufigkeit, also die Anzahl der Trennflächen pro Meter, der Kehrwert des Abstandes.

Die Einfallsrichtung und -winkel wird mittels eines Geologenkompasses direkt von jeder einzelnen Fläche abgenommen.

Die Persistenz beschreibt die komplette Trennfläche, etwa wie die Form. Hier gibt es verschiedene Annahmen, etwa wie die Annahme einer zirkularen Scheibe.

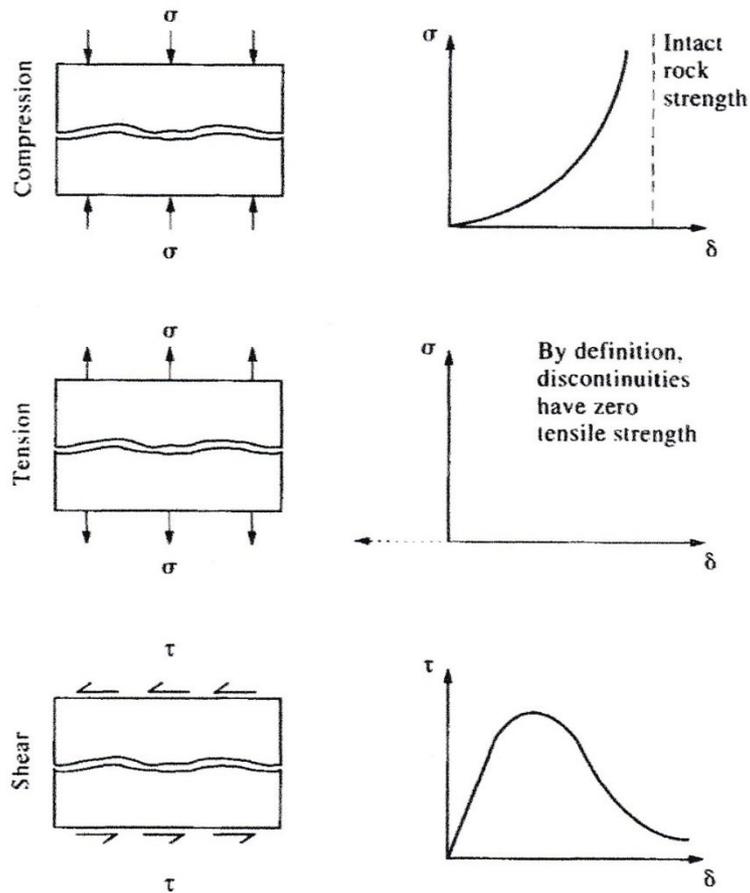
Die Rauigkeit der Trennfläche kann durch Tabellen, aber auch mathematisch ermittelt werden.

Die Öffnung der Trennflächen wird mittels des lotrechten Abstandes zwischen dem gegenüberliegenden Gestein gemessen. Dieser Wert kann bei einer parallelen Trennfläche konstant sein, linear bei unterschiedlichen Abständen und geringer Rauigkeit und komplett variabel bei unterschiedlichem Abstand und einer Rauigkeit.

Die verschiedenen Trennflächen treten nicht in komplett zufälliger Anordnung auf, sondern variieren. Die Trennflächen werden in einzelnen Clustern zusammengefasst, wobei die einzelnen Trennflächen in einem Cluster leicht in ihren Werten variieren. Dieses Zusammenfassen in Clustern erleichtert das Bestimmen von mechanischen Parametern.

Die Blockgröße hängt von den zuvor erwähnten Parametern ab und hat vor allem im Tunnelbau einen großen Einfluss.

Es ist auch möglich, ähnlich wie bei intaktem Gestein, Druck- und Scherspannung auf einer Trennfläche anzulegen (Abbildung 10).



**Abbildung 10 Darstellung von Druck-, Zug- und Scherspannung auf einer Trennfläche (Hudson & Harrison, 1997)**

Bei einer angelegten Druckspannung wird bei einem angelegten Druck die Trennfläche solange aufeinander zubewegt, bis sie geschlossen ist. Bei einer Scherspannung ähnelt die Kurve einer Spannung-Deformationskurve eines intakten Gesteins unter Druck. Hierbei ist die Widerstandsfähigkeit vom Reibungswinkel und der Kohäsion abhängig, allerdings auch vom Grad und der Art ab. Eine Zugspannung an einer Trennfläche ist mit der Definition ausgeschlossen, denn bei Zug hat eine Trennfläche keinerlei Widerstand.

Eine weitere Eigenschaft eines Gebirges, welche zu den schwierigsten gehört, ist die Permeabilität, also die Durchlässigkeit eines Gesteins oder Gebirges für Wasser. Dieses Wasser kann starken Einfluss auf die Festigkeit eines Gesteins, wie bereits beim Mohr-Coloumb Fehlerkriterium erwähnt, haben.

Zur Beschreibung eines Gebirges sind zwei Charakteristika entscheidend, die Charakteristika des intakten Gesteins und der Trennflächen. Das Zusammenspiel dieser zwei Charakteristika ist entscheidend für die Eigenschaften eines Gebirges.

Nun ist es möglich ein Gebirge zu charakterisieren. Allerdings ist es im Sinne der Vereinfachung für die Projektplanung wichtig verschiedene vergleichbare Gesteinseinheiten

zusammenzufassen und eine Klassifizierung dieser durchzuführen. Hierbei gibt es verschiedene Methoden das Gestein zu klassifizieren.

Eine Methode ist das "Rock Mass Rating" (RMR). Bei dieser Klassifizierung werden die uniaxiale Druckfestigkeit des intakten Gesteins, der RQD, der Trennflächenabstand, die Eigenschaften der Trennflächenoberfläche, die Grundwassereigenschaften und die Orientierung der Trennflächen zu dem Projekt, etwa einem Tunnel, verwendet. Die einzelnen Parameter werden mittels Tabellen einfach einem Wert zugewiesen und im Anschluss alle Werte addiert. Je höher dann die Endsumme, desto besser das Gestein.

Eine weitere Methode ist das Q-System. Hierbei werden zur Klassifizierung sechs Parameter, der RQD, die Anzahl der Trennflächencluster, die Rauigkeit der unvorteilhaftesten Trennflächen, die Alteration und Füllung von unvorteilhaften Trennflächen, der Wassergehalt und die Spannungseigenschaften verwendet. Für die Berechnung des Q-Wertes wird folgende Formel herangezogen

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$$

**Formel 10 Berechnung des Q-Wertes mittels sechs Parameter**

- RQD Rock Quality Designation
- J<sub>n</sub> Anzahl der Trennflächen
- J<sub>r</sub> Wert für die Rauigkeit
- J<sub>a</sub> Wert für die Alteration
- J<sub>w</sub> Wert für den Wassergehalt
- SRF Wert für die Spannungseigenschaften

Bei dieser Formel stellt der erste Teil (RQD/J<sub>n</sub>) einen Bezug auf die Geometrie des Gebirges dar. Je höher dieser Wert, desto besser die geometrische Qualität. Der zweite Teil der Formel (J<sub>r</sub>/J<sub>a</sub>) bezieht sich auf die mechanischen Eigenschaften. Je höher der Wert, desto besser die mechanischen Eigenschaften. Der dritte Teil der Formel (J<sub>w</sub>/SRF) bezieht sich auf die Eigenschaften der Umwelt. Dieses System ist komplexer als das RMR und benutzt die schlechtesten Werte eines Parameters.

Sowohl beim RMR, als auch beim Q-System wird der Wert des RQD verwendet. RQD steht hierbei für Rock quality designation und wird dadurch berechnet, dass die Anzahl aller

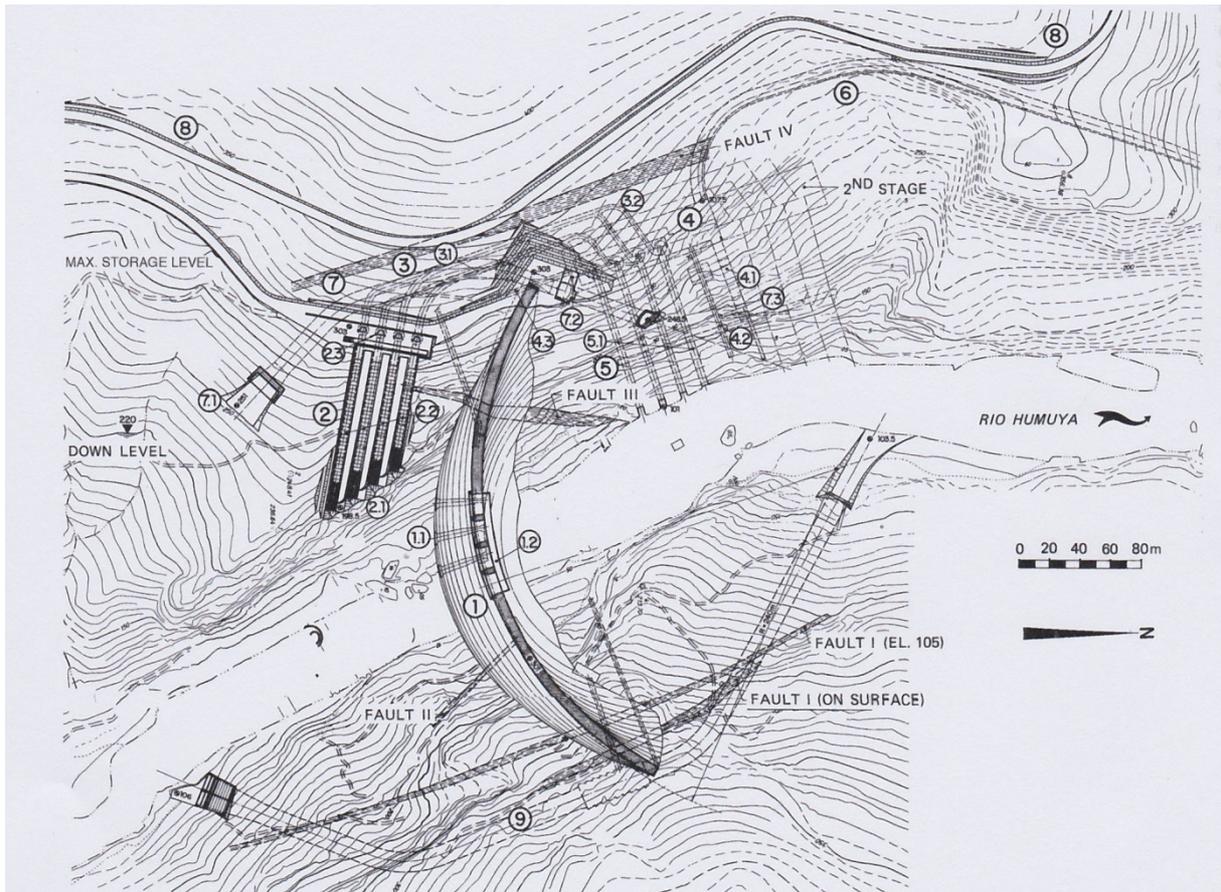
Bruchstücke, welche größer als 10cm sind, durch die Länge des Bohrkerns dividiert und das Ergebnis mit 100 multipliziert wird, um einen Prozentwert zu erlangen. Der RQD-Wert ist dadurch gekennzeichnet, dass er einfach und leicht zu ermitteln ist. Allerdings ist er international nicht unumstritten, da es durch eine Änderung der Bruchstückgröße von wenigen mm zu einer massiven Änderung des RQD-Wertes kommt (Hudson& Harrison, 1997).

## **4.1 Beispiele aus dem Felsbau**

Es gibt verschiedenste Beispiele, in denen Trennflächen im Bereich von Bauprojekten eine wichtige Rolle spielen. Hier soll kurz auf verschiedene Projekte eingegangen werden.

### **4.1.1 Bogenmauer Francisco Morazán**

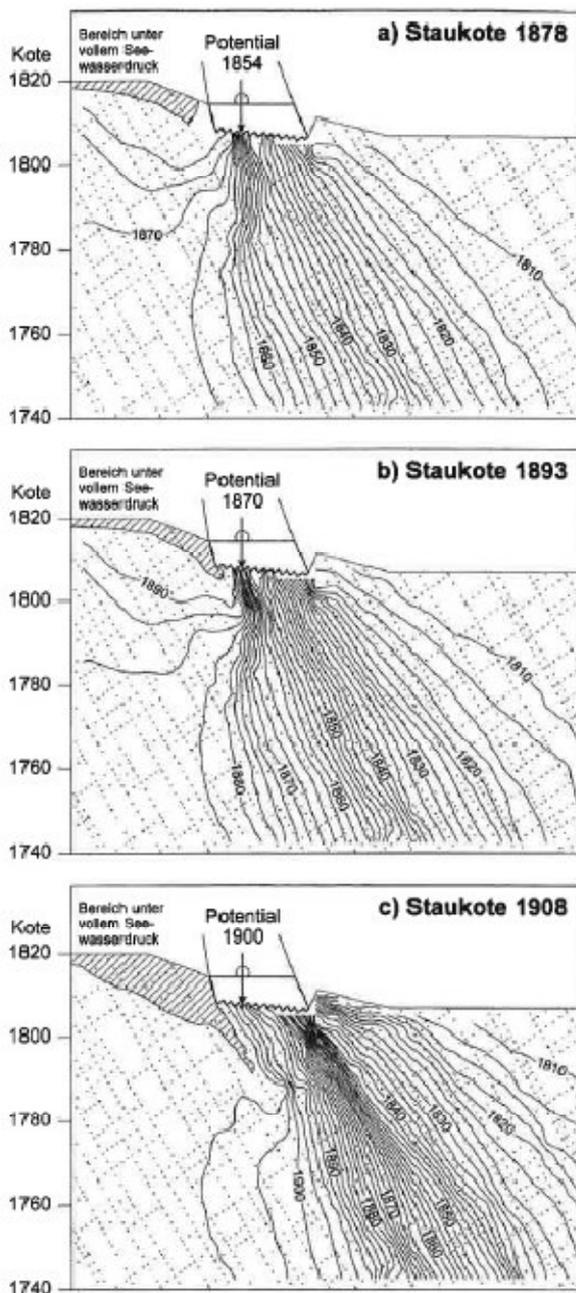
Eines dieser Projekte ist die Bogenmauer Francisco Morazán in Honduras. Bei dieser Bogenmauer wurde ein Dichtungsschleier errichtet, welcher von vier breiten Störungszonen im verkarsteten Kalkgestein durchstoßen wird (Abbildung 11). Die Bogenmauer befindet sich im Bereich von massivem Kalkstein, welcher eine Verkarstung aufweist. Rund um diesen Kalk gibt es Überlagerungen von Vulkaniten. Im Bereich des Dichtungsschleiers treten vier Störungszonen auf, welche eine Mächtigkeit von einigen Dezimetern bis zu 30m aufweisen und teilweise mit Kalzit gefüllt sind. Die Vulkanite haben bei einer Untersuchung eine geringere Durchlässigkeit als der Kalk aufgewiesen, zusammen mit der Tatsache, dass die Verkarstung mit der Tiefe zunimmt, hat man sich dann entschlossen einen Dichtungsschleier zu bauen, um somit einen offenen Boden zu vermeiden. Hierfür wurde an verschiedenen Orten sowohl das Sickerwasser gemessen, als auch Standrohrpiezometer an verschiedenen Orten installiert. Als dann die Staukote 264 erreicht wurde, kam es allerdings zu Problemen wodurch man vermutete, dass der Dichtungsschleier gerissen war. Im Anschluss begann man eine Nachinjektion durchzuführen, um einer Erosion des Materials aus den Störungen entgegenzuwirken. Allerdings zeigten die Maßnahmen keine Wirkung. Außerdem kam erschwerend dazu, dass ein besonders kritischer Bereich betroffen war. Nach einer massiven Injektionskampagne konnte dann eine Verminderung der Menge an Sickerwasser, eine Verminderung der erodierenden Wirkung des Grundwasserstromes und eine Verminderung des Auftriebes im zentralen Mauerbereich erzielt werden (Kreuzer, 1997).



**Abbildung 11 Plan der Bogenmauer mit der gesamten Anlage Francisco Morazán (Kreuzer,1997)**

#### 4.1.2 Bogenmauer Sta. Maria

Bei diesem Bauprojekt wurde eine doppelt gekrümmte, symmetrische Staumauer gebaut. Allerdings kam es beim Erstaufstau zu unerwartet hohen Verschiebungen der Aufstandsfläche im Bereich des zentralen und rechten Teils der Mauer, mit einer Horizontalverschiebung von 17mm. Bei dieser Verschiebung kam es zu einer Abscherung in einer Stahlverrohrung 4m unter dem Mauerfundament. Durch anschließend durchgeführte Messungen kam man auf das Ergebnis, dass die Auflagefläche der Mauer bei einem Vollstau unter sehr hohem Druck stand. Im zentralen Bereich wurde ein irreversibler Versatz von bis zu 13mm gemessen. Auch gab es deutliche Anzeichen von Kluftöffnungen, welche allerdings reversibel waren. Das vorherrschende Gestein bei der Talsperre sind ein Granit und ein Granodiorit, wobei der feine, verschieferte und leicht vergneiste Granodiorit auf der rechten Talseite vorherrschend war. Nach den ersten Problemen mit den hohen Drücken wurden einige Messungen mit schwankendem Wasserstand durchgeführt. Hierbei wurde festgestellt, dass ab einer Staukote von 1890m ü. M eine starke Deformation an einer Hauptkluft auftritt, wobei sich diese an der Grenze zwischen den beiden vorherrschenden



**Abbildung 12 Druckverhältnisse unter der Staumauer bei den unterschiedlichen Staukoten**  
(Otto & Moor, 1997)

Gesteinstypen befindet. Unter dieser Staukote waren die Verformung und Deformation im Bereich der erwarteten Werte. Abschließend wurde nach den genauen Messungen festgestellt, dass das Gestein und die Festigkeit vom Öffnen und Schließen von Kluftsystemen abhängig ist. Bis zur Staukote von 1890m ü. M. kam es zu einer kleinen Auflockerung der Felsfundation auf der Wasserseite. Über diese Staukote kam es zu einer großflächigen Auflockerung, die sich auch in dem Bereich des Fundaments der Staumauer erstreckte. Also wird angenommen, dass bis zu dieser Staukote eine flächenmäßige Verteilung der Last erfolgt. Über dieser Staukote kommt es allerdings zu einer Konzentration der Last auf einen kleinen luftseitigen Bereich (Abbildung 12) (Otto & Moor, 1997).

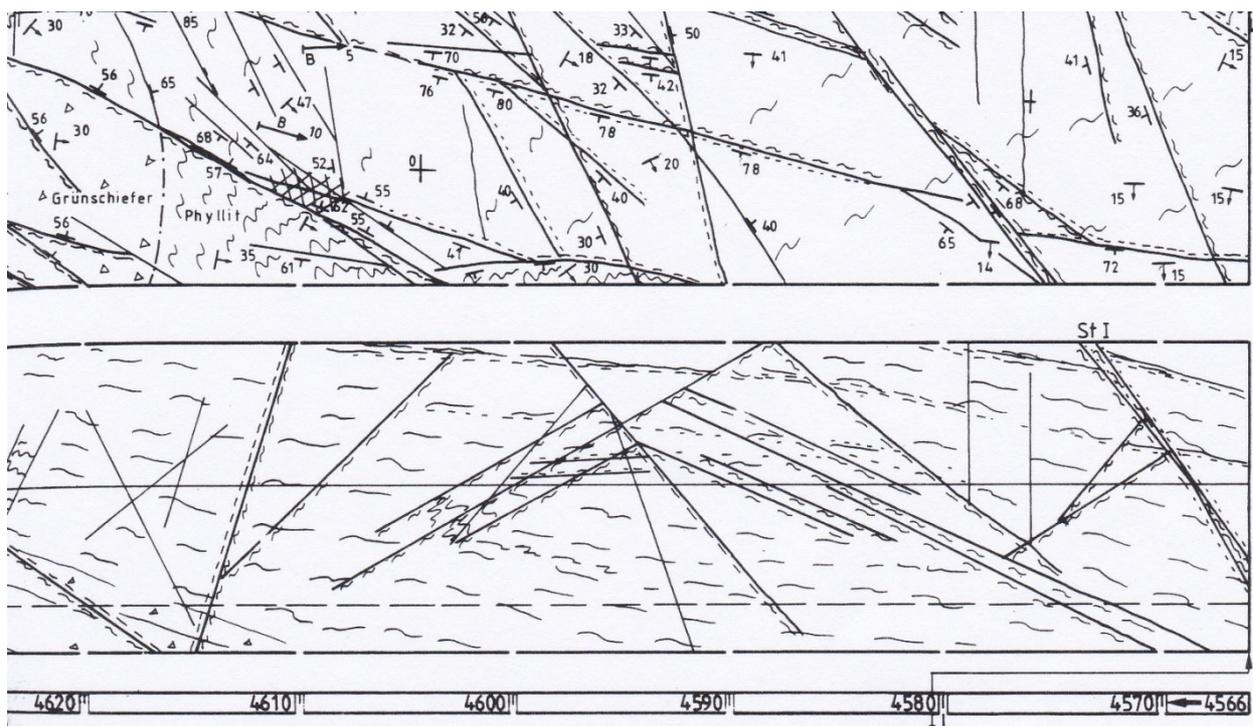
### 4.1.3 Inntaltunnel

Der Inntaltunnel befindet sich am Nordwestrand des Innsbrucker Quarzphyllites, welcher aus schwach metamorphen Quarzphyllit, Chlorit-, Kalk-, und Serezitphyllit sowie Grünschiefer und Karbonatgestein besteht. Auch treten im Bereich des Tunnels vier Großstörungen auf. Während des Bauvortriebs vom Norden und Süden wurden verschiedene Bereiche

angefahren, teilweise wurden hierbei stabile Bereiche angefahren, wo teilweise eine Abschlaglänge von bis zu 4m möglich war. Allerdings wurden auch andere Bereiche angefahren, wo ein Kakirit vorhanden war, wo ein Zerdrücken des Materials mit bloßer Hand und eine Abschlaglänge von nur 1m möglich waren. Der Teilabschnitt in Abbildung 13 ist durch teilweise sehr flachen Trennflächen gekennzeichnet (Leimser& Köhler, 1994).

Eine Herausforderung beim Bau des Tunnels war auch das die Trennflächen im spitzen Winkel zur Vortriebsachse stand, wodurch es zu besondere Schwierigkeiten beim Vortrieb kam. Außerdem kam es teilweise zu sehr massiver Deformation im Bereich des Firstes mit bis zu 100cm (Schubert, 1993).

Eine weitere besondere Herausforderung beim Bau des Inntaltunnels war auch der Bau der Abzweigungsbereich für die zukünftige Anbindung an den Brennerbasistunnel. In diesen Bereich gab es einen Ausbruchquerschnitt von bis zu 310m<sup>2</sup>, durch gute Planung und einer engen Zusammenarbeit zwischen den einzelnen Teams war auch dies kein Problem (Schubert u.a.).



**Abbildung 13 Teilabschnitt mit eingezeichneten Trennflächen, (Leimser& Köhler, 1994)**

#### 4.1.4 Semmering-Basis Tunnel

Der Semmering-Basis Tunnel ist ein essenzielles Bauprojekt für die Verbindung von Wien und dem Adriatischen Meer mittels Eisenbahn und verbindet die Bundesländer Niederösterreich und Steiermark. Beim Tunnel gab es im Jahr 1994 bereits eine geplante Trasse, auch wurde bereits bei einen Erkundungsstollen von steirischer Seite (Abbildung 15), welcher eventuell zum Tunnel erweitert werden sollte, gebaut. Hier gab es dann einen Wassereintritt und außerdem gab es keine behördliche Baugenehmigung für den geplanten Tunnel im Bereich des Bundeslandes Niederösterreich. Dadurch war eine komplette Neuplanung des Tunnels notwendig. Für diesen Tunnel wurde mehrere Jahre eine Erkundung des möglichen Gebietes durchgeführt und sich anschließend auf einen geschwungenen Trassenverlauf mit einer Länge von 27,3km Länge geeignet. Der Tunnel schneidet in seinem Verlauf die Grauwackenzone sowie Einheiten von Marmor, Quarzit, Quarzphyllit und Phyllit. Und ist durch einen komplizierten Gebirgsbau mit Falten- und Deckensystemen gekennzeichnet. In der Detailkartierung konnten insgesamt 18 Großeinheiten und über 60 verschiedenen Gesteinseinheiten definiert werden. Auch konnte man verschiedene Störungen erkennen, etwa das Graßberg-Schlagl Störungssystem (Abbildung 14). Dieses Störungssystem hat eine Mächtigkeit von 900m und besteht aus stark gestörten Phyllit, Schiefer, Quarzit und Sulfatgestein, sowie aus feinkörnigen Störungsgestein und weißt eine Plastifizierung des Gebirges auf. Hierdurch wird in diesen Bereich kein Vortrieb mittels TVM (Tunnelvortriebsmaschine) sondern mittels der NATM ("new austrian tunneling method") durchgeführt werden. Die Bauarbeiten haben vor kurzem begonnen (Reidl u.a. 2011; Riedmüller u.a. 2000).

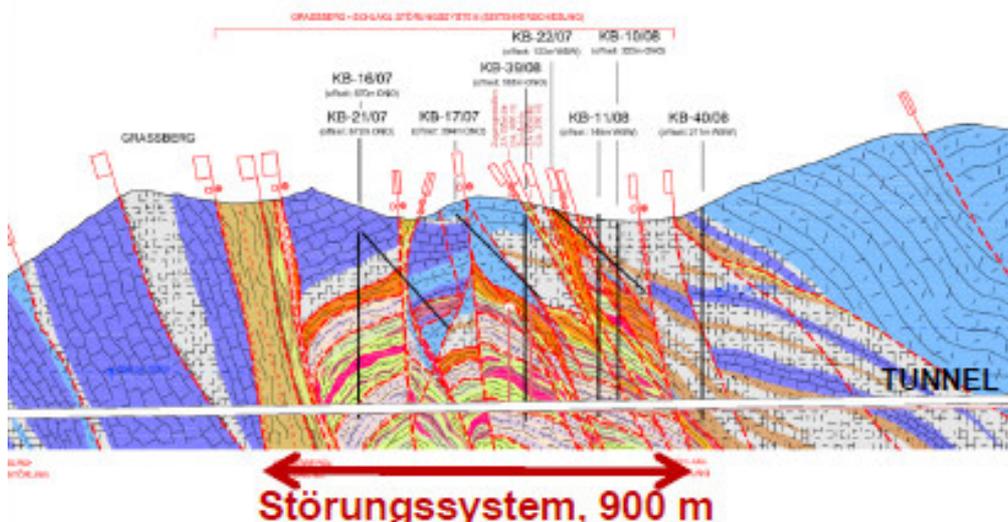
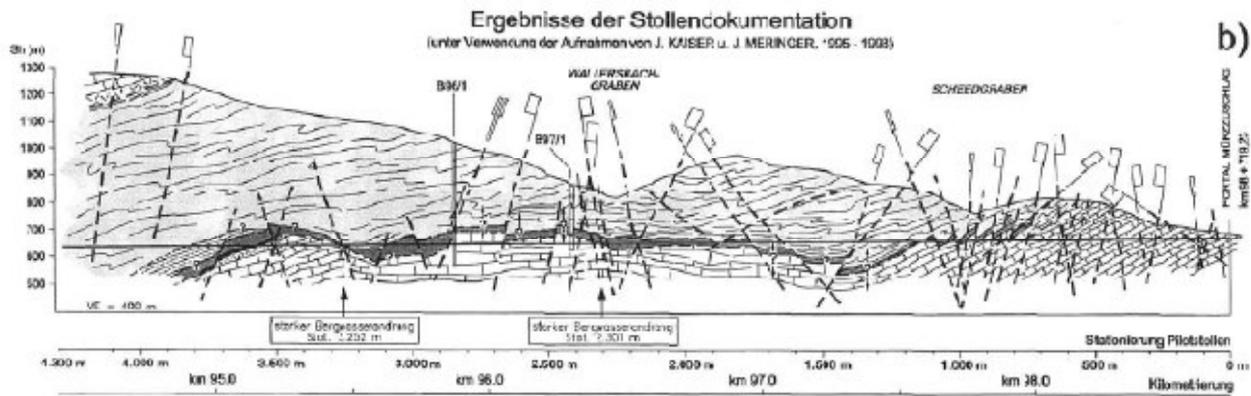


Abbildung 14 Ausschnitt der geologischen Kartierung, Graßberg-Schlagl Störungssystem

(Reidl u.a. 2011)



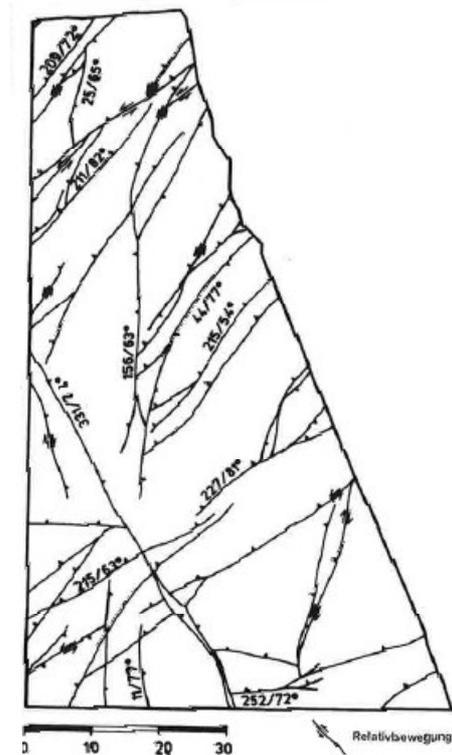
**Abbildung 15 Störungssystem im Bereich des Portals Mürzzuschlag des Semmering-Basis Tunnel in der Version von 1989-1999 (Pölsler, 2000)**

#### 4.1.5 Erkundungsschurf für Gewichtstaumauer

Für den Bau einer Gewichtstaumauer in dem Bundesland Thüringen, Deutschland wurde ein Erkundungsschurf im Bereich der geplanten Staumauer durchgeführt. Dies wurde durchgeführt um ein möglichst genaues Bild über das Gestein zu bekommen, da es sehr wenige Aufschlüsse im Bereich der geplanten Staumauer gab. Mit Hilfe dieses Schurfes konnte ein genaues Bild über die vorherrschenden Gesteins- und Trennflächeneigenschaften erstellt werden (Abbildung 16, Abbildung 17) und die vorher aufgestellten Behauptungen über diese Eigenschaften konnten bestätigt werden. Auch war es möglich mittels des Erkundungsschurfes die geplanten Bautechniken, etwa wie die Anordnung und Schemata bei Sprengungen, bereits zu probieren, wobei man erkannte, dass die geplanten Bautechniken ausreichend und passend waren (Meister u.a. 1997).



**Abbildung 16** Der Großschurf von der gegenüberliegenden Talseite (Meister u.a. 1997)



**Abbildung 17** Darstellung der markanten Störungen (Meister u.a. 1997)

#### 4.1.6 Galgenbergtunnel

Bei dem Bauprojekt des Galgenbergtunnels sollte eine schnelle Verbindung zwischen St. Michael und Leoben im Bahnverkehr ermöglicht werden. Im Bereich des Tunnels herrscht ein komplizierter geologischer Aufbau vor (Abbildung 18). Hierbei gibt es Bereiche mit Gesteinen, die eine hohe Druckfestigkeit aufweisen, wobei es bei Quarzit und Quarzphylliten eine Abweichung gab. Aufgrund von verschiedenen Deckensystemen kam es im Grenzbereich zwischen den einzelnen Decken zu einer starken tektonischen Beeinflussung und somit zu einer starken Zerlegung des Gesteins. In diesen Bereichen kam es beim Vortrieb dann auch zu teilweise erheblichen Überprofilen. Eine Decke, die hierbei angefahren wurde, ist die Veitscher Decke. Im Bereich dieser Decke wurde bereits bei der Planung mit einem komplexen Gebirgsbau und einer schnell wechselnden Abfolge von verschiedenen Gesteinen gerechnet. In diesem Bereich traten auch die zwei markanten Großstörungen, die Hinterbergstörung und die Haberlstörung, auf. Die Hinterbergstörung liegt zwischen zwei massigen Körpern aus Kalk- und Dolomitmarmor und besteht aus Grünschiefer, Chlorit-, Karbonat- und Graphitphyllit. Die Haberlstörung hat ein sehr flaches Einfallen, wobei sie trotz schieferungsparalleler mylonitischer Lagen im Vortrieb nicht





**Abbildung 19** Das Flusstal mit Colle Isolato (gestrichelte Linie) (Semenza& Ghirotti, 2000)

Südseite des Flusses befand, wurde nicht erkannt. Durch das Aufstauen des Wassers kam es dann zu einer Reaktivierung der alten Massenbewegung und damit immer wieder zu kleineren Rutschungen in das Reservoir, welche im Zusammenhang mit der Erhöhung und Senkung des Wasserstandes gesehen wurden. Am 9. Oktober 1963 kam es dann zur großen Rutschung wo mehrere Millionen  $m^3$  Material in den Stausee rutschten (Abbildung 20, Abbildung 21). Dadurch kam es zu einer Flutwelle, welche die Stadt Longarone am Fuß der Staumauer überschwemmte und rund 2000 Menschen tötete (Genevois& Ghirotti, 2005; Kieffer, 2014; Semenza& Ghirotti, 2000).



**Abbildung 20 Südseite des Flusstales mit Bereich der Rutschung (gestrichelte Linie) (Genevois & Ghirotti, 2005)**



**Abbildung 21 Südseite der Flusseite, nach der Rutschung (2014)**

#### 4.1.8 Malpasset

Die Staumauer von Malpasset zeigt welche katastrophale Folge es haben kann, wenn vor einem Bauprojekt keine geologische Untersuchung eines Gebietes erfolgt. Diese Staumauer befand sich nahe der Stadt Fréjus in der Provence in Südfrankreich und sollte die Bewässerung der umliegenden Gegend über das gesamte Jahr ermöglichen. Bei der Staumauer von Malpasset wurde der Standort der Staumauer rein von konventionellen Gesichtspunkten aus gewählt. Allerdings wurde dadurch der Staudamm auf zwei Trennflächen gesetzt, welche zusammen einen Keil bildeten (Abbildung 23). Durch den Bau der Mauer kam es dann zu einer massiven Druckerhöhung im Bereich des Keiles. Am 2. Dezember 1959 kam es dann, rund 5 Jahre nach der Fertigstellung der Mauer (Abbildung 22), zum Versagen der Staumauer (Abbildung 24). Die gesamte Staumauer zerbrach in der Nacht und das gestaute Wasser überflutete das gesamte Tal. Auch wurde eine Brückenbaustelle für die heutige Autobahn A8, welche Aix-en-Provence mit der Italien (A10) verbindet, überflutet. Die Opferzahl soll bei rund 421 liegen (Kieffer, 2014; Londe, 1987).



*Abbildung 22 Staumauer von Malpasset nach der Fertigstellung (Londe, 1987)*



Abbildung 24 Staumauer von Malpasset nach dem Versagen (2014)

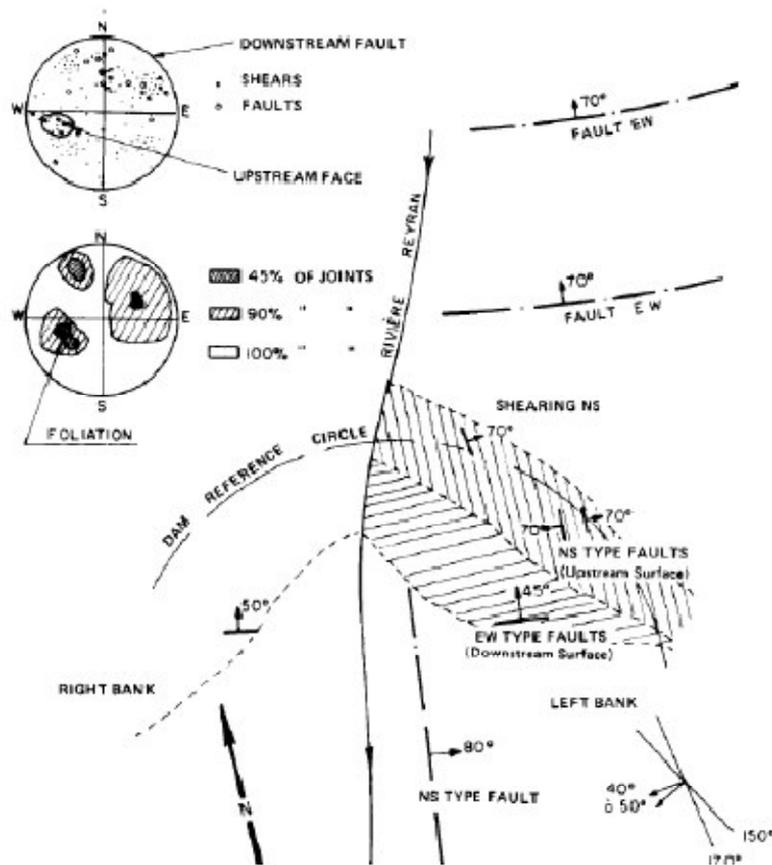


Abbildung 23 Darstellung des Keiles (Liu, 2014a)

# 5. Trennflächenmodellierung

Im folgenden Kapitel soll nun sowohl auf die verschiedenen charakteristischen Trennflächenparameter, als auch auf die Erfassungsmethoden und die notwendigen Verfahren für die Datenauswertung eingegangen werden.

## 5.1 Charakteristische Trennflächenparameter im Felsbau

Im Bereich des Felsbaues gibt es verschiedenste Trennflächenparameter die verwendet werden. Ausschlaggebend ist hierbei einerseits das Bauprojekt selbst, andererseits das vorherrschende Gebirge. In der Abbildung 25 stellen die gefüllten Punkte signifikante Zusammenhänge und leere Punkte untergeordnete Zusammenhänge dar.

GESTEINSART	MASSGEBENDE PARAMETER																				
	GESTEINSEIGENSCHAFTEN										TRENNFLÄCHENEIGENSCHAFTEN										
	Mineralbestand	Tonmineralegehalt (qualitativ)	Tonmineralegehalt (quantitativ)	Zementation	Korngröße	Textur	Verhältnis Matrix / Komponenten	Porosität	Alteration / Verwitterung	Lösungsphänomene	Quelleigenschaften	Festigkeitseigenschaften	Anisotropie	Orientierung der dominierenden Schar	Anzahl und Orientierung der Scharen	Zerlegungsintensität	Durchtrennungsgrad	Öffnung	Schereigenschaften / Rauigkeit	Füllung	
FESTGESTEINE	Plutonische Gesteine	■				■	■					■		■	■			■			
	Vulkanische Gesteine (massig)	□						■	■			■			■	■			■	■	
	Vulkanoklastische Gesteine	□	□		□	□	■	■	■		□	□									
	Grobkörnige Klastische Gesteine (massig)	□		□	■	■	□	■	□	□		■			□	□		□			
	Feinkörnige Klastische Gesteine (massig)		■	■	■	■				□		■	□		□	□					
	Grobkörnige Klastische Gesteine (geschichtet)	□		□	■	■		■	□	□		■	■	■						■	
	Feinkörnige Klastische Gesteine (geschichtet)		■	■	■	■				□		■		■	■					■	□
	Karbonatgesteine (massig)	■									■	■			□	■	□	■			□
	Karbonatgesteine (geschichtet)	■									■	■		■	■					□	□
	Sulfatgesteine	■									■	■	□								
	Metamorphe Gesteine (massig)	■				■	■			□		■		■	■	■	□	■			■
	Metamorphe Gesteine (geschiefert)	■				■	■			□		■	■	■	■	■	□			■	■
	Störungsgesteine	□	■	■	■		■			□		■	■								
	LOCKERGESTEINE	Grobkörnige Böden (Kies)				■	■	□				■									
Grobkörnige Böden (Sand)					■	□	□				■										
Gemischtkörnige Böden		□		■	■	■	□			□	■										
Feinkörnige Böden (Schluff)					■		□				■										
Feinkörnige Böden (Ton)		□		■	■		□				■	■									

Abbildung 25 Zuordnung von maßgebenden Parametern im Tunnelbau zu Gesteinsarten (ÖGG, 2001)

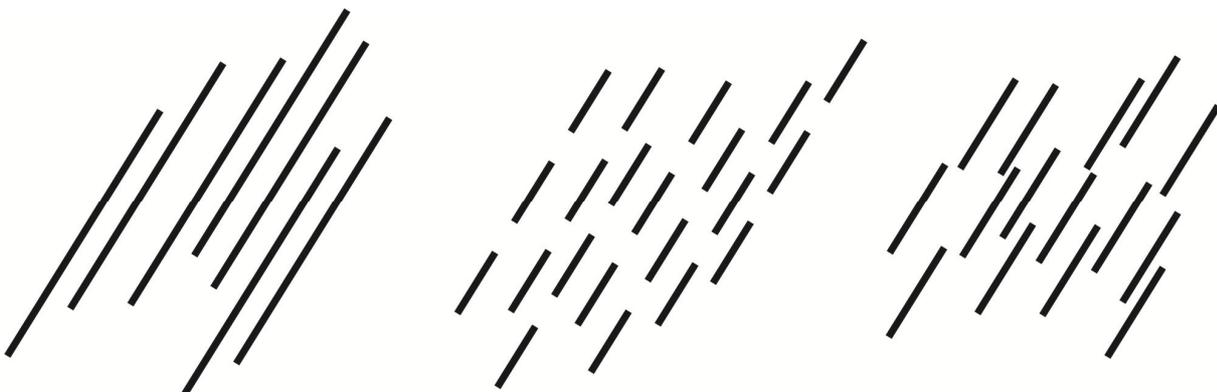
Durch die ISRM wurden folgende charakteristischen Parameter für Trennflächen bestimmt.

- (I) Orientierung
- (II) Abstand
- (III) Persistenz
- (IV) Rauigkeit
- (V) Öffnung
- (VI) Füllung
- (VII) Seehöhe
- (VIII) Anzahl der Cluster
- (IX) Blockgröße
- (X) Wandfestigkeit

**ad (I)** Die Orientierung wird in Form von Einfallrichtung und -winkel angegeben.

**ad (II)** Unter Anstand wird jener Anstand verstanden, welcher zwischen einer Trennfläche und der nächsten Trennfläche gemessen wird.

**ad (III)** Bei der Persistenz wird angegeben, ob eine Trennfläche durchlaufend ist. Also ob eine Trennfläche im gesamten sichtbaren Bereich komplett durchlaufend zu erkennen ist oder ob es Unterbrechungen in Form von intaktem Gestein gibt. Im Allgemeinen wird zwischen drei verschiedenen Typen von Persistenz unterschieden, wobei bei der ersten Art die Trennfläche im gesamten Bereich sichtbar und durchlaufend ist. Bei der zweiten Art gibt es Unterbrechungen der Trennflächen durch intaktes Gestein, wobei die Trennfläche allerdings keinen seitlichen Versatz aufweist. Bei der dritten Art gibt es nicht nur Unterbrechungen durch intaktes Gestein, sondern auch einen seitlichen Versatz, es ist also nicht möglich eine Trennfläche über die Unterbrechung hinweg mit anderen in Verbindung zu setzen, wie es bei der zweiten Art möglich ist (Abbildung 26).



**Abbildung 26 Die drei verschiedenen Arten von Persistenz**

**ad (IV)** Die Rauigkeit kann auf verschiedene Arten bestimmt werden. Eine Möglichkeit hierbei ist die Rauigkeit mittels eines Handmessgerätes direkt abzunehmen. Weiters kann die Rauigkeit auch in Form des JRC (Joint Roughness Coefficient) angegeben werden.

**ad (V)** Unter Öffnung wird der Abstand zwischen den zwei Seiten einer Trennfläche angegeben, wobei der Abstand im rechten Winkel gemessen wird.

**ad (VI)** Die Füllung ist das Material, welches sich in geöffneten Trennflächen sammelt.

**ad (VII)** Die Seehöhe bezieht sich auf den Aufschluss.

**ad (VIII)** Die Trennflächen, welche ähnliche Werte bei z.B. Einfallrichtung und -winkel aufweisen, können in sogenannten Clustern zusammengefasst werden.

**ad (IX)** Die Blockgröße beschreibt die Größe von Gesteinsblöcken, die durch die Verschneidung von Trennflächen entstehen.

**ad (X)** Die Wandfestigkeit gibt die Festigkeit des Gesteins an.

Bei den beschreibenden Parametern von Trennflächen sind die Größe, die Form, die Verschneidungen und die Termination jene Parameter, welche meistens durch minimiertes Auftreten zensiert sind (Liu, 2014a).

Um Trennflächen darzustellen und zu beschreiben braucht man die folgenden geometrischen Parameter

- (I) Ort und Anordnung im Raum
- (II) Häufigkeit/ Intensität
- (III) Orientierung
- (IV) Größe
- (V) Form
- (VI) Termination
- (VII) Eigenschaften der Trennflächenoberflächen

**ad (I)** Für den Ort und die Anordnung im Raum gibt es drei verschiedene Konzeptmodelle. Das ist zum Einen das "Enhanced Baecher Model", dieses Modell zeichnet sich dadurch aus, dass es ein Zufallsmodell ist. Das zweite Modell ist das "Nearest Neighbor Model", dieses Modell ist jenes, welches die geologischen Gegebenheiten am besten repräsentiert. Das dritte Modell ist das "Fractal Fracture Model", jenes ist eine mathematische Methode. Es gibt weiteres eine sehr starke Beziehung von der Anordnung im Raum und der Termination (Liu, 2014b).

**ad (II)** Die Intensität kann am besten mittels folgender Bezeichnung dargestellt werden

$$P_{ba}.$$

Wobei  $b$  die Dimension der Aufnahme-region darstellt, also jenen Bereich den wir betrachten und  $a$  die Dimension der Trennflächengeometrie, also jenen Bereich den wir erkennen wollen. Mittels folgender Tabelle kann man die Häufigkeit, Porosität und Dichte komplett darstellen.

			DIMENSION OF THE FRACTURE PROPERTY, $a$			
			0	1	2	3
			Fracture number	Fra. trace length	Fracture area	Fracture volume
DIMENSION OF THE SAMPLING REGION, $b$	Point measures	0	$P_{00}$ [-] Number of fracture samples per point sample of rock mass			
	Scanline	1	$^{(2)}P_{10}$ [1/m] Number of fractures per unit length of scanline (frequency or linear density)	$^{(1)}P_{11}$ [-] Total fracture aperture per unit length of scanline (lineal porosity)		
	Sampling window	2	$^{(3)}P_{20}$ [1/m <sup>2</sup> ] Number of trace centres per unit area of sampling surface (areal density or trace density)	$^{(2)}P_{21}$ [1/m] Length of fracture traces per unit area of sampling surface (areal intensity or trace intensity)	$^{(1)}P_{22}$ [-] Area of fractures per unit area of sampling plane (areal porosity)	
	Volumetric region	3	$^{(3)}P_{30}$ [1/m <sup>3</sup> ] Number of fracture centres per unit volume of rock mass (volumetric density)		$^{(2)}P_{32}$ [1/m] Area of fracture per unit volume of rock mass (volumetric intensity)	$^{(1)}P_{33}$ [-] Volume of fractures per unit volume of rock mass (volumetric porosity)
			$^{(3)}$ density	$^{(2)}$ intensity	$^{(1)}$ porosity	

**Abbildung 27 Darstellung der Zusammenhänge von den Dimensionen von  $P_{ba}$  (Liu, 2014b)**

Allerdings ist das Bestimmen der Intensität sehr schwierig und kompliziert (Liu, 2014b). Das System, welches am häufigsten verwendet wird, ist das System  $P_{32}$ , hierbei wird die Fläche der Trennfläche durch das Volumen des Gesteins dividiert. Dadurch wird das System richtungsunabhängig (Maldon& Dershowitz, 2000; Liu, 2014b). Außerdem ist  $P_{32}$  dimensionslos, dadurch allerdings auch nicht einfach direkt bei der Messung zu ermitteln. Der einfachste Weg ist über die eindimensionale Trennflächenhäufigkeit  $P_{10}$  wobei folgende Formel verwendet wird

$$P_{32} = c * P_{10}.$$

**Formel 11 Berechnung von  $P_{32}$  mittels der eindimensionalen Trennflächenhäufigkeit**

Formel 11 beruht darauf, dass  $P_{10}$  eine lineare Funktion von  $P_{32}$  ist. Heutzutage wird die Berechnung von  $P_{32}$  meistens direkt von einem Programm, etwa FracMan durchgeführt.

Hierbei wird ein Bohrloch im Programm durch die simulierten Trennflächen angelegt. Anschließend kann mit folgender Formel die wahre Häufigkeit berechnet werden

$$P_{32} = P_{10} \left( \frac{P_{32}^*}{P_{10}^*} \right)$$

**Formel 12 Berechnung der wahren Häufigkeit mittels  $P_{10}$**

Hier ist  $P_{32}$  die wahre Häufigkeit,  $P_{10}$  ist die gemessene Häufigkeit in einer bestimmten Richtung im Aufschluss,  $P_{32}^*$  ist eine Schätzung am Beginn der Modellierung, etwa 0,05, und  $P_{10}^*$  ist die simulierte lineare Häufigkeit in eine bestimmte Richtung. Bei der Modellierung mittels FracMan können, für ein genaueres Ergebnis, mehr Bohrlöcher in X-, Y- und Z-Richtung erstellt werden, wodurch man einen genaueren  $P_{10}^*$  Wert bestimmen kann und damit einen genaueren Wert für  $P_{32}$  (Liu, 2014b).

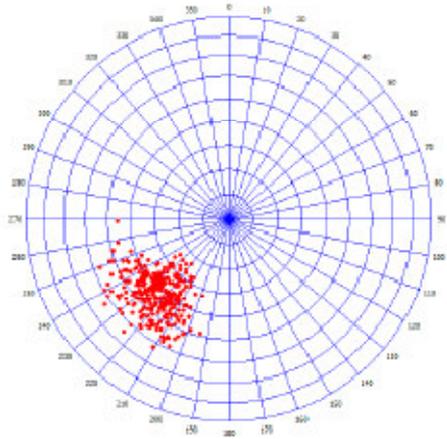
Ein weiteres Verfahren ist das Formulieren der Intensität und der Orientierung über einen Trennflächentensor (Zhang& Einstein, 2000).

**ad (III)** Die Orientierung von Trennflächen wird in den meisten Fällen mittels eines Geologenkompasses gemessen und ermöglicht das Definieren von Sets. Dies kann mittels der Verwendung eines Algorithmus und Vektor-Clustering erfolgen.

Die Trennflächenorientierung können auf verschiedene Arten statistisch beschrieben werden. Eine Möglichkeit ist die sphärisch normalverteilte Fisher Verteilung. Diese Verteilung ist durch die Schwerpunkfläche (AZ/FA) und den sogenannten Fisher Parameter (k) definiert, welcher einen Konzentrationsparameter darstellt. Wobei je kleiner der Wert, desto größer ist die Streuung. Bei der eindimensionalen Fisher Verteilung gibt es nur einen solchen Parameter. Eine weitere Verteilung ist die zweidimensionale Fisher Verteilung, hierbei gibt es zwei verschiedene Fisher Konzentrationsparameter. Insgesamt gibt es drei Möglichkeiten

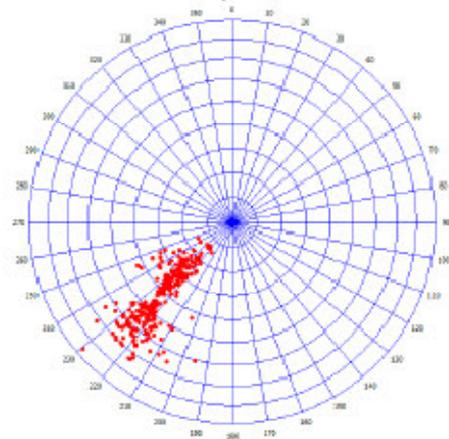
- (I)  $k_1=k_2$ , hier liegt dann eine eindimensionale Verteilung vor (Abbildung 29)
- (II)  $k_1>k_2$ , die Verteilung ist mehr um die mittlere Einfallrichtung konzentriert und um den mittleren Einfallswinkel mehr gestreut (Abbildung 28)
- (III)  $k_1<k_2$ , die Verteilung ist mehr um die mittlere Einfallrichtung gestreut und um den mittleren Einfallswinkel mehr konzentriert (Abbildung 30).

$k_1 = k_2 = 50$



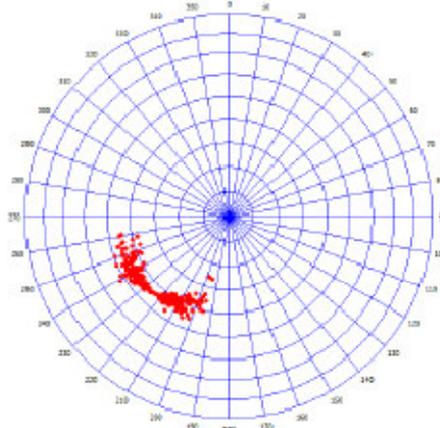
**Abbildung 29** eindimensionale Verteilung bei einem  $k$ -Wert von 50 (300 Trennflächen und Orientierungswerten von  $45^\circ/45^\circ$ )(Liu, 2014b)

$k_1 = 50, k_2 = 25$



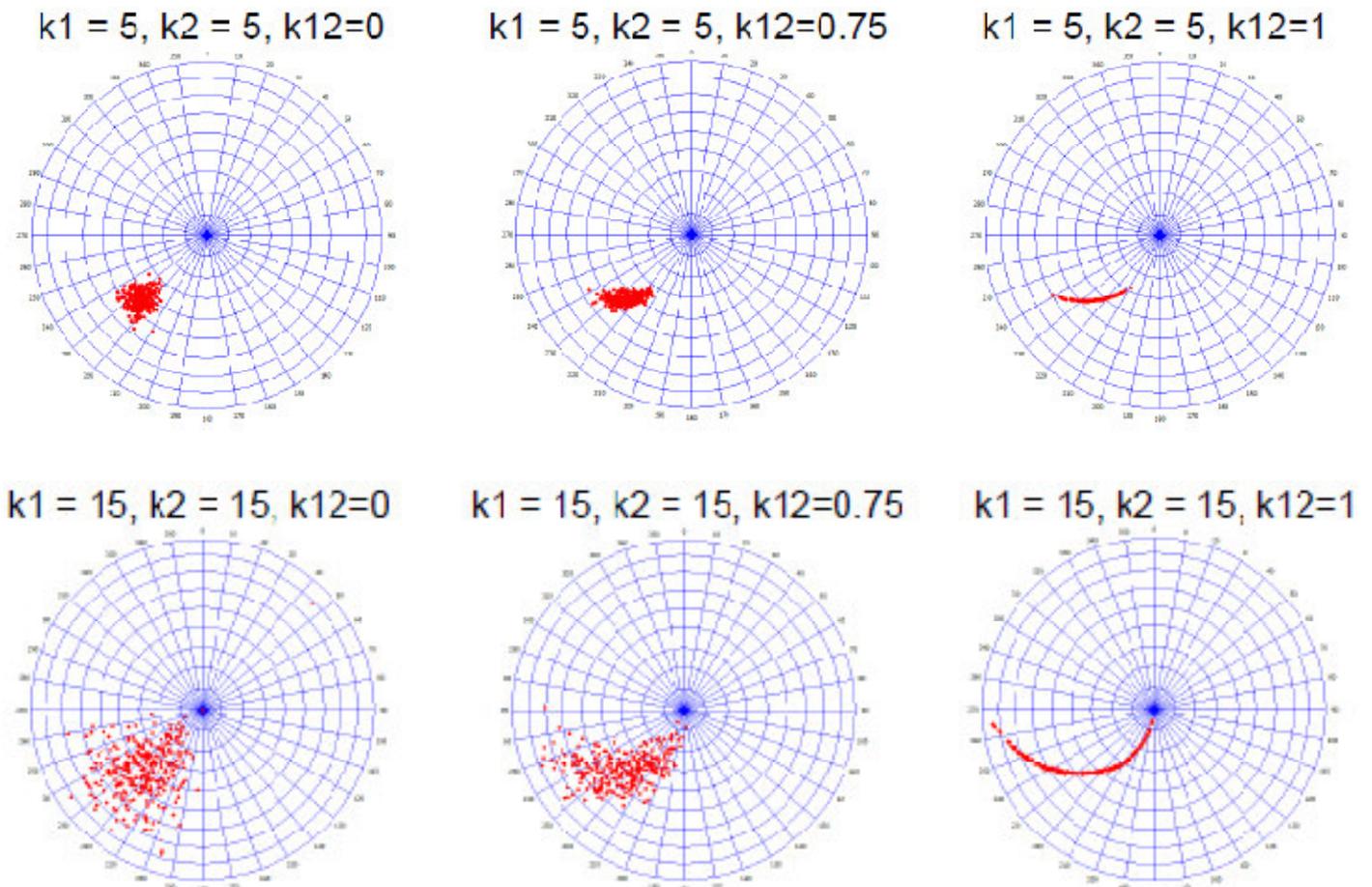
**Abbildung 28** zweidimensionale Verteilung bei einem  $k_1$ -Wert von 50 und  $k_2$ -Wert von 25 (300 Trennflächen und Orientierungswerten von  $45^\circ/45^\circ$ )(Liu, 2014b)

$k_1 = 25, k_2 = 50$



**Abbildung 30** zweidimensionale Verteilung bei einem  $k_1$ -Wert von 25 und  $k_2$ -Wert von 50 (300 Trennflächen und Orientierungswerten von  $45^\circ/45^\circ$ )(Liu, 2014b)

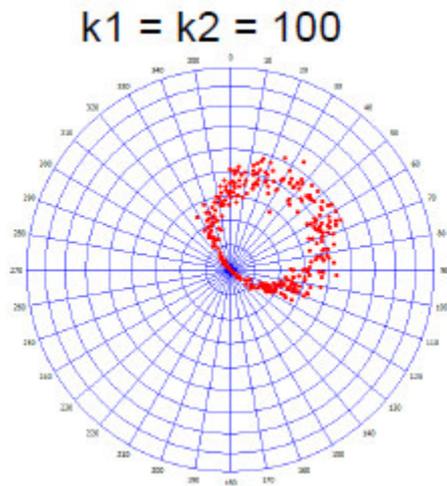
Eine weitere Verteilung ist die eindimensionale Normalverteilung. Diese Verteilung wird mittels fünf Parameter definiert, die mittlere Orientierung (Einfallrichtung und -winkel), die Standardabweichung von Einfallrichtung und -winkel,  $k_1$  und  $k_2$ , wobei  $k_1$  und  $k_2$  die Standardabweichung der Orientierung ist, und den Korrelationskoeffizient  $k_{12}$  der Einfallrichtung und -winkel. Je höher der Korrelationskoeffizient, desto konzentrierter ist die Verteilung, wobei der Wert  $k_{12}$  zwischen 0 und 1 liegt (Abbildung 31).



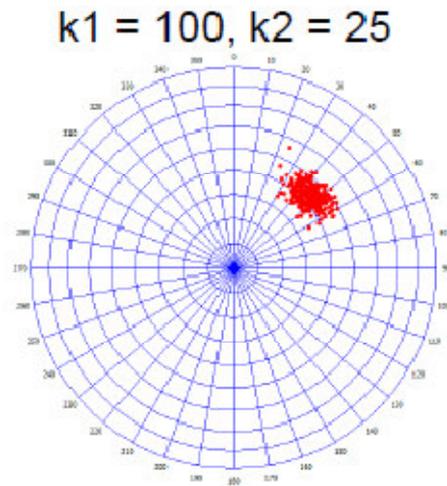
**Abbildung 31** eindimensionale Normalverteilung bei 300 Trennflächen und unterschiedlichen  $k_1$  und  $k_2$  Werten und unterschiedliche  $k_{12}$  Werte (Liu, 2014b)

Eine andere Verteilung ist die zweidimensionale Bingham Verteilung. Diese Verteilung wird mittels vier Parameter, mittlere Orientierung (Einfallrichtung und -winkel) und die Konzentrationsparameter  $k_1$  und  $k_2$  definiert. Bei dieser Verteilung gibt es, wie bei der zweidimensionalen Fisher Verteilung, drei verschiedene Möglichkeiten:

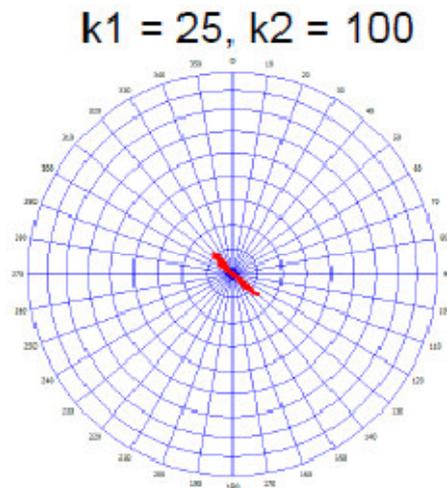
- (I)  $k_1 = k_2$ , hierbei kommt es zu einer höheren Konzentration um den Äquator bei einem Winkel von  $90^\circ$  (Abbildung 33)
- (II)  $k_1 > k_2$ , hier tritt eine bimodale Verteilung auf, wobei es eine höhere Konzentration bei einer Einfallrichtung von  $0^\circ$  und einem Winkel von  $90^\circ$  sowie bei einer Einfallrichtung von  $180^\circ$  und Winkel von  $90^\circ$  gibt (Abbildung 32)
- (III)  $k_1 < k_2$ , hier tritt eine bimodale Verteilung auf, wobei es eine höhere Konzentration bei einer Einfallrichtung von  $90^\circ$  und einem Winkel von  $90^\circ$  sowie bei einer Einfallrichtung von  $270^\circ$  und Winkel von  $90^\circ$  gibt (Abbildung 34)(Liu, 2014b)



**Abbildung 33** zweidimensionale Bingham Verteilung, wobei  $k_1$  und  $k_2$  den gleichen Wert haben (300 Trennflächen und Orientierungswerten von  $45^\circ/45^\circ$ )(Liu, 2014b)



**Abbildung 32** zweidimensionale Bingham Verteilung, wobei  $k_1$  einen Wert von 100 und  $k_2$  einen Wert von 25 haben (300 Trennflächen und Orientierungswerten von  $45^\circ/45^\circ$ )(Liu, 2014b)



**Abbildung 34** zweidimensionale Bingham Verteilung, wobei  $k_1$  einen Wert von 25 und  $k_2$  einen Wert von 100 haben (300 Trennflächen und Orientierungswerten von  $45^\circ/45^\circ$ )(Liu, 2014b)

**ad (IV)** Die Größe ist sowohl durch die reine Größe, aber auch durch die Form der Trennfläche charakterisiert. Hierbei wird meistens, wegen der Einfachheit, von einer zirkularen Scheibe ausgegangen (Priest, 1993). Dabei werden mittels der aufgenommenen Trennflächenlänge und stereologischer Berechnungen Werte für die Größe der Trennflächen ermittelt (Zhang u.a. 2002).

