

Photogrammetrische Erfassung der Klüftigkeit des Gebirges und Zugänge zur weitgehend automatisierten Bereitstellung der Ergebnisse*

JOACHIM MENZ, THOMAS MARTIENBEN & VAN DIEN NGUYEN, Freiberg

Zusammenfassung: Das Forschungskonzept von Prof. Rüger, der bis 1968 an der Bergakademie Freiberg als Direktor des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie gearbeitet hat, war auf die Anwendung der Photogrammetrie in den Geo- und Montanwissenschaften ausgerichtet. Dazu gehörte auch die photogrammetrische Erfassung der Klüftigkeit des Gebirges, die eine Alternative zur traditionellen Kluftkartierung mit dem Geologenkompass darstellt, vor allem dann, wenn die Gebirgsformationen schwer zugänglich sind.

Nach einer Einführung in die Kluftmessung wird der analytisch – photogrammetrische Zugang zur Kluftkartierung und richtungsstatistischen Auswertung im SCHMIDT'schen Netz behandelt. Bei diesem Zugang ist die Auswertung der Stereobilder am Komparator sehr zeitintensiv. Deshalb wird im zweiten Teil des Beitrages gezeigt, wie durch die Nutzung der digitalen Photogrammetrie die Detailauswertung der Stereobilder automatisiert werden kann. Dazu genutzt wird die PCI-Software zur automatischen DEM-Generierung. Zur Erkennung und Auswertung der in den automatisch abgeleiteten digitalen Oberflächenmodellen enthaltenen Kluftebenen sind eigene Softwarelösungen entwickelt worden. An Anwendungsbeispielen wird gezeigt, dass die so automatisierte photogrammetrische Kluftkartierung zu praktisch brauchbaren statistischen Auswertergebnissen führen kann.

Summary: *Photogrammetric jointing determination of rock body an digital approach to the further automated solution.* Professor Rüger was the head of the department of geodesy and photogrammetry at the Freiberg University of Mining and Technology and has worked here until 1968. His work focussed on the application of photogrammetry in geosciences as well as mining sciences. This includes also the photogrammetric measurement of the joints of the mountains. The photogrammetric method represents an alternative to the traditional measurement using the compass. It has advantages particularly if the mountains difficult to get to.

In the first part of this paper an introduction into the classical joint measurement is given. The joint exploration is described by using the analytically-photogrammetric method, and the direction statistics is applied for the data analysis. The results are represented in a SCHMIDT's grid. Measurements of stereopair takes much time. That's why we use the automatic digital photogrammetric method described in the second part of the paper. For this we use the PCI Geomatics software. Digital surface models (DOM) are calculated automatically from stereopairs. The self generated software DKA (digital joint analysis) realizes the detection and analysis of the joints in thoses DOM's. The results of the automated photogrammetric joint mapping are of practical use and statistically provable. The problems we knows will be touched. At the end of the paper first results of examples of use are shown.

1 Einführung

Prof. Rüger hat bis 1968 als Direktor des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie an der Bergakademie Freiberg gearbeitet. Sein Forschungskonzept war auf die Anwendung der Photogrammetrie in den an

der Bergakademie Freiberg vertretenen Geo- und Montanwissenschaften ausgerichtet. Mit dem Namen von Prof. Rüger ist die

* Vortrag zum Ehrenkolloquium aus Anlass des 90. Geburtstages von Prof. Dr.-Ing. WERNER RÜGER, TU Dresden 18. 1. 2002

Einführung der Photogrammetrie in den ostdeutschen Braunkohlenbergbau eng verbunden. Auch nach der Berufung von Prof. Rüger an die TU Dresden ist in Freiberg die von ihm eingeschlagene Forschungsrichtung durch seine Schüler weiter verfolgt worden. Auf eine der vielen an der Bergakademie bearbeiteten Sonderanwendungen der Photogrammetrie soll im Folgenden eingegangen werden. Es ist ein Beispiel aus der Gebirgs- und Lagerstättegeometrie, und zwar die photogrammetrische Erfassung der Klüftigkeit des Gebirges.

In dem Beitrag wird gezeigt, dass die photogrammetrische Klufkartierung eine Alternative zur traditionellen Klufkartierung mit dem Geologenkompass darstellt, insbesondere dann, wenn die Gebirgsformationen schwer zugänglich sind. Die dafür konzipierten analytisch – photogrammetrischen Verfahren haben allerdings den Nachteil, dass der Zeitaufwand für die Erfassung der Klüfte an einem Stereokomparator relativ hoch ist. Deshalb wird im zweiten Teil der Arbeit gezeigt, wie durch die Nutzung der digitalen Photogrammetrie die Auswertung der Kluftaufnahmen weitestgehend automatisiert werden kann, und zwar über automatisch generierte digitale Oberflächenmodelle und über Algorithmen zur Erkennung der darin vorhandenen Kluftebenen.

2 Der Gebirgsparameter Klüftigkeit

Bedeutung dieses Gebirgsparameters

Die Klüftigkeit des Gebirgskörpers ist ein entscheidendes Merkmal zur Beurteilung der Standfestigkeit von Böschungen. Sie ist ausschlaggebend für die Gewinnbarkeit der Festgesteine. Sie beeinträchtigt die Qualität abzubauen der Natursteine. Oft ist die Verzerrung an die Ausbildung gewisser Klufscharen gebunden. Sie ist schließlich maßgebend für die Beurteilung der Durchströmungseigenschaften des Gebirgskörpers, die bei vielen Aufgaben untersucht werden müssen, wie z.B. bei der Anlage von Depo-

nien, bei der Ausbreitung von Schadstoffen, bei der Erdöl- und Erdgasgewinnung.

