

# DIE GEFÜGEKUNDE DER GEOWISSENSCHAFTEN – EINE FÜR DIE ARCHÄOMETRIE NEUE METHODE

Johann Georg Haditsch, Graz

Die Archäometrie bedient sich bis heute für die Materialanalyse und für die Lösung verarbeitungstechnischer Fragen nahezu ausschließlich chemischer, physikalischer, mineralogischer und metallurgischer Methoden. Für die Klärung verarbeitungstechnischer Fragen, sowie zur Klärung der Herkunft von mineralischen Werkstoffen kann aber auch eine in den Geowissenschaften schon seit langem mit großem Erfolg eingesetzte Methode herangezogen werden: die Gefügekunde.

Diese Methode, grundsätzlich für Gefüge jeglicher Art konzipiert, wurde im Jahr 1925 durch den zeitweilig auch an der Leobener Hohen Schule tätig gewesen W. SCHMIDT für die Geowissenschaften geschaffen und hierauf durch B. SANDER (Innsbruck) und seine Schüler weiterentwickelt. Heute ist die Gefügekunde ein unverzichtbares Werkzeug jedes Geowissenschaftlers. Der Geologe wendet sie hauptsächlich bei Aufgaben im megaskopischen Bereich an, der Mineraloge oder Petrograph bei solchen im mikroskopischen. Im Nachstehenden sollen an den Beispielen einer vor- oder frühgeschichtlichen Gesteinsbearbeitung und einer Untersuchung neuerzeitlicher Ziegel die Einsatzmöglichkeiten der gefügekundlichen Methodik im Mega- bzw. Mikrobereich gezeigt werden (W. SCHMIDT 1925, B. SANDER 1930, 1948/1950).

Wenngleich die Gefügekunde bisher schon viele wertvolle Beiträge zum Verständnis (auch des technischen) Gesteinsverhaltens liefern konnte, so blieb sie doch außerhalb der Geowissenschaften bisher noch weitgehend unbekannt. Daher erscheint es hier angebracht, diese Methode und ihre Vorzüge gegenüber anderen Gesteinsklassifikationen, gerade auch bei ihrer Anwendung in der Archäometrie, kurz zu beschreiben.

Jede technische Tätigkeit setzt eine gründliche Materialkenntnis voraus. Auch Gesteinsarbeiten können umso werkstoffgerechter, funktionstüchtiger, haltbarer und ästhetisch befriedigender ausgeführt werden, je besser die Eigenschaften des zu bearbeitenden Gesteins, z.B. seine Festigkeitsquasiisotropie, bekannt sind (denn es gibt in Gesteinen, über den Millimeterbereich hinausgehend, keine Isotropie). Die alten Künstler hatten eine auf Erfahrung beruhende bessere Beziehung zum für Bildhauerarbeiten günstigen Verhalten quasi-isotroper, d.h. nur mäßig geregelter, Gesteine. Wie anders als so wäre es erklärlich, weshalb beispielsweise Michelangelo für seine Pietà ausgerechnet den wenig geregelten „Statuario“ einem besser geregelten Carrara-Marmor vorzog, oder weshalb die Kanzel des Wiener Stephansdomes (in den Jahren 1510-1515) aus dem nahezu unregelmalten und relativ seltenen Breitenbrunner Foraminiferensandstein gehauen wurde?

Um die Eigenschaften von Gesteinen zu charakterisieren, gibt es mehrere Möglichkeiten einer Gliede-

rung. Der selbst heute noch meist verfolgte Weg ist der nach dem Mineralbestand und der Genese. Dem entsprechend kann man zwischen den verschiedenen primären, sedimentären und metamorphen Gesteinen unterscheiden. Eine weitere Möglichkeit der Gesteinsgliederung, die besonders von Stratigraphen bevorzugt wird, ist die altersmäßige.

Schon sehr bald stellte sich aber heraus, daß mineralogisch-petrographische oder stratigraphische Klassifikationen kein genaues und vollständiges, für technische Zwecke brauchbares Bild eines Gesteines wiederzugeben vermögen, daß vielmehr für eine Typisierung besonders das Flächeninventar als wesentliches Merkmal hinzugenommen werden muß, da die meisten Gebirgseigenschaften durch die Schichtung, die Schieferung und die Zerklüftung bedingt sind. Vor allem die Art, die Orientierung, die Klüftungsweite und die Häufigkeit der Fugen bestimmen viele Gesteinseigenschaften.