Allerdings ist der Nachteil bei der Annahme eines zirkularen Auftretens, dass man auch von einem regelmäßigen Auftreten in verschiedenen Richtungen und relativ gleicher Größe ausgehen muss. Dies ist allerdings in der Natur nicht der Fall. Dadurch wurde von Warburton (1980b) eine Möglichkeit postuliert in der er davon ausgeht, dass Trennflächen Parallelogramme von verschiedenen Größen sind. Für die Vereinfachung geht er davon aus, dass sie alle eine ähnliche Geometrie haben. Bei einem Vergleich dieser beiden Methoden, Auftreten als zirkuläre Scheibe oder als Parallelogramm, ist die Berechnung mit der Annahme eines Parallelogramms komplexer als jene mit der zirkularen Scheibe (Zhang u.a. 2002).

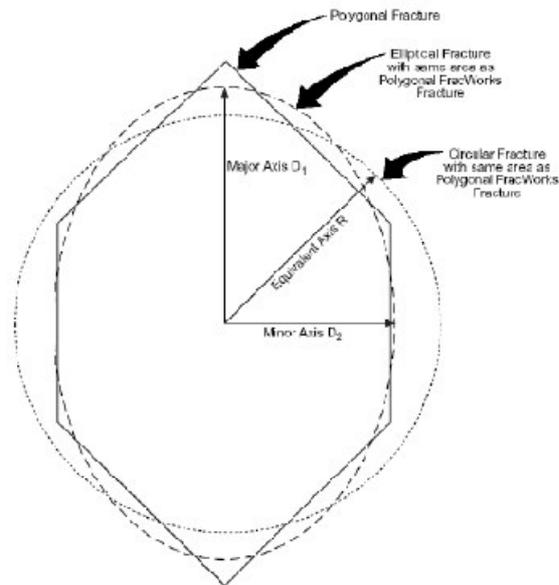
Bei Zhang u.a. (2002) geht man bei den Berechnungen von einer elliptischen Form der Trennfläche aus, wodurch es zu einer komplett anderen Ansatzweise für die stereologische Berechnung kommt, hier wird allerdings, gleich wie bei den anderen Methoden, die Trennflächenlänge verwendet.

Eine weitere Möglichkeit die Größe einer Trennfläche anzugeben ist durch den Äquivalentradius (Abbildung 35). Hierbei wird von einer Trennfläche in Form eines ebenen Polygons ausgegangen. Der Äquivalentradius ist der Radius einer radialen Scheibe der dieselbe Fläche hat wie das Polygon. Er wird folgend berechnet

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

**Formel 13 Berechnung für den Äquivalentradius**

wobei  $R_e$  der Äquivalentradius und  $A_f$  die Fläche der Trennfläche ist. Die Variation von  $R_e$  kann mit einer Quantifizierung mittels einer Wahrscheinlichkeitsverteilung von skalaren Daten konstant, exponentiell, normal, log normal, power law und bootstrap ermittelt werden (Liu, 2014b).

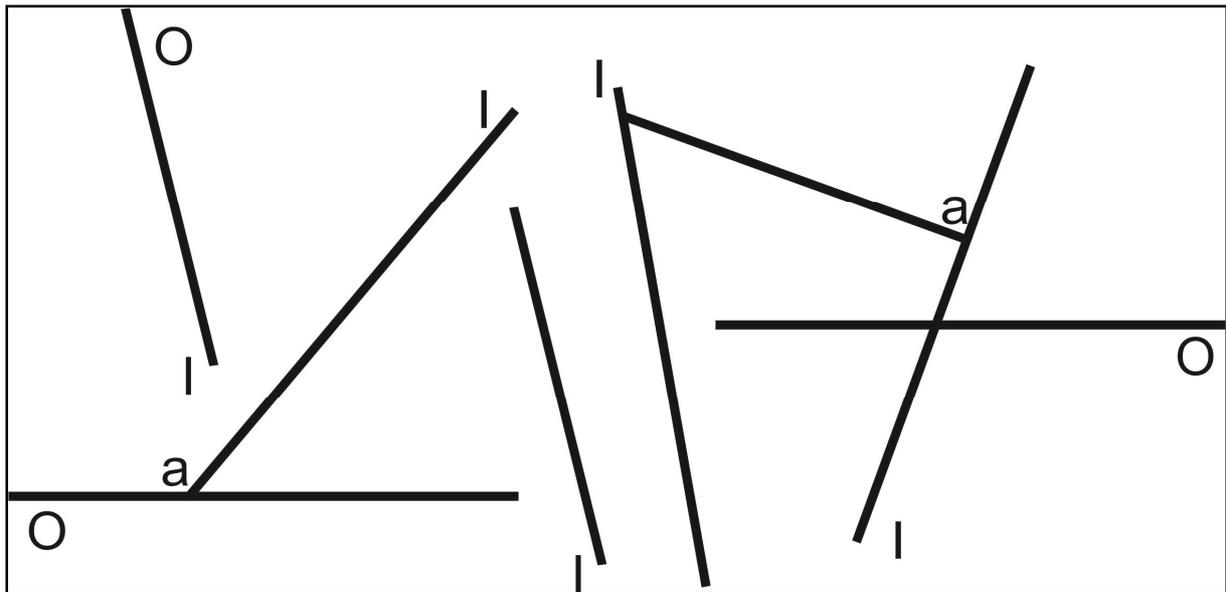


**Abbildung 35 Darstellung des Äquivalentradius (Liu, 2014b)**

**ad (V)** Die Form einer Trennfläche kann durch geomechanische Prozesse gestreckt werden. Dies kann durch den Formfaktor  $a$ , also das Verhältnis von größerer zur kleinerer Achse dargestellt werden, bei einen Rechteck gilt etwa  $a$  ist die Länge dividiert durch die Breite.

Die Variation der Magnitude von  $a$  kann mit einer Quantifizierung mittels einer Wahrscheinlichkeitsverteilung von skalaren Daten konstant, exponentiell, normal, normal von log, log normal, power law und bootstrap ermittelt werden (Liu, 2014b)

**ad (VI)** Die Termination kann in verschiedenen Arten auftreten. Eine Variante ist hierbei die "obscured-Variante", hierbei ist die Termination nicht erkennbar, sie wird mittels eines  $O$  dargestellt. Die "another-Variante", hier endet eine Trennfläche in einer anderen Trennfläche, wird mittels  $a$  gekennzeichnet. Die "intact-Variante", hier endet die Trennfläche im intakten Gestein, wird mittels  $i$  gekennzeichnet (Abbildung 36).



**Abbildung 36 Schematische Darstellung von den drei verschiedenen Termination Varianten**

Die Geometrie der Termination kann Informationen über die Form, Größe, die Lage und die tektonische Geschichte der Trennfläche liefern.

Die Termination kann mittels folgender Formel ermittelt werden

$$T(\%) = \frac{N_T}{N_T + N_R}$$

**Formel 14 Berechnung der Termination in Prozenten**

wobei  $N_T$  die Anzahl der Trennflächen mit einer Endung in einer anderen Trennfläche und  $N_R$  die Anzahl der Trennflächen mit beiden Endungen im intakten Gestein ist.

Bei Daten, welche von den Window-Sampling Methode stammen, wird folgende Formel verwendet

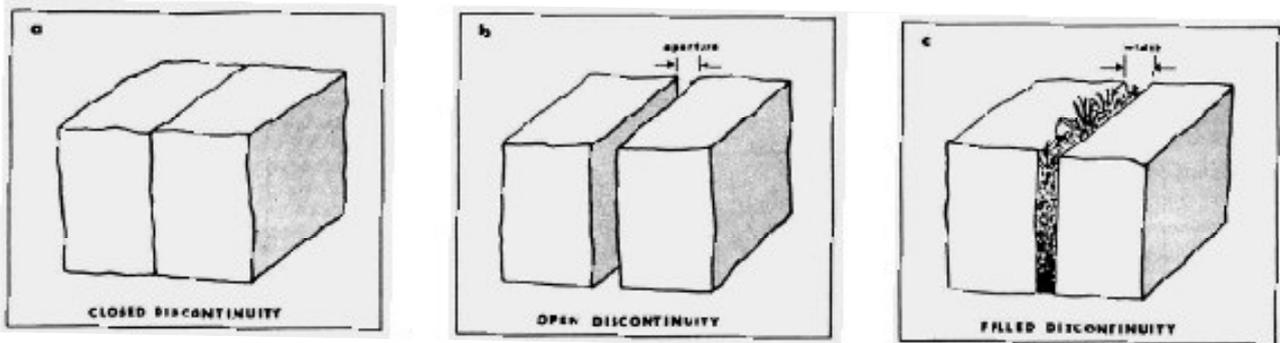
$$T_R = \frac{N_i}{2 * \text{Anzahl\_der\_gesamten\_Trennflächen}} * 100\%$$

**Formel 15 Berechnung der Termination für die Window-Methode**

wobei  $N_i$  die Anzahl der Trennflächen ist, welche in intaktem Gestein enden. Ein hoher  $T_R$  Wert gibt an, dass ein großer Anteil der Trennflächen in intaktem Gestein endet. Dadurch kann man von einer höheren Festigkeit im Gesteinsverband ausgehen (Liu, 2014b).

**ad (VII)** Die am häufigsten verwendeten und ermittelten Eigenschaften von Trennflächen sind die Öffnung, die Permeabilität, die Transmissivität, die Kompressibilität, die Kohäsion und der Reibungswinkel, auch seismische Messungen von Trennflächen werden oft durchgeführt.

Hierbei wird die Öffnung durch die ISRM folgend definiert



*Abbildung 37 Definition von Trennflächenöffnung, ISRM (Liu, 2014b)*

Die oben erklärte Parameter Orientierung, Häufigkeit/ Intensität und Größe (Äquivalenzradius) finden ihre Verwendung in verschiedenen Programmen zur Modellierung von Gebirgen. Ein Beispiel für solch ein Programm ist FracMan (Liu, 2014a).

## 5.2 Strukturgeologische Signifikanz

Bei einer Trennflächenanalyse ist es wichtig auch über die tektonische Geschichte des Gebirges und den genetischen Typ der Trennflächen zu haben. So können Ereignisse in der Vergangenheit massive Einwirkungen auf das Verhalten des Gesteins und der Trennflächen in der Gegenwart haben.

Daher werden Trennflächen auch nach ihrer mechanischen Entstehung klassifiziert. Hierbei ermöglicht dies für die Trennflächensysteme das spezifische Spannungsfeld zu bestimmen. Dadurch kann man die Entwicklung, sowohl regional als auch lokal, des Spannungsfeldes mit der Zeit besser verstehen, was für ein gutes Verständnis der gesamten Region sehr wichtig ist.

Es gibt drei große strukturgeologische Ereignisse, welche spezifische Erscheinungsformen bilden. Diese sind Abschiebung (Abbildung 38) und Übersiebung (Abbildung 39) sowie eine seitliche Verschiebung (Abbildung 40) (Liu, 2014a).

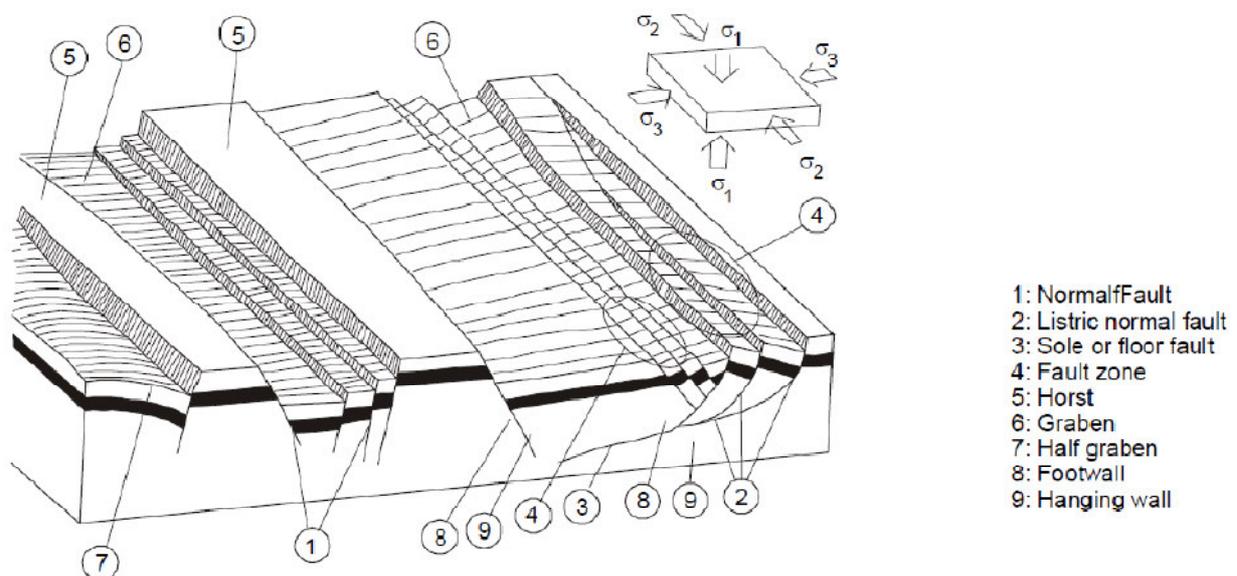


Abbildung 38 Abschiebung mit den typischen Erscheinungsformen (Liu, 2014a)

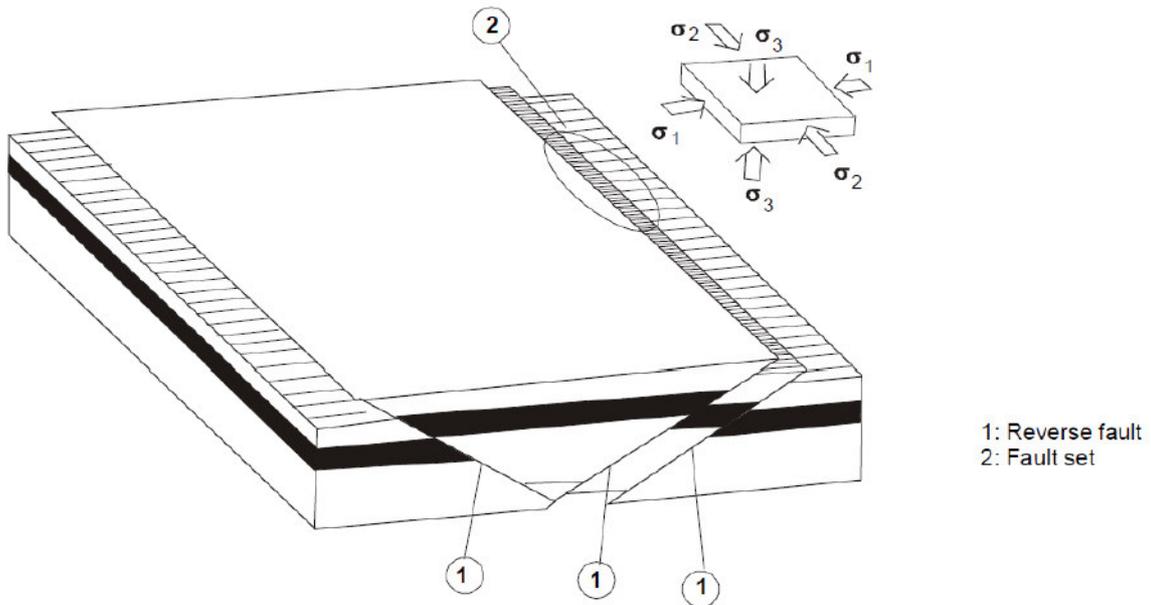


Abbildung 39 Überschiebung mit typischen Erscheinungsformen (Liu, 2014a)

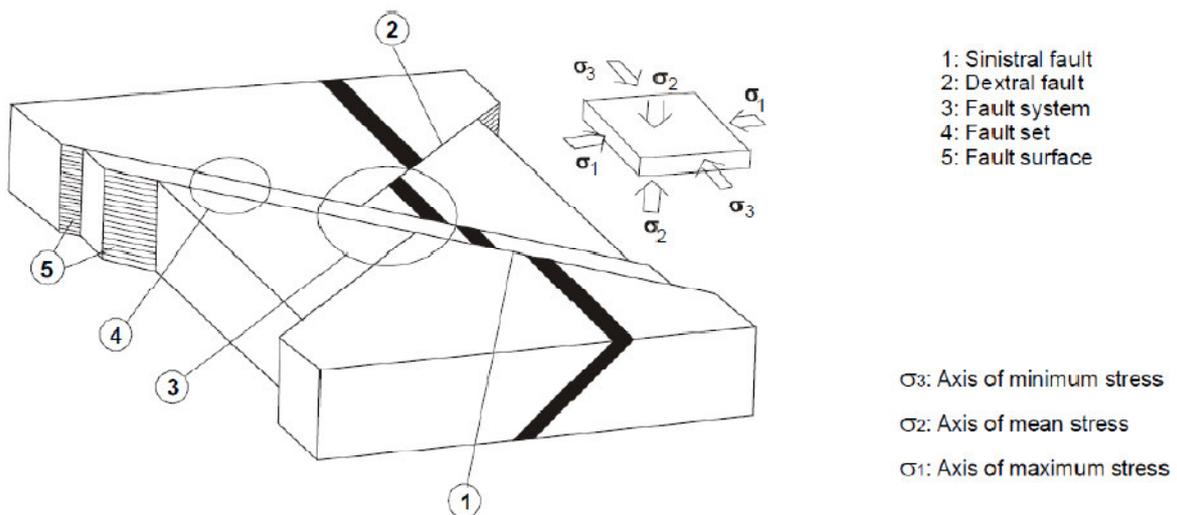


Abbildung 40 Seitlicher Versatz mit typischen Erscheinungsformen (Liu, 2014a)

Durch das Wissen über die Entstehung beziehungsweise die Geschichte, welche ein Trennflächensystem durchlebt hat, ist es möglich verschiedene Annahmen über deren Eigenschaften aufzustellen. So sind Trennflächen, welche durch Dehnung entstanden sind irregulärer als jene Trennflächen, welche bei einer seitlichen Verschiebung entstanden sind. Auch haben, durch diese Irregularität, Zugsbrüche eine höhere Kohäsion als Scherbrüche, da diese meistens eine glatte und teilweise sogar polierte Oberfläche haben.

Bei den Grenzen von Lagen, welche oft eine große Ausdehnung aufweisen, kann es eine Tonlage zwischen den Lagen geben. Welche die Eigenschaften des gesamten Gesteinsverbandes stark beeinflussen kann. Etwa durch Wasserzutritt und möglicher Quellung des Tones kann es zu einer massiven Herabsetzung der Kohäsion kommen.

Im Zusammenhang mit Trennflächen gibt es auch Klüfte. Klüfte sind hierbei Trennflächen an denen kein relativer Versatz aufgetreten ist.

Im Felsbau sind große Störungen und Störungsgestein jene Bereiche, welche die größten Herausforderungen darstellen (Liu, 2014a).

## 5.3 Erfassungsmöglichkeiten

In diesem Kapitel soll auf die verschiedenen Erfassungsmöglichkeiten von Trennflächenparametern und -eigenschaften eingegangen werden.

### 5.3.1 Scanline-Methode

Bei der Scanline-Methode wird eine Linie, etwa ein Maßband verwendet, um die Trennflächen in dessen Verlauf zu charakterisieren. Hierbei gibt es die Möglichkeit diese Methode bei einem Aufschluss durchzuführen, aber auch ist es möglich eine Scanline Aufnahme in einem Bohrloch durchzuführen.

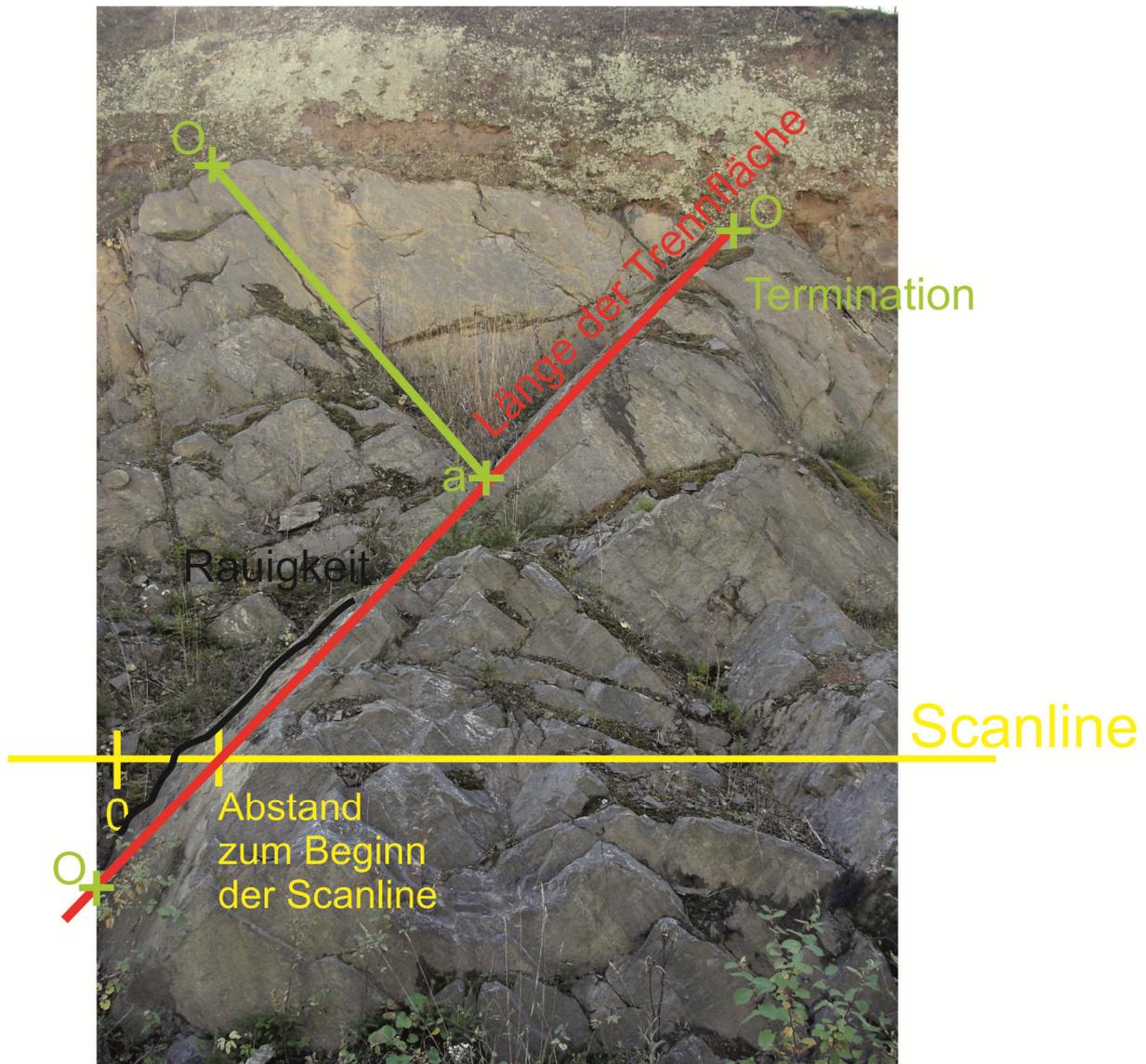
#### 5.3.1.1 Am Aufschluss

Bei einem Aufschluss wird für die Scanline üblicherweise ein Maßband über einen Bereich des Aufschlusses oder, bei kleineren Aufschlüssen, über den ganzen Aufschluss gezogen (Abbildung 41). All jene Trennflächen, welche diese Linie schneiden, werden charakterisiert und ihre Parameter aufgenommen, in Abbildung 42 ist ein Aufnahmeprotokoll zu sehen. Die üblichen Parameter hierbei sind die Orientierung, der Abstand, die Spurlänge, die Termination die Rauigkeit, die Persistenz und die Alteration. Um das Trennflächensystem mit der Scanline Methode objektiv zu erfassen sind drei orthogonal zueinanderstehende Aufschlüsse notwendig. In Abbildung 43 sind schematisch einige der Parameter am Aufschluss dargestellt.



*Abbildung 41 Scanline über den Aufschluss*





**Abbildung 43 Schematische Darstellung der typischen Parameter bei einer Scanline-Methode am Aufschluss**

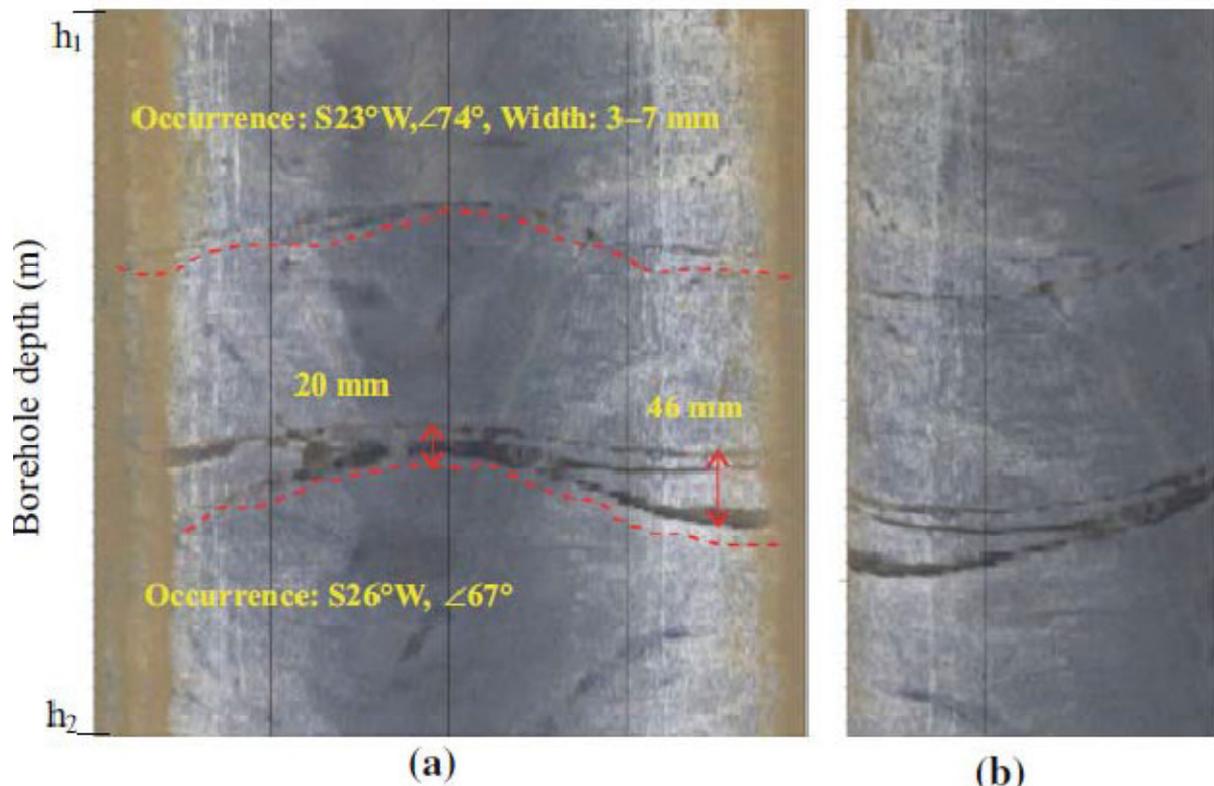
### 5.3.1.2 Im Bohrloch

Bei der Verwendung der Scanline-Methode im Bohrloch gibt es Limitierungen, etwa ist es nur möglich die Orientierung, den Abstand, die Häufigkeit die Rauigkeit und die Öffnung zu ermitteln, andere Parameter, etwa wie die Termination können in einem Bohrloch nicht aufgenommen werden.

Bei der Verwendung der Scanline-Methode in einem Bohrloch wird gleich verfahren wie bei einem Aufschluss. Bei einer Aufnahme im Bohrloch wird entlang der Bohrachse eine imaginäre Linie durch das Bohrloch gezogen und alle schneidenden Trennflächen aufgenommen. Die Parameter werden mittels Borehole Digital Optical Televiewer

aufgenommen. Hierbei wird ein kontinuierliches Bild des Bohrloches, 360° und in Farbe aufgenommen, welches es etwa ermöglicht Veränderungen in der Lithologie direkt zu erkennen.

Der Durchmesser des Bohrloches sollte unter 110mm sein, da dadurch die besten Ergebnisse erzielt werden. Weiteres sollte bei der Bohrung ein Bohrprotokoll geführt werden und es sollte das Bohrloch auch vor den Messungen gespült werden um eventuell noch vorhandene Rückstände vom Bohren zu entfernen.



**Abbildung 44** Beispielbild von einem Borehole Digital Optical Televiewer mit einer schneidenden Trennfläche (Li u.a. 2013)

In Abbildung 44 ist eine Trennfläche, welche durch Borehole Digital Optical Televiewer aufgenommen wurde, zu sehen. Im Bereich a) ist die entrollte Aufnahme in b) ein virtueller Zylinder. Die gestrichelte Linie zeigt den Verlauf der Trennfläche, durch die Pfeile wird die Öffnung der Trennfläche angezeigt (Li u.a., 2013; Liu, 2014a).

### 5.3.2 Window-Sampling Methode

Bei der Window-Sampling Methode wird, anders als bei der Scanline-Methode, ein Aufschluss und nicht eine Linie herangezogen. Mit den Fernerkundungsmöglichkeiten kann man auf einen "Sampling-Window" die Trennflächeneigenschaften, wie Orientierung, 3D

Abstand, die Flächengröße und die Termination direkt aufnehmen. Bis jetzt ist allerdings diese Methode meist für die Einschätzung der scharbezogenen Trennflächenspurlänge angewandt worden (Maldon, 1998; Zhang& Einstein, 1998).

#### **5.3.2.1. Am Aufschluss**

Bei der Verwendung der Window-Sampling Methode am Aufschluss wird, anders als bei der Scanline-Methode, nicht eine Linie gezogen, sondern ein Fläche bestimmt. Hierbei werden die Trennflächen in diesem Bereich charakterisiert, auch jene die über diese Fläche hinaus gehen. Man kann dabei eine beliebige oder eine kreisförmige Fläche verwenden (Priest, 1993).

#### **5.3.2.2 Photogrammetrie**

Bei der Computer-Version der Photogrammetrie wird mittels einer Software aus zwei aufgenommenen Bildern ein 3D Bild erzeugt. Für das Generieren des 3D Bildes ist es notwendig Bezugspunkte im späteren Bild zu platzieren. Es gibt hierbei Unterschiede zwischen den verschiedenen Aufnahmesystemen.

Bei der Verwendung des Systems ShapeMetrix (3G Software & Measurement GmbH (2006)) werden insgesamt drei Bezugspunkte im Bereich des zukünftigen Bildes platziert. Wobei zwei dieser Punkte auf einer Vorrichtung übereinander angeordnet werden. Der genaue Abstand zwischen diesen Punkten muss für die Auswertung im Anschluss bekannt sein. Der dritte Bezugspunkt wird in einiger Entfernung aufgestellt (Abbildung 45).



*Abbildung 45 Anordnung für eine Aufnahme für die Photogrammetrie (Liu, 2013)*

Anschließend werden zwei Fotos des Bereiches aufgenommen, wobei das zweite Foto mit ca. 10% seitlicher Abweichung von der Entfernung vom Aufschluss aufgenommen wird. Für die anschließende Analyse sollte irgendwo vermerkt werden, welches das rechte bzw. das linke Foto ist. Die Orientierung zwischen den unterem Bezugspunkt, bei den vertikalen Punkten und dem etwas entfernten Punkt muss gemessen und ebenfalls notiert werden, da diese Daten im Anschluss benötigt werden. Zuerst wird über die Software das 3D Bild erzeugt, wobei es beim Vertauschen des rechten und linken Bildes zu Problemen kommt. Das erzeugte 3D Bild muss dann mit Hilfe der aufgenommenen Orientierung referenziert werden (3G Software & Measurement GmbH (2006)).

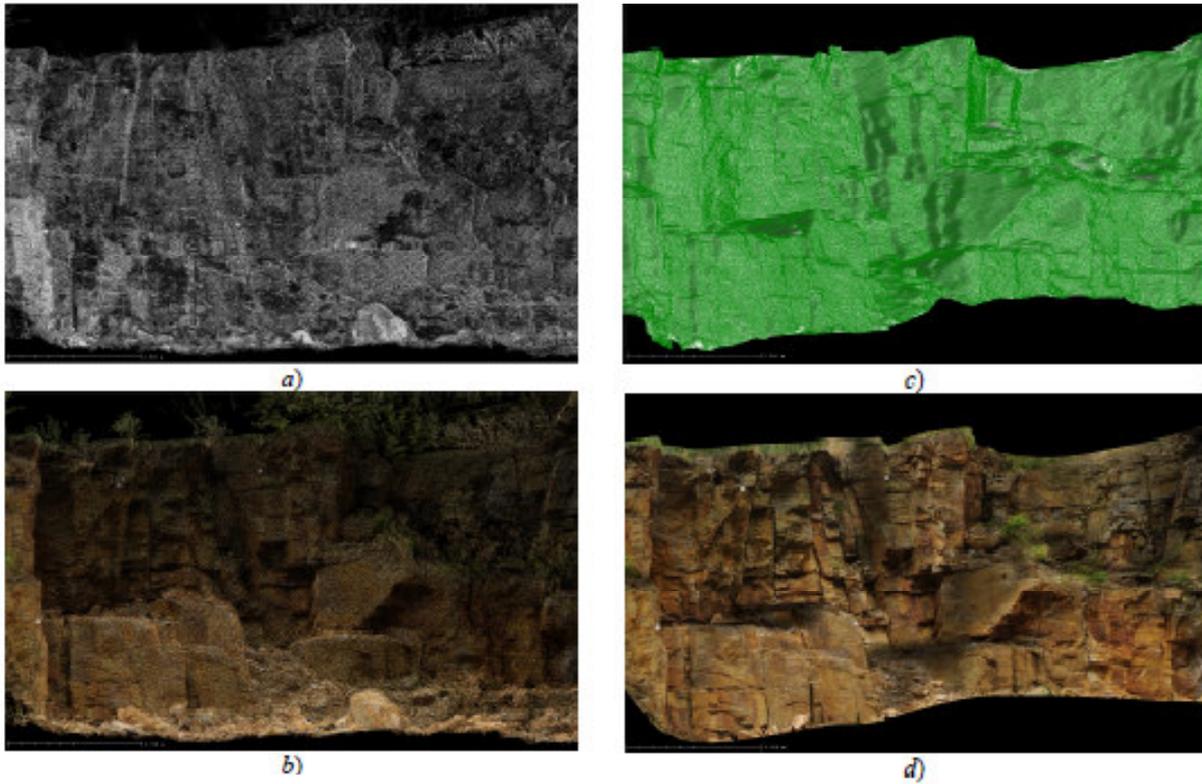
### 5.3.2.3 LiDAR

Bei LiDAR (Light Detection And Ranging) wird mittels eines Laserscanners ein definierter Bereich, etwa der Aufschluss abgetastet. Der genaue Aufnahmeaufbau ist hierbei wieder von dem verwendeten Gerät abhängig.

Bei der Verwendung eines Rigel 3D TLS LMS-Z620 Scanners sollten im Aufnahmebereich verstreut reflektierende Ziele vorhanden sein. Weiteres muss von diesen Zielen und vom Laser die genaue GPS-Position bekannt sein. Dann kann im Anschluss verschiedene Modelle erstellt werden (Abbildung 47). Die besten Ergebnisse hierbei bekommt man mittels RTK-GPS. Bei der Aufnahme sollte besonders darauf geachtet werden, dass der Laser absolut waagrecht steht (Abbildung 46). Im Anschluss muss die erzeugte Punktwolke noch mittels der GPS- Daten georeferenziert werden (Liu, 2014b).



*Abbildung 46 Aufnahme von Daten mittels Scanner und RTK-GPS (Liu, 2014b)*



**Abbildung 47 LiDAR Model eines Aufschlusses, a) reflektiertes Histogramm b) Punktwolke mit realen Farben c) netzartiges kontinuierliches Model d) strukturiertes kontinuierliches Model (Liu& Kieffer, 2011)**

## 5.4 Verfahren für Datenauswertung

In diesem Kapitel soll nun auf die Auswertung der in Kapitel 5.3 aufgenommenen Daten erläutert werden.

### 5.4.1 Das Fisher Modell für Orientierungsdatensätze

Die folgenden Berechnungen werden verwendet um die Orientierungsdaten von den einzelnen Trennflächensystemen statistische auszuwerten und die spezifischen statistischen Parameter dieser Systeme zu erhalten. Dies wird durchgeführt um die Streuung einzelner Trennflächensysteme zu bestimmen.

Für ingenieurgeologische Orientierungssysteme von einem bestimmten genetischen Typ sind folgende Parameter für technische Anwendungen zu ermitteln: neben Schwerpunkt (Azimuth, Einfallswinkel) sind es spezifischen Parameter welche für die Quantifizierung der Streuung verwendet werden.

Diese spezifischen Parameter sind der prozentuale Regelungsgrad, der Konzentrationsparameter (k), der sphärische Öffnungsgrad und der Vertrauenskegel. Üblicherweise werden diese Parameter direkt vom Programm (Sphaira oder ShapeMetrix) berechnet und ausgegeben (Abbildung 48).

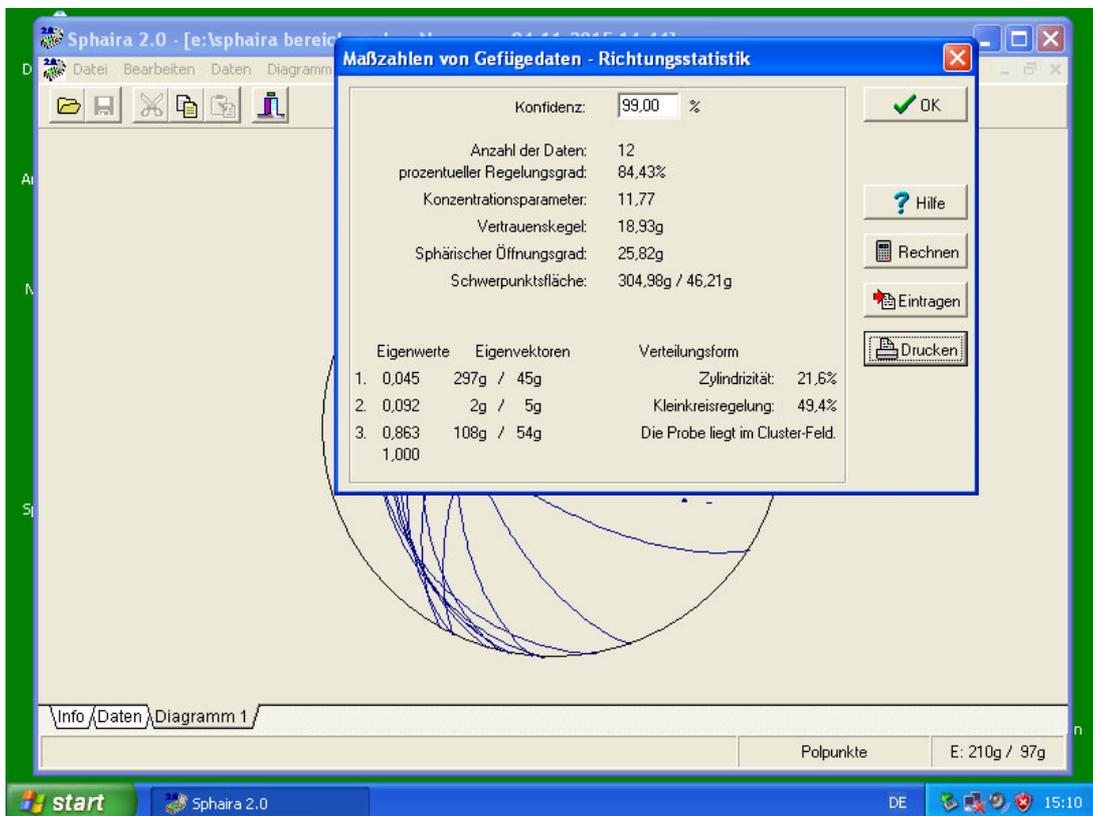


Abbildung 48 Automatisch berechnete spezifischen Parameter der Orientierungsdaten, Sphaira

Der Schwerpunkt, Azimuth und Einfallswinkel, wird über mehrere verschiedene Formel berechnet. Dies wird in Kapitel 5.4.2.1 Am Aufschluss, genauer in Formel 20, Formel 21, Formel 22, Formel 23 erklärt.

Der prozentuale Regelungsgrad (R %) wird folgend berechnet

$$R\% = \frac{2|\bar{R}| - n}{n} \cdot 100,$$

**Formel 16 Berechnung des prozentuale Regelungsgrad**

wobei n die Anzahl der Trennflächen und die Berechnung von  $|\bar{R}|$  ebenfalls in Kapitel 5.4.2.1 Am Aufschluss, erklärt wird.

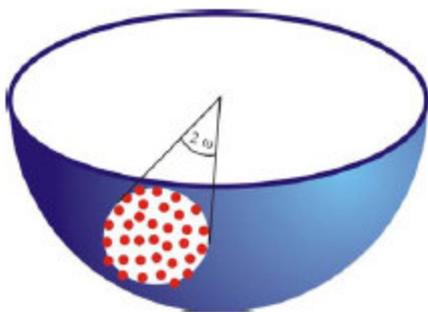
Der Konzentrationsparameter (k) für eine sphärische Normalverteilung wird folgend berechnet

$$k = \frac{n-1}{n - |\bar{R}|},$$

**Formel 17 Berechnung des Konzentrationsparameters**

wobei n wieder die Anzahl der Trennflächen und die Berechnung von  $|\bar{R}|$  in Kapitel 5.4.2.1 Am Aufschluss, erklärt wird. Weiters soll für den Konzentrationsparameter auch auf Kapitel 5.1 Charakteristische Trennflächenparameter im Felsbau, verwiesen werden.

Der sphärische Öffnungsgrad ( $\omega$ ) (Abbildung 49) wird folgend berechnet



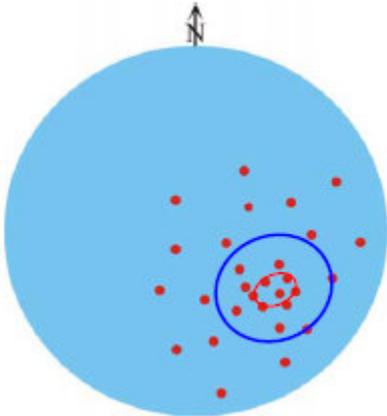
$$\omega = \arcsin \sqrt{2 \frac{1 - \frac{1}{k}}{n}},$$

**Formel 18 Berechnung des sphärischen Öffnungsgrades**

**Abbildung 49 Darstellung des sphärischen Öffnungsgrades (Liu, 2014a)**

wobei n die Anzahl der Trennflächen und k der Konzentrationsparameter ist.

Der Vertrauenskegel ( $\vartheta$ ) (Abbildung 50) wird folgend berechnet



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

**Formel 19 Berechnung des Vertrauenskegel**

**Abbildung 50 Darstellung des Vertrauenskegels für einige Trennflächen (Liu, 2014a)**

wobei hier wiederum  $n$  die Anzahl der Trennflächen, die Berechnung von  $|\overline{R}|$  wird in Kapitel 5.4.2.1 Am Aufschluss, erklärt wird.

Diese Berechnungen werden sowohl bei der Scanline- Methode als auch bei der Photogrammetrie und LiDAR angewendet. Meistens allerdings, wie bereits erwähnt, werden die Berechnungen direkt von einem Programm durchgeführt (Liu, 2014a).

## 5.4.2 Scanline-Methode

### 5.4.2.1 Am Aufschluss

Die Daten, welche an einem Aufschluss mittels Scanline-Methode, Kapitel 5.3.1 Scanline-Methode, genommen wurden, müssen noch weiter berechnet werden um die Daten verwenden zu können. So muss sowohl die Orientierung, als auch die Abstände berechnet werden. Dies erfolgt üblicherweise mittels einer mathematischen Software, etwa Microsoft Excel.

Zur Ermittlung der wahren Einfallrichtung und -winkel wird zuerst  $A_R$ , für die Einfallrichtung und  $\Phi$  für den Einfallswinkel berechnet. Hierfür werden zuerst der mittlere Wert von der Einfallrichtung und -winkel eines Trennflächensystems verwendet, um die Koordinaten zu erhalten, wobei  $\alpha_i$  für die Einfallrichtung und  $\varphi_i$  für den Einfallswinkel einer Trennfläche steht (Formel 20).

$$x_i = \cos \alpha_i \cdot \cos \varphi_i$$

$$y_i = \sin \alpha_i \cdot \cos \varphi_i$$

$$z_i = \sin \varphi_i$$

**Formel 20 Berechnung der Koordinaten der Trennfläche, Scanline-Methode am Aufschluss**

Anschließend wird über den Vektorbetrag von R und den Koordinaten der Trennfläche verrechnet mit R, die Werte  $A_R$  und  $\Phi$  der Trennfläche berechnet (Formel 21, Formel 22, Formel 23).

$$|\bar{R}| = \sqrt{\left(\sum_1^n x_i\right)^2 + \left(\sum_1^n y_i\right)^2 + \left(\sum_1^n z_i\right)^2}$$

**Formel 21 Berechnung des Vektorbetrags von R**

$$x_R = \frac{1}{|\bar{R}|} \sum_1^n x_i$$

$$y_R = \frac{1}{|\bar{R}|} \sum_1^n y_i$$

$$z_R = \frac{1}{|\bar{R}|} \sum_1^n z_i$$

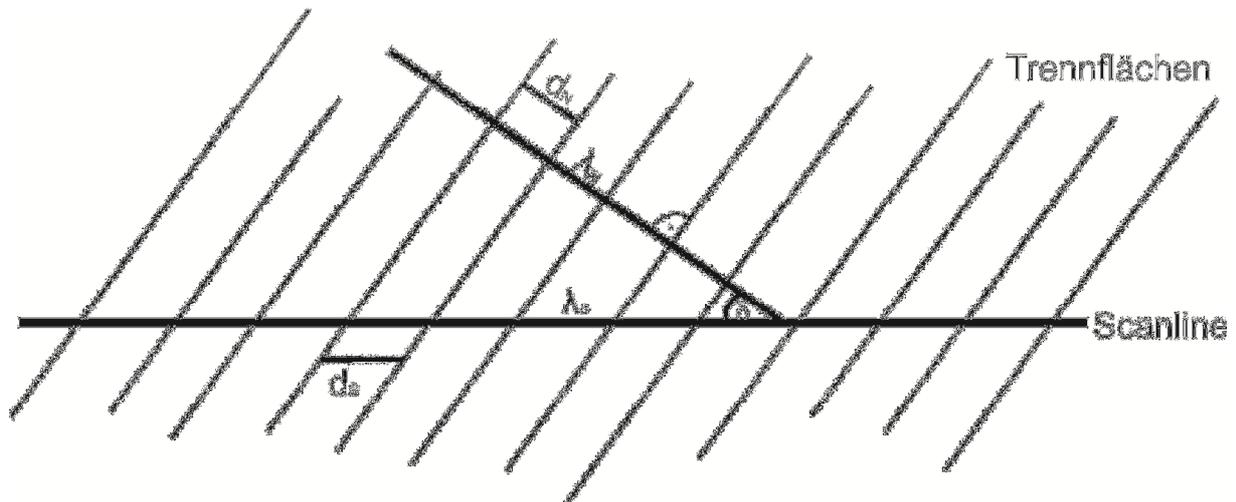
**Formel 22 Berechnung der Koordinaten der Trennfläche verrechnet mit R**

$$A_R = \arctan \frac{y_R}{x_R}$$

$$\phi = \arcsin z_R$$

**Formel 23 Berechnung von  $A_R$  und  $\Phi$**

Die Werte  $A_R$  und  $\Phi$  sind die umgerechneten Werte für die Orientierung.



**Abbildung 51 Schematische Darstellung einer Scanline-Datenaufnahme**

Anschließend können mittels Formel 24 die Winkel  $\alpha_n$  und  $\beta_n$  berechnet werden, welche für die Berechnung des Abstandes der einzelnen Trennflächen benötigt werden. In Abbildung 51 ist eine schematische Darstellung einer Scanline-Datenaufnahme sowie die im Anschluss erklärten Daten dargestellt.

$$\alpha_n = A_R \pm 180^\circ$$

$$\beta_n = 90^\circ - \Phi$$

**Formel 24 Berechnung von  $\alpha_n$  und  $\beta_n$**

Für den nächsten Schritt der Berechnung wird die Einfallsrichtung und -winkel der Scanline benötigt, dieser muss während der Datenaufnahme im Gelände genommen werden. Diese Werte werden benötigt um den Winkel  $\delta$  zu berechnen (Formel 25).

$$\cos \delta = |\cos(\alpha_s - \alpha_n) \cdot \cos \beta_s \cdot \cos \beta_n + \sin \beta_s \cdot \sin \beta_n|$$

$$\delta = \arccos(\cos \delta)$$

**Formel 25 Berechnung von  $\delta$**

Im Anschluss wird die Summe aller zuvor aufgenommenen Abstände durch die Anzahl der Abstände dividiert, Formel 26.

$$d_s = \sum_{s=1}^n \frac{d_s}{n}$$

**Formel 26 Berechnung des Abstandes an der Scanline**

Für die Berechnung des Abstandes an der Normale zu den Flächen wird das Ergebnis von Formel 26 mit dem Ergebnis von Formel 25 multipliziert, Formel 27.

$$d_n = d_s \cdot \cos \delta$$

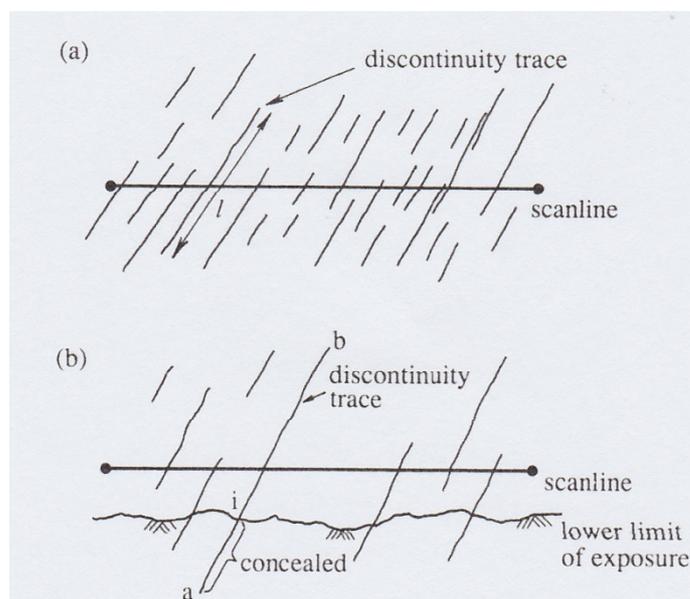
**Formel 27 Berechnung des Abstandes an die Normale auf die Fläche**

Nun kann die Häufigkeit berechnet werden. Hierfür wird einfach durch das Ergebnis von Formel 27 dividiert, Formel 28 (Liu, 2014a).

$$\lambda_n = \frac{1}{d_n}$$

**Formel 28 Berechnung der Häufigkeit**

Weiters ist es nötig die wahre Spurlänge der Trennflächen, also die tatsächliche Länge der Trennfläche, zu ermitteln. Im Aufschluss gibt es allerdings die Limitierung, dass die Trennflächen sich teilweise in den Untergrund fortsetzen. In Abbildung 52 ist a) eine theoretische Verteilung von Trennflächen über eine Scanline dargestellt. In b) ist eine typisch wahre Trennflächenverteilung über eine Scanline dargestellt. Wobei hier auch das oben erwähnte Problem mit den sich in den Untergrund fortsetzenden Trennflächen dargestellt ist.



**Abbildung 52 Spurlänge bei einer Aufnahme durch eine Scanline a) idealisierte Darstellung b) wahre Darstellung**

**(Priest, 1993)**

Die Methode die Spurlänge zu bestimmen ist jene nach Priest (1993). Bei dieser Methode muss zuerst eine Verteilung der erkennbaren Spurlängen erstellt werden. Im Anschluss kann, je nachdem welche Verteilung vorliegt, die mittlere Spurlänge berechnet werden. Die allgemeine Formel zur Berechnung der Spurlänge nach Priest (1993) ist

$$F(l) = \int_0^l f(m) dm$$

**Formel 29 Allgemeine Formel zur Bestimmung der theoretischen Spurlängenverteilung**

wobei  $f(m)$  der Mittelwert der gesamten Spurlängenverteilung und  $F(l)$  die kumulative Verteilung von  $f(m)$  ist. Für typische Verteilungsformen gibt es bereits Formeln, in die nur mehr eingesetzt werden muss. Bei einer triangulären Verteilung wird folgende Formel verwendet

$$\mu_L = \frac{4}{3} \mu_{hL}$$

**Formel 30 Berechnung der mittleren Spurlänge bei einer triangulären Verteilung**

Bei einer uniformen Verteilung wird folgende Formel verwendet

$$\mu_L = \frac{3}{2} \mu_{hL}$$

**Formel 31 Berechnung der mittleren Spurlänge bei einer uniformen Verteilung**

Bei einer negativen Exponentialverteilung wird folgende Formel verwendet

$$\mu_L = \mu_{hL}$$

**Formel 32 Berechnung der mittleren Spurlänge bei einer negativen Exponentialverteilung**

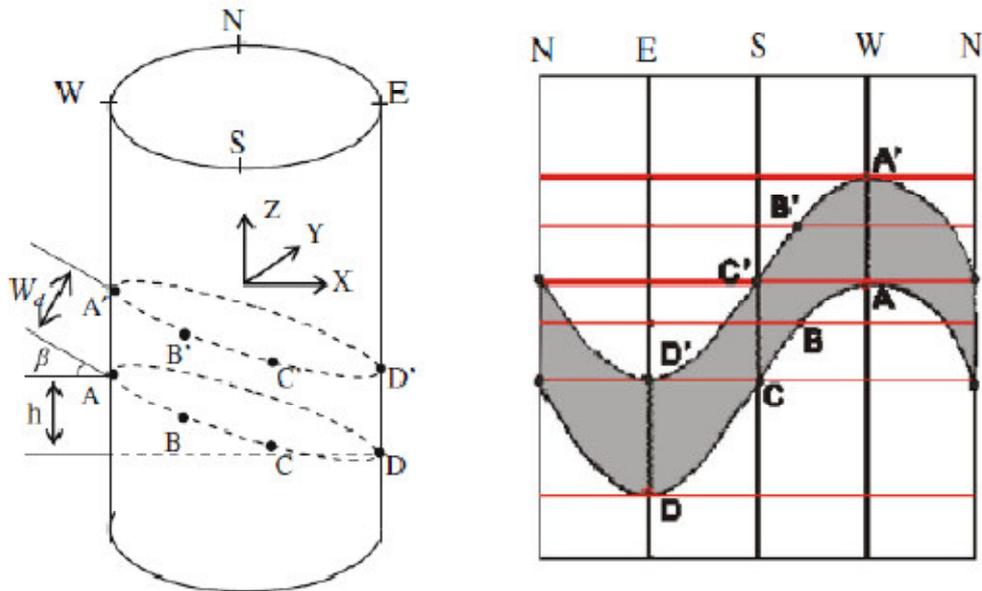
Bei all diesen Formeln ist  $\mu_L$  der Mittelwert der echten Spurlänge und  $\mu_{hL}$  der Mittelwert der Spurlänge (Priest, 1993).

**5.4.2.2 In der Bohrung**

Die Datenauswertung für die Daten, welche aus einer Scanline-Methode in einer Bohrung stammen, Kapitel 5.3.1.2 Im Bohrloch, wird folgend durchgeführt.

Die Orientierung einer Trennfläche kann dadurch ermittelt werden, dass die Trennfläche von den Aufnahmen des Borehole Digital Optical Televiewer entrollt wird. Für die weiteren Berechnungen der Orientierung wird angenommen, dass die Z-Achse die

zentrale Achse des Bohrloches ist und die positive Richtung der Achse nach oben zeigt. Sowie die X- und Y-Achse in Richtung Osten und Westen zeigen (Abbildung 53).



**Abbildung 53** Darstellung einer Trennfläche im Bohrloch und die "entrollte" Trennfläche zur Bestimmung der Orientierung (Li u.a. 2013)

Zur Berechnung der Orientierung werden 3 nicht kollineare Punkte, Punkte die sich also nicht auf eine Linie befinden, wie etwa A, C und D aus Abbildung 53, verwendet. Anschließend werden zwei Vektoren gebildet  $V_1$  und  $V_2$ , wobei

$$\begin{aligned} \overline{V}_1 &= \overline{AC} \\ \overline{V}_2 &= \overline{AD} \end{aligned}$$

**Formel 33** Vektoren zur Bestimmung der Orientierung einer Trennfläche im Bohrloch

Dann wird der Normalvektor der Trennfläche bestimmt

$$\overline{N} = \overline{V}_1 * \overline{V}_2,$$

**Formel 34** Berechnung Normalvektor der Trennfläche

um dann den Einheitsvektor der Trennfläche zu bestimmen

$$\overline{N}_E = \frac{\overline{N}}{\|\overline{N}\|}$$

**Formel 35 Einheitsvektor der Trennfläche**

Wenn dann die Z-Komponente des Einheitsvektors kleiner gleich null ist, kann der Gegenvektor ( $\overline{N}_0 = \{X_0, Y_0, Z_0\}$ ) folgend dargestellt werden

$$\overline{N}_0 = -\overline{N}_E$$

**Formel 36 Darstellung des Gegenvektor mittels des Einheitsvektors**

Dann kann der Einfallswinkel mit folgender Formel berechnet werden

$$\beta = \cos^{-1} Z_0$$

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{h}{d}\right),$$

**Formel 37 Berechnung des Einfallswinkels**

wobei h die vertikale Distanz zwischen A und D ist, und d der Durchmesser des Bohrloches ist. Weiters kann die Einfallsrichtung der Trennfläche berechnet werden (Formel 38), indem man annimmt, dass  $\overline{N}_P = \{X_P, Y_P\}$  eine Projektion von  $N_0$  an die XY Fläche ist.

$$\alpha = \begin{cases} 90^\circ - \tan^{-1} \frac{Y_P}{X_P} & \text{wenn } X_P > 0 \\ 90^\circ & \text{wenn } X_P = 0 \text{ und } Y_P > 0 \\ 270^\circ - \tan^{-1} \frac{Y_P}{X_P} & \text{wenn } X_P < 0 \\ 270^\circ & \text{wenn } X_P = 0 \text{ und } Y_P < 0 \end{cases}$$

**Formel 38 Formel zur Berechnung des Einfallswinkels**

Weiters lässt sich neben der Orientierung auch die eventuelle Öffnung einer Trennfläche messen. Zur Berechnung der Öffnung wird einfach der Abstand zwischen zwei Punkten, etwa A und A' gemessen (Abbildung 53) (Li, 2013).

Um die Häufigkeit zu berechnen kann man die Methode nach Wang (2005) verwenden. Hierbei wird ein Umformungsfaktor,  $C_{13}$  und  $C_{23}$  eingeführt, diese Umformungsfaktoren können anschließend verwendet werden, um die Häufigkeit zu berechnen

$$P_{10}C_{13} = P_{32}$$

$$P_{21}C_{23} = P_{32}$$

**Formel 39 Berechnung der Häufigkeit mittel Umformungsfaktor nach Wang**

Diese Umformungsfaktoren können mittels folgenden Formeln bestimmt werden

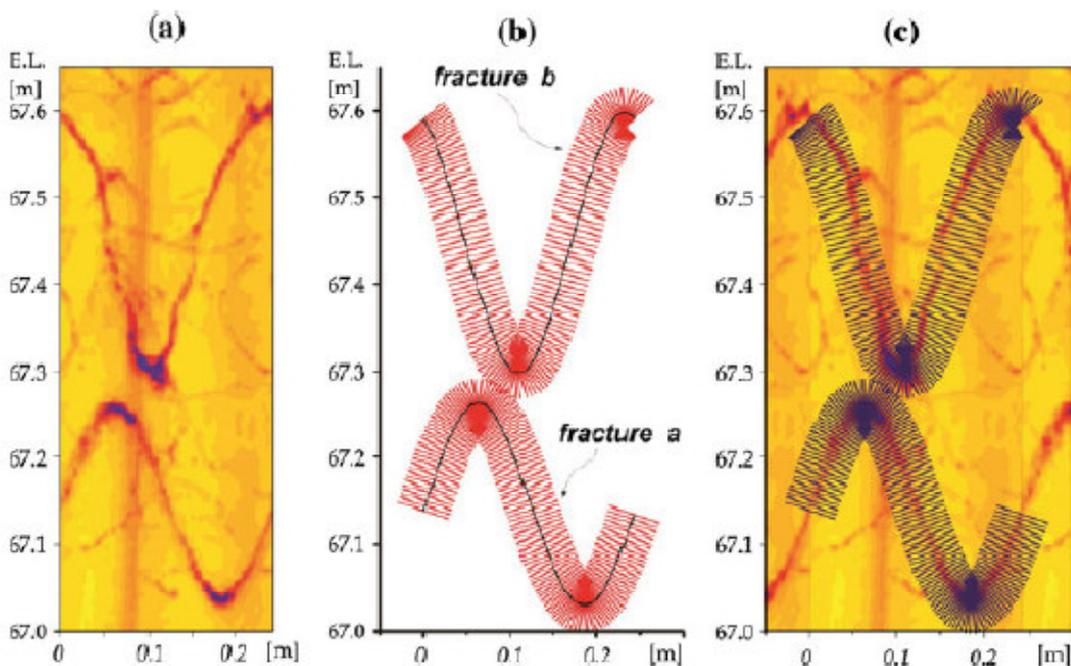
$$C_{13} = \left[ \int_0^x |\cos \alpha| f_A(\alpha) d\alpha \right]^{-1}$$

$$C_{23} = \left[ \int_0^x \sin \beta f_B(\beta) d\beta \right]^{-1}$$

**Formel 40 Berechnung der Umformungsfaktoren nach Wang**

Wobei  $\alpha$  und  $\beta$  Funktionen der Trennflächenorientierung und  $f_A$  und  $f_B$  Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen sind.

