

## Bruchhafte Deformation im Gebirgskörper und im Gründungsgestein von Ingenieurbauwerken\*)

Von RUDOLF SCHWINGENSCHLÖGL\*\*)

Mit 31 Abbildungen, 2 Tabellen und 2 Tafeln (Beilagen)

*Ingenieurgeologie  
Bruchhafte Deformation  
Trennflächenanalyse Klüfte*

### Inhalt

Zusammenfassung .....	394
Abstract .....	394
1. Allgemeine baugelogeische Probleme als Folge bruchhafter Deformationen des Gebirges .....	395
2. Die Stellung der Trennflächen in den „allgemeinen“ Klassifizierungssystemen von Gebirgskörpern .....	396
3. Aussagewert und Bedeutung von Trennflächen-Analysen .....	397
3. 1. Kluftbildung .....	398
3. 2. Kluffstellung .....	398
3. 3. Kluffabstand .....	398
3. 4. Klufföffnungsweite .....	398
3. 5. Ebener Kluffflächenanteil .....	399
3. 6. Kluffwandung .....	399
3. 7. Kluffrauigkeit .....	400
3. 8. Klufffüllung .....	401
3. 9. Kluffstreckung .....	402
3.10. Klufftreibungswinkel .....	403
3.11. Durchtrennungsgrad .....	403
3.12. Zerlegungsgrad .....	403
3.13. Kluffkörpergröße .....	404
3.14. Kluffscharen .....	404
3.15. Auflockerungsgrad .....	405
4. Felsbauaufgaben und Trennflächengefüge (bruchhafte Verformung) .....	405
4.1. Bemerkungen zur Bruchtektonik der Böhmisches Masse .....	405
4.1.1. Felsbauaufgaben bei Großprojekten im Kristallin der Böhmisches Masse .....	406
4.1.1.1. Kamptal-Sperren .....	406
4.1.1.2. Projekt CERN-Teilchenbeschleuniger .....	406
4.1.1.3. Donau-Kraftwerk Aschach .....	406
4.1.1.4. Felsgleitung in metamorphen Gesteinen des Thayatales, NÖ .....	406
4.1.2. Zusammenfassung und Vergleich von Trennflächenausbildungen an den ausgewählten Felsbaubeispielen .....	407
4.2. Bemerkungen zur Bruchtektonik im östlichen Flyschgebiet .....	409
4.2.1. Felsbauaufgaben im Flyschgebiet .....	409
4.2.1.1. Autobahn A1 (Westeinfahrt), SW Dürrwien .....	409
4.2.1.2. Westautobahnabschnitt Mondsee – Seewalchen .....	409
4.2.1.3. Donaukraftwerk Greifenstein .....	409
4.2.1.4. Bruchstrukturen im Flysch der Kahlenberger Schichten .....	411
4.2.2. Vergleich der ausgewählten Beispiele mit ihren Trennflächenlagen im östlichen Flyschgebiet .....	411
4.3. Bemerkungen zur Bruchtektonik an der Überschiebungszone Nördliche Kalkalpen auf Flysch .....	412
4.3.1. Felsbauaufgaben im Grenzbereich der Nördlichen Kalkalpen/Flysch-Überschiebung .....	413
4.3.1.1. Massenbewegungen bei Plankenstein, NÖ .....	413
4.3.1.2. Massenbewegungen an der Flysch/Kalkalpen-Grenze in Vorarlberg .....	414
4.3.2. Zusammenfassung und Vergleich .....	414
4.4. Bemerkungen zur Bruchtektonik der Nördlichen Kalkalpen .....	414
4.4.1. Betrachtungen über die Verformbarkeit von Sedimentgesteinen .....	414
4.4.2. Felsbauaufgaben in den Nördlichen Kalkalpen .....	415
4.4.2.1. Bruchtektonik im Toten Gebirge .....	415
4.4.2.2. Die geplante Bogensperre „Kaiblingmauer“ .....	418
4.4.2.3. Der Wetterin-Stollen Ost .....	419
4.4.2.4. Die Hochstegbrücke im Schwarzatal, NÖ .....	419

\*) Habilitationsschrift zur Erlangung der Lehrbefähigung an der Universität für Bodenkultur.

\*\*) Anschrift des Verfassers: Ing. Dr. RUDOLF SCHWINGENSCHLÖGL, Institut für Bodenforschung und Baugeloge, Abteilung für Baugeloge, Universität für Bodenkultur, Gregor Mendel-Straße 33, A-1180 Wien.

4.4.2.5. Lawinengalerie Schwarzatal .....	420
4.4.2.6. Hangbrücke Piestingtal .....	421
4.4.2.7. Gscheidl-Stollen .....	421
4.4.2.7.1. Petrographie des Gscheidl-Stollens (Westlichster Abschnitt) .....	422
4.4.2.7.2. Betrachtungen zur Stollengeometrie .....	422
4.4.2.7.3. Tektonik und Trennflächen .....	423
4.4.2.7.4. Gebirgsqualität im Gscheidl-Stollen .....	423
4.4.3. Zusammenfassung und Vergleich von Klufsystemen im Ostteil der Nördlichen Kalkalpen .....	424
4.5. Bemerkungen zur Bruchtektonik in der nordöstlichen Zentralzone .....	425
4.5.1. Felsbauaufgaben in der Zentralzone .....	426
4.5.1.1. Böschungen in Phyllitgesteinen .....	426
4.5.1.2. Kippungsbruch („toppling failure“) in Phylliten .....	427
4.5.1.3. Der Einfluß von Gesteinstrennflächen bei der Boden- und Felsklassifizierung .....	428
4.5.2. Zusammenfassung und Vergleich .....	428
4.6. Ingenieurgeologische Charakteristika zur Felsklassifizierung (Projekt 672) .....	429
4.7. Bemerkungen zur Bruchtektonik im Tertiär des südlichen Wiener Beckens .....	429
4.7.1. Felsbauaufgaben in den tertiären Ablagerungen des Wiener Beckens .....	429
4.7.1.1. Die Tegelgrube Leopoldsdorf .....	429
4.7.1.2. Die Tegelgrube Sooß .....	430
4.7.1.3. Klüftung und Störungen in Peliten des Wiener Beckens .....	431
4.7.2. Zusammenfassung und Vergleich .....	431
5. Interpretation der ermittelten $\sigma_1$ -Richtungen .....	432
6. Schlußbetrachtungen über tektonische Spannungen und Bruchmechanik .....	434
Literatur .....	436

## Zusammenfassung

Die baugewissenschafliche Bedeutung von Trennflächen im Gestein und im Gebirge stellt für die Projektierung und Durchführung von Felsbauvorhaben eine wichtige geowissenschaftlich-praktische Grundlage dar.

Zum einen ist der Fels, welcher von Klüften, Schieferungs- und Schichtflächen geprägt ansteht, ein Material, das auf Beanspruchungen wie Druck-, Zug- und Scherkräfte, aber auch in einer Kombination dieser Kräfte verschieden reagiert. Zum anderen wird er deformiert und wenn seine Festigkeit überschritten ist, zerbricht er.

Dies alles geschieht unter dem Einfluß von Spannungen, die als Folge der Tektonik oder/und als Folge von Lastumlagerungen durch einen Eingriff von außen, auf diesen Felskörper einwirken.

Felsbauprobleme allgemeiner Natur, die Bedeutung der Trennflächen in einigen Gebirgsklassifizierungen, wie der Aussagewert und Nutzen von Trennflächenanalysen werden hier beschrieben.

Weiters wird der Vergleich von verschiedenen Felsbauvorhaben in Österreich, einem Forschungsprojekt und mit aus der Literatur bekannten Projekten, gegeben.

Ziel ist die Ermittlung der größten Hauptnormalspannungsrichtung im Gebirge, dargestellt an besonders ausgewählten Standorten und Felsbauaufgaben. Auch die Korrelation mit der Tektonik (= primärer Spannungszustand) anhand von kluffstatistischen Analysen zuordenbarer Scherklüfte wird versucht.

Dafür wurden aus der Geländepraxis und der regionalen Kenntnis des Verfassers eine Auswahl von großen Felsbauvorhaben, besonders aus dem Osten Österreichs herangezogen.

## Ruptural Deformation in Rock Masses and in Basis Rocks of Engineering Constructions

### Abstract

Joints and joint orientations in the rock mass are very important for projecting and constructing of most of the surface and underground constructions in a rock mass. Therefore engineering geology is the basis to describe the behavior of the solid rock mass.

Rock masses are first of all characterised by joints, foliation and bedding planes. Combined stress consisting of pressure-, tension and shearing forces led to a deformation. An exceeding of rock strength is the reason for a rock failure.

Tectonic stress or a concentration of stress caused by a rock construction are the two stress modes considered. The importance of parting planes in some rock mass-classifications and the utility of joint analysis are described.

Regarding joint orientations a comparison of various rock mass constructions in Austria are presented.

The aim is the investigation of directions of the major principal normal stress in the rock mass on selected sites. Also a correlation is given between the tectonic stress and the stress direction constructed by joint analysis of conjugated shear joints. Examples for these considerations were a number of rock mass constructions in the eastern part of Austria.

# 1. Allgemeine baugelogeische Probleme als Folge bruchhafter Deformation des Gebirges

Der Einfluß bruchhafter Verformung in einem Festgestein tritt in den Gebirgsmassiven durch die nachfolgende, morphologische Ausformung unter Einbeziehung sämtlicher Verwitterungserscheinungen deutlich zu Tage. Er ist hier vor allem für die Bildung von Tälern und Flußläufen (A.E. SCHEIDEGGER, 1979) der wichtigste Grund. Besonders die Grundrißgestalt wird nach H. BREMER (1989) durch die Bruchtektonik festgelegt, nicht jedoch die Gestaltung des Gebirges selbst. Diese terrestrischen Großformen sind eine Folge ganz bestimmter kinematisch-mechanischer Vorgänge im Gestein. Erkennbar werden diese Zusammenhänge (Gesteinsklüftung bzw. geologische Störungen und Landschaftsbild) oft erst, nachdem in vielen Einzelaufschlüssen mehrere hundert bzw. tausend Klüfte gemessen und analysiert oder die stereoskopische Auswertung von Luft- und Satellitenbilddaten durchgeführt wurden. Die Klüftung bestimmt überdies wesentlich die mechanischen Eigenschaften der einzelnen Klüftkörper, einer Felswand oder eines Gebirgstales.

Ist in Gebirgstteilen beispielsweise durch das Abschmelzen des Gletschereises somit auch die Auflast des Gebirges wesentlich kleiner geworden, so treten vor allem in den Einhängen deutliche Entspannungerscheinungen auf. Talzuschub (J. STINY, 1941) und Doppelgratbildungen (O. AMPFERER, 1939 und U. ZISCHINSKY, 1969) sind die Folge. Sichtbar werden diese Deformationsakte im großen als Rotation des Flächengefüges, wie auch im kleinen als Korngefügeveränderung (B. SANDER, 1948). Auch Entspannungs- bzw. Entlastungsklüfte treten nach Lastwegfall auf, wie sie A. KIESLINGER (1958) in kluffarmen, interglazialen Konglomeraten genauso wie in skandinavischen Graniten beschrieben hat. Sie durchziehen dabei in langanhaltenden Fugen nahezu oberflächenparallel die Gebirgshänge. Allen diesen Vorgängen gemeinsam ist eine sehr langsame Änderung des Spannungszustandes im Gebirge bzw. das "Sichändern" der jeweiligen Hauptspannungsrichtungen.

Beinahe oberflächenparallele (hier ist eine mehr oder weniger horizontale Geländeoberfläche gemeint) Klüfte (cf. Neubrüche) können auch bei erosionsbedingtem Wegfall von Gesteinsmassen auftreten. So haben sich beispielsweise beim Baugrubenaushub für das Hauptbauwerk des Donaukraftwerkes Greifenstein in einem steil nach SE einfallenden, wohlgeschichteten Quarzsandstein völlig neue Klüfte gebildet. In den Baugrubenwänden ließen sich denn auch diese fast sölilig verlaufenden Trennflächen gut beobachten. Da die ss-Flächen und die Klüfte wie auch die spezielle Lithologie des Flyschgesteines aus der Kartierung untersucht und gut bekannt war, konnte es sich nur um Entlastungerscheinungen handeln (R. SCHWINGENSCHLÖGL, 1988).

Anders ist die Situation bei mehr oder weniger hangparallelen Klüften zu bewerten, wo manchmal mehrere Meter mächtige Gesteinsplatten (sehr gut in den metamorphen Gesteinen unserer Alpen ausgebildet) als regelrecht abgleitgefährdet vorliegen.

Während nun der vorhin genannte Entlastungsvorgang in den klastischen Sedimentgesteinen bereits durch die ständige Bauwerkslast weitgehend kompensiert werden kann, bedarf es bei technischen Projekten in Gebirgshängen doch umfangreicherer Maßnahmen.

Straßeneinschnitte verursachen manchmal relativ hohe Böschungen, an denen „bewegungswillige“ Gesteinsplatten zu einer Gefahr werden können. Es hängt nun von der Petrologie der geklüfteten Gesteine und der Ausbildung dieser speziellen Klüfte ab, ob die vorhandene Rauigkeit ausreichend hoch ist, um die hier geweckten Reibungskräfte aufnehmen zu können. Oder ob für die Reibung, welche durch tonige (= gleitfähige) Klüftzwischenmittel herabgesetzt wird, eine gewisse Gebirgsverbesserung erzielt werden muß, um der Bewegung Einhalt zu gebieten. In vielen Fällen reicht es aus, die Gebirgsfestigkeit durch eine Art von Verdübelung zwischen den einzelnen „Platten“ geringfügig zu erhöhen. Bei anhaltendem Kriechen sind allerdings vorgespannte Felsanker unumgänglich. Diese bewirken durch eine induzierte Druckspannung im Fels (idealisiert: doppelkegelförmig um den Ankerverlauf) das Anwachsen der Reibungsfestigkeit in den trennenden, hangparallelen Klüften.

Ist bei den beiden genannten Trennflächenformen (Schichtflächen ... ss und Schieferungsflächen ... sf) die Richtung und die Art der Beanspruchung auf Scher- und Zugspannungerscheinungen zu begrenzen gewesen, so sind die sogenannten „konjugierten Scherflächenscharen“ bereits einem wesentlich vielfältigeren Spannungsgeschehen zuzuschreiben. Schon beim Zuordnen, d.h. genetisch gleichwertige Klüfttypen statistisch zusammengefaßt zu betrachten, ergeben sich erhebliche Schwierigkeiten.