Einen ersten Versuch einer tektonischen Gliederung (nach Schichtung, Schieferung und Klüftung) lieferte H. CLOOS. Seine Gliederung und jüngere petrographisch-tektonische Klassifikationsarten waren solange dominant, solange nicht technisch-geologische Probleme (etwa des Straßen-, Tunnel- und Talsperrenbaues) erhöhte Anforderungen an die Genauigkeit geologischer Voraussagen stellten. Bei derartigen technischen Fragestellungen machte man nämlich bald die Erfahrung, daß in vielen Fällen, z.B. durch Umkristallisation, der ursprünglichen Schichtung oder Schieferung gegenüber der Klüftung eine geringere Bedeutung zukommt. Dies bedeutet, daß, vom technischen Standpunkt aus, neben den Klüften nur jene Schicht- und Schieferungsflächen interessant sind, an denen der mechanische Zusammenhalt aufgehoben wurde, die also auch heute noch durch eine mechanische Deformation aktiviert werden können (H. CLOOS 1936).

In Konsequenz des hier Gesagten schlug J. STINI für eine nutzbringende technische Gesteinsbeschreibung neben der schon durch H. CLOOS und seine Schule dafür herangezogenen Raumstellung der Klüfte auch die Dichte des Klüftnetzes, die räumliche Erstreckung der Klüfte, den Durchtrennungsgrad, die Öffnungsweite, eine eventuelle Füllung der Klüfte und die Beschaffenheit der Klüftwände vor (H. CLOOS 1936, J. STINI 1950).

Die Dichte des Klüftnetzes (ausgedrückt als sogenannte Klüftigkeitsziffer) bezeichnet den Grad der Gesteinszerlegung. Diese und der Durchtrennungsgrad des Klüftnetzes bestimmen eine sehr wesentliche Eigenschaft eines Gesteins, nämlich seine Thixotropie.

Die Öffnungsweite der Klüfte und ihre statistische Erfassung ermöglichen den Nachweis der Hauptdehnungsachse, nach der die betreffenden Klüfte entstanden, und eine Klassifikation der Klüfte nach Reiß- und Preßfugen.

Die Natur der Kluffüllung bestimmt die Beweglichkeit des Gebirges längs der Fugen, also, wie B. SANDER es formulierte, die Teilbeweglichkeit. Besonders Füllungen mit einem gleitfähigen Material, beispielsweise mit Serizit oder Talk oder tonigem Letten oder mit anderen Bestegen, haben eine sehr hohe mechanische Bedeutung und verdienen daher das besondere Augenmerk jedes geotechnisch Interessierten.

Die Oberflächenbeschaffenheit der Klüfte ist im Hinblick auf die mechanische Wirksamkeit der Fugen ohne weitere Erläuterung als wesentliches Gesteinsmerkmal evident.

Die guten Erfahrungen mit diesem Klassifikationschema J. STINT's haben die älteren mineralogisch-petrographischen Gesteinsgliederungen, besonders im technischen Bereich, nach und nach verdrängt, doch muß dabei bedacht werden, daß, wenngleich nicht bestritten werden kann, daß beispielsweise verschiedene Sedimentationsbedingungen (wie Anlagephasen, Abtragungen, Faziesänderungen) besondere Raumgefüge mit speziellen mechanischen Eigenschaften schaffen können, es doch auch der Mineralbestand sein kann, der richtungsabhängige Änderungen der Gebirgseigenschaften, d.h. eine Anisotropie, hervorrufen kann. So besitzen oft Gefüge aus isometrischen Körnern ohne eine ausgesprochene Bankung (wie z.B. Aplite oder gewisse Marmore) oder auch Gesteine mit megaskopisch nicht erfaßbaren heterometrischen Körnern (wie z.B. manche Granite) eine diskrete Anisotropie, z.B. eine Festigkeitsanisotropie, die durchaus auch einem megaskopisch erfaßbaren geregelten Korngefüge entsprechen kann. Diese Anisotropie ist demnach in erster Linie nicht vom flächigen, sondern vom Korngefüge und damit von mineralogisch-petrographischen Gegebenheiten abhängig.