Zur Bestimmung der Rauigkeit in Trennflächen muss zuerst die Trennfläche in Form einer Linie dargestellt werden (Abbildung 54, Bild a). Anschließend wird eine Messskala über die Trennfläche gelegt (Abbildung 54, Bild b,c), dann wird das Bild der Trennfläche entrollt (Abbildung 55). Mit Hilfe der Messskala kann dann die Trennfläche und ihr Verlauf genau dargestellt werden. Die dadurch erhaltene Rauigkeit kann dann, gleich wie bei den Daten von einer Scanline-Aufnahme am Aufschluss, interpretiert werden (Abbildung 55) (Bae u.a. 2011).



**Abbildung 54 Abnahme der Rauigkeit in einen Bohrloch (Bae u.a. 2011)**

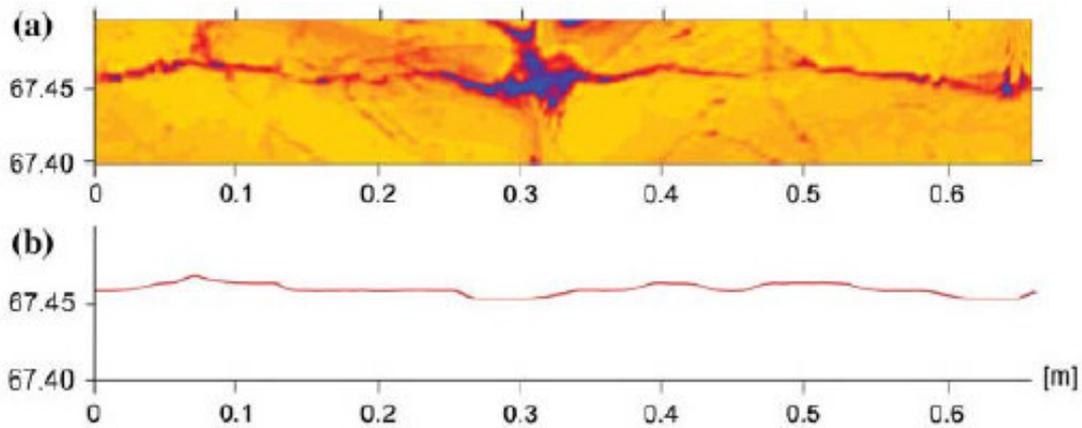


Abbildung 55 Entrollte Trennfläche und das Rauigkeitsprofil (Bae u.a. 2011)

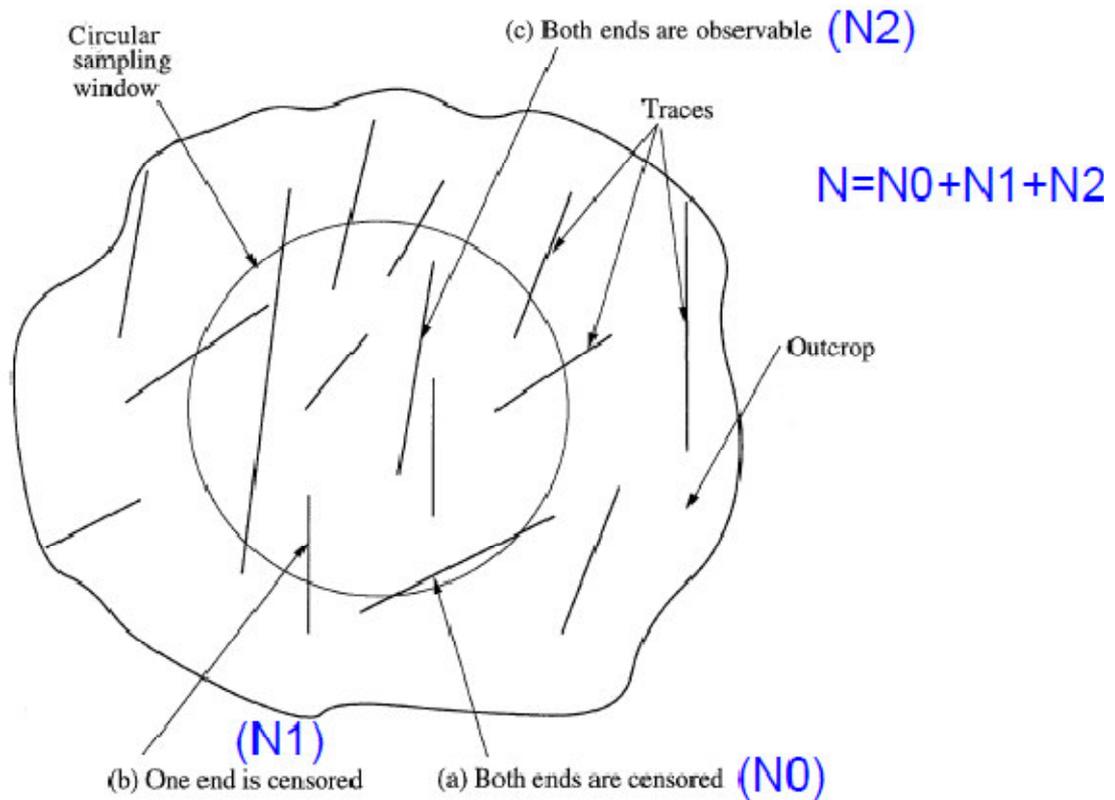
### 5.4.3 Window-Sampling Methode

Bei der Auswertung von Daten aus der Window-Methode, Kapitel 5.3.2 Window-Sampling Methode, wird wie folgend erklärt, vorgegangen.

#### 5.4.3.1 Am Aufschluss

Eine Methode die Spurlänge beim Window-Sampling zu bestimmen ist durch die Methode von Zhang& Einstein (1998). Bei dieser Methode wird im Bereich des Window-Sampling eine kreisförmige Fläche betrachtet und die Trennflächen, die sich in diesen Bereich befinden (Abbildung 56). Dann werden alle Flächen gezählt bei denen

- (I) beide Enden der Trennfläche außerhalb des Bereiches sind ( $N_0$ )
- (II) sich ein Ende der Trennfläche im Bereich befindet ( $N_1$ )
- (III) beide Enden der Trennfläche sich im Bereich befinden ( $N_2$ ).



**Abbildung 56 Darstellung der verschiedenen Trennflächen für die Berechnung der Spurlänge mittels der Methode von Zhang und Einstein (1998) (Liu, 2014a)**

Hierbei ist die Gesamtanzahl der Trennfläche

$$N = N_0 + N_1 + N_2$$

**Formel 41 Gesamtanzahl der Trennflächen im Bereich**

Mittels der folgenden Formel kann die Spurlänge der Trennflächen in diesem Bereich berechnet werden, wobei  $c$  der Radius des kreisförmigen Bereiches ist.

$$\mu = \frac{\pi(N + N_0 - N_2)}{2(N - N_0 + N_2)} c$$

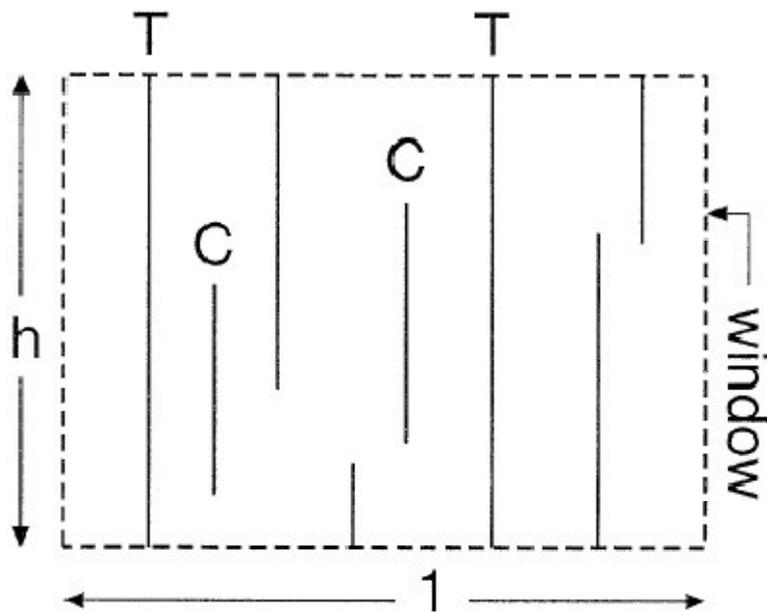
**Formel 42 Berechnung der Spurlänge bei Window- Sampling nach Zhang und Einstein (1998)**

Eine weitere Methode die mittlere Spurlänge von Trennflächen zu bestimmen ist die Methode nach Maldon (1998). Hierbei muss der betrachtete Bereich nicht kreisförmig sein. Bei einem rechteckigen Bereich wird folgende Formel verwendet

$$\mu = h \left( \frac{N + N_T - N_C}{N - N_T + N_C} \right),$$

**Formel 43 Formel zur Berechnung der mittleren Spurlänge nach Maldon (1998)**

wobei N die Anzahl der Trennflächen ist, welche den rechteckigen Bereich schneiden,  $N_T$  die Anzahl der Trennflächen, welche den Bereich durchschneiden,  $N_C$  die Anzahl der Trennflächen die im Bereich enden und h ist die Höhe des Rechtecks. (Abbildung 57).



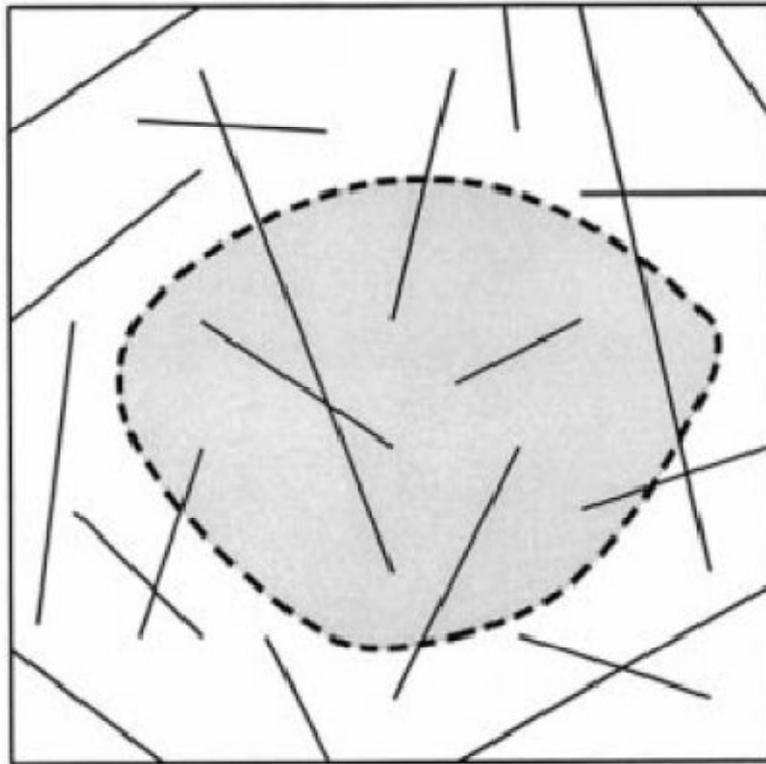
**Abbildung 57 Darstellung der verschiedenen Trennflächen für die Berechnung der Spurlänge eines rechteckigen Bereiches mittels der Methode von Maldon (1998)**

Auch ist es möglich die mittlere Spurlänge für einen unregelmäßigen Bereich zu berechnen (Abbildung 58) (Maldon, 1998). Hierbei wird die Spurlänge folgend berechnet

$$\mu = \frac{A}{E(w)} \left( \frac{N + N_T - N_C}{N - N_T + N_C} \right),$$

**Formel 44 Berechnung der mittleren Spurlänge für einen unregelmäßigen Bereich**

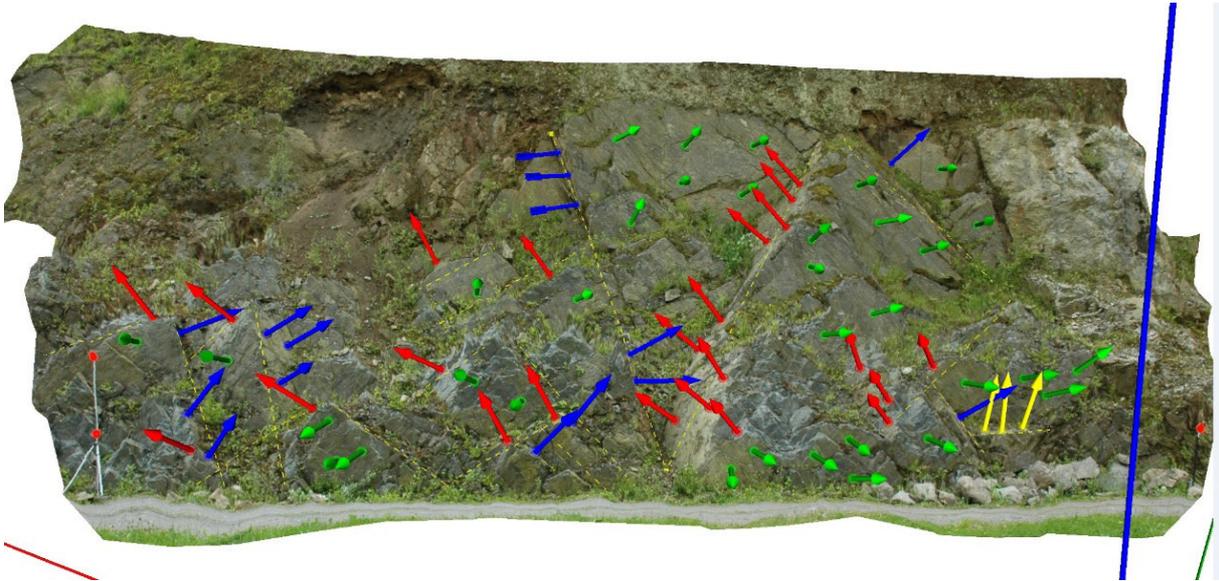
wobei  $A$  die Fläche des Bereiches und  $E(w)$  der Mittelwert der Bereichsbreite ist.



**Abbildung 58 Darstellung der verschiedenen Trennflächen für die Berechnung der Spurlänge für einen unregelmäßigen Bereich mittels der Methode von Maldon (1998)**

#### **5.4.3.2 Photogrammetrie**

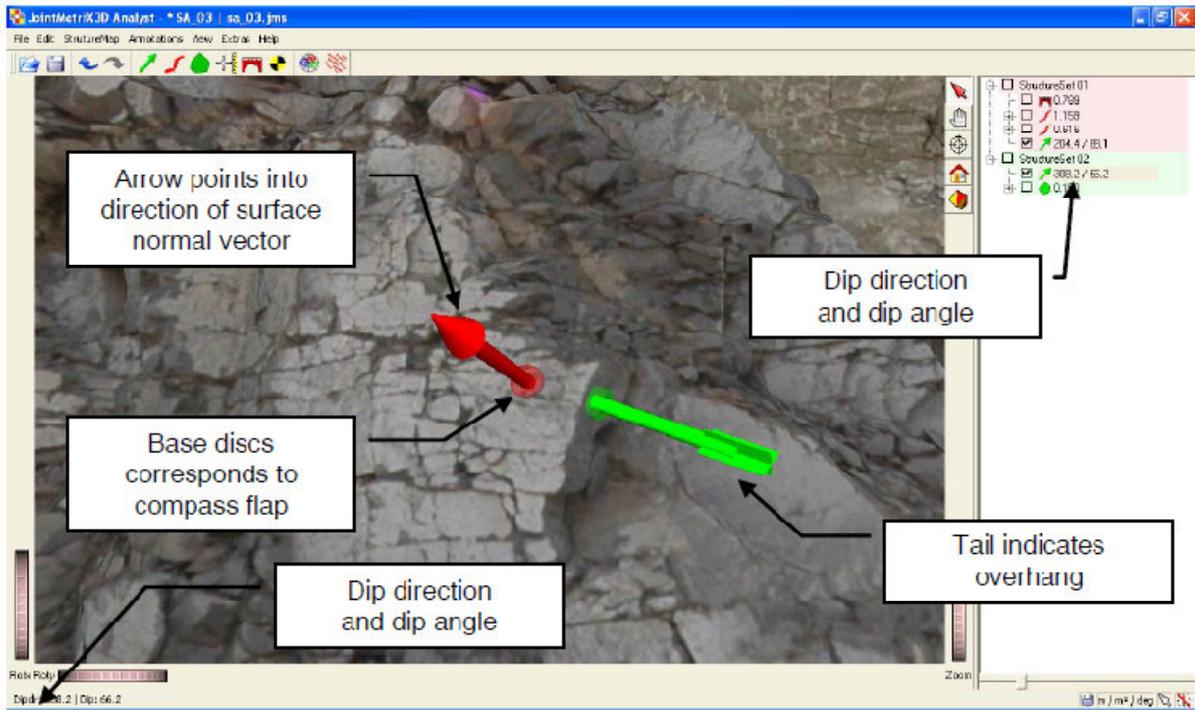
Die Auswertung der Daten aus einer Photogrammetrie Analyse, Kapitel 5.3.2.2 Photogrammetrie, erfolgt im Fall von ShapeMetrix mittels der Software. Nachdem das erzeugte 3D Bild referenziert wurde (Abbildung 59, Abbildung 60), kann es mit dem Programm weiter ausgewertet werden. Bei der Orientierung wird ein Punkt im 3D Bild ausgewählt und das Programm bestimmt automatisch die Orientierung in diesem Punkt (Abbildung 61). Weiters ist es möglich mittels des Programmes auch Längen direkt im Aufschluss zu messen (Liu, 2014a).



**Abbildung 60 3D Bild eines Teiles des Aufschlusses**



**Abbildung 59 Georeferenzierung der Referenzpunkte (3G Software & Measurement GmbH (2006))**



**Abbildung 61 Schematische Darstellung der Analyse der Daten mit der Software (3G Software & Measurement GmbH (2006))**

### 5.4.3.3 LiDAR

Die Daten aus einer LiDAR Aufnahme, Kapitel 5.3.2.3 LiDAR, werden direkt im Programm ausgewertet. Nach dem georeferenzieren der Punktwolke mittels der GPS-Daten von der Aufnahme kann die Punktwolke weiter ausgewertet werden. Für die Orientierung wird eine erkannte Trennfläche mit einer selbst erzeugten Trennfläche überlegt (Abbildung 62) und die Orientierung dieser Fläche dann direkt vom Programm bestimmt. Hierbei wird zuerst die erzeugte Fläche ausgewählt (schwarzer Pfeil) und anschließend können die genauen Werte einfach abgeschrieben werden (roter Pfeil)(Abbildung 63). Auch wird die Größe dieser Fläche direkt vom Programm berechnet und kann dann abgeschrieben werden. Hierbei wird zuerst die Fläche ausgewählt (dunkelblauer Pfeil) und anschließend die Größe einfach abgeschrieben (oranger Pfeil)(Abbildung 65). Dies ist eine Besonderheit des LiDAR, den hier wird die Größe direkt bestimmt. Bei der Scanline- Methode ist dies nicht möglich, hier kann nur die Spurlänge gemessen werden und anschließend daraus die Trennflächengröße berechnet werden. Auch gibt es die Möglichkeit Längen direkt in der Punktwolke zu messen. Dies wird zur Bestimmung der Spurlänge angewendet (Abbildung 66). Weiters kann der Abstand ebenfalls mittels des Software gemessen werden (Abbildung 64).

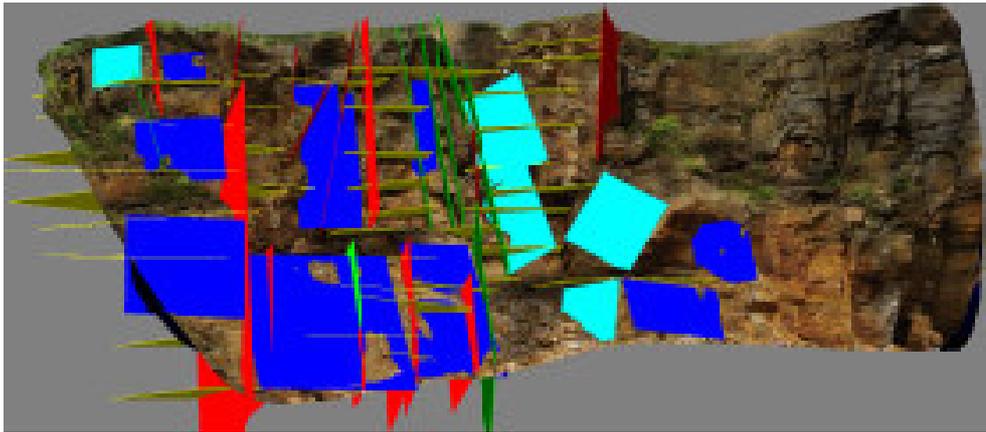


Abbildung 62 Modell eines Aufschlusses mit den erzeugten Flächen für die Orientierung  
(Liu & Kieffer, 2011)

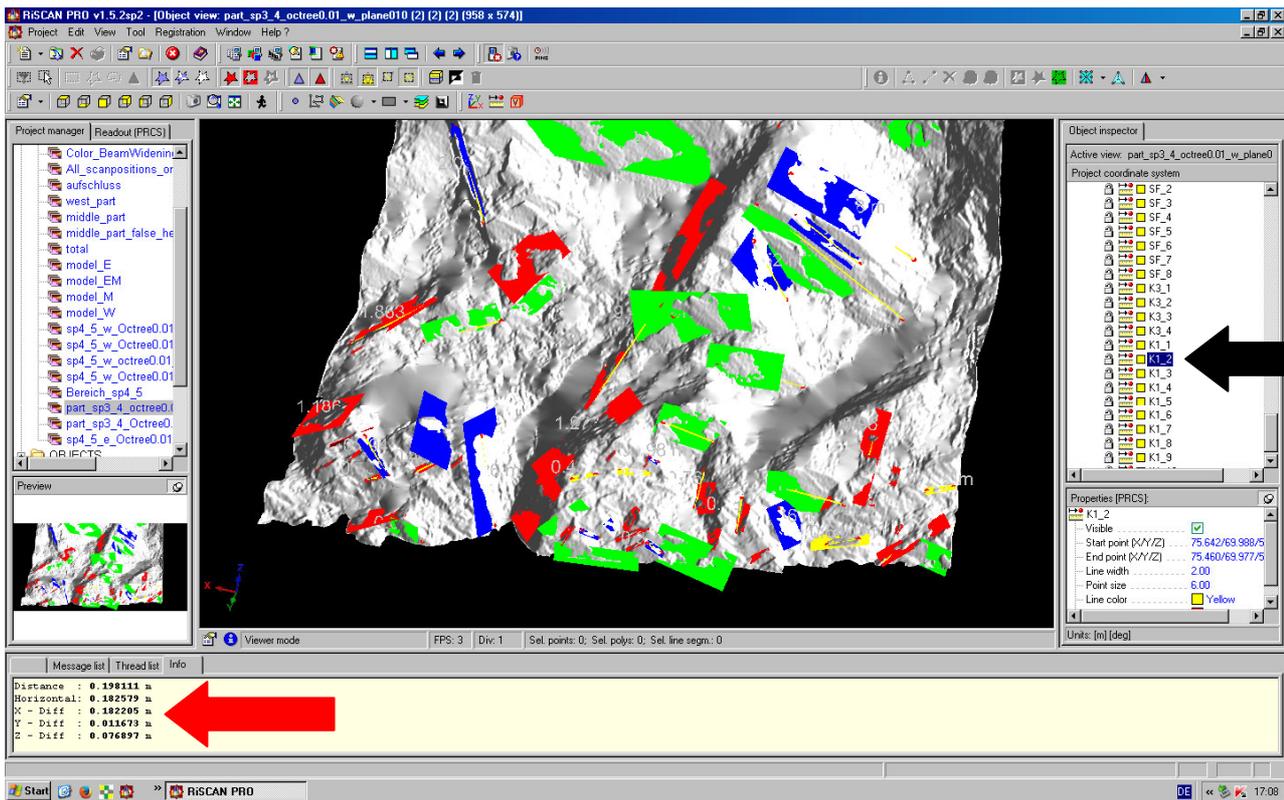


Abbildung 63 Screenshot von Bereich M und Bestimmung der Orientierung

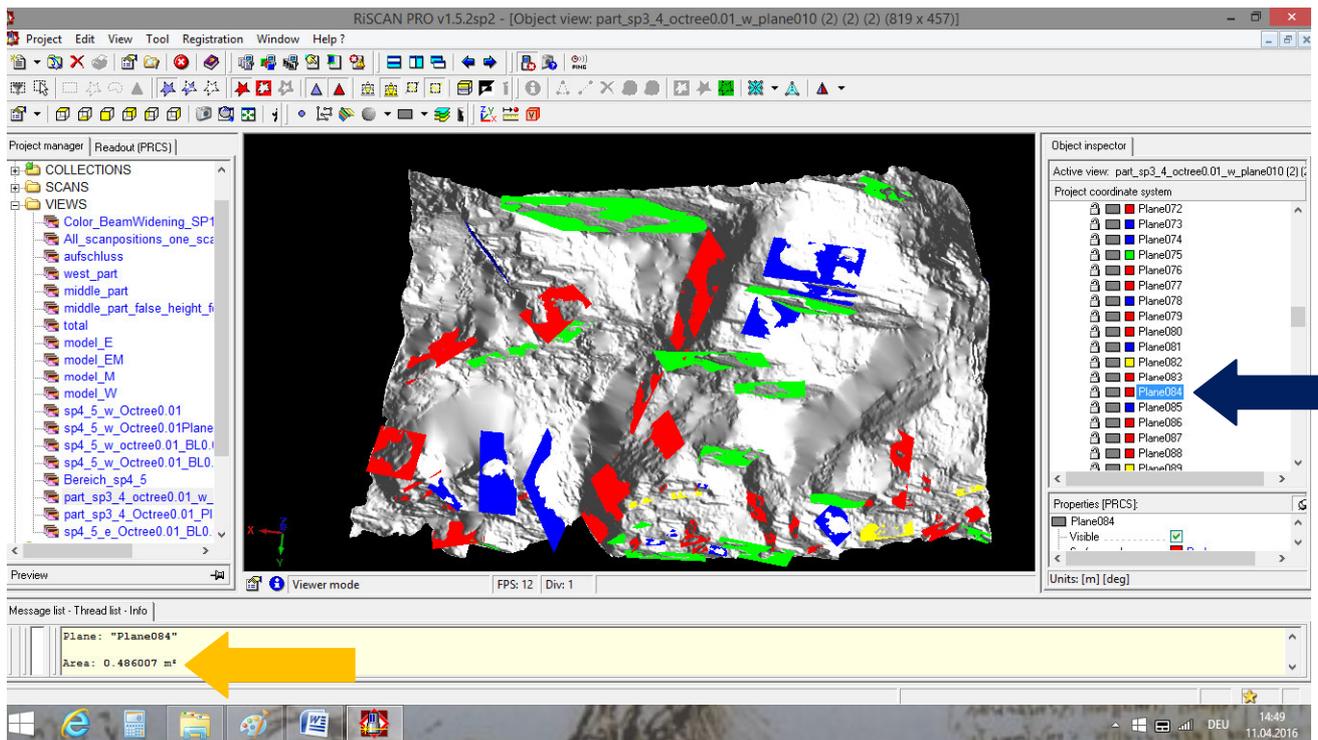


Abbildung 65 Screenshot von Bereich M mit Bestimmung der Größe

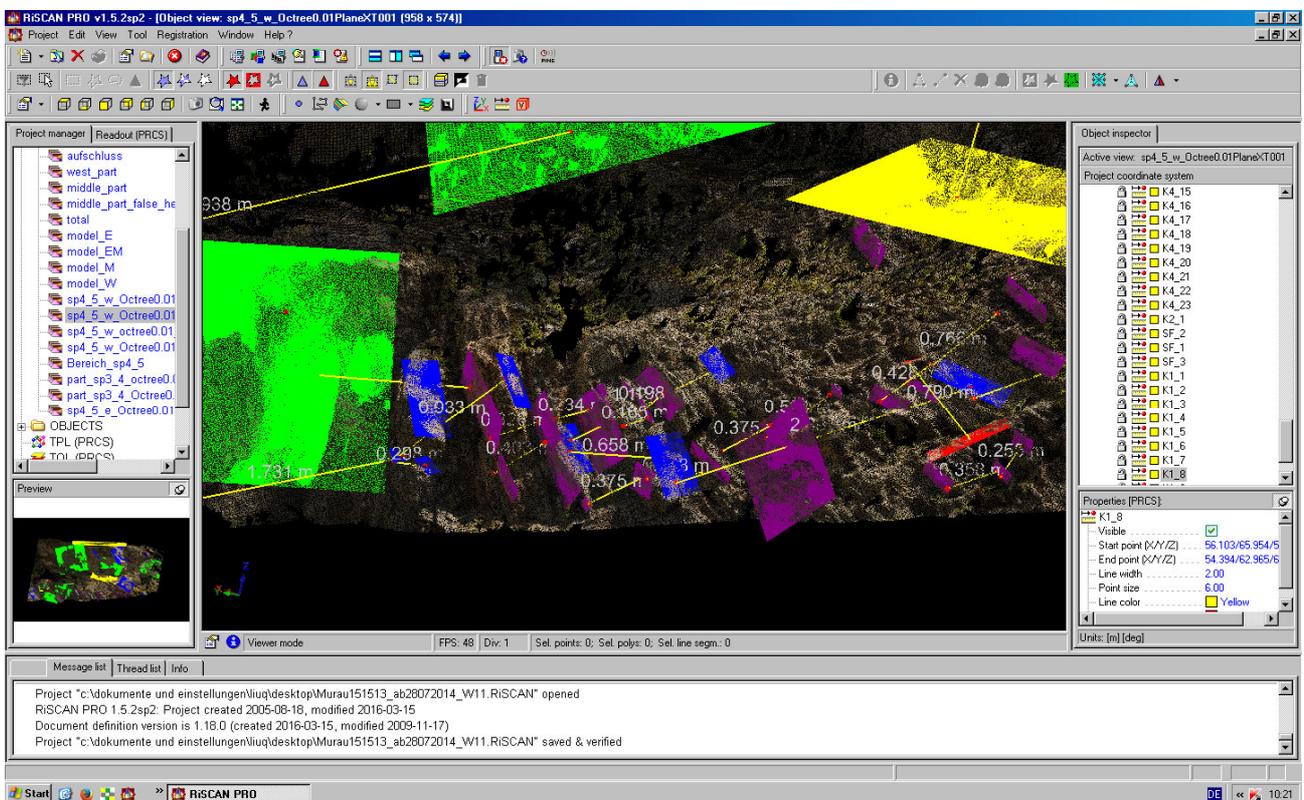
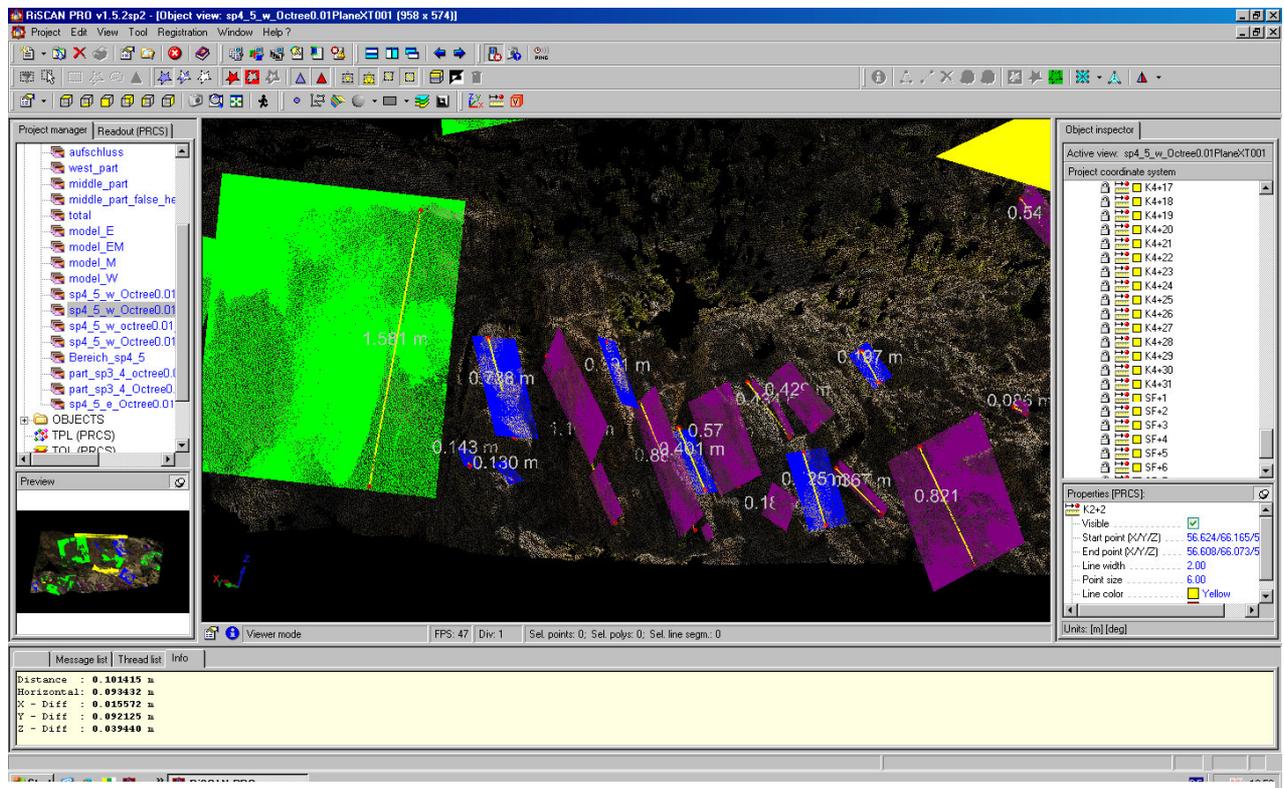
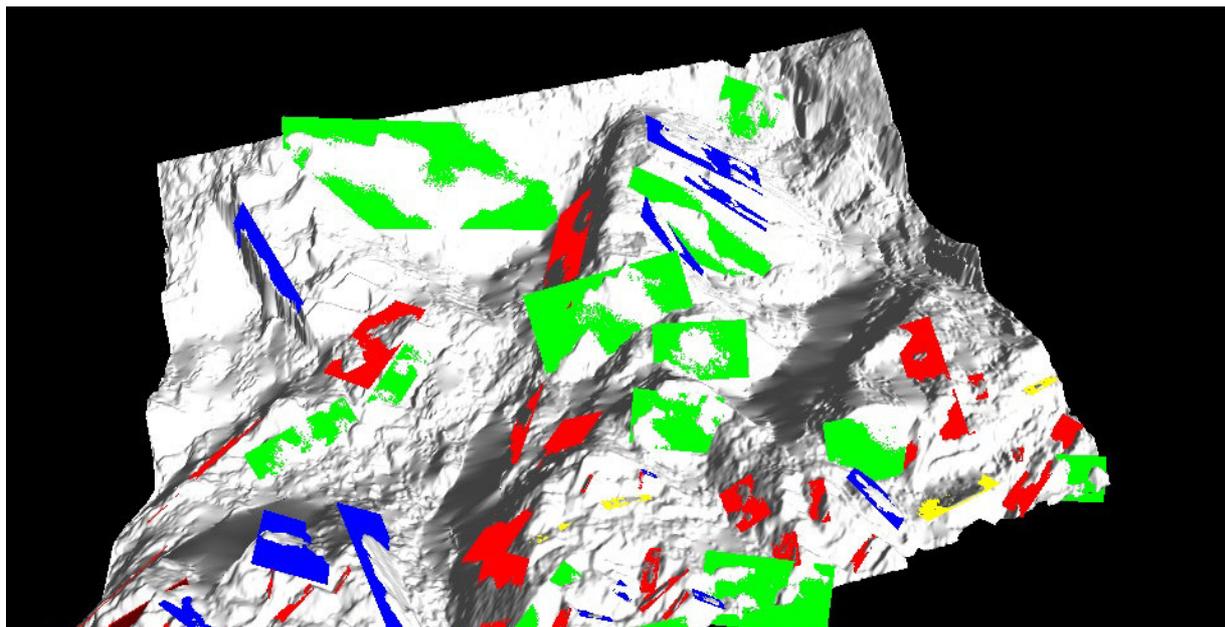


Abbildung 64 Screenshot von der Messung der Abstände im Bereich W



**Abbildung 66 Screenshot von der Messung der Spurlänge im Bereich W**

Bei einem LiDAR-Modell gibt es die Möglichkeit ein 3D trianguliertes kontinuierliches Oberflächenmodell zu erzeugen, welches dann eine noch genauere Analyse ermöglicht. Hierbei wird die Vegetation, welche eventuell bereits am Aufschluss gewachsen ist, mittels mathematischer Berechnungen trianguliert und im Modell entfernt (Abbildung 67). Dieser Schritt ist allerdings sehr zeitaufwändig (Liu, 2014b).



**Abbildung 67 Punktwolke mit angepasste Trennflächen, trianguliertes Modell**

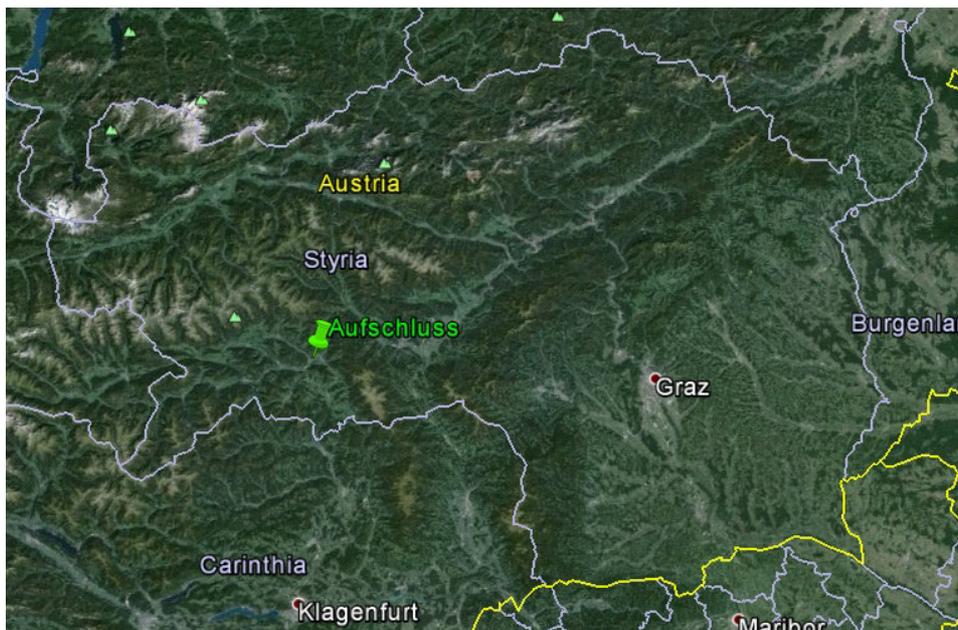
## 6. Praktische Beispiele

Hier sollen nun die Ergebnisse, welche durch die verschiedenen Erfassungsmethoden aufgenommen wurden, kurz erläutert werden.

Die Daten für die verschiedenen Analysen wurden zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommen, die Daten von der Scanline-Analyse wurden über mehrere Jahre von Studenten in Rahmen eines Geländepraktikums erhoben.

### 6.1 Der Aufschluss

Für die verschiedenen Modellierungen wurde ein Aufschluss herangezogen. Dieser Aufschluss befindet sich in der Steiermark, bei der Ortseinfahrt zu Niederwölz (Abbildung 68, Abbildung 69).



*Abbildung 68 Lage des Aufschlusses in der Steiermark, erstellt mittels Google*

*Maps*



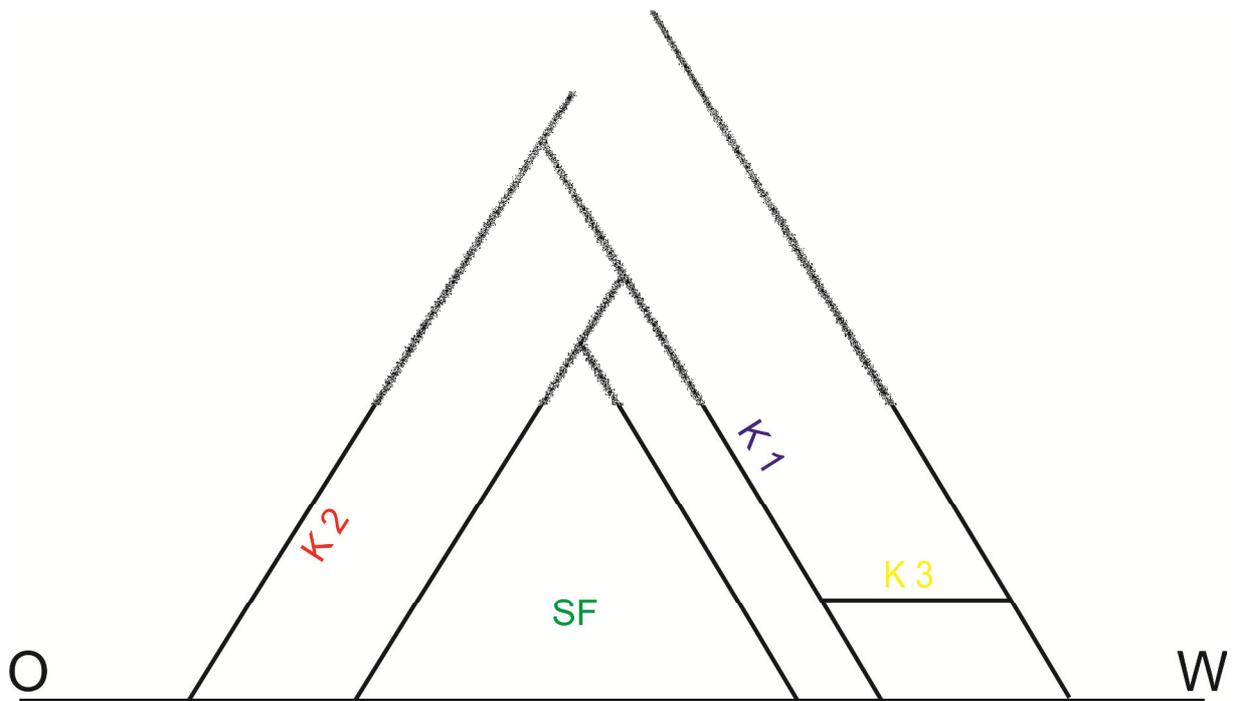
**Abbildung 69 Lage des Aufschlusses zur Ortschaft Niederwölz, erstellt mittels Google Maps**

Der Aufschluss hat eine Länge von ca. 60m und eine Mächtigkeit von ca. 7m (Abbildung 70). Das Gestein des Aufschlusses ist ein Amphibolit, wobei im östlichen Teil des Aufschlusses vereinzelt Granate zu finden sind. Das Gestein gehört zum sogenannten Wölzer Kristallin, welcher zum Murauer Paläozoikum gezählt wird (Neubauer, 1980).



**Abbildung 70 Ansicht des Aufschlusses, (October 2014, courtesy of Volker Reinprecht)**

Bei der Geländearbeit am Aufschluss konnten 4 Haupttrennflächen bestimmt werden. (Abbildung 71). Hierbei hat SF (Schieferung) eine durchschnittliche Orientierung von 200/78, die Trennfläche K1 (Klufffläche 1) hat eine durchschnittliche Orientierung von 290/50, die Trennfläche K2 (Klufffläche 2) hat eine durchschnittliche Orientierung von 110/40 und K3 (Klufffläche 3) eine durchschnittliche Orientierung von 90/20.



**Abbildung 71 Schematische Darstellung der 4 Haupttrennflächen des Aufschlusses**

Bei den verschiedenen Analysen konnten dann zwei weitere Trennflächensysteme bestimmt werden. Hierbei ist K4 (Klufffläche 4) eine um 90° verkippte Variante von K1 und K5 (Klufffläche 5) ist eine verkippte Variante von K3.

Der Aufschluss charakterisiert sich durch Folgendes: sowohl K1, als auch K2 sind über den gesamten Aufschluss zu finden. K3 ist selten wirklich gut zu sehen, kann allerdings ebenfalls über den gesamten Aufschluss gefunden werden. SF bildet in einigen Bereichen des Aufschlusses schöne und große Flächen und ist im gesamten Aufschluss aber eher sehr fein. Im mittleren Bereich des Aufschlusses ist ein vertikaler Quarzgang zu finden. Im östlichen Bereich des Aufschlusses ist die Verwitterung des Gesteins deutlich höher als im westlichen Teil. Das Trennflächensystem K2 kippt von Ost nach West mehr ein.

## 6.2 Scanline

Der gesamte Aufschluss wurde von Studentengruppen über mehrere Jahre immer wieder im Rahmen der Lehrveranstaltung GEO.950 mittels der Scanline-Methode, Kapitel 5.3.1 Scanline-Methode, analysiert. Die hier verwendeten Daten stammen von diesen Studenten, wobei ein Datensatz von einer Gruppe von Studenten stammt.

Bei der Orientierung der Daten fällt auf, dass es Datensätze gibt, bei denen eine große Streuung auftritt (Abbildung 73), andere wiederum haben fast keine Streuung der einzelnen Punkte (Abbildung 72). Allerdings steht diese Streuung in keinem Zusammenhang mit der Position der Datenaufnahme am Aufschluss. Die mittels des Programms Sphaira geplotteten Datensätze und Diagramme befinden sich alle im Anhang A.

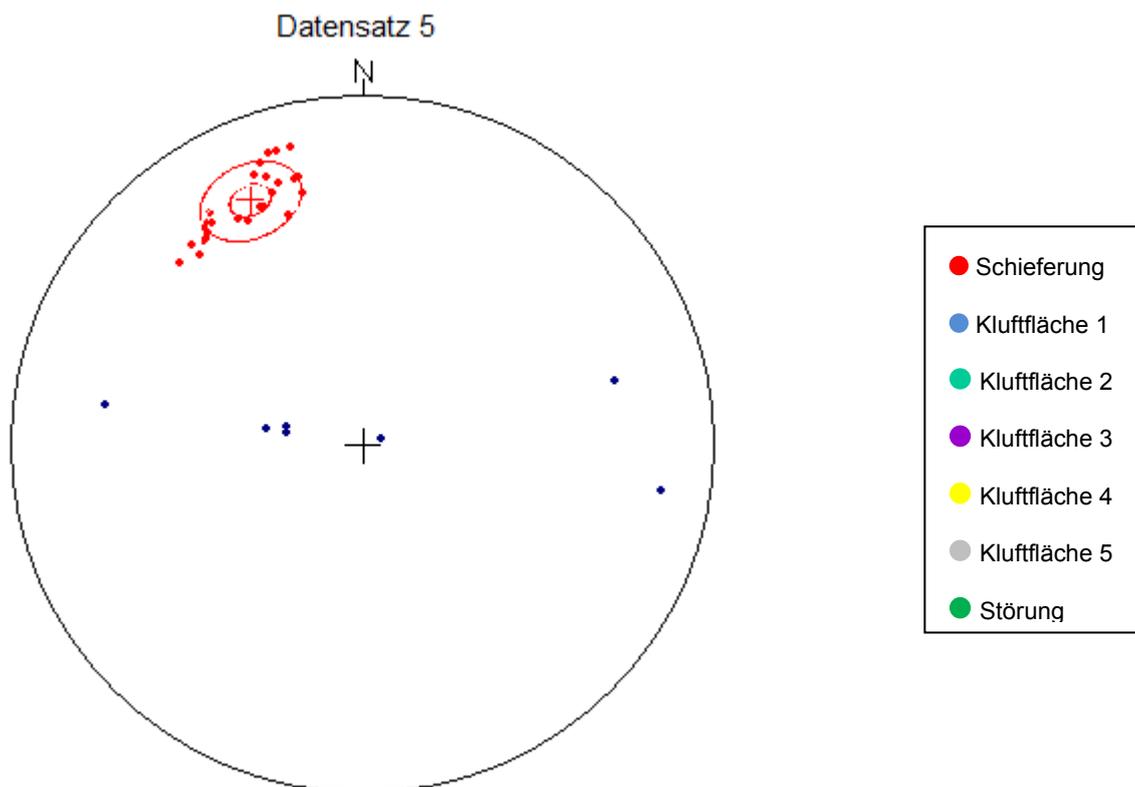


Abbildung 72 Datensatz 5, relativ genauer Datensatz

### Statistische Werte

Datensatz 5	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktfäche
K	43,21	30,2	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	200/5
SF	96,82	60,94	4,66	11,41	173/73

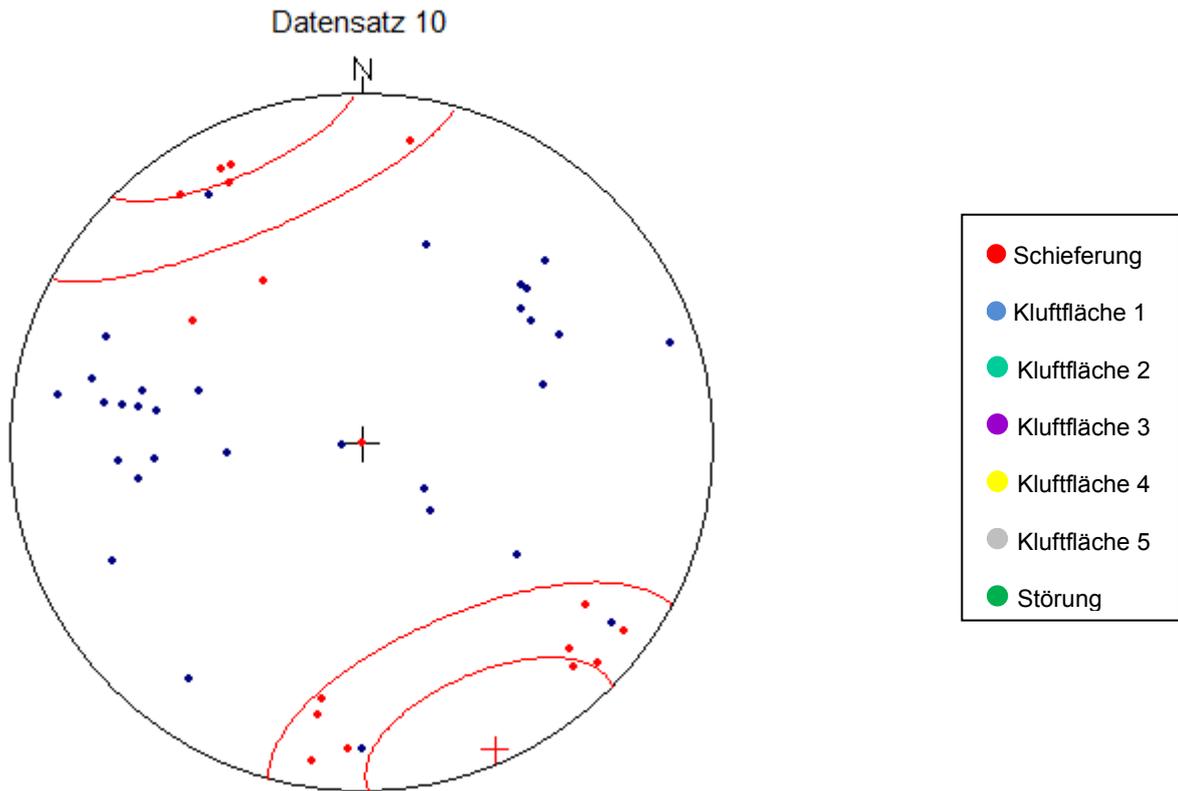
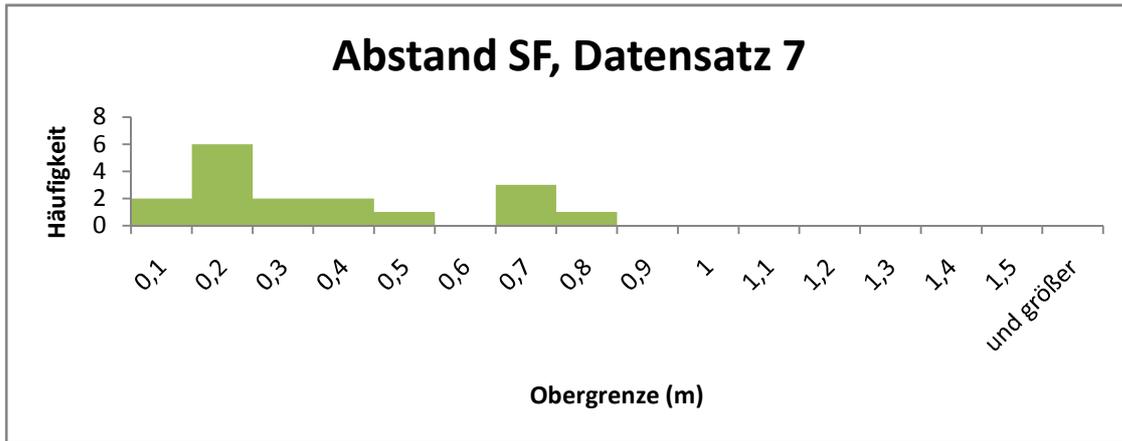


Abbildung 73 Datensatz 10, relativ ungenauer Datensatz

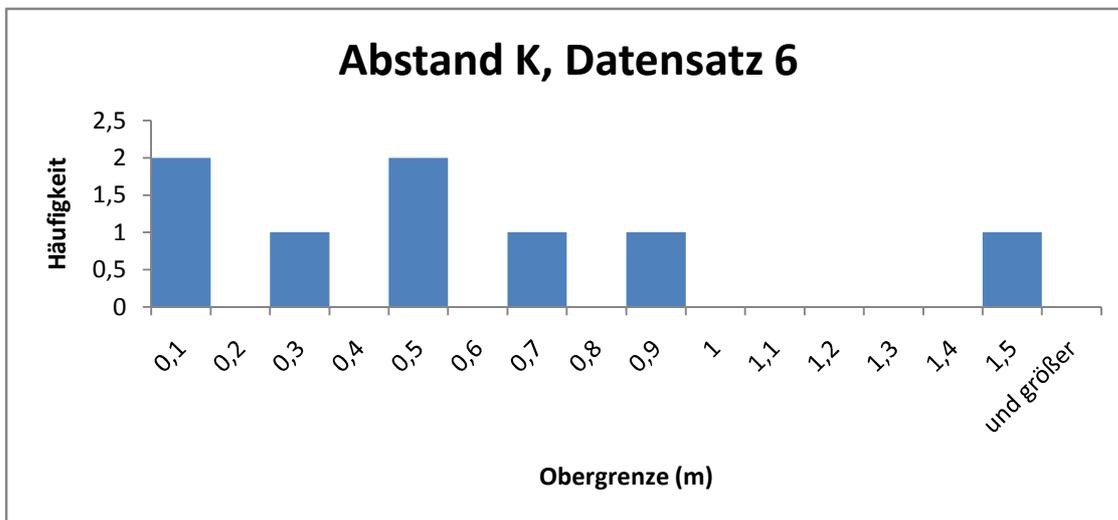
### Statistische Werte

Datensatz 10	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktfäche
K	25,1	2,6	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	123/28
SF	60,21	4,75	25,19	43,45	374/94

Beim Abstand ließ sich erkennen, dass der Wert bei der Schieferung hauptsächlich bei rund 0,2m liegt, teilweise allerdings auch über einen Meter, das Maximum liegt bei 1,85m. Bei den Kluffflächen liegt der Wert meistens zwischen 0,08 und 0,95 (Abbildung 74, Abbildung 75).

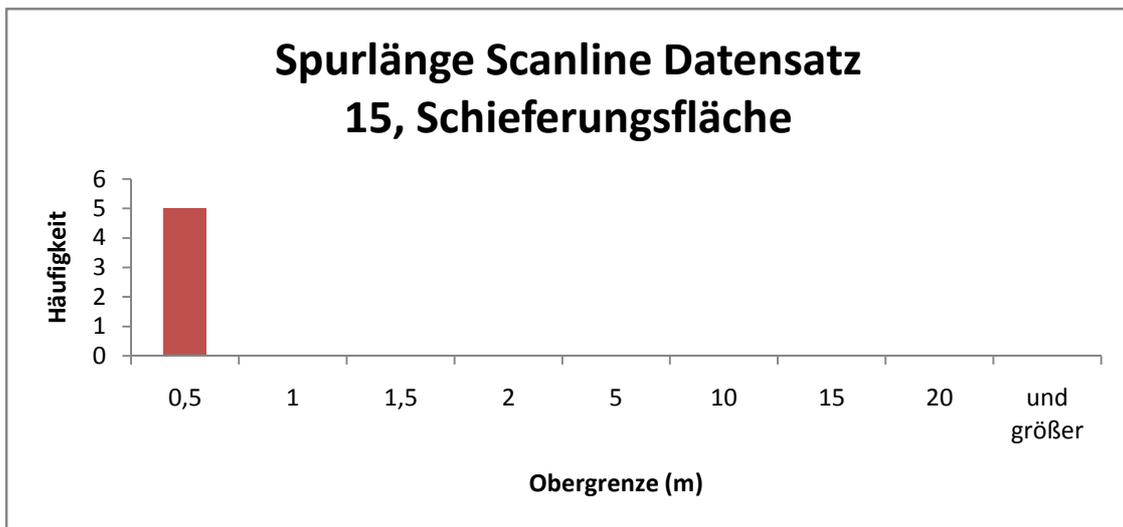


**Abbildung 74 Histogramm der Abstände der Schieferungsflächen, Datensatz 7**

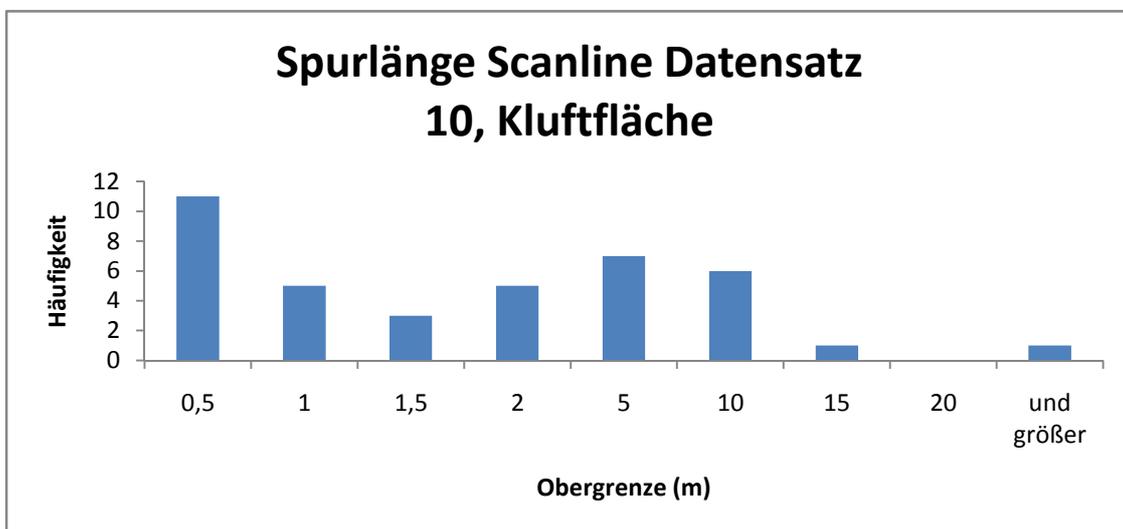


**Abbildung 75 Histogramm der Abstände der Kluffflächen, Datensatz 6**

Bei der Spurlänge zeigen sich extreme Schwankungen, dies etwa bei den Werten für die Schieferung die zwischen Zentimetern bis zu über 20m reichen. Bei der Länge der Klufffläche variieren die Werte zwischen wenigen Zentimetern und bis zu 25m (Abbildung 76, Abbildung 77).



*Abbildung 77 Spurlänge des Datensatzes 15, Schieferungsfläche*



*Abbildung 76 Spurlänge des Datensatzes 10, Kluffflächen*

### **6.3 Photogrammetrie**

Die photogrammetrische Untersuchung des Aufschlusses, genaue Beschreibung in Kapitel 5.3.2.2 Photogrammetrie, erfolgte mit dem System ShapeMetrix (3G Software & Measurement GmbH (2006)). Hierbei wurden die einzelnen Trennflächen mehrfach gemessen und durch das Programm auch gleich geplottet.

Bei der Orientierung tritt teilweise eine große Streuung auf, wobei dies nur einzelne Datensätze sind. Die Streuung ist allgemein größer als die bei den Daten von der Scanline. Die gesamten Daten sind hierbei im Anhang B zu finden. Ein Beispiel für solch einen Datensatz ist Abbildung 78.