Die einfach scheinende Unterscheidung in Trenn- bzw. Zugklüfte und Gleitungs- bzw. Scherklüfte ist im Gelände oft nicht eindeutig durchzuführen. Ob ein konjugiertes Scherflächensystem vor Bruchausbildung nicht doch noch einer gewissen Zugspannung unterworfen war, ist nicht mit Sicherheit anzugeben. Deswegen sollten Ermittlungen des Beanspruchungssystems nur im Verein mit in-situ Messungen oder anderen Untersuchungskriterien, wie Styrolithen, Gleitstriemungen und Bohrlochrandausbrüchen angestellt werden. Klüftbeschreibungen und deren Zuordnung zu bestimmten Spannungsbildern müssen sehr subtil durchgeführt werden. Darauf haben schon sehr viele Autoren hingewiesen (J. STINY, 1929; L. MÜLLER, 1963; G.D. ASHGIREI, 1963; P. BANKWITZ, 1966 und 1976; H. BOCK, 1972; G. GREINER, 1976; K. PETERS, 1980 sowie H. BOCK, 1980).

Welche Rolle spielen nun die Trennflächen, insbesondere die Klüfte, in der Baugelogeie? Von jenen Fällen abgesehen, wo die „geotechnisch wichtigen“ Fugen die Schicht- oder Schieferungsflächen sind, kommt meist den Klüften die Hauptbedeutung zu. Weiters ist die Art der Klüftfüllungen und die Morphologie der Klüftwandungen von großer Wichtigkeit.

Wie oft hat L. MÜLLER-SALZBURG in unzähligen Publikationen und bei den Geomechanik-Kolloquien in Salzburg die überragende Wichtigkeit der Klüfte betont. Daß aber in den letzten Jahren häufig von „geklüfteten Medien“ gesprochen wird, wie das bei vielen Felsmechanikern üblich ist, scheint etwas grob vereinfacht.

Noch immer haben die petrogenetischen Merkmale bei der Ermittlung von Gesteins- und Gebirgseigenschaften entscheidenden Vorrang – oder sollten diesen haben! Denn es kann nicht egal sein, ob sich aus einem feinkörnigen Granit oder einem Quarzit (mit vielleicht ähnlichem Festigkeitsverhalten) in den Trennflächen des ersteren durch Verwitterung der Feldspäte Kaolinit bzw. durch Zersetzung der Glimmer Tonminerale bilden. Beim zweiten Gestein liegt in den Klüften aber Quarzgrus vor, der den Reibungswinkel des Zwischenmittels doch entscheidend anhebt.

Augenscheinliche Beispiele für weitgehend klüftungsabhängige Geländeformen sind die Taleinhänge und die Böschungen bei Verkehrswegebauten. Trennflächen im Felsgestein, aus ss (= Schichtflächen) oder sf (= Schieferungsflächen) hervorgegangen, sind entweder als festigkeitsfördernd oder -hemmend eher leicht zu erkennen. Bei der Anlage von uneinheitlich ausgebildeten Klüftscharen, oder bei dem Fehlen einer Regelung des Makrogefüges, wird die Wahl einer Böschungsneigung hinsichtlich der Standfestigkeit des angeschnittenen Gebirges zur ernsthaften Felsbauaufgabe.

Da sich aber bei Beanspruchung ein durch Fugen (Trennflächen) in seinem Kraftfluß unterbrochener Fels einer numerischen Betrachtungsweise durch den Bodenmechaniker weitgehend entzieht – es sei denn, er beschränkt sich nur auf die Berechnung der Eigen-

schaften des Klüftzwischenmittels – ist gerade die Abgrenzung von Homogenbereichen ein wichtiger Bewertungsfaktor. Hilft er doch, einen Aufschlußabschnitt genau zu beschreiben und für den Geomechaniker hinsichtlich ganz bestimmter Gesteins- und Gebirgsparameter, einzuengen.

Besitzt man von einem Projektareal bereits geologische Informationen, so kann man diese mit neu eingemessenen Daten verknüpfen. Um für die Baudurchführung notwendige Gesteins- und Gebirgskennwerte statistisch zu stützen, müßten sehr viele neue Untersuchungen vorgenommen werden. Wenn aber aus früheren Analysen oder aus Tabellen Kennwerte vorliegen, braucht man nur mehr einige wenige neue Bestimmungen durchführen. Auch Schätzungen und Erfahrungswerte von Materialfestigkeiten können durch gezielte Prüfungen einiger Proben mit geringem Aufwand verbessert werden.

Ermöglicht wird dies durch das sogenannte „BAYES-Theorem“ (s. dazu K. STANGE, 1977).

Damit können bereits vorhandene Informationen eines geologischen Körpers A mit neu gemessenen Daten (desselben geologischen Körpers A) verknüpft werden. Besitzt man gewisse Vorkenntnisse über den geologischen Körper A und erhält durch zusätzliche Stichproben neue Informationen, so kann die Standardabweichung vom bekannten zum erwarteten Mittelwert erheblich verkleinert werden.

## **2. Die Stellung der Trennflächen in den „allgemeinen“ Klassifizierungssystemen von Gebirgskörpern**

Vergegenwärtigt man sich die seit etwa 1962 erstmals publizierten Vorschläge (R.E. SCHIMMER, 1975) für eine „generelle Gebirgsklassifizierung“, so sieht man, daß die Bestimmung der einaxialen Gesteinsdruckfestigkeit besonders interessiert. Ebenso wichtig ist die genaue geotechnische Kenntnis des gesamten Klüftinventars (siehe Pkt. 3.1. bis 3.15.).

Es ist auch bezeichnend, daß von den geologisch relevanten Parametern der Klüftabstand und die geotechnischen Eigenschaften der Klüftwände, wie auch Klüftfüllungen, in den Klassifizierungssystemen am häufigsten verwendet werden (s. auch R.E. SCHIMMER, 1975). Die Trennflächensysteme in einem Gebirgskörper stellen ein sehr komplexes felsmechanisches Problem dar. Bei der Beurteilung einer Gesteins- und Gebirgseigenschaft aber sind sich die Baugeologen und die Bauingenieure nicht immer einig, welcher Parameter wichtig ist und welcher vernachlässigt werden könnte.

Betrachtet man die verschiedenen Klassifizierungsversuche auch als einen Ansatz zur Verständigung des Geologen mit dem Bauingenieur (K. W. JOHN, 1977), so ist vor allem stark auf die praxisorientierte Aufgabe Bezug zu nehmen.

Das größte Problem meiner Ansicht nach, liegt wohl in dem Umstand, daß jedes nachfolgende und meist auf einem schon vielfach erprobten Klassifikationschema aufbauende, noch um mindestens einen Para-

meter mehr umfaßt! Sicherlich wird man einwenden, daß für eine Gebirgsbewertung oft nur wenig Zeit zur Verfügung steht und man deswegen möglichst viele, oft auch zu „akademische Parameter“ untersuchen muß!

Für den in der angewandten Geologie Tätigen und noch vielmehr für den eigentlichen Anwender sollten vorerst nur jene Parameter ausgewählt werden, welche im Gelände ohne großen Material- und Geräteaufwand erhoben werden können.

Bei jeder Klassifizierung sollte immer sofort die Felsbauaufgabe im Vordergrund stehen, aus der sich dann die Gewichtung der einzelnen Kennwerte gut herauschälen läßt. Im Projektstadium sind daher folgende Aufschlüsse und Untersuchungen zu fordern:

- Oberflächenkartierung
- Kernbohrungen
- Schurfröschchen („Baggerschlitze“)
- Schächte
- Seismische Untergrunderkundungen

### **Oberflächenkartierung**

Hier können sämtliche Trennflächen (= TRFL) erfaßt und sollten sofort nach ihrer Bildungsweise geordnet werden. Statistische Aussagen sind über die Lagenkugeldarstellung und eine EDV-gerechte Verarbeitung gut herstellbar. Meist können dabei schon die „geotech-

nisch wichtigen“ Trennflächen oder -scharen erkannt werden.

### Kernbohrungen

Die Bohrkern orientiert entnommen, liefern eine zusätzliche Information über die räumliche Anordnung des Gesteinsgefüges. So kann bereits über den RQD-Index (Rock Quality Designation) eine erste, grobe Abschätzung über den Felszustand erreicht werden. Scher- und Druckversuche an Proben sind durchführbar.

### Schurfröschen

Vom Bagger hergestellte Probeschlitze liefern eine sehr schnelle Auskunft über die Trennflächen im Fels. Voraussetzung ist allerdings eine nur geringmächtige Lockergesteinsüberlagerung.

### Schächte

Diese bringen wesentlich bessere Daten, weil sie bis in Tiefen von 10 m und mehr durchaus herstellbar sind. Hier ist das TRFL-Inventar meist sehr gut zu erfassen. Auch der räumliche Auflockerungs- und der Durchtrennungsgrad ( $\alpha$ ) sind bei dieser Methode mit recht guter Genauigkeit zu bestimmen. Die Raumlagen der TRFL sind gut zu beschreiben und die Klufztzwischenmittel zu beproben.

### Seismische Untergrunderkundungen

liefern kaum direkte Aussagen über die Klüftung und die Lagerungsverhältnisse von Gesteinen. Eher läßt sich eine Auflockerungsschwarte von einem unversehrten, gering geklüfteten Gebirge durch die unterschiedlichen Laufzeitgeschwindigkeiten abgrenzen.

Aus diesen fünf genannten Möglichkeiten ist ersichtlich, daß sich eine Gesteins- und Gebirgsklassifizierung – mit dem Schwerpunkt TRFL-Erkundung – sehr wohl erstellen läßt, um so für jedes technische Projekt bestimmte Folgerungen ableiten zu können:

- Homogenbereiche abgrenzen, bezogen auf die Felsbauaufgabe.
- Ermittlung von jenen kritischen Bereichen, die einer zusätzlichen Erkundung bedürfen.
- Weiters die Notwendigkeit, unsichere Kennwerte durch weitere Parameterstudien zu ergänzen und
- letztlich die Aussage über die Eignung einer Projektstelle zu treffen.

Aus der Vielzahl von Klassifikationsversuchen sei jener von Z.T. BIENIAWSKI (1973) herausgegriffen, da hier mit Ausnahme der einaxialen Druckfestigkeit alle Parameter (s. Kap. 3) im Gelände bestimmbar sind. Überdies strebt dieses Schema nicht sofort die spezielle Gebirgsklassifizierung an, sondern es wird zunächst der entscheidende Einfluß der Kluftrichtungen für die Qualität des betreffenden Gebirges bewertet.

N. BARTON et al. (1974) haben ebenfalls dem Trennflächeninventar große Bedeutung zugemessen. Nur machten sie die Gebirgsqualität zusätzlich vom Überlagerungsdruck und dem SRF (= stress-reduction-factor) abhängig. Das ist vollkommen richtig, denn nirgendwo befindet sich ein geologischer Körper in einem spannungsfreien Zustand! Damit wird klar, daß dieses System bereits als „spezielle“ Gebirgsklassifikation verstanden werden soll. Auch die primären Spannungsverhältnisse des Gebirges aus der Tektogenese fließen bereits in diesen SRF ein. Im Gegensatz zum System von N. BARTON et al. (1974), deren Qualitätswerte vornehmlich im Tunnelbau Eingang finden, zieht Z.T. BIENIAWSKI auch Gründungen und Felsböschungen als Anwendungsfälle heran.

E. FECKER & G. REIK (1987) haben recht, wenn sie allen bisherigen Klassifizierungsversuchen eher skeptisch gegenüberstehen. Ein Gebirge und dessen umfassende, komplexe geotechnische Eigenschaften lassen sich nicht in einer Ziffer beschreiben. Aber die Näherung auf eine einzige Zahl hin wird sicherlich immer größer und besser werden, je mehr Einzelparameter nicht nur geologisch-statistisch, sondern auch quantitativ erfaßt werden können. Es liegt nur an den Baugeologen selbst, eine große Anzahl an Felskennwerten beizubringen, wie dies ja schon im anglo-amerikanischen Raum bereits üblich ist (A. JUMKIS, 1983; R.D. LAMA & V.S. VUTUKURI, 1978). Dann wird sicherlich der Weg von der jahrelang gepflogenen beschreibenden Geologie langsam – bestärkt auch durch eine internationale Abstimmung wichtiger felsmechanischer Begriffe – zu einer zumindest semiquantitativen Bewertung führen. Bestimmte Kenngrößen, wie beispielsweise das Formänderungsverhalten von Gestein und Gebirge sowie die Nichtlinearität von Festigkeitseigenschaften (E. FECKER & G. REIK, 1987, S. 369ff) werden aber sehr schwer miteinander zu vergleichen sein. Nicht zuletzt deshalb, weil ein Gebirge auch durch die Intuition des Bauingenieurs oder des Baugeologen zu bewerten sein wird. Für jedes größere Projekt ist daher im Sinne von L. MÜLLER-SALZBURG ein spezielles Klassifizierungssystem anzustreben.

## 3. Ausagewert und Bedeutung von Trennflächen-Analysen

Über die primäre Bedeutung einer Kluft als Beweis für eine bruchhafte Verformung im Fels muß kaum mehr diskutiert werden, wohl aber noch über die felsmechanische Behandlung des gesamten Trennflächeninventars. Die Gründe dafür sind wohl in der historisch ausgerichteten Betrachtungsweise der Geologie zu suchen. Die folgende Übersicht möge die Fülle der Einzelparameter aufzeigen:

- Kluftbildung
- Kluftstellung
- Kluftabstand
- Kluftöffnungsweite
- Ebener Kluftflächenanteil
- Kluftwandung
- Kluftrauigkeit
- Kluftfüllung

- Klufsterstreckung
- Klufstreibungswinkel
- Durchtrennungsgrad
- Zerlegungsgrad  $Z = f$  (Kluftziffer, Durchtrennungsgrad)
- Kluftkörpergröße (technische Gebirgsfazies)
- Kluftschar(en)
- Auflockerungsgrad (linear und räumlich)

### 3.1. Kluftbildung

Die Kluft selbst ist hier als genetisches Problem zu sehen, nämlich, ob es sich um Absonderungsklüfte, Trenn-, Scher- oder Verschiebungsbrüche handelt. Die Notwendigkeit der Festlegung im Gelände in eine der genannten Entstehungsformen wird erkennbar.