Aus dem Gesagten kann unschwer entnommen werden, daß für technisch brauchbare Gesteinsklassifikationen, je nach der konkreten Aufgabenstellung, das eine Mal eine mineralogisch-petrographische Typisierung, das andere Mal eine tektonisch-gefügekundliche und im dritten Fall eine Kombination beider Gliederungsmöglichkeiten angeraten sein kann.

Einen weiteren Fortschritt erbrachte die statistische Betrachtungsweise des linearen und flächigen Gefüges, ist es doch gerade dieses, das - wie schon früher dargelegt - einem Gesteinskörper in den verschiedenen Richtungen des Raumes eine unterschiedliche Teilbeweglichkeit (Bewegungsfreiheit) verleihen kann.

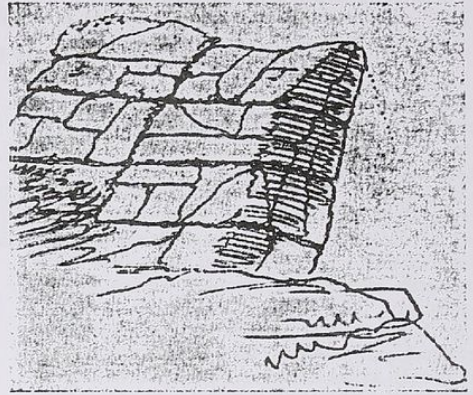


Abb. 1: J.W.v.GOETHE: Felszeichnung

Es fiel schon J.W.v.GOETHE auf, daß Trennfugen immer in gesetzmäßiger Weise in bestimmten Richtungen auftreten und daß die Klüfte auch meist das Gestein nach einer bestimmten rhythmischen Ordnung durchziehen, subparallele Scharen bilden (Abb. 1). Dies bedeutet, daß die Kluftrichtungen meist innerhalb sehr enger Grenzen streuen, was wieder die Möglichkeit bietet, dieses naturgesetzliche Prinzip als Grundlage für gefügekundliche und statistische Untersuchungen zu nutzen.

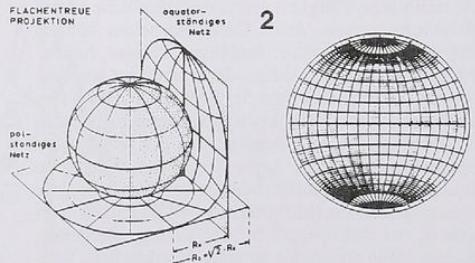


Abb. 2: Flächentreue Projektion nach LAMBERT und äquatorständiges (SCHMIDT'sches) Netz. Nach G. BRAUN 1966.

Die Gefügekunde, wie schon gesagt: durch W.SCHMIDT und B.SANDER entwickelt, hat die Aufgabe die Raumdaten (Gefügedaten) eines geologischen Körpers möglichst vollständig zu erfassen, sie in der sogenannten Gefügestatistik zu verwerten und in der Gefügeanalyse in Teilbewegungen aufzugliedern und auf diese Weise ein vollständiges Bewegungsbild zu konstruieren. So ist die moderne Gefügekunde eine Beschreibung tektonischer Daten mit Hilfe der Geometrie; sie setzt an die Stelle mehr oder weniger unübersichtlicher und subjektiver Eindrücke die objektive und übersichtlichste Darstellung von Ortslage und Verteilung aller Gefügedaten.

Es ist der unschätzbare Wert dieser Untersuchungsmethode, daß sie den mit ihr Arbeitenden in die Lage versetzt räumliche Erscheinungen und Zusammenhänge, wie es beispielsweise Bruch- und Bewegungsbilder sind, nur zu beschreiben, ohne diese Bilder auch, wie das sonst häufig geschieht, zu deuten. Für den Techniker ist diese Methode auch deshalb besonders wertvoll, weil ihre Ermittlungen nachvollziehbar und ihre Ergebnisse überprüfbar sind, da ja an die Stelle subjektiver, qualitativer Beschreibungen quantitative Angaben treten.