Daten 14	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktläche
K1	88,6	16,29	10,16	19,74	45/76
K2	95,67	43,67	5,29	12	344/59
K3	84,15	12,27	7,11	23,46	13/20
SF	92,4	25,48	5,13	16,01	22/71

## Daten14

Do15 Okt14 21:25 2015

### StereoNet

Lambert projection on lower hemisphere

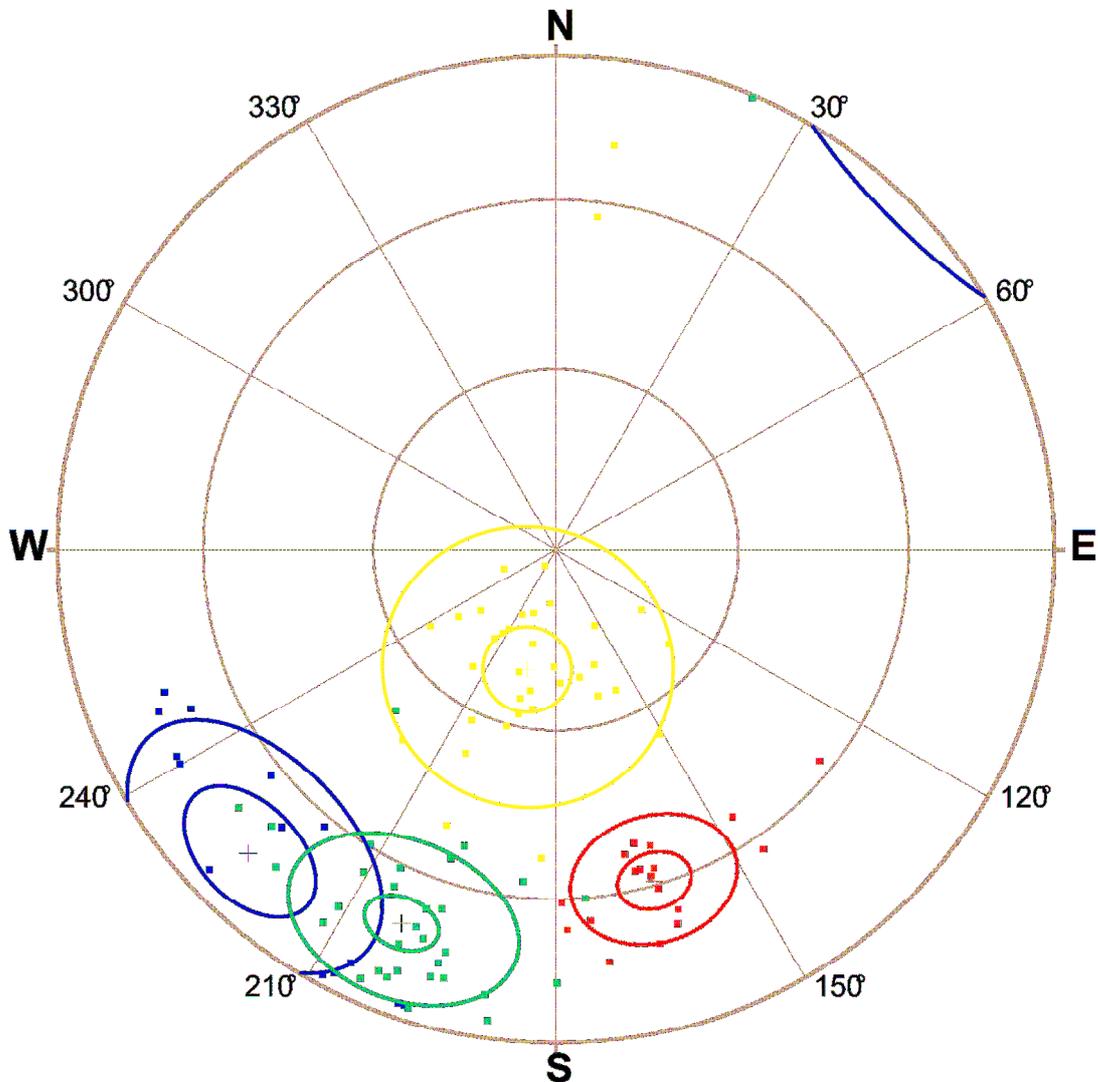


Abbildung 78 Geplottete Daten von Datensatz 14 aus der ShapeMatrix Auswertung

Bei der Spurlänge der Schieferung liegen die Werte der einzelnen Datensätze bei rund zwei Metern. Bei der Klufffläche 1 tritt bei der Spurlänge eine relativ große Streuung auf. Wobei eine relativ große Menge der Werte entweder klar unter einem Meter liegen oder klar über zwei Metern. Bei der Klufffläche 2 ist ebenfalls eine große Streuung zu erkennen. Anders als bei der Klufffläche 1 ist allerdings kein Trend zu erkennen, die Werte schwanken zwischen klar unter einem Meter und über drei Metern (Abbildung 79, Abbildung 80).

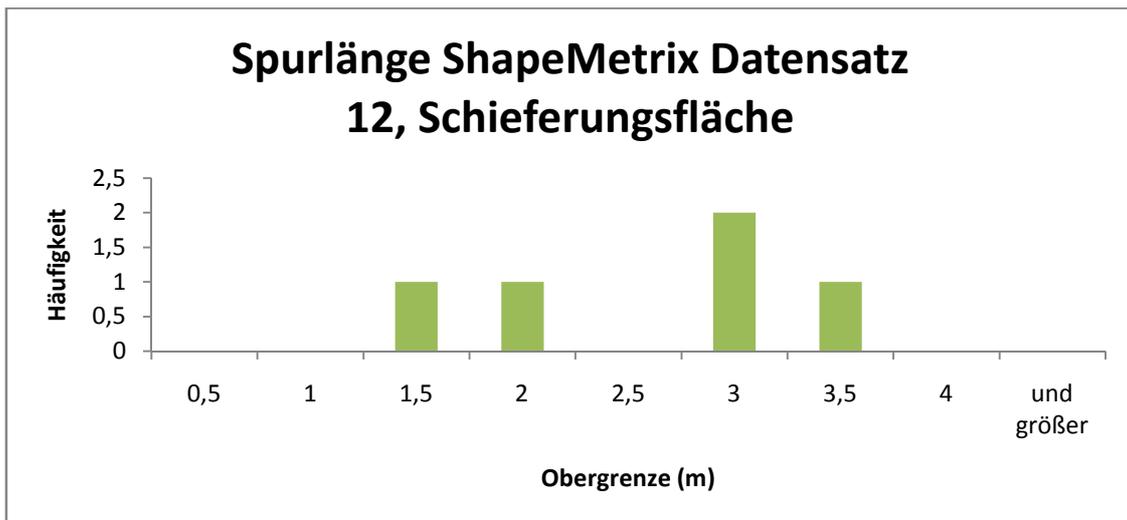


Abbildung 79 Spurlänge des Datensatzes 12, Schieferungsfläche

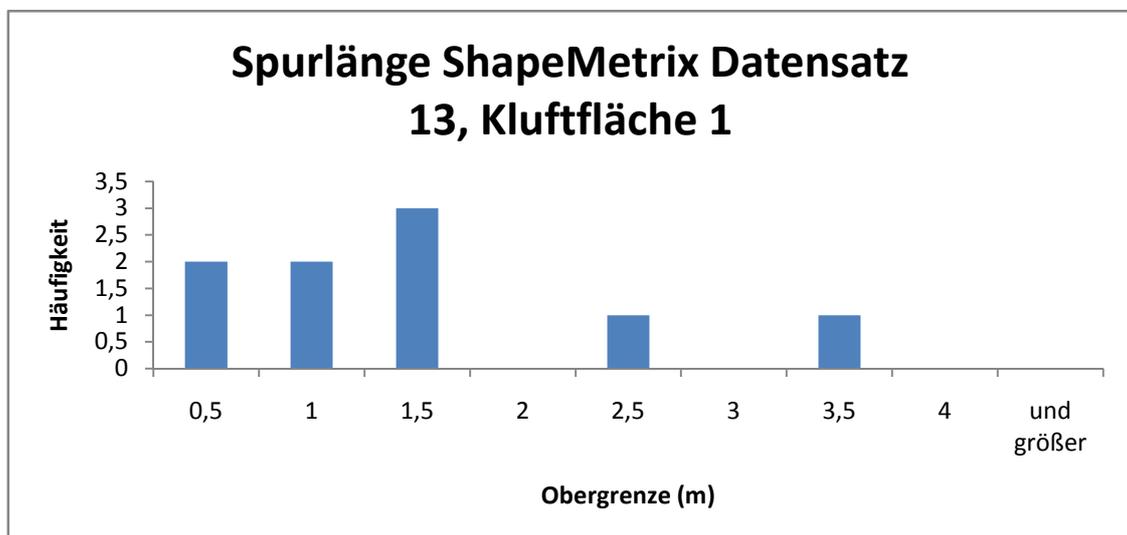


Abbildung 80 Spurlänge des Datensatzes 13, Klufffläche 1

## 6.4 LiDAR

Bei der Analyse mittels LiDAR wurde ein Laserscanner der Firma RiScan und die Software RiScanPro verwendet. Die Werte von der Orientierung wurden im Anschluss mit dem Programm Sphaira geplottet. Hierbei treten sowohl bei Bereich M (Mitte), als auch im Bereich W (West) der genauen Modelle große Streuungen auf. Die Plots und Diagramme befinden sich im Anhang C.

Beim Abstand und bei der Spurlänge lassen sich die beiden Bereich nicht vergleichen. In Abbildung 81, Abbildung 82, Abbildung 83 und Abbildung 84 sind verschiedenen Spurlänge und Abstände zu sehen.

Bei den Werten für die Trennflächengröße sind zwischen den Bereichen große Unterschiede zu erkennen, wobei bei allen Bereich die meisten Werte unter 0,5m<sup>2</sup> liegen (Abbildung 85, Abbildung 86, Abbildung 87).

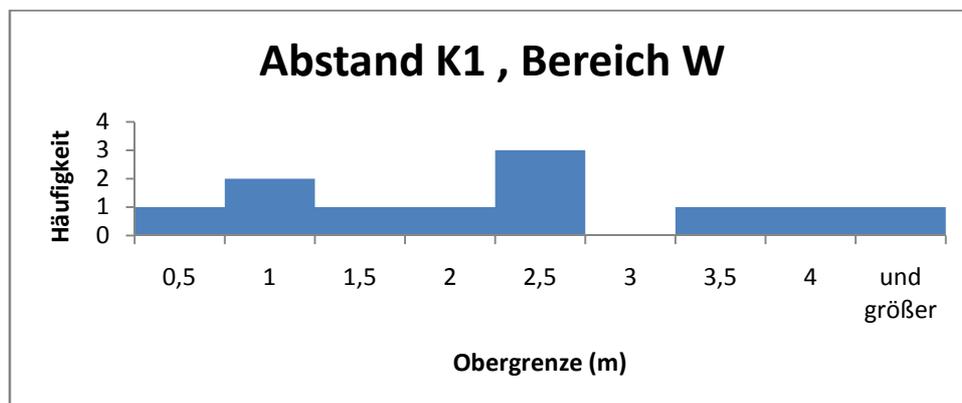


Abbildung 81 Abstand der Kluftfläche 1, Bereich W

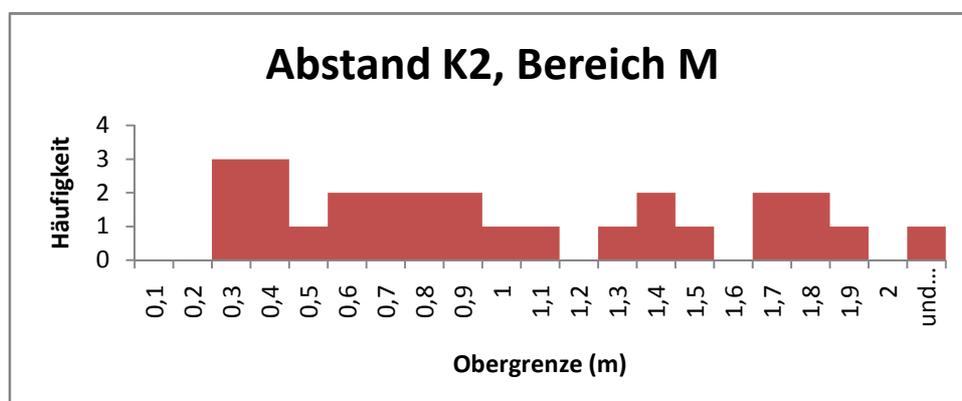


Abbildung 82 Abstand der Kluftfläche 2 Bereich M

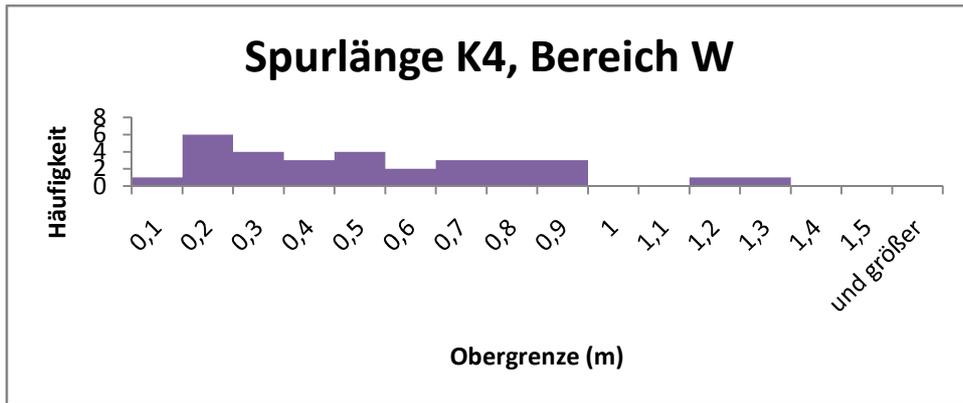


Abbildung 83 Spurlänge der Kluftfläche 4, Bereich W

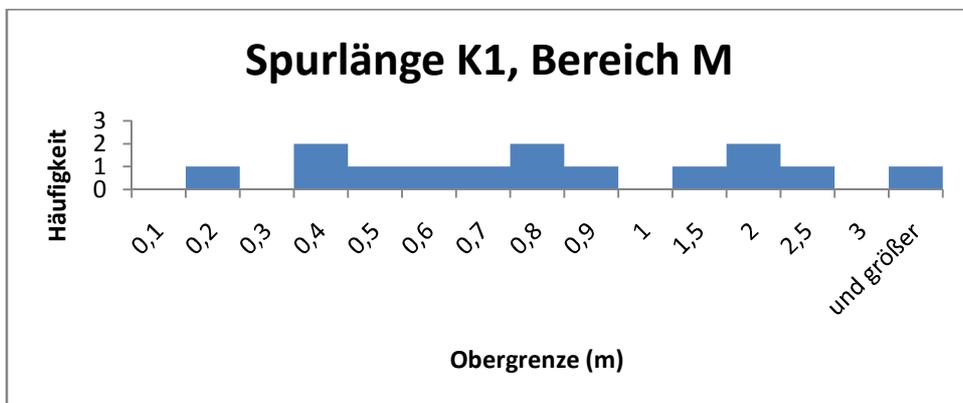


Abbildung 84 Spurlänge der Kluftfläche 1, Bereich M

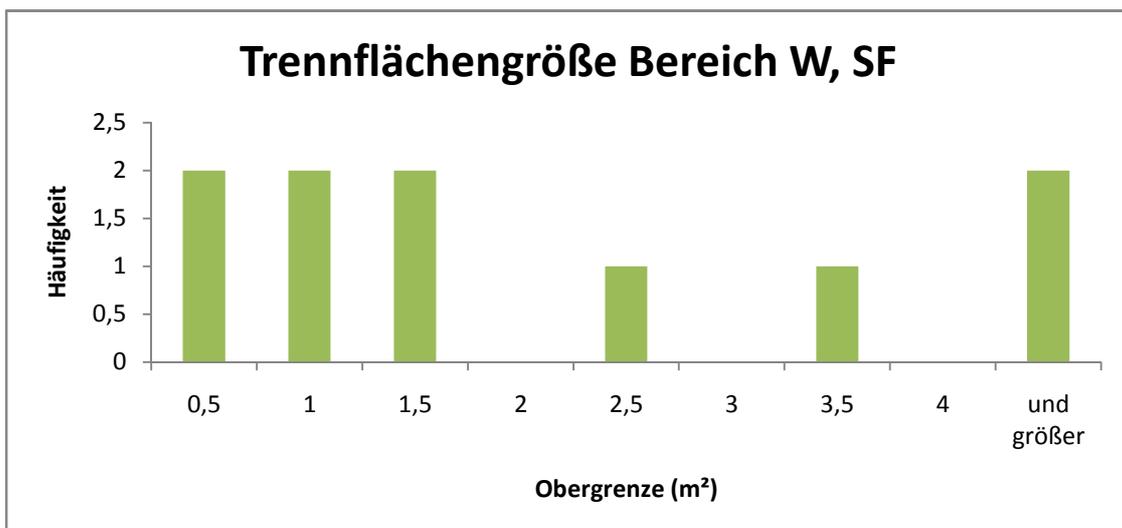
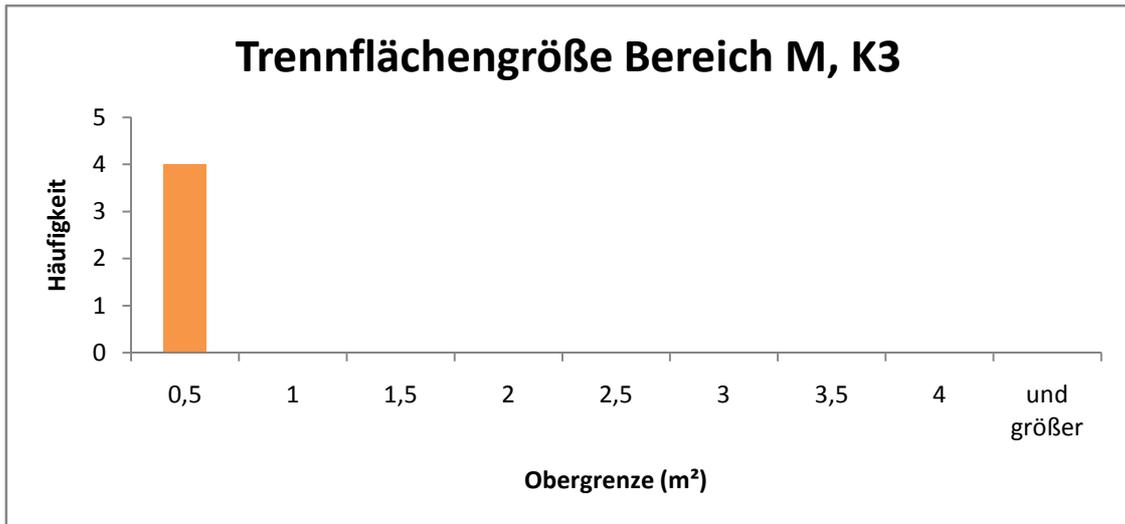
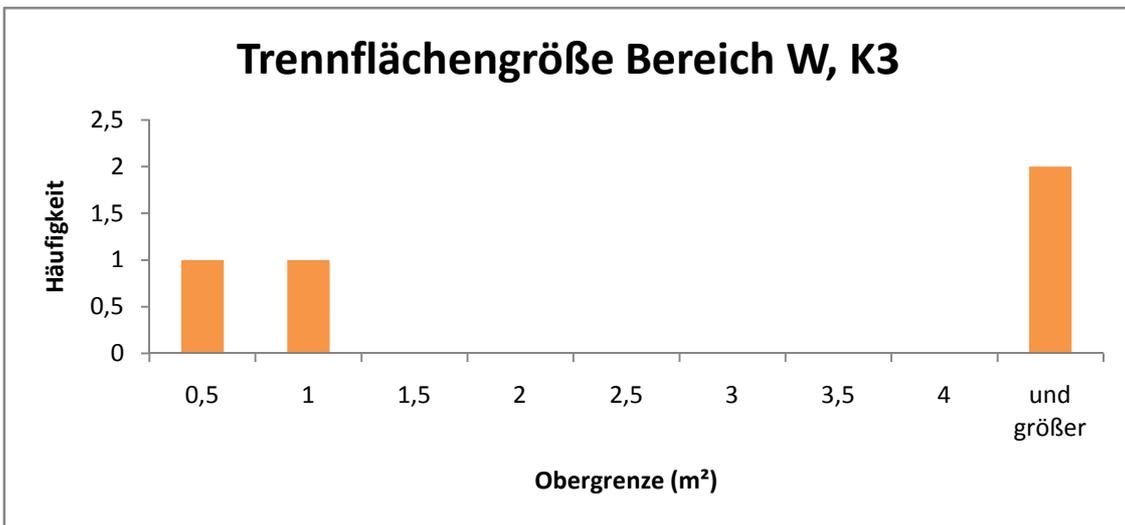


Abbildung 85 Trennflächengröße Schieferungsfläche, Bereich W



*Abbildung 86 Trennflächengröße der Kluffläche 3, Bereich M*



*Abbildung 87 Trennflächengröße der Kluffläche 3, Bereich W*

## 7. Methodenvergleich

Bei der Aufnahme mittels Scanline an einem Aufschluss kann man sagen, dass es durch die Aufnahme durch einen Geologen von Beginn an möglich ist Besonderheiten des Aufschlusses, etwa die einzelnen Trennflächensysteme, zu erkennen. Bei der Analyse von Aufschlüssen mittels Fernerkundung, Photogrammetrie und LiDAR, kann diese Information schwieriger zu erhalten sein, überhaupt wenn man den Aufschluss zuvor nicht gesehen hat. Ein Vorteil den die Scanline-Methode bietet ist, dass sie auch auf sehr kleinem Bereich, etwa in einem Bohrloch, angewandt werden kann. Photogrammetrie und LiDAR sind hier nicht möglich. Damit ist sie die einzige Methode die es ermöglicht Parameter auch aus dem "Inneren" des Gebirges zu liefern. Nachteil der Scanline-Methode ist, dass man in der Lage sein muss den Aufschluss direkt zu erreichen. Wenn man den Aufschluss, etwa ein Steilhang, nicht direkt erreichen kann, da es keine Möglichkeit gibt ihn zu Fuß zu erreichen, muss man auf Fernerkundung ausweichen. Auch kann es sein, dass man gewisse Bereiche des Aufschlusses auf Grund von zum Beispiel der Höhe nicht erreichen kann. Ein weiterer Faktor ist die Zeit, es nimmt auch mit Erfahrung bei der Aufnahme der Daten mittels Scanline, mehr Zeit in Anspruch einen Aufschluss mittels Scanline aufzunehmen als mit Fernerkundungsmethoden.

Außerdem ist die Nachbereitung der Daten bei einer Aufnahme mittels Scanline von allen drei Methoden die längste, dies unter der Annahme, dass die Daten von der Laseraufnahme nicht weiter verbessert werden. Bei der Scanline-Methode sind die limitierenden Faktoren auch am Größten. Allerdings ist diese Methode von allen drei Methoden am günstigsten, da keine Geräte benötigt werden, lediglich für die Auswertung ist ein PC und Software für die mathematischen Berechnungen notwendig. Dies natürlich nur bei Aufschlüssen, bei Verwendung der Scanline-Methode im Bohrloch sind Geräte und spezielle Software nötig.

Was bei den ausgewerteten Daten von der Scanline-Methode auffällt ist, dass die Werte stark zwischen den einzelnen Datensätzen variieren. Teilweise gibt es Datensätze, welche nur eine sehr geringe Streuung aufweisen, andererseits gibt es Datensätze, welche eine extreme Streuung aufweisen wo es eigentlich unmöglich ist irgendwelche Aussagen zu treffen. Die Schwankungen können auf die Tatsache zurückgeführt werden, dass verschiedene Personen die Daten aufgenommen haben. Allerdings ist es auch möglich, dass die Daten mit geringer Schwankung in einem sehr kleinen Bereich genommen wurden und die Genauigkeit daher kommt. Das lässt sich allerdings durch die vorhandenen Unterlagen nicht genau nachvollziehen.

Die getroffenen Aussagen beziehen sich alle auf die Orientierungswerte, beim Abstand und der Spurlänge sind die Schwankungen bei allen Datensätzen relativ gleich.

Bei der Datenaufnahme mittels Fernerkundung (Photogrammetrie und LiDAR) kann die Blockgeometrie sowie die Größe der Blöcke direkt gemessen. Was klar ein Vorteil gegenüber der Scanline-Methode ist, außerdem sind die Daten aus Fernerkundungsmethoden üblicherweise genauer und sind auch ortsbezogen.

Bei der Aufnahme mittels Photogrammetrie lässt sich leicht und schnell ein 3D Bild erzeugen. Wobei beim Aufbau der Bezugspunkte nur einige wenige Dinge beachtet und aufgenommen werden müssen. Ein weiterer Vorteil ist, dass man auch Bereiche erfassen kann, welche nicht direkt zugänglich sind, auch kann man größere Bereiche aufnehmen als mit der Scanline-Methode. Man muss nur in der Lage sein Fotos zu machen, welche die gewünschte Genauigkeit haben. Ein anderer Vorteil ist die Software für die Nachbearbeitung der Daten. Sie ist einfach und selbsterklärend und ermöglicht die wichtigsten Parameter in kürzester Zeit sehr einfach aufzunehmen. Weiters ist man bei der Verwendung der Photogrammetrie weniger wetterabhängig als zum Beispiel bei der Scanline-Methode, wo man mehrere Stunden bei einem Aufschluss verbringt. Bei der Photogrammetrie ist ein langer Aufenthalt beim Aufschluss nicht nötig. Nachteile der Aufnahme mittels Photogrammetrie ist, dass zum Erzeugen der 3D Bilder eine hohe Rechenleistung des PC nötig ist. Mit entsprechender Rechenleistung ist es möglich ein Bild in rund 10 Minuten zu generieren, mit einem handelsüblichen Laptop kann es pro Bild auch über eine Stunde dauern. Unter der Voraussetzung, dass man für eine genaue Analyse des Bereichs mehrere 3D Bilder benötigt, ist dies doch ein erheblicher zeitlicher Aufwand. Ein anderer Nachteil ist, dass im Gelände Bilder aufgenommen werden, welche bei der anschließenden Erzeugung des 3D Bildes keine weitere Auswertung ermöglichen, da die Bilder entweder so stark zusammenschrumpfen oder der wichtige Bereich nicht dargestellt werden kann. Dadurch ist es im Gelände unbedingt notwendig mehrere Fotopaare von einem signifikanten Bereich zu machen. Ein weiterer Faktor ist der Preis für photogrammetrische Systeme, denn man benötigt, je nach System, nicht nur die speziellen Bezugspunkte für das System, sondern auch eine kalibrierte Kamera und die dazugehörige Software.

Bei der Auswertung der Daten für diese Arbeit ist es zeitweise zu Problemen gekommen, da man beim Arbeiten mit 3D Bilder etwas Übung benötigt um die verschiedenen Trennflächensysteme über zwei 3D Bilder hinweg zu verfolgen. Dadurch gibt es auch bei den Orientierungsdaten im Anhang Datensätze, wo Datenpunkte im relativ gleichen Bereich, bei unterschiedlichen Datensätzen unterschiedlich gefärbt sind.

Die Datenaufnahme mittels LiDAR ist jene, welche die größten Bereiche am genauesten aufnehmen kann, und liefert dabei sehr genaue Abbildungen in Form einer Punktwolke. Etwa ist es mittels eines Scanners (z.B. Rigel 3D TLS LMS-Z620) möglich 360° horizontal und 80° vertikal zu messen. Auch ist es durch LiDAR möglich Aufschlüsse

aufzunehmen die nicht zu erreichen sind, etwa große Steilhänge im Hochgebirge. Weiters ist es möglich mittels LiDAR auch sehr kleine Trennflächen zu erkennen und aufzunehmen. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Vegetation und andere Störfaktoren auf dem Aufschluss mittels der Software entfernt (trianguliert) werden können. Allerdings nimmt genau dieser Vorgang sehr viel Zeit in Anspruch, wodurch diese Methode, mit dem Entfernen der Störfaktoren, die zeitaufwändigste ist. Ebenso nimmt das Georeferenzieren viel Zeit in Anspruch, wobei das Georeferenzieren wiederum auch ein Vorteil ist, da alle Daten in einen einzelnen System georeferenziert werden. Anders als bei einer Scanline, wo jede einzelne ein eigenes System hat. Ein Aspekt ist der hohe Preis des Systems, da nicht nur der Laserscanner sondern auch ein GPS-Gerät, hierbei am besten ein RTK-GPS Gerät, benötigt wird.

Ein Nachteil der sich bei Analyse ergeben hat ist, dass es sein kann, dass die Punktwolke schon zu genau ist. Hierbei trat das Problem auf, dass am Beginn bis zu 21 verschiedene Trennflächensysteme erkannt wurden, wo es nur 4 Hauptsysteme gibt.

In Abbildung 88 ist schematisch dargestellt welche Erfassungsmethode für welchen Parameter geeignet sind. Hierbei bedeutet + sehr gut geeignet, 0 es ist möglich, allerdings ist etwas Aufwand nötig, etwa verschiedene Berechnungen und - bedeutet die Methode ist nicht geeignet.

	Scanline- Methode Am Aufschluss	Scanline- Methode Im Bohrloch	Window- Methode Am Aufschluss	Window- Methode Photogrammetrie	Window- Methode LiDAR
Orientierung	+	+	+	+	+
Abstand	+	+	+	+	+
Spurlänge	+	-	+	+	+
Termination	+	-	+	+	+
Rauigkeit	○	○	○	+	+
Intensität	○	○	○	○	○
Häufigkeit	+	+	+	+	+
Größe	○	-	○	○	+

**Abbildung 88** Mögliche Erfassungsmethoden und ihre Eignung zur Bestimmung der Parameter

## 8. Zusammenfassung

Es gibt drei verschiedene Methoden Daten für die Gebirgscharakterisierung aufzunehmen. Jede diese Methode hat ihre Vor- und Nachteile und muss weiter ausgewertet werden. Auch hierbei gibt es Unterschiede und auch verschiedene Methoden die verwendet werden. Welche Methode letztendlich für ein Projekt gewählt wird, hängt sowohl von der Beschaffenheit und Anzahl der Aufschlüsse als auch von den finanziellen Möglichkeiten ab.

Unterschiede in der Genauigkeit der Ergebnisse konnten keine erkannt werden.

## 9. Literaturverzeichnis

3G Software & Measurement GmbH (2006): ShapeMetrix3D 3D imaging for measuring and assessing rock and terrain surfaces, Graz

BAE Dae-seok, KIM Kyung-su, KOH Young-kwon, KIM Jung-yul (2011): Characterization of Joint Roughness in Granite by Applying the Scan Circle Technique to Images from a Borehole Televiewer, Rock Mechanics and Rock Engineering, Springer Verlag

BERGMAIR M., HARER G., RIEDMÜLLER G., STADLMANN T.(1996): Die Baugeologie des Galgenbergtunnels, Felsbau 14 (1996) Nr. 1

GENEVOIS R., GHIROTTI M. (2005): The 1963 Vaiont Landslide, Giornale di Geologica Applicata (2005) 41-52

HUDSON J. A., HARRISON J. P. (1997): Engineering rock mechanics, an introduction to the principles, Published by ElsevierScience Ltd.

KIEFFER, S. (2014): Engineering Geological Field Excursion, The Vaiont and Malpasset Dam Disasters, Institute of applied Geosciences, University of technology, Graz

KREUZER H. (1997): Bogenmauer Francisco Morazán in Honduras- Erweiterung des Dichtungsschleiers in Karstgestein, Felsbau 15 (1997) Nr. 1

LEIMSER W., KÖHLER M. (1994): Die baugeologischen Verhältnisse des Intaltunnels, Felsbau 12 (1994) Nr. 2

LI S.J., FENG Xia-Ting, WANG C.Y., HUDSON J.A. (2013): ISRM Suggested Method for Rock Fractures Observations Using a Borehole Digital Optical Televiewer, Rock Mechanics and Rock Engineering, Springer Verlag, Austria

LIU Q. (2014a): Rock Mass Characterization, Institute of applied Geosciences, University of technology, Graz

LIU Q. (2014b): Modelling in Engineering Geology, Institute of applied Geosciences, University of technology, Graz

LIU Q., KIEFFER D.S. (2011): Virtual Outcrop Modeling for 3D Characterization of Engineering Rock Masses, American Rock Mechanics Association

LONDE P. (1987): The Malpasset Dam Failure, Engineering Geology, 24 (1987) 295-329, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam

MALDON M. (1998): Estimating Mean Trace Length and Density from Observations in Convex Windows, Rock Mechanics and Rock Engineering, Springer Verlag Printed in Austria

MALDON M., DERSHOWITZ W. (2000): A Multi- Dimensional System of Frature Abundance Measures, Geological Society of America Annual Meeting, Reno, Nevada, November 2000, Summit 2000

MEISTER J., PFARRE I., PETERS J. (1997): Großflächiger Erkundungsschurf zur Beurteilung der Gründungsverhältnisse einer Gewichtsstaumauer, Felsbau 15 (1997) Nr. 1

NEUBAUER F.R. (1980): Die Geologie des Maurauer Raumes-Forschungsstand und Probleme, Mitt. Abt. Geol. Paläont. Bergb. Landesmus. Joanneum, Heft 41, Graz

OTTO B., MOOR C. (1997): Felsmechanisch- hydraulische Wechselwirkung in der Foundation der Bogenmauer Sta. Maria, Felsbau 15 (1997) Nr.1

Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, Richtlinie für die Geomechanische Planung von Untertagebauarbeiten mit zyklischem Vortrieb, Gebirgscharakterisierung und Vorgangsweise zur nachvollziehbaren Festlegung von bautechnischen Maßnahmen während der Planung und Bauausführung, 50. Geomechanik Kolloquium Oktober 2001

PÖLSLER P. (2000): Geologische Prognose und tatsächliche Verhältnisse- Beispiele aus dem Pilotstollen des Semmering Basistunnels, Mitt. Österr. Geol. Ges., Heft 91, Wien

PRIEST, S.D. (1993): Discontinuity Analysis for Rock Engineering; Springer Verlag Netherlands

REICHL P., VANEK R., Forstinger+Stadlmann ZT GmbH (2011): Geotechnische und hydrogeologische Herausforderungen bei der Planung des "Semmering-Basistunnel neu" alumniTalks 016, Die Zukunft liegt im Untergrund, TU Graz, 22-06-2011

RIEDMÜLLER G., SCHUBERT W., GORICKI A., PÖLSLER P. (2000): Investigation Strategies for the Design of the Semmering Base Tunnel, Felsbau 18 (2000) No. 4

SCHUBERT W. (1993): Erfahrungen bei der Durchörterungen einer Großstörung im Inntaltunnel, Felsbau 11, Essen

SCHUBERT W., SIDING U., LEIMSER W.: Inntaltunnel-Vortrieb des Abzweigungsbauwerkes Brenner,

SEMENZA E., GHIROTTI M. (2000): History of the 1963 Vaiont slide: the importance of geological factors, Bull Eng Geol Env (2000) 59:87-97, Springer Verlag

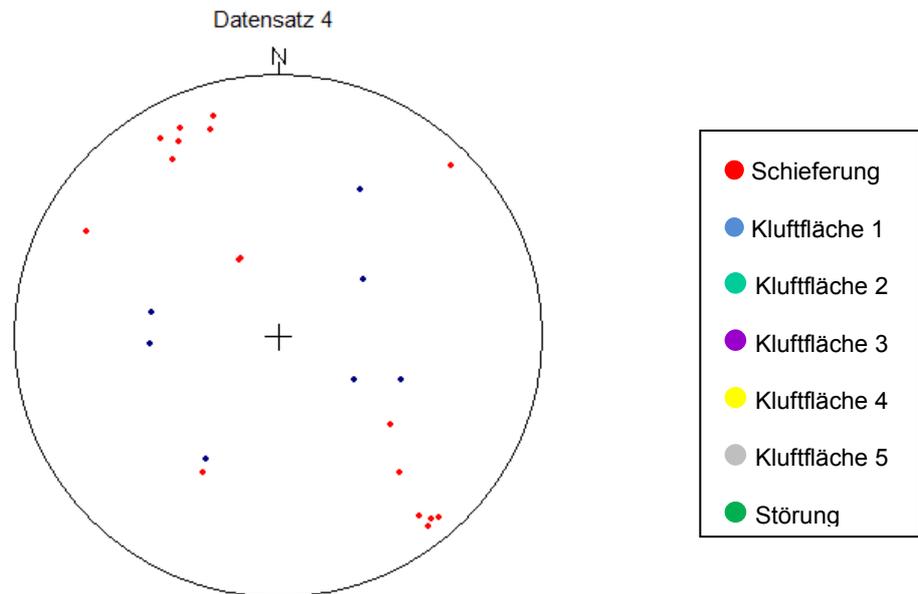
WARBURTON P. M. (1980b): Stereological interpretation of joint trace data; influence of joint shape and implications for geological surveys. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomach. Abstr. 17, 305-316

ZHANG L., EINSTEIN H. H. (1998): Estimating the Mean Trace Length of Rock Discontinuities, Rock Mechanics and Rock Engineering, Springer Verlag Printed in Austria

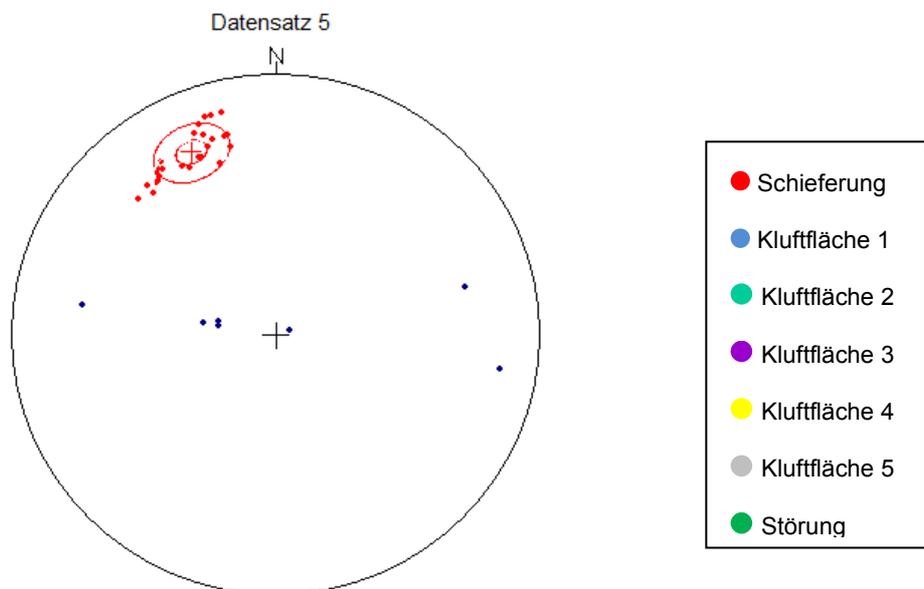
ZHANG L., EINSTEIN H. H., DERSHOWITZ W. S.(2002): Stereological relationship between trace length and size distribution of elliptical discontinuities, Geotechnique 52, No. 6, 419-433

# 10. Anhang

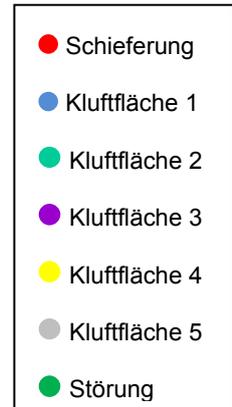
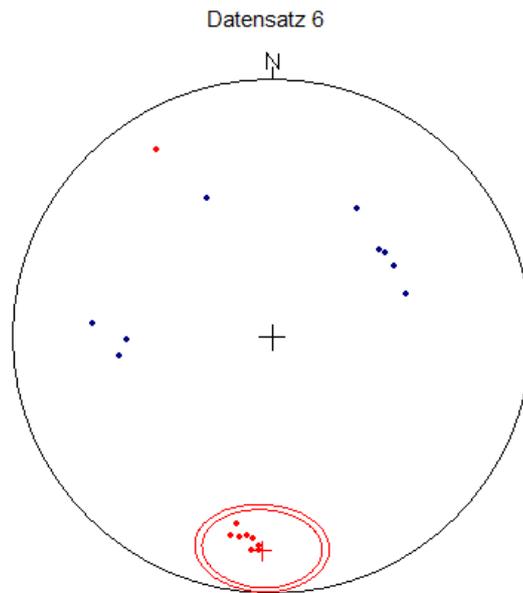
## A. Daten aus der Scanline Analyse



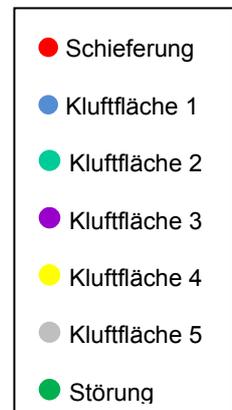
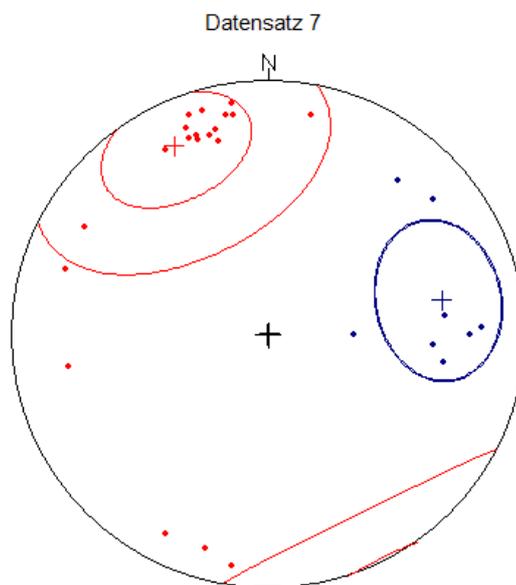
Datensatz 4	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktläche
K	52,08	3,58	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	200/2
SF	44,96	3,43	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	161/97



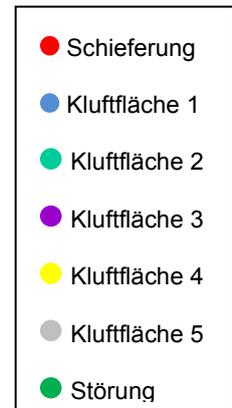
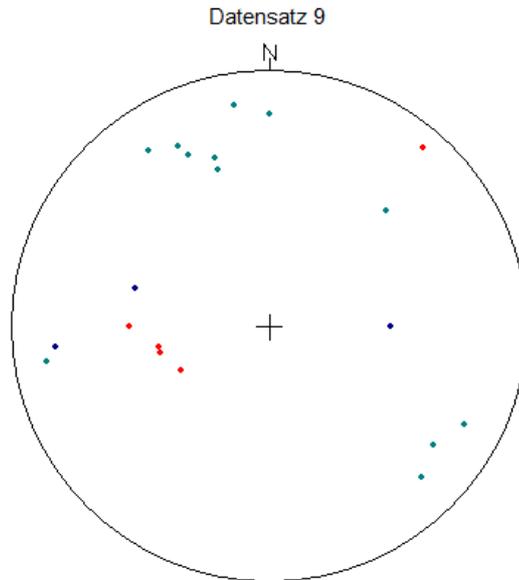
Datensatz 5	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktläche
K	43,21	30,2	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	200/5
SF	96,82	60,94	4,66	11,41	173/73



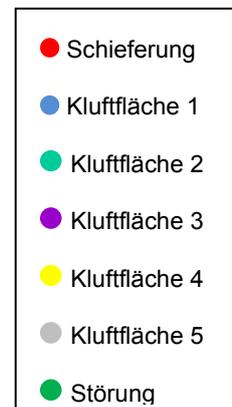
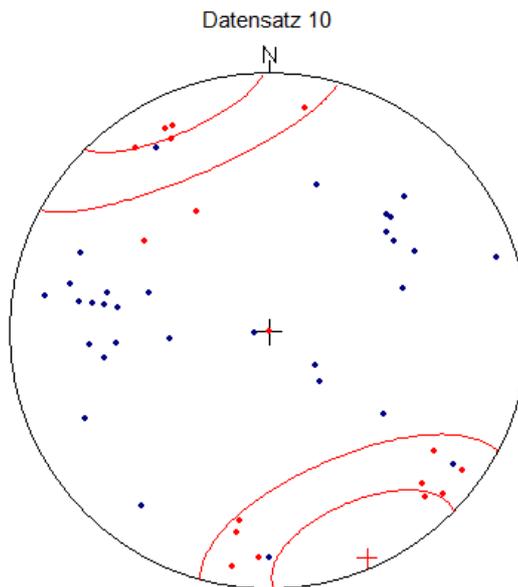
Datensatz 6	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktläche
K	46,42	3,32	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	203/27
SF	91,41	20,68	16,88	18,94	3/80



Datensatz 7	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktläche
K	84,79	11,51	25,08	25,51	287/65
SF	57,24	4,47	22,78	45,37	171/80

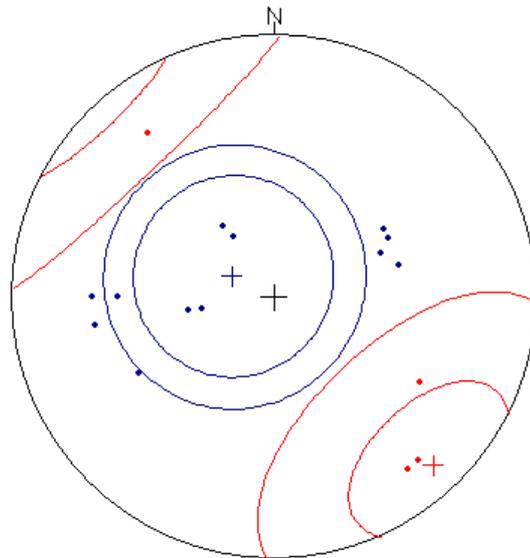


Datensatz 9	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktläche
K1	51,07	2,72	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	303/93
K2	9,23	2,02	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	198/51
SF	49,72	3,18	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	110/30



Datensatz z 10	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktläche
K	25,1	2,6	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	123/28
SF	60,21	4,75	25,19	43,45	374/94

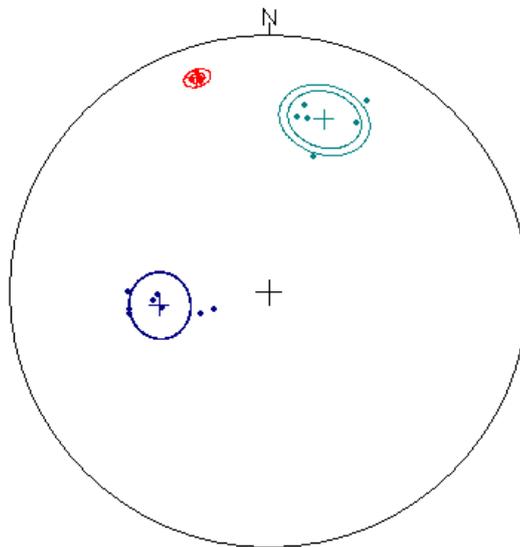
Datensatz 11



- Schieferung
- Klufffläche 1
- Klufffläche 2
- Klufffläche 3
- Klufffläche 4
- Klufffläche 5
- Störung

Datensatz 11	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktfäche
K	56,15	4,18	34,83	46,08	130/60
SF	84,36	9,59	51,43	25,88	352/86

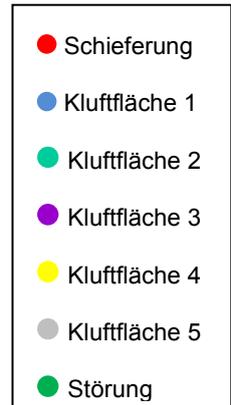
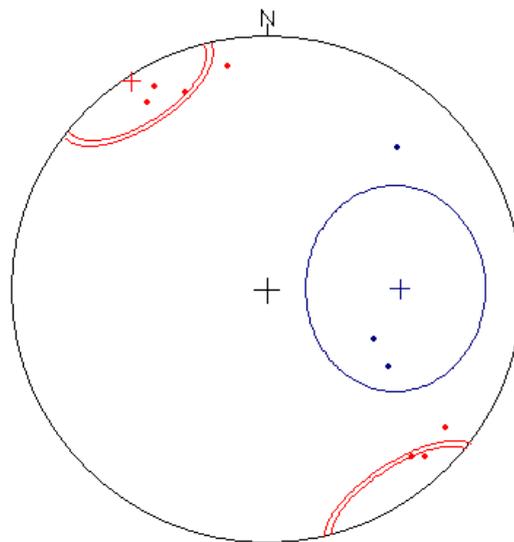
Datensatz 12



- Schieferung
- Klufffläche 1
- Klufffläche 2
- Klufffläche 3
- Klufffläche 4
- Klufffläche 5
- Störung

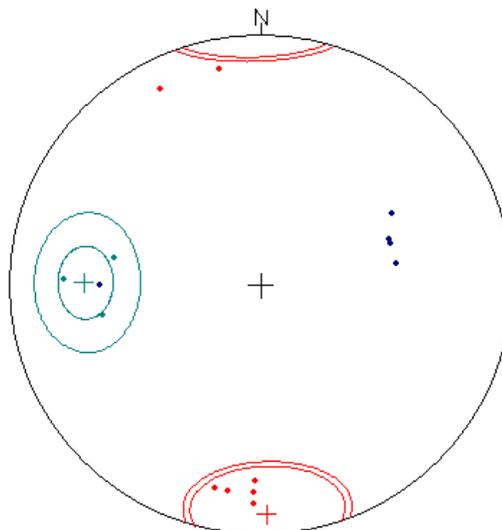
Datensatz 12	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktfäche
K1	96,85	55,54	11	11,36	92/39
K2	96,89	53,54	13,95	11,29	220/67
SF	99,9	1560	3,77	1,97	180/85

Datensatz 13

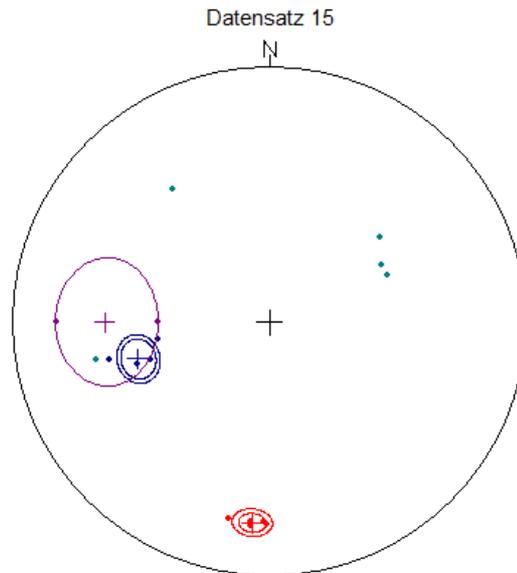


Datensatz 13	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunkfläche
K	73,55	5,04	nicht bestimmbar	34,39	299/48
SF	89,96	17,08	22,35	20,52	164/98

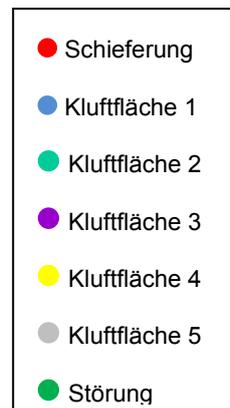
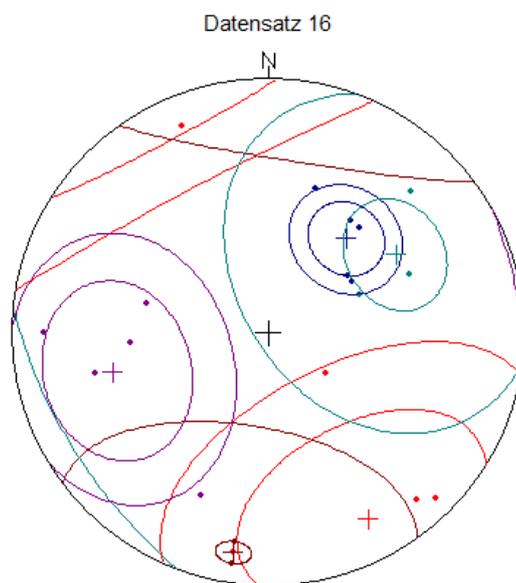
Datensatz 14



Datensatz 14	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunkfläche
K1	58,69	3,87	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	271/36
K2	96,82	47,1	21,96	11,42	101/66
SF	89,3	16,02	23,13	21,22	398/90

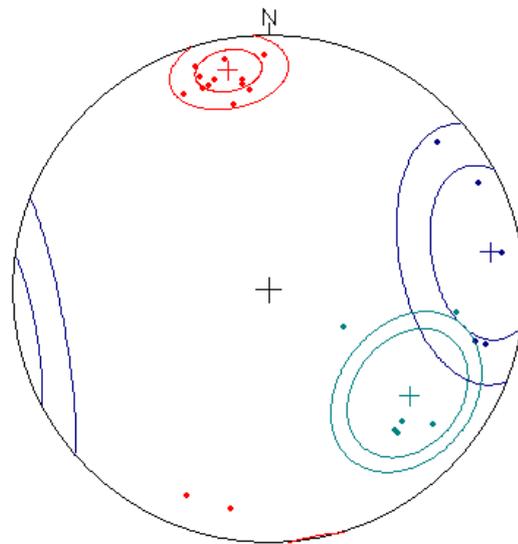


Datensatz 15	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktfläche
K1	98,93	156,49	8,11	6,58	82/49
K2	46,39	2,98	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	219/27
K3	90,21	10,22	nicht bestimmbar	20,26	100/60
SF	99,61	406,95	5,88	3,99	6/76



Datensatz 16	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktfläche
K1	95,72	37,35	19,66	13,27	244/44
K2	91,39	15,49	59,42	18,96	265/54
K3	80,37	8,15	44,58	29,22	84/58
SF1	67,61	4,94	60,45	38,55	369/80
SF2	99,38	162,2	51,18	5	10/85

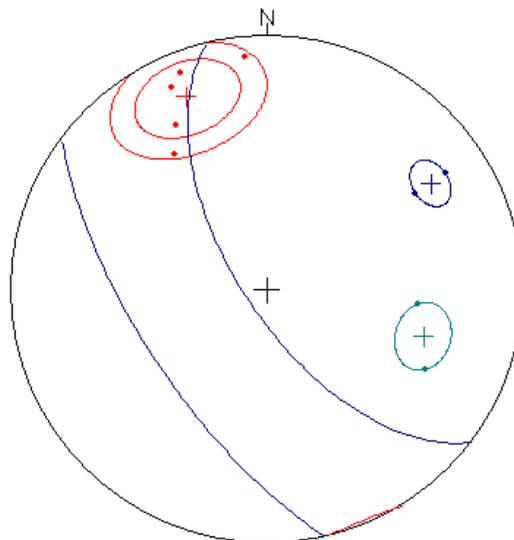
Datensatz 18



- Schieferung
- Klufffläche 1
- Klufffläche 2
- Klufffläche 3
- Klufffläche 4
- Klufffläche 5
- Störung

Datensatz 18	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktfläche
K1	85,73	11,21	37,23	24,66	289/85
K2	88,8	14,88	27,17	21,73	341/65
SF	93,37	28,51	9,3	16,57	188/85

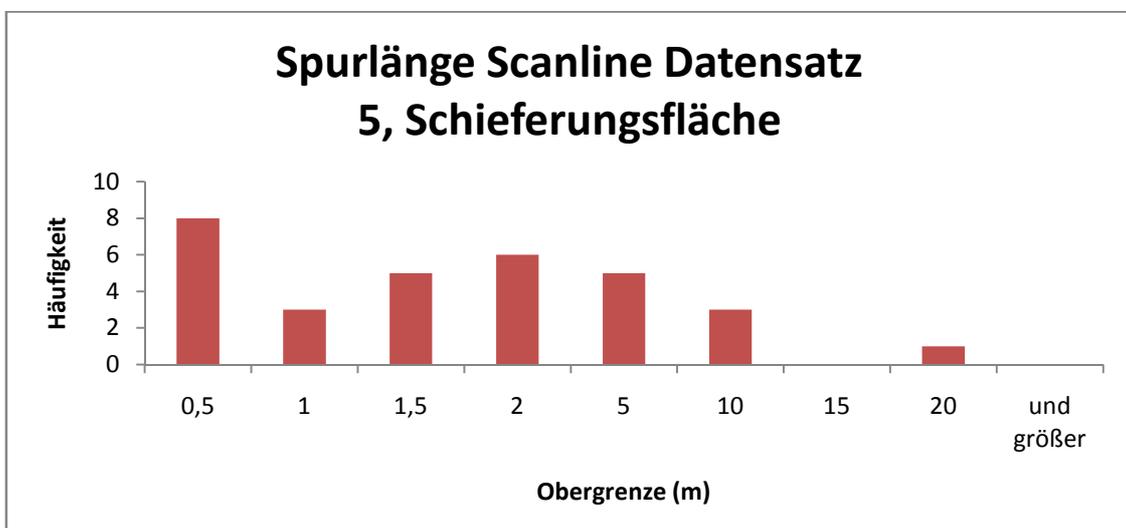
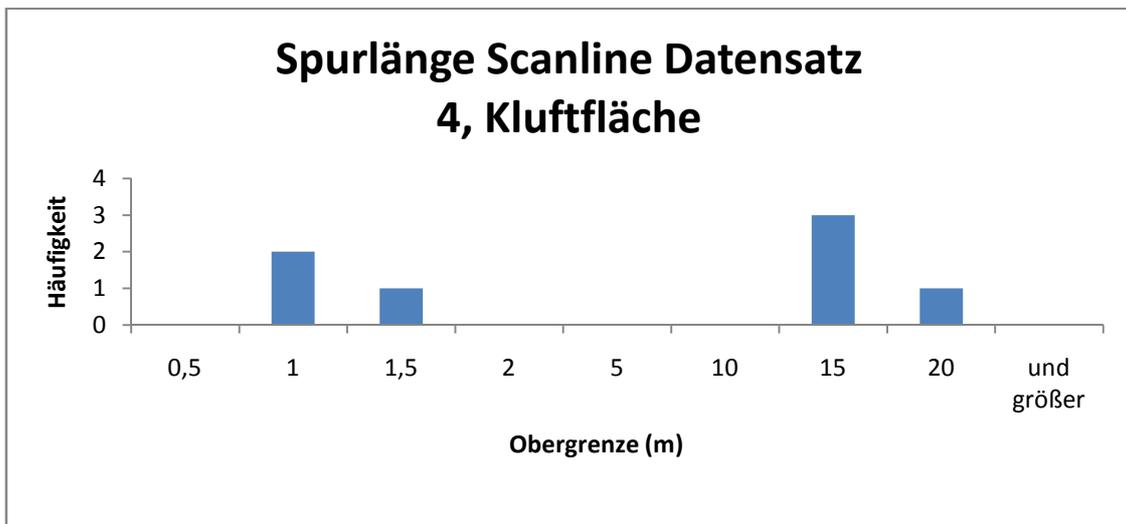
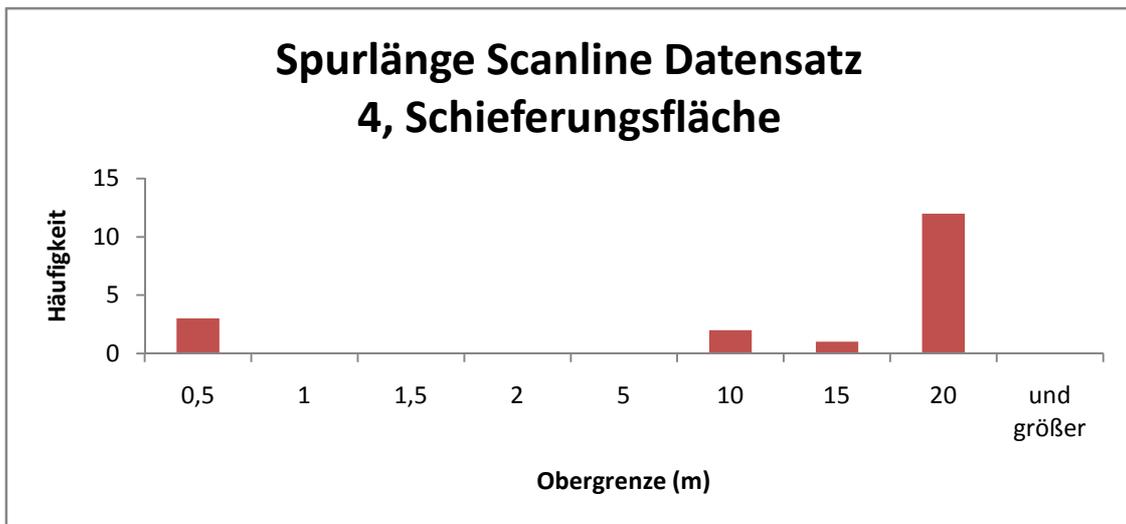
Datensatz 19

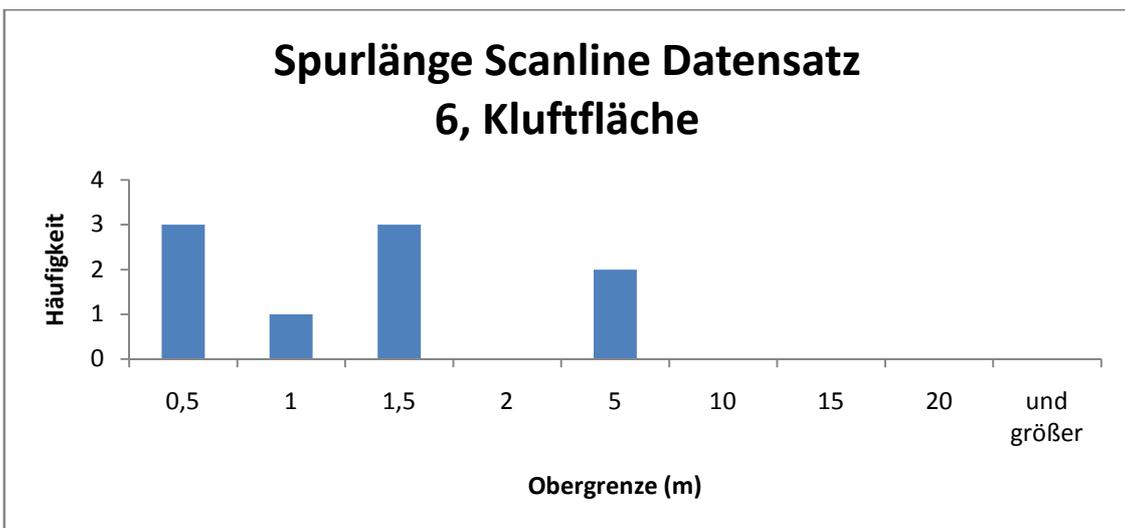
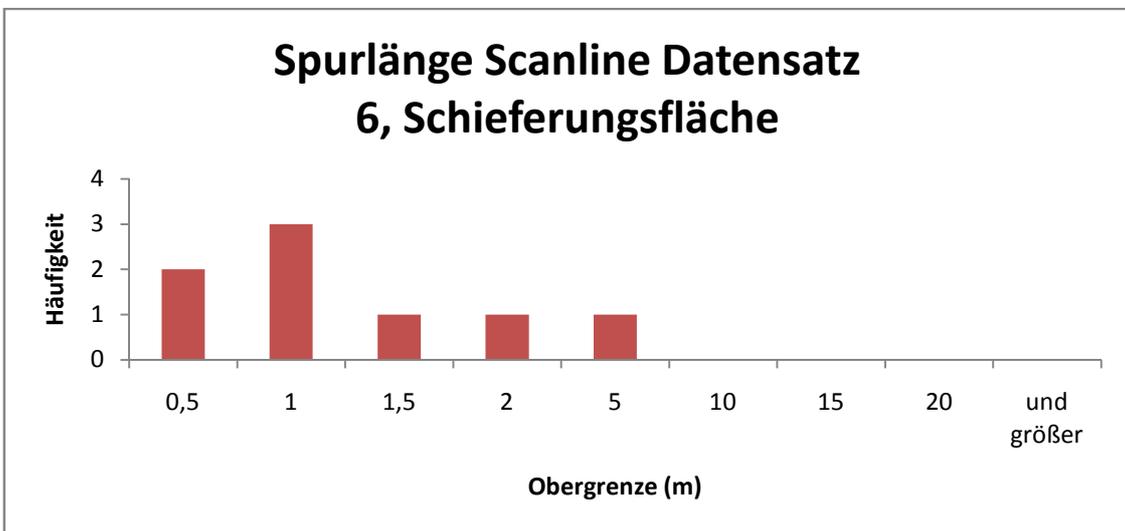
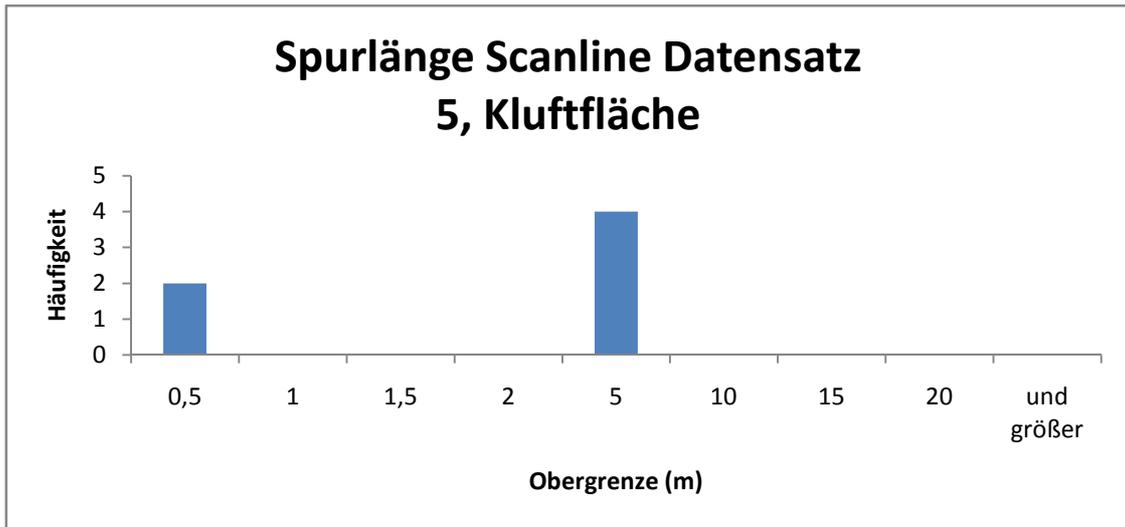