Da in der felsmechanischen Betrachtungsweise auch die sf- und ss-Flächen inkludiert sein müssen, sind sie als Trennflächen in ihrer mechanischen Wirksamkeit den Klüften gleichzusetzen. Eine sf-Fläche ist ebenso auch als potentielle Trennfuge mit verminderter Scherfestigkeit anzusehen – das zeigen ja schon die eingeregelt Mineralaggregate sehr deutlich! An einer ss-Fläche andererseits können bei Beanspruchungen ebenso wesentlich früher Verschiebungen erwartet werden, als im gesunden Gestein innerhalb eines Sedimentationsereignisses.

### 3.2. Kluftstellung

Die räumliche Anlage von Klüften bzw. Kluftscharen bestimmen in manchen Fällen die Geometrie und Position eines technischen Projektes. Die Darstellung der erhaltenen Geländedaten erfolgt vorzugsweise in Form der unteren, offenen Hälfte der Lagenkugel, wo die EDV-gestützte Verarbeitung heute dem Geologen schon viele Möglichkeiten eröffnet.

Es gibt verschiedene Auffassungen über die statistische Ermittlung von Trennflächen im Schmidt'schen Netz der Lagenkugel. So geben F. KOHLBECK & A.E. SCHEIDEGGER (1976) an, daß zur Ermittlung von drei Kluftpolmaxima (um einen parallelepipedischen Kluftkörper zu konstruieren) nur 12 bis 15 Kluftmessungen nötig sind. Sie unterlegen diese Theorie auch mit Beispielen aus mehreren Aufschlüssen, schränken aber ein, daß dies nur funktioniert, wenn solche Maxima überhaupt vorhanden sind.

Dazu ist anzumerken, daß in der Baugewandologie sehr häufig nicht sofort ersichtlich wird, wo überhaupt Maxima der Kluftscharen liegen. Hier wird es nun schwierig, abzusehen, wie viele Messungen man überhaupt machen soll.

Geht man bei statistischen Behandlungen von Trennflächen vom „Gesetz der großen Zahl“ aus, bei dem Schwankungen zufälliger Art gegenüber den gesetzmäßigen zurücktreten (L. MÜLLER, 1963), so ist diese geringe Anzahl von 15 Klüften sicher geologisch und statistisch nicht ausreichend. L. MÜLLER schreibt 1963:

„... Man fülle das Diagramm so lange, bis man glaubt, es zu verstehen oder noch länger ...“

F. KOHLBECK & A.E. SCHEIDEGGER räumen aber andererseits ein, daß die Anzahl der Messungen immer so groß sein sollte, um ein eindeutiges Maximum zu erhalten.

Nun, beide Standpunkte ähneln einander doch sehr, sodaß ich meine, es weiterhin dem kartierenden Geologen „vor Ort“ zu überlassen, mit welcher Datenmenge er auskommen wird. Tragen nämlich Gesteinsaufschlüsse ihre drei Maxima deutlich zur Schau, wie man sie zur Zeichnung des Kluftkörpers oder zur Ermittlung von Hauptspannungsrichtungen benötigt, so würden im Extremfall nur drei Messungen genügen, für jede Kluftschar eine! Wo dies nicht sofort sichtbar wird, kann bei schlechten Aufschlußverhältnissen eine Mehrfachaufnahme von Klüften an verschiedenen Stellen ohne weiteres notwendig werden, um eventuell vorhandene Kluftpolmaxima herauszuarbeiten!

### 3.3. Kluftabstand

Trennflächenabstände sind bei Schieferungs- und/oder Schichtflächen, die ja parallel oder subparallel verlaufen, einfach zu bestimmen. Auch orthogonal angelegte Klüfte, wie sie in Karbonatsedimenten häufig auftreten, sind noch einfach zu bemaßen. Hier stimmt auch die statistische Aussage gut mit der Wirklichkeit überein.

Problematisch wird die Abstandsermittlung aber bei nicht parallel oder stark gekrümmt verlaufenden Trennflächen. Um eine einigermaßen statistisch brauchbare Aussage zu erhalten, sollte man eine beliebige Meßgerade nicht zu kurz wählen.

Kluftabstandsermittlungen nach H. RICHTER et al. (1976), für jede Kluftschar getrennt ausgeführt, ergeben die Abstandsverteilung, den Mittelwert, die Streuung, die Variationsbreite der Kluftabstände für jede Trennfläche, wie auch ein mittleres Kluftkörpervolumen und die Kluftkörperform.

Am wohl aussagekräftigsten sind aber Messungen, welche auf die einzelnen Kluftkörper konzentriert werden (H. RICHTER et al., 1976, S. 240f). Die dabei erhaltenen Meßwerte können den TRFL-Scharen zugeordnet und statistisch ausgewertet werden. Eine Zufälligkeit in der Auswahl wird ebenfalls gewährleistet, was bei der Kluftabstandsmessung an einer Meßgeraden nicht immer gegeben ist. Hier erhält man mathematisch exakt einen mittleren Kluftkörper. Auch die Volumensverteilungen der Kluftkörper lassen sich wesentlich genauer berechnen. Diese Angaben gelten zumindest für einen Kluftkörper, der prismatisch, plattig, säulig, kugelig oder kubisch sein kann.

### 3.4. Kluftöffnungsweite

Die Kluftöffnungsweite läßt sich bei parallel verlaufenden Kluftufern eindeutig bestimmen. Weniger aussagekräftig für den Gebirgskörper sind allerdings jene Messungen, welche nur an der freien Felsoberfläche durchgeführt werden. Bei sich nach innen zu verjüngenden oder erweiternden Klüften ist die Angabe der Öffnungsweite alleine zu wenig.

Da die Teilbeweglichkeit der einzelnen Kluftkörper, wie auch das hydraulische Verhalten (s. C. LOUIS, 1967) sehr stark von diesem Parameter bestimmt werden, ist die Tiefenerstreckung einer Kluft ein weiteres wichtiges Bestimmungsmerkmal. Auch der Auflockerungsgrad oder beispielsweise eine Injektionsgutaufnahme hängen weitgehend vom Öffnungsbetrag ab.

Könnte man hingegen für einen Felskörper, je nach Beanspruchungsart, Zonen der Kraffteinleitung oder die Spannungsspitzen (mittels FEM = Finite Element Method) schon im Plan und danach im Gelände festlegen, dann wäre die Angabe von Öffnungsbeträgen neben Tiefererstreckung der Klüfte durchaus sinnvoll. Vielleicht führt auch hier die Methode, sehr viele Klüftöffnungen zu messen, zu statistisch brauchbaren Abschätzungen. Sehr vielfältig sind allerdings die Randbedingungen dabei, wie: primärer und sekundärer Spannungszustand, Lithologie, Bauwerkslast, Lastwechseleinwirkungen, Aushubvorgänge, etc.

Statistische Untersuchungen in verschiedenen Gesteinen haben gezeigt, daß die Klüftöffnungen nach einem anfänglichen Größtwert (s. K. PETERS, 1980, S. 865ff) sich bis zu ihrer minimalen Öffnungsweite relativ rasch verengen. Der Grund dafür liegt nach V.K. GROMOV (1970) in der Aufhebung der Spannung nach der Bruchbildung, die für die verschiedenen Gesteine eben verschieden tiefe Ausdehnung hervorrufen kann.

Ist die Bestimmung der Klüfttiefe mittels einer Kernbohrung nicht durchführbar und diese auch in keine Beziehung zum Bauwerk zu bringen, so ist die Öffnungsweite eigentlich nur für den oberflächennahen Bereich aussagekräftig.

Den im Felsbau tätigen Geologen zeigt sich eine offene Kluft meistens als Folge eines Zerrungsvorganges im Gesteinsgefüge, bei der die dritte Dimension häufig nur durch „Stochern“ oder Hineinleuchten abzuschätzen ist. Eine brauchbare Methode, geöffnete Klüfte baugewologisch-technisch zu „behandeln“, ist, sie weitgehend zu versiegeln. Als Konsolidierungs- und/oder Dichtungsmaßnahmen werden solche offenen Klüfte bei einem bestimmten Druck ausgepreßt. So wird ein intakter, wieder vollends mittragender Felskörper geschaffen. Kontrollbohrungen überwachen das Eindringen des Injektionsgutes bis in haarfeine Trennflächen.

### 3.5. Ebener Klüftflächenanteil ( $\alpha_e$ )

Der ebene Klüftflächenanteil ist ein wichtiger Kennwert, um das Verhältnis von Materialbrücken und durchtrennten Felsteilen abschätzen zu können. Ein semiquantitativer Wert deswegen, weil meist nur Klüftausbisse erkennbar sind und es schwer abzusehen ist, wie tief die Klüfte das Gestein durchtrennen (Abb. 1).

Ist dieser Strukturkennwert bekannt, so lassen sich Aussagen über das Bruch- und Deformationsverhalten, die Scherfestigkeit, die Teilbeweglichkeit der Klüftkörper, die Wasseraufnahmefähigkeit des Gebirges und die Auftriebswirkung des Gebirgswassers treffen.

Probleme gibt es allerdings bei der Erfassung des ebenen Klüftflächenanteils im Gelände. Es wird wohl sehr von der Erfahrung des kartierenden Geologen abhängen, diesen Faktor möglichst objektiv zu bewerten.

Liegen beispielsweise die Luftausbisse gestaffelt vor, das heißt, in jeder Kluftebene tritt eine Kluft auf, die an der freien Felsoberfläche nur durch ihre Ausbißlänge sichtbar ist, so ist hier die Flächenermittlung nur durch Potenzieren der einzelnen Ausbißlängen möglich. Das fordert aber die Annahme, daß man es nur mit quadratischen Klüftflächen zu tun hat.

Eine weitere Frage ist die Wahl der Bezugsfläche. Sie erfolgt im allgemeinen willkürlich, wohl bauwerksbezogen, richtet sich aber weniger nach objektiven Gegebenheiten. Vollkommen unberücksichtigt bleiben Trennflächen, wie dies H. RICHTER et al. (1976) ausführen, die senkrecht zur Bezugsfläche verlaufen. Hier sind dann das hydraulische Verhalten und die Teilbeweglichkeit der Klüftkörper ganz unterschiedlich, besonders wenn diese senkrecht verlaufende Trennfläche ebenfalls einen großen oder kleinen ebenen Klüftflächenanteil aufweist. Da dieser Kennwert in Prozent angegeben wird, sollte man sich höchstens auf die Angaben von beispielsweise 25 %, 33 % oder 50 %-Beträge beschränken. Genauere Angaben täuschen aus den vorhin genannten Einwänden und als Folge unzureichend erfassbarer Daten im Gelände eine Genauigkeit vor, die fast nur im Modellfall zu erhalten ist.

### 3.6. Klüftwandung

Der Habitus der Klüftwandung kann entscheidend das mechanische Verhalten eines Felskörpers bei einer Beanspruchung beeinflussen.

Eine deskriptive Einteilung der Klüftufermorphologie unterscheidet generell zwischen eben, uneben, stufig und wellig. So sehr dieses vereinfachte Schema zu begrüßen ist, bereitet es doch erhebliche Schwierigkeiten bei der Typisierung der Klüfte im Aufschluß. Auch hier wird wieder die Felsbauaufgabe bestimmend sein, bei der eben im Gestein nur jene Kluftoberflächen zu beschreiben und zu bewerten sein werden, die für die Einschätzung der mechanischen Eigenschaften wirklich relevant erscheinen.

Die Ausbildung der Klüftwand wird beispielsweise von L. MÜLLER (1963) als Einteilungskriterium für die Klüftgenese herangezogen. Da aber auch Scherbrüche aus Trennbrüchen hervorgehen können (H. BOCK, 1980), ist die Zuordnung aus der Klüftmorphologie zumindest nicht eindeutig. BOCK führt zwei Argumente an, welche vor allem die ungleiche Entwicklung steilstehender Klüftscharen (Hauptklüfte und Nebenklüfte)

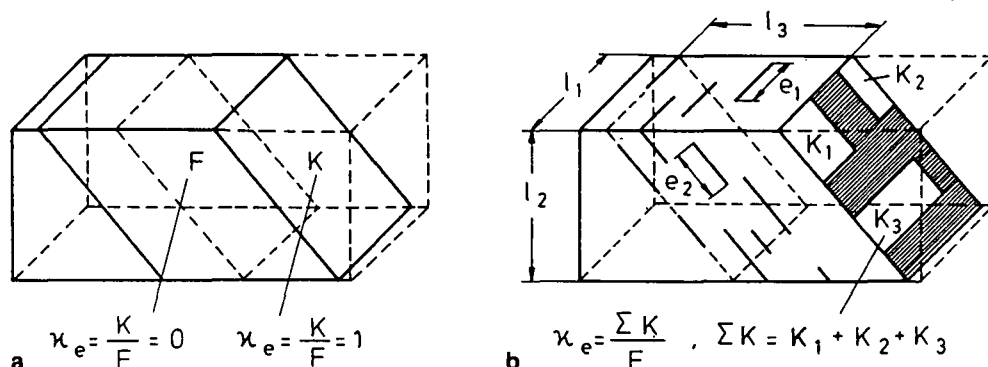


Abb. 1.  
Ebener Klüftflächenanteil (nach PACHNER, 1959).  
a)  $\alpha_e = 0$  bzw. 1.  
b)  $\alpha_e < 1$

in Frage stellen und die Tatsache, daß die dazu notwendige größte Hauptnormalspannung  $\sigma_1$  annähernd immer horizontal gerichtet sein müßte. Die Anlage des Scherklufsystems ist in Sedimentgesteinen nach herkömmlichen Vorstellungen in der Spätphase der Diagenese gebildet worden. Für diesen Akt werden aber Senkungen postuliert und auch nachgewiesen. Diese Bewegungen bedingen eine Zerrungstektonik, also ein vertikal gerichtetes  $\sigma_1$  und ein horizontal gerichtetes  $\sigma_3$ . Die für die Bildung eines paarigen Scherklufsystems notwendigen horizontal bis subhorizontal verlaufenden  $\sigma_1$ -Richtungen können aus der Einengungsphase eines Orogens abgeleitet werden.

Was die Anlage von Trennbrüchen betrifft, so gibt es bei Fragen zur Kluffgenese keine Schwierigkeiten. Sind die Trennflächen zackig und ohne Abrieb, ist die Unterscheidung von anderen Klüften stets einfach.

Als weitere Kluffkategorie werden die Harnische herangezogen. Sie sollten den Gleitungsbruch verdeutlichen. Aus vielen Beobachtungen, besonders in kalkalpinen Gesteinen, ließ sich die Stellung von Harnischflächen nach erfolgter statistischer Auswertung auch ohne weiteres mit der Anlage und Richtung der umliegenden Scherklüfte durchaus korrelieren. Das heißt aber, daß an manchen Scherklüften eine Bewegung stattgefunden hat. Die Natur ihrer Entstehung war dabei allerdings nicht zu erkennen.