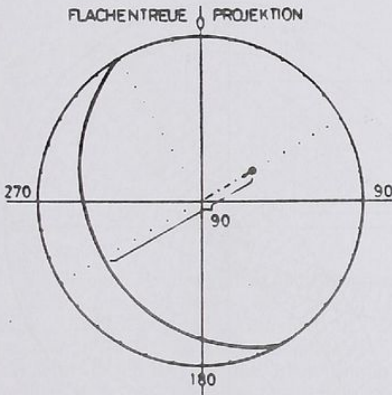


Abb. 3: Flächentreue (LAMBERT'sche) Lagenkugelprojektion mit einer als Großkreis und Polpunkt eingetragenen Fläche. Nach G. BRAUN 1966.

Das Produkt einer bruchlosen oder bruchhaften bleibenden tektonischen Verformung wird durch die Summe seiner flächigen und linearen Merkmale (Fugen, Rupturen, s-Flächen bzw. Achsen, Lineare) definiert. Die Gefügestatistik erfaßt diese Merkmale (Gefügeelemente) und stellt sie, meistens in einer Häufigkeitsverteilung, dar. Dabei hat sich gegenüber anderen Darstellungsweisen (Histogrammen, Kluftrosen u.dgl.) die mittels der Lagenkugel bzw. ihrer ebenen, äquatorständigen und flächentreuen Azimutalprojektion, also mittels des SCHMIDT'schen Netzes (Abb. 2), durchgesetzt.

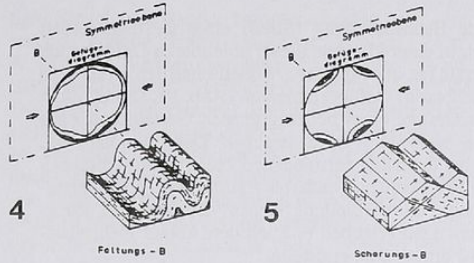


Abb. 4, 5: Biege- und Scherfaltenachsen (B) und dazugehörige Gefügediagramme. Nach F.KARL & G. BRAUN 1968.

Aus den in dieses Netz in Form von Durchstoßpunkten linearer Elemente oder in der von Flächenpolpunkten (Abb. 3) eingetragenen Gefügedaten werden mit Hilfe verschieden geformter Auszählflächen Dichtewerte (Häufigkeitswerte) ermittelt, deren Verteilung durch Linien gleicher Dichte (Häufigkeit) anschaulich dargestellt werden kann. Die solcherart erhaltenen Gefügediagramme lassen die für jede Art der Verformung charakteristische Dichteverteilung leicht erkennen (Abb. 4,5), besser als Punktwolken die Symmetrie der Verteilung erschließen und damit auch den Verformungsplan ermitteln (Abb. 6-8).

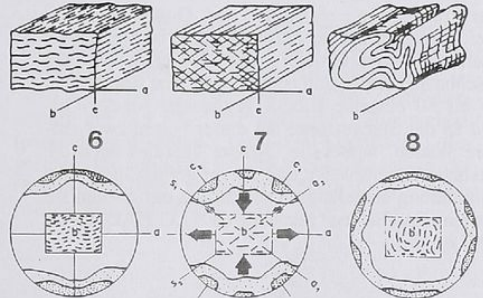


Abb. 6-8: Faltengefüge und entsprechende Gefügediagramme mit Angabe des Deformationsplanes im Koordinatenkreuz a,b,c. Nach G. BRAUN 1972.

Die Kombination der Symmetrieelemente des Gefüges, wie beispielsweise der Symmetrieachsen und -ebenen, führte, ähnlich wie in der Mineralogie, zu einzelnen Symmetrieklassen und -systemen. Zusätzlich zu den aus der Kristallographie schon bekannten rhombischen, monoklinen und triklinen Symmetriestystemen kommen in der Gefügekunde noch das achsiale, das triklin-achsiale und das sphärische System. Wenngleich also geologische Körper jeder Größenordnung hinsichtlich der Orientierung und Anordnung der realen oder ideellen, flächigen und linearen Gefügeelemente (Raumdaten) sehr komplex aufgebaut sein können, so bestehen sie doch aus Formelementen, die symmetrologisch eindeutig aufeinander bezogen sind.