Entstehung der Klüfte

Die bei der Gebirgsbildung wirkenden Kräfte haben die Gesteinskörper deformiert und dabei Falten und Klüfte erzeugt. Trennflächen, Klüfte im Gebirge, sind nach MÖBUS (1989) als Elemente der Bruchtektonik der Ausdruck vorhanden gewesener elastischer Spannungen, die bei Überschreiten der Bruchfestigkeit des Gesteins zur Auslösung gelangten. Dabei konnte die Beanspruchung des Gesteins durch Druck, Zug, Schub, Biegung oder Torsion verursacht worden sein. Dementsprechend ist z.B. zwischen Zerr- und Scherklüften zu unterscheiden. Darüber hinaus können auch schichtbedingte Trennflächen die Ausbildung der Klüfte begünstigt haben.

Der Gebirgskörper setzt sich somit aus Gesteinskörpern zusammen, die durch Diskontinuitäten, wie Klüfte und Trennfläche, voneinander abgegrenzt sind. Dabei ist meist eine gewisse Regelung der Klüfte zu beobachten. Annähernd parallel zueinander verlaufende Klüfte bilden eine so genannte Klufscharen. Je nachdem wie unterschiedlich das Gestein in den verschiedenen Phasen der Gebirgsbildung beansprucht worden ist, unterscheidet sich die Anzahl und Ausrichtung der Klufscharen.

Traditionelle Klufkartierung

In Abb.1 wird eine Felsböschung aus dem Porphyrtagebau Petersberg gezeigt. In dem Messbildausschnitt sind die Klufflächen deutlich zu sehen. Die Klufflächen werden als Ebenen aufgefasst, deren Raumstellung in der traditionellen Arbeitsweise mit dem Geologenkompass gemessen wird. Erfasst werden die Fallrichtungen α_i und Fallwinkel β_i von $i = 1$ bis N Klufflächen aus jedem interessierten Homogenitätsbereich. Dabei sollte der für statistisch gesicherte Angaben notwendige Stichprobenumfang N bei ca. 300 vermessenen Klufflächen liegen.

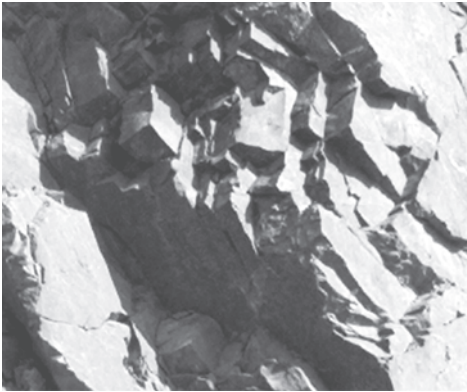


Abb. 1: Festgesteinsböschung im Porphyrtagebau Petersberg, Ausschnitt aus einem Messbild.

In Abb. 2 wird ein Gesteinskörper mit einer nach vorn einfallenden Kluftebene gezeigt. Eine Horizontalebene schneidet die Kluftebene. Die Schnittgerade, eine Höhenlinie, gibt das Streichen der Kluft an. Dazu senkrecht verläuft das Fallen. Das Azimut α der Fallrichtung und der Fallwinkel β , der Winkel zwischen Horizontal- und Kluftebene, definieren die Raumstellung einer Kluft, deren Ortskoordinaten bei der sich anschließenden richtungsstatistischen Auswertung innerhalb eines Homogenitätsbereiches vernachlässigt werden.

Wie in Abb. 2 gezeigt, können die Klüfte unter Beibehaltung ihrer Raumstellung, die der Stellungsvektor \vec{v}_i repräsentiert, im Ho-

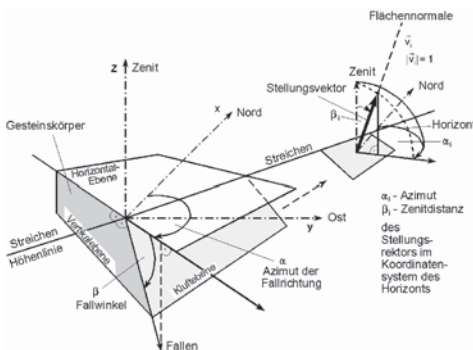


Abb. 2: Streichen und Fallen einer Kluftebene und die Benutzung des Stellungsvektors zur Darstellung ihrer Raumlage.