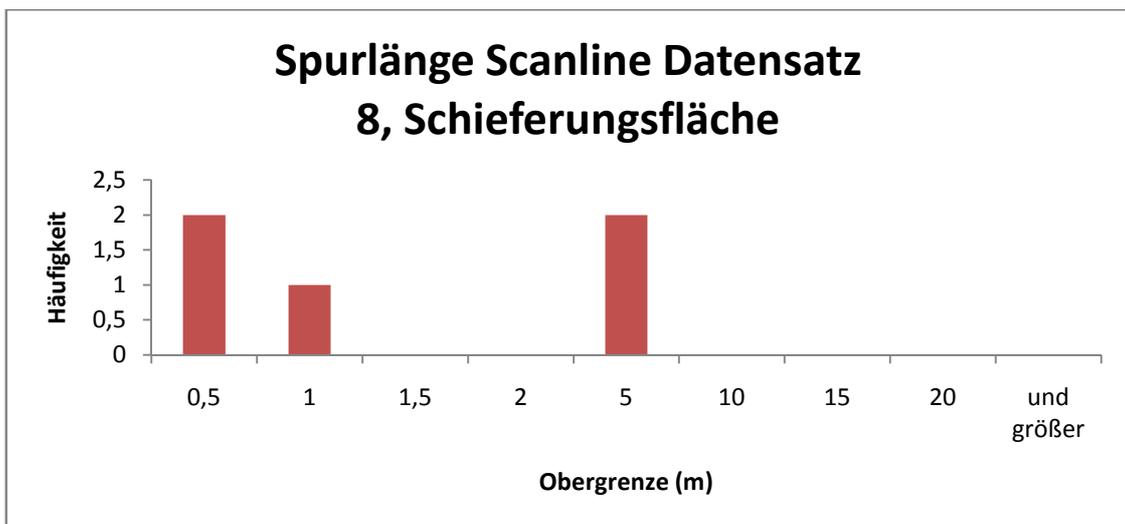
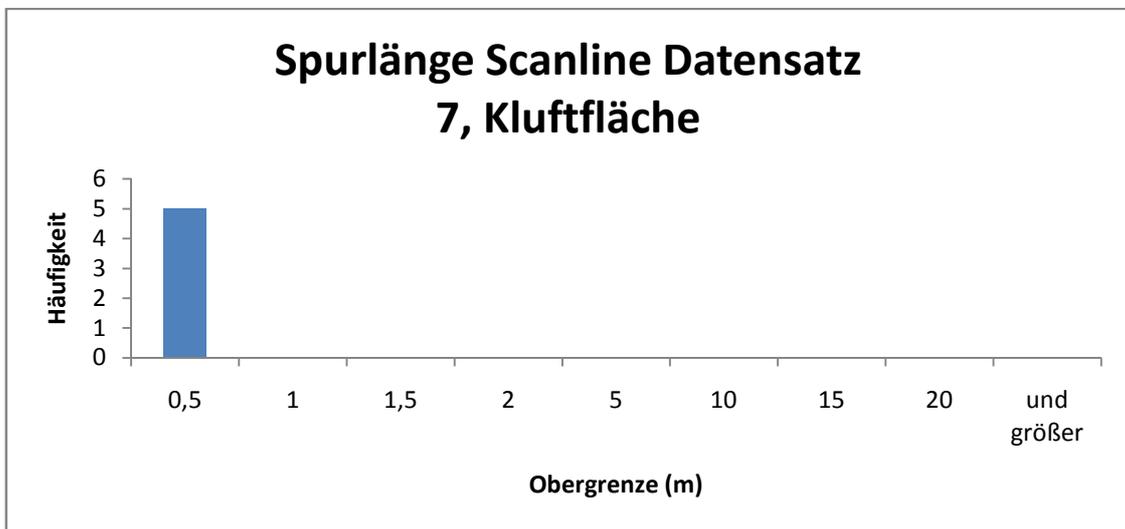
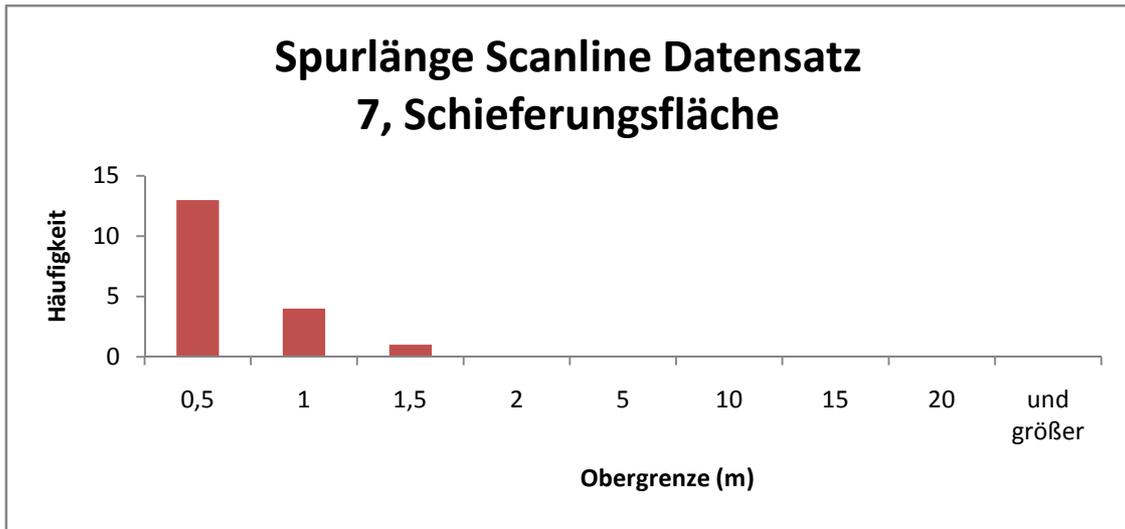
- Schieferung
- Klufffläche 1
- Klufffläche 2
- Klufffläche 3
- Klufffläche 4
- Klufffläche 5
- Störung

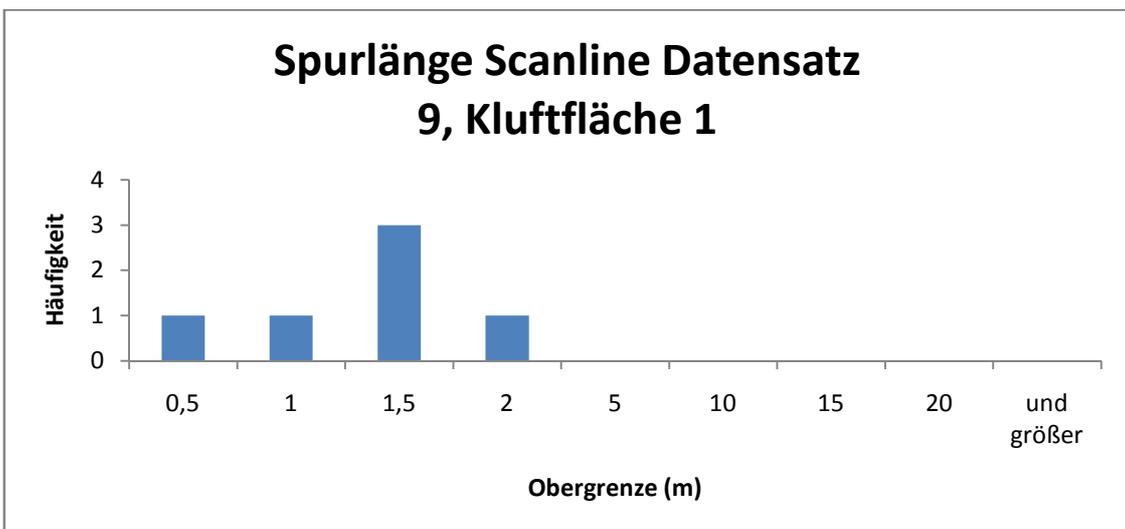
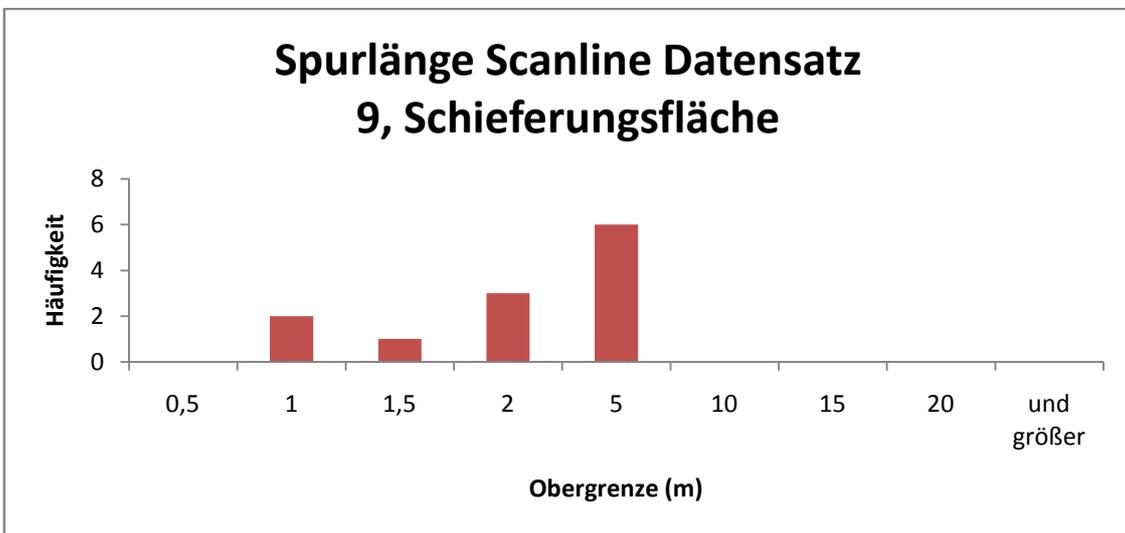
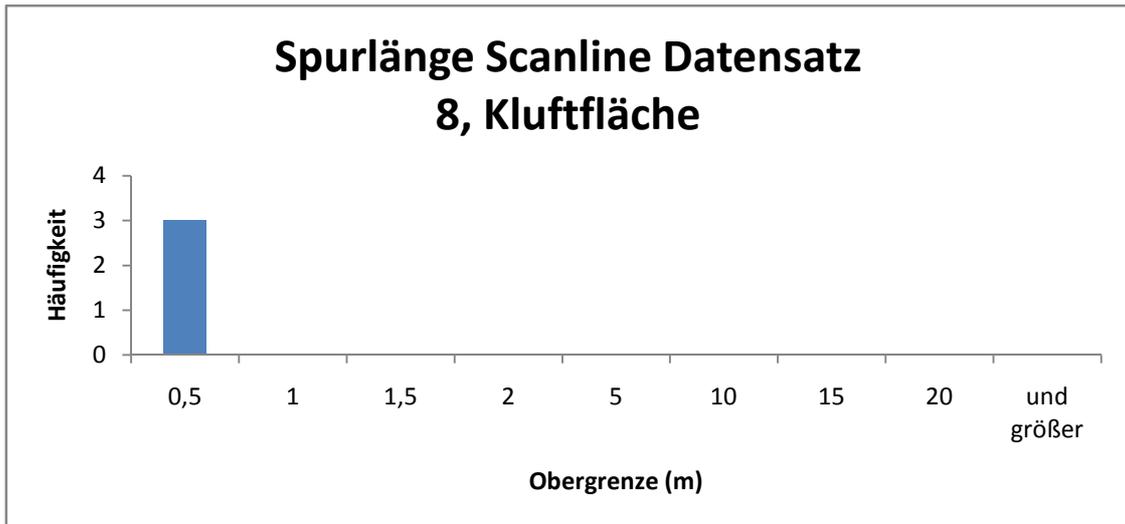
Datensatz 19	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktfläche
K1	98,61	72,13	80	7,51	263/73
K2	97,09	34,33	nicht bestimmbar	10,92	319/59
SF	93,93	26,35	23,56	15,85	175/79

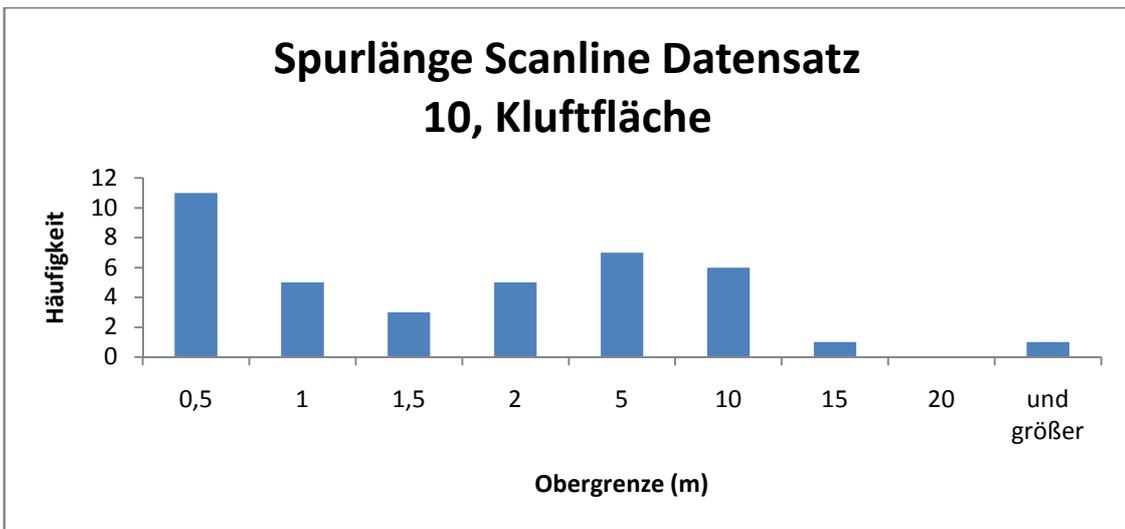
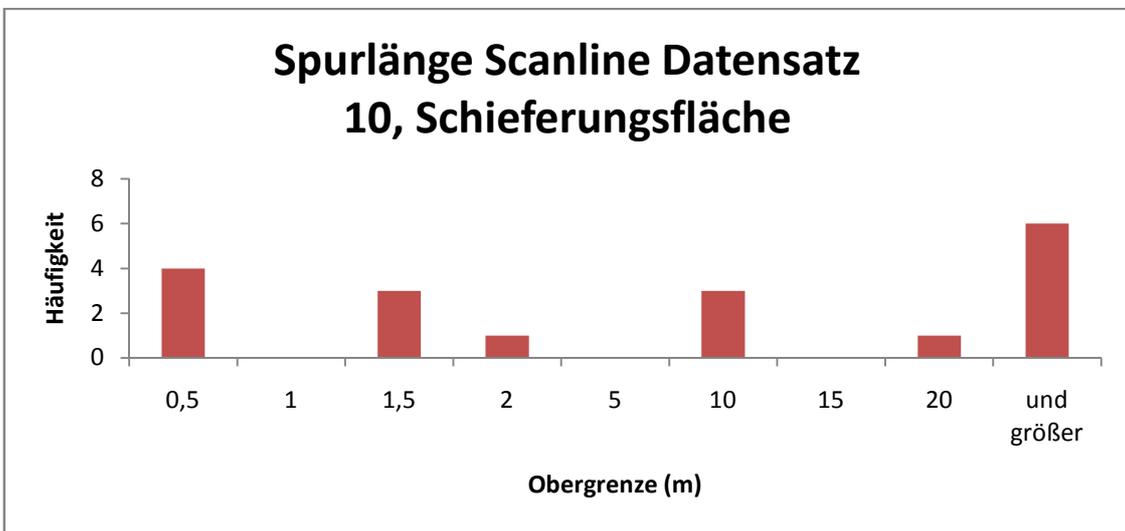
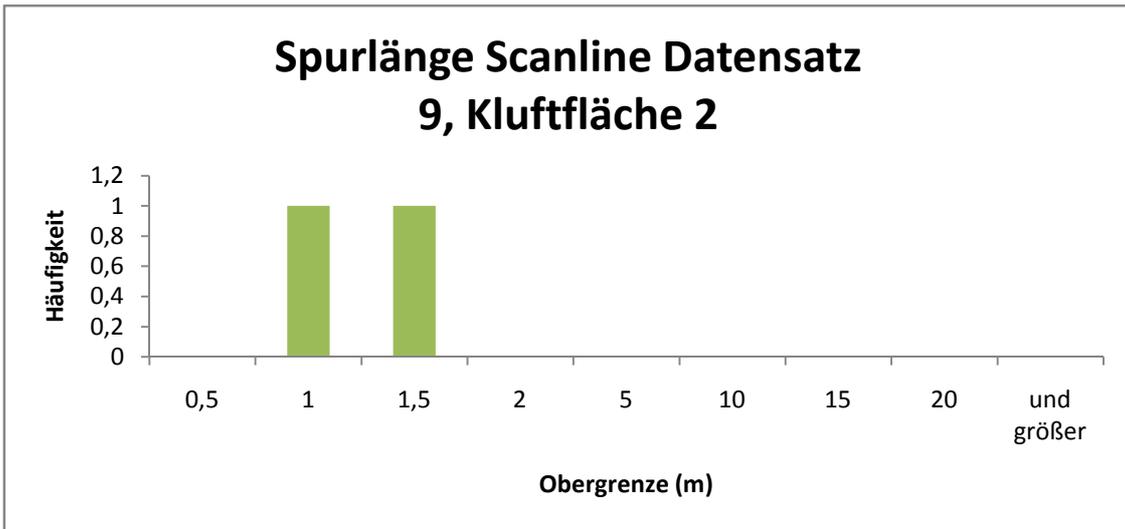
## Spurlängen von den Scanline- Daten

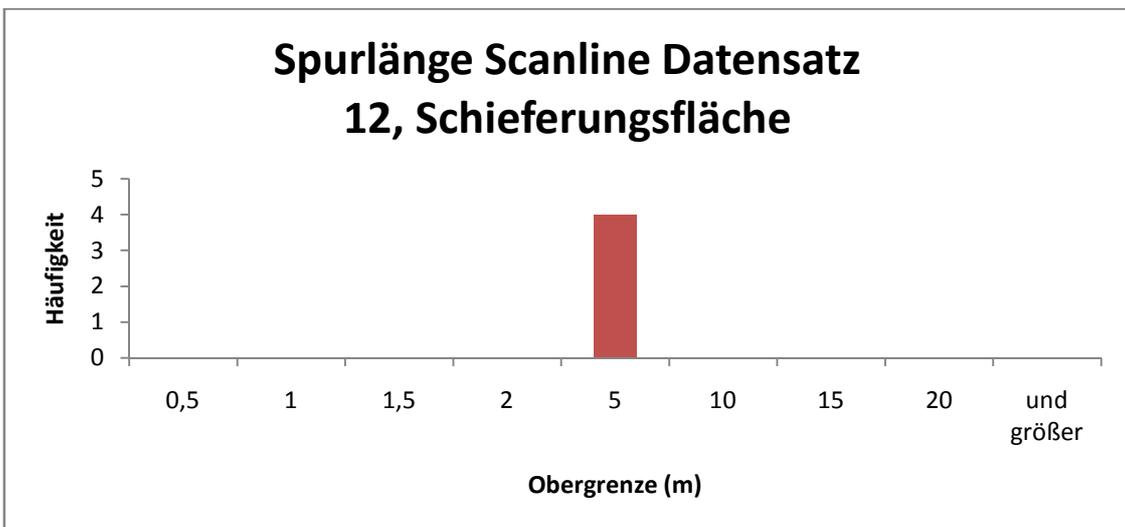
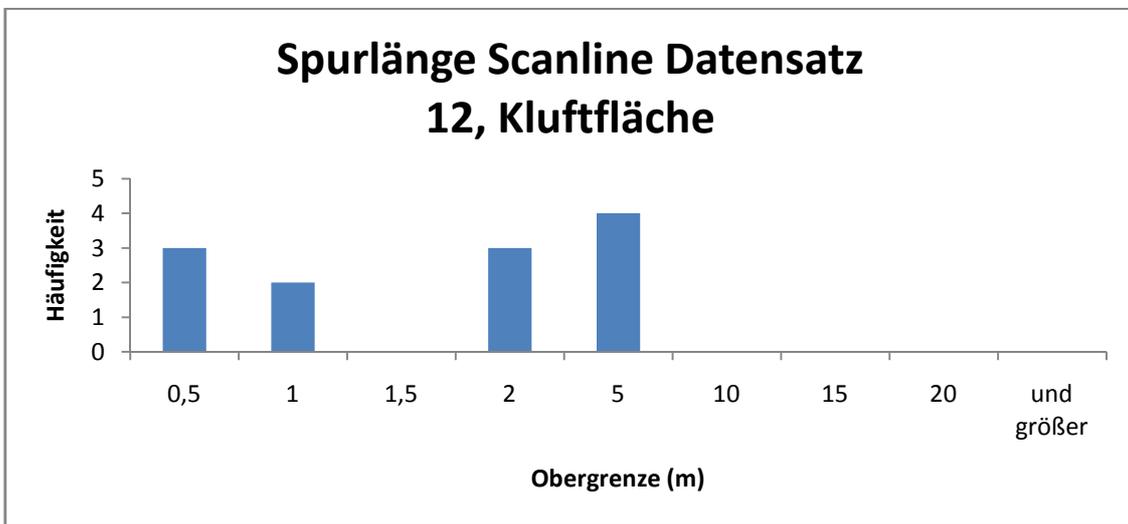
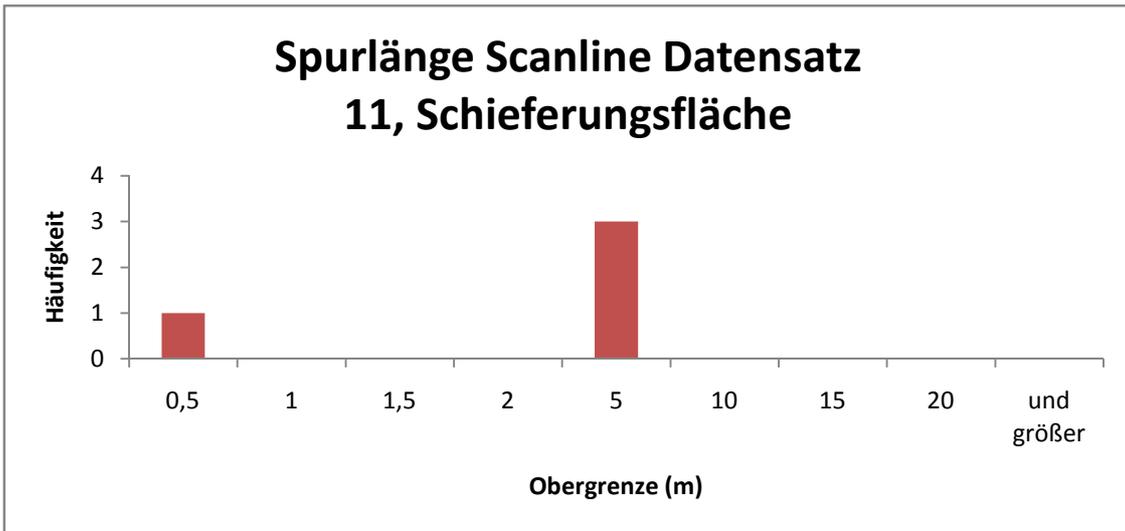


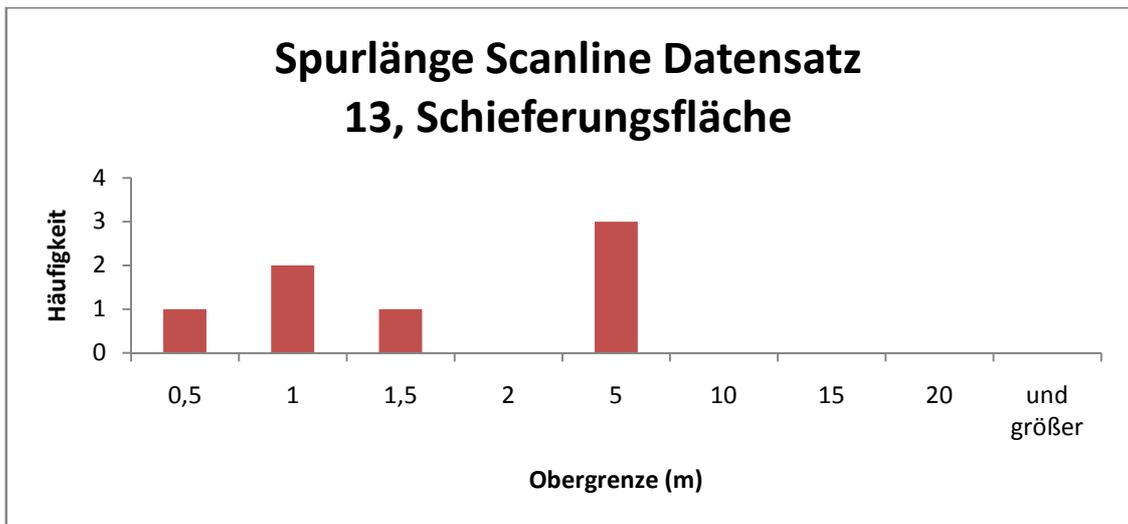
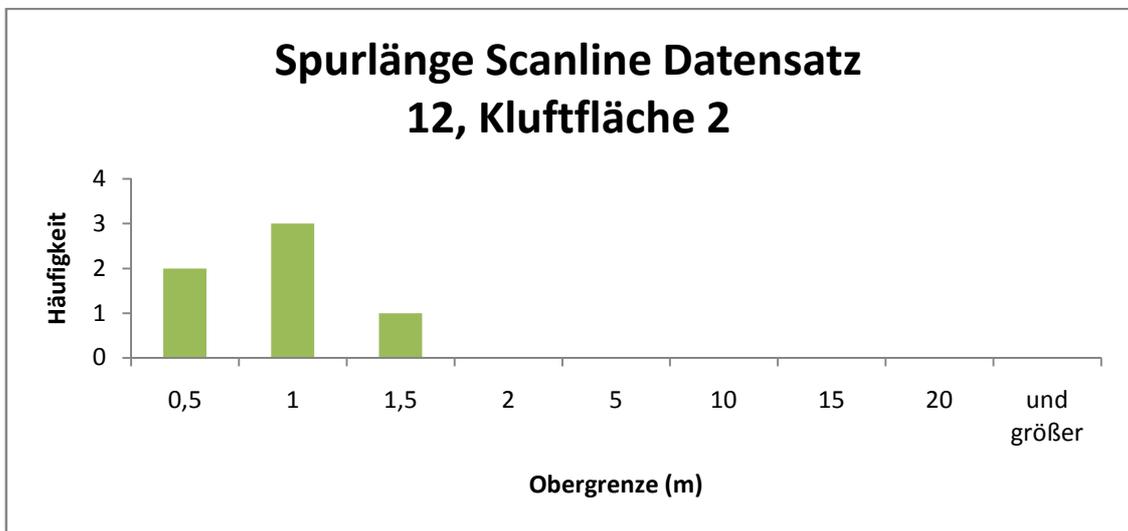
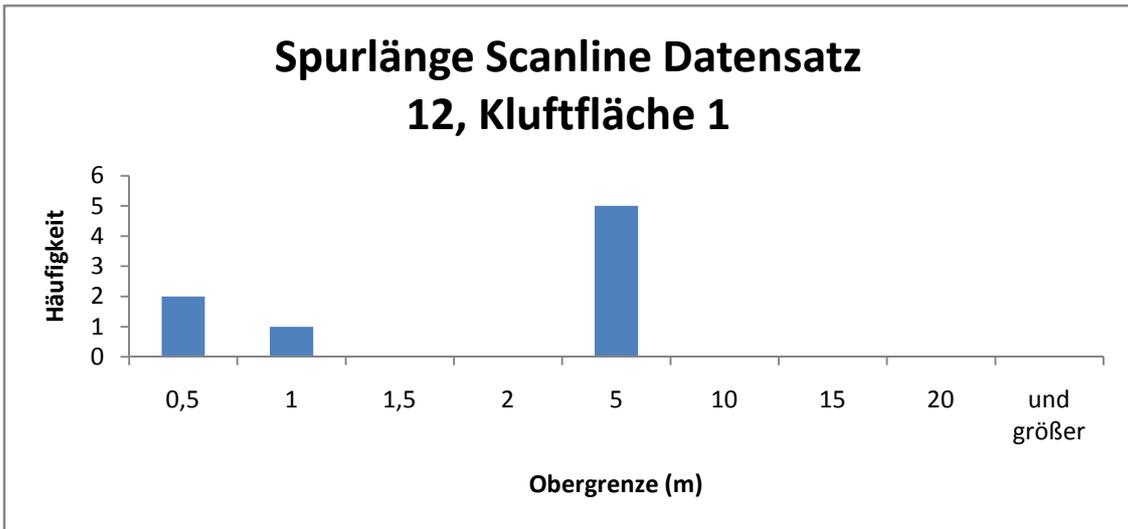


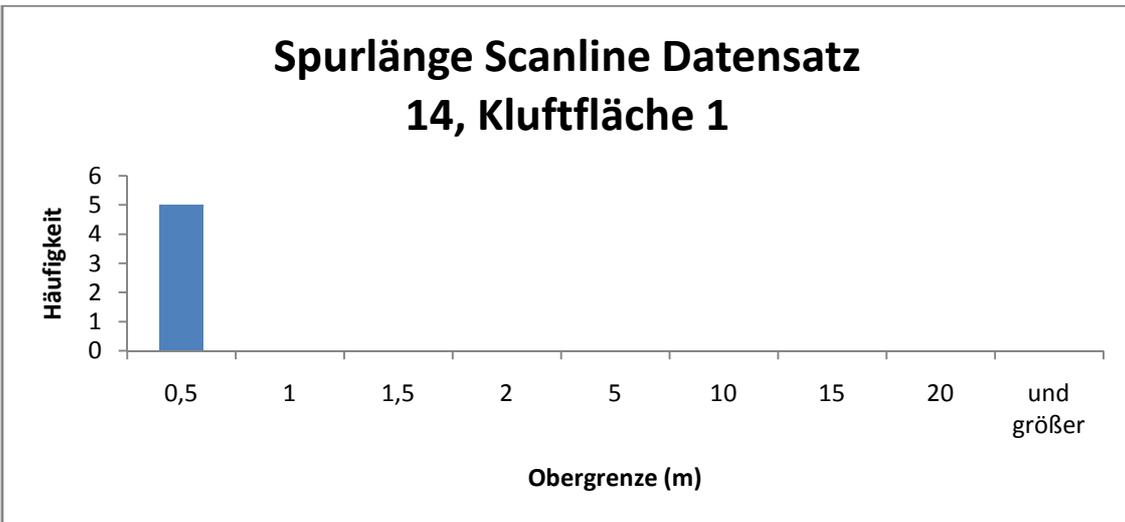
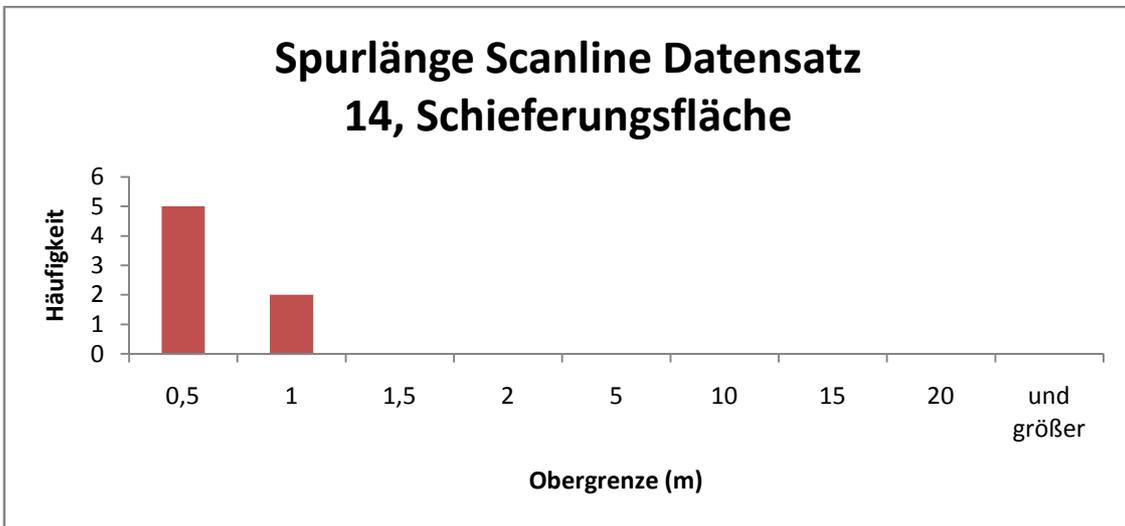
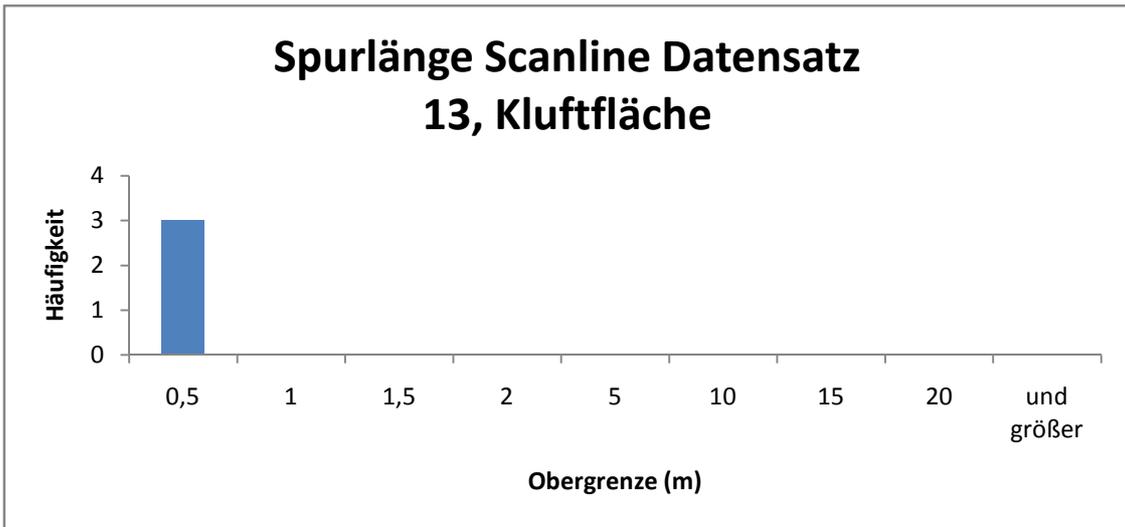


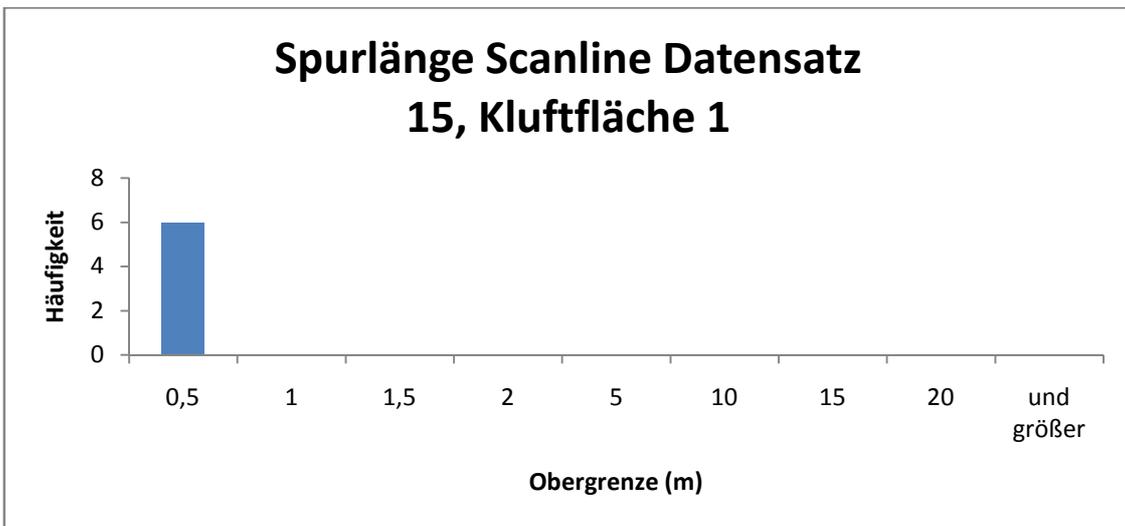
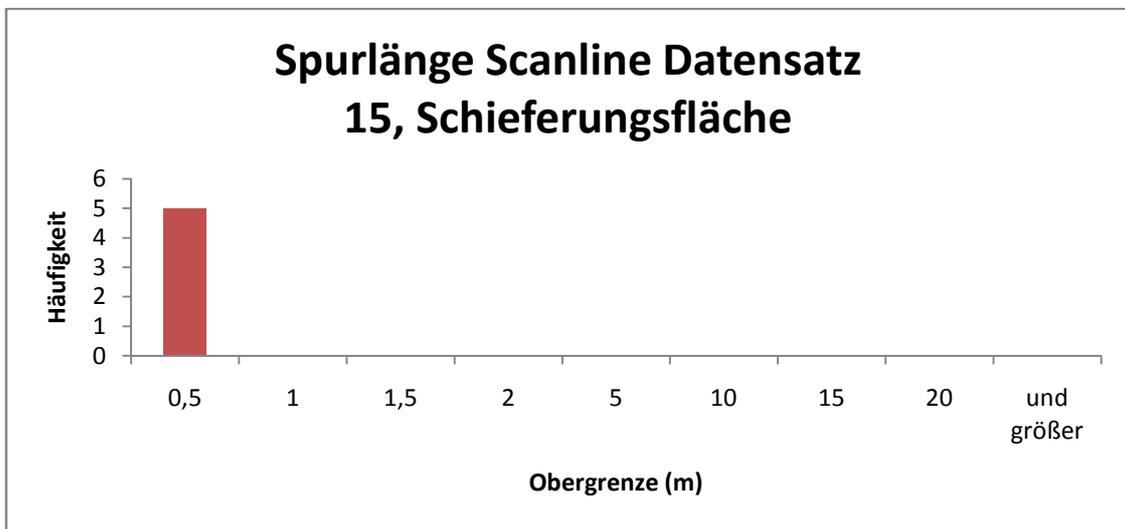
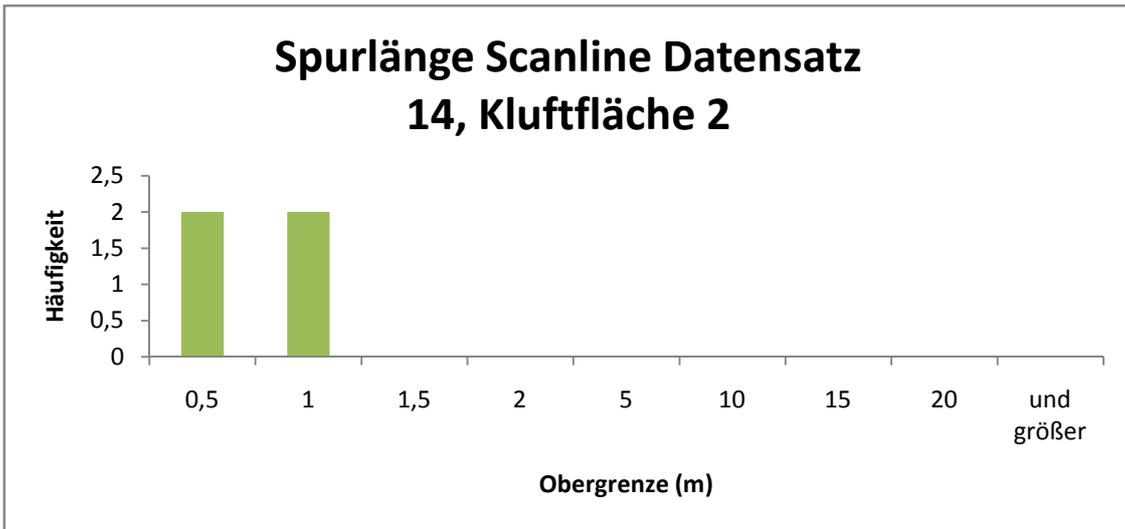


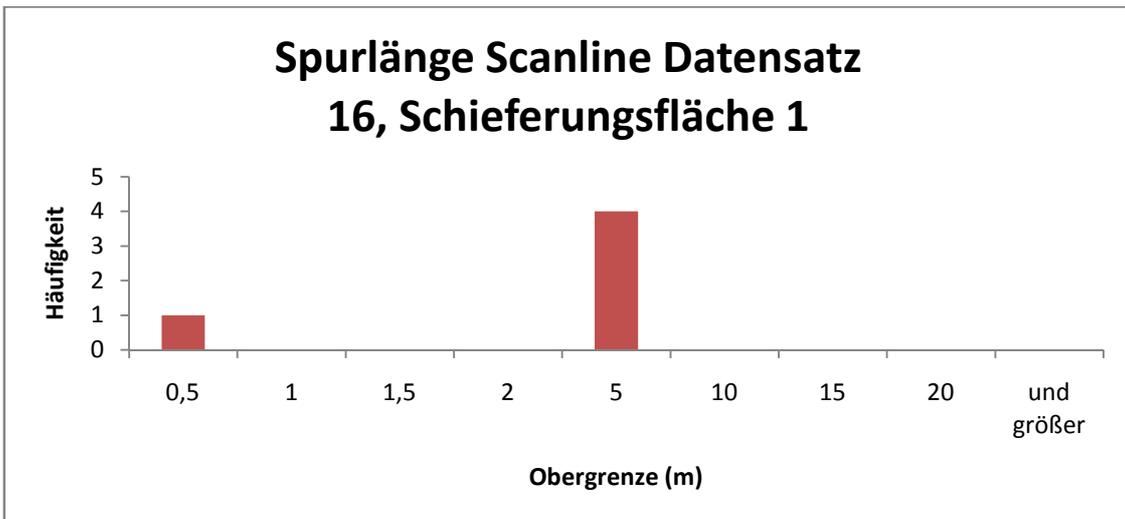
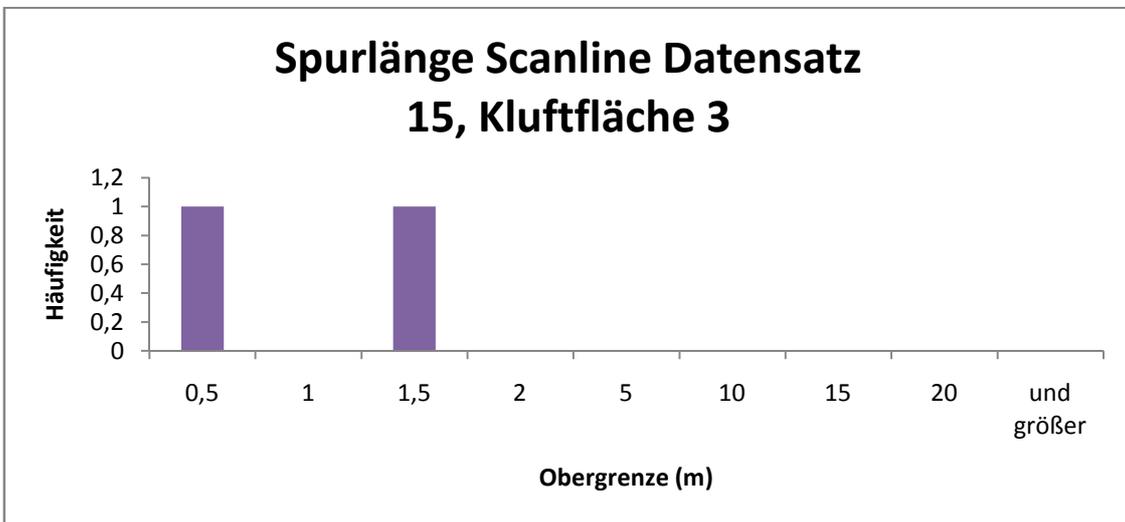
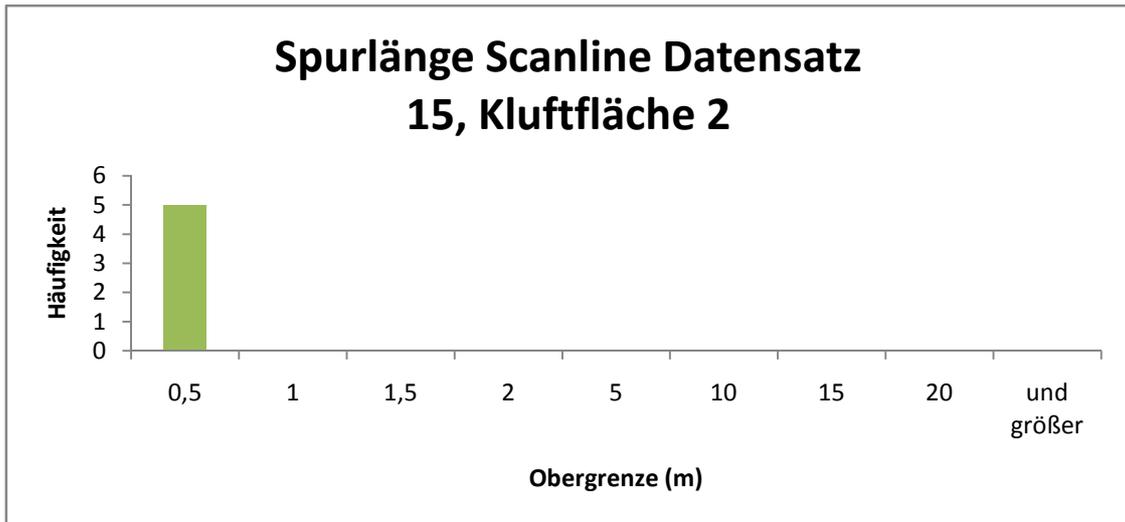


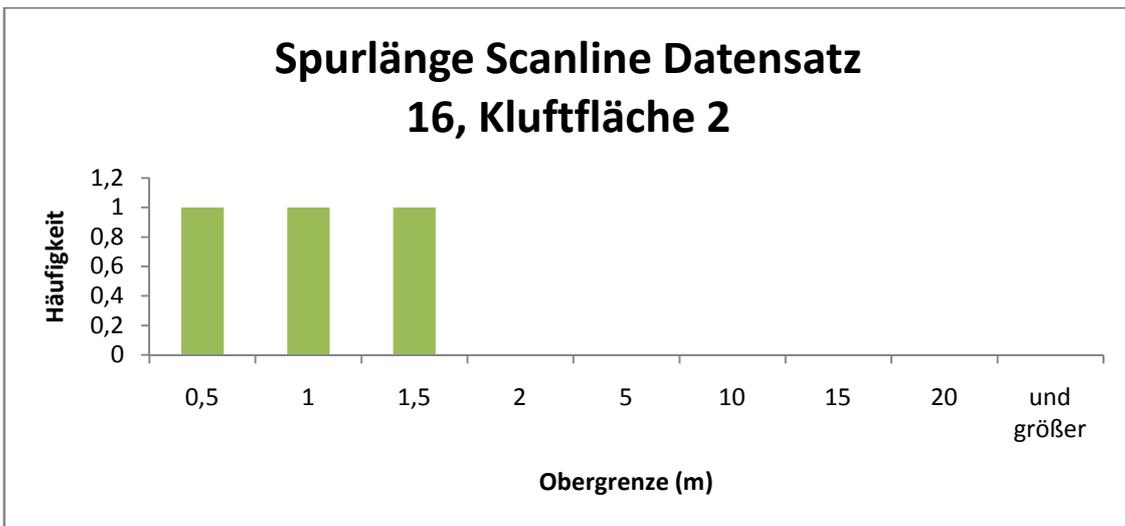
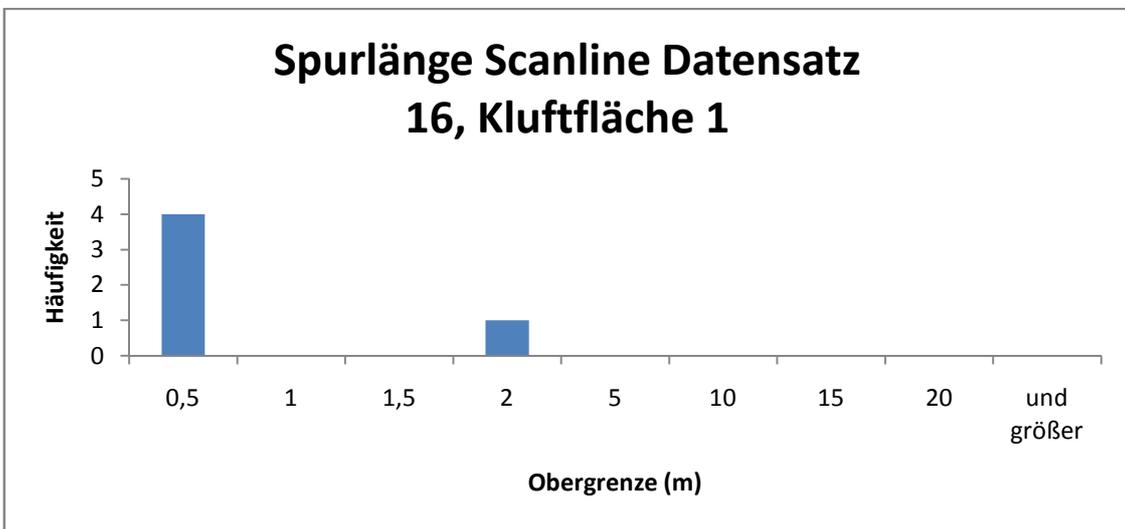
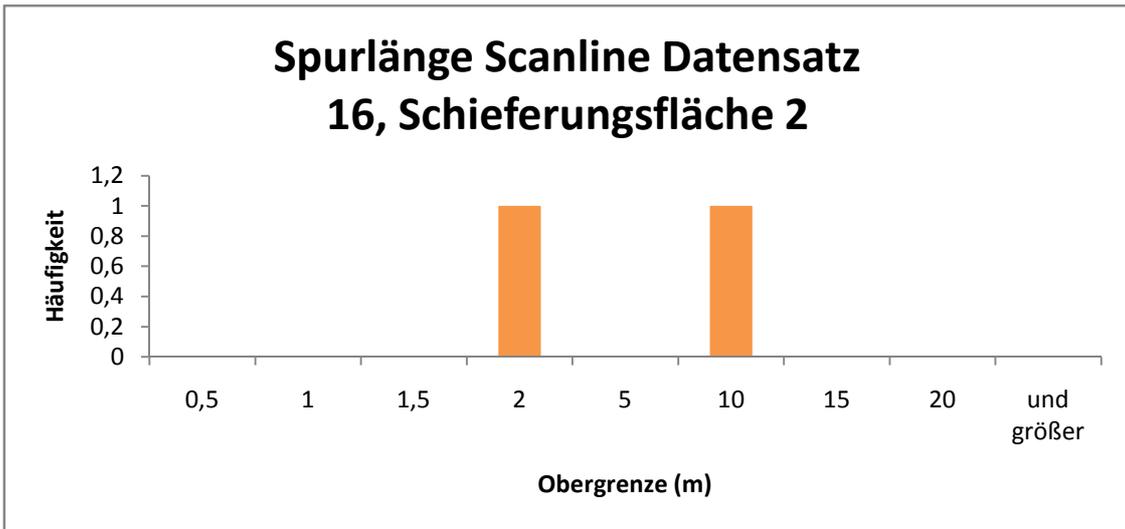


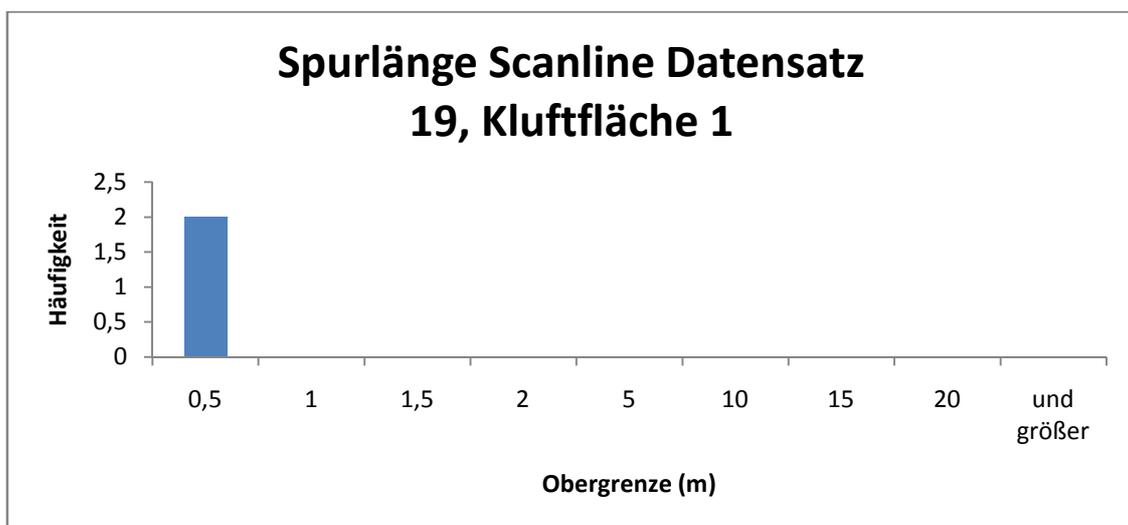
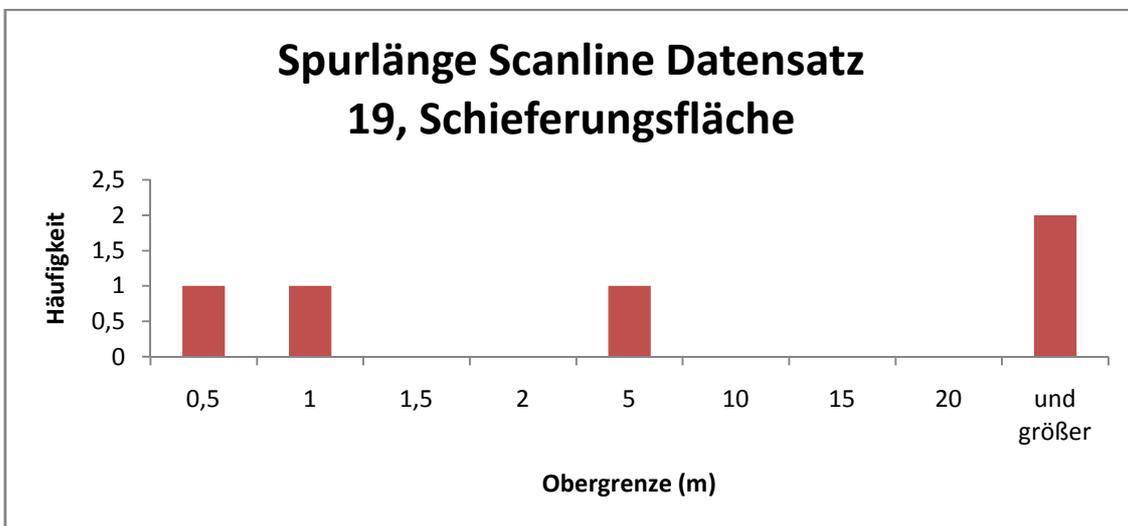
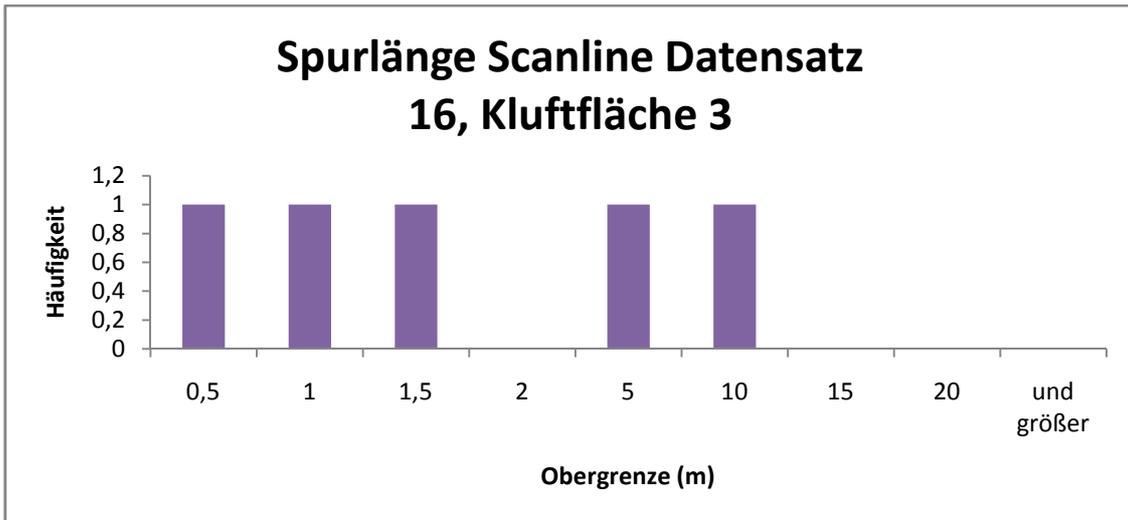




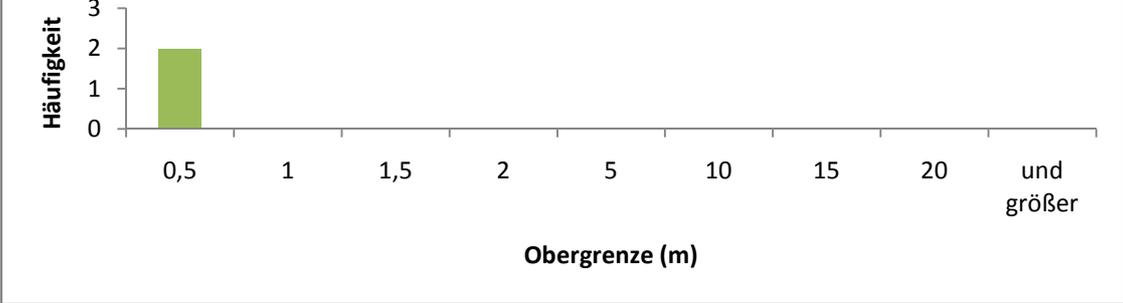




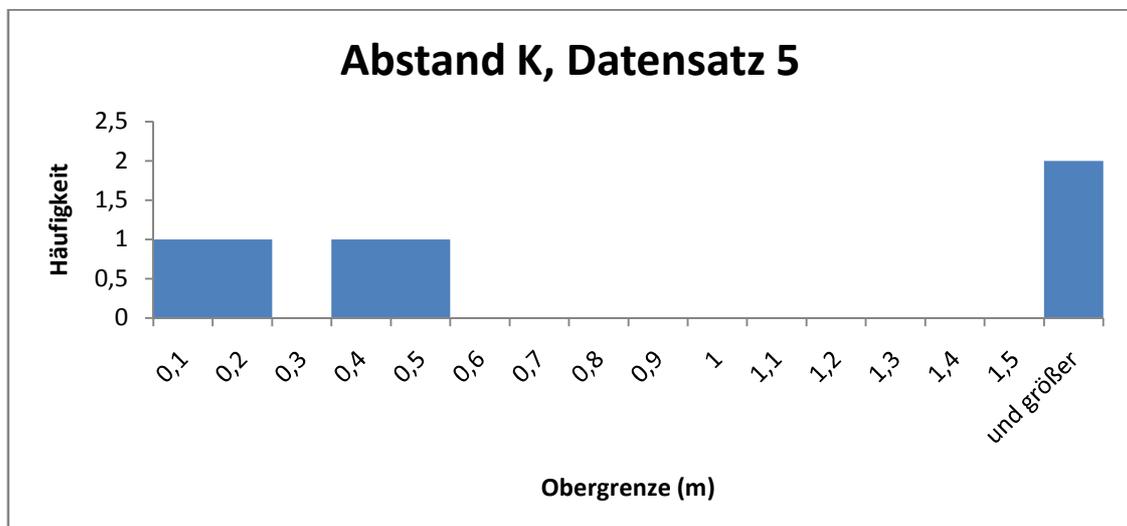
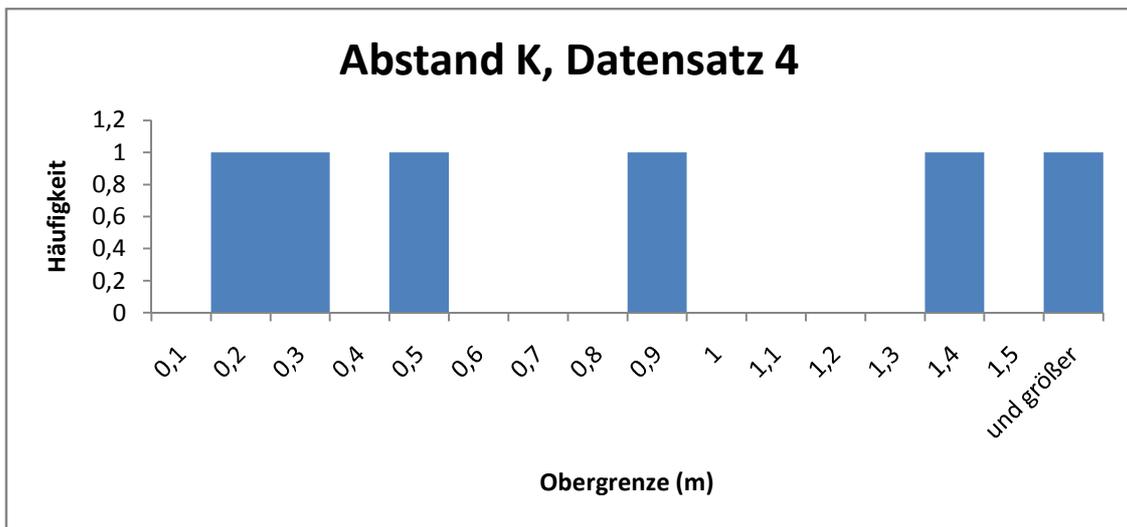
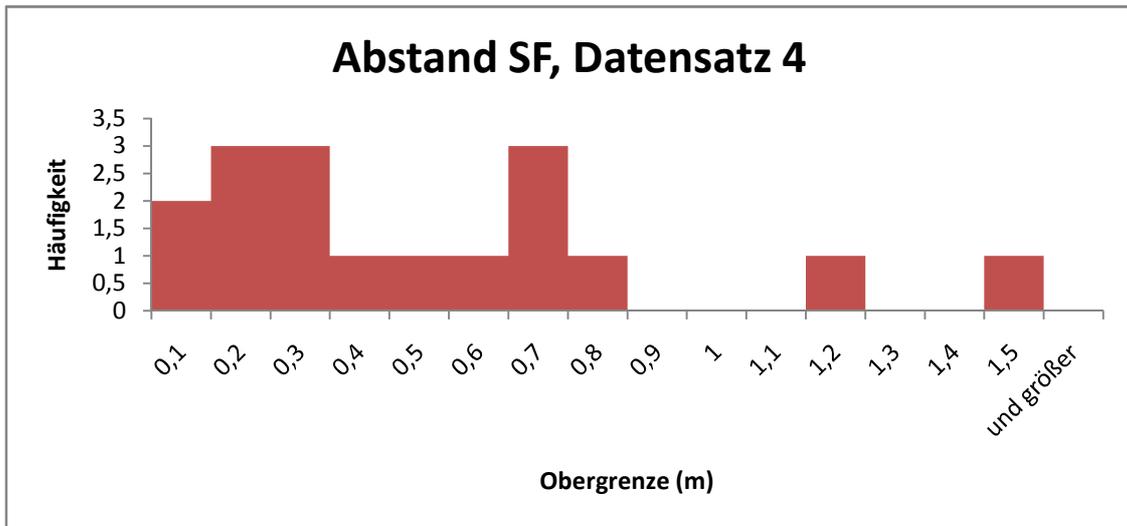