Jede Beanspruchung (Streß) eines Gesteins äußert sich in einer klar von dieser ableitbaren Deformation (Strain) in der Form von wissenschaftlich erfassbaren (meßbaren) Gefügeelementen (Abb. 9). Damit bildet das Gefüge eines beliebig großen Gesteinsbereiches alle bleibenden mechanischen Deformationen ab, wobei die dabei entstandenen Trennflächen symmetrisch auch mit anderen Raumdaten (z.B. Faltenachsen) in Verbindung stehen. Konstruktive Rückformungen erlauben es auch den Ablauf mehrphasiger Formakte zu ermitteln.

Diese enge Beziehung zwischen Deformation(en) und Gefügebild(ern) ermöglicht es natürlich entstandene Flächen von künstlich geschaffenen zu unterscheiden; damit ist auch eine Nachweismöglichkeit für anthropogen geschaffene Flächen gegeben, und dies ermöglichte jüngst den Nachweis einer von Menschenhand geschaffenen Altanlage unbestimmten Alters (Alt-Hadersdorf im Mürtztal, Steiermark) und den einer anthropogenen vor- oder frühgeschichtlichen Gesteinsbearbeitung (Teufelstein in den Fischbacher Alpen, Steiermark). Während im Falle der aus sieben Steinen aufgebauten Kultstätte auch aus anderen Gründen der Schluß auf anthropogene Einflüsse relativ einfach erscheint (dazu: J.G.HADITSCH 1991), konnte der Nachweis menschlicher Tätigkeit am Teufelstein ausschließlich nur mit Hilfe gefügekundlicher Erkenntnisse geführt werden.

Der Teufelstein, eigentlich der Gipfelfelsen des gleichnamigen Berges (1498 m SH.), liegt in phyllitischen Glimmerschiefern der Grobneisserie der Fischbacher Alpen und ist durch stärkere Rupturen in 26 bis 30 einzelne Blöcke gegliedert. An der Ost- und an der Südwestseite hat dieser Felsen zwei größere Wände, wobei die Ostseite überdies noch die Besonderheit aufweist, daß aus ihr geringfügig in die Schieferung eingelängte Quarzlinsen mit erstaunlich glatten Endflächen herausragen (J.G.HADITSCH 1987).

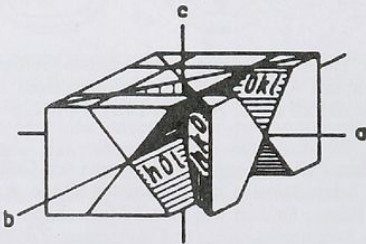


Abb. 9: Auf eine Deformation zurückgehende Gefügeelemente (Klüftflächen) mit den (positiv gerechneten) Kehrwerten  $1/a$ ,  $1/b$ ,  $1/c = h, k, l$  der Koordinatenabschnitte a, b, c. Nach G. BRAUN 1972.

Eine gefügestatistische Untersuchung zeigte eine relativ starke Streuung der s-Flächen (dargestellt durch deren Pole), dies im Gegensatz zu den Polen der beiden oben genannten Wände (Abb. 10). Die genaue Ausformung der Ostwand geht auch aus dem schmalen Gürtel und der geringen Streuung der Pole her-

vor. Der Schwerpunkt der Linearen (Fältelungsachsen) liegt im Südsüdwesten und steht in keinem mittels der Gefügesymmetrie erklärbaren genetischen Zusammenhang mit den beiden Wänden. Diese symmetrisch nicht mit dem Gesteinsgefüge korrelierbare, allgemeine Lage (hkl) der beiden Wände deutet eindeutig auf ein in bezug auf die flächige und achsiale Prägung des Teufelsteins postgenetisches Alter dieser Wände hin. Die Ausgestaltung dieser Wände wird damit mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit als anthropogen angesehen werden müssen, wobei allerdings (noch) keine Angaben über das absolute Alter der Gesteinsbearbeitung gemacht werden können. Die Annahme einer anthropogenen Bearbeitung der Ostwand wird sehr stark auch durch die schon früher erwähnten erstaunlich glatten Endflächen der Quarzlinsen gestützt. Eine korngefügekundliche Untersuchung einer orientiert entnommenen Probe zeigte nämlich für die unterschiedlich großen Quarzeinzelkörner, bei einer nicht strengen Regelung, auch nur eine allgemeine und nicht nach der (nur selten deutlichen) Spaltbarkeit des Quarzes nach (1011) orientierte Lage der Linsen-Endflächen.

