

# Über den geologischen Gegensatz von Gestein und Fels

von Eberhard Clar

*Zum Beginn des Vortrages, der diesem Aufsatz zugrundeliegt, richtete Eberhard Clar Worte des Dankes für die ihm verliehene hohe Auszeichnung an das Professorenkollegium der Technischen Hochschule Wien und an die maßgebenden Fachvertreter, deren Urteil dabei grundlegend gewesen sein muß. Der Verfasser kann diese Ehrung nicht auf besonders hervorstechende ingenieurgeologische Neuerkenntnisse seiner Arbeit beziehen, sondern nur auf sein unablässiges Bestreben, die in ständigem Fortschritt wachsenden Einsichten der verschiedensten wissenschaftlich-geologischen Fachrichtungen immer nach Möglichkeit den praktischen Aufgaben dienstbar zu machen, die dem Bauwesen und dem Bergbau in der Weiterentwicklung unserer Heimat, wie auch aller anderen Länder gestellt sind. Der Verfasser freut sich, in diesem Sinne darin eine Anerkennung der Mithilfe des ganzen Faches Geologie im Bauwesen sehen zu dürfen, dessen Aussagen ja so gerne im Scherz oder im Ernst als unexakt den exakten oder exakt formulierbaren Angaben des Ingenieurs gegenübergestellt werden. Dieser scheinbare Gegensatz ist letztlich die Folge eines Unterschiedes in der Methodik und grundsätzlichen Betrachtungsweise des gemeinsamen Objektes, das die Geologie primär beschreibend und genetisch-historisch erklärend, noch nicht physikalisch behandelt. Es scheint mir entscheidend wichtig, daß auch die Ingenieurgeologie diesen spezifischen und nichttechnischen Ausgangspunkt der Betrachtungsweise ihres Faches wahrt, denn nur von diesem aus ist sie befähigt, dem Ingenieurwesen grundsätzlich neue, nur ihr eigene Gesichtspunkte und Schlüsse beizutragen. Diese Grundeinstellung zieht auch durch die folgenden Ausführungen.*

Seit es eine Arbeitsrichtung gibt, die man als Technische Geologie, Baugeologie oder Ingenieurgeologie bezeichnen kann, wird auch darauf hingewiesen, daß die mechanischen und sonstigen Eigenschaften größerer, in ihrem natürlichen Verbands erschlossener Gesteinskörper wesentlich von denen abweichen müssen, die man im Laboratorium an Probestücken ermitteln kann, die aus diesem gleichen Gesteinskörper entnommen worden sind. Dieser Sachverhalt ist offenbar nicht oder nicht hauptsächlich eine Folge der unterschiedlichen Dimensionen, sondern sichtbar daraus ableitbar, daß die größeren Gesteinskörper praktisch ausnahmslos von mehr oder minder zahlreichen Trenn-

fugen, wie Schichtflächen und Bankungsfugen, Klüften, Rissen und Spalten zerteilt werden.

Dem Bergmann ist dieser Unterschied von je bewußt, wenn er — wenigstens im deutschen Sprachgebrauch — scharf dem petrographisch beschreibbaren tauben Gestein, Erz oder Nichterz das „Gebirge“ gegenüberstellt, von dem in erster Linie das mechanische Verhalten interessant ist, wie Standfestigkeit, Nachbrüchigkeit, Wasserführung oder der „Gebirgsdruck“, der durch die Herstellung von Hohlräumen darin ausgelöst wird. Im Bauwesen hat der Stollen- und Tunnelbau diesen Begriff mit gleichem Inhalt übernommen, während der Obertagebau neuerdings in zunehmendem Maße mit praktisch fast gleichem Inhalt den Begriff „Fels“ verwendet, um fortgesetzte Verwechslungen mit „Gebirge“ als morphologischem Begriff zu vermeiden.

Eine scharfe Unterscheidung von „Gebirgsfestigkeit“ und „Gesteinsfestigkeit“ hat der große Schweizer Geologe Albert HEIM schon vor mehr als 60 Jahren aus den Erfahrungen der großen Alpentunnelbauten gefordert, von unserem Raum aus hat Josef STINI seit 1927 eine geologische Erfassung dieses Gegensatzes durch systematische Kluftmessung gelehrt und angewandt; besonders aber ist es das Verdienst des Salzburger Arbeitskreises um Leopold MÜLLER, nicht nur unermüdlich auf die Tatsache des *diskontinuierlichen Gefüges* natürlicher Felskörper hingewiesen, sondern auch den Weg zu einer, in den praktischen Einzelaufgaben anwendbaren rechnerischen Behandlung solcher Gefüge beschritten zu haben.

Die vor allem im Fugengefüge oder Trennflächengefüge begründete Besonderheit von Fels oder Gebirge gegenüber dem fugenlosen Gestein an sich ist der letzte Ausgangspunkt dafür, daß sich die Behandlung des Verhaltens solcher Massen bei technischen Eingriffen unter oder über Tage anscheinend weltweit immer mehr als eigenes Arbeitsgebiet, „Fels“- oder „Gebirgsmechanik“ und Gegenstück der „Erdbaumechanik“, bzw. „Bodenmechanik“ herauszuheben trachtet. *Geomechanik* will viel allgemeiner in diese Behandlung auch die natürlichen, tektonischen Formungen und Verformungen unserer Erdkruste ohne Begrenzung der Größenordnung einbeziehen.

Diese Aufgaben gehen weit über den Arbeitsbereich des Geologen hinaus, seine Erhebungen bleiben aber doch dafür eine der wesentlichen Grundlagen. Die Benützung dieser Grundlagen verlangt vom Ingenieur

Verständnis dafür, daß der Geologe an sie mit einer ganz andersartigen Betrachtungsweise herankommt, doch kann die Verbindung beider gerade dadurch fruchtbar werden. Darum hoffe ich, es wird nicht als nutzlos empfunden, wenn ich hier — im zugehörigen Vortrag durch eine größere Zahl Lichtbilder unterstützt — einige allgemeinere, *rein geologische* Gesichtspunkte zu diesem Gegensatz zwischen Gestein und Fels bringe, trotzdem dabei viel längst bekannte oder vielleicht als selbstverständlich erscheinende Sachverhalte zu erwähnen sind.

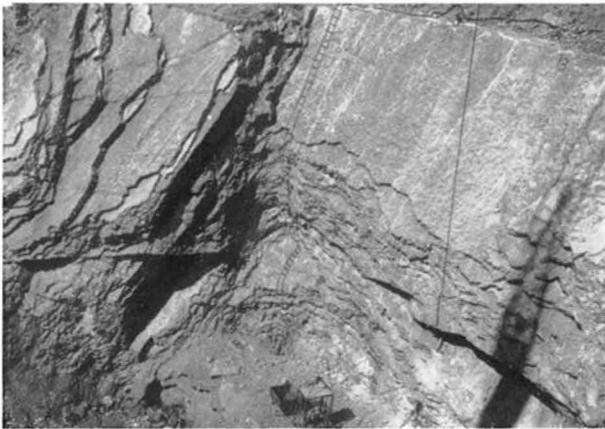


Abb. 1: Gestein: dichter Kalk der Mitteltrias, teilweise mit Hornstein; Verhalten als Felskörper in der dargestellten Baugrubenböschung ausschließlich durch das Fugengefüge (teils raue, teils tonbelegte Bankungsfugen, wenige Querklüfte) bedingt.

Zu den letzteren gehören etwa bereits folgende Hinweise: Schon die Form irgendwelcher natürlichen oder künstlichen Felsaufschlüsse (siehe hier die Abb. 1, 2, 5, 6, 13) zeigt sehr häufig, wie der Einfluß der eingangs erwähnten *Trennfugen*, ihrer geometrischen Anordnung als Fugengefüge und die Zahl dieser Trennfugen die mechanische Eigenart des Felskörpers offenbar weit mehr bestimmt, als die Gesteinsart selbst. Natürlich ist auch das Fugensystem weitgehend ein Abbild verschiedener Bildungsweise verschiedener Gesteinsarten (Schichtungstypen in Sedimenten, Absonderungsformen in Erstarrungsgesteinen, Schieferungsarten der Metamorphite); darüber aber legt sich in aller Regel noch ein Netz von Zerbrechungsfugen, die aus einer späteren Verformung der geologischen Körper im Rahmen der Gebirgstektonik stammen und letztlich deren Bruchverhalten unter örtlich und zeitlich wechselnden, aber nicht exakt bestimmbar geologischen Bedingungen abbilden. Die Fugen bestimmen u. a. die Größe, Form und Orientierung der gewinnbaren Gesteinskörper, Anteile der Gewinnungsfestigkeit, die Böschungsform und *Standfestigkeit*, sie enthalten und leiten den technisch wesentlichen Teil der *Wasserführung* in den an sich meist praktisch undurchlässigen Festgesteinen. Kurz, in den weitaus

meisten Aufgaben ist das Objekt der technisch-geologischen Fragestellung nicht das Gestein, sondern im hier besprochenen Sinne der Fels, bzw. das Gebirge oder die Böden als lockere oder bindige Kornverbände ohne eine durchgreifende diagenetische Verfestigung. Den Böden in einem gewissen Grade grundsätzlich vergleichbar wird der Fels durch die Fugen zu einem, von STINI mit Trockenmauerwerk verglichenen *Verband* oder *Gefüge* relativ starrer Bauelemente; seine Festigkeit ist „*Verbandfestigkeit*“ (L. MÜLLER), seine Verformung vollzieht sich wenigstens bei niedrigen Belastungen nach heutigem Einblick nicht nur im nicht-rückläufigen, sondern auch im elastischen Anteil vorwiegend durch Relativbewegung an diesen Trennfugen.