Nach H. BOCK (1980) ist es sogar möglich, die Anlage von Klüften überhaupt nur auf das Vorhandensein geringer seitlicher Zug- und großer vertikaler Druckspannungen zurückzuführen. Sein sogenanntes „fundamentales Kluffsystem“, welches ausschließlich aus Trennbrüchen hervorgegangen sein soll, wird vorwiegend auf Sedimentgesteine bezogen.

Da Haupt- und Nebenkluffflächen ungleiche morphologische Entwicklung aufweisen (s.H. BOCK, 1980, S. 629ff), sind die Streuung der Kluffstellungen, weiters die Kluffabstände und die Kluffstreckungen wie auch die Kluffwandungen verschieden ausgebildet. BOCK folgert daraus, dies kann nicht ein – im Aufschluß sieht es manchmal wirklich so aus – Scherkluffsystem alleine hervorbringen. Bei diesem müßten die beiden Kluffscharen eigentlich gleichwertig ausgebildet sein, wenn man von einer gewissen Gesteins- und Mineralanisotropie absieht.

Die Frage, die es nun zu beantworten gilt, ist, wo kommen die für die Trennbruch-Hypothese nach BOCK geforderten Zugspannungen bzw. sehr kleinen Druckspannungen her?

Eine Annahme, die totalen Druckspannungen im Gestein zu verkleinern, ist das Miteinrechnen von Porenwasserüberdrücken. Es kommt dabei zu einer Abminderung der Druckspannungen, die dann sehr kleine Druck- oder auch schon Zugspannungen bewirken können.

Da die BOCK'sche Hypothese vor allem auf flachliegende Sedimente angelegt ist, muß man die Herleitung der entsprechenden Spannungen für den österreichischen Alpenanteil neu interpretieren.

Nach A. TOLLMANN (1986) können die geforderten Spannungen schon im Geosynklinalstadium durch Einsinken der Erdkruste entstehen. Das  $\sigma_1$  ist hier vertikal und  $\sigma_3$  horizontal ausgerichtet – es bilden sich Zerrklüfte.

Im späten Orogenesestadium, wo es weiterhin zu einer N-S-Einengung gekommen war (besonders im Alttertiär, wie viele Beispiele aus den Kalkalpen bele-

gen), müßte sich ein Scherkluffsystem ausgebildet haben. Bei nahezu horizontal gerichtetem  $\sigma_1$  kommt es zu Überschiebungen – zum Deckenbau schlechthin. Doch als Antwort auf die nicht mehr aufnehmbaren Spannungen im Gestein entstehen nun Scherbrüche. Die Hauptrichtung zuerst und vielleicht zeitlich etwas verzögert, bewirkt durch eine Spannungsumlagerung, entstehen die Nebenkluffscharen. Denn so wie H. BOCK (1980, S. 636 ff) ausführt, daß durch Verringerung der Spannungseinwirkung nach erfolgtem Bruch die gleiche Spannungsart sich in einiger Entfernung wieder einstellt und einen neuerlichen Bruchvorgang bewirkt, so kann man sich auch ein Scherbruchsystem phasenversetzt entstanden denken.

Im kratogenen Stadium, im Jungtertiär, bildeten sich große Transversalgräben im Ostalpenorogen (A. TOLLMANN, 1986), Die aber wieder entsprechend angeordnete Zugspannungen, also ein vertikales  $\sigma_1$ , erfordern.

Auch der letzte Bauakt, die isostatische Hebung der Alpen – eine Art von Großundulation, wie BOCK es nennt – tritt auf. Dabei kann es ebenfalls zur Bildung von Trennbrüchen oder Zerrklüften kommen.

Diese Betrachtungen, die thematisch eigentlich zur Kluffbildung (Kapitel 3.1) gehören, sollen hier zeigen, daß das alleinige Beobachten und Bewerten einer Kluffwand wesentlich komplexer ist als es scheint. Es kann ja eine Kluffschar in diesem Bauakt zunächst als geschlossene Trennkluff angelegt worden sein, damit ist die Schwächung des Gesteins vorgegeben und die Scherkräfte vollenden ihr Werk (siehe auch K. PETERS, 1980, S. 855ff). Vielleicht klingt es trivial, aber auch bei der Kluffentstehung sind offenbar Mischformen möglich. Die Kluffwandung ist also das Ergebnis einer vielfältigen Spannungsgeschichte. Ein Auftreten von Scherklüften oder von einem „geordneten“ Kluffsystem ist nicht nur in Sedimentgesteinen, sondern in Österreich auch in der Zentralzone, in der Böhmisches Masse und in den jungen tertiären Ablagerungen zu beobachten.

### 3.7. Kluffrauigkeit

Die Kluffrauigkeit ist gleichlaufend mit der Behandlung der Kluffufer zu sehen. Bestimmt sie doch entscheidend, ob und in welcher Größe Scherkräfte in einer Trennfläche aufgenommen oder übertragen werden können.

Durch eine möglichst genaue Beschreibung der Kluffufer können die Scherfestigkeiten in einer Trennfläche relativ gut bewertet werden. Kennt man die „Welligkeit“ dieser Fläche, so läßt sich nach N. BARTON & V. CHOUBEY (1977) ein sogenannter Rauigkeitskoeffizient (JRC = Joint Roughness Coefficient) abschätzen. Aus diesem wird ersichtlich, daß mit ansteigender Rauigkeit, bei angenommener gleicher Normalspannung, die Scherfestigkeit deutlich ansteigt.

Die geringste Scherfestigkeit besitzen ebene, glatte und/oder schwach wellige Kluffflächen. Je größer die Amplituden der rauhen Oberfläche, also je höher die Wellen sind, umso größer ist das  $\beta_s$  (Scherfestigkeit des Gesteines oder einer Gesteinsfläche). Wenn man stufige oder zackige Trennflächen einem Abschertest unterzieht, erhält man meist sehr hohe  $\beta_s$ -Werte. Es müssen nämlich dabei intakte Gesteinsanteile durchgeschert werden. Das sind Anteile einer echten Gesteins-



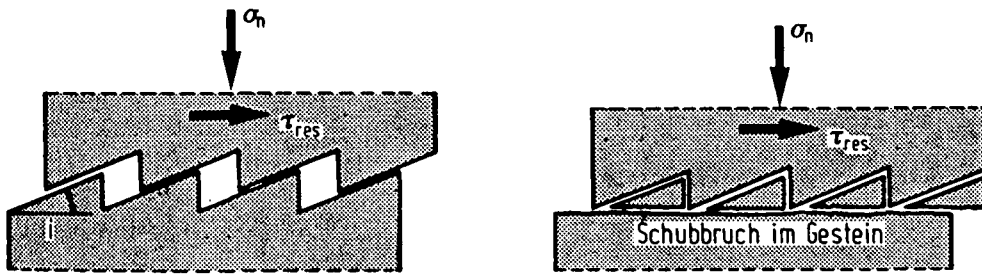


Abb. 2. Sägezahnförmige Kluftrauhigkeit mit dem Aufgleitwinkel „i“. Je nach Größe von „i“ ergeben sich auch bei kleinen Normalspannungen hohe Scherfestigkeiten (nach W. WITTKÉ, 1984).

scherfestigkeit. Hier setzt sich der Reibungswiderstand aus der Scherfestigkeit, der Rauigkeit und den sägezahnförmigen Unebenheiten des Gesteins zusammen. Auch bei kleinen Normalspannungen ist es dann möglich, hohe Scherfestigkeiten zu erzielen. Es kann sogar von einer echten Kohäsion gesprochen werden.

Zu den Gesteinen mit häufig nur geringer Rauigkeit ausgestattet Trennflächen zählen aufgrund ihrer Genese und Petrographie jene metamorphen Gesteine mit einem hohem Anteil an Schichtsilikaten. Diese liegen in den sf-Richtungen und begünstigen so die Gleitbereitschaft bei Beanspruchung parallel zur Schieferung.

Je grobkörniger und unregelmäßiger das Gesteinsgefüge vorliegt, umso schneller wird die Scherfestigkeit ansteigen, denn die Trennflächen werden so zunehmend rauher, das heißt, der JRC steigt an. Dieser Faktor ist überdies vom Verhältnis der Scher- und Normalspannungen, wie auch vom Reibungswinkel an den Trennflächen und der Rückprallhärte der Klufufer abhängig.

Gesteine mit sehr hohen Rauigkeitskoeffizienten sind Sedimentgesteine, welche senkrecht zu den ss-Flächen Styolithen führen. Diese, aus Auflast entstanden, heben durch das zapfenartige Ineinandergreifen des oberen und unteren Kluffkörpers den Widerstand gegen Verschieben enorm an. Obwohl diese durch tektonischen Druck meist parallel zur ss-Fläche entstehen, kann man in Karbonatgesteinen auch senkrecht zur primären Ablagerungsfläche hervorgegangene Styolithen beobachten.

Gerade das Gegenteil repräsentieren die Harnische. Sie sind durch Verschiebungsvorgänge im Gestein entstanden und haben polierte, glatte Flächen. Hier beträgt der Rauigkeitskoeffizient nahezu Null.

Allgemein läßt sich die Welligkeit einer Trennfläche durch den Aufgleitwinkel „i“ definieren (Abb. 2). Es ist dies jener Fallwinkel, welcher die Oberflächenneigungen einer Klufffläche bestimmt. Bei Großklüften läßt sich die Ermittlung dieses Winkels leicht bewerkstelligen.

Hingegen hat man bei einer Mikrorauigkeit nur mehr die Chance, mit einem Profilographen Unebenheiten zu registrieren, um sie empirisch ermittelten Rauigkeitsverhältnissen gegenüber zu stellen. Diese Geländemethode haben E. FECKER & N. RENGERS (1971) erstmals vorgestellt. Es muß allerdings die Trennfläche gut zugänglich sein.

Weiters zeigten sie, daß mit abnehmendem Kreisdurchmesser der Anlegefläche des Kompaßgehäusedeckels die Aussagekraft von Unebenheitsmessungen an einer Gesteinstrennfläche ansteigt. Mit einer zu großen Anlegefläche eines Kompaßdeckels werden nur Tangentenmessungen der Oberflächengeometrie einer Klufffläche vorgenommen. Bei kleinen Anlegeflächen hingegen können auch die „Mulden“ und „Sättel“ der Trennfläche erfaßt werden. Die besten Ergebnisse liefert eine Fläche mit  $D = 5,5 \text{ cm}$  ( $F = 24 \text{ cm}^2$ ). Jene mit

11 cm Durchmesser ( $F = 95 \text{ cm}^2$ ) bringt ebenfalls noch sehr gute Resultate. Da die Deckelfläche des Geologenkompasses ca.  $60 \text{ cm}^2$  aufweist, liegt sie gerade zwischen diesen beiden Größen. Das bedeutet, daß die übliche ( $7,5 \times 8,0 \text{ cm}$ ) Anlegefläche bereits aussagekräftige Werte über die Kluffmorphologie ergibt. Außerdem ist sie auch schon bei flächenhaft klein aufgeschlossenen Klüften einsetzbar.

Für die Erfassung von sehr kleinen Kluftrauhigkeiten empfiehlt N. RENGERS (1971) die Labormethode mittels eines Stereotiefenmeßmikroskopes.

Eine sehr wichtige Erkenntnis bringt die genaue Analyse der Kluftrauhigkeit hinsichtlich möglicher Bewegungen im Felskörper. E. FECKER & N. RENGERS zeigten sehr anschaulich daß nach Isolinienauswertung der eingemessenen Oberflächenneigungen einer Klufffläche, Angaben über eine potentielle Gleitrichtung gemacht werden können. Dies kann bei den verschiedensten technischen Projekten, wo es manchmal nur auf eine einzige Kluft ankommt, beispielsweise die Auftreffrichtung der Resultierenden einer Bogenmauer, überaus wichtig sein. Die Rauigkeit einer Trennfläche geht auch in die Scherspannung ein, und zwar mit dem Winkel „i“. Die Formel lautet:

$$\tau_{\text{REST}} = \sigma_n \cdot \tan(\varphi_T + i)$$

$\sigma_n$  ... Normalspannung

$\varphi_T$  ... Reibungswinkel der Trennfläche

Daraus wird ersichtlich, daß bei Bestimmung des Scherwinkels im Labor der Unebenheitswinkel „i“ vorher an Klüften der gleichen Schar im Gelände mitgemessen werden muß. Die praktische Bedeutung der Kluftrauhigkeit zeigt sich auch bei der Berechnung von Strömungsvorgängen im Fels sowie deren Einfluß auf die innere Erosion von Klüften (C. LOUIS, 1967).

### 3.8. Kluffüllung

Eine wichtige Tätigkeit des Geologen bei der Bearbeitung von Kluffüllungen liegt in der genauen Beschreibung des Zwischenmittels. Dabei sollte die Mineralogie im Vordergrund stehen. Gleichzeitig benötigt man genügend Probenmaterial für Laboranalysen.

Korngröße, Farbe, Form, Konsistenz des Füllmaterials und Verwitterungsbildungen sind zu registrieren. Besonderes Gewicht ist auf die Feinfraktionen Schluff und Ton zu legen, da hier der Anteil der schwelfähigen Tonminerale liegen wird. Entsprechende Analysen sollten aus feinkörnigen Kluffüllungen immer gemacht werden. Es darf dabei nicht übersehen werden, daß die kleinste Kornfraktion die Scherfestigkeit „bestimmt“ (I.S.R.M., 1978, S. 353ff). Außerdem ist der Zustand der Klufufer zu bewerten, da diese unter Umständen eine Aussage über das Langzeitverhalten des zerbrochenen Felskörpers zulassen.

Eine sehr wichtige, da auch häufige Kluffüllung, bilden Mylonite (hier im Sinne der DGEG, 1982, verwendet). Diese aus einer Scherbeanspruchung hervorgegangenen Gesteinszerreißel sind ein wichtiger Faktor für die Abschätzung des Scherwiderstandes. Das jeweils schlechteste Gesteinsmaterial im Zerreibsel steuert die Gebirgsfestigkeit.

Mylonite besitzen meist eine weiche bis halbfeste Plastizität und sind besonders anfällig gegenüber einer Erosion durch Wasser. Bei Anwesenheit von schwellfähigen Tonmineralen wäre neben dem Quelldruck auch ein abdichtender Effekt zu erwarten. Werden hingegen Kluffüllungen gänzlich aus dem Gefüge entfernt, führt dies zu einer erhöhten Teilbeweglichkeit und zu einer bedeutenden Minderung der Gebirgsfestigkeit.