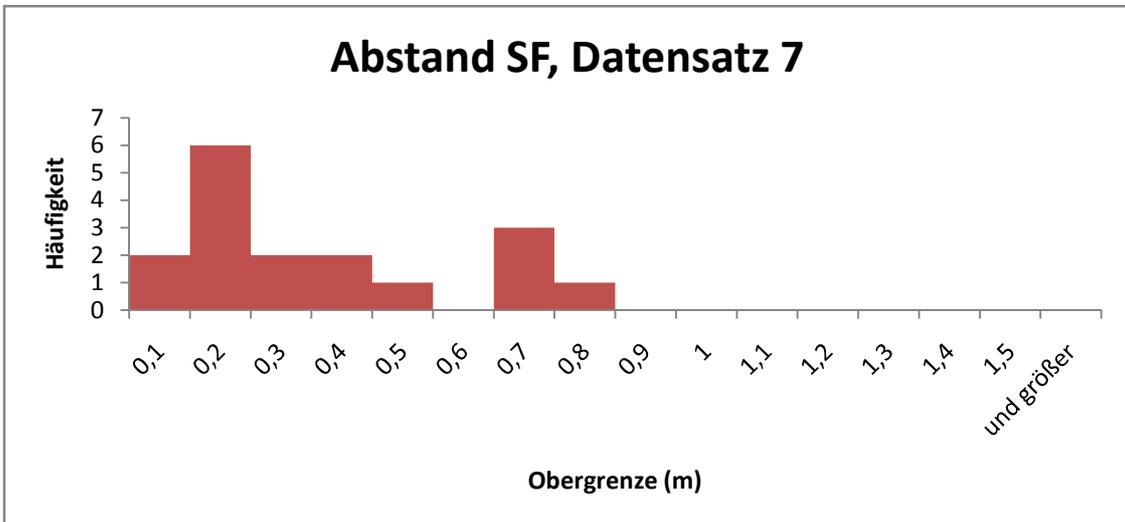
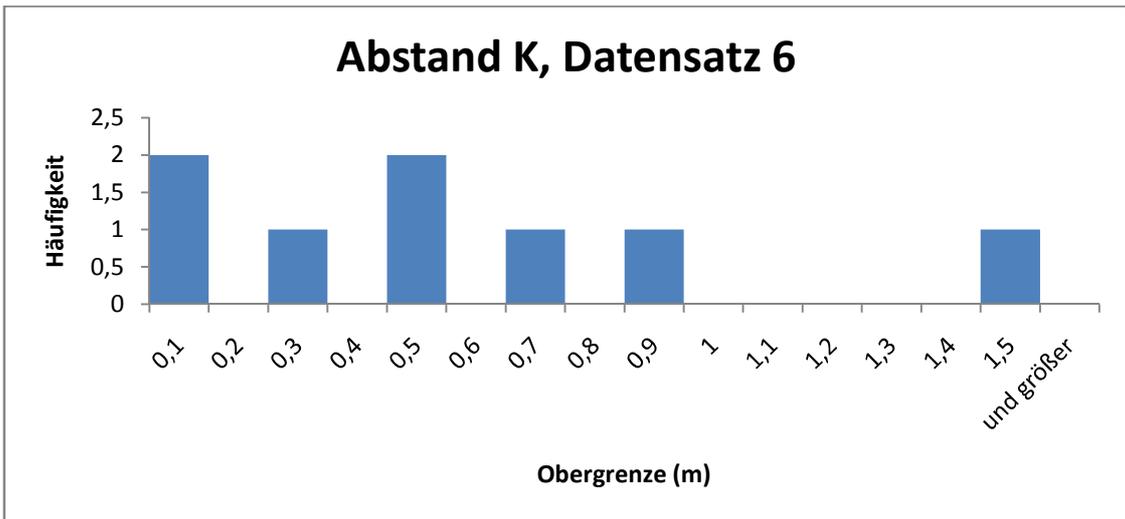
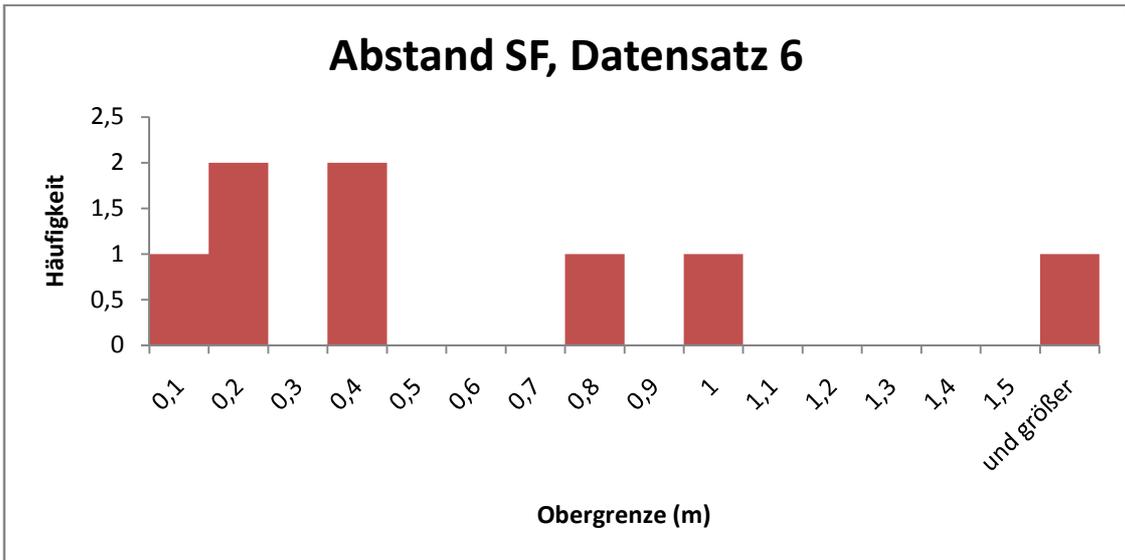


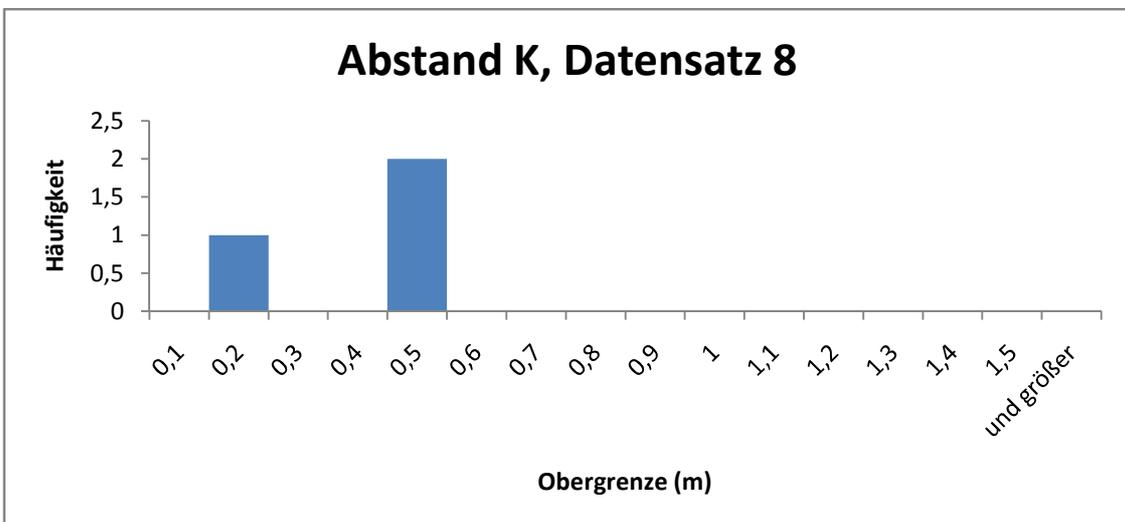
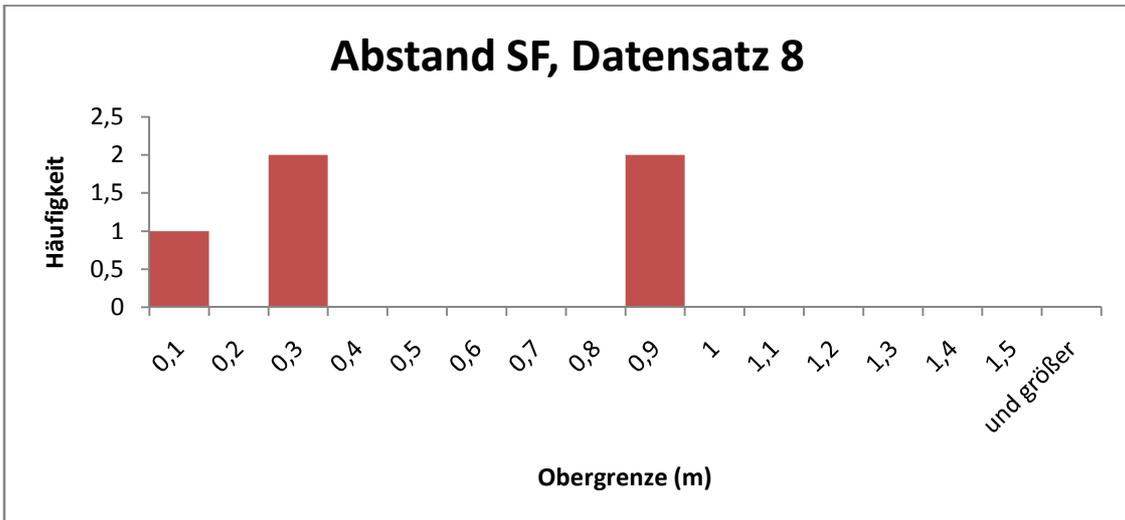
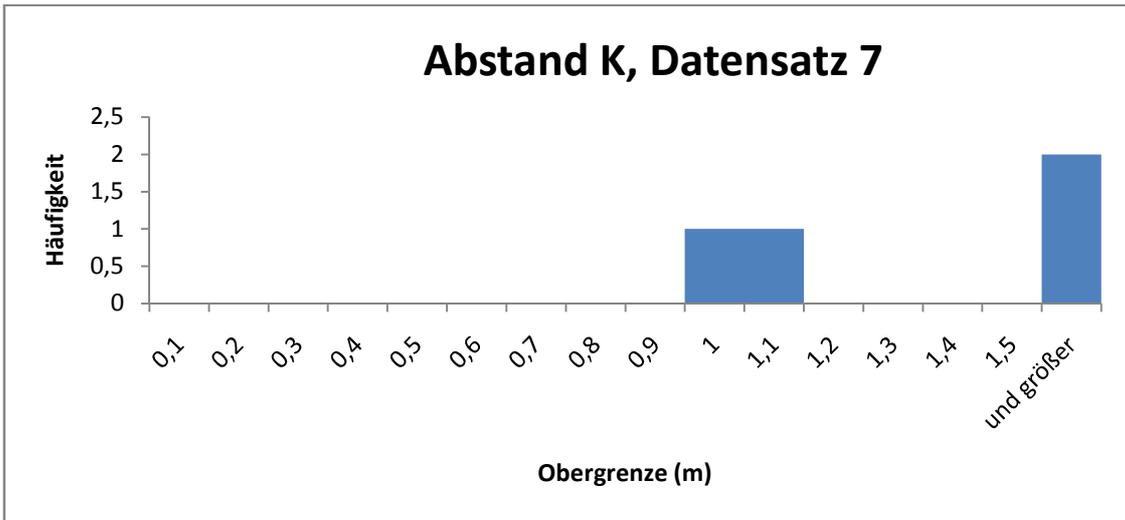
# Spurlänge Scanline Datensatz 19, Kluftfläche 2

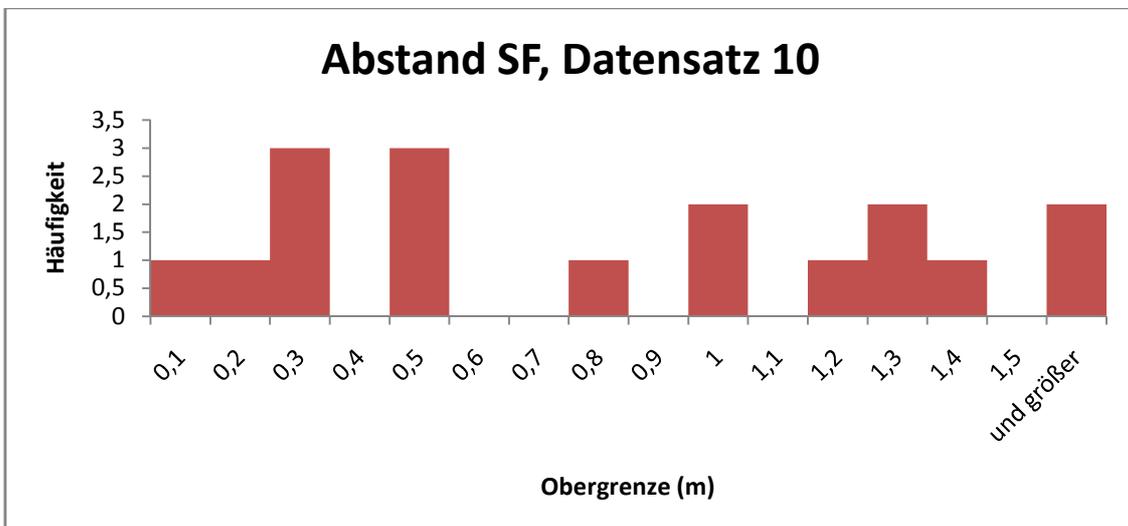
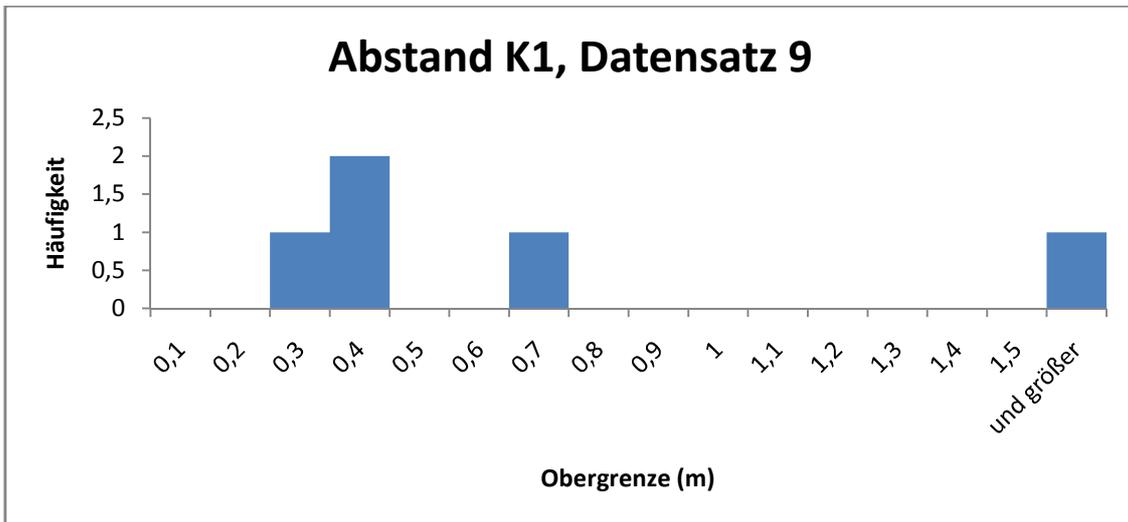
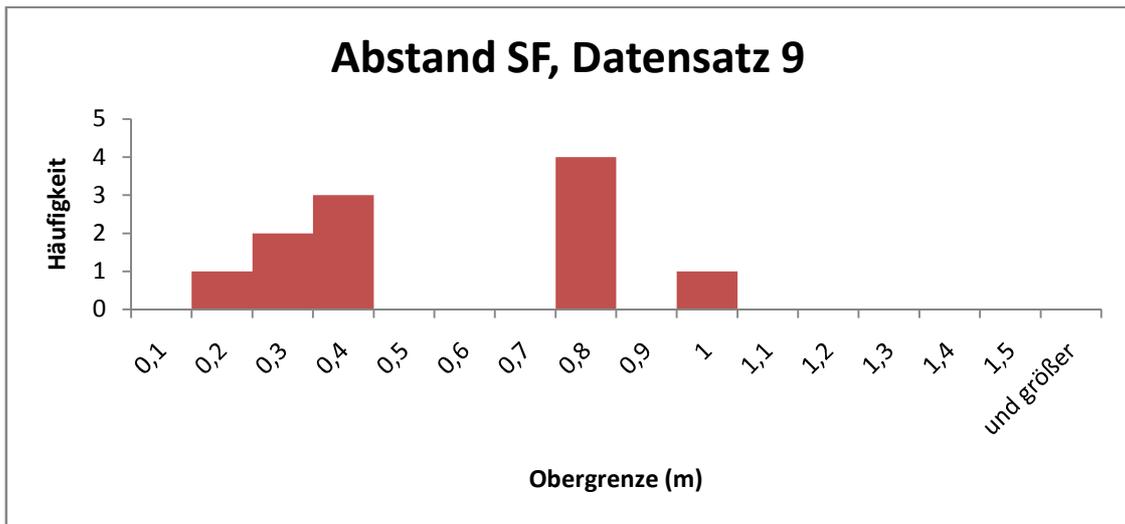


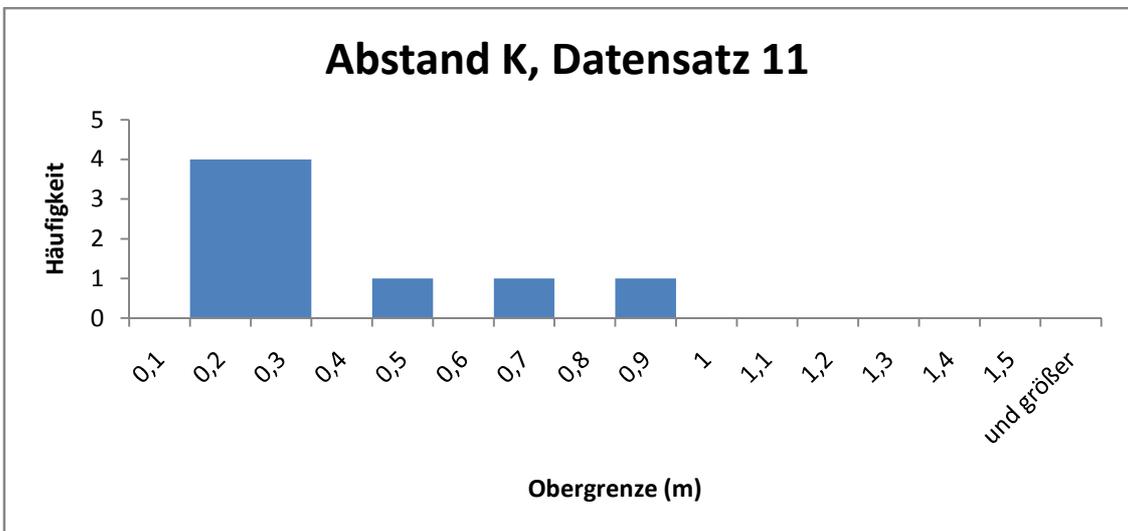
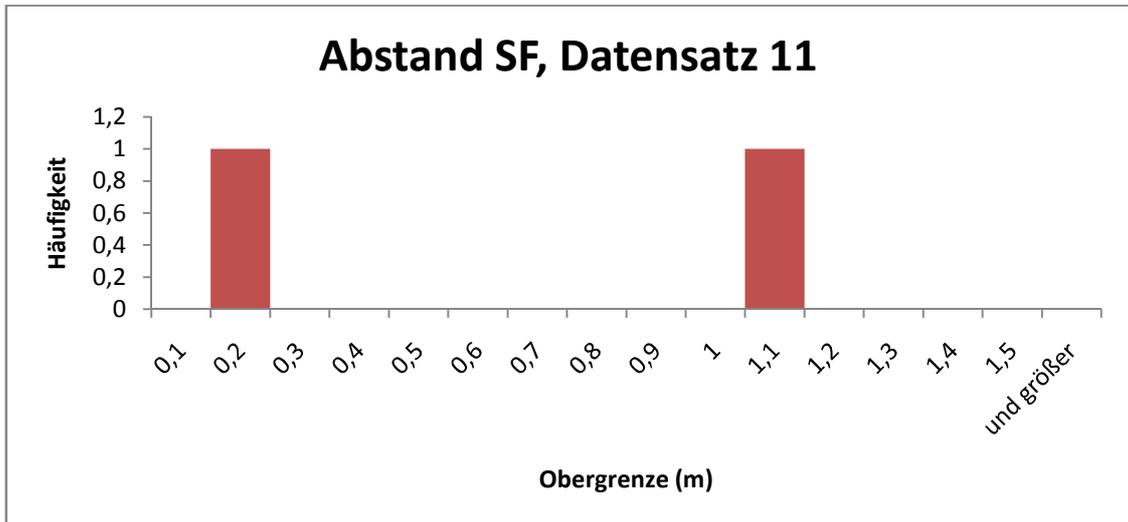
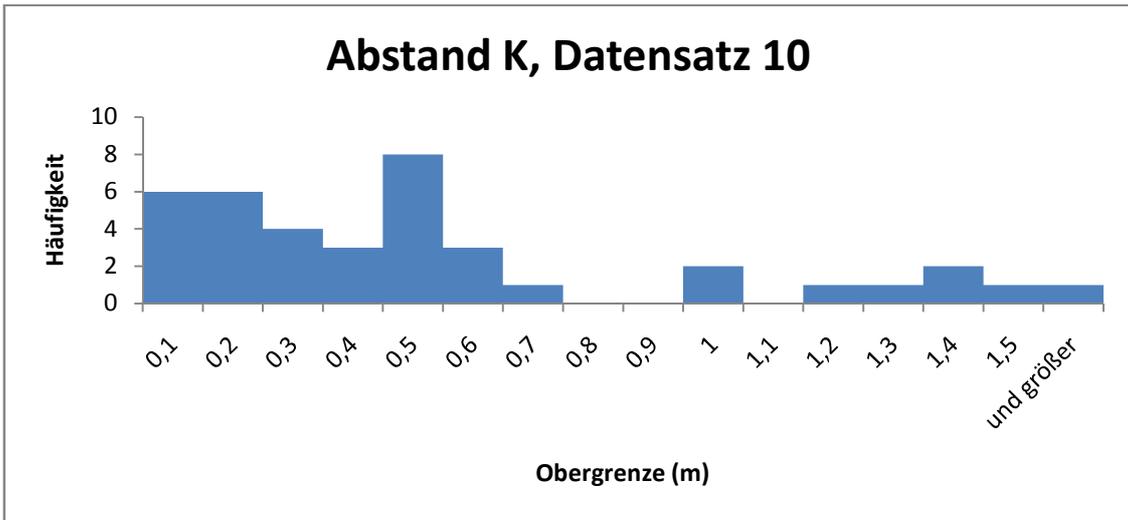
## Abstände von den Scanline-Daten

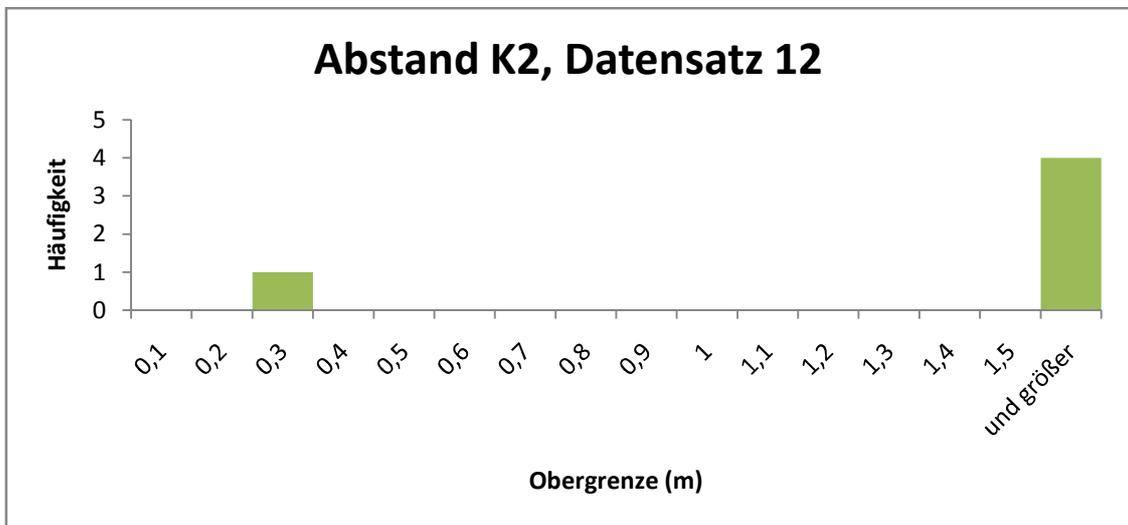
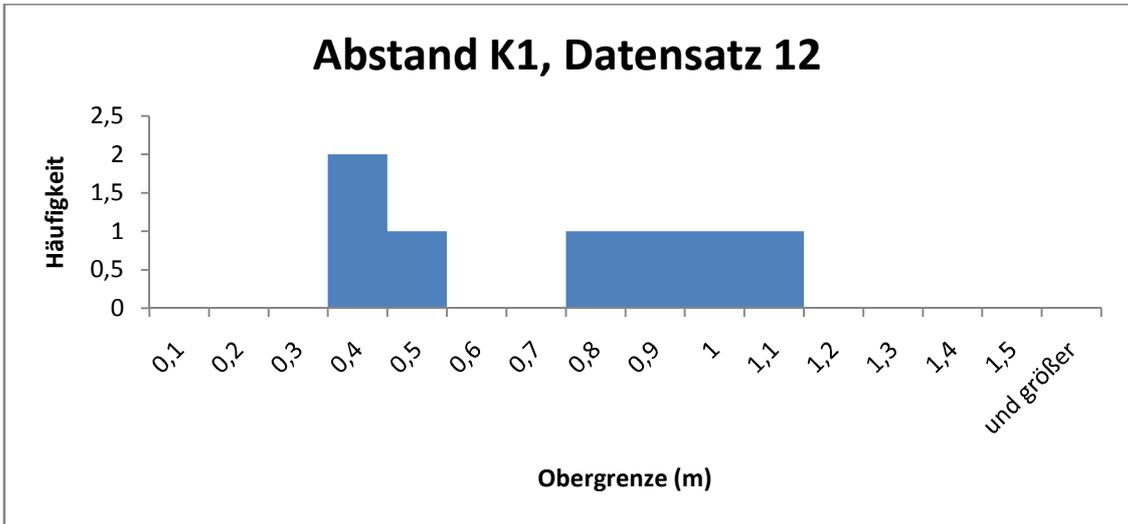
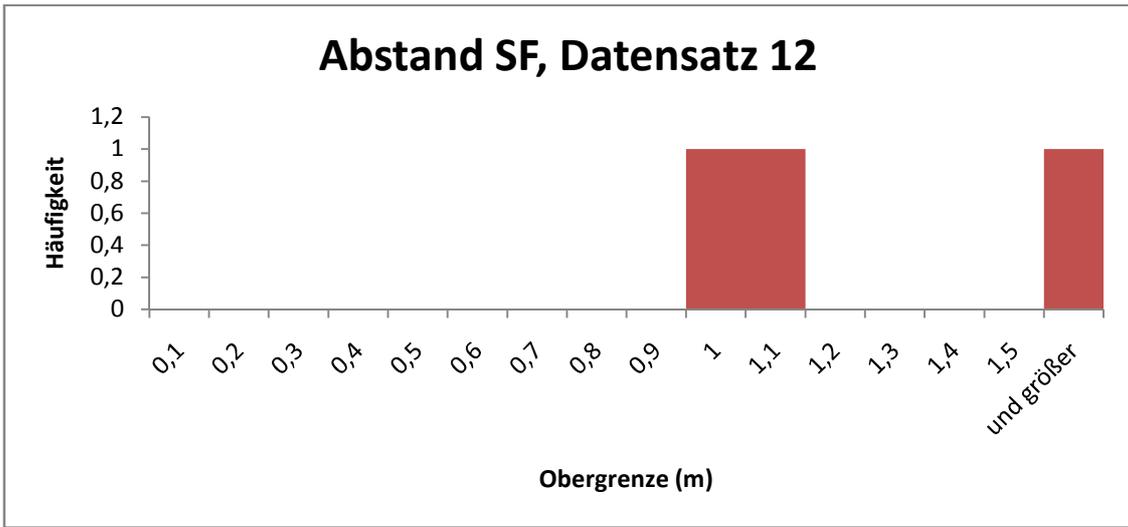


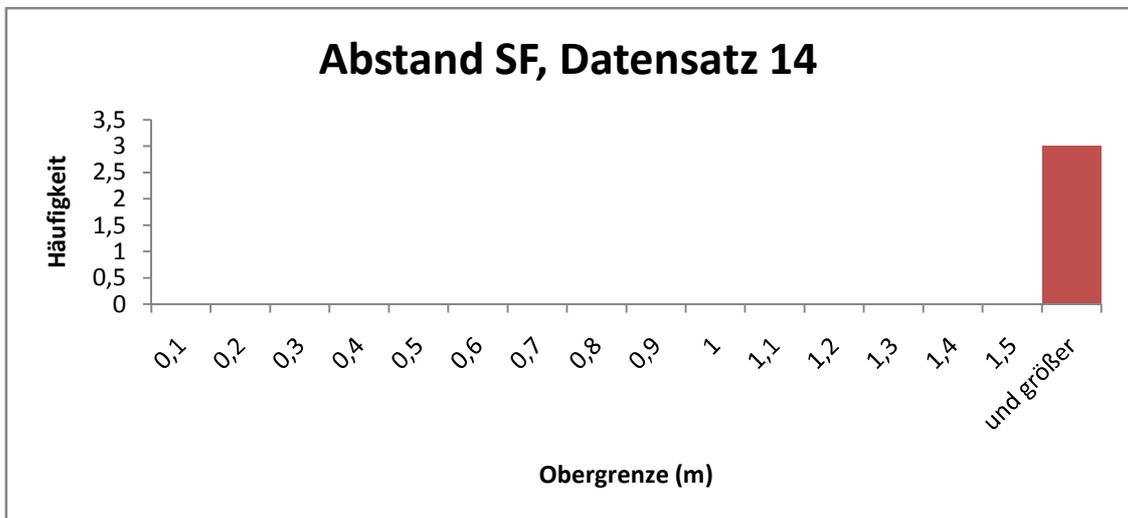
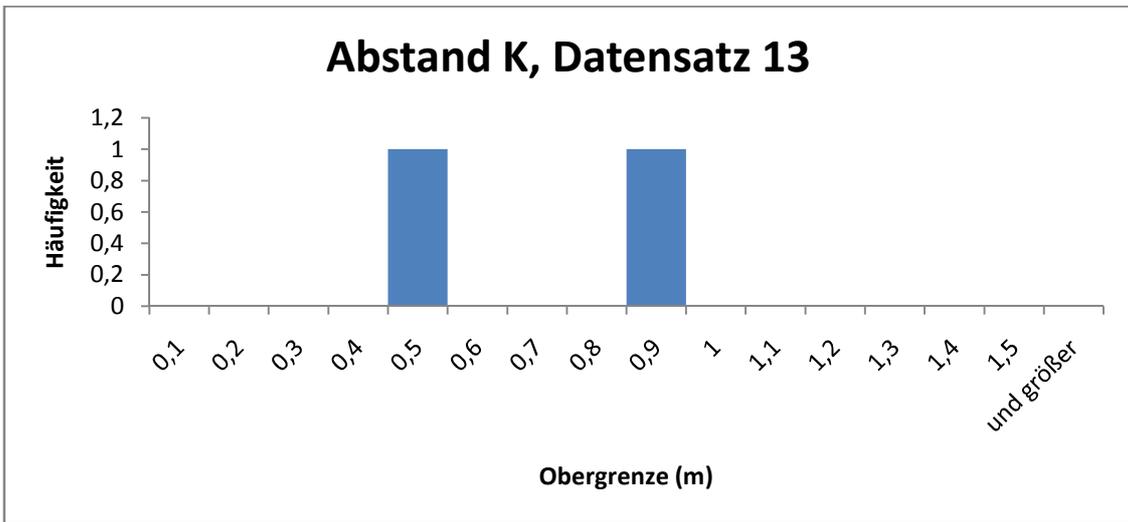
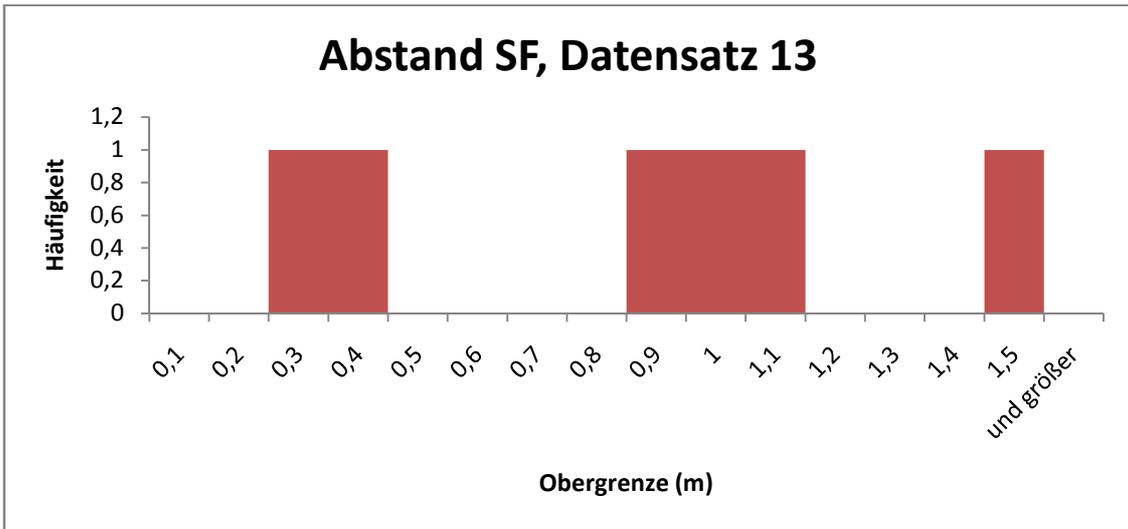


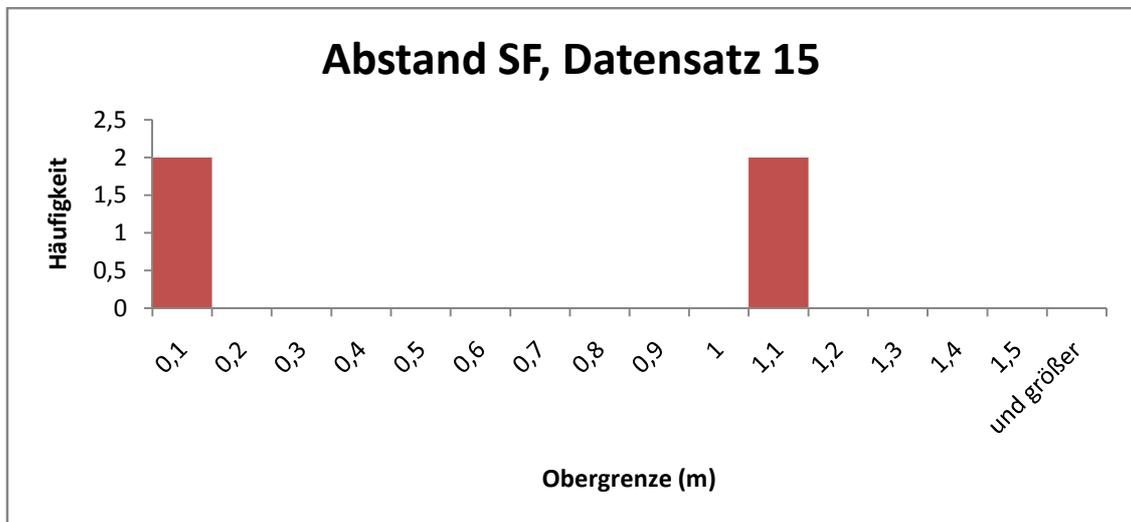
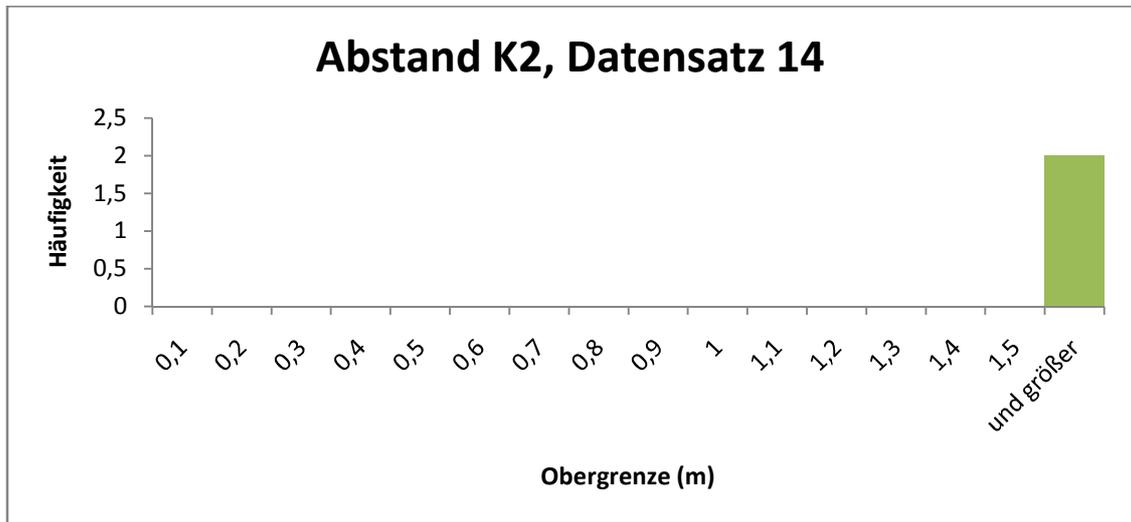
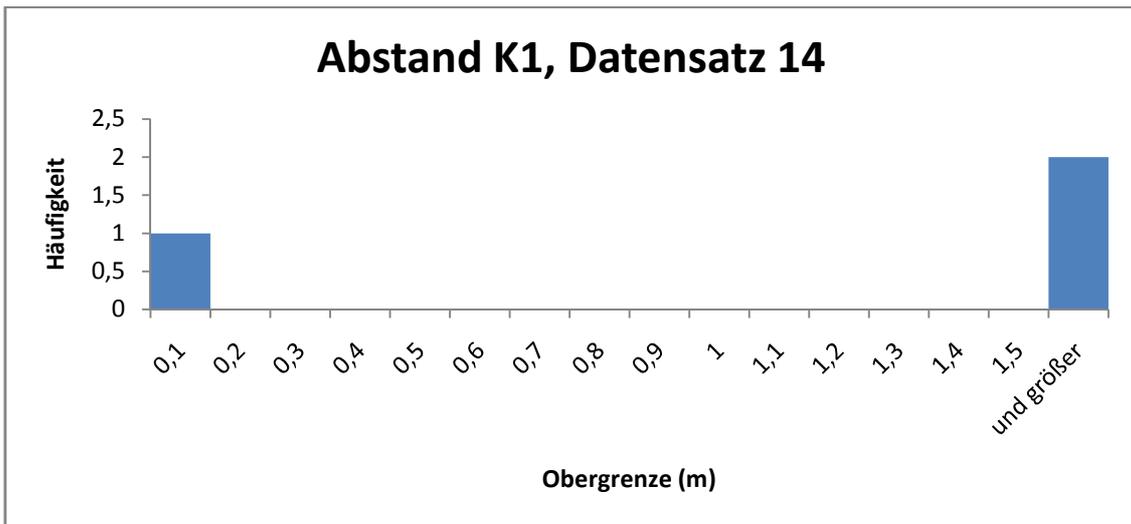


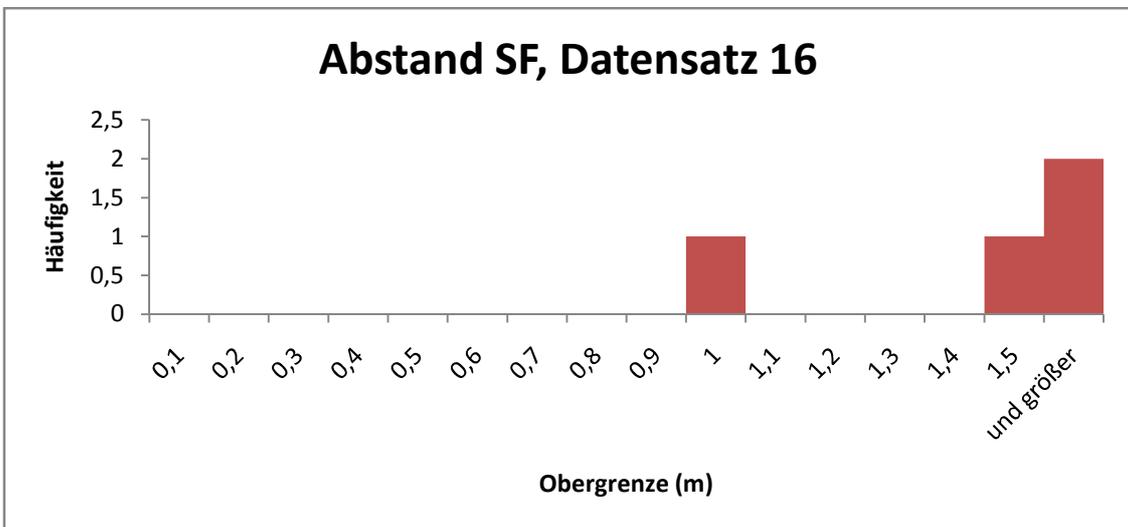
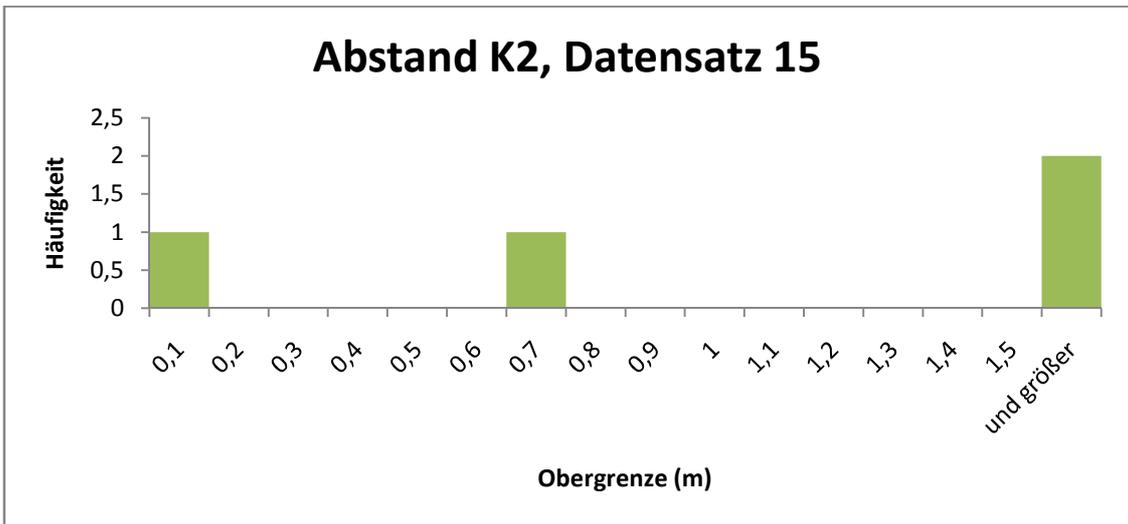
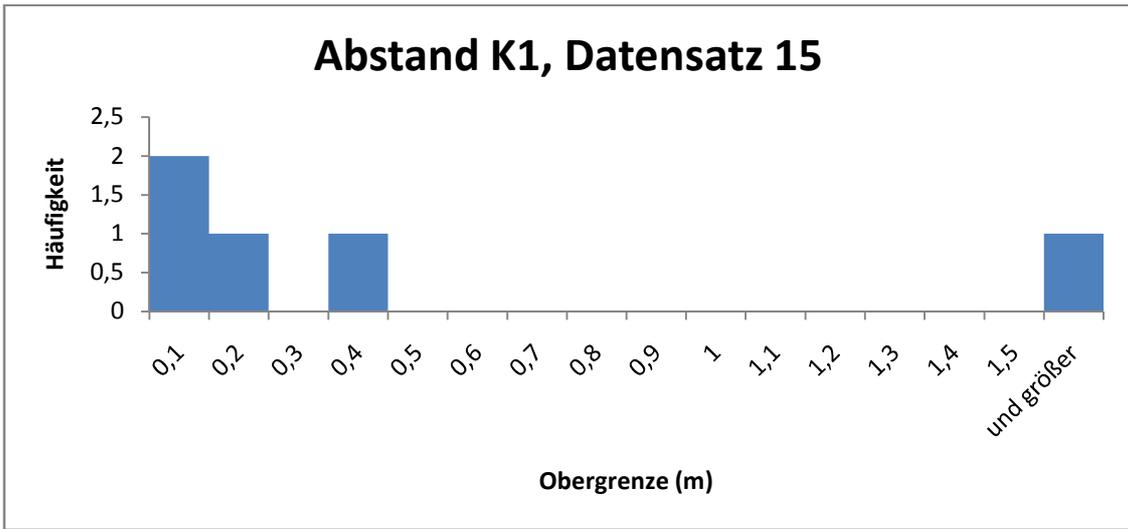


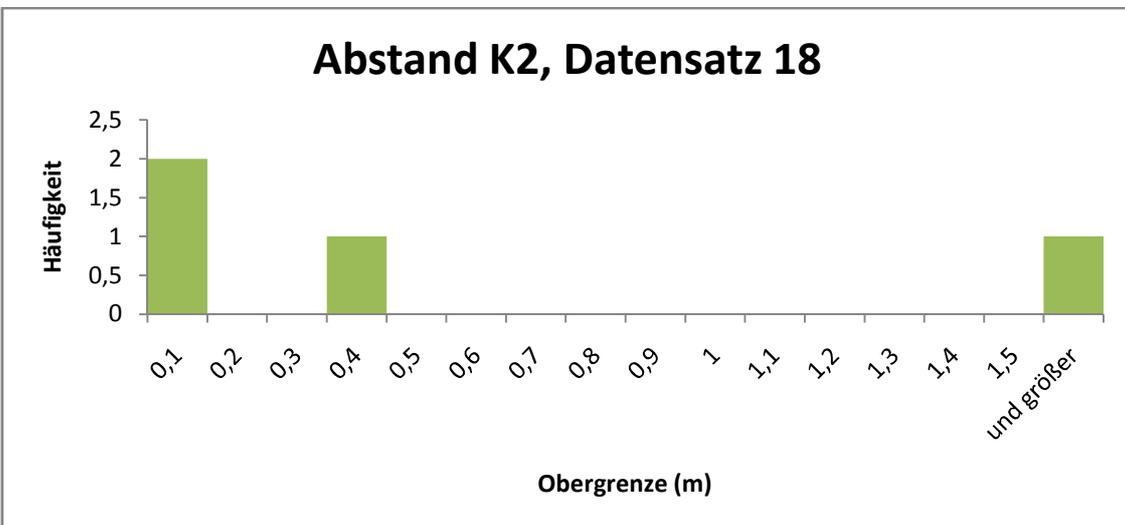
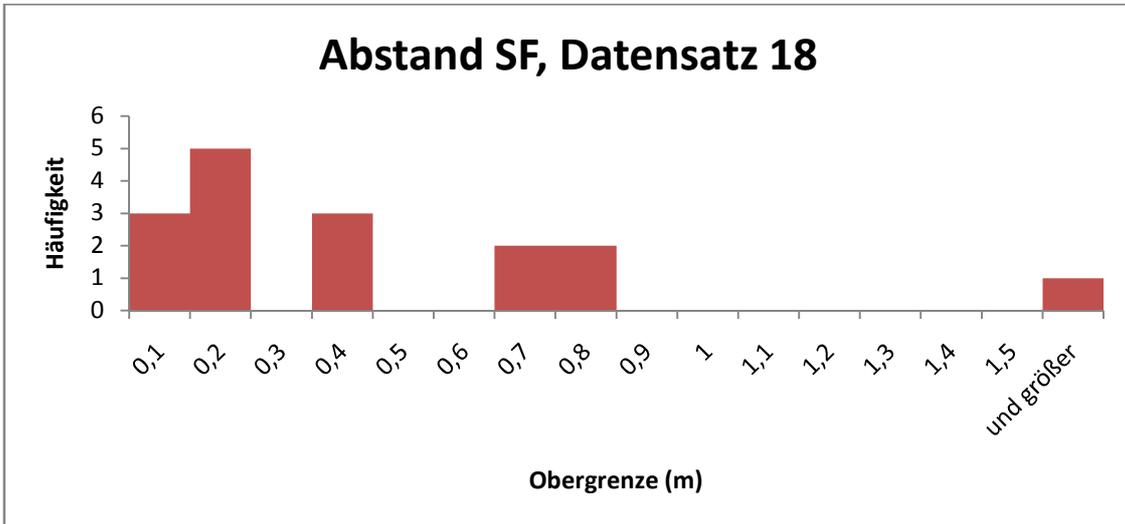
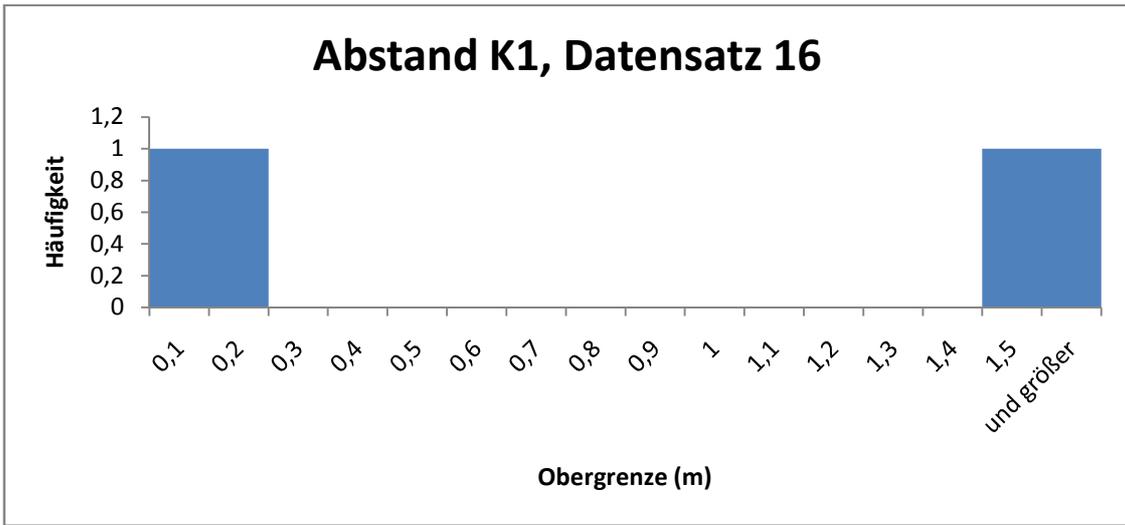


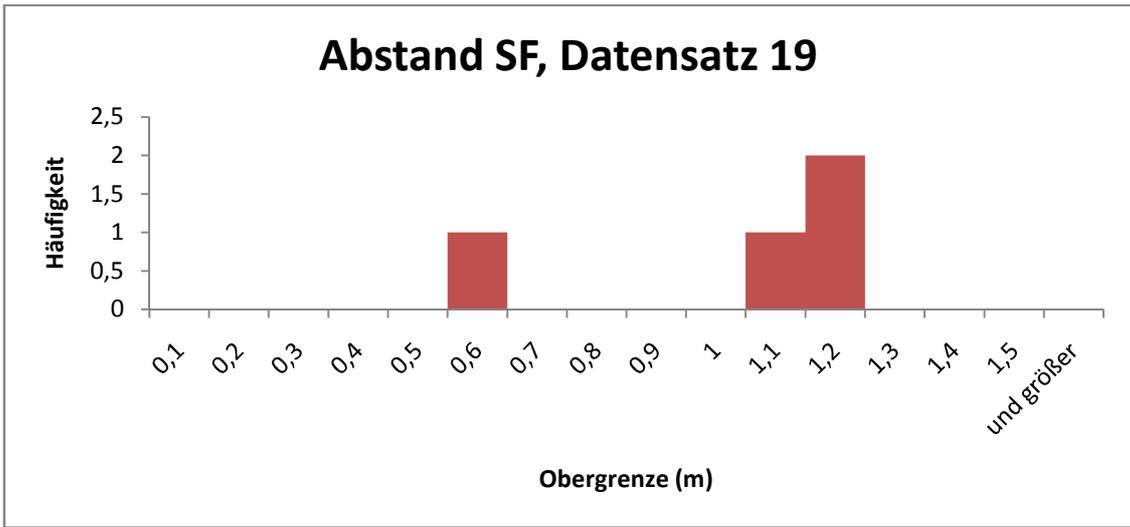












## B. Daten von der Photogrammetrie

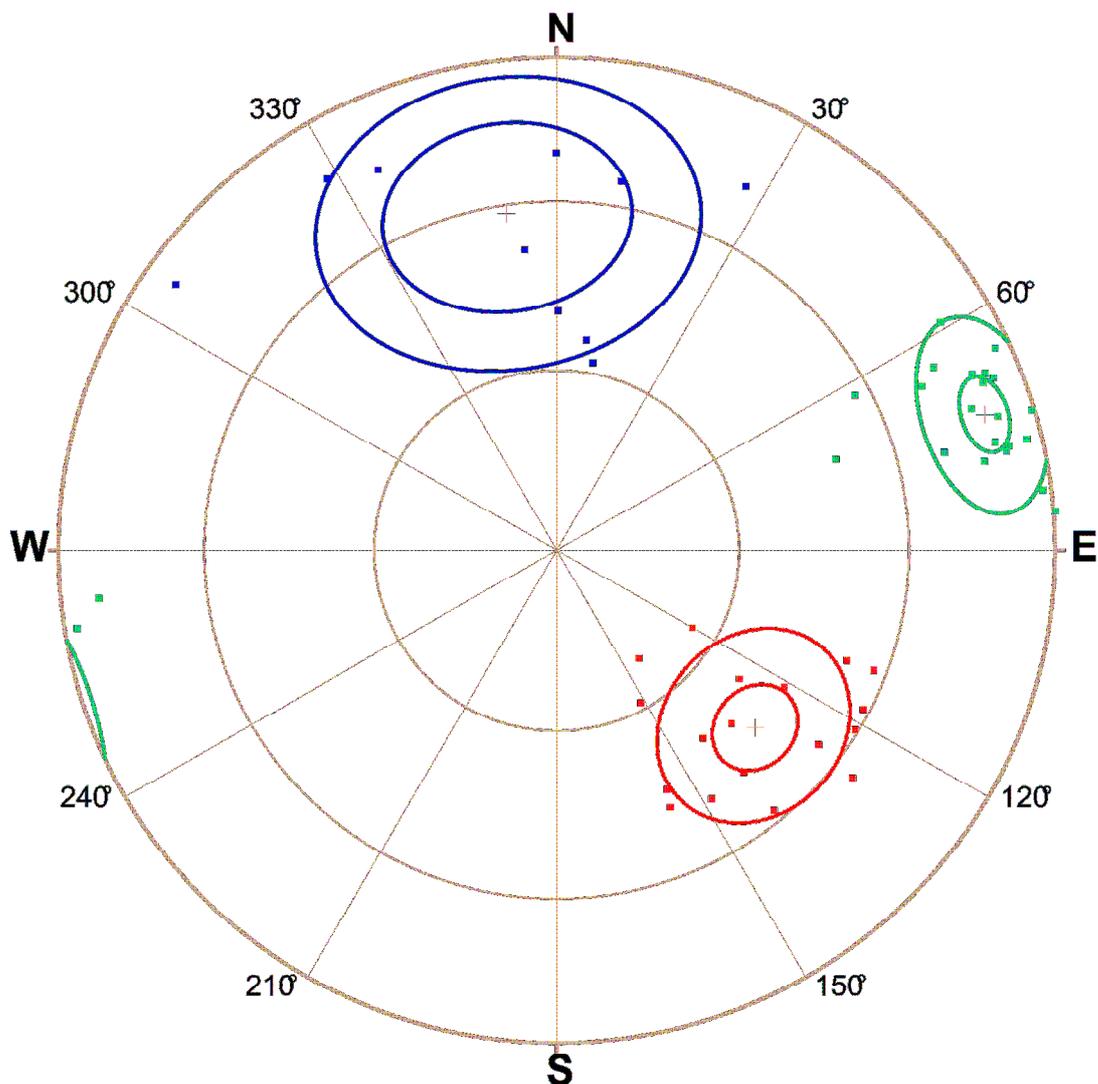
Daten 1	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunkfläche
K1	78,3	8,29	17,84	27,77	172/58
K2	92,61	25,56	6,97	15,77	312/45
SF	95,05	38,66	4,93	12,85	252/79

# Daten1

So18. Okt 20:48:53 2015

## StereoNet

Lambert projection on lower hemisphere



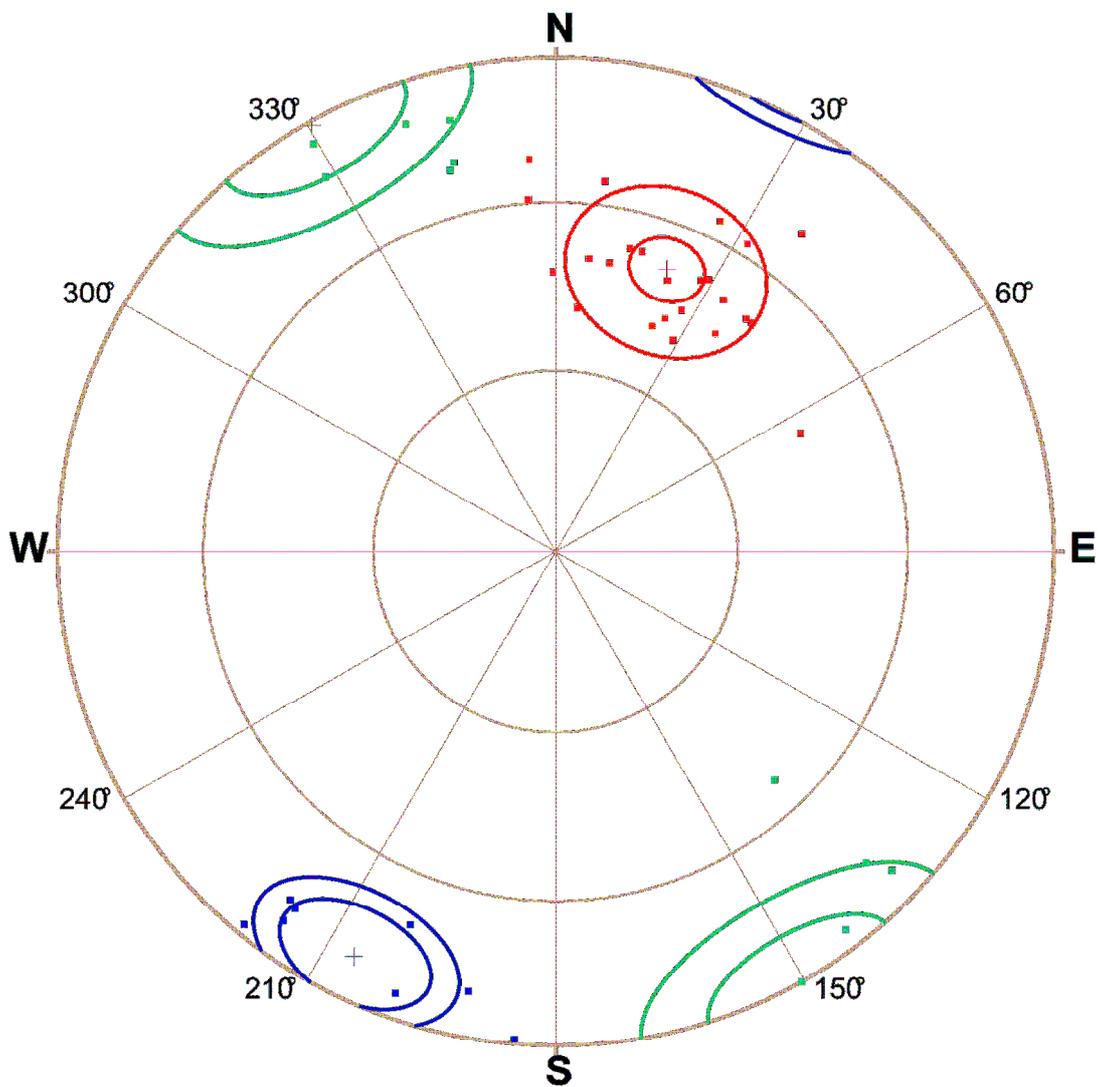
Daten 7	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktfäche
K1	94,36	31,01	10,1	13,74	26/80
K2	93,17	28,05	5,69	15,15	201/51
SF	88,57	15,9	11,81	19,76	105/89