Da es sich bei natürlichen Felskörpern demgemäß wesentlich um Verbandfestigkeiten und Verbandverhalten handelt, können dafür gültige Kennziffern nur aus *Prüfungen* abgeleitet werden, bei denen ein repräsentativer Bereich dieses *Verbandes* erhalten bleibt, also im Normalfalle nur „in situ“; daß es sich dabei in der Regel auch um „*Großversuche*“ handeln muß, wird erst durch die Weitmaschigkeit des maßgebenden Fugennetzes erzwungen. Wir kommen auf die Bedeutung des Größenmaßstabes noch zurück.

#### *Art und Aussagen der geologischen Beschreibung des Felsgefüges.*

Es besteht heute noch teilweise die Neigung, das Netz von Zerbrechungsfugen, das die Felskörper vom Gestein unterscheidet, einfach als zufällige und nicht systematisch kontrollierbare *Fehler* des Materials abzutun und irgendwie näherungsweise zu berücksichtigen. Demgegenüber hatte eben schon STINI den Wert systematischer Kluftmessung und ihrer statistischen Auswertung für technische Aufgaben gezeigt, als sich gerade in Österreich die Betrachtungsweise der „*Gefügekunde*“ von B. SANDER in Innsbruck auch für diese Fugensysteme als die überlegene Darstellungsart erwies und seither auf der ganzen Welt für solche Zwecke Verwendung findet. Neben dem neueren grundlegenden Werk von B. SANDER (1948/50) ist hiefür auf die ausführlichen methodischen Erläuterungen in TURNER und WEISS (1963) und für unsere Frage besonders in L. MÜLLER (1963) zu verweisen. Es ist eine Bestätigung für diese von Österreich ausgehende Betrachtung des Felsgefüges, daß K. v. TERZAGHI in einer seiner letzten Arbeiten (1962) schrieb: „it is essential to get as much information concerning the characteristic features of the joint system as our means for rock exploration permits“ (p. 253). Die Geologie hat der Felsmechanik in dieser Richtung eine gewisse Starthilfe leisten können. Was wir aus dieser gefügekundlichen Charakteristik

eines Felskörpers gewinnen, ist viel und wenig zugleich. Es sind ihrem Wesen nach Daten der *Gefügegeometrie*. Aus der Untersuchung des Gesteins bringt sie u. a. Angaben über die Symmetrie von Regelungen in der Anordnung und Orientierung der Komponenten, der auch die Festigkeitsanisotropie symmetriegemäß



Abb. 2: Aufschluß in Quarzitschiefer, Bildhöhe ca. 1,5 m, Veitsch. Die natürliche plastische („pseudoplastische“) Deformation des dargestellten Bereiches ist erkennbar aus drei Arten von Teilbewegungen summiert: Verschiebung unverformter parallelepipedischer Gefügeelemente entlang den Trennfugen; Verformung dieser Elemente ohne (in diesem Maßstabe) sichtbaren Bruch; Verformung dieser Elemente unter Zerbrechung bzw. Aufspalten. phot. O. FRIEDRICH.

folgen muß; betreffs des Fugen- und Trennflächengefüges bringt sie eine objektive Übersicht über die Regelmäßigkeit der *räumlichen Orientierung*, die Häu-

vorzeichnet; beschreibende Wertung der *Ausbildungsart* dieser Trennflächenscharen als Grundlage für die Beurteilung des Reibungswiderstandes nach verschiedenen Richtungen; zahlenmäßige Angaben über den *Grad der Zerklüftung* in Bezug auf Zahl und Abstand („Kluftdichte“ STINI) und auf den mechanisch wichtigen „Durchtrennungsgrad“ (MÜLLER). Je nach Bedarf werden die Daten direkt dargestellt oder in Diagrammen statistisch ausgewertet (Beispiele in den zitierten Werken).

Wird ein derart von Fugen geteilter Felskörper beansprucht, so vollzieht sich wenigstens der bleibende Anteil der zugehörigen Verformung anfangs nur dadurch, daß sich die relativ starren Gesteinstücke als „*Gefügeelemente*“ gegeneinander an den sie trennenden Fugen verschieben, so daß diese je nach Orientierung sich schließen, öffnen oder Gleitverschiebungen ermöglichen. Bei weiterem Fortschreiten der Verformung zeigen natürliche Felskörper oft durch „*Sperrausdehnung*“ (SANDER) eine Volumzunahme an. Ferner kann dann auch eine deutliche plastische Verformung oder ein neuerliches Zerbrecen, also Bruch der Gesteinstücke hinzukommen (siehe Abb. 2). Als „*Kluftkörper*“ wird meist nach dem Vorgang von F. PACHER ein aus der statistischen Verarbeitung idealisierter mittlerer Baustein des Felskörpers verstanden, der das Kluftgefüge nach Orientierung und Dichte versinnbildlicht.

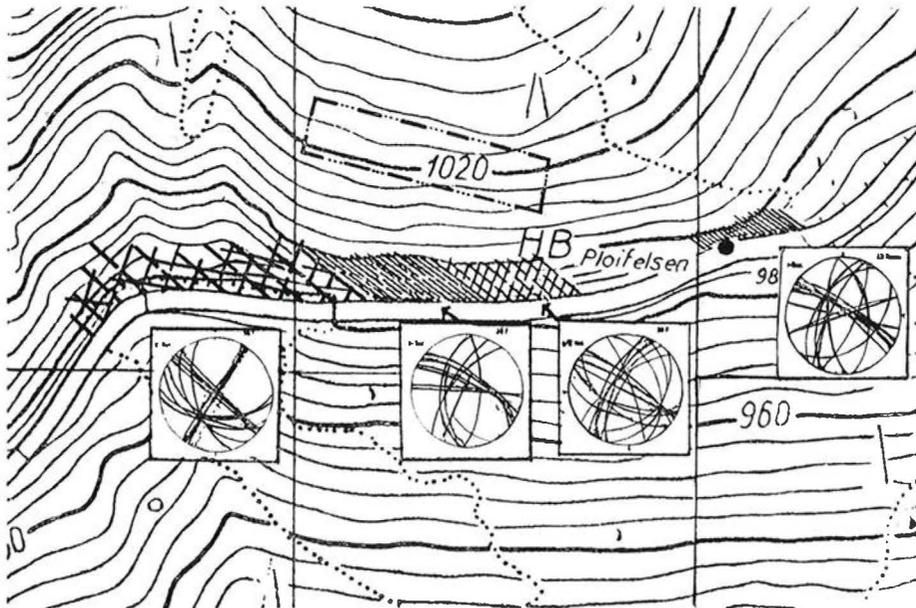


Abb. 3: Beispiel einer technischen Felskartierung, bei der in petrographisch wenig differenzjerten Glimmerschiefern bei ähnlicher Orientierung der Klüftung (s. Lagenkugeldiagramme) eine Unterscheidung nach der Ausbildungsart (Fazies) des Trennflächengefüges vorgenommen ist („Blocktektonit“- „s-Tektonit“- und „Übergangs“-Fazies). Nach F. KARL (1954).

figkeit der einzelnen Richtungen, die *Symmetrie* dieser Anordnung, die wieder auch eine mechanische *Anisotropie* des Felskörpers in gleicher Orientierung

Der Vergleich gefügekundlich charakterisierter Teilbereiche untereinander erlaubt eine objektive Feststellung, ob sich diese Teilbereiche in der Art und

Orientierung ihres Felsgefüges unterscheiden und erlaubt so allmählich fortschreitend die objektive Abgrenzung von Bereichen der *Homogenität* der Felsstruktur, in denen nun mit Wahrscheinlichkeit auch eine gewisse Gleichheit des mechanischen Felsverhaltens und aller anderen Folgerungen daraus erwartet werden darf. Solche Homogenitätsbereiche der Struktur decken sich vielfach nicht mit den Homogen-Bereichen der Gesteinsart, wie wir sie in unseren geologischen Karten oder Plänen primär ausscheiden. Ein gutes Beispiel gibt die Abb. 3 nach F. KARL.