Über dünne, tonige Trennflächenbeläge und deren felsmechanische Bedeutung in Felsböschungen haben jüngst F. BROSCHE & G. RIEDMÜLLER (1988) berichtet.

Der Verfestigungsgrad der Kluffüllungen spielt ebenfalls eine entscheidende Rolle bei der Bewertung des Felskörpers. Es ist nämlich nicht egal, ob das Zwischenmittel weichplastisch reagiert und bei geeigneter Belastungsart ausgequetscht werden kann, oder ob es sich sogar um eine mineralverheilte Kluft handelt. Diese wäre dann wie ein intaktes Gestein zu bewerten, nur mit sichtbaren „Sollbruchstellen“ versehen.

Einer weit verbreiteten Meinung zufolge, verringert die Anwesenheit von Kluftwasser die Reibungsfestigkeiten einer Kluffüllung. Bei den blättrigen Mineralen trifft dies zu, nicht aber bei glattpolierten Mineralflächen, wie Quarz, Feldspat oder Calcit. So haben H.N. HORN & D.U. DEERE (1962) nachgewiesen, daß Wasser bei den drei zuletzt genannten Mineralen den Reibungswiderstand sogar erhöhen kann.

Nicht immer ist das Festigkeitsverhalten vom Kluftzwischenmittel abhängig. So kann bei großer Belastung des Felses die Kluffüllung ausgepreßt werden und die Aufnahme von Normal- und Scherkräften wird wieder von Gestein auf Gestein möglich.

### 3.9. Klufferstreckung

Bei der Beschreibung der Klufferstreckung ist deren Flächenausdehnung von größter Bedeutung: Sicherlich ist dieser Kennwert im Gelände äußerst schwierig zu bestimmen. Eine ausgeprägte Kluftschar oder ein Kluftsystem können etwa durch zahlreiche kleinflächige Klüfte eine Kluftgasse großer Ausdehnung im Gesteinsverband bewirken. Die gleiche morphologische Erscheinung kann aber auch eine Riesenkluft (vgl. L. MÜLLER, 1963) hervorbringen.

So ist es bei der Bewertung der Gebirgseigenschaften unumgänglich, die Erstreckung für jede einzelne Kluftschar gesondert anzugeben. Es wird nämlich felsmechanisch von großem Einfluß sein, ob ein Gebirge kleinklüftig vorliegt, das heißt, ob das Flächenausmaß der Trennflächen klein ist. Hier ist dann das Gebirge stark tektonisch beansprucht gewesen. Bei einem geologischen Körper mit Klüften von großer zweidimensionaler Ausdehnung hingegen ist das Gestein nur geringfügig zerlegt, aber an der Kluftstelle selbst entsprechend stark beansprucht worden. Dies kann sich bei anhaltender Scherbeanspruchung vom Zerrüttungsstreifen bis hin zum Mylonit auswirken. Bestimmte mineralogische und mechanische Unstetigkeiten im Ge-

stein begünstigen dabei diese Bruchfugen. Großklüfte erleichtern statistisch gesehen eine Prognose für den tieferen Gebirgsbereich. Viele flächenhaft kleine Trennfugen können auch durch die Auflockerung (Entspannung an der freien Felsoberfläche) entstanden sein. Eine Aussage über deren Verbreitung im Gebirge ist dann oft mit großen statistischen Unsicherheiten behaftet.

Eine wichtige Erkenntnis (L. MÜLLER, 1963) ist auch, daß mit Zunahme von gehäuft auftretenden Klüften, besonders Kleinklüften, die Gebirgsqualität entscheidend abnimmt. Handelt es sich hier auch nur um einen qualitativen Wert, so kann schon aus der geologischen Beschreibung ein erster Eindruck über die Gebirgsbeschaffenheit vermittelt werden. Besteht eine Kluftschar hingegen aus nur wenigen Großklüften mit großem Kluftabstand voneinander, so ist sie baueologisch besser einschätzbar. Liegen doch die Kluftkörpergrößen manchmal schon im Bereich einzelner Bauelemente eines technischen Projektes. Eine ungünstig auftretende Lastrichtung kann bei einer einzeln auftretenden Großkluft leichter in ihrer geomechanischen Wirksamkeit beurteilt werden, als eine Häufung von Kleinklüften.

Bei der Besprechung der Klufferstreckung wird von einer bereits vorhandenen Kluft ausgegangen. Von Interesse aber ist auch, wie diese Kluft überhaupt entstanden ist.

Historisch gesehen hat A.A. GRIFFITH (1921) als erster versucht, die Entstehung und Ausbreitung von Mikrorissen in Gläsern (!) zu beschreiben und mechanisch zu deuten. GRIFFITH setzte allerdings die Existenz des Risses schon voraus und sieht diesen als das Spannungszentrum im Körper, welches durch von außen einwirkende Zug-, Druck- oder Torsionskräfte entstanden ist. Diese Mikrorisse bilden Spannungszentren, an denen sich die elastische Energie konzentrieren kann. Er postulierte auch, daß die Mikrorisse elliptische Formen hätten und sich aus ihnen beim Bruchvorgang neue Oberflächen entwickelten.

G.R. IRWIN (1958) hingegen berücksichtigt besonders das kritische Spannungsfeld um die Reißspitze (= Reißfront), von der ausgehend die Reißbildung fortschreitet, bis ein ausgeglichener Spannungszustand erreicht und die Verformungsenergie abgeklungen ist. Nach Abbau der Spannungsspitzen durch plastisches Fließen wird der Bruch verzögert oder gänzlich aufgehalten. Zu Kluftbeginn sucht sich die Verformungsenergie eine Fehlstelle im Gestein oder bereits im Mineral, denn schon im Kristallgitteraufbau liegen die primären Unstetigkeiten (S.N. ZURKOV, 1965).

Mit P. BANKWITZ (1966), J. GRAMBERG (1966) und V.N. KALAČEVA (1968) läßt sich ausführen, daß zuerst Embryonalrisse (Mikrorisse) an den Basisfehlern im Gestein entstehen. Dies dürfte vorwiegend auf Zugspannung bzw. sehr kleine Druckspannungen zurückzuführen sein. Die meisten Klüfte, besonders im Deckgebirge, sind auch nach P. BANKWITZ Zugklüfte, da bei allen Gesteinen die Zugfestigkeit immer sehr klein ist und am ehesten überschritten wird. An den Spitzen der Mikrorisse wird nun ständig durch Spannungshäufung eine Reißerweiterung provoziert, die dann erst endet, wenn die neugeschaffene Trennfläche (Streichrichtung) mit der Belastungsrichtung korrespondiert (vgl. K. PETERSS, 1980). Reißgabelungen, wie sie nach BANKWITZ zu beobachten sind, werden durch Energieüberschüsse der zum Wachstum notwendigen Spannung verursacht.

Zur Frage der elliptischen Form der „Basisfehler“ im Gestein, wie sie GRIFFITH voraussetzt und seiner Energiebetrachtung zugrunde legt, möchte ich anmerken, daß die Belastungsgeschwindigkeit beim Bruchvorgang die Form der Mikrorißflächen stark beeinflussen wird. K. METZ hat bereits im Jahre 1957 (S. 57ff) darauf hingewiesen, daß die Bruchgrenze von den jeweils herrschenden p-T-Bedingungen sowie von der Formänderungsgeschwindigkeit abhängt.

Nach P. BANKWITZ (1966) erfolgt die Kluffbildung innerhalb weniger Sekunden, während die Formentwicklung sich über längere Zeit hin erstreckt und von den gesteinsmechanischen Eigenschaften diktiert wird.

### 3.10. Kluffreibungswinkel

Bei der Beurteilung von Trennflächen spielt der Kluffreibungswinkel eine wichtige Rolle. Dabei sollte nicht übersehen werden, daß nicht die Scherfestigkeit ( $\varphi$  und  $c$ ) des gesunden Gesteins zu prüfen sein muß, sondern nur die eigentliche Kluff. So sind auch Angaben über die Scherparameter eines Gesteins nicht sehr aussagekräftig. Besser sind Werte, die sich ausschließlich auf die Kluff im Gestein und deren Füllung beziehen. Das hat seinen Grund darin, daß die maßgebenden Klüfte bei Beanspruchung eines Felskörpers die Schwachstellen darstellen und selten das unverwitterte Gesteinsmaterial. Pelitische bis sandige Kluffüllungen fallen bei Analysen eindeutig in den Zuständigkeitsbereich der Bodenmechanik. Aber auch rein ingenieurgeologische Methoden können für die Ermittlung des Kluffreibungswinkels herangezogen werden.

Eine sehr elegante Geländemethode stellt der sogenannte „ZAJIC-Versuch“ dar (K.J. KLENGEL & O.W. WAGENBRETH, 1982). Hier erhält man aus vielen Einzelversuchen einen Durchschnittswert für den Reibungswinkel an der Klufffläche, welcher für eine vereinfachte Berechnung ausreicht. Dieser auch „tilt-Versuch“ genannte Vorgang liefert jenen Neigungswinkel zweier zusammengehöriger Kluffkörper, wenn bei Kippung das obere auf dem unteren Probestück zu gleiten beginnt. Theoretisch haben N. BARTON & V. CHOUBEY (1977) diesen Versuch eingehend behandelt. Diese Methode ist durch geeignete Labor und/oder in situ-Versuche zu kontrollieren, um die große Streuung der „Gelände“-Scherparameter einzuengen.

Über genaue Naturbeobachtung lassen sich an Gesteinsaufschlüssen ebenfalls Näherungswerte für den Reibungswinkel an Trennflächen bereitstellen. Dies hat J. STINY (1953) in einer Arbeit über behelfsmäßige Untersuchungen der Gebirgsfestigkeit kurz umrissen.

### 3.11. Durchtrennungsgrad

Wurde der ebene Kluffflächenanteil  $\alpha_e$  noch als Quotient aus der Summe der Einzelflächen  $\Sigma K$  zu einer Bezugsebene (A) angesehen, so ist der Durchtrennungsgrad ( $D_e$ ) bereits wesentlich komplizierter. Er ist als ebener Durchtrennungsgrad ein Mittelwert von  $\alpha_e$  bei zwei senkrecht aufeinander stehenden Trennflächenscharen. So sehen sich H. RICHTER et al. (1977) veranlaßt, eine begriffliche Trennung zwischen  $\alpha_e$  und  $D_e$  vorzunehmen. An einem Beispiel wurde gezeigt, daß

bei gleichem ebenen Durchtrennungsgrad die Flächenform des durchtrennten Gesteins voneinander völlig verschieden sein kann. In vielen einschlägigen Fachpublikationen werden aber Kluffflächenanteil und der Durchtrennungsgrad gleich behandelt, also synonym gebraucht. Da über die räumliche Anordnung der zerlegenden Kluffflächen und über die Anzahl der Klüfte, die beim ebenen Durchtrennungsgrad ( $D_e$ ) die dritte Ebene schneiden und sie somit zerteilen, bestimmte Schwierigkeiten schon bei der Ermittlung der Eingangsgrößen auftreten, ist der Durchtrennungsgrad als Kennwert für die Gebirgsanisotropie nicht geeignet. Außerdem sind modellhafte Kluffkörper in der Natur relativ selten.

In der Felsmechanik (W. WITKE, 1984) wurde der anschauliche Weg beschritten, den ebenen Kluffflächenanteil dem ebenen Durchtrennungsgrad gleichzusetzen und als quantitative Größe den Bewertungen zugrunde zu legen.

Als ausreichend für felsstatische Untersuchungen sieht K.E.H. MÜLLER (1974) den ebenen Durchtrennungsgrad an – gemeint ist dabei der ebene Kluffflächenanteil. Begründet wird dies mit dem Umstand, daß solche Betrachtungen an charakteristischen, ebenen Schnitten durchgeführt werden sowie außerdem Deformations- bzw. Hauptspannungsebenen auch bevorzugte Richtungen einnehmen.

Als neue Methode empfiehlt K.E.H. MÜLLER die „Meßstreifenanzählung“. Innerhalb dieses Streifens, welcher parallel zu einer Kluffschar liegen muß, kann dann nach F. PACHER (1959) der ebene Durchtrennungsgrad ermittelt werden. Weiters werden bei K.E.H. MÜLLER (1974) die Materialbrücken koordinativ erfaßt und die Kluffausbißlängen gewichtet, d.h. es wird ihnen eine Längensklasse zugeordnet.

Die Materialbrücken spielen bei diesen Bewertungen eine große Rolle. Besser als eine strenge geometrische Kartierung von Kluff- oder Trennflächen i.a. (was im Gelände meist nicht durchführbar ist), wäre eine Quantifizierung der Materialbrücken; also die Bewertung sollte vom intakten Gestein ausgehen und nicht von der Kluff! Was sicher wichtig ist, sind Extremwertanalysen, denn auch in der Statik bestimmt nicht die Durchschnichtsbeanspruchung die Dimensionierung, sondern der Extremwert!

E. FECKER & G. REIK (1987) haben ebenfalls den „ebenen Kluffflächenanteil oder Durchtrennungsgrad“ synonym verwendet. In einer Darstellung der Gebirgsfestigkeit in Abhängigkeit vom Durchtrennungsgrad und der Klüftigkeit erläutert L. MÜLLER (1963) den ebenen Kluffflächenanteil und die Klüftigkeit getrennt. Die gesamte „ebene“ Problematik trifft auch für den „räumlichen Kluffflächenanteil“ zu.

### 3.12. Zerlegungsgrad

Der ebene Kluffflächenanteil ( $D_e$ ) und die Kluffdichte werden häufig als Zerlegungsgrad definiert. Da ( $D_e$ ) aber meist nur sehr schwierig zu bestimmen ist (man denke dabei nur an einen Bohrkern), die Kluffdichte aber leichter zu ermitteln ist, beschränkt man sich in solchen Fällen auf die Angabe eines Zerlegungsgrades. Gemeint ist dann allerdings der Grad der Zerrüttung eines Gesteines, d.h. ( $D_e$ ) wird nicht mehr definitionsgemäß verwendet (W. WITKE, 1984). Die Kernstücke (der Kerngewinn) und die Kernqualität (d.s. Klassen be-

stimmter Kernlängen) werden gesondert bewertet. Beides zusammen wird von WITKE als Zerlegungsgrad eines Felsbohrkernes angesehen. (Anm.: In Fällen der Bohrkernkartierung kann auch der RQD-Index herangezogen werden!).