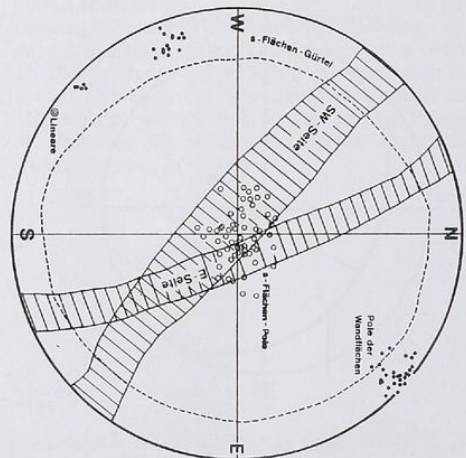


Abb. 10: Gefügediagramm des Teufelsteins mit Angabe der s-Flächen, der SW- und der E-Wand (als Gürtel und Pole), sowie des Schwerpunktes der Lineare (Achsens der Fältelung). Nach J.G. HADITSCH 1987.

Als weiteres Beispiel für den Nutzen der korngefügekundlichen Analytik kann die Untersuchung grobkeimiger Produkte angesehen werden (O.W.BLÜMEL & P.PAULITSCH 1952). So war es z.B. möglich zu beweisen, daß Dachziegel mit einem weniger gut geregelten Glimmergefüge frostbeständiger sind als solche mit einem strenger geregelten (Abb. 11,12,13).

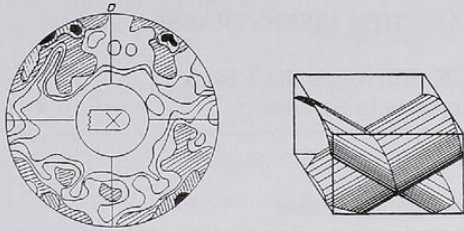


Abb. 11: Gefügediagramm (links) und Blockdarstellung der Flächenanlagen (rechts) eines frostbeständigen Dachziegels. 150 Glimmerpole. Besetzungsfelder: 7-5-3-1-0,5 %. Die häufigste Glimmerlage liegt parallel zu den Scherflächen mit einer bis zu 50° betragenden seitlichen Schwankung (gegen die Diagramm-Mitte zu). In der Diagramm-Mitte ist die Orientierung eines Ziegel-Querschnittes mit der Spur der Scherfläche abgebildet. In der Blockdarstellung ist die Scherflächen-Lage mit der bis zu 50° gemessenen seitlichen Schwankung (die die Festigkeit des Ziegels erhöht) dargestellt. Nach O.W. BLÜMEL & P. PAULITSCH 1952.

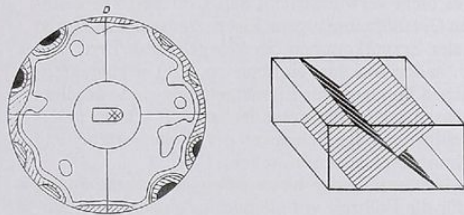


Abb. 12: Gefügediagramm (links) und Blockdarstellung der Flächenanlagen (rechts) eines nicht frostbeständigen Dachziegels. 453 Glimmerpole. Besetzungsfelder: 14-8-3-1 %. Zwei besonders deutliche Scherflächen-Lagen der Glimmer-Blättchen. In der Diagramm-Mitte ist ein Ziegel-Querschnitt dargestellt. Aus dem Blockbild geht deutlich hervor, daß die bevorzugten Glimmerlagen nur zwei Scherflächen abbilden. Nach O.W. BLÜMEL & P. PAULITSCH 1952.