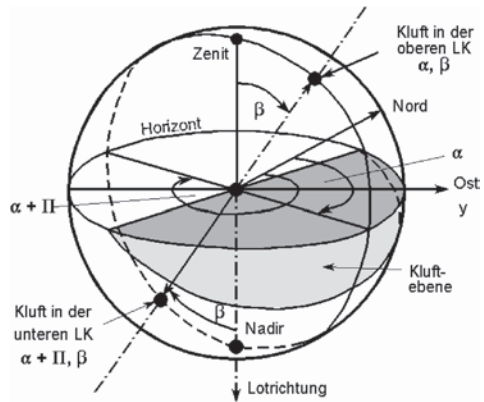


Abb. 3: Flächennormale bzw. oberer und unterer Stellungsvektor einer Kluftebene in der Lagekugel, dem sphärischen Koordinatensystem des Horizonts.

mogenitätsbereich verschoben werden. Der Stellungsvektor ist ein bipolarer Einheitsvektor, der die Richtung der Klufflächennormale angibt. Zur Darstellung der Klüfte benutzt der Geologe die Lagekugel. In der Geodäsie ist sie das sphärische Koordinatensystem des Horizonts (Abb. 3).

Der Stellungsvektor \vec{v}_i wird mit seinem Ansatzpunkt in den Mittelpunkt der Lagekugel verschoben. Die Spitze des Vektors \vec{v}_i gibt die Lage der Kluft i auf der Lagekugel durch einen Punkt an, der auf der oberen Lagekugel die Koordinaten α_i und β_i hat, wobei β_i die Zenitdistanz dieses Punktes ist und α_i sein Azimut. In der unteren Lagekugel, die der Geologe benutzt, hat die Kluft $-\vec{v}_i$ die Koordinaten $\alpha_i + \pi$ und β_i , wobei β_i ihre Nadirdistanz ist.

Richtungsstatistische Auswertung

Bei der geologischen Kluffkartierung bildet der Geologe unter Benutzung des LAMBERTSchen flächentreuen Azimalentwurfs die untere Lagekugel in die Ebene ab (Abb. 4). Die Abbildung heißt in der Geologie SCHMIDTSches Netz und die Kartierung der vermessenen Kluffflächen im SCHMIDTSchen Netz wird als Gefügepunktdiagramm bezeichnet.

Im Folgenden werden aus unseren Untersuchungen derartige Gefügepunktdiagramm-

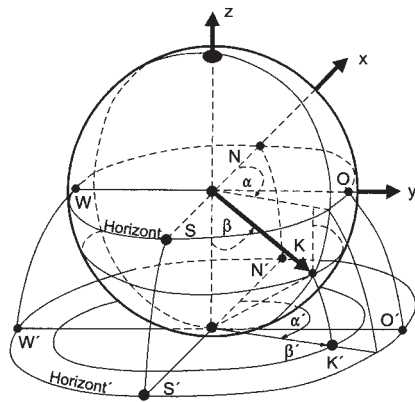


Abb. 4: Flächentreue Abbildung der unteren Lagekugel mit der Kluff K, Erzeugung des Gefügepunktdiagramms im SCHMIDT'schen Netz.

me gezeigt, wie z.B. in Abb. 5 (links) vom Steinbruch Petersberg, der in Abb. 1 zu sehen war.

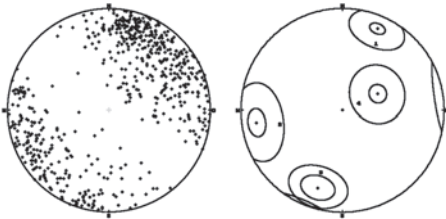


Abb. 5: Gefügepunktdiagramm (links) und daraus abgeleitete Kluffscharen mit ihren Streu- und Konfidenzkegeln (rechts) im SCHMIDT'schen Netz.

Bei der richtungsstatistischen Auswertung werden die vermessenen Klüfte nach Kluffscharen geordnet. Aus den N Klüften einer Schar wird der Regelvektor \vec{R} über die Summe der Stellungsvektoren \vec{v}_i berechnet:

$$\vec{r} = \sum_{i=1}^N \vec{v}_i \tag{1}$$

Wie aus Abb. 6 ersichtlich, zeigt der Regelvektor in die Richtung \vec{r}_i der Achse dieser Schar:

$$\vec{r}_i = \frac{\vec{R}}{R} \quad \text{mit} \quad R = |\vec{R}| \tag{2}$$

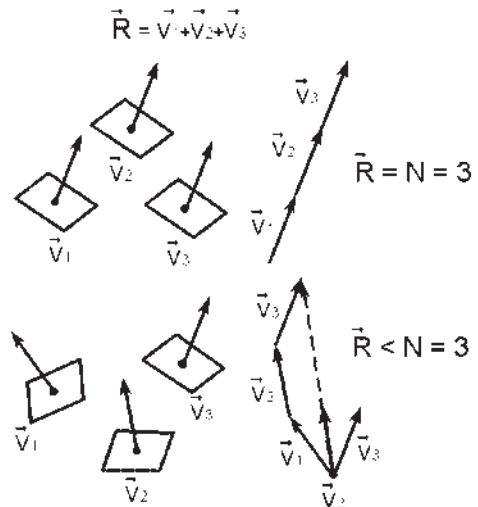


Abb. 6: Regelung der Kluffscharen, oben: strenge Regelung – keine Streuung (Parallelorientierung), unten: schwache Regelung – Streuung der Klüfte innerhalb der Schar.

Darüber hinaus ist sein Betrag R ein Maß für die Regelung der Klüfte in der Schar:

$$[N/2 \leq R \leq N] \tag{3}$$

Bei strenger Regelung, Parallelorientierung der Klüfte, ist R gleich N (Abb. 6) und bei völliger Unordnung (Gleichverteilung über die untere Lagekugel) ist R gleich N/2.