Man sollte aber nach der ursprünglichen Definition von F. PACHER (1959) den Zerlegungsgrad als eine Funktion der Kluffziffer ( $k_f$ ) und des ebenen Kluffflächenanteiles ( $D_e$ ) verstehen. Eine Abweichung von diesem Vorschlag führt nämlich meist zu einer etwas verwirrenden baugelologischen Beschreibung von identen Gesteinskörpern.

### 3.13. Kluffkörpergröße

In jeder Beziehung umfassend hat L. MÜLLER (1963) die technische Gesteinsfazies als Ausdruck für die Form des Kluffkörpers beschrieben (siehe auch dazu F. KARL, 1954). Trotzdem findet man in der Baugelologie viele verschiedene Bezeichnungen für die Beschreibung des Kluffkörpers. Daher ist die von L. MÜLLER (1963, S. 253 ff.) aufgestellte Klassifizierung nach Kluffkörpergröße und -form als überaus nachahmenswert zu empfehlen. Lassen sich doch schon aus diesem Grundkörper, wie ihn J. STINY (1930) nannte, des öfteren Rückschlüsse auf die Gesteinsart anstellen.

Ein Kalkgestein zum Beispiel ist schon allein wegen seiner scharfkantigen, spitzwinkligen Formen von einem fast parallelepipedisch brechenden Dolomit zu unterscheiden. Somit ermöglicht der Kluffkörper alleine schon einen gewissen Vergleich mit anderen Gebirgsarten. Bei der Bewertung der Standfestigkeit einer freien Felsoberfläche werden besonders die Flächenlagen des Kluffkörpers zum Bauwerk selbst zu bewerten sein. So wird auch manchmal die Größe des mittleren Kluffkörpers zu bestimmen sein, um das Gebirge allgemein charakterisieren zu können. Vornehmlich bei gewinnungsorientierten Felsbauvorhaben ist diese Kenngröße von Bedeutung. Anhand von Extremwertdarstellungen über die Kluffkörpergrößen hat man die Möglichkeit, bevorzugte Richtungen der Teilbeweglichkeit in einem Felsverband herauszufinden.

Beim Aushub von Hohlräumen im Gebirge bildet die Form des Kluffkörpers (L. MÜLLER, 1963) und seiner Verspannung untereinander ein wichtiges Kriterium. So werden bei einem engständig geklüfteten Gebirge, also kleinen Kluffkörpern, sich von selbst eher steile Gewölbe einstellen. Hingegen gestattet ein weitständig geklüftetes Gebirge die Anlage von flachen Bögen, oder besser, das Gebirge bildet von selbst flache Gewölbe-tragwerke (Gebirgstragring) aus. Die Form dieser Kraftableitung ist natürlich von der Lage der einzelnen Kluffscharen im Raum abhängig. Günstig ist dabei, wenn die Bogennormalkräfte unter solchen Winkeln auf die Kluffoberflächen auftreffen, welche größer als die Reibungswinkel der entsprechenden Scharen sind (K.W. JOHN & R. DEUTSCH, 1974). Orthogonal angeordnete Kluffscharen bilden ein flaches Gewölbe parallel zur horizontalen Schar aus. Liegen die im gleichen Abstand voneinander rechtwinklig geklüfteten Gesteine in einem Winkel von 45 Grad oder generell in einem spitzen Winkel zur Horizontalen, so wird sich eher ein spitzbogenartiges Gewölbe ausbilden.

Der Grund liegt nach L. MÜLLER (1963) darin, daß sich bei größeren Kluffkörpern die Stützlinie\*) innerhalb einer einzigen Kluffkörperreihe ausbildet. Beim klein-klüftigen Gebirge müssen die Stützlinien hingegen mehrmals von einer Reihe zur anderen springen. Von den Hauptkluffstellungen, der Kluffkörpergröße und vom Durchtrennungsgrad hängt es ab, ob ein Gebirge überhaupt in der Lage ist, ein wirksames Verspannungsgewölbe auszubilden. Allfällige Klufffüllungen seien bei dieser Betrachtung weggelassen.

### 3.14. Kluffscharen

Als Einfluß auf die Standsicherheit eines Felsbauvorhabens ist die Geometrie der Trennflächen, besonders jene der Klüfte, von entscheidender Bedeutung. Gilt es nämlich herauszuarbeiten, welche der manchmal zahlreichen Kluffscharen die felsstatisch relevante ist. Um beispielsweise den Regelungsgrad einer Kluffschar bestimmen zu können, bedient man sich der Darstellung in der Lagenkugel. In weiterer Folge versucht man, die kinematische Komponente einer Kluffschar, welche sich aus der Lage im Raum ergibt, zu ermitteln.

Neben vielen anderen Faktoren, wie Lage, Richtung, Anzahl, Erstreckung, Öffnungsweite einer Kluff etc., beruht die Ermittlung von kritischen Bereichen in einer Felsbauaufgabe auf der Annahme, daß alle Klüfte durch den Kugelmittelpunkt laufen. In einem anschaulichen Beispiel zeigt H.H. EINSTEIN (1985, S. 401), daß eine korrekte, stochastische (= zufallsbedingte) Darstellung auch die Lage der Klufforte berücksichtigen sollte. Begründen läßt sich dies damit, daß man in einem Würfel sehr viele Möglichkeiten hat, die Kluff entsprechend ihrer Stellung im Raum verschieden zu postieren.

Dazu läßt sich aber einwenden, daß ein Felsbauvorhaben zu groß ist, um es als idealisierten „Gebirgswürfel“ darzustellen, in dem die Klüfte auch ihrer Lage nach richtig eingezeichnet werden könnten. Abhilfe schafft in diesem Fall die Anwendung des Begriffes „Homogenbereich“. Für diesen gilt eine wohl modellhafte, kubische Felsdarstellung mit den häufigsten, geometrisch richtig eingetragenen Trennflächenlagen, die als Teil für den gesamten Homogenbereich stehen, einer Berechnung zuführen zu können.

Da diese statistische Betrachtungsart aus der Bodenmechanik kommt, sind erhaltene Felsparameter – hier die Kluffschar *eo ipso* – zunächst vorsichtig zu bewerten. Weiters gilt es abzuwägen, in welchem Aufwandsverhältnis Statistik und Praxis zueinander stehen, um trotz vielleicht etwas fehlerhafter Anwendung streng wissenschaftlicher Methoden die erhaltenen Aussagen zur Sicherheit eines Felsbauwerkes zu optimieren.

Eine sehr anschauliche Methode führt W. WITKE (1984) vor. Er erstellt für jedes Felsbauvorhaben ein dreidimensionales geologisches Gefügemodell, in welches die Trennflächen maßstabsgetreu, einander zugeordnet, eingezeichnet werden. Ergänzend verwendet er zur übersichtlichen Behandlung des Trennflächeninventars die verschiedenen Möglichkeiten der Lagenkugel.

\*) Das ist der natürliche Kräfteverlauf in einer Bogenform, bei dem nur Normal-/Druck-Kräfte wirksam werden (Anmerkung des Verfassers).

So wird der rein statistische Wert von Maxima der Kluftpollagen mit dem räumlichen kombiniert. In einem weiteren Schritt wird das felsmechanische Modell mit den zugehörigen Kennwerten erstellt und für die Berechnung letztlich zu einem ebenen oder räumlichen Fachwerk (FEM) aufbereitet. Ich glaube, daß hier ein für die Belange der Ingenieurgeologie besserer Weg beschritten wurde, als die stochastische Behandlung auch auf die Trennflächen in Festgesteinen auszudehnen. Überdies eignen sich wirklich nicht alle Methoden der Bodenmechanik für das mathematisch abstrahierte und doch noch naturnahe Erfassen eines geologischen Körpers.

Bekanntlich liegt es auch heute noch immer im Ermessen des Geologen, welche Schar und wieviele Klüfte für welche Fragestellungen wesentlich sind. Da viele Felsbereiche oft nur schwer oder gar nicht zugänglich sind, ist K. LINKWITZ schon 1963 auf die photogrammetrische Auswertung von Kluffstellungen eingeschwenkt. H.D. PREUSS hat dann 1974 mit dem Kompaß eingemessene Klüfte mit photogrammetrisch (Phototheodolit) ausgewerteten verglichen. Fehleranalysen zeigten dabei, daß diese Art der Messung die gefügestatistische Feldarbeit sehr gut unterstützt, wenn nicht sogar völlig ersetzen kann. Wird diese Betrachtungsweise als sinnvolle Ergänzung für die direkte Kluffinterpretation vor Ort verstanden, so ist sie zweifellos für Bestimmungen des Regelungsgrades oder bevorzugter, geotechnisch wichtiger Richtungen bestens geeignet. Außerdem genügen dem Geodäten bereits zwei räumliche,

im Gelände definierte Photostandpunkte, um mittels der Vorwärtseinschnittsmethode die Raumkoordinaten von verschiedenen Klufflagen berechnen zu können.

### 3.15. Auflockerungsgrad

Bei der Bestimmung dieses Parameters sollte zuerst festgestellt werden, ob die Auflockerung auf eine echte tektonische Erscheinung, auf eine anthropogene Beeinflussung oder auf die Verwitterung zurückgeht.

Nach L. MÜLLER (1963) wird der Auflockerungsgrad linear und räumlich einfach durch Aufsummierung von Klufföffnungsweiten entlang einer definierten Geraden ermittelt. Heute ist es besser, nach der Methode der „rotierenden Meßgeraden“ zu verfahren. Dabei wird eine mindestens 2 m lange Meßplatte an einer Felsoberfläche an- oder aufgelegt und jeweils um 45 Grad gedreht. Das jeweilige Maß der Gebirgsauflockerung wird an dieser Lattenlinie festgestellt. Um statistisch richtige Aussagen zu treffen, sollte die Meßplatte jene Länge aufweisen, die dem Zehnfachen des geschätzten mittleren Kluffabstandes entspricht. Orientierung der Meßfläche und -geraden muß festgehalten werden. Für die Ermittlung des räumlichen Auflockerungsgrades benötigt man mindestens zwei Felsoberflächen, welche in einem spitzen bis stumpfen Winkel zueinander aufgeschlossen sein sollten. Die physikalische und chemische Verwitterung als Agens der Gefügauflockerung wird hier nicht berücksichtigt.

## 4. Felsbauaufgaben und Trennflächengefüge (bruchhafte Verformung)

Bei der Besprechung bruchhafter Verformungen im Gestein und deren Konsequenzen bei der Errichtung technischer Bauwerke möchte ich hier, stellvertretend für alle nachfolgenden tektonischen Einheiten herausstreichen, daß vor allem Gebiete im östlichen Abschnitt Österreichs gemeint sind.

Betrachtet man den Zusammenhang zwischen der bruchhaften Deformation im Gebirge und einem Bauwerk, so erhebt sich unter anderem auch die Frage nach der Gründungsart. Weiters interessiert neben der örtlichen Gesteinsbeschaffenheit vorwiegend die Verteilung der Trennflächen im Gründungsgestein sowie deren Reaktionen auf Lasteinleitung jeglicher Art und Größe.

### 4.1. Bemerkungen zur Bruchtektonik der Böhmisches Masse

Obwohl über den variszischen, außeralpinen Anteil Österreichs schon sehr viel gearbeitet und publiziert wurde, ist dem Trennflächeninventar erst seit geraumer Zeit mehr Beachtung geschenkt worden.

Statistische Kluffuntersuchungen großen Ausmaßes hat im Kristallin der südlichen Böhmisches Masse erstmals O. SCHERMANN (1966) vorgenommen. Eingeschlossen waren dabei auch Harnischflächen mit Striemun-

gen. Weiters oblag ihm die mechanische Deutung dieser Trennflächensysteme. Als gefügekundliches Ergebnis werden ein NW-SE- und ein NE-SW-Streichen der beiden gleichwertigen Scherflächenscharen angegeben, was eine Hauptspannung (= Einengung) in N-S-Richtung fordert.

1976 hat A. SCHEIDEGGER bei einer Analyse des Beanspruchungsplanes der Diendorfer Störung ebenfalls Klüfte eingemessen. Die mehr als 850 Klüfte im Bereich dieser Verwerfung zeigen ein konjugiertes Kluffsystem, welches eine Richtung mit NNE-SSW und die zugeordnete mit WNW-ESE aufweist.

Es handelt sich hier um typische Scherklüfte, die in den metamorphen wie auch plutonischen Gesteinen des Moldanubikums und des Moravikums gleichermaßen auftreten.

Obwohl SCHEIDEGGER, durch seine Untersuchungen bestärkt, eine Übereinstimmung des nördlich und südlich gelegenen Bereiches der Diendorfer Störung bezüglich der Gleichwertigkeit der Kluffsysteme ablehnt, ist meiner Ansicht nach eine gewisse Korrelation zwischen den beiden Störungsufern sehr wohl gegeben. A.E. SCHEIDEGGER sieht nämlich zwischen dem erhaltenen Kluffsystem nördlich der Diendorfer Störung und den Ergebnissen von O. SCHERMANN südlich dieser Blattverschiebung keine Gemeinsamkeiten. Die geringfügige Verdrehung der beiden Kluffscharen kann je-

doch im verstärkten „Anschub“ des Alpenkörpers an die Böhmisches Masse liegen. Leichte Rotationen durch ein verändertes Kraftfeld eines Trennflächengefüges sind in einer ausklingenden Gebirgsbildungsphase nichts Außergewöhnliches (A. TOLLMANN, 1969). Bei der Durchmusterung der Böhmisches Masse nach großen Störungszonen und Lineamenten wurde von A. TOLLMANN (1977) erstmals eine fotogeologische Auswertung von Satellitenbildern vorgenommen. Er brachte bei dieser Untersuchung allerdings nur von der „Zerstückelung“ der Böhmisches Masse ein sehr eindrucksvolles Bild. Die unzähligen kleinen Klufsysteme jeglicher Art und Entstehung mußten dabei unbeachtet bleiben.

#### **4.1.1. Felsbauaufgaben bei Großprojekten im Kristallin der Böhmisches Masse**

Aus der Fülle von bautechnisch interessanten Projekten wurden in den von mir behandelten geologisch-tektonischen Einheiten recht subjektiv einige wenige ausgewählt, um bestimmte Vergleiche hinsichtlich ihrer Gründungserfordernisse anstellen zu können. Des weiteren werden der Beanspruchungsplan und der Bruchwinkel  $2\alpha$  aus der Kluffstatistik der jeweiligen Gebirgstypen analysiert. Bei dieser Art der Betrachtung möchte ich Fundierungsprobleme und/oder die Trennflächenbildungen dieser Felsbauvorhaben gegenüberstellen oder vergleichen. Es kann damit allerdings keine Vollständigkeit erzielt werden, was die Anzahl und Bedeutung dieser Bauwerke innerhalb einer tektonischen Einheit Österreichs betrifft.