Gefügekundliche Untersuchung in solcher Art erweist sich besonders dort als leistungsfähig, wo es sich sozusagen um die *innere Geometrie* von Felskörpern und die Voraussicht ihrer typischen Merkmale unter der Oberfläche handelt. Wir denken da als Beispiele an die Voraussicht der Orientierung einer Festigkeitsanisotropie, von Schwächezonen oder des möglichen Verlaufes von Bruchflächen, an die Berücksichtigung der Fugenorientierung bei Injektionsbohrungen, wie sie auf Grund der Vorarbeit von STINI zuerst FILL (1950) von der Dichtung der Hierzmannsperre beschrieben hat, überhaupt beim Aufbau eines verbesserten Raumbildes des Untergrundes aus der Verbindung der örtlichen Aufschlußdaten. Statistische Auswertung der Messungen führt zu einer *Typisierung* des Gefüges, die es z. B. gestattet, in Modellkörpern, die klüftigen Fels nachbilden sollen, die für die betreffende Masse typische Fugengeometrie des „Kluftkörpers“ herauszuarbeiten. Am entscheidendsten aber wird die Kenntnis der Art und Orientierung des Fugengefüges wohl dann, wenn der *Fels*, wie das heute immer ausgedehnter angestrebt wird, bewußt zusammen mit dem Kunstbauwerk als Teil einer *Verbundkonstruktion* behandelt wird. (Verankerte Stützmauern, Hohlraumausbau jeder Art usw. siehe L. MÜLLER 1963, L. RABCEWICZ — K. SATTLER 1965).

Es ist aber hier wohl wichtig darauf hinzuweisen, daß auch die gründlichste gefügekundliche Untersuchung der Felskörper genau wie andere rein geologische Erhebungen ihrem Wesen nach *ungeeignet* ist, direkt *Zahlenwerte* für das mechanische Verhalten dieser Körper, ihre Durchlässigkeit usw. zu liefern. Sie ist (siehe SANDER I, Einleitung) zunächst Beschreibung des *morphologischen* Gefüges und sucht dann für dieses im Rahmen einer *zeitlichen Gliederung* des Bildungsganges rückschauend einen selten mehr als qualitativen Schluß auf die symmetriegemäßen gestaltenden Kräfte.

Am weitesten vorgestoßen auf dem Wege zu einer direkten rechnerischen Auswertung von Gefügedaten, wenn auch mit kalkulierten Reibungsbeiwerten, ist jedenfalls L. MÜLLER mit der Ableitung einer „Cha-

rakteristik der Gesteinsbeweglichkeit“ und „Widerstandsziffer“ (des Felsgefüges).

Methodisch gesehen liegt Ermittlung und Auswertung von Kennziffern und Zahlenwerten des mechanischen Verhaltens von Felskörpern zweifellos schon außerhalb der geologischen Mittel, nämlich schon auf dem Gebiete der Gebirgstechologie und Felsmechanik. Genau wie die Erdbaumechanik ist diese zweifellos ein Ingenieurfach und nicht ein Spezialgebiet geologischer Arbeit. Die Mitwirkung des Geologen liegt dabei weiter auf dem ihm vertrauten Gebiet der „gestaltlichen“ Charakterisierung und des darauf aufgebauten geologischen *Vergleiches*. Praktisch alles, was die Geologen an Schätzungen von technischen Kennziffern immer noch liefern müssen, kann nur darauf beruhen, daß mit allen geologischen Daten wie Gestein, Felsgefüge, geologische Situation und deren zeitlich abgeleitete Entwicklung, Vergleiche mit Orten oder Stellen gezogen werden, wo solche Werte auf technischem Wege ermittelt worden sind.

Mit befriedigendem Erfolg hat z. B. seinerzeit STINI eine sehr stark wechselnde Mitwirkung des Gebirgs-widerstandes in einigen Druckstollen nur auf Grund der Erfahrung mit vergleichbaren Felsarten unter Baugrundbelastung geschätzt. Solange den Geologen z. B. für die von ihnen verlangte Schätzung von E-Modulwerten nur Laboratoriumsprüfungen zugänglich waren, waren ihre Angaben auf Basis der petrographischen Vergleiche relativ zueinander verwendbar, wurden aber durch Großversuche in situ absolut in Zehnerpotenzen korrigiert. Die geologische Schätzung lebt von der Möglichkeit des Vergleiches mit ausreichend beschriebenen Erfahrungsbeispielen.

Die Möglichkeit direkter Ermittlung notwendiger Felsdaten im *Großversuch* macht die beschreibende und vergleichende Mitarbeit des Geologen nicht hinfällig, sondern konzentriert sie nur auf den Bereich ihrer eigentlichen Leistungsfähigkeit. Die Lage ist nicht anders als in der Charakterisierung einer Gewinnungsstelle von Nutzgestein durch die technologische *Gesteinsprüfung*. Diese wird erst dadurch auswertbar, daß die Probe auf der Basis einer vergleichenden petrographischen Untersuchung des Vorkommens als *repräsentativ* erwiesen ist und die Giltigkeit der Werte wird begrenzt durch den Bereich, den man als *homogen* in Bezug auf diese Gesteinsart bezeichnen könnte. Umsomehr verlangt die bedeutende Investition des gebirgstechologischen Großversuches eine vorherige *Abgrenzung des voraussichtlichen Geltungsbereiches* der erhaltenen Daten und bewußt eine möglichst getrennte Erfassung von mehr oder weniger homogenen Teilbereichen mit Unterschieden der Gesteinsart und ihres Felsgefüges. Wieder ein Beispiel: Abb. 4 zeigt nach H. LAUFFER und G. SEEBER (1962) die An-

ordnung der Meßstellen mit der Tiwag-Radialpresse im Kraftabstieg des Kaunertalwerkes; ihre Position war nach Möglichkeit so gewählt, daß die unterscheidbaren geologischen Hauptabschnitte und einzelne speziellere Situationen durch Messungen repräsentiert sind. Der Geologe war dadurch der aus seiner Untersuchungsart nicht direkt ableitbaren Angabe von geschätzten Absolutwerten irgendwelcher Kennziffern

sich in unserem Raum schon weitgehend durchgesetzt, daß nach Maßgabe der Möglichkeiten des Bauvorganges (sofortige Spritzbetonsicherung!) eine geologische Detailaufnahme auch die Daten des Flächengefüges sichert, so daß diese in fortlaufender Aufzeichnung den übrigen Daten und Erfahrungen (wie Wasserzutritt, Gebirgsdruck, bzw. Standzeit und Stützweite nach LAUFFER (1958), Sicherung, Ausbau und

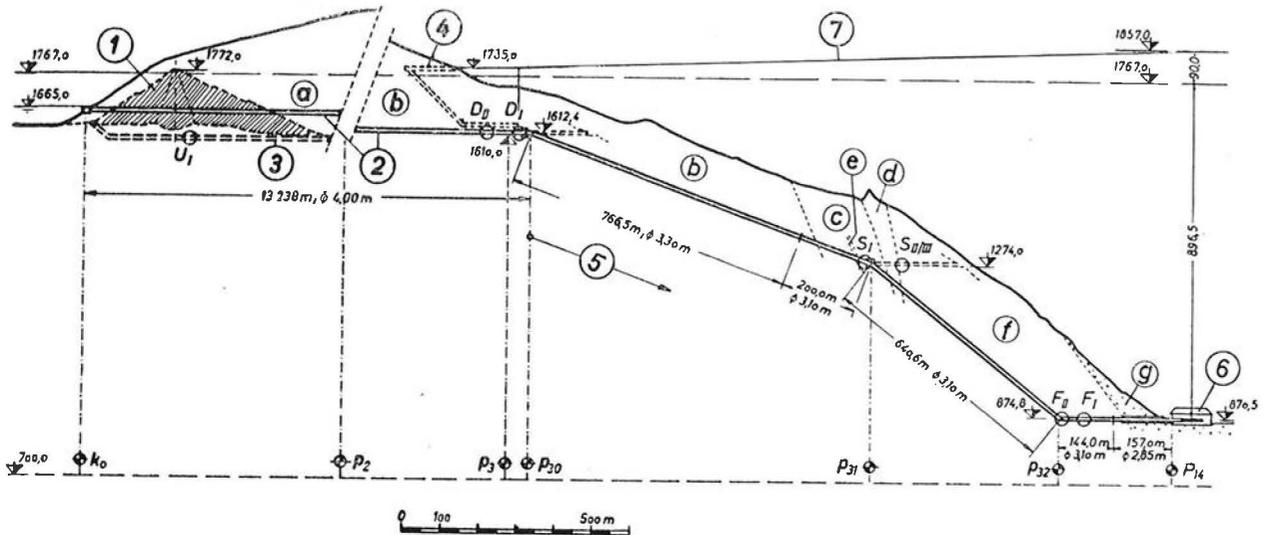


Abb. 4: Höhenplan des Kraftabstieges am Kaunertalkraftwerk mit den geologischen Hauptabschnitten: a Gneis, b phyllitische und f kalkige Bündner Schiefer, c, d, e Serizitschiefer, Dolomit und Gips der Trias, g Hangschutt; D, F, S, U Meßstellen für Felsdehnungsmessungen. Nach LAUFFER und SEEBER (1962).

enthoben; aber es blieb ihm noch der sehr wesentliche Beitrag, durch Vergleich des Felsgefüges innerhalb der von ihm abgegrenzten Komplexe mit dem des Prüffeldes die Bereiche abzugrenzen, für die die Prüfungswerte als gültig angenommen werden können und zusätzlich im Wege des Vergleiches der Gesteinsausbildung und des Gefüges anzugeben, wo und in welchem Sinne Abweichungen von diesen Werten und lokale Störungen zu gewärtigen sind.