Die Abhängigkeit von N wird beim Vergleich der Regelvektoren als störend empfunden. Deshalb wird (3) in das Intervall

$$[0 \leq RG \leq 1] \tag{4}$$

durch die Transformation

$$\frac{(2R - N)}{N} = RG \tag{5}$$

abgebildet. Die nach (5) aus R und N abgeleitete Vergleichsgröße RG heißt Regelungsgrad. Die komplementäre Größe S ist der Streuungsgrad, der sich aus

$$S = 1 - RG \quad \text{mit} \quad [1 \geq S \geq 0] \tag{6}$$

ergibt.

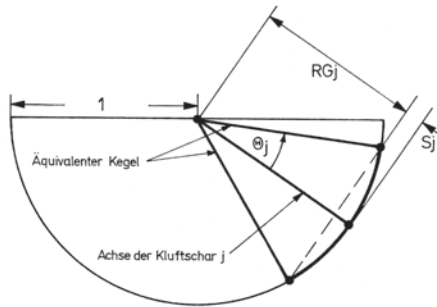


Abb. 7: Vertikalschnitt durch die Lagekugel in Richtung der Achse einer Klufschar j mit der Darstellung des Streukegels.

In Abb. 7 wird der Vertikalschnitt durch die Lagekugel in Richtung der Achse einer Klufschar j gezeigt. Mit der Pfeilhöhe S_j , dem Streuungsgrad der Klüfte dieser Schar, wird eine Kugelkappe abgeschnitten. Die Spur ist ein Kreis, dem der so genannte Streukegel mit dem Öffnungswinkel

$$\Theta_j = \arccos(1 - S_j) \quad (7)$$

zugeordnet ist. Er wird in MENZ (1988) auch als äquivalenter Kegel bezeichnet. Denn wären die Klüfte dieser Schar j unter Beibehaltung des aus den Messungen abgeleiteten Regelungsgrades RG_j zentralsymmetrisch gleichverteilt, dann würden alle Klüfte dieser Schar j innerhalb des Streukegels liegen. Unter der Annahme zentralsymmetrischer Normalverteilung lassen sich darüber hinaus für vorgegebene statistische Sicherheiten (hier z. B. 95 %) die Öffnungswinkel der Konfidenzkegel zur Beurteilung der Genauigkeit der Raumstellung der Achsen der Klufscharen bestimmen.

Die Ergebnisse der richtungsstatistischen Auswertung, die Achsen der festgestellten Klufscharen und ihre zugehörigen Streu- und Konfidenzkreise, werden ebenfalls im SCHMIDTSchen Netz dargestellt. In Abb. 5 (rechts) werden z. B. die Ergebnisse für das in Abb. 5 (links) gezeigte Gefügekpunktdiagramm wiedergegeben. Anhand solcher Darstellungen sollen im Folgenden die photogrammetrischen Auswertergebnisse präsentiert und diskutiert werden. Auf das Ver-

fahren zur Klassifizierung der Klüfte und ihrer richtungsstatistischen Auswertung wird in MENZ (1988) näher eingegangen.

3 Analytisch – photogrammetrische Klufkartierung

Aufgabenstellung

Die direkte Vermessung der Klüfte mit dem Geologenkompass wird dann riskant, wenn die Festgesteinsböschungen schwer zugänglich sind. In solchen Fällen stellt die stereophotogrammetrische Aufnahme der Felswände eine Alternative dar. Bei der analytisch-photogrammetrischen Klufkartierung werden die Stereobilder an einem Stereokomparator ausgemessen. Dabei muss jede interessierende Kluftebene durch mindestens 3 nicht auf einer Geraden liegende Messpunkte erfasst werden.

In einem Computer-Programm werden aus den Bildkoordinaten der Messpunkte ihre Landeskoordinaten in einem nach Nord ausgerichteten System berechnet. Aus diesem Grund muss bei den Stereoaufnahmen auch das Azimut der Aufnahmeachsen mit einer Bussole bestimmt werden. Durch die im Landeskoordinatensystem vorliegenden Messpunkte jeder Klufte wird eine ausgleichende Ebene gelegt und deren Stellungsvektor bestimmt (MARTIENBEN 1994). Anhand dieser Stellungsvektoren wird das Gefügekpunktdiagramm der vermessenen Klüfte erzeugt und nach MENZ (1988) richtungsstatistisch ausgewertet.

Genauigkeit und Messaufwand

Kurz nach dem Weggang von Prof. Rüger, der die Tür für die folgende Anwendung der Photogrammetrie geöffnet hat, wurde im Jahre 1969 an der Bergakademie Freiberg die erste photogrammetrische Kluftaufnahme durchgeführt, und zwar die Aufnahme des Bastei-Massivs bei Rathen. Die Aufnahme wurde für ein geologisches Standsicherheitsgutachten gebraucht.

Die Abb. 8 zeigt in einem Messbild das Basteimassiv. Die vermessenen Klüfte sind durch weiße Punkte markiert und die aus-



Abb. 8: Elbseitige Ansicht des Basteimassivs in der Sächsischen Schweiz, Messbild mit Markierung der vermessenen Klüfte, Profil- und Höhenlinien.

gewerteten Höhen- und Profillinien perspektivisch eingezeichnet worden (MENZ & HEISE 1970).