Für die Gegenüberstellung von speziellen Trennflächenlagen mit der regionalen Bruchtektonik des jeweiligen Bereiches, einschließlich der daraus abgeleiteten Beanspruchungspläne, wurden folgende Felsbauvorhaben herangezogen:

- Die Kamptal-Sperren (J. STINY, 1955 und J. STINY & H. PETZNY, 1956).
- Der CERN-Teilchenbeschleuniger (H. KÜPPER et al., 1971).
- Das Donaukraftwerk Aschach (E. CLAR & G. HORNINGER, 1964).
- Eine Felsgleitung im Thayatal, NÖ (R. SCHWINGENSCHLÖGL, 1990).

Eine zusammenfassende Darstellung aller Felsbauvorhaben größeren Ausmaßes und ihrer Gründungsfragen (besonders Trennflächenbildungen) innerhalb einer tektonischen Einheit würde den Rahmen dieser Arbeit sicher sprengen – reizvoll jedoch wäre sie allemal!

##### **4.1.1.1. Kamptal-Sperren**

Beim Bau der Kamptal-Kraftwerke wurden die Ausbildungen der Klufsysteme im Gründungsgestein von J. STINY (1955) genau beschrieben. Eine gefügekundliche Analyse erlaubte z.B. die Aussage, daß verschiedene Details im Widerlagerbereich der Sperre Dobra deswegen geändert werden mußten, weil lettengefüllte Klüfte und eine erhebliche Auflockerungszone die auftretenden Widerlagerkräfte nicht ohne große Verformungen hätte aufnehmen können.

Einen hydraulischen Grundbruch im nahezu unverwitterten Spitzer Gneis der Sperre Dobra (Position des

luftseitigen Austrittes des Umlaufstollens) verursachten mit Pelitmaterial gefüllte Klüfte und eine zu geringe Felsüberlagerung. Durch die Kluffüllungen kam es dabei einerseits zu einem Anstieg des Porenwasserdruckes und andererseits zu einer Erhöhung des Strömungsdruckes, da die Kluffletten zum Teil ausgespült worden waren, und so die Fließgeschwindigkeit des Bergwassers anstieg. All dies wurde bewirkt durch die Völlfüllung des Umlaufstollens und das dadurch in den tagnahen Abschnitten unter einem zu hohen Druck stehende, umgebende Gebirge.

Besonders J. STINY (1956) und des weiteren J. STINY & H. PETZNY haben 1956 darüber berichtet, daß bei ungenauer Kenntnis der Walch'schen Grenze im Gneisgebirge (= Bergwasserdruck hält dem Innendruck eines vollgefüllten Druckrohres das Gleichgewicht) der geländenahe Bereich dieses Umlaufstollens durch den vergrößerten Wasserdruck aus dem Hang herausgepreßt wurde. Da schon die Verengung von Klüften einen erhöhten Wasserdruck bewirkt, wird der Ermittlung des Trennflächeninventars, der Kluffüllungen und der Kluffwässer ein besonderes Augenmerk zu schenken sein.

Diese Art der tektonischen Beanspruchung wurde deshalb mit in die Überlegungen einbezogen, da ein Gebirge nicht schon alleine deswegen einen hohen Grad an Festigkeit aufweist, nur weil es unverwittert vorliegt, sondern weil es eben durch engständige Klüftung zerlegt ist.

##### **4.1.1.2. Projekt CERN-Teilchenbeschleuniger**

Großen Einfluß auf den ehemals projektierten Standort eines Teilchenbeschleunigers in der Böhmisches Masse hatten jene Gesteinsuntersuchungen, welche in den Jahren 1964 bis 1969 von der Geologischen Bundesanstalt Wien durchgeführt wurden. Das Gebiet für eine mögliche Errichtung eines Synchrotron-Ringes befindet sich in den östlichen Bereichen des Moldanubikums im Granulit, unweit von Göpfritz.

Besonders die Kluffbeläge eines Granulitmylonites sind eingehend petrographisch analysiert worden. H. KÜPPER et al. haben 1971 eine Kurzfassung dieser Arbeiten publiziert. Leider sind die Trennflächenlagen nicht veröffentlicht worden, wie auch die sorgfältige Beschreibung der Kluffparameter aus der Stollenkartierung fehlt. Angaben über die Gesteins- bzw. Gebirgsfestigkeiten sind in der englischen Ausgabe (1967) über den Standort dieses Teilchenbeschleunigers aufgenommen worden.

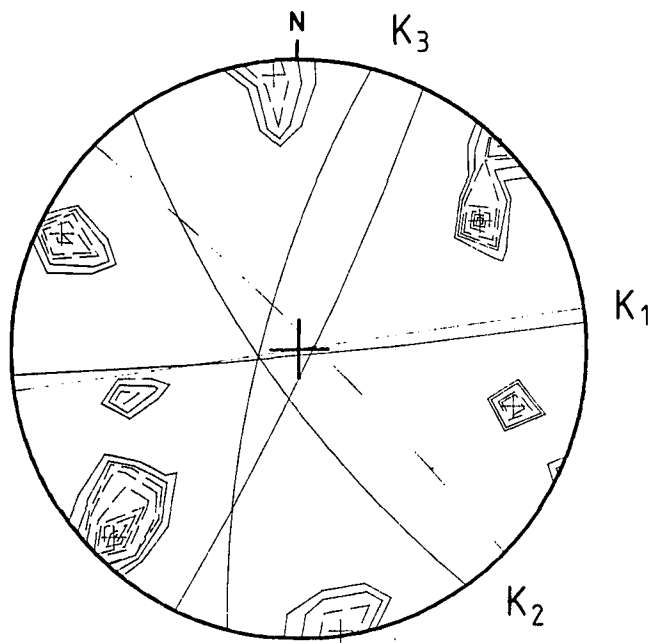
##### **4.1.1.3. Donau-Kraftwerk Aschach**

Bei diesem Kraftwerk wurde das Hauptbauwerk in Aschacher Granit des Moldanubikums gegründet. Es handelt sich hier um einen feinkörnigen Granit, welcher nur geringfügig verwitterte Bereiche aufweist (E. CLAR & G. HORNINGER, 1964, S. 141ff.). Kluffuntersuchungen im Aufschluß und in Bohrlöchern erbrachten zwei Hauptkluffscharen mit einer NW-SE-betonten Richtung und einen Verlauf, welcher NE-SW-Streichen zeigt.

##### **4.1.1.4. Felsgleitung in metamorphen Gesteinen des Thayatales, NÖ**

(R. SCHWINGENSCHLÖGL, 1990)

Die Standsicherheit eines Böschungsanschnittes im Zuge einer Straßenverbreiterung wurde weitgehend von



124 Messungen

Abb. 3.  
Primmersdorf (Böhmische Masse).  
Klüftung - Isolinien.

der Lage der Trennflächen im Hang bestimmt. Eine ingenieurgeologische Kartierung aus den Jahren 1986/87 führte zu der Vorstellung einer Felsgleitung auf einer „Klufttreppe“. Es waren hier weniger die Gesteinsfestigkeiten als vielmehr die ungünstige Lage der sf-Flächen zur freien Felsböschung, welche zu der Gleitbewegung führten. Dazu kamen noch drei ausgeprägte Kluftstellungen, welche mit unterschiedlicher geotechnischer Wirksamkeit dieses Felsbauwerk beeinflussten (Abb. 3).

Eine Auswertung der Kluftsysteme in Form einer Kreuzlinienermittlung zeigte, daß die so erhaltenen Flächenverschnitte (Abb. 4) zum Teil flacher als die neugeschaffene Böschung einfallen. Daraus konnte eindeutig gefolgert werden, daß die nach NW zeigende

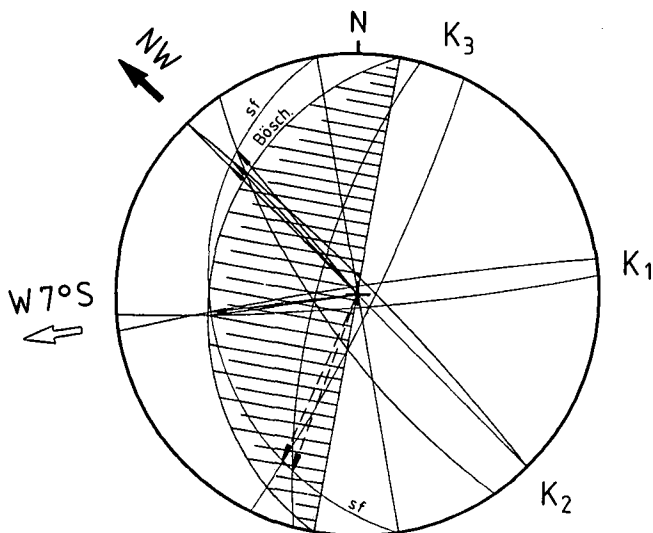
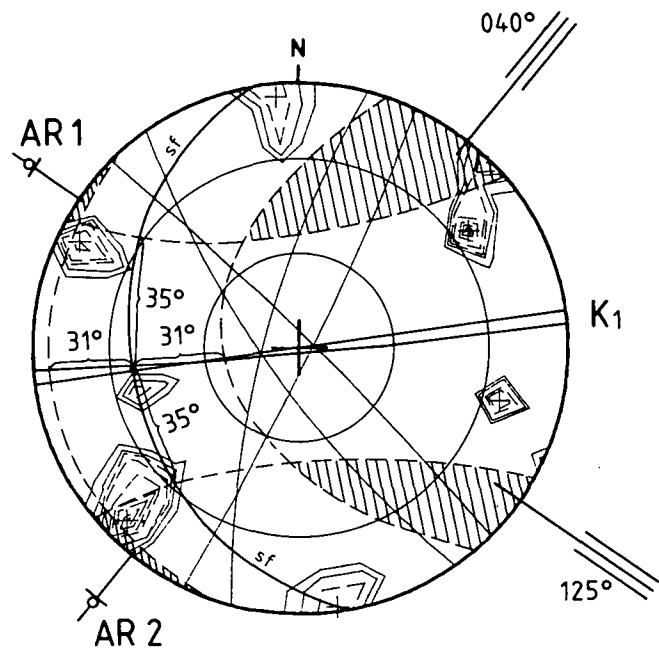


Abb. 4.  
Primmersdorf (Böhmische Masse).  
Kreuzlinienermittlung.  
Der Verschiebungsvektor zeigt nach Nordwesten.

lxe mit dem aus der geodätischen Beobachtung bekannten Verschiebungsvektor recht gut übereinstimmte. Durch die unterschiedlich schnellen Bewegungsraten, erhalten aus den zweimal jährlich durchgeführten Vermessungen, kann die Gleitmasse kinematisch als ein „Kriechen-Gleiten-Kriechen-Gleiten-etc.-Vorgang“ verstanden werden. Wobei jeweils nach der Frühjahrschneesmelze der Gleitvorgang einsetzte. Die Felsmasse insgesamt zeigte überdies bis zum Beobachtungszeitraum noch keine nennenswerten Strukturaufweichungen.

Für eine etwaige Böschungssanierung wurden dann nach der Konzeption der Talobre-Reibungskegel (Abb. 5) Bereiche zulässiger Ankerrichtungen erarbeitet. Damit soll festgelegt werden, daß die geotechnisch maßgebenden Klüfte, von einem Ankerstab in Winkeln, welche größer als die Reibungswinkel auf den jeweiligen Kluftflächen sind, durchörtert werden. Nur so kann eine optimale Anpassung an das vorhandene Flächengefüge und eine bedeutende Anhebung der Gebirgsfestigkeit erreicht werden. Die endgültige Sanierung erfolgte allerdings als Felsabräumung bis zur hypothetischen Gleittreppe (s. R. SCHWINGENSCHLÖGL, 1990).



124 Messungen

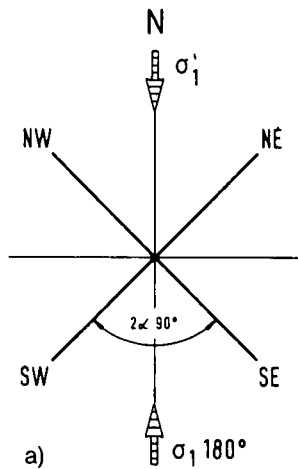
Abb. 5.  
Primmersdorf (Böhmische Masse).  
Ermittlung der günstigsten Ankerrichtungen zufolge der beiden geotechnisch wirksamen Trennflächen  $s_1$  und  $K_1$ .

#### 4.1.2. Zusammenfassung und Vergleich von Trennflächenausbildungen an den ausgewählten Felsbauvorhaben

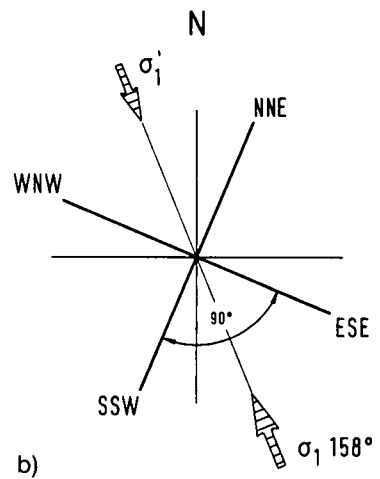
So unterschiedlich und geographisch disloziert diese Felsbauvorhaben auch sein mögen (siehe auch Abb. 6) sowie trotz der geringen Anzahl an Beispielen sind bestimmte Gemeinsamkeiten aus den abgebildeten Kluftdiagrammen herauszulesen.