Mit dem laufenden Zuwachs veröffentlichter Felsprüfungsergebnisse aus Großversuchen an verschiedensten Felsarten wird natürlich auch die Möglichkeit wachsen, aus rein geologischen Vergleichen angenäherte Werte oder Wertgrenzen zu schätzen, wie dies in der Praxis bei erster Übersicht nötig ist und etwa bezüglich Festigkeitswerten von Gesteinen oder Tragfähigkeit des Baugrundes immer wieder geschieht. Solche *vergleichende Anschätzungen* werden nur dann befriedigend fundiert sein, wenn bei der Mitteilung von Versuchsergebnissen und Versuchsanordnungen an Fels auch dieser *Fels selbst in seinem Gefüge* beschrieben und nicht nur durch einen Gesteinsnamen abgetan wird. Darum muß bei jeder Gelegenheit gebeten werden. Im Stollen- und technischen Hohlraumbau hat

Nachbehandlung) gegenübergestellt werden. Auch hierin können wieder die ausgedehnten neueren Stollenbauten der Tiroler Wasserkraftwerke mit ihren „Stollenbändern“ beispielhaft genannt werden.

#### Tektonische Bauformen als Naturversuche

In der Untersuchung der Gebirgsbaue hat die tektonische Geologie fortgesetzt in den Verfaltungen, Überschiebungen und Systemen von Bruchstörungen *natürliche Verformungsbilder* von Gesteins- bzw. Felskörpern zu beschreiben und zu erklären, die in ihren Dimensionen gewaltig sind gegenüber den etwa in „Großversuchen“ erfassbaren Bereichen. Die Gefügekunde studiert sie gestaltlich zugleich in *allen Größenbereichen* vom mikroskopischen Korngefüge über Aufschlüsse technisch interessierender Größenordnung bis zu Gebirgsdimensionen (mikro-, meso- und megaskopischer Bereich nach TURNER u. WEISS 1963). Es ist natürlich verlockend, den Felsmechaniker immer wieder zur nachträglichen Kalkulation solcher Verformungen einzuladen, damit auch aus diesen Riesenversuchen der Natur exaktere technologische bzw. rheologische Einblicke zu schöpfen wären.

Man denke da etwa an einige der Gebirgsprofile durch

große berühmte Alpentunnels (wie Hauensteinbasis, Grenchenberg, Simplon, Bosruck) und die klaren Gegensätze des Verformungsverhaltens, die aus ihrem Vergleich anschaulich werden. Zu ihrem Verständnis und ihrer Erklärung ist schon viel getan, von Modellversuchen, in denen nach frühen Anfängen wie E. REYER in Wien 1892 besonders die Tonversuche von H. CLOOS (seit 1925) geologisch wegweisend geworden waren, bis zu Theorien der Faltung und Schieferung seit S. KIENOW 1942. Bei all dem ist aber das Ziel die Erklärung der vorhandenen geologischen Bauform (im Sinne einer „Geomechanik“), nicht die Gewinnung von Daten, die das weitere Verhalten der schon verformten großen Felskörper oder von Teilen davon in den Bereichen bautechnischer Veränderungen kennzeichnen können.

Für das letztere Ziel müssen Verformungen geologischer Körper gesucht werden, bei deren Ausführung möglichst schon die Gesamtheit der den Felskörper heute kennzeichnenden Gefüge-Eigenschaften vorhanden und wirksam gewesen sein dürfte, nicht jene, die älter sind oder auf die das Gefüge zurückgeht.

Wir können von diesem Gesichtspunkt aus drei Gruppen gegenüberstellen:

a) Verformungen, die unter wesentlich *höheren Belastungen* und *Temperaturen* (einschließlich Schmelzzustand) vor sich gegangen sein müssen, als sie heute in technisch interessierenden Bereichen herrschen, verbunden mit oder überdauert von Metamorphose des Mineralbestandes, Neukristallisationen usw. Diese Verformungsbilder sagen daher viel über die Gesteinsgeschichte und Vorgänge der Tiefentektonik aus, aber nur mittelbar etwas über das künftige technische Felsverhalten, das sie durch die erzeugte Kornanordnung, ihre Anisotropie u. ä. beeinflussen.

b) Die Verformungen, die den Großteil der heute wirksamen Fugen- und *Kluftsysteme* erzeugt haben, gelten im allgemeinen als jünger im Vergleich zur ersten Gruppe und zur primären Gesteinsverfestigung, mit dieser aber teilweise, wie in den Kontraktionsriß-Systemen von Magmatiten oder Sedimenten, noch deutlich verbunden. Soweit solche Fugen- oder Kluftsysteme auf eine *tektonische* Verformung des ganzen geologischen Körpers zurückgehen müssen, lassen sie sich nach gefügekundlicher Untersuchung oft befriedigend als Erzeugnisse einer ein- bis mehrscharigen *Zerschierung* mit oder ohne zugehörige Zugspaltensysteme verstehen. Ihre Symmetrie gestattet den Rückschluß auf die Symmetrie des erzeugenden Kraftanriffes und es können für diesen auf Grund der prüfbareren Festigkeit des kluftfreien Gesteins unter dieser Vorstellung genäherte Werte ermittelt werden (C. TORRE 1951). Nur ausnahmsweise geben geologische Beobachtungen direkte Hinweise auf die *Größe der*

*Kräfte* bei tektonischer Verformung, wie dies W. E. PETRASCHECK aus dem Einfluß auf den Inkohlungsgrad ableiten konnte oder Veränderungen der Porosität in Aussicht stellen.



Abb. 5: Faltensattel in Unterkreide-Kalkschiefern, Dopplerhütte; Bildhöhe ca. 3 m; die dickere, unter diesen Bedingungen steifere Bank ist bei der Faltung unter symmetriegermäßiger Rotation der Teilstücke zerschert worden. phot. E. CLAR.

Die Analyse der Symmetrieverhältnisse kann ferner erkennbar machen, wenn die Zerklüftung, bzw. das Fugengefüge nicht aus einer einzigen Verformung ableitbar ist, sondern aus *mehreren* in *zeitlicher Folge*, die sich mit veränderten Bedingungen symmetriekonstant überlagern oder sich auch in trennbaren Verformungsplänen verschiedener Orientierung „überprägen“ können.

Was nun die *Bewegungsform* bei der Entstehung dieser Zerklüftung anlangt, so scheint es zunächst klar, daß es sich um eine Zerbrechung, einen „Bruch“ des vorher zusammenhängenden Gesteinskörpers handeln muß. In der Abb. 5 sieht man jedoch als Beispiel sehr deutlich, wie in der dargestellten Antiklinalfalte eine offenbar sprödere Kalkbank symmetriegermäßig zur Falte bei deren Bildung zerschert wird, wobei es in den beiden Schenkeln zu gegensinnigen Rotationen der Kluftkörper kommt. Die Falte als *Ganzes* ist zweifellos Ergebnis einer *plastischen* Verformung, im Maßstab der Falte betrachtet ist die Zerbrechung nur eine *Teilbewegung* zu dieser plastischen Formung, im Maßstab oder besser Größenbereich nur weniger Kluftkörper ist der Vorgang aber zweifellos als Verschiebungsbruch zu beschreiben. Grundsätzlich gleiches zeigt die Abb. 6; hier ist ein Dolomit mit steil aufragender Bankung über einer flach nach links ein-

fallenden Überschiebung zu einer Falte geschleppt. Der Dolomit ist in der üblichen Weise zu einem Gefüge kantiger cm-Stücke „zerhackt“, so daß sich die ganze plastische Faltenformung sichtbar auf dem Wege



Abb. 6: Faltende Schleppung von gebanktem kleinklüftigem Mitteltriasdolomit an einer flachliegenden Störung im unteren Bildteil; rein „brechende“ Teilbewegungen einer im Ganzen plastischen Verformung unter „Sperrausdehnung“; Bildhöhe ca. 2 m, Steinbruch Weißenbach-Hinterbrühl; phot. E. CLAR.

von Relativverschiebungen dieser starren Dolomitstücke gegeneinander vollzieht und dabei eine „Sperrauflockerung“ eintritt. Nach unten im Bereich der Störung leitet dies in ein gepresstes Trümmerhaufwerk über. Wie die Verformung zu beschreiben ist, hängt ganz davon ab, ob man einen Maßstab anwendet, in dem die gegeneinander bewegten Teilkörper (Gefügeelemente) einzeln wahrgenommen werden oder nicht. Geht man nun mit solcher Einsicht in den gefügebedingten Verformungsmechanismus eines klüftigen Felskörpers hinauf in die Dimensionen von geologischen Karten (km-Bereich) oder von Bergzügen, so ergibt sich wieder ein etwas anderer Aspekt: es wird klar, daß auch die scheinbar bruchlosen Verformungen der Großkörper, Verfaltungen und Verdrückungen, wenigstens in höheren Gebirgstockwerken wesentlich durch solche Teilbewegungen im Kluffgefüge vermittelt werden können. Dieses Kluffgefüge aber sehen wir immer wieder in Symmetriebeziehungen zu den größeren geologisch kartierbaren Störungen und Verwerfungen, also echten, weithin durchschneidenden Bruchflächen des Gebirgskörpers, die bei seiner tektonischen Verformung entstanden sind (als Beispiel Abb. 7). Das Kluffgefüge wird in diesem Sinne zum Zeugen der im Kleinen diskontinuierlichen, im Großen aber plastischen Verformungen, die seine Zerlegung durch große Bruchflächen begleiten. Es ist wohl zwingend

daraus zu schließen, daß diese Gebirgskörper nicht irgendwie in einem bescheidenen Maße, sondern eben im Bereich ihrer Bruch- und Fließgrenze tektonisch verformt worden sind. Sie wären schon einmal in den Bereichen der Verformung gewesen, die etwa in der Darstellung eines Großversuches in Abb. 8 nach