Die richtungsstatistische Auswertung im SCHMIDT'schen Netz zeigt eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse aus Photogrammetrie und Kompassmessung, die im oberen zugänglichen Bereich möglich war (Abb. 9). Das bestätigte die Brauchbarkeit der Methode, die bereits in LINKWITZ (1963) empfohlen und danach u. a. in ADLER (1969), ADLER et al. (1972) und KLEINSTÄUBER (1977) erfolgreich angewandt worden ist. Nach diesen und unseren weiterführenden Untersuchungen können bei der analytisch-photogrammetrischen Klufkartierung die Genauigkeiten der Kompassmessung erreicht werden.

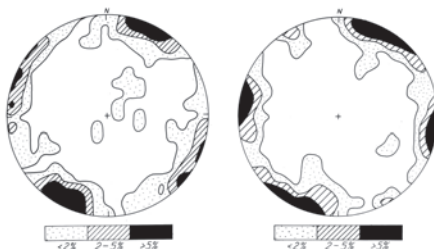


Abb. 9: Gegenüberstellung der Auswertergebnisse vom Basteimassiv, links – photogrammetrische Bestimmung und rechts – Kompassmessung.

In den von uns erstellten Programmen zur analytisch-photogrammetrischen Klufkartierung werden in Abhängigkeit von der Form und Größe der vermessenen Klufflächen Genauigkeitsmaße berechnet, über welche die Genauigkeit der richtungsstatistischen Auswertung gesteuert werden kann. Außerdem liefern die Programme im Rahmen der richtungsstatistischen Auswertung auch Angaben zur Kluffkörpergrößenverteilung und zum mittleren Kluffkörper (MENZ (1988). Kluffkörper sind Gesteinskörper, in die z. B. das Festgestein bei der sprengtechnischen Gewinnung zerfällt.

Bei der Bewertung der analytisch-photogrammetrischen Auswertverfahren tritt der relativ hohe Zeitaufwand für die Vermessung der Klüfte am Stereokomparator als ein entscheidender Nachteil auf. Aus diesem Grund wurde nach Möglichkeiten zur Reduzierung dieses Arbeitsaufwandes gesucht und ein Konzept zur weiteren Automatisierung des Verfahrens entwickelt, das Gegenstand der folgenden Ausführungen sein soll.

4 Digitale photogrammetrische Klufkartierung

Konzept zur weiteren Automatisierung der photogrammetrischen Klufkartierung

Das von uns verfolgte Konzept nutzt die Möglichkeiten der digitalen Photogrammetrie. Softwarepakete zur Luftbildauswertung wie beispielsweise PHODIS, ERDAS, EASI/PACE und digitale photogrammetrische Workstation verfügen über Module zur automatischen Generierung digitaler Höhenmodelle (DHM). An unserem Institut steht das Programmsystem GEOMATICA von der kanadischen Firma PCI zur Verfügung, das für die DHM-Generierung die Software APEX bereitstellt.

APEX ist eine PC-Version der von Helava für digitale photogrammetrische Workstation entwickelten Software SOCET SET. Es ist ein leistungsfähiges Instrument zur automatischen Ableitung digitaler Höhenmodelle aus Luftbildern.

Durch die Anschaffung dieser Software waren für die weitere Automatisierung der photogrammetrischen Klüftkartierung günstige Voraussetzungen gegeben. Deshalb entstand die Idee, in weiterführenden Forschungsarbeiten die drei grundlegenden Fragestellungen zu untersuchen.

1. Kann die für die Aerophotogrammetrie konzipierte Software APEX auch zur automatischen Ableitung brauchbarer digitaler Oberflächenmodelle (DOM) in der terrestrischen Stereophotogrammetrie eingesetzt werden, und zwar dann, wenn die Aufnahmeobjekte Felsböschungen sind?

2. Wenn ja, können Algorithmen und Verfahren zur automatischen Wiedererkennung und Auswertung der Klüftflächen in den DOM entwickelt werden, die brauchbare Daten für die richtungsstatistische Auswertung mit den bereits von uns entwickelten Programmen liefern?

3. Wie kann die Klüftflächenerkennung in den DOM durch weitere Varianten zur Auswertung der Grauwertinformationen noch verbessert werden?

In Voruntersuchungen konnte festgestellt werden, dass sich mit APEX brauchbare DOM von Felsböschungen aus Festgesteinstagebauten ableiten lassen. Die Untersuchungen wurden auf der Basis von bereits vorhandenen Stereobildern durchgeführt, die mit dem Phototheodolit 19/1813 von Zeiss JENA in Normal- oder Schwenkungsfall aufgenommen worden waren. Die positive Beantwortung der 1. Frage war der erste Schritt zur weiteren Automatisierung der photogrammetrischen Klüftkartierung.

Die Beantwortung der 2. Frage, ob sich die Klüfte in den DOM wiedererkennen und auswerten lassen, war unter anderem Gegenstand der Untersuchungen in dem DFG geförderten Forschungsprojekt DFG II D2-Me 1111/3-2, in dem NGUYEN, VAN DIEN diese Fragestellung bearbeitet hat und in dem auch die 3. Frage nach weiteren Varianten zur Auswertung der Grauwertinformation mit beantwortet werden sollte. Der Abschlussbericht zu dieser Forschung wurde im März 2001 an die DFG übergeben. Über die Ergebnisse dieser Forschung soll im Folgenden berichtet werden.