# Daten7

So18 Okt20:50:54 2015

## StereoNet

Lambert projection on lower hemisphere



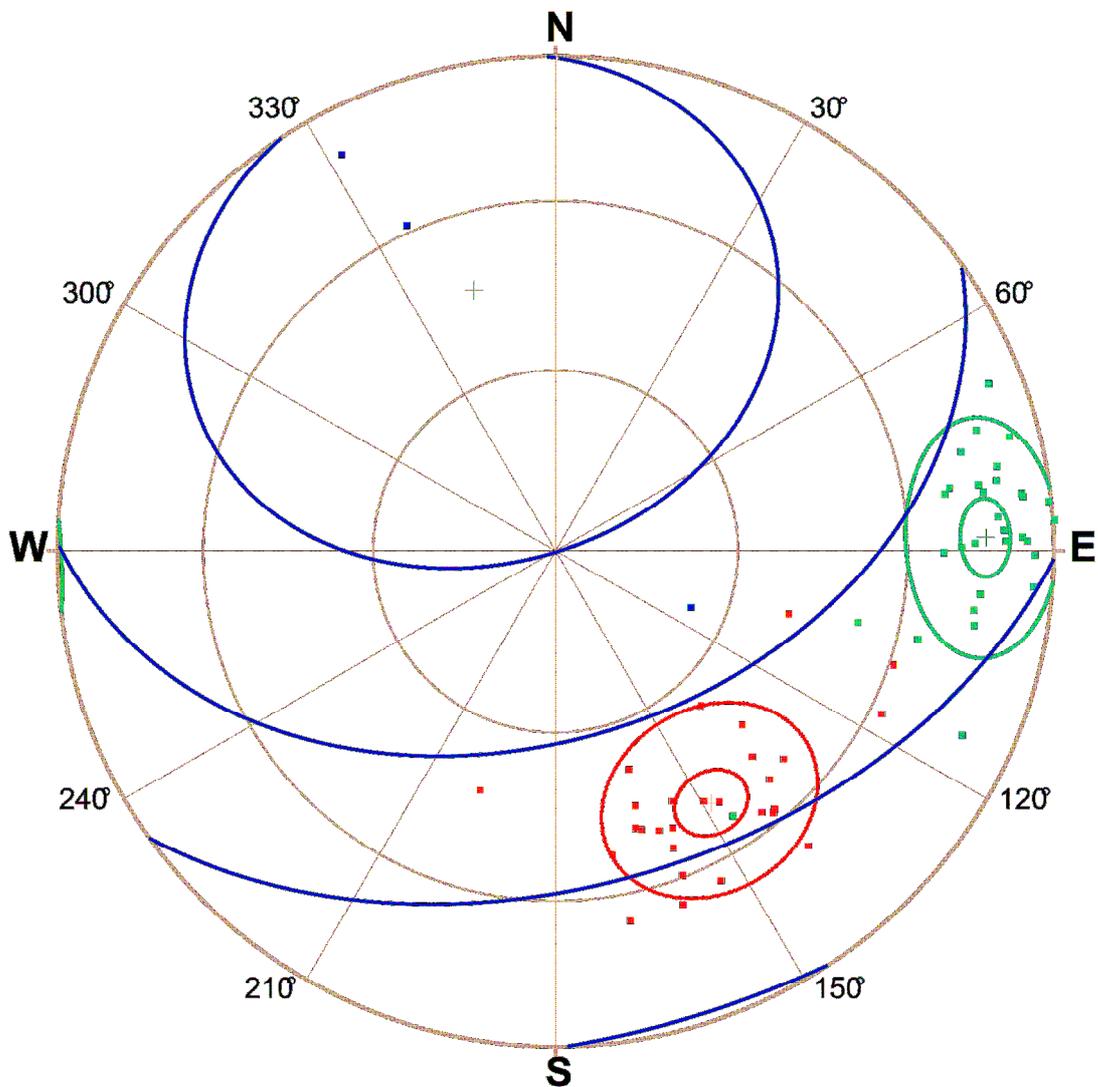
Daten 8	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktfäche
K1	47,83	2,56	103,1	46,24	163/46
K2	91,7	23,28	5,67	16,74	328/50
SF	92,69	26,49	5,12	15,68	268/75

## Daten8

Mi14 Okt14:25:02 2015

### StereoNet

Lambert projection on lower hemisphere



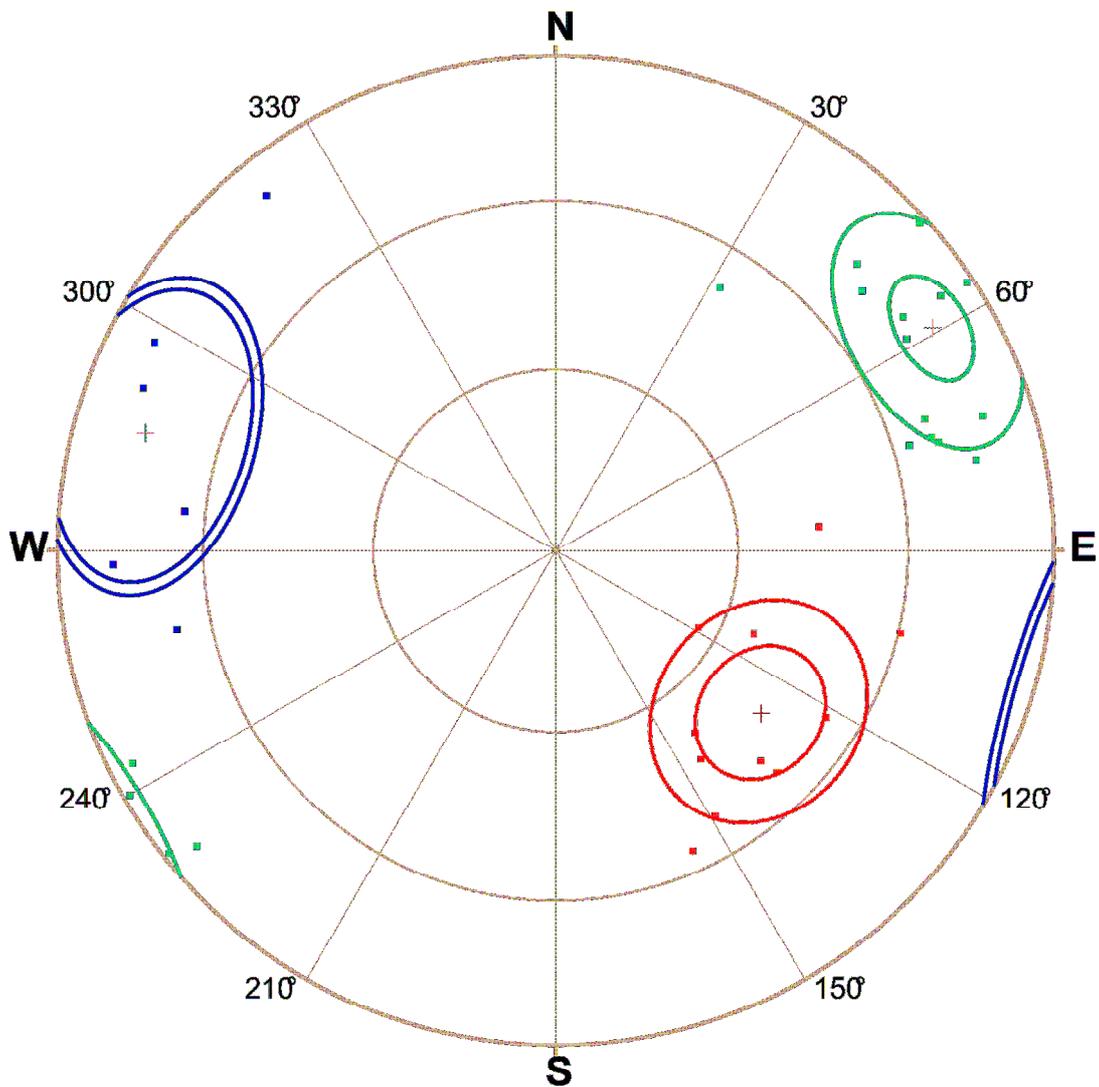
Daten 9	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktläche
<b>K1</b>	86,81	12,64	19,6	21,29	106/75
<b>K2</b>	90,51	19,15	10,71	17,95	309/44
<b>SF</b>	91,86	23,2	7,33	16,58	239/77

# Daten9

Mi14 Okt14:41:22 2015

## StereoNet

Lambert projection on lower hemisphere



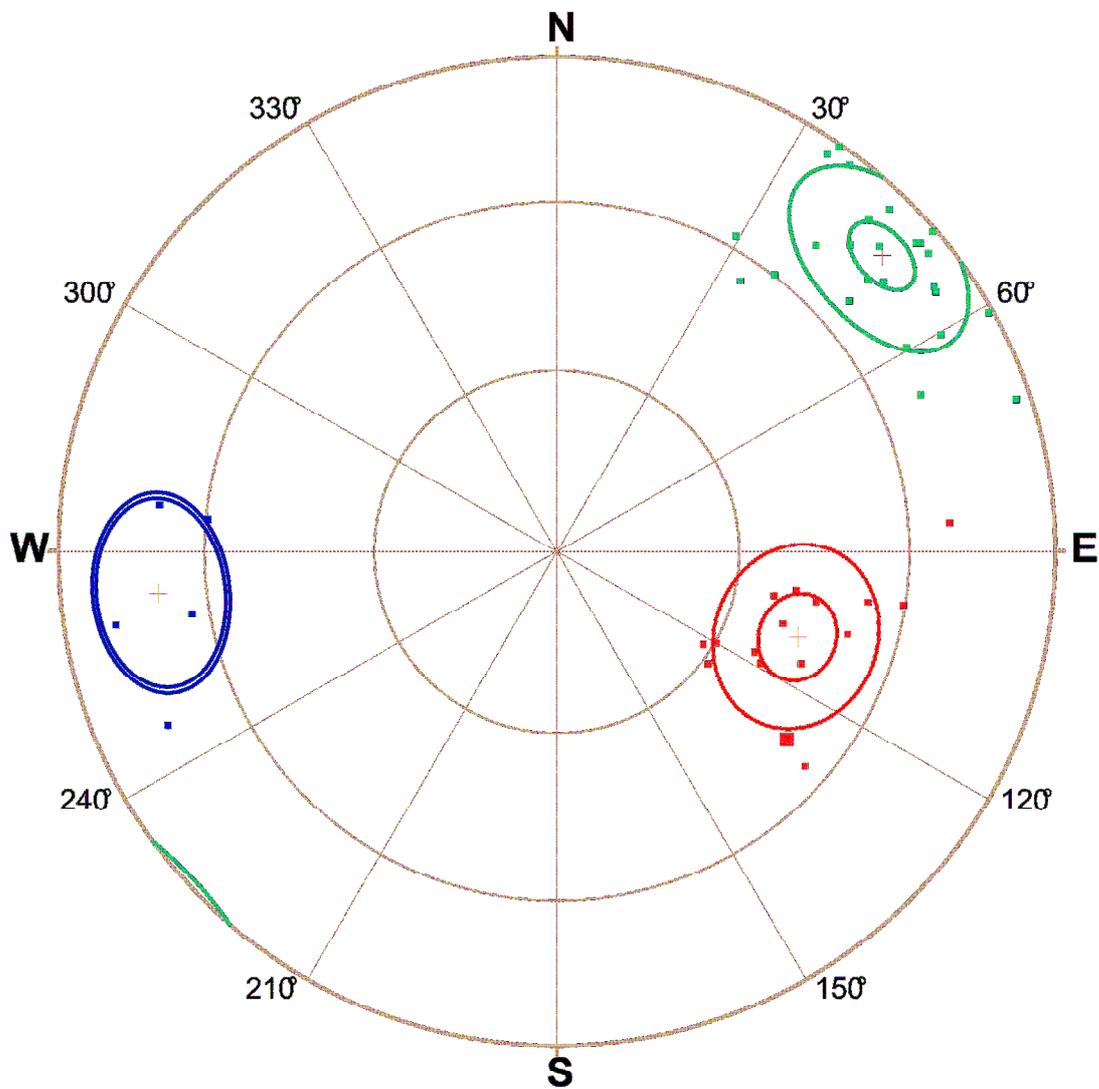
Daten 11	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktfäche
K1	95,11	32,72	13,58	12,78	84/69
K2	93,92	30,83	6,75	12,48	290/43
SF	94,09	32,48	5,16	14,07	228/78

# Daten11

Mi14 Okt14:58:51 2015

## StereoNet

Lambert projection on lower hemisphere



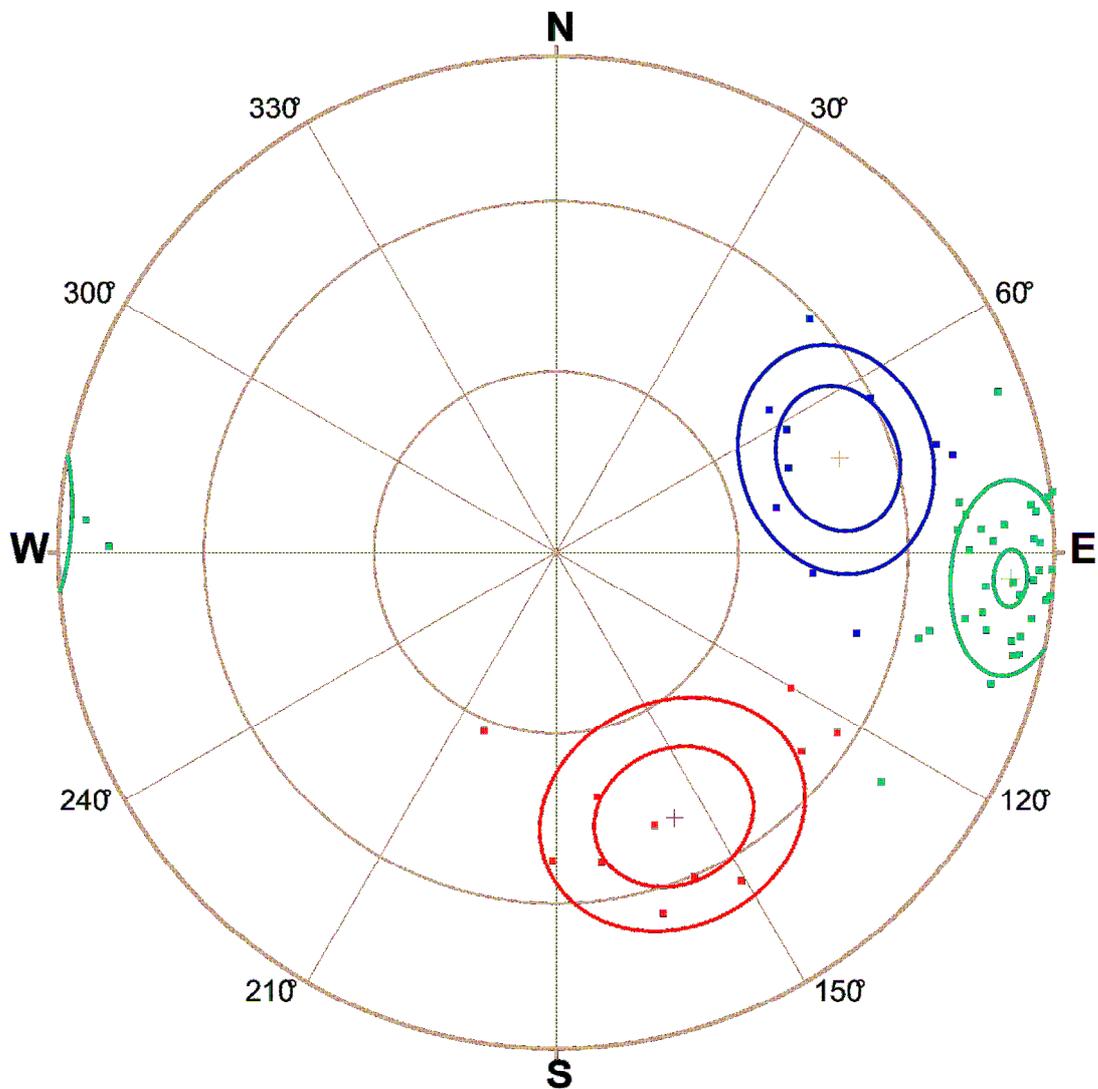
Daten 12	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunkfläche
K1	91,18	20,41	10,95	17,27	252/50
K2	88,01	15,16	12,12	20,26	336/49
SF	95,48	43,13	3,58	12,27	273/81

# Daten12

Mi14 Okt15:2237 2015

## StereoNet

Lambert projection on lower hemisphere



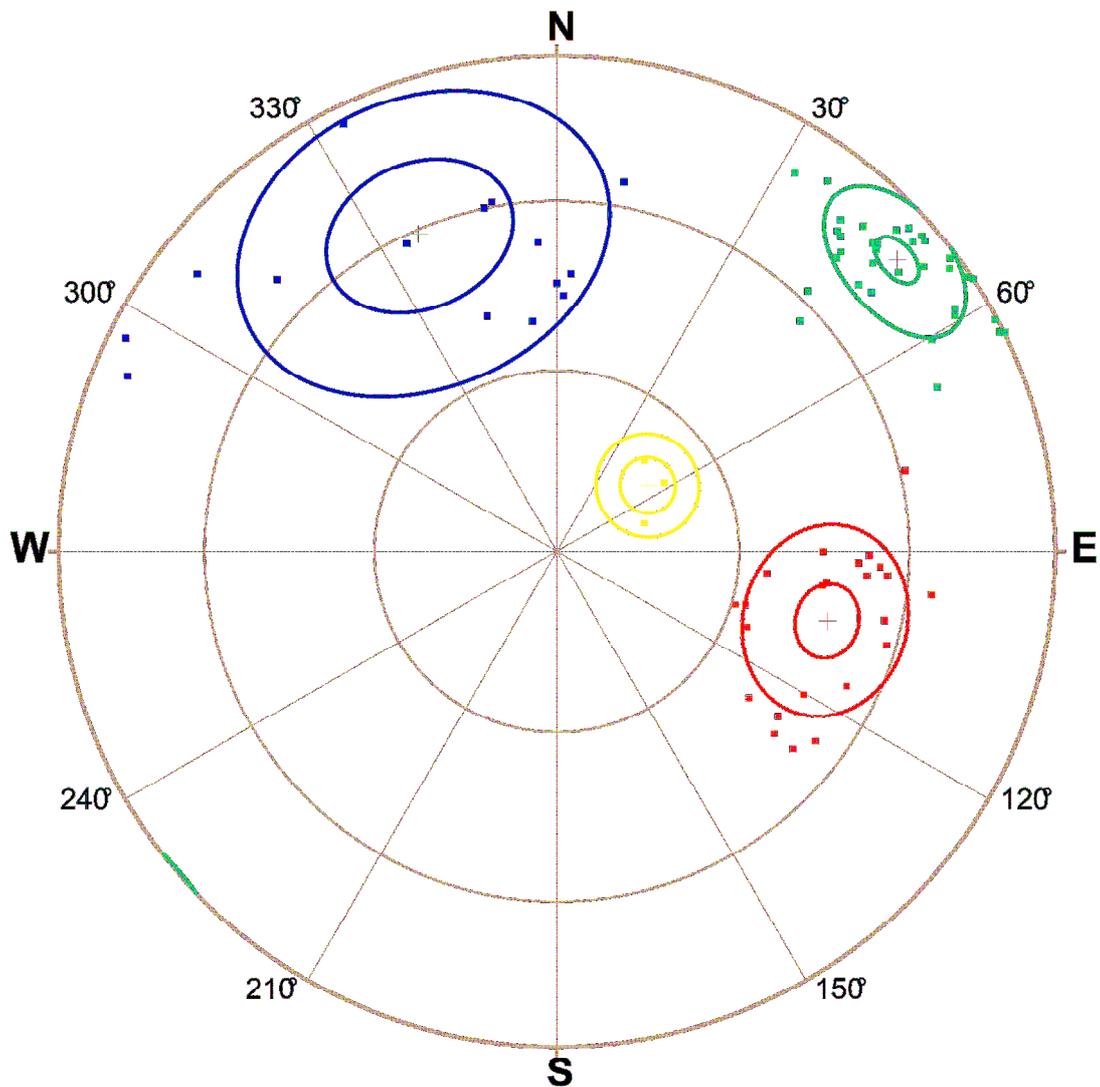
Daten 13	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktfäche
K1	78,64	8,74	13,72	27,53	157/59
K2	93,67	30,21	5,6	14,57	285/47
K3	99,38	215,59	8,42	4,51	234/18
SF	96,22	51,37	3,47	11,21	229/79

## Daten13

Mi14 Okt15:55:11 2015

### StereoNet

Lambert projection on lower hemisphere



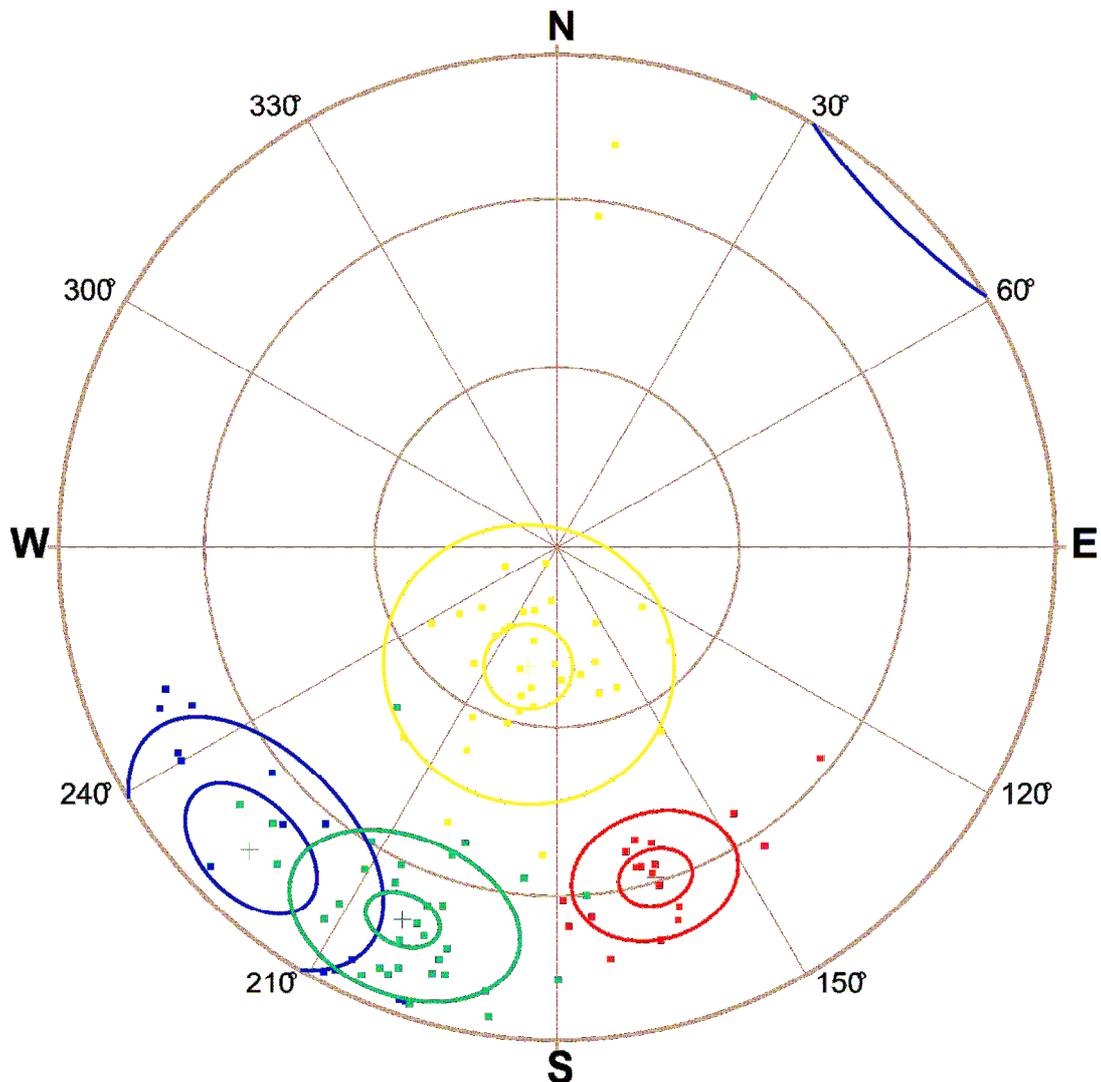
Daten 14	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktfäche
<b>K1</b>	88,6	16,29	10,16	19,74	45/76
<b>K2</b>	95,67	43,67	5,29	12	344/59
<b>K3</b>	84,15	12,27	7,11	23,46	13/20
<b>SF</b>	92,4	25,48	5,13	16,01	22/71

# Daten14

Do15 Okt14:21:25 2015

## StereoNet

Lambert projection on lower hemisphere

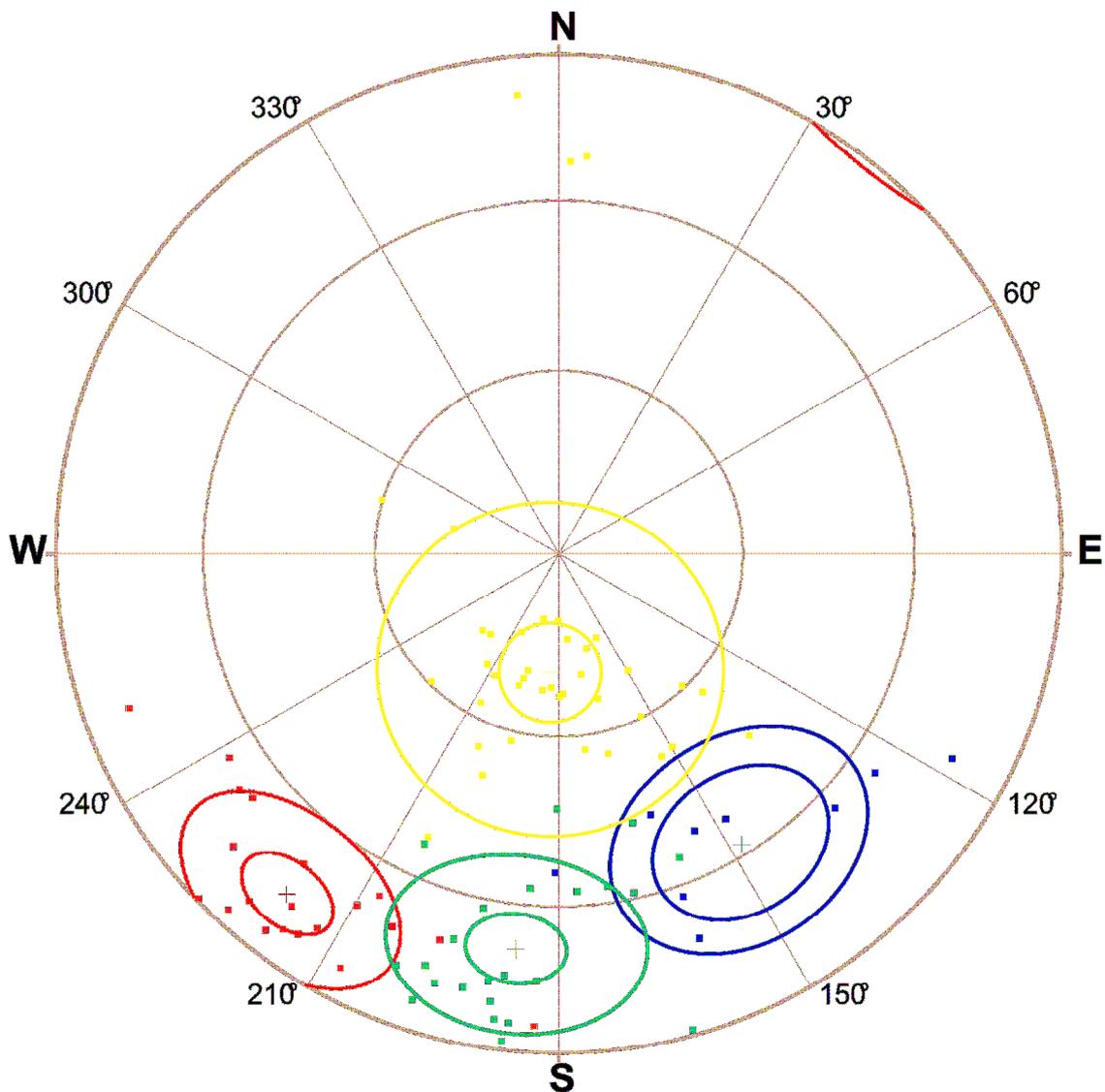


Daten 15	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktfäche
K1	88,97	16,12	13,22	19,39	328/58
K2	92,38	24,93	6,67	16,02	38/76
K3	78,28	8,97	8,11	27,78	4/19
SF	90,9	21,03	6,76	17,56	6/69

## Daten15

### StereoNet

Lambert projection on lower hemisphere



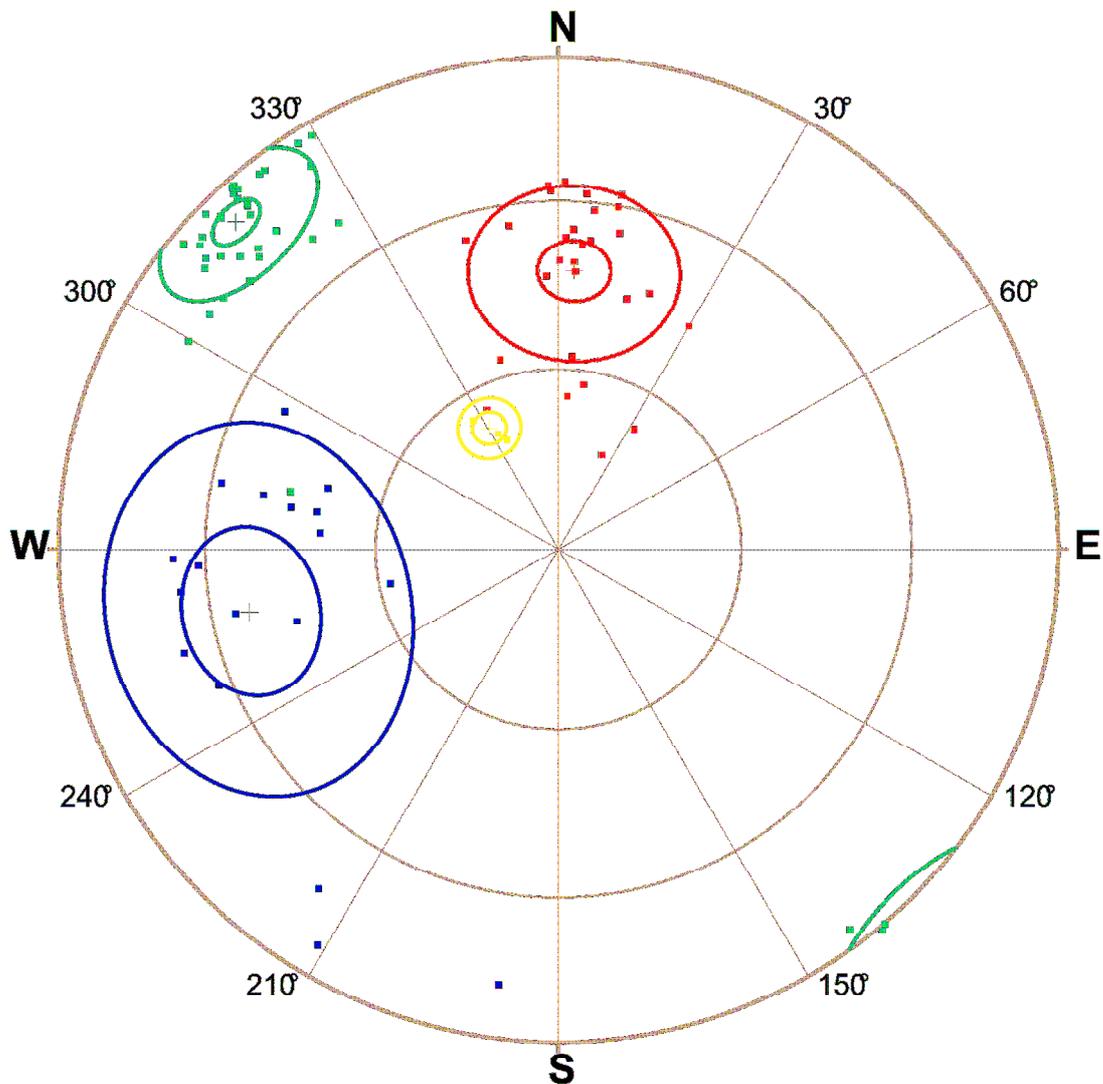
Daten 16	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktfäche
<b>K1</b>	78	8,59	12,53	27,97	78/53
<b>K2</b>	92,57	25,97	5,45	15,81	183/47
<b>K3</b>	99,78	593,23	5,07	2,72	151/23
<b>SF</b>	95,8	46,3	3,55	11,82	136/82

# Daten16

Do15 Okt14:56:00 2015

## StereoNet

Lambert projection on lower hemisphere



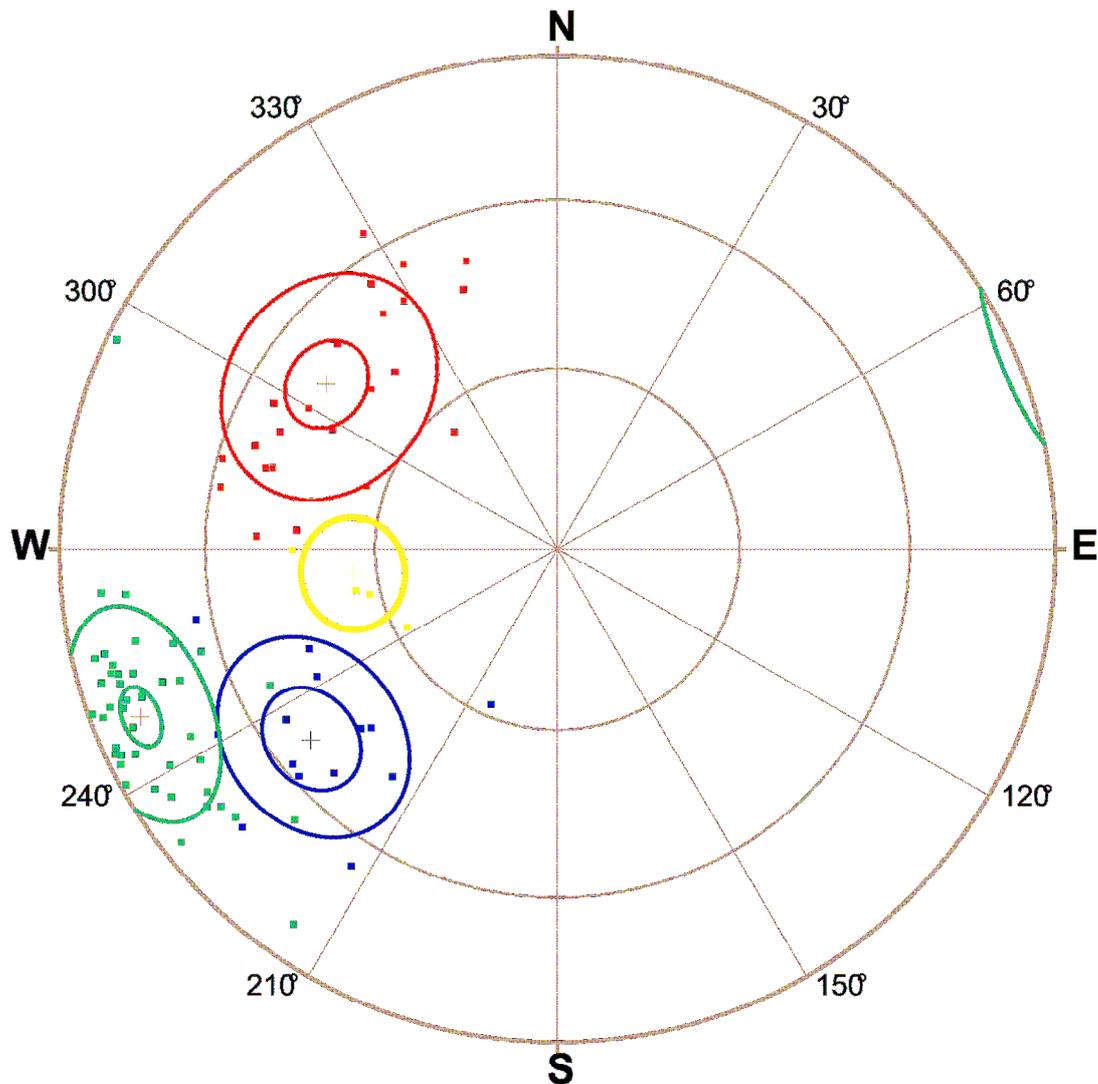
Daten 17	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktfäche
K1	92,46	24,62	8,17	15,94	52/53
K2	90,45	20,03	6,93	18	126/48
K3	97,76	71,36	9,12	8,61	83/34
SF	93,83	31,68	3,93	14,38	68/79

# Daten17

Do15 Okt15:09:44 2015

## StereoNet

Lambert projection on lower hemisphere



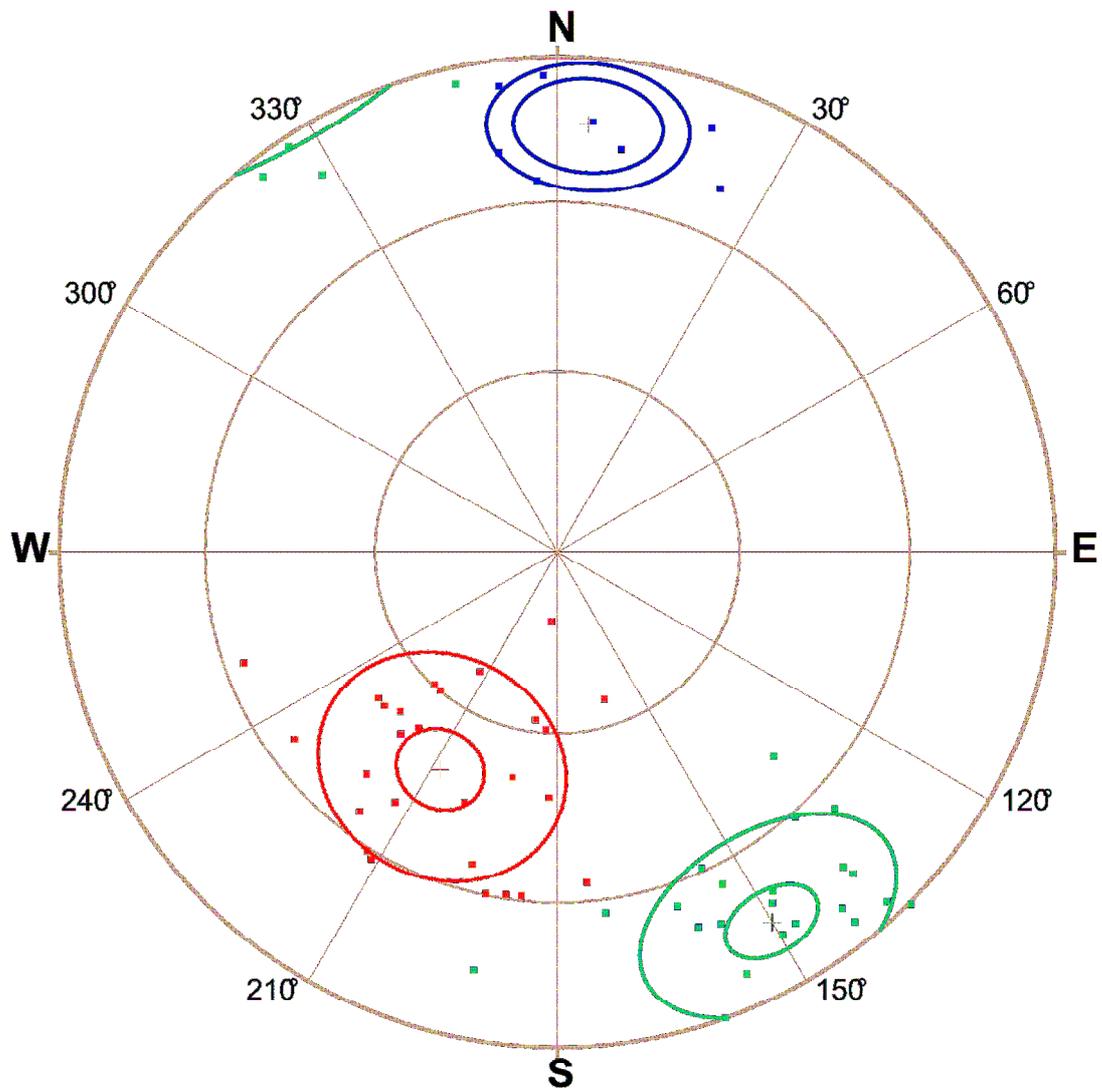
Daten 18	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktfäche
K1	94,83	33,87	9,66	13,14	184/76
K2	88,87	17,3	6,88	19,49	28/41
SF	90,41	20,05	6,49	18,04	330/75

# Daten18

Do15 Okt15:56:59 2015

## StereoNet

Lambert projection on lower hemisphere



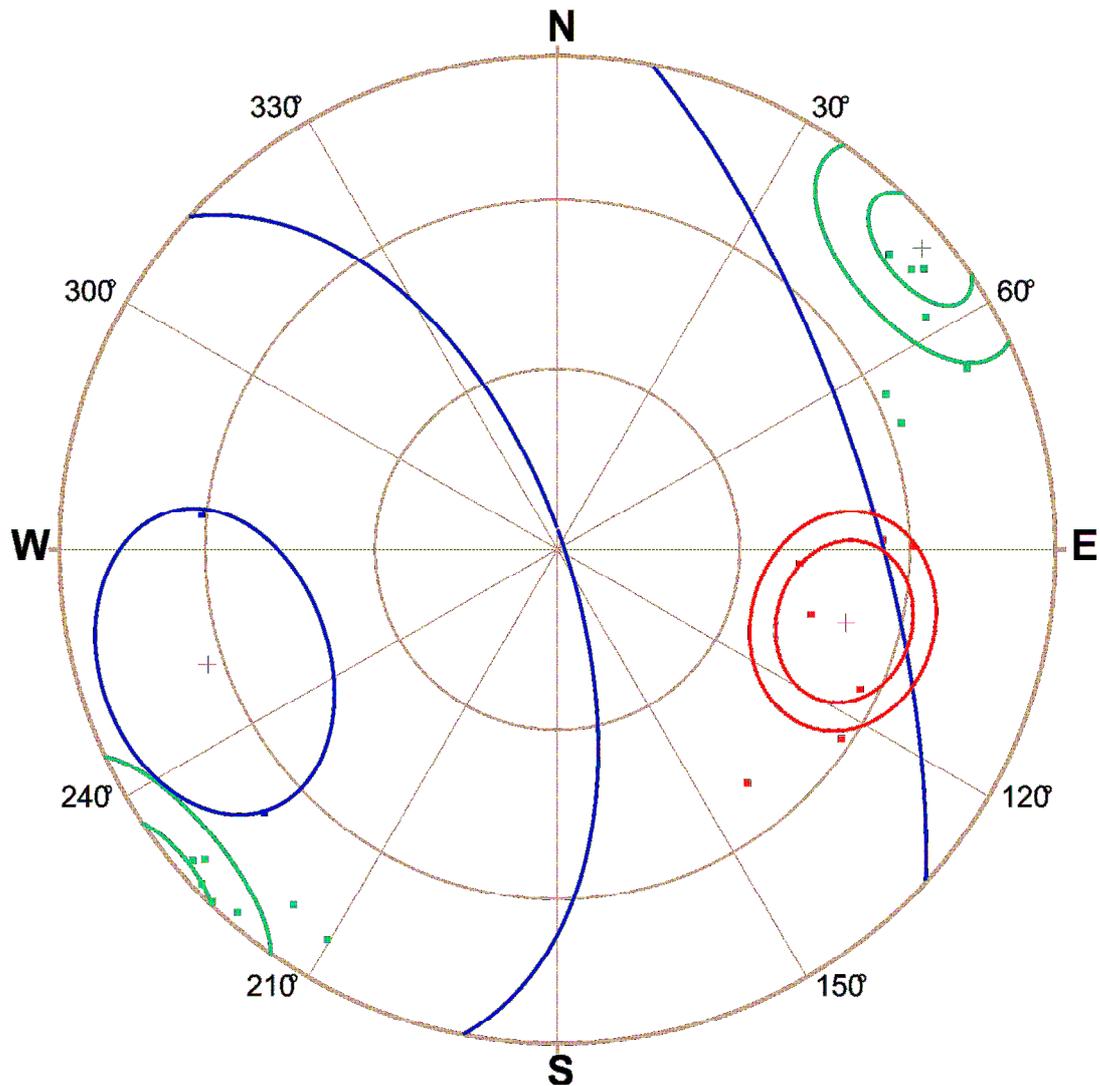
Daten 20	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktfäche
<b>K1</b>	85,94	7,11	115,86	22,02	72/63
<b>K2</b>	91,88	21,55	12,21	16,56	284/50
<b>SF</b>	92,5	24,76	8,15	15,9	230/85

# Daten20

Do15 Okt15:28&21 2015

## StereoNet

Lambert projection on lower hemisphere



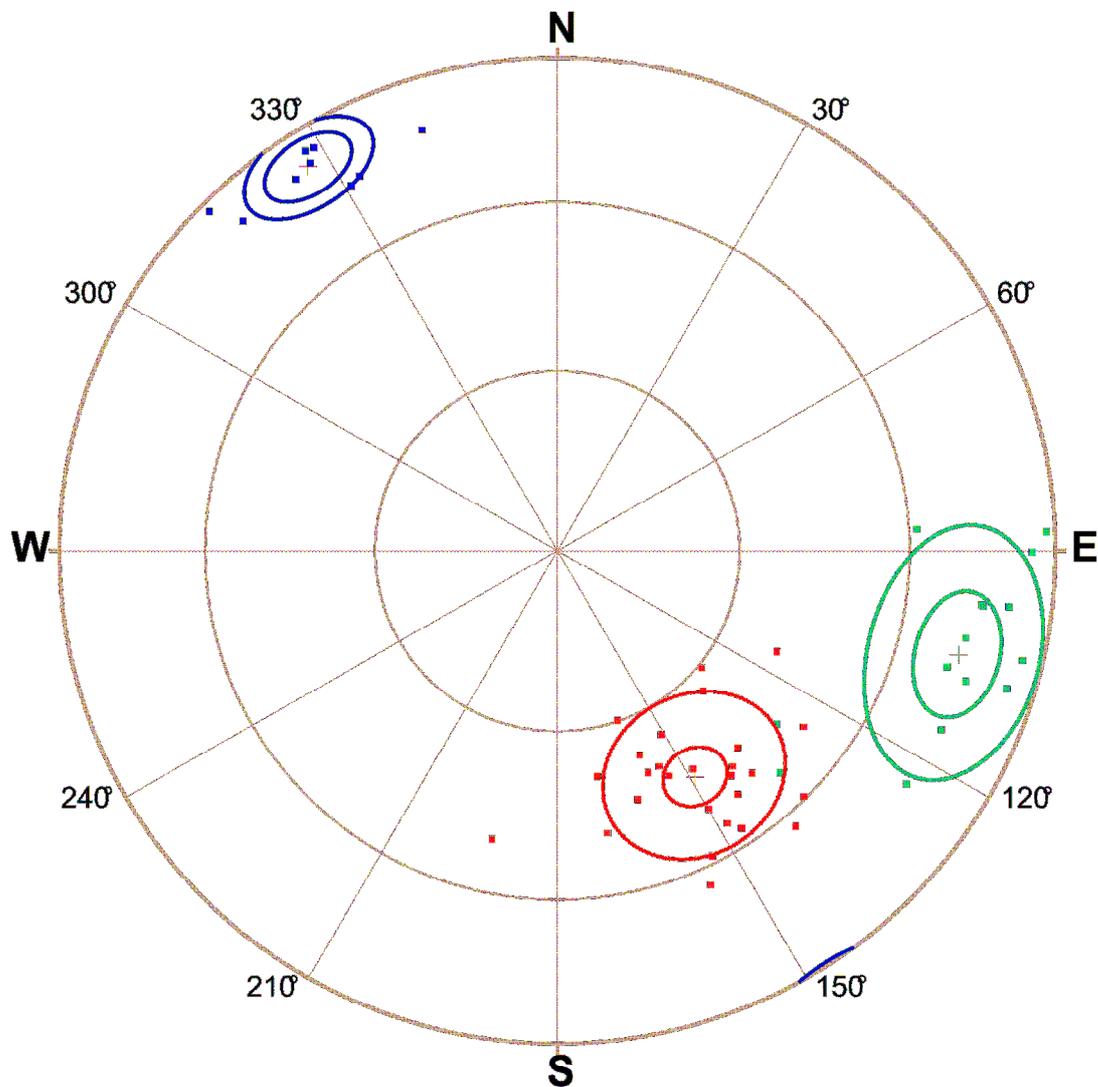
Daten 22	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktfäche
K1	97,63	74,93	5,99	8,86	147/82
K2	93,91	31,62	5,02	14,29	329/45
SF	91,14	21,06	8,53	17,32	285/72

## Daten22

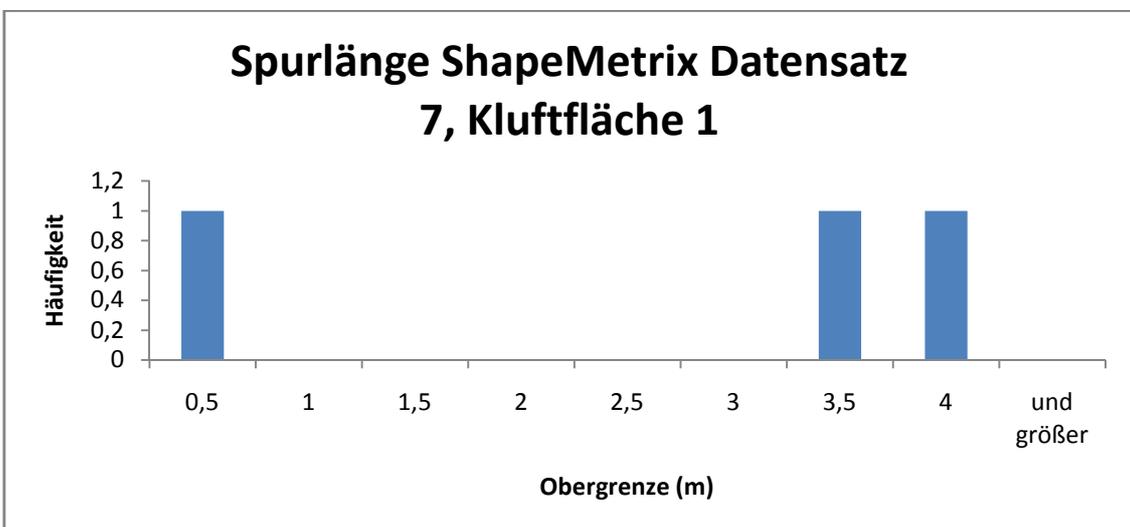
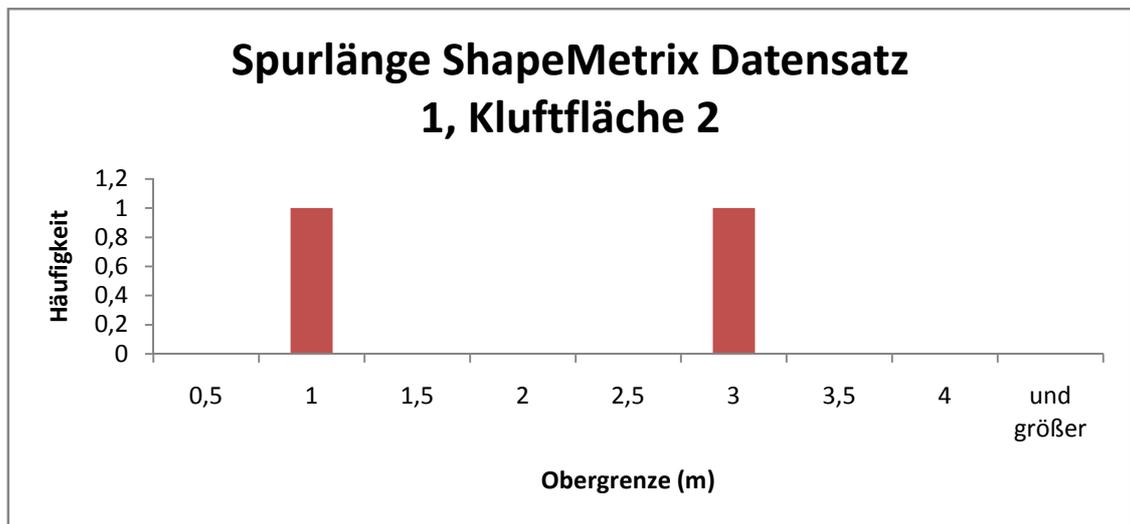
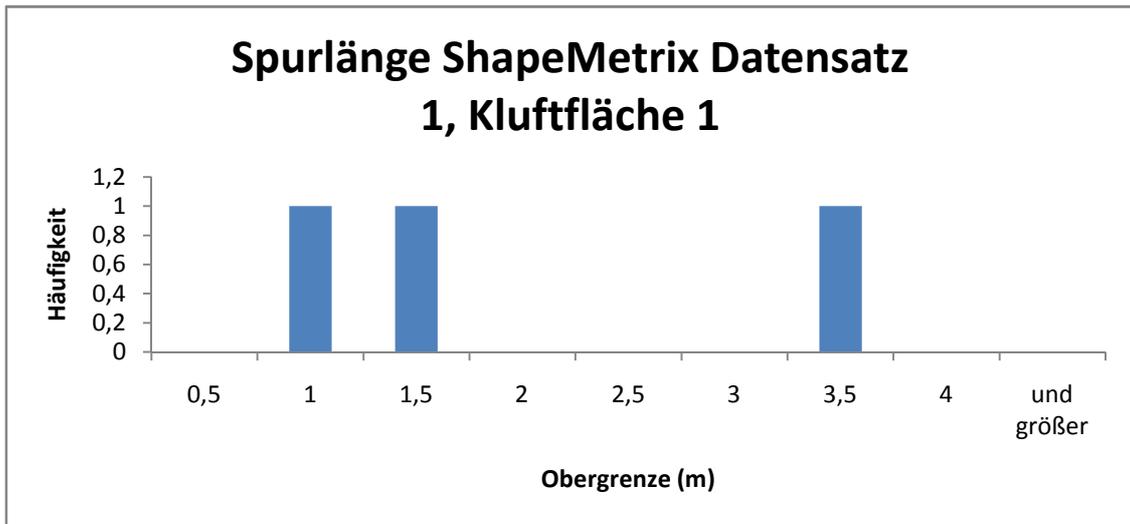
Do 15. Okt 15:37:09 2015

### StereoNet

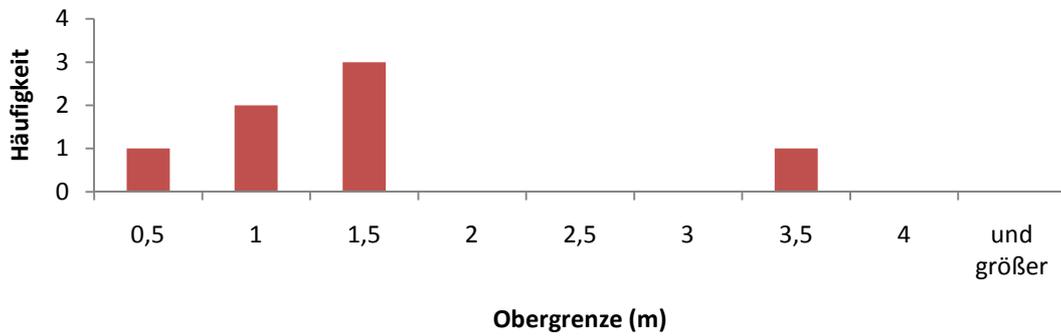
Lambert projection on lower hemisphere



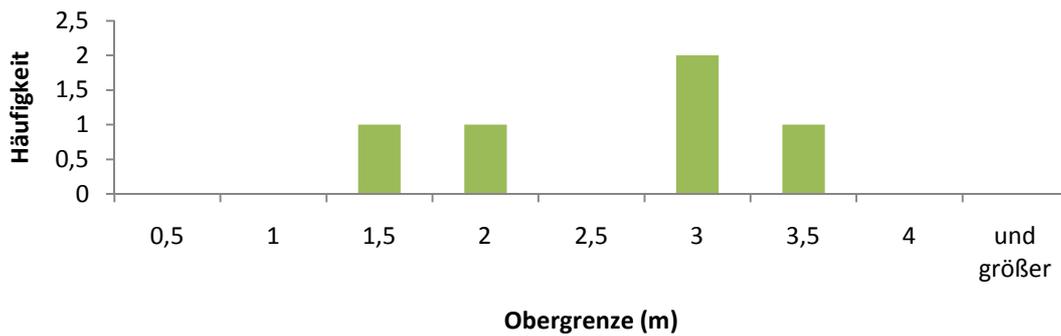
## Spurlängen von Photogrammetrie- Daten



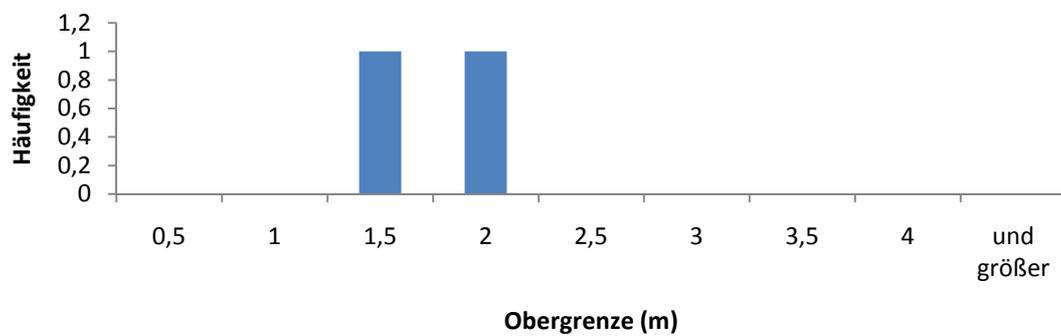
### Spurlänge ShapeMetrix Datensatz 9, Kluftfläche 2

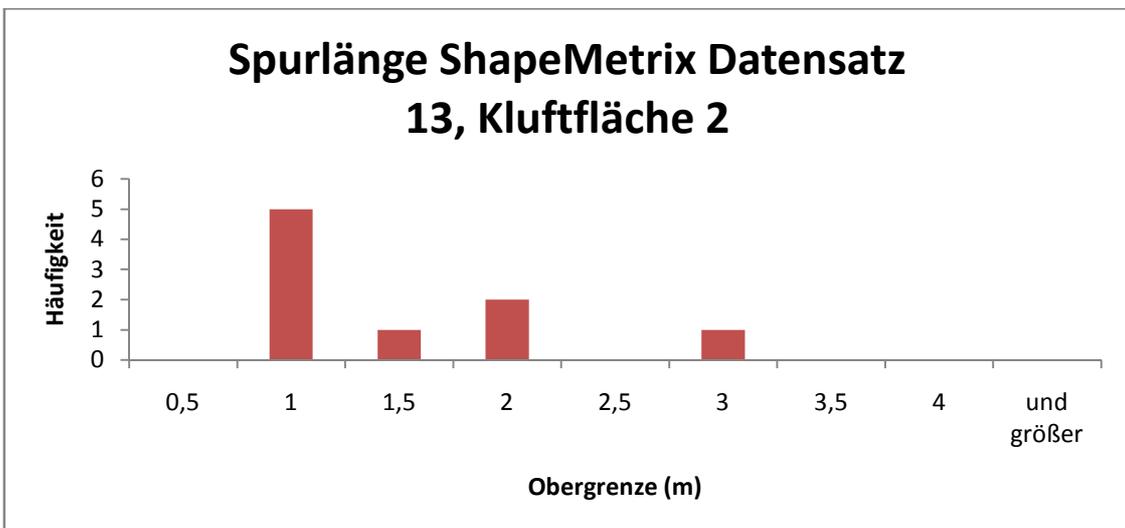
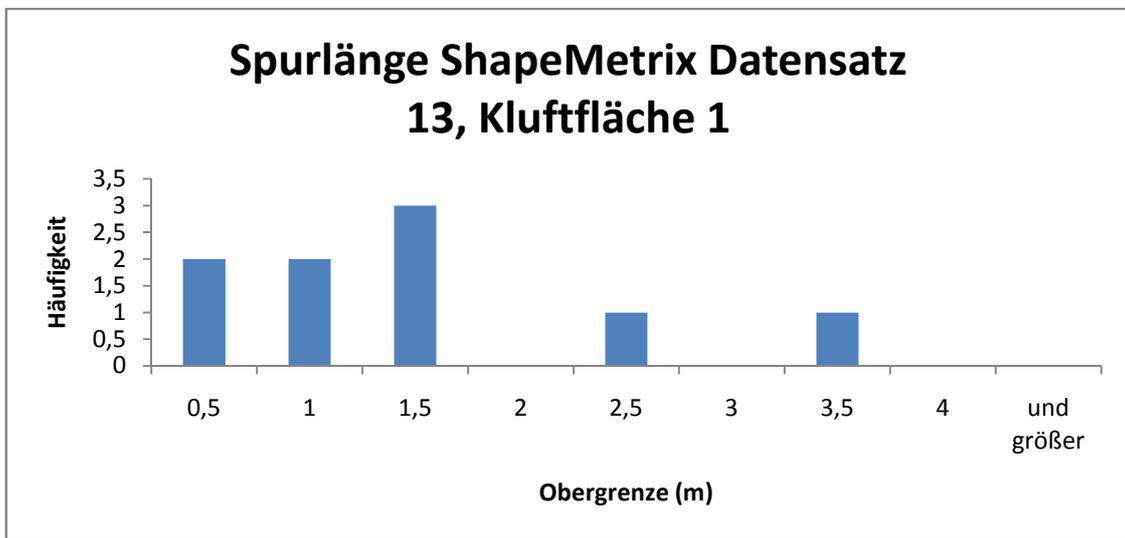
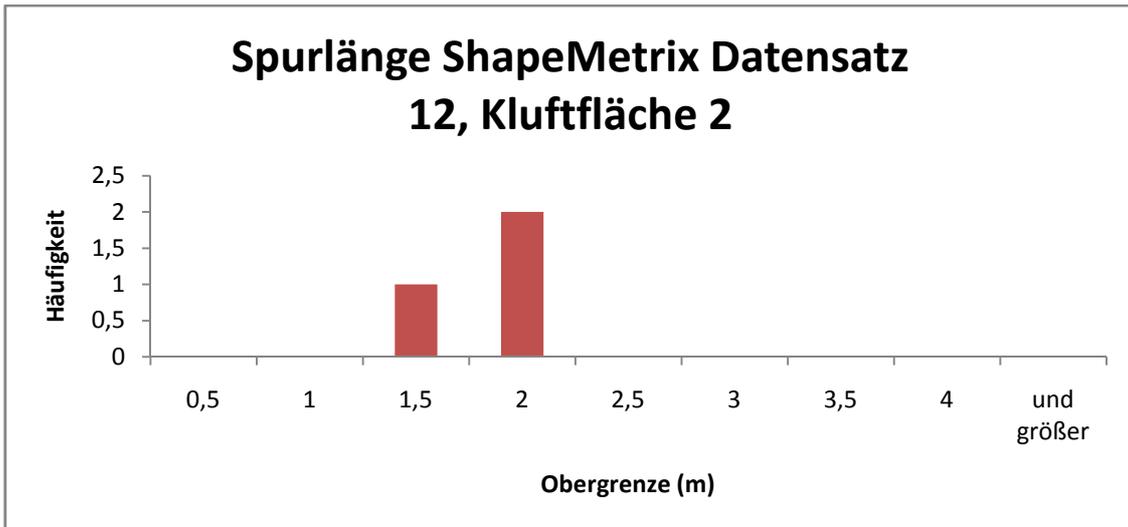