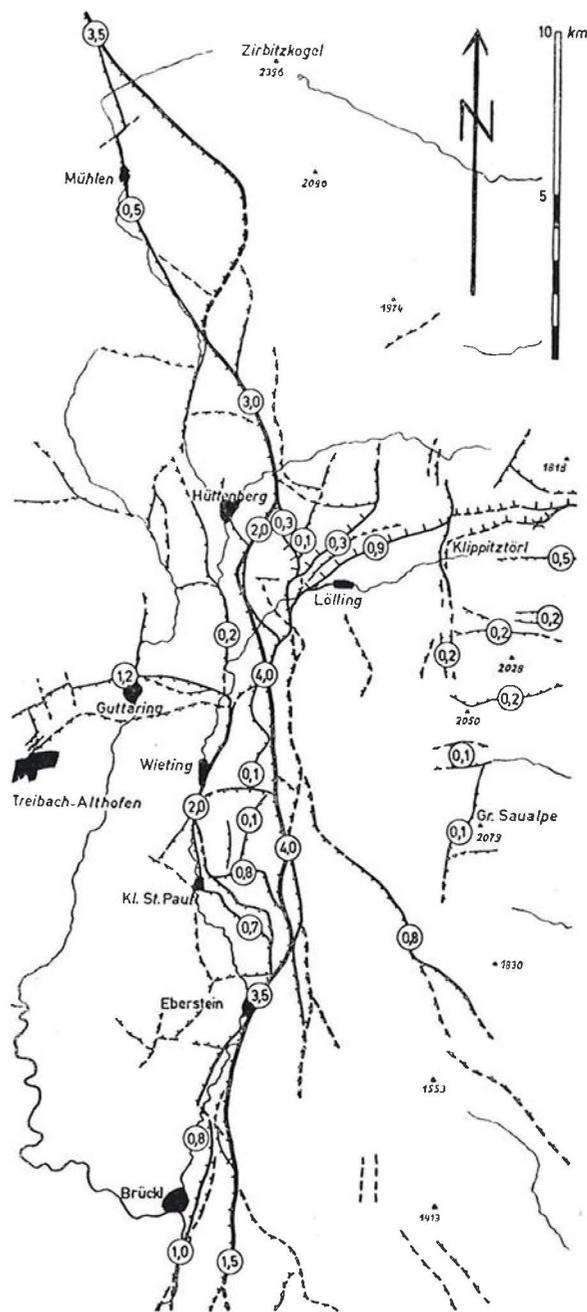


Abb. 7: Kartenübersicht der größeren Bruchstörungen des Görttschitztales in Kärnten nach W. FRITSCH (196); ein System von echten Bruchflächen (Verschiebungsbeiträge in km in den Kreisen) zerlegt geologische Großkörper, deren Kartenbild und Kluffgefüge eine offenbar damit im Zusammenhang stehende, also nahe der Bruchgrenze erfolgte plastische oder Fließverformung belegt.

MÜLLER jenseits einer Fließgrenze oder schon im Bereich des „Bruchfließens“ im Sinne von K. H. HÖFER (1958) liegen. Wir müssen damit rechnen, daß unsere technischen Beanspruchungen, verglichen mit der geologischen Vorgeschichte auf Entlastungsschleifen liegen, die bereits aus diesen Grenzbereichen ihren Ursprung nehmen und dahin zurückkehren.

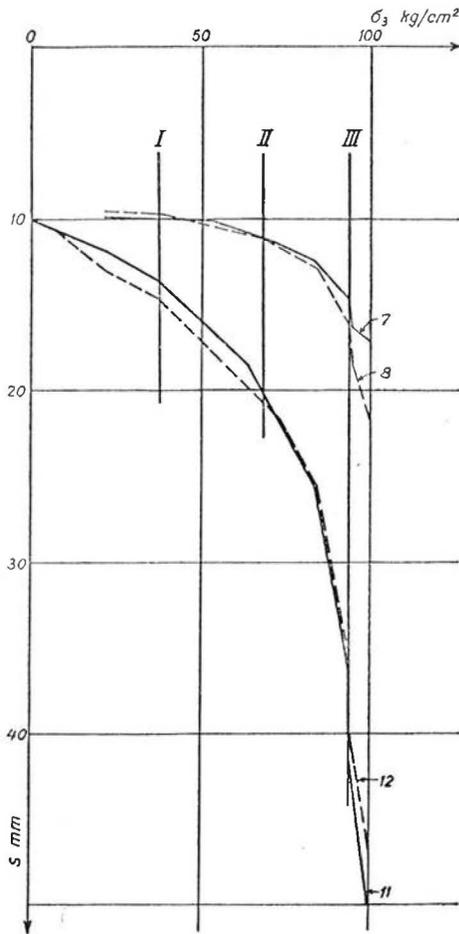


Abb. 8: Typische Arbeitslinie eines Triaxial-Großversuches in zerklüftetem Granit; 11, 12 für Meßpunkte in Richtung der größten Hauptnormalspannung (Druck)  $\sigma_3$ , 7, 8, in der Richtung der Querdehnung, I, II Fließgrenzen, III Beginn des Bruchfließens. Aus L. MÜLLER (1963).

Vielleicht soll in diesem Zusammenhang noch an die eindrucksvollen, ebenfalls unter starker Kluftauflockerung produzierten Verfaltungen erinnert werden, die in der Stirn der Felsgleitmasse von Vajont sichtbar sind und die eine zum späteren Bruch überleitende Fließverformung konserviert haben.

Aus diesen Größenmaßstäben lassen sich wieder gute Parallelen zum Verformungsversuch an Gesteinsproben eröffnen, bei denen aber wieder die Kristallkörner als Gefügeelemente *relativ sehr klein* zum Gesamtbereich sind. In Untersuchungen zur Bruchtheorie von GRIF-FITH hat W. F. BRACE (1964) u. a. die mikroskopischen Veränderungen im Verlauf der zum Bruch füh-

renden stress-strain-Kurve verfolgt. In seiner idealisierten Kurve der Abb. 9 vollzieht sich ab III eine zunehmende Rißbildung an Korngrenzen und es be-

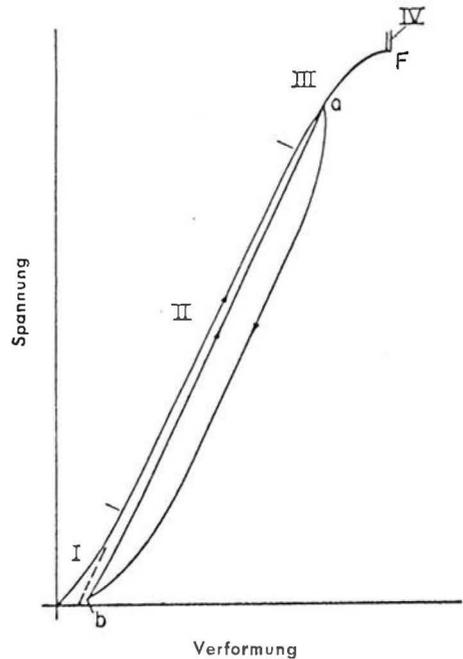


Abb. 9: Idealisierte stress-strain-Kurve aus den Versuchen zur Bruchtheorie an Proben natürlicher Gesteine (W. F. BRACE 1964); Bereich III mit Rißbildung an Korngrenzen und Volumszunahme (Sperrausdehnung) mit Weiterbildung in IV zu „fault-type-fracture“ und zum Bruch (F).

legt eine Volumszunahme die „Sperrauflockerung“ genau wie im Großmodell des Felskörpers etwa gemäß Abb. 7. Im letzten Stadium, wo sich das Gestein durch Fließen oder Bruch einer weiteren Laststeigerung entzieht, kommt es zu einem Wachsen der Risse über die Korngröße, überleitend zur „fault-type-fracture“ mit Zerreibungen zu Grus wie in unseren geologischen Groß-Verwerfungen.

Es drängt sich in diesem Sinne der Schluß auf, daß unsere geologischen Felskörper nicht mit den Gesteinsprobekörpern verglichen werden sollen, die wir etwa zur Festigkeitsuntersuchung ins technologische Laboratorium liefern, sondern mit den Restkörpern, die nach Eintreten des Bruches zwischen den Bruchflächen mehr oder weniger verformt erhalten bleiben.

c) Am interessantesten erscheinen hier natürlich Verformungen, die Felskörper *nach* ihrer Zerbrechung zu einem diskontinuierlich gebauten Kluftkörper-Verband in Beziehung zu den *heutigen Geländeformen* unter Einwirkung der *Schwerkraft* mitgemacht haben. Wir sehen dabei durch die Bezugnahme auf die heutigen Geländeformen davon ab, daß heute in zunehmendem Maße auch Bauformen der großen Gebirgsstrukturen

auf Schwerkrafteinfluß rückführbar werden (z. B. Zergleiten von Auffaltungen, Deutung der nördlichen Kalkalpen als gigantischer zusammenhängender Gleitkörper).