5 Ergebnisse der durchgeführten Forschungsarbeiten

Zur Ableitung digitaler Oberflächenmodelle (DOM)

Nach ZHANG & MILLER (1997) sind Verfahren zur adaptiven automatischen Gelände-Extraktion (AATE) entwickelt worden, die die Informationen aus allen im Überdeckungsbereich liegenden Bildern und Spektralbereichen nutzen können. In Verbindung mit einem wissensbasierten Regelsystem werden über merkmalsorientierte Methoden homologe Bereiche gesucht, in denen über intensitätsbasierte Verfahren (Bildkorrelation, kombiniert mit MKQ-Matching) schließlich die optimale Zuordnung gefunden wird. Die Nutzung dieses Methodenspektrums wird über Strategie-Files gesteuert, auf die der Anwender Einfluss nehmen kann. In unseren Voruntersuchungen zur automatisierten Ableitung der DOM wurden bisher nur die in APEX vordefinierten Strategien genutzt.

Bei der Durchführung der Steinbruchaufnahmen müssen die von APEX geforderten Bedingungen, die sonst für die Orientierung der Luftbilder über Bündelblockausgleichung notwendig sind, entsprechend nachgestellt werden. Über die Aufnahmedisposition kann die Genauigkeit der aus den Stereobildern abgeleiteten DOM gesteuert werden.

Für Genauigkeitsvoranschläge wird die Parallaxenmessgenauigkeit benötigt, die APEX bei der automatischen Bildzuordnung der vorliegenden Aufnahmeobjekte erreichen kann. Nach unseren Untersuchungen liegt diese Genauigkeit bei $\pm 0,02$ mm oder $\pm 1,4$ Pixel. Das bedeutet, dass eine Kluft von ca. 0,4 m Ausdehnung in der Aufnahmeentfernung von 30 m beim Basisverhältnis 1 : 5 mit einer Genauigkeit $d\gamma = \pm 3^\circ$ erfasst werden kann, wobei $d\gamma$ der Öffnungswinkel des Streukegels des Stellungsvektors ist. Diese Genauigkeit ist für richtungsstatistische Auswertungen völlig ausreichend.

Für die Ermittlung der Parallaxenmessgenauigkeit sind Kontrollmessungen herange-

zogen worden. Sie wird durch viele Faktoren beeinflusst, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll. Der oben angegebene Wert ist im Mittel erreichbar.

Zur digitalen Klufftauswertung (DKA)

Im Rahmen der von der DFG geförderten Forschungsarbeit wurde die Software DKA entwickelt, welche die im DOM abgebildeten Klüfte wiedererkennen und auswerten kann. Dabei wird angenommen, dass die Klüfte Ebenen sind. Die Aufgabe bestand deshalb darin, Algorithmen zur Anpassung von Ebenen an die Punkte des DOM zu entwickeln.

Der in NGUYEN (2001) implementierte Algorithmus zur Ebenenerkennung arbeitet mit digitalen Bildern. Die Maschen des x , y Rasters vom DOM sind die Pixel des digitalen Bildes, denen ganzzahlige z -Werte aus dem Intervall $[0,255]$ durch Digitalisierung der in APEX abgeleiteten reellen z -Werte zugeordnet werden. Dabei ist die Wahl des Digitalisierungselementes dz eine wichtige Stellgröße, wie gleich noch gezeigt wird.

Zur Ebenenerkennung werden im Wesentlichen die ersten beiden partiellen Ableitungen von z nach x und y benutzt, d. h. Informationen über das Anstiegs- und Krümmungsverhalten in den Zeilen und Spalten der digitalen Bilder. Vereinfacht gesprochen, arbeitet der Algorithmus mit einer planparallelen Scheibe, deren maximal zulässige Dicke dz_{\max} vorgegeben werden muss. Die Scheibe kann über zwei Rotationen und drei Translationen im Raum gedreht und verschoben werden, so dass sie sich damit in jede gewünschte Raumstellung bewegen lässt. Innerhalb dieser Scheibe müssen stets alle Punkte einer vom Programm erkannten Kluft liegen. Die Kluftflächengrenze in der Zeile bzw. Spalte ist erreicht, sobald der erste Punkt außerhalb der Scheibe angetroffen wird.

In Abb. 10 wird in einem nach X ausgerichteten Vertikalschnitt gezeigt, wie die Klufftebenen mit einer planparallelen Scheibe der angepassten Dicke dz festgestellt werden können. In den X - bzw. Y -Schnitten ist die Scheibe dabei nur als Streifen zu sehen.

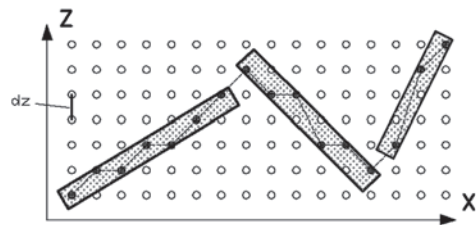


Abb. 10: Klufftebenenerkennung im DOM mit Hilfe einer planparallelen Scheibe der Dicke dz (X -Schnitt).