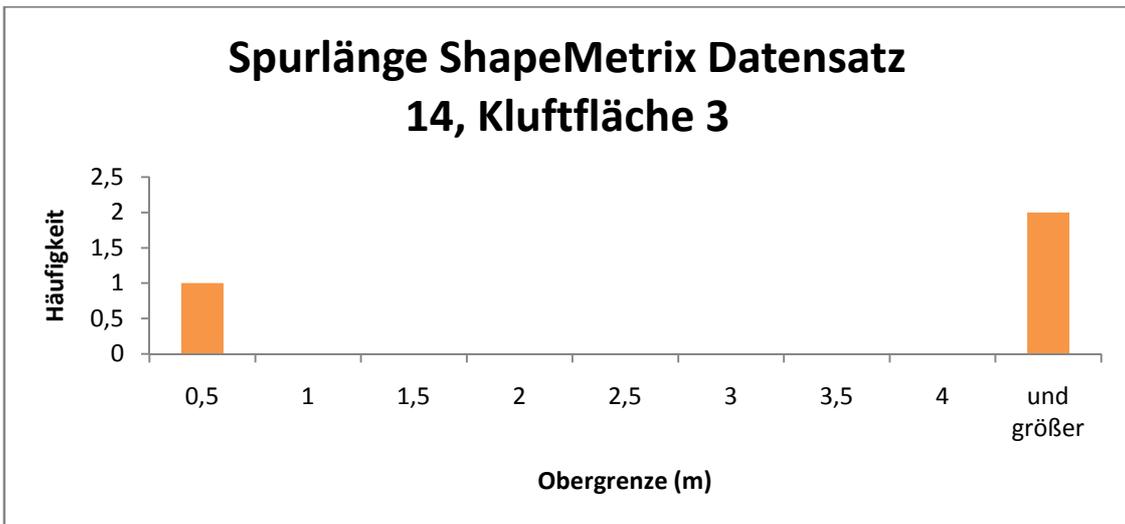
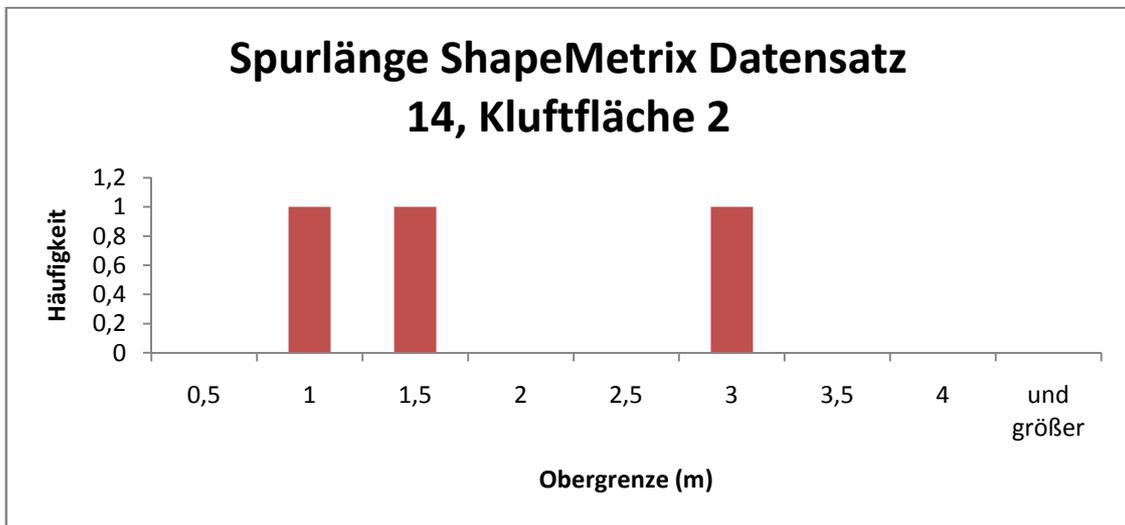
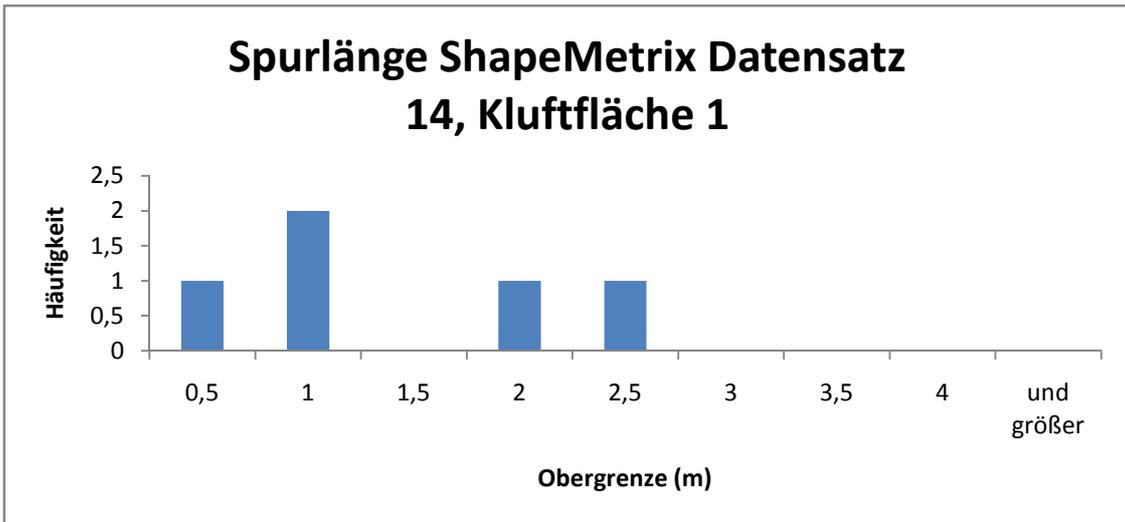
### Spurlänge ShapeMetrix Datensatz 12, Schieferungsfläche

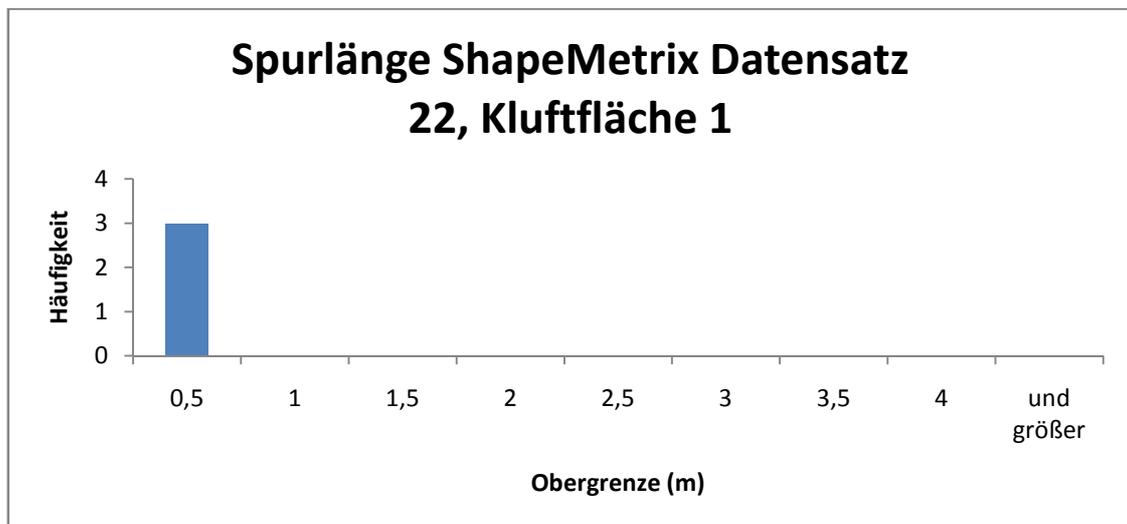
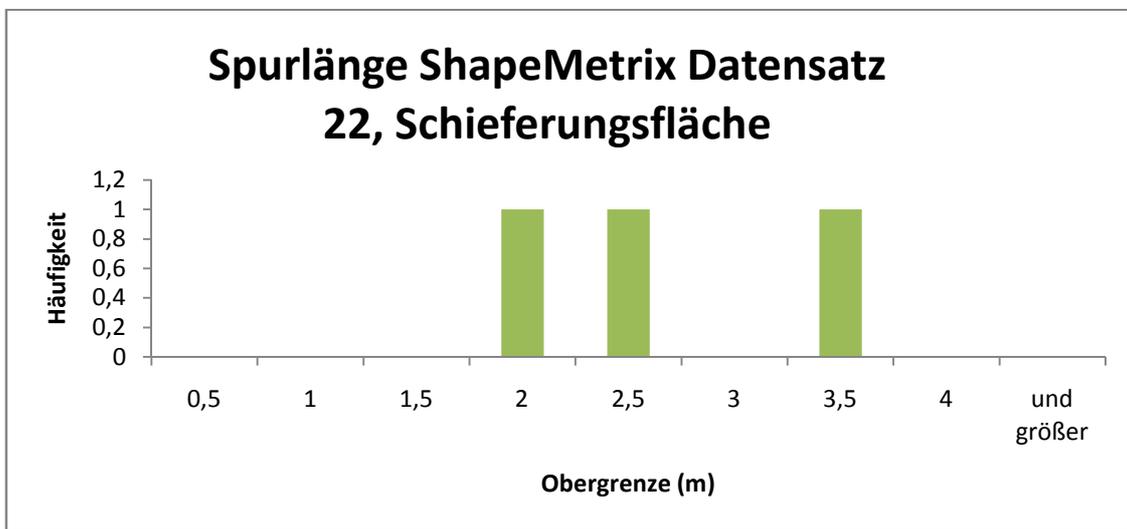
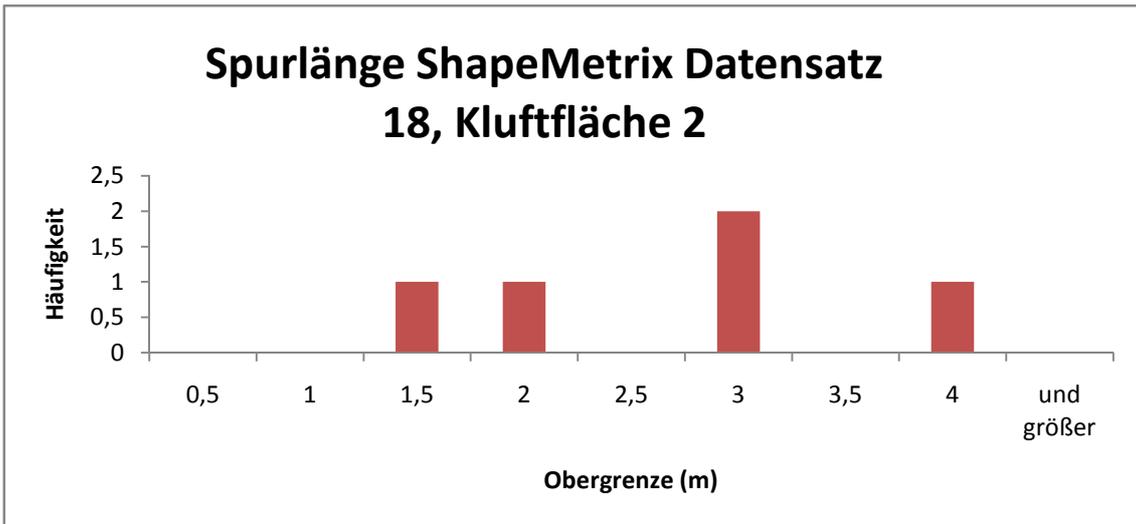


### Spurlänge ShapeMetrix Datensatz 12, Kluftfläche 1

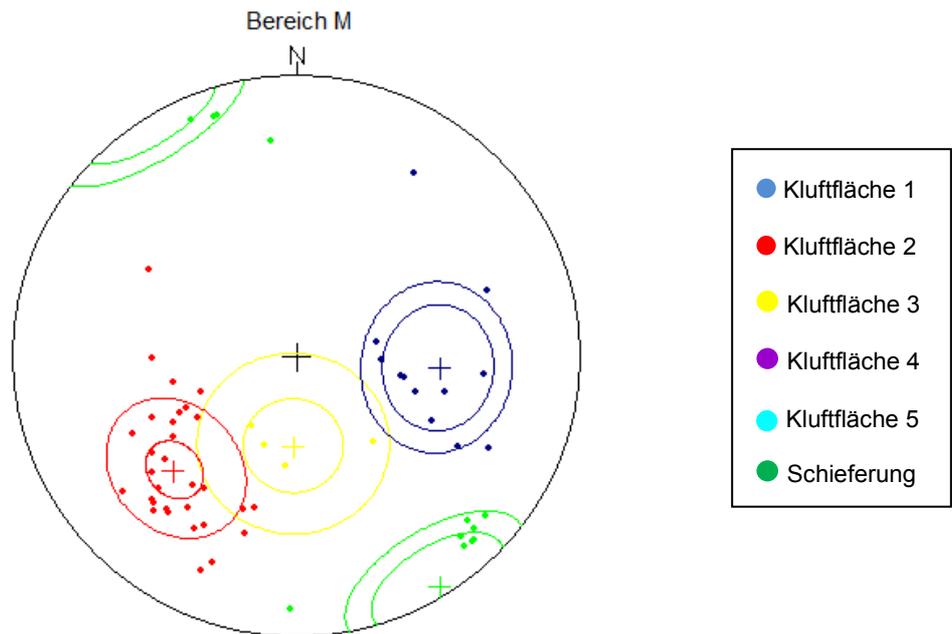




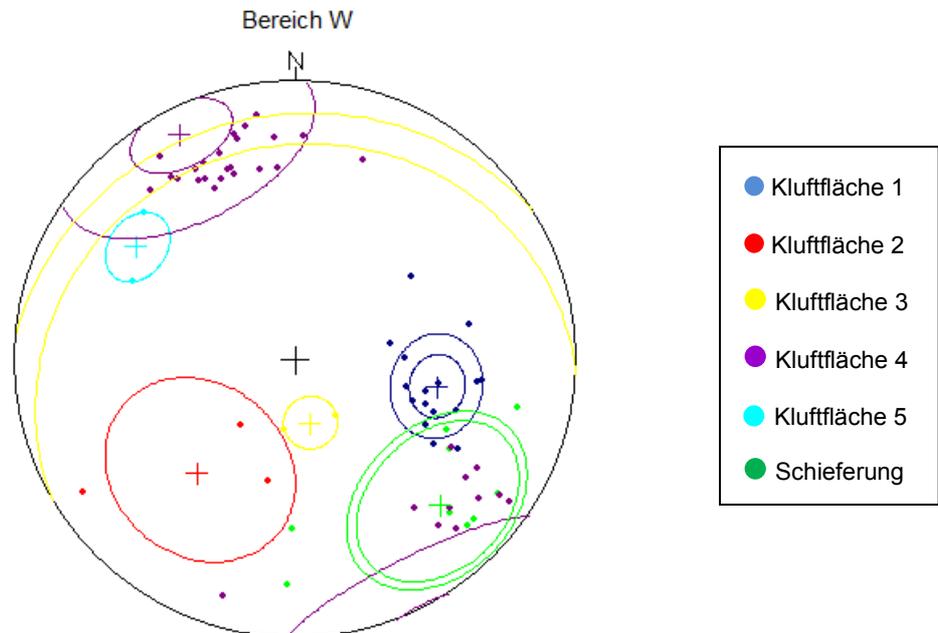




## C. Daten aus der LiDAR Analyse

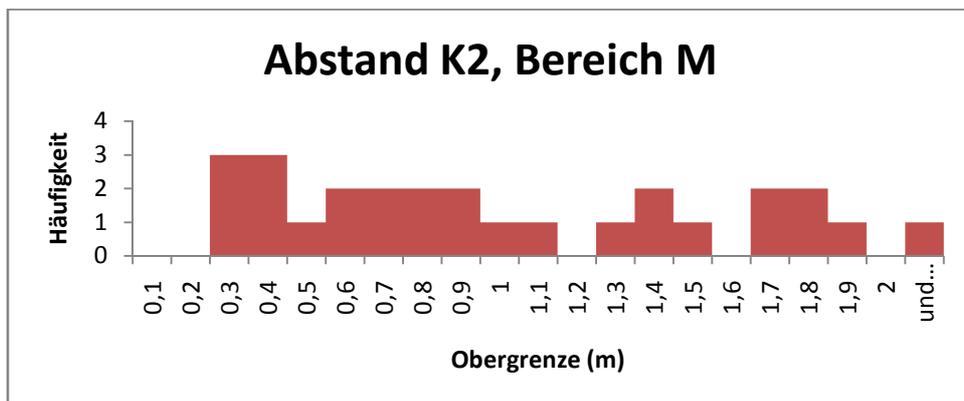
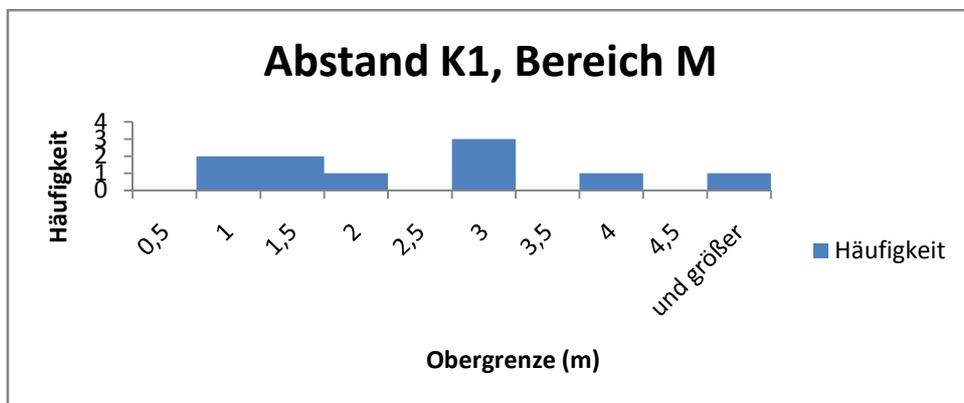
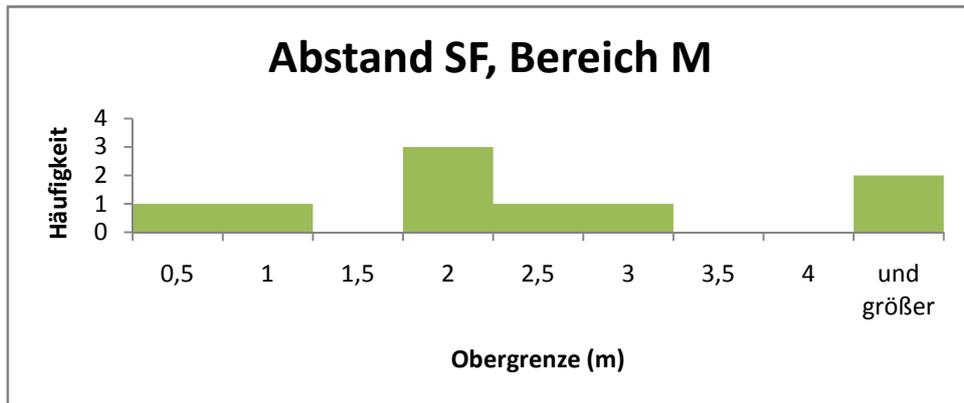


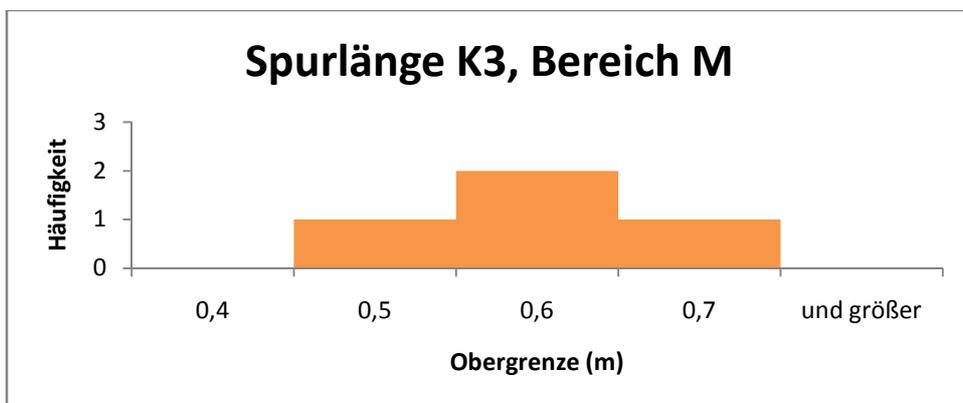
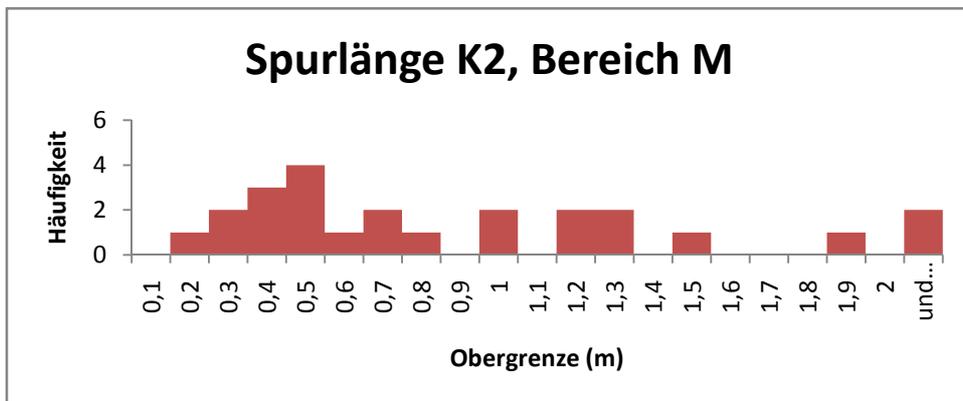
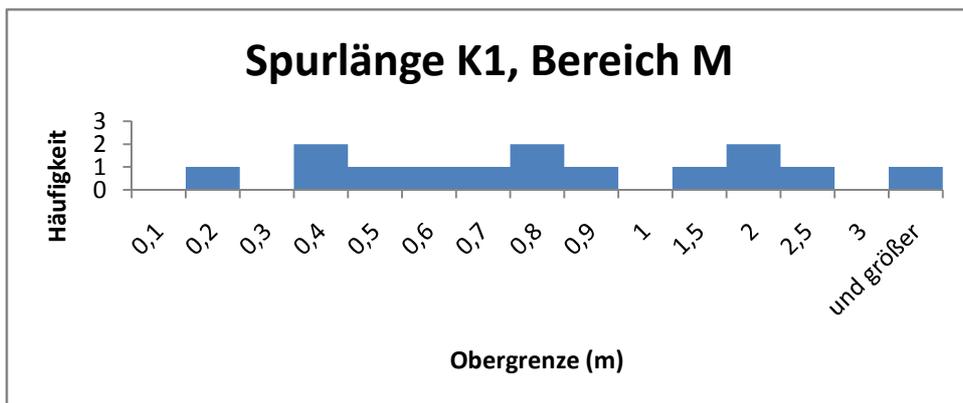
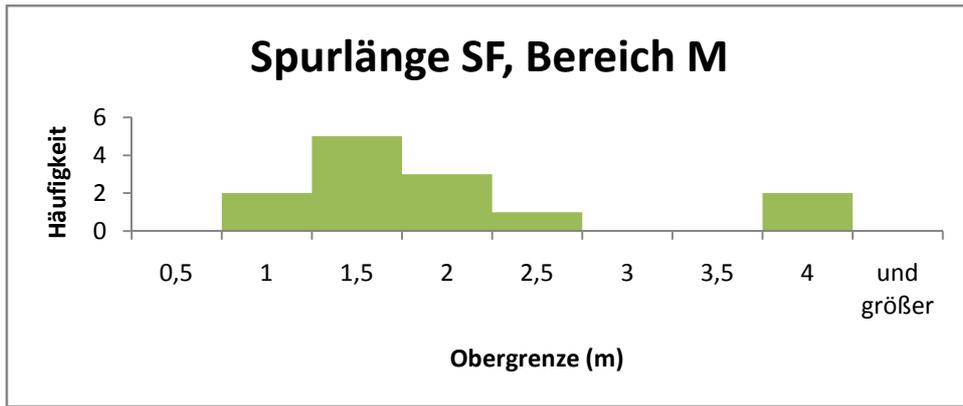
Bereich M	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktfläche
K1	84,43	11,77	18,93	25,82	305/46
K2	88,34	16,6	9,13	22,18	52/55
K3	94,21	25,89	29,95	15,47	3/29
SF	86,75	13,84	17,34	23,72	365/95

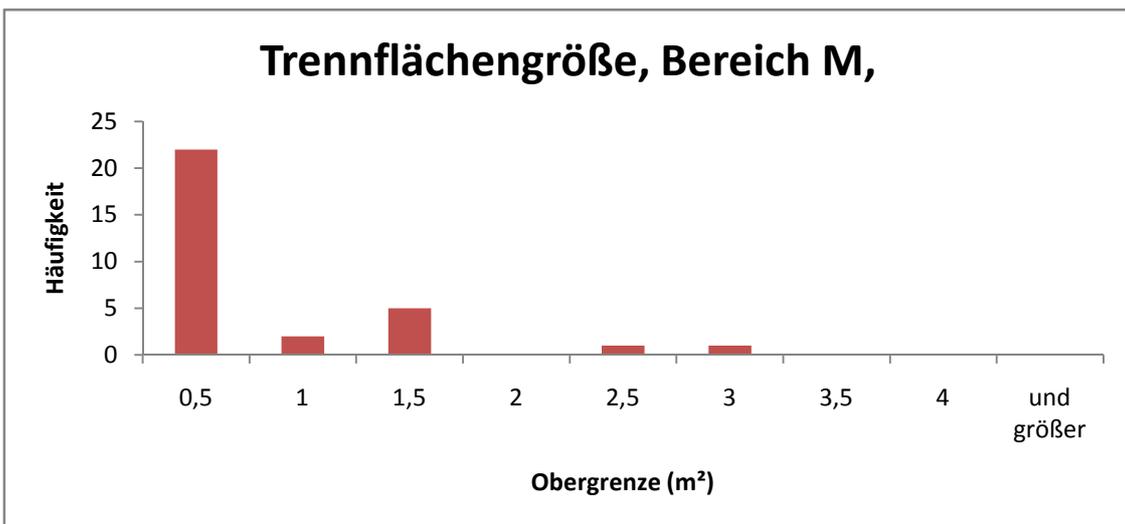
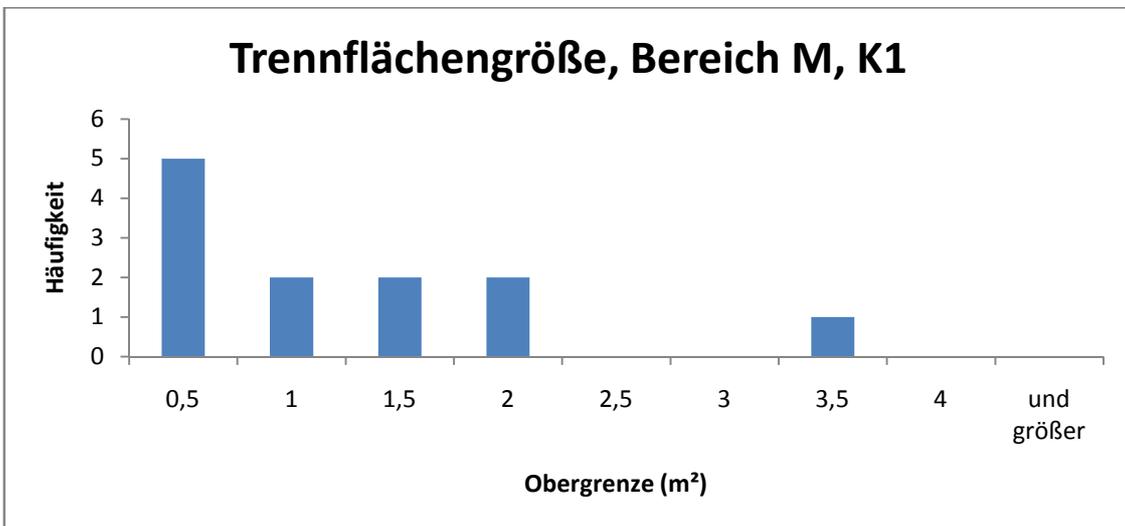
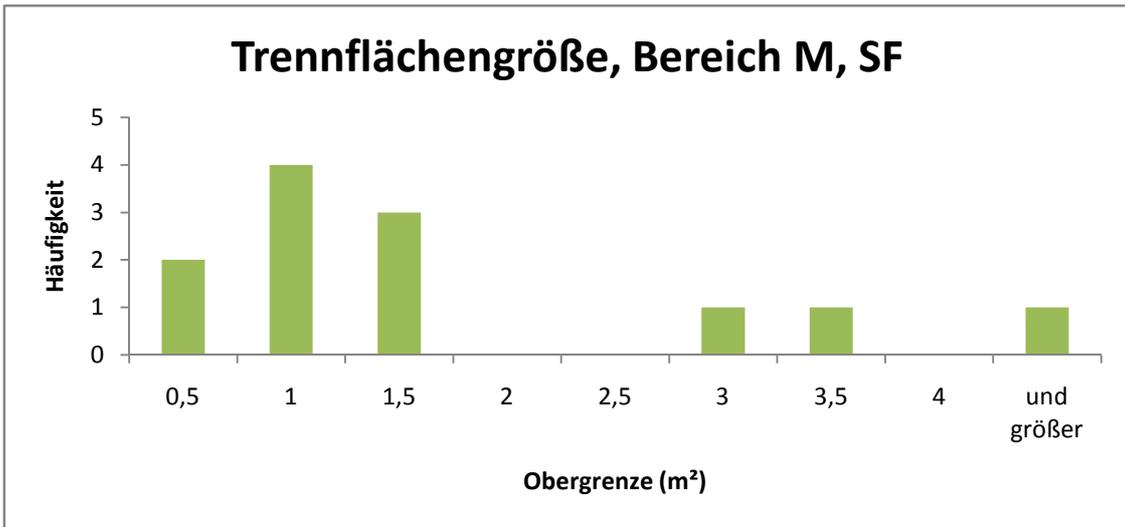


Bereich W	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktfläche
K1	93,89	30,69	9,59	15,9	312/47
K2	79,16	6,4	nicht bestimmbar	30,18	45/50
K3	98,19	55,26	93,88	8,59	385/21
K4	74	7,47	13,49	34,07	170/88
K5	97,25	36,38	nicht bestimmbar	10,6	140/65
SF	81,46	9,59	25,56	28,34	350/69

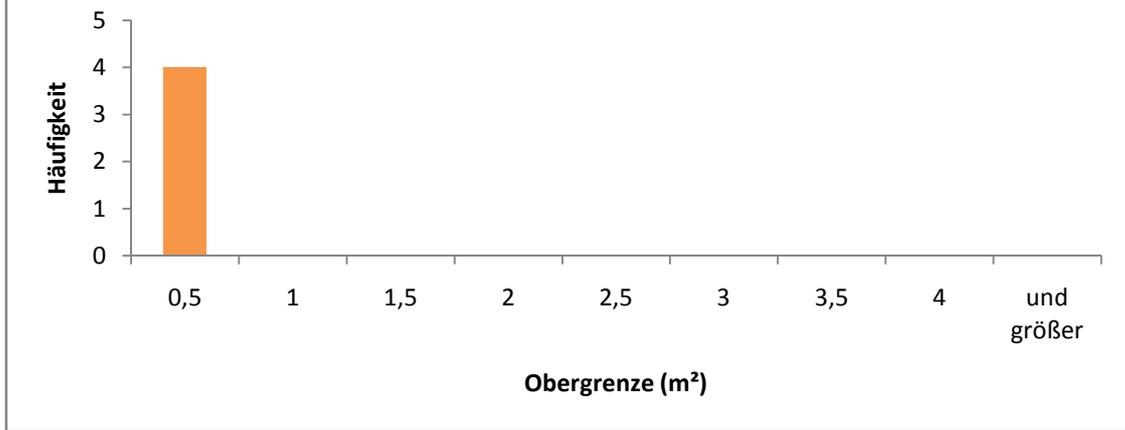
## Bereich M



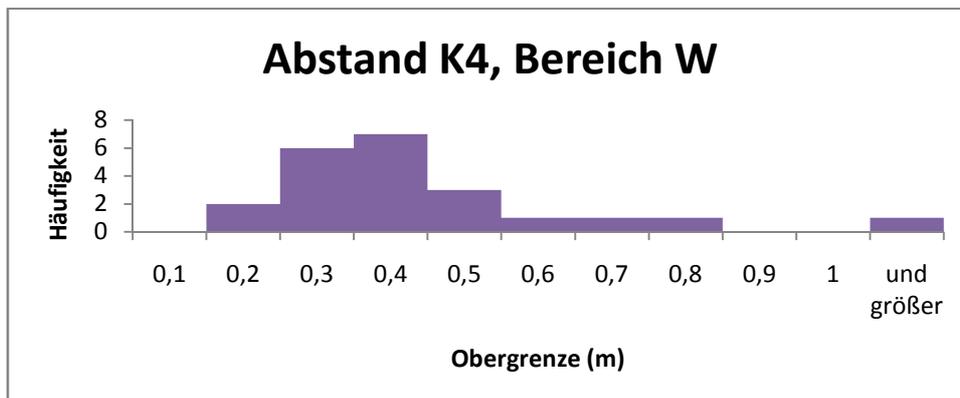
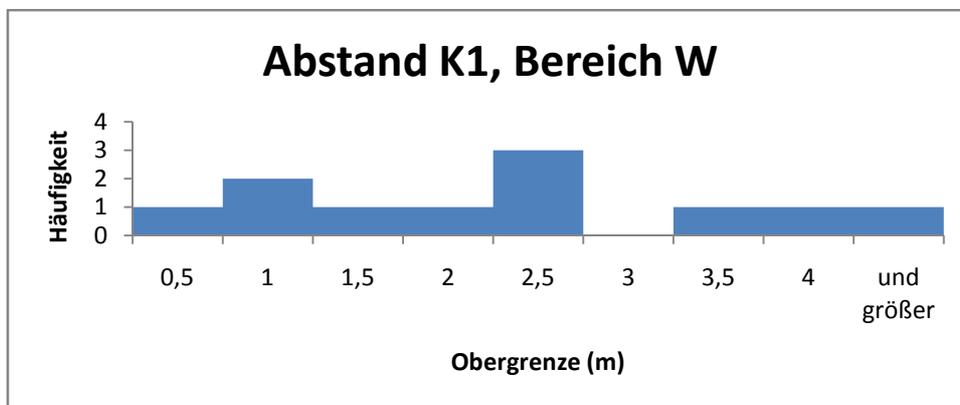
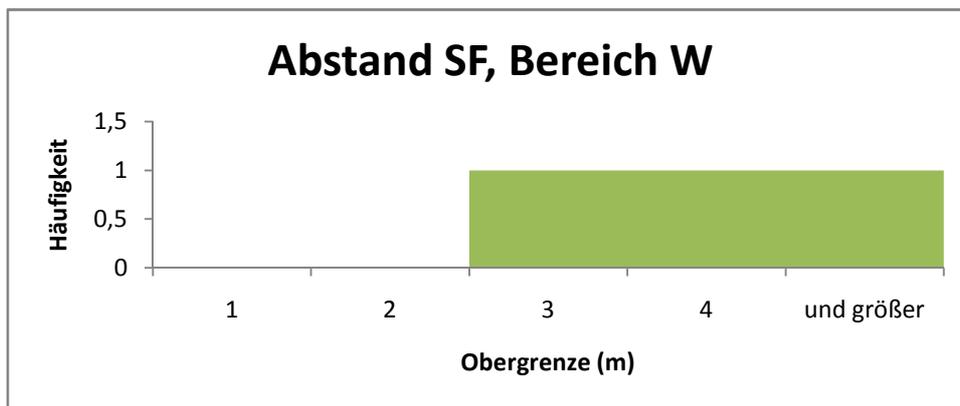


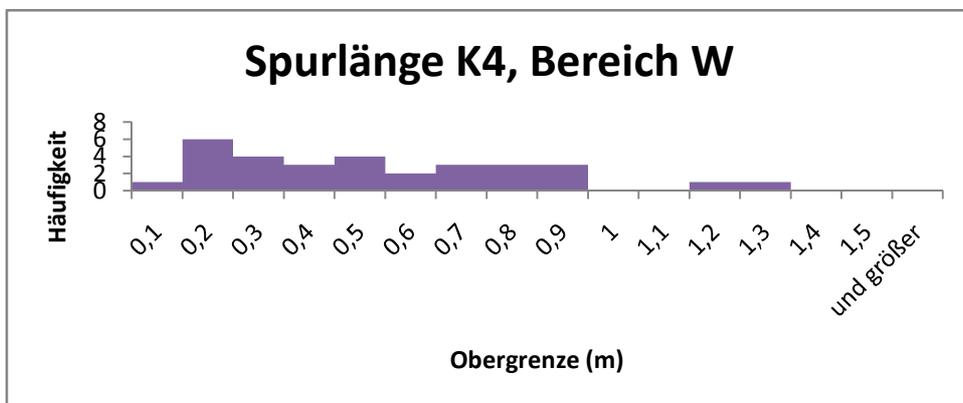
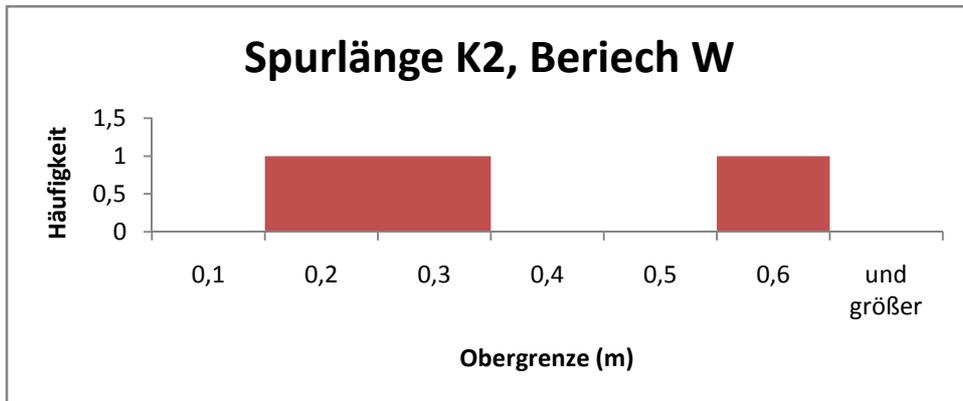
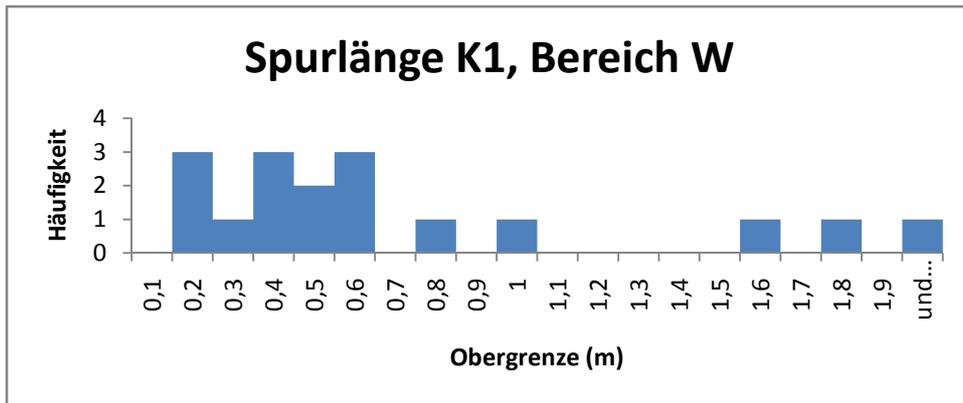
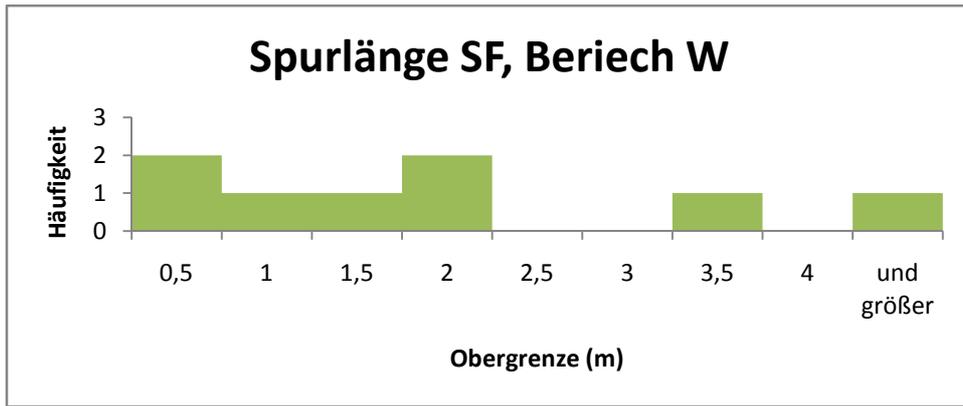


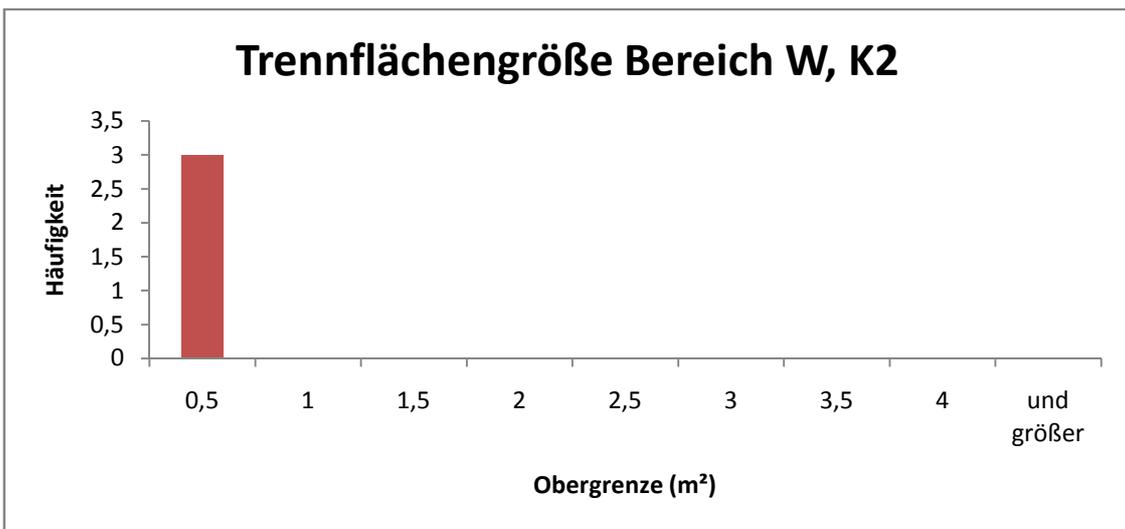
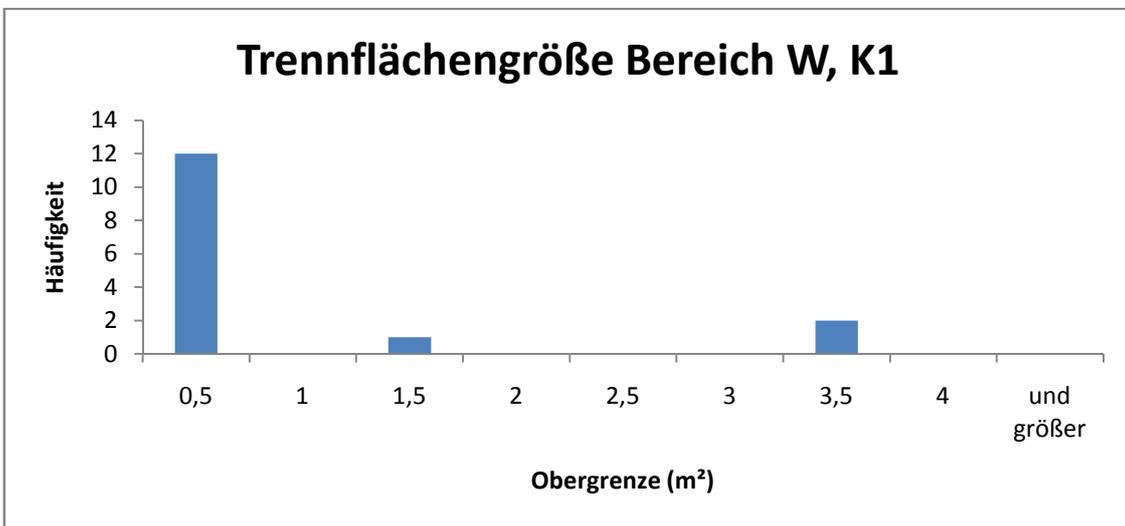
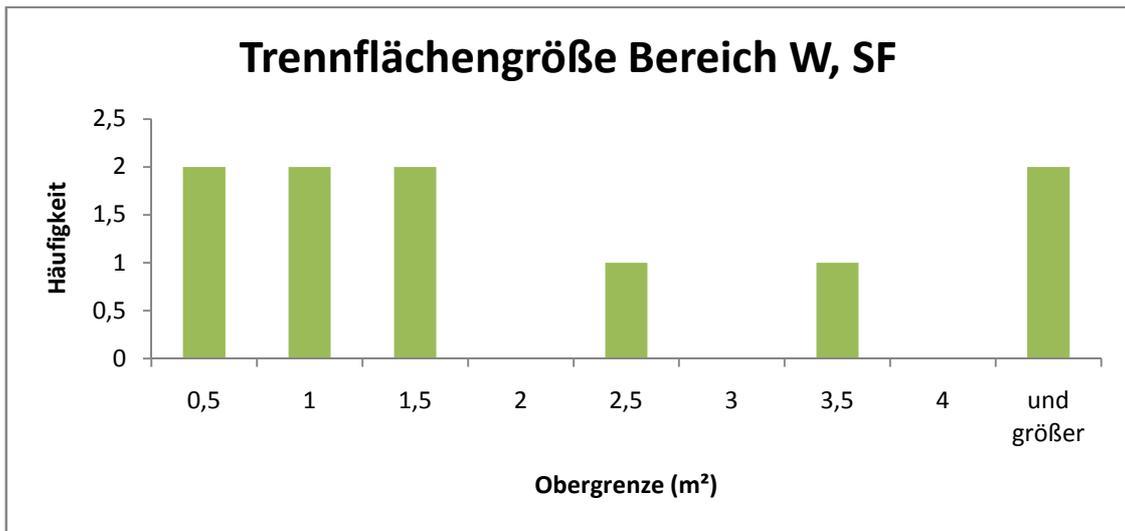
### Trennflächengröße Bereich M, K3

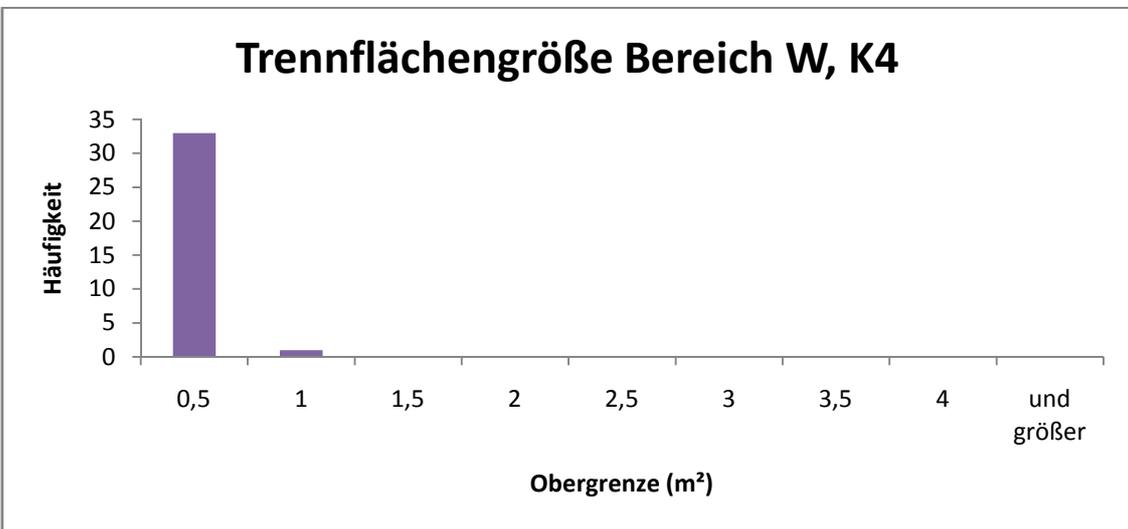
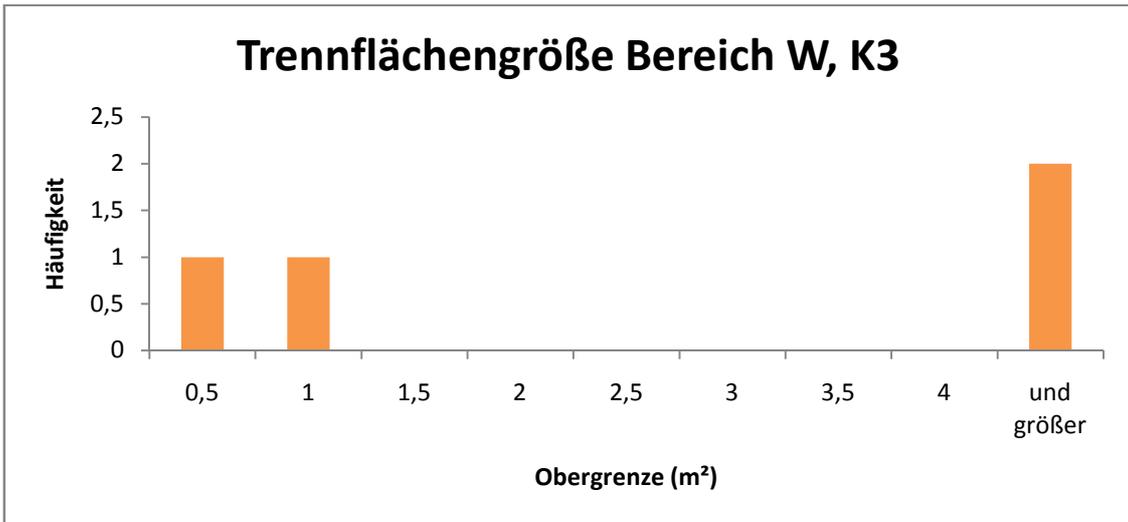


## Bereich W









## Statistische Werte der Orientierungsdaten

<b>Scanline</b>					
	<b>R (%)</b>	<b>k</b>	<b><math>\theta</math></b>	<b><math>\omega</math></b>	<b>Schwerpunktfläche</b>
<b>Datensatz 4</b>	<b>R (%)</b>	<b>k</b>	<b><math>\theta</math></b>	<b><math>\omega</math></b>	<b>Schwerpunktfläche</b>
K	52,08	3,58	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	200/2
SF	44,96	3,43	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	161/97
<b>Datensatz 5</b>	<b>R (%)</b>	<b>k</b>	<b><math>\theta</math></b>	<b><math>\omega</math></b>	<b>Schwerpunktfläche</b>
K	43,21	30,2	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	200/5
SF	96,82	60,94	4,66	11,41	173/73
<b>Datensatz 6</b>	<b>R (%)</b>	<b>k</b>	<b><math>\theta</math></b>	<b><math>\omega</math></b>	<b>Schwerpunktfläche</b>
K	46,42	3,32	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	203/27
SF	91,41	20,68	16,88	18,94	3/80
<b>Datensatz 7</b>	<b>R (%)</b>	<b>k</b>	<b><math>\theta</math></b>	<b><math>\omega</math></b>	<b>Schwerpunktfläche</b>
K	84,79	11,51	25,08	25,51	287/65
SF	57,24	4,47	22,78	45,37	171/80
<b>Datensatz 9</b>	<b>R (%)</b>	<b>k</b>	<b><math>\theta</math></b>	<b><math>\omega</math></b>	<b>Schwerpunktfläche</b>
K1	51,07	2,72	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	303/93
K2	9,23	2,02	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	198/51
SF	49,72	3,18	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	110/30
<b>Datensatz z 10</b>	<b>R (%)</b>	<b>k</b>	<b><math>\theta</math></b>	<b><math>\omega</math></b>	<b>Schwerpunktfläche</b>
K	25,1	2,6	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	123/28
SF	60,21	4,75	25,19	43,45	374/94
<b>Datensatz 11</b>	<b>R (%)</b>	<b>k</b>	<b><math>\theta</math></b>	<b><math>\omega</math></b>	<b>Schwerpunktfläche</b>
K	56,15	4,18	34,83	46,08	130/60
SF	84,36	9,59	51,43	25,88	352/86

<b>Datensatz 12</b>	<b>R (%)</b>	<b>k</b>	<b><math>\theta</math></b>	<b><math>\omega</math></b>	<b>Schwerpunktfläche</b>
K1	96,85	55,54	11	11,36	92/39
K2					
SF	99,9	1560	3,77	1,97	180/85
<b>Datensatz 13</b>	<b>R (%)</b>	<b>k</b>	<b><math>\theta</math></b>	<b><math>\omega</math></b>	<b>Schwerpunktfläche</b>
K	73,55	5,04	nicht bestimmbar	34,39	299/48
SF	89,96	17,08	22,35	20,52	164/98
<b>Datensatz 14</b>	<b>R (%)</b>	<b>k</b>	<b><math>\theta</math></b>	<b><math>\omega</math></b>	<b>Schwerpunktfläche</b>
K1	58,69	3,87	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	271/36
K2	96,82	47,1	21,96	11,42	101/66
SF	89,3	16,02	23,13	21,22	398/90
<b>Datensatz 15</b>	<b>R (%)</b>	<b>k</b>	<b><math>\theta</math></b>	<b><math>\omega</math></b>	<b>Schwerpunktfläche</b>
K1	98,93	156,49	8,11	6,58	82/49
K2	46,39	2,98	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	219/27
K3	90,21	10,22	nicht bestimmbar	20,26	100/60
SF	99,61	406,95	5,88	3,99	6/76
<b>Datensatz 16</b>	<b>R (%)</b>	<b>k</b>	<b><math>\theta</math></b>	<b><math>\omega</math></b>	<b>Schwerpunktfläche</b>
K1	95,72	37,35	19,66	13,27	244/44
K2	91,39	15,49	59,42	18,96	265/54
K3	80,37	3,15	44,58	29,22	84/58
SF1	67,61	4,94	60,45	38,55	369/80
SF2	99,38	162,2	51,18	5	10/85
<b>Datensatz 18</b>	<b>R (%)</b>	<b>k</b>	<b><math>\theta</math></b>	<b><math>\omega</math></b>	<b>Schwerpunktfläche</b>
K1	85,73	11,21	37,23	24,66	289/85
K2	88,8	14,88	27,17	21,73	341/65
SF	93,37	28,51	9,3	16,57	188/85

Datensatz 19	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktfläche
K1	98,61	72,13	80	7,51	263/73
K2	97,09	34,33	nicht bestimmbar	10,92	319/59
SF	93,93	26,35	23,56	15,35	175/79
<b>RIScan</b>					
Bereich M	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktfläche
K1	84,43	11,77	18,93	25,32	305/46
K2	88,34	16,6	9,13	22,18	52/55
K3	94,21	25,89	29,95	15,47	3/29
SF	86,75	13,84	17,34	23,72	365/95
Bereich W	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktfläche
K1	93,89	30,69	9,59	15,9	312/47
K2	79,16	6,4	nicht bestimmbar	30,18	45/50
K3	98,19	55,26	93,88	8,59	385/21
K4	74	7,47	13,49	34,07	170/00
K5	97,25	36,38	nicht bestimmbar	10,6	140/65
SF	81,46	9,59	25,56	28,34	350/69
<b>ShapeMetrix</b>					
Daten 1	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktfläche
K1	78,3	8,29	17,84	27,77	172/58
K2	92,61	25,56	6,97	15,77	312/45
SF	95,05	38,66	4,93	12,35	252/79
Daten 7	R (%)	k	$\vartheta$	$\omega$	Schwerpunktfläche
K1	94,36	31,01	10,1	13,74	26/80
K2	93,17	28,05	5,69	15,15	201/51
SF	88,57	15,9	11,81	19,76	105/89

<b>Daten 8</b>	<b>R (%)</b>	<b>k</b>	<b><math>\varnothing</math></b>	<b><math>\omega</math></b>	<b>Schwerpunktfläche</b>
K1	47,83	2,56	103,1	46,24	163/46
K2	91,7	23,28	5,67	16,74	328/50
SF	92,89	26,49	5,12	15,60	260/75
<b>Daten 9</b>	<b>R (%)</b>	<b>k</b>	<b><math>\varnothing</math></b>	<b><math>\omega</math></b>	<b>Schwerpunktfläche</b>
K1	86,81	12,64	19,6	21,29	106/75
K2	90,51	19,15	10,71	17,95	309/44
SF	91,86	23,2	7,33	16,58	239/77
<b>Daten 11</b>	<b>R (%)</b>	<b>k</b>	<b><math>\varnothing</math></b>	<b><math>\omega</math></b>	<b>Schwerpunktfläche</b>
K1	95,11	32,72	13,58	12,78	84/69
K2	93,92	30,83	0,75	12,48	290/43
SF	94,09	32,48	5,16	14,07	228/78
<b>Daten 12</b>	<b>R (%)</b>	<b>k</b>	<b><math>\varnothing</math></b>	<b><math>\omega</math></b>	<b>Schwerpunktfläche</b>
K1	91,18	20,41	10,95	17,27	252/50
K2	88,01	15,16	12,12	20,26	336/40
SF	95,48	43,13	3,58	12,27	273/81
<b>Daten 13</b>	<b>R (%)</b>	<b>k</b>	<b><math>\varnothing</math></b>	<b><math>\omega</math></b>	<b>Schwerpunktfläche</b>
K1	78,04	8,74	13,72	27,53	157/59
K2	93,87	30,21	5,6	14,57	285/47
K3	99,38	215,59	8,42	4,51	234/18
SF	96,22	51,37	3,47	11,21	229/79
<b>Daten 14</b>	<b>R (%)</b>	<b>k</b>	<b><math>\varnothing</math></b>	<b><math>\omega</math></b>	<b>Schwerpunktfläche</b>
K1	88,6	16,29	10,16	19,74	45/76
K2	95,87	43,67	5,29	12	344/59
K3	84,15	12,27	7,11	23,46	13/20
SF	92,4	25,48	5,13	10,01	22/71

Daten 15	R (%)	k	$\theta$	$\omega$	Schwerpunktfläche
K1	88,97	16,12	13,22	19,39	328/58
K2	92,38	24,93	6,67	16,02	38/76
K3	78,28	8,97	3,11	27,78	4/19
SF	90,9	21,03	6,76	17,56	6/69
Daten 16	R (%)	k	$\theta$	$\omega$	Schwerpunktfläche
K1	78	8,50	12,53	27,07	78/53
K2	92,57	25,97	5,45	15,81	183/47
K3	99,78	593,23	5,07	2,72	151/23
SF	95,8	40,3	3,55	11,82	130/82
Daten 17	R (%)	k	$\theta$	$\omega$	Schwerpunktfläche
K1	92,46	24,62	3,17	15,94	52/53
K2	90,45	20,03	6,93	18	126/48
K3	97,76	71,36	9,12	8,61	83/34
SF	93,83	31,68	3,93	14,38	68/79
Daten 18	R (%)	k	$\theta$	$\omega$	Schwerpunktfläche
K1	94,83	33,87	9,66	13,14	184/76
K2	88,87	17,3	6,88	19,40	28/41
SF	90,41	20,05	6,49	18,04	330/75
Daten 20	R (%)	k	$\theta$	$\omega$	Schwerpunktfläche
K1	85,94	7,11	115,86	22,02	72/63
K2	91,88	21,55	12,21	16,56	284/50
SF	92,5	24,76	3,15	15,9	230/85
Daten 22	R (%)	k	$\theta$	$\omega$	Schwerpunktfläche
K1	97,63	74,93	5,99	8,86	14/182
K2	93,91	31,62	5,02	14,29	329/45
SF	91,14	21,06	3,53	17,32	285/72