Schon STINI hat in einer kurzen Notiz (1953) angeregt, in natürlichen und künstlichen Felsböschungen einfache Beispiele von eingetretenen oder sich vorbereitenden Gleitungen, aber auch Überhänge u. ä. zur „behelfsmäßigen“ Gewinnung von Daten der Gebirgsfestigkeit, besonders von Grenzwerten der praktisch wirksamen Reibung auf Fugen, nachzukalkulieren. Der Gedanke bleibt weiter eine Anregung für felsmechanische Untersuchungen.

Wesentlich ausgedehntere und tiefgreifendere Verformungen des Felskörpers als solche lokale Nieder-

der Erosion durch fließendes Wasser übernommen. Wie Hänge aus unverfestigten Sedimenten (Böden) reagiert auch der Fels neben den „plötzlichen“ Brucherscheinungen der Rutschungen und Bergstürze durch langsame, dem *Bodenfließen* und „Hakenwerfen“ vergleichbare Verformungen. Im klüftigen Fels ist ihre Wirkung zunächst als eine *Auflockerung* festzustellen, bei der sich das Kluftnetz öffnet, ohne daß Verdrehungen meßbar sein müssen. Mit Mächtigkeiten in Zehnern von Metern oder mehr sind solche äußere Lockerungszonen auch seismisch belegt. Sie können tiefer reichen als Frost und Verwitterung; es wäre daher möglich, daß bei ihrer Entstehung auch ursächlich noch ungeklärte *Entspannungen* des Felskörpers eine Rolle spielen, wie sie eindeutig nur in kluft-

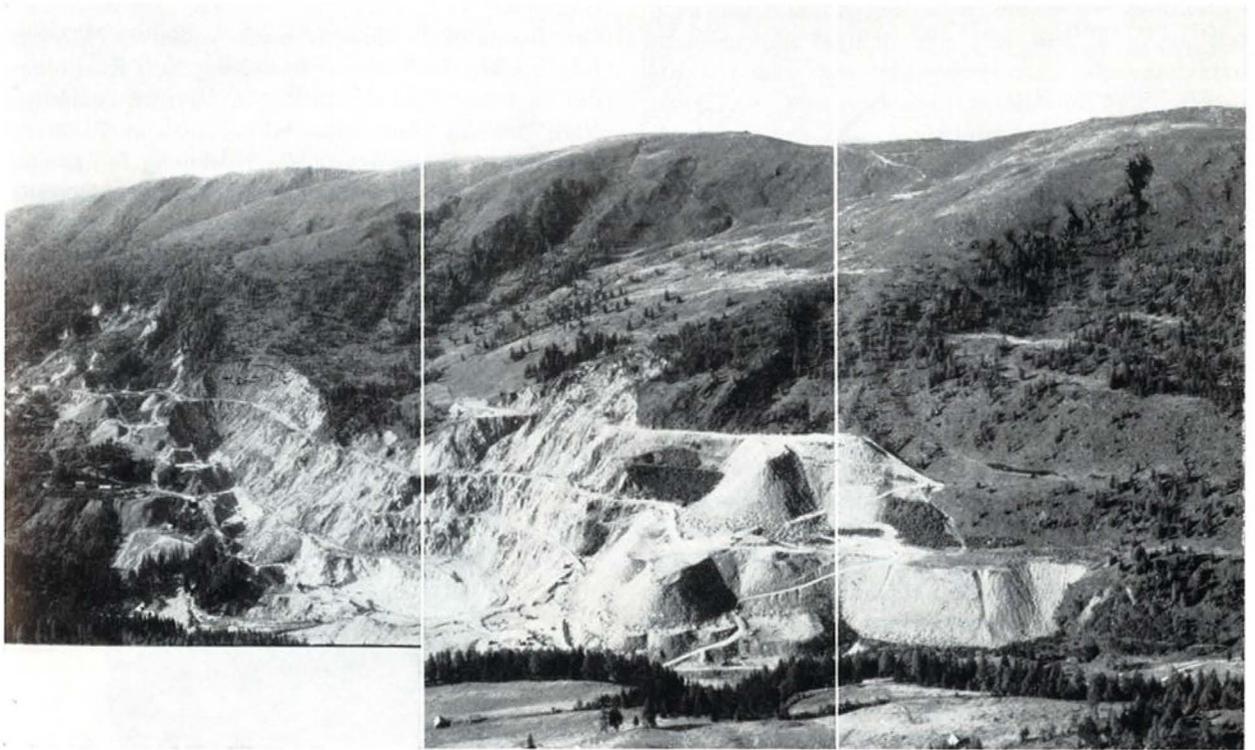


Abb. 10: Übersicht der Großnische des „Talzschubes“ im Hang der Millstätter Alpe (Kärnten) mit dem Tagbauanteil des Magnesitbergbaues Radenthein (aus CLAR u. WEISS 1965) phot. U. ZISCHINSKY .

brüche werden aber heute immer wieder bei geologischer und gefügekundlicher Detailaufnahme von Gebirgshängen gefunden und meist unter dem Begriff „Hangtektonik“ zusammengefaßt.

Die Hangtektonik belegt, daß wir auch in unseren Felshängen des Gebirges nicht nur Produkte der Verwitterung und Erosion sehen sollen, sondern *Gleichgewichtsformen* der Stabilität des Felsgerüsts, die bei Störungen (wie Unterschneidung, extreme Kluftwasserdrucke durch Niederschläge oder Aufstau, Auftrieb) allenfalls Massenüberschüsse abbauen müssen. Diese werden sozusagen erst in zweiter Hand von

freien Gesteinskörpern durch die Abspaltung hangparalleler Platten nachweisbar sind (A. KIESLINGER 1959 u. a. Arbeiten), sonst aber das schon vorhandene Kluftnetz benutzen würden.

Meist aber läßt sich mit der Auflockerung ein Bergabkriechen wie im bekannten Hakenwerfen der Verwitterungszone erkennen, nur viel tiefer reichend. Neuere gute Beispiele sind etwa von Kraftwerksbauten in den Beskiden (ZARUBA 1962), von Brücken unserer Wienerwald-Autobahn (A. KIESLINGER 1962) beschrieben, die großzügigsten aber mit Tiefenerstreckung bis an 200 m hat Cl. BORDET (1959) von

Kraftwerksbauten der französischen Westalpen bekannt gemacht. Für Hangbewegungen dieser Art wird bei uns meist mit STINI die Bezeichnung „Talzus Schub“ gebraucht oder man spricht bei größerer Ausdehnung möglichst neutral bezüglich der Bewegungsform von Felsackungsmassen.

Eine Reihe solcher Talzuschübe aus unseren Ostalpen ist neuerdings in unserem Institut von Herrn U. ZISCHINSKY im Rahmen seiner Dissertation vor allem geologisch und gefügekundlich studiert worden, wobei im Hintergrund der Wunsch nach einem besseren grundsätzlichen Einblick in diese Vorgänge mit Hin-

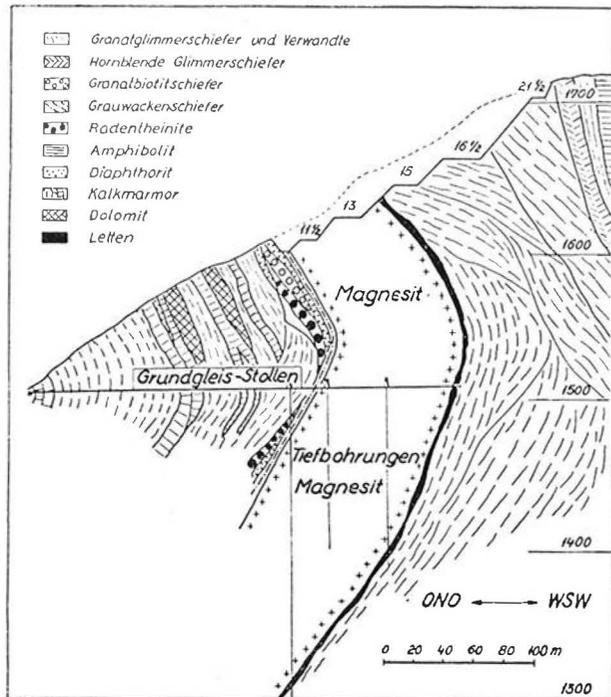


Abb. 11: Geologisches Querprofil durch den Magnesitbergbau Radenthein; Abbeugung der steilstehenden Lagerstätte und der sie einschließenden Schiefer infolge einer gravitativen Fließverformung des sich auflockernden Felskörpers („Hakenwerfen“) bis über 100 m unter Oberfläche. Nach AWERZGER u. ANGEL, 1948.

blick auf die Hänge unserer Staubecken steht. Ich möchte hier nur von einem besonders gut erschlossenen Beispiel, nämlich am Magnesitbergbau Radenthein — Kärnten (siehe E. CLAR und P. WEISS 1965 und Abb. 10 bis 13) wenige Charakteristika herausheben. In dem rund 400 m hohen Hang ist hier über die ganze Höhe reichend eine riesenhafte, muschelbruchartig begrenzte postglaziale Felsabsitzung eingesenkt, im Prinzip ähnlich einer muschelförmigen Rutschungsnische in Tongesteinen. Ihr konvex vorgeschobener Fuß wurde vom Magnesitbergbau in einer Reihe von Tagbau- und Abraumetagen bis gegen 200 m hoch angeschnitten, die Fortsetzung in die Tiefe wird grubenmäßig weiter erschlossen. Durch die beschriebene Felsabsitzung, besser Talzus Schub, ist der an sich steil-

stehende Magnesitkörper und seine Überlagerung aus Glimmerschiefern und Amphiboliten unter Auflockerung des Felsgefüges bis etwa 100 m Tiefe unter der Oberfläche in Form eines gewaltigen *Hakenwerfens* zu flacherem bergwärtigem Einfallen herausgekippt. Die zunächst erwartete, in höheren Teilen nach der Formung vorhandene Basisgleitfläche *fehlt*, hier ist kein durchscherender Bruch eingetreten; die Bewegungsform im Ganzen gesehen war jedenfalls kein Gleiten, sondern zähes *Fließen*.