Die Lage einer mit der Scheibe festgestellten Kluftfläche wird durch die Raumstellung der in Scheibenmitte liegenden Parallelebene ausgewiesen. Man erkennt, dass damit $dz/2$ gleichzeitig ein Maß für die Genauigkeit der Ebenenerkennung ist, wobei die Bedingung:

$$dz < dz_{\max} \quad (8)$$

eingehalten wird. In der praktischen Arbeit muss deshalb bei der Vorgabe des Digitalisierungsintervalls dz_{\max} berücksichtigt werden,

1. mit welcher Genauigkeit S_z die Aufnahmeentfernungen Z in APEX ermittelt werden können und
2. wie groß die Abweichung der Klüfte von der Ebenengestalt ist.

Mit S_z wird die Standardabweichung der Z -Werte bezeichnet, die sich aus der oben genannten Parallaxenmessgenauigkeit ergibt. Der Algorithmus zur Klufftebenenerkennung mit Hilfe einer planparallelen Scheibe sucht die Polyederanpassung an das DOM mit der minimalen Anzahl von Klufftebenen. Das heißt, in den Zeilen und Spalten wird jeweils diejenige Polygonanpassung als die Beste angesehen, die über die Bestimmung maximal großer Teilebenen (Klüfte) ermittelt worden ist. Bei der Auswahl der Klufftebenen in den Zeilen und Spalten des DOM wird mit dem Streifenoperator minimaler Dicke dz gearbeitet, der die Bedingung (8) erfüllt. Zu Beginn der Klassifizierung wird ein Algorithmus abgearbeitet, in dem die zur Bezugsebene des DOM steil

oder senkrecht stehenden Klüfte unter Vorgabe einer Steilanstiegsschwelle erkannt und ausgewählt werden.

6 Auswertebeispiele

Fallstudie Berbersdorf

Die ersten Versuchsauswertungen nach dem neuen Verfahren wurden im Steinbruch Berbersdorf durchgeführt. Die Abb. 11 zeigt einen Ausschnitt aus einem Messbild vom Biotit/Granit Steinbruch Berbersdorf.



Abb. 11: Ausschnitt aus einem Messbild vom Biotit/Granit Steinbruch Berbersdorf.

In Abb.12 sind die Gefügekpunktdiagramme (links) zu sehen, die aus der automatischen DOM-Generierung und DKA-Auswertung hervorgegangen sind. Rechts wird die zugehörige richtungsstatistische Auswertung gezeigt, die zu den Ergebnissen

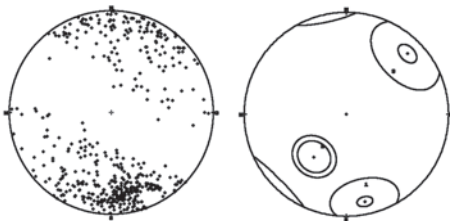


Abb. 12: Gefügekpunktdiagramm (links) und Richtungsstatistik (rechts) für Biotit/Granit im Steinbruch Berbersdorf, Ergebnisse der automatisierten digitalen photogrammetrischen Klüftkartierung.

der analytisch-photogrammetrischen Klüftkartierung passt.

Fallstudie Hertie-Kaufhaus Dresden

Als ein von der Geometrie her ideales Testobjekt sollte die Fassade des Hertie Kaufhauses Dresden dienen (Abb. 13). Die im all-

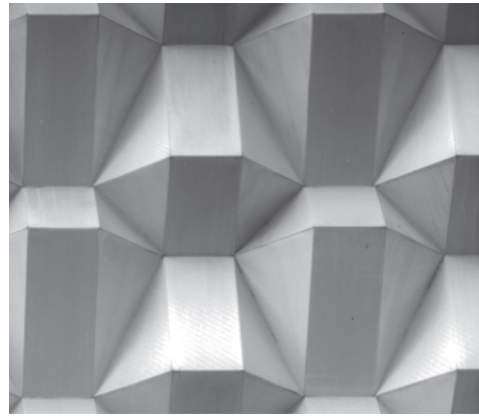


Abb. 13: Fassade des Hertie Kaufhauses Dresden, die als ein Testobjekt für die DKA-Erkennung genutzt worden ist.

gemeinen an Felsböschungen vorhandene Textur auf der Gesteinsoberfläche fehlt in diesem Beispiel. Dadurch bedingt, kam es bei der automatischen DOM-Generierung zu Ausreißern, die eliminiert werden mussten. In Abb. 14 werden (links) die Ergebnisse der Stecometerauswertung und (rechts) die aus der DOM-Generierung mit DKA-Auswertung gezeigt. Die Übereinstimmung der

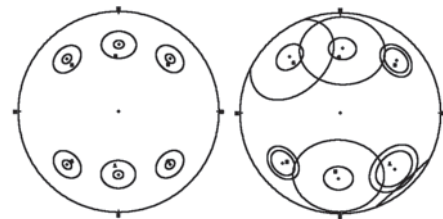


Abb. 14: Gegenüberstellung der richtungsstatistischen Auswertung aus der manuellen Stecometermessung (links) und aus der DOM-Generierung mit DKA-Klüfterkennung (rechts).

richtungsstatistischen Auswertergebnisse spricht für die Brauchbarkeit des DKA-Programmes, dass an analytisch abgeleiteten und mit Störgrößen verfälschten DOMs von geometrisch bekannten Polyederflächen getestet worden ist.