Ein Vorherrschen der NW-SE-Richtung im Gefüge ist erkennbar. Das Streichen der Kluftscharen in NNW-SSE ist wie jenes nach ENE-WSW nur unterge-

südl. Böhmisches Masse  
(SCHERMANN, 1966)

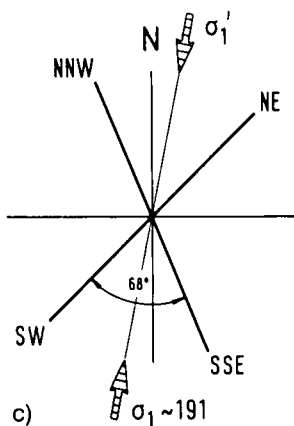


nördlich und südlich der  
Diendorfer Störung  
(SCHEIDEGGER, 1976)

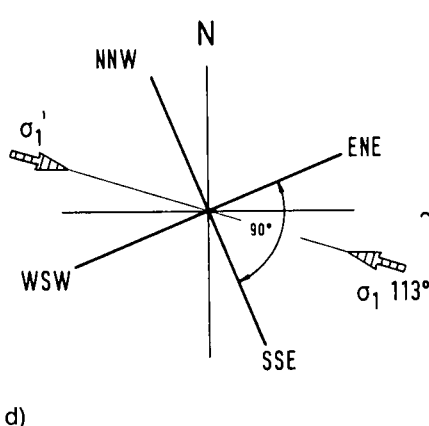


Kamptalkraftwerke  
STINY (1955)

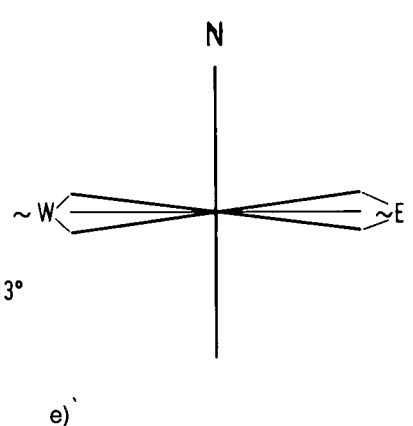
Ottenstein



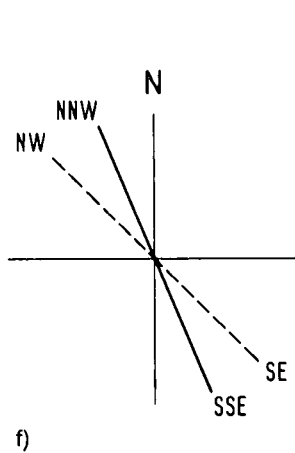
Dobra



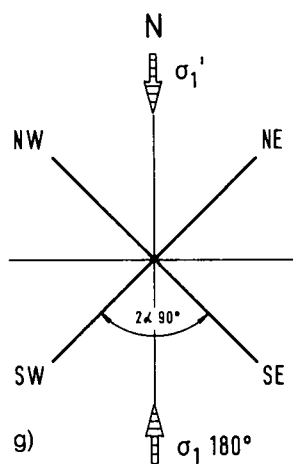
Thurnberg - Wegscheid



Eisganner Granit / Weitra  
Kartierung R. SCHWINGENSCHLÖGL, 1988



Aschach - Granit, Donaukraftwerk  
Kartierung MAKOVEC (1962)  
[in:] CLAR & HORNINGER (1964)



Bunte Serie / Primmersdorf  
(R. SCHWINGENSCHLÖGL, 1989)

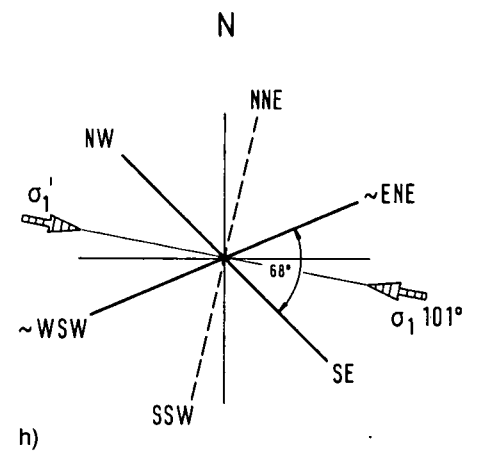


Abb. 6.  
Trennflächen (Klüfte) und Streichrichtungen von ausgewählten Felsbauvorhaben in der Böhmisches Masse.  
Die Hauptscharen sind durchgezogen hervorgehoben, die Nebenscharen sind strichliert.



ordnet vertreten. Aus diesen Streichrichtungen läßt sich eine gewisse Zuordnung zu den tektonischen Hauptrichtungen in der Böhmisches Masse (Moldanubikum) treffen.

Eine Übereinstimmung mit der Rheinischen Richtung ist nur bei zwei Kluftdiagrammen (6b und 6h) anzugeben. Die Herzynische Störungsanlage ist bloß bei der Richtungsrose 6b ausgeprägt, während die Erzgebirgische Richtung deutlich angelegt erscheint (6a, 6e, 6g). Hinsichtlich eines einheitlichen Beanspruchungsplanes sind die Kluffrosen untereinander eher nicht vergleichbar, aber, daß die Haupteinengungsrichtung aus Süden bzw. SSW bis ESE gekommen sein muß, läßt sich erkennen. Die abweichende Anlage des Kluftdiagrammes „Dobra“ (6d) und „Bunte Serie/Primmsdorf“ (6h) scheint auf eine WNW bis ESE zeigende Beanspruchung hinzudeuten. Diese dürfte ihre Ursache in der von Westen andrängenden Moldanubischen Teilmasse haben, und könnte als ausklingende Bewegung der Überschiebung Moldanubikum auf Moravikum angesehen werden.

#### 4.2. Bemerkungen zur Bruchtektonik im östlichen Flyschgebiet

Die klastischen Sedimente der Flyschzone zeigen insgesamt eine ausgeprägte Klüftung sowie in den oberflächennahen Bereichen eine intensive Verwitterung. Obwohl es in diesem Abschnitt der ostalpinen Flyschzone viele Aufschlüsse gibt, ist diese tektonische Einheit bis heute noch nicht zur Gänze bruchtektonisch bearbeitet worden.

Sehr gute Einblicke in die Ausbildung dieser gradierten Sedimente bot schon seit den frühen 60-er Jahren der Bau der Autobahn A1, besonders der Westeinfahrt. Da dies der erste bedeutende Fernstraßenzug quer durch Österreich war, von dem viele Kilometer durch den Flysch verlaufen, mußten die Planer und Baufirmen auf die besondere Natur der Flyschgesteine sehr Bedacht nehmen. Es war nicht nur der ständige Wechsel von festen, harten Gesteinen mit weichen, schiefrigen, welcher dem Straßenbau zu schaffen machte, sondern auch häufig die Trennflächenlagen und deren Ausbildungen. Hier wurde vielleicht erstmals deutlich, daß es sehr wichtig sein kann, die Kluffparameter: Kluffwandung und Klufftrauhigkeit, wie auch das  $\varphi_{\text{rest}}$  auf diesen Flächen möglichst genau zu ermitteln. Den in einer rhythmischen Gesteinsabfolge auftretenden Sandsteinen hingegen konnte man allerdings erhebliche Festigkeiten zutrauen. So wurden Kluffstellungen geschickt ausgenutzt, um den Böschungen die nötige Standsicherheit zu verleihen. Weiters war auch häufig die Entfernung einer bis zu mehr als 15 m mächtigen Verwitterungsschwarte notwendig, um zum anstehenden, gesunden Gebirge zu gelangen.

Beim Talübergang „Brenntenmais“ wurde z.B. sogar eine beträchtliche Bergzerreißung beobachtet, welche sich nach B. SCHWAIGHOFER (1966) in bis zu 10 cm offenen Zugspalten am Osthang dieses Tales äußerte.

##### 4.2.1. Felsbauaufgaben im Flyschgebiet

Nachstehende Felsbaubeispiele und deren Trennflächenlagen werden miteinander verglichen:

- Autobahn A1 ( Westeinfahrt), SW Dürrwien (W. GRÜN et al., 1961).

- Westautobahnabschnitt Mondsee-Seewalchen (H. BRANDECKER, 1968).
- Donaukraftwerk Greifenstein (R. SCHWINGENSCHLÖGL, 1984 und 1988).
- Bruchstrukturen im Flysch der Kahlenberger Schichten (Kartierung: R. SCHWINGENSCHLÖGL, 1989).

##### 4.2.1.1. Autobahn A1 (Westeinfahrt), SW Dürrwien

Geologische Untersuchungen an diesem Verkehrsbauwerk hatten W. GRÜN et al. (1961) vorgenommen. In einem etwa 370 m langen Böschungsteil sind petrographische und tektonische Kartierungen durchgeführt worden. Die Bruchtektonik wird im straff geregelten Gefügebild erkenntlich. Eine Hauptkluffschar streicht in WNW-ESE-Richtung, die zweite in N5°W bzw. S5°E. Daraus läßt sich im Winkel zwischen den beiden Scharen eine Hauptspannungsrichtung mit ca. 150 Grad (330 Grad) angeben. Für die Bildung dieses Kluffpaares ist die zu fordernde Einengung demnach aus fast SSE erfolgt. Die kleinste Druckspannung ( $\sigma_3$ ) steht normal auf diese Richtung und kann für die Erklärung von Zugklüften herangezogen werden. Das  $\sigma_3$  hat somit eine Richtung von nahezu WSW-ENE. Die von W. GRÜN et al. eingemessene Lineation auf den Klüften in Richtung 150/330° ist ein Indiz für die Natur dieser Brüche, sie als Verschiebungsklüfte anzusehen.

##### 4.2.1.2. Westautobahnabschnitt Mondsee - Seewalchen

Die genaue Kenntnis von Kluffscharen in einem Felsbauwerk ist unumgänglich. Dies zeigte anschaulich H. BRANDECKER (1968). Durch den Felsabtrag für die Autobahn ändert sich der Spannungszustand in einem Hang stetig. Man vermindert dabei die  $\sigma_v$ -Komponente beträchtlich, das  $\sigma_h$  bleibt aber in alter Größe vorhanden. Ein geänderter Spannungszustand im Gebirge oder nahe dessen freier Oberfläche ist die Folge. Das bewirkt eine erhöhte Felsauflockerung, neue Klüfte können entstehen, wie auch ungünstig zum Bauwerk liegende Kluffscharen ihre volle geotechnische Wirksamkeit entfalten können.

BRANDECKER berichtete, daß die Kluffwässer in diesem Flyschgebirge sehr oft gespannt vorlagen. Dem wurde mit Entwässerungsmaßnahmen abgeholfen. Da durch tonige Zwischenlagen und intensive Zerschierung an Kluffflächen die Verbandsfestigkeit stark herabgesetzt wurde, mußte vor allem der oft auftretende Strömungsdruck entschärft werden.

Es sind beim Flysch nicht so sehr die Klüfte, welche zur Instabilität von neugeschaffenen Böschungen beitragen, sondern meist sind die Beschaffenheit und die Lage der ss-Flächen entscheidend. Begründen läßt sich dies mit dem häufigen Auftreten von schwellfähigen Tonmineralen in den Pelitzzwischenlagen, auf welchen sich durch Wassereinfluß der vorhandene Reibungswiderstand enorm erniedrigen kann. So läßt sich auch erklären, daß schon nur wenige Grad geneigte Hänge von einer Kriech- in eine Gleitbewegung übergehen können.

##### 4.2.1.3. Donaukraftwerk Greifenstein (R. SCHWINGENSCHLÖGL, 1984 und 1988)

Den wohl europaweit besten und flächenmäßig größten künstlichen Flyschaufschluß erbrachte der Aushub

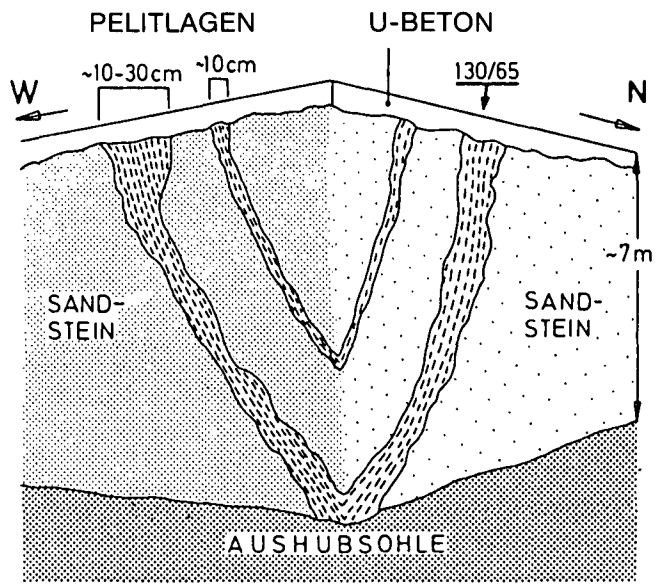
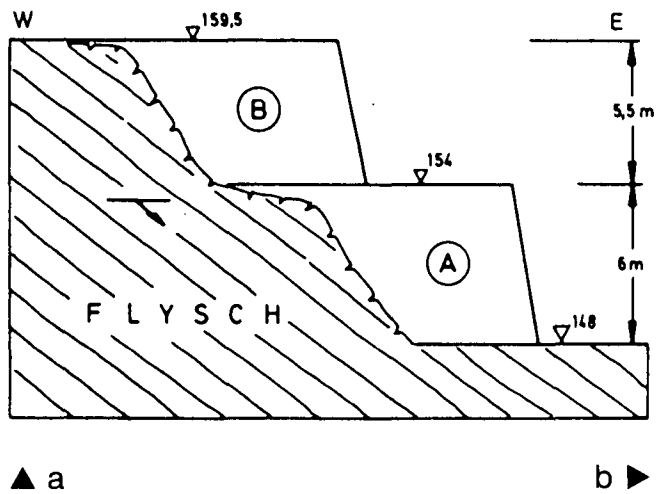


Abb. 7. Donaukraftwerk Greifenstein.  
 a) Schema der betonierten Stützblöcke (A und B) in den Flyschgesteinen im Gründungsbereich des Kraftwerkes.  
 b) Sandsteinkette auf Pelitlagen.

für das Hauptbauwerk des Laufkraftwerkes Greifenstein. Geprägt von der üblichen Wechsellagerung Pelite/Psammite/Psephite ist diese Abfolge in den harten Sandsteinen beinahe lehrbuchhaft geklüftet gewesen. Neben einer schönen, konjugierten Scherflächenausbildung in den dickbankigen Sandsteinen (R. SCHWINGSCHLÖGL, 1988, Tafel 5) konnte besonders im Südteil

des Aushubbereiches das Auftreten von nahezu waagrecht Entspannungsklüften beobachtet werden. Bei den einzelnen Aushubstadien für dieses Kraftwerk war an mehreren Stellen der Einfluß von Trennflächenlagen zum Bauteil sehr gut zu erkennen. Bedingt durch die hangauswärts fallenden Flyschschichten blieben die bis zu 13 m tiefen Aushubbö-

### Donaukraftwerk Greifenstein Hauptbauwerk Kluefte

### Donaukraftwerk-Greifenstein Hauptbauwerk Grosskreise aus Isolinienermittlung Hauptklufscharen