Durch die Unterschneidung ist seit gut 10 Jahren ein Teil dieser Zuschubmasse — Größenordnung 30 Millionen  $m^3$  — *wieder in Bewegung* geraten, so daß sich die felsige Etagenfront mit einer Geschwindigkeit von einigen mm/Tag wieder ohne jede ablösende Gleitfläche auf breiter Front in den Tagbau vorschob und diesem einen Massenzuwachs von etwa 70.000  $m^3$ /Jahr brachte. Die weitere Bewegung nach Erschöpfung des Tagbaues wird nun photogrammetrisch kontrolliert. Nach den im oben zitierten Bericht von P. WEISS mitgeteilten Daten zeigte die Bewegung ferner einen *Jahresrhythmus* in zweierlei Hinsicht, der zweifellos durch den Wechsel der Wasserfüllung des fließenden



Abb. 12: Nachriß einer streichenden Strecke in der Lagerstätte zum Ausgleich der fortschreitenden Verdrückung und Verschiebung durch deren Verformung im „Talzus Schub“. (aus CLAR u. WEISS)

Felskörpers (Summe der Quellschüttungen um 15 l/sec) und des in ihm wirkenden Kluftwasserschubes erzeugt ist. Einerseits schwankt die absolute Geschwindigkeit mit dem Halbjahr, andererseits zeigten sich auch rhythmische Schwankungen der Fließrichtung, die sich auf den Einfluß verschieden orientierter Klufttrichtungen des Felsgefüges beziehen ließen. Die Verformung wird also durch eine im Kluftgefüge verankerte *Anisotropie* des Gesamtkörpers beeinflusst.

In der Betrachtung als *Ganzes* wie Abb. 10 u. 11 wird man diese stetig verlaufende, ohne irgendwelche durchlaufenden Brüche nach der Tiefe allmählich abklingende Verformung, die unter konstanter Last — abgesehen vom Wechsel der Wasserführung — linear fortschreitet, als Fließen oder Kriechen des Felskörpers bezeichnen müssen; bei Zuwachs von Daten würde sich voraussichtlich ein Fließgesetz ähnlich dem des Eises ergeben.

Gehen wir jedoch in dieser gleichen Masse mit dem Maßstab des direkten Anblickes in die Etagenabbrüche, verändert sich das Bild (siehe Abb. 12, 13). In diesen Betrachtungsbereichen von Metern bis Zehner von Metern drängt der *diskontinuierliche* Aufbau des Felskörpers sich in den Vordergrund und die Verformung löst sich in diskontinuierliche Teilbewegungen der praktisch starren Blöcke („Gefügeelemente“) gegeneinander an den sichtbaren Trennfugen auf. Dabei geschieht eine Auflockerung durch „Sperrausdehnung“, vergleichbar den Erscheinungen des Umlagerungsdruckes im Stollenbau oder auch dem sogenannten „pseudoplastischen“ Hereinwandern von klüftigem Gebirge. Die Bewegung erscheint dabei im Kleinen nicht als Fließen, sondern als *Brechen*.

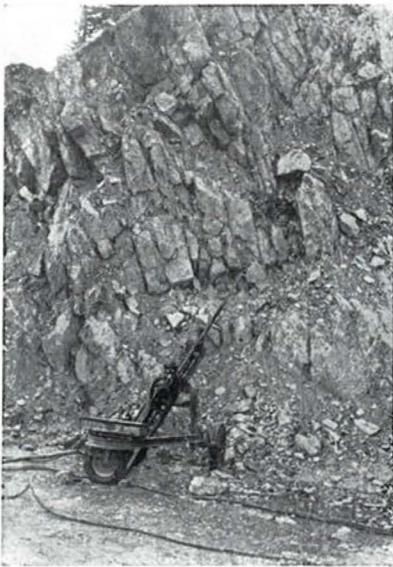


Abb. 13: Anschnitt in der vorrückenden Front einer Abraumetage im Felskörper der hangenden Glimmerschieferserie; Magnesitbergbau Radenthein (aus CLAR u. WEISS).

Das Beispiel soll wieder herausstellen, daß die *gleiche* Felsverformung in verschiedenen *Größenmaßstäben* *verschieden* zu beschreiben ist. Im Sinne einer von B. SANDER 1939 ausgesprochenen Forderung muß das Verhalten eines Gefüges auch durch Kennzeichnung der bei der Deformation bewegten Teile (Gefügeelemente), ihrer Anordnung und ihrer *Größe im Verhältnis zur Größe des Ganzen* beschrieben werden.

Nimmt man also in diesem Sinne die Größe der gegeneinander bewegten Gefügeelemente zum Maßstabe, so hat der Felskörper, wie er in den Etagenauflösungen zu studieren ist, eine Ausdehnung in der Größenordnung des 10- 100-fachen dieser relativ starren Gefügeelemente. Der diskontinuierliche und inhomogene Aufbau kann in diesem Maßstabe nicht übersehen und wohl nur mit bewußten Vorbehalten vernachlässigt werden. Im Sinne der von L. MÜLLER aufgestellten Gliederung des Zerlegungsgrades handelt es sich um ein „*Mehrkörper-*“ bis „*Vielkörper-System*“ im Gegensatz zu einem „*Einkörper-*“ Kontinuum.

Im Gesamtüberblick erschien diese selbe Felsmasse jedoch als ein sich fließend verformender Körper, wenn sie in einer Ausdehnung betrachtet wird, die linear etwa das Ein- bis Mehrtausendfache der gleichen Gefügeelemente beträgt. Wir sind nun in einem statistisch homogenen *Massenverband*, dessen diskontinuierlicher Klüftgefügebau in diesem Maßstabe nur durch die erwähnte mechanische Anisotropie wirksam wird. Nur infolge seiner größeren Ausdehnung fände er sich nun in der oben benützten Gliederung des Zerlegungsgrades von L. MÜLLER trotz grobblockigen Felsgefüges in der Gruppe „*gekörnte Massen*“. In einem kleinstückig zerhackten Felskörper mit einer Größe der Gefügeelemente von angenommen nur 1 cm und darunter würde eine vergleichbare Homogenisierung schon bei einer Ausdehnung von wenigen Zehnern Meter erreicht sein.

Es ist wesentlich, daß der solche Überlegungen leitende *Zerlegungsgrad* ein *Größen-Verhältnis* ist und daher in derselben Felsmasse davon abhängt, einen wie ausgedehnten Bereich man in Betracht zieht; einen Straßenanschnitt von wenigen Metern Höhe oder eine ganze Bergflanke, einen Querschnitt durch ein Streifenfundament oder den Gründungsfels einer Talsperre als *Ganzes*.

Von dieser gefügekundlich begründeten bewußten Beachtung des Größenverhältnisses zwischen Felskörper und Gefügeelementen ist abschließend noch ein Seitenblick auf die Verschiedenheit des *Ausgangspunktes felsmechanischer* Ableitungen angebracht. Etwa im Sinne von Bemerkungen in Aufsätzen von CH. JÄGER (1962), J. TALOBRE (1964), L. MÜLLER u. a. scheinen gegensätzliche Auffassungen darüber zu bestehen, ob das mechanische Verhalten des Naturkörpers „*Fels*“ mit Ansätzen der Kontinuumsmechanik im Allgemeinen, mit solchen der Bodenmechanik oder mit solchen einer eigens dafür zu entwickelnden „*Gefügemechanik*“ wiederzugeben ist, die die Existenz geometrisch geregelter Diskontinuitäten auch rechnerisch berücksichtigt. Ich glaube, unsere der Mechanik selbst bewußt fernbleibenden Betrachtungen zeigen,

daß es eine allgemein gültige Entscheidung zwischen diesen Möglichkeiten nicht geben kann, sondern daß eben die bewußte Beachtung des Größenverhältnisses und der Zahl der beteiligten Gefügebausteine zum Ganzen (also Zerlegungsgrad) zusammen mit der möglichen Mitwirkung einer Wasserfüllung des Fugennetzes dafür maßgebend sein muß, welche Betrachtungsweise in jedem Einzelfalle für zutreffender gehalten wird.