7 Aufgaben für weiterführende Forschungsarbeiten

In weiterführenden Forschungsarbeiten soll der Einsatz digitaler Kameras für die Aufnahme der Gebirgsformation untersucht werden.

Es soll festgestellt werden, ob sich durch die Erhöhung der Anzahl der Aufnahmen und durch die Auswertung mehrerer Spektralbereiche die Qualität der DOM verbessern lässt. Nutzerdefinierte Strategie-Files sind zu konzipieren.

Wenn ein Gebirgskörper durch Stereoaufnahmen aus den drei um 90° versetzten Koordinatenrichtungen aufgenommen werden kann, können an Hand der den drei Koordinatenrichtungen zugeordneten DOM alle vertretenen Kluftrichtungen statistisch gleichwertig erfasst werden. Es soll gezeigt werden, wie durch Stereoaufnahmen aus unterschiedlichen Richtungen die Genauigkeit erhöht werden kann.

Im Zusammenhang mit der Auswertung der DOM durch das DKA-Programm sind weiterführende Untersuchungen zur richtigen Auswahl der Stellgrößen durchzuführen. An der gleichwertigen Erfassung der in Aufnahme richtung streichenden Klüfte muss weiter gearbeitet werden. Bei der DKA-Klufterkennung fallen die Ergebnisse unterschiedlich aus je nachdem, ob die Erkennung mit Zeilen- oder Spaltenpriorität durchgeführt worden ist.

Zur DKA-Erkennung der Klüfte aus Grauwerten kann zunächst der gleiche Algorithmus benutzt werden, allerdings mit einer stets horizontal gelagerten „Scheibe“, deren Dicke dz nun das Digitalisierungsintervall dg der Grauwerte ist, das wieder variiert werden kann. Auch hier ergeben sich Unterschiede in Abhängigkeit von der Klassifizierung nach x oder y .

Zur richtungsstatistischen Auswertung sollen nur die Kluftflächen herangezogen werden, die in allen Klassifizierungsvarianten erkannt worden sind und eine bestimmte Größe haben.

Die Verfahren zur automatisierten Erkennung der Korngrößen- und Kornformenverteilung von Haufwerk, die aufbauend auf MENZ & OHSER (1988) abgeleitet worden sind, können auch zur Erkennung der Kluftkörpergrößen- und -formenverteilung des Festgesteins eingesetzt werden. Sie bieten sich zur Identifikation der in Aufnahme richtung streichenden Klüfte an und sollen zum weiteren Ausbau des Verfahrens herangezogen werden.

Literatur

- ADLER, R. E., 1969: Moderne Daten- und Informationsgewinnung und -verarbeitung in der Tektonik. – Zentralblatt für Geologie und Paläontologie. Teil I, **1969** (6): 1053–1079.
- ADLER, R. E., BODECHTEL, J. & HAYDN, R., 1972: Automation der photogeologisch-tektonischen Datenbearbeitung und -auswertung. – Bildmessung u. Luftbildwesen, **40** (4): 194–197.
- KLEINSTÄUBER, G., 1977: Photogrammetrisch-geologische Verfahren zur Kluftmessung an Felswänden und zur Analyse gesprengter Felsmassen. – Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, **26** (6): 1271–1276.
- LINKWITZ, K., 1963: Terrestrisch-photogrammetrische Kluftkartierung. – Felsmechanik und Ingenieur-Geologie, **28** (3): 152–159.
- MARTIENßEN, T., 1994: Entwicklung und Anwendung eines Verfahrens zur Bestimmung einer ausgleichenden Ebene. – Das Marscheidewesen, **101** (1): 5–9.
- MENZ, J., 1988: Photogeologische Strukturanalyse, ein BASIC-Programmsystem für Bürocomputer. – Zeitschrift für angewandte Geologie, **34** (1): 19–23.
- MENZ, J. & HEISE, G., 1970: Photogeologische Aufnahme des Basteigebietes westlich von Niederrathen. – Bergakademie, **22** (12): 709–713.
- MENZ, J. & OHSER, J., 1988: Rationelle Haufwerkanalyse durch digitale Bildverarbeitung. – Zeitschrift für angewandte Geologie, **34** (1): 24–26.
- MÖBUS, G., 1989: Tektonik. – 1. Aufl., 472 S., Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.

NGUYEN, V., 2001: Kluftanalyse durch digitale Bildverarbeitung. – Forschungsbericht DFG II D2-Me 1111/3-2, 18 S., TU Bergakademie Freiberg.

ZHANG, B. & MILLER, S., 1997: Adaptive Automatic Terrain Extraction. – In: MC KEOWN, D.M. & MCGLONE, J.CH. (ed): Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision. – III. SPIE Proceedings, **3072**: 27–36.

Anschrift der Autoren:

Prof. Dr.-Ing. JOACHIM MENZ,
Dipl.-Ing. THOMAS MARTIENBEN,
Dipl.-Math. VAN DIEN NGYUEN,
TU Bergakademie Freiberg,
Institut für Markscheidewesen und Geodäsie,
Agricolastr. 1, D-09599 Freiberg
e-mail: Joachim.Menz@mabb.tu-freiberg.de
Thomas.Martienssen@mabb.tu-freiberg.de
nvandien@yahoo.de

Manuskript eingereicht: Mai 2002

Angenommen: Mai 2002