In der archäometrischen Forschung erlaubt diese Methode, auch wenn nur Ziegelbruchstücke vorliegen, gewisse Rückschlüsse auf die Produktionstechnik, denn handgeschlagene Ziegel (tegulae, imbrices) weisen im allgemeinen eine schlechte Regelung der in ihnen enthaltenen Schichtsilikate (Muskovit etc.) auf, wogegen die z.B. mit Strangpressen gefertigten eine sehr gute (man könnte sagen: schieferige) Textur zeigen, welche sich durch Dünnschliffuntersuchungen auf dem Universaldehtisch auf relativ einfachem Wege nachweisen läßt. Allerdings wird auch noch zu untersuchen sein, inwieweit in jüngster Vergangenheit entwickelte Techniken die eben angedeutete Möglichkeit, handgeschlagene und maschinengefer-

tigte Ziegel voneinander zu unterscheiden, zunichte machen können. Herm Univ. Doz. Dipl.-Ing. Dr. A. MAYER (Leoben) verdanke ich den Hinweis auf das „Handformatic“-Verfahren der Fa. De Boer B. V. (Nijmegen, Niederlande), das die maschinelle Herstellung von „handmade bricks“ erlauben soll. Im Vorstehenden wurden an einigen Beispielen kurz die Möglichkeiten der Gefügekunde bei der Klärung von Fragen nach dem Nachweis und der Art anthropogener Materialverarbeitung aufgezeigt. Die Gefügekunde könnte aber auch in vielen weiteren Fällen der archäometrischen Forschung helfen - so etwa bei der Bestimmung der Art und der Herkunft von Rohstoffen für bestimmte Artefakte (und damit: alter Verkehrs- und Handelswege) - und es ist zu hoffen, daß in Hinkunft besonders die Archäologie verstärkt von diesem Angebot Gebrauch macht.

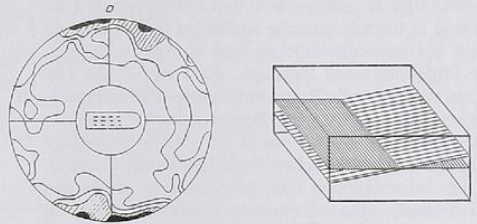


Abb. 13: Gefügediagramm (links) und Blockdarstellung (rechts) eines gut geregelten Gefüges in einem Dachziegel. 150 Glimmerpole. Besetzungsfelder: 7-5-3-1 %. In der Diagramm-Mitte ist ein Ziegelquerschnitt mit der Spur der häufigsten Glimmerlage (parallel bis subparallel zur Ziegel-Dachfläche) dargestellt. Im Blockbild ist die strenge Regelung der Glimmerblättchen angedeutet. Nach O.W. BLÜMEL & P. PAULITSCH 1952.

#### Schrifttum:

- BLÜMEL, O.W. & PAULITSCH, P. (1952): Gefügeuntersuchungen an Dachziegeln. - TIZ-Zbl., 76, 17/18: 256-258.  
 BRAUN, G. (1966): Deutsches Handwörterbuch der Tektonik  
 BRAUN, G. (1972): Deutsches Handwörterbuch der Tektonik  
 CLOOS, H. (1936): Einführung in die Geologie. - XII + 503p.  
 HADITSCH, J.G. (1987): Ein Beitrag geowissenschaftlicher Methoden, speziell der tektonischen Gefügekunde, zum Nachweis einer vor- oder frühgeschichtlichen Gesteinsbearbeitung. - Mannus-Bibl., XXIII (D.KORELL-Fs., III): 957-981.  
 HADITSCH, J.G. (1991): Fischbacher Teufelstein und siebensteinerne Altaranlage in Alt-Hadersdorf (Steiermark). - Im Druck  
 KARL, F. & BRAUN, G. (1968): Deutsches Handwörterbuch der Tektonik  
 SANDER, B. (1930): Gefügekunde der Gesteine mit besonderer Berücksichtigung der Tektonite. - VI + 352 p.  
 SANDER, B. (1948/1950): Einführung in die Gefügekunde der geologischen Körper. - I: X + 215 p.; II: XII + 409 p.  
 SCHMIDT, W. (1925): Gefügestatistik. - Min. Petrogr. Mitt., N.F., 38: 392-423.  
 STINI, J. (1950): Tunnelbaugeologie. - XI + 366