Die Großform des hier herausgegriffenen Talzuschubes mit seiner Abrißnische und konvexen Stirnfront läßt kaum einen Zweifel, daß hier grundsätzlich gleichartige Gestaltungsgesetze wirksam waren, wie in bodenmechanisch rechenbaren sogenannten Rutschnischen von Tonschichten; es handelt sich schon um ähnliche Größenordnungen wie in den gleichfalls im Tonmodell nachahmbaren (H. CLOOS u. a.) Verformungen des großen tektonischen Gebirgsbaues.

Demgegenüber zielt der Aufbau einer eigenen sogenannten „Gefügemechanik“ im Sinne von L. MÜLLER speziell auf eine exaktere Behandlung der diskontinuierlichen *Mehrkörpersysteme*, bzw. Mehrkörperverbände aus einer *begrenzten Zahl* von relativ starren, gegeneinander an vorhandenen Fugen verschiebbaren

Gefügeelementen. Ihr Aufbau weicht *grundsätzlich* von dem der gewohnten Objekte technologischer Untersuchung oder auch der Bodenmechanik ab; denn für diese müssen die Probekörper — man denke an Proben kristalliner Gesteine, Beton oder grobkörnige Böden — wieder mindestens Tausende von Bauelementen des Gefüges (Kristall- oder Bodenkörner) enthalten, um die Forderung nach ausreichender Homogenität zu erfüllen. An diesen Objekten hätte eine vergleichbare „Gefügemechanik“ die Aufgabe, die Festigkeit eines Verbandes aus nur ganz wenigen Kristallen, Kieskörnern oder Tonschuppen rechnerisch zu behandeln. Dafür besteht in diesen Größenbereichen noch kein technischer Bedarf. In unseren natürlichen Felskörpern aber liegen die Fugenabstände und damit die Bauelemente des Gefüges leider sehr häufig in einem solchen Größenverhältnis zum Bauwerk, daß dieses *gezwungen* ist, sich mit einem „Mehrkörperverband“ auseinanderzusetzen. In diesem Sinne bestimmt also die von der Gefügekunde geforderte Beachtung des *Größenverhältnisses* zwischen den *Gefügeelementen* und dem Untersuchungsbereich als *Ganzes* die *Grenzen*, innerhalb derer eine Felsmechanik besondere, ihr eigene Wege begehen muß.

---

Zusammenfassend und abschließend sei also nochmals das Folgende hervorgehoben:

1. Um den Einfluß des Diskontinuitätsgefüges der natürlichen Felskörper oder des Grades ihrer Zerlegung durch Trennflächen auf ihr technisches Verhalten zu beschreiben oder vorherzusagen, ist dieses Gefüge nicht nur in seiner Symmetrie usw. und seinen *absoluten* Maßen, sondern auch in seinem *Größenverhältnis* zwischen den relativ starren Bauelementen und dem Untersuchungsbereich als Ganzes zu betrachten.  
2. In erster Linie dieses Größenverhältnis bestimmt, ob der zu untersuchende Bereich eines Felskörpers infolge Zerteilung durch Diskontinuitäten

a) im Sinne von L. MÜLLER als „Mehr-“ oder „Vielkörper“ (etwa in der Größenordnung des 2 bis 100-fachen der „Gefügeelemente“) gekennzeichnet und sein Verhalten nur mit Berücksichtigung der realen Diskontinuitäten durch eine „Gefügemechanik“ erfaßt werden kann oder ob

b) der Untersuchungsbereich aus einer so großen Zahl von Elementarbausteinen besteht (1000 bis unzählbar, „Massenverband“), daß die Diskontinuität des Gefüges nur in einer statistischen Mittelung berücksichtigt oder vernachlässigt werden kann, wie offenbar meist in der Bodenmechanik oder in der Kontinuumsmechanik.

Der erste Fall liegt in kluftärmeren Felskörpern von der Ausdehnung unserer Bauwerkslastflächen häufig vor und wäre der Aufgabe vergleichbar, in Böden das Verhalten von Verbänden aus nur wenigen Bodenkörnern zu untersuchen.

3. Aus geologischen Beobachtungen ist ablesbar, daß das Fugengefüge geologischer Großkörper in tektonisch gestörten Gebieten durch Verformungen erzeugt ist, die diese Körper bereits in den Bereich ihrer *Bruch- und Fließgrenze* geführt haben. Ihr heutiges Festigkeitsverhalten kann daher nur Entlastungsschleifen entsprechen, die aus dem Bruch- und Fließbereich kommen und dorthin zurückführen; die großen Felskörper sind nicht den *zum* Druckversuch kommenden Gesteinsproben vergleichbar, sondern eher den zerdrückten Probekörper-Resten *nach* dem Druckversuch.

4. Der Versuch einer exakteren mechanischen Analyse von natürlichen Felsverformungen, insbesondere den durch Schwerkraft erzeugten — wie im „Talzuschub“ — verspricht Auskünfte über das Verhalten von Felskörpern in Dimensionen, die um ein Mehrfaches über denen liegen, die in „Großversuchen in situ“ erfaßbar sind. Das ist aber nur in einer Gemeinschaftsarbeit von Geologen und Ingenieuren möglich.

## LITERATURHINWEISE

- Bordet Cl., Les modes de circulation de l'eau dans les terrains cristallins (d'après des observations en galerie); Schriftenreihe: Les congrès et colloque de l'Université de Liège, Vol. 14, 1959.
- Borowicka H., Bodenmechanik — Felsmechanik; Österr. Ing.-Zs. 5 (107.) H. 6, 1962, 192—202.
- Brace W. F., Brittle fracture of rocks; in: State of stress in the earth's crust, Elsevier N. Y. 1964, 111—174.
- Clar E., Gebirgsbau und Geomechanik; Geologie und Bauwesen 25. 1960, 186—190.
- Clar E., Gefüge und Verhalten von Felskörpern in geologischer Sicht, Felsmech. u. Ing. Geol. I. 1963, 4—15.
- Clar E. und Weiss P.: Erfahrungen im Talzusub des Magnesit-Bergbaues Millstätter Alpe; Berg u. Hüttenm. M. H. Leoben, 110. 1965, H. 12.
- Fill R., Kluftrmessung und Talsperrenanlage; Geologie und Bauwesen. 17. H. 4, 1950.
- Jaeger Ch., Bemerkungen zum Problem Felsmechanik und Wasserkraftwerkbau; Die Wasserwirtschaft, 54. 1964, 149—157.
- Kieslinger A., Restspannung und Entspannung im Gestein; Geologie und Bauwesen. 24. 1959, 95 — und andere Arbeiten.
- Kieslinger A., Die Rolle der Geologie bei öffentlichen Bauvorhaben; Accad. Naz. dei Lincei, Quaderno 53, Roma 1962, 37—46, 99—100, 153—155.
- Lauffer H., Gebirgsklassifizierung für den Stollenbau; Geologie u. Bauwesen, 24./1 1958, 46—51.
- Lauffer H. und Seeber G., Die Bemessung von Druckstollen- und Druckschachtauskleidungen für Innendruck auf Grund von Felsdehnungsmessungen; Österr. Ing.-Zs. Jg. 5, H. 2, 1962, 37—48.
- Müller L., Brechen und Fließen in der geologischen und mechanischen Terminologie; Geologie u. Bauwesen. 25. 1960, 218—227.
- Müller L., Der Felsbau; Bd. 1, Enke-Stuttgart 1963.
- Müller L. und Pacher F., Baugologie und Gefügemechanik; Zs. Deutsch. Geol. Ges. 114./2. (1962), 1963, 337—343.
- Rabcewicz L. v. und Sattler K., Die neue Österreichische Tunnelbauweise; I. u. II. Der Bauingenieur, 40. (H. 8) 1965, 189—301.
- Reyer E., Geologische und geographische Experimente; Engelmann, Leipzig 1892, 55 S.
- Sander B., Einführung in die Gefügekunde geologischer Körper; Springer — Wien, Teil I 1948. Teil II 1950.
- Spang J. und Kahler F., Gebirgsdruckbegriffe; Felsmech. und Ing. Geol. I (3—4) (Springer) — Wien 1963.
- Stini J., Behelfsmäßige Untersuchungen der Gebirgsfestigkeit; Geologie u. Bauwesen, 20. 1953, 34—36.
- Talobre J., La mécanique des roches; Dunod, Paris 1957.
- Terzaghi K., Stability of steep slopes on hard unweathered rock; Géotechnique 12. 1962, 251—270.
- Torre C., Berechnung des Gebirgsdruckes in Fels; Geologie und Bauwesen. 18. (H. 2) 1951.
- Turner F. J. und Weiss L. E., Structural analysis of metamorphic tectonites; Mc. Graw Hill, N. Y. 1963.
- Zaruba Qu., Novosad St., Tyrolerova P., Deformations of Cretaceous Sandstones on the Valley-slope of the Moravka River in the Beskidy Mts; Cech. Akad. Geol. Inst. Bocni II, Praha 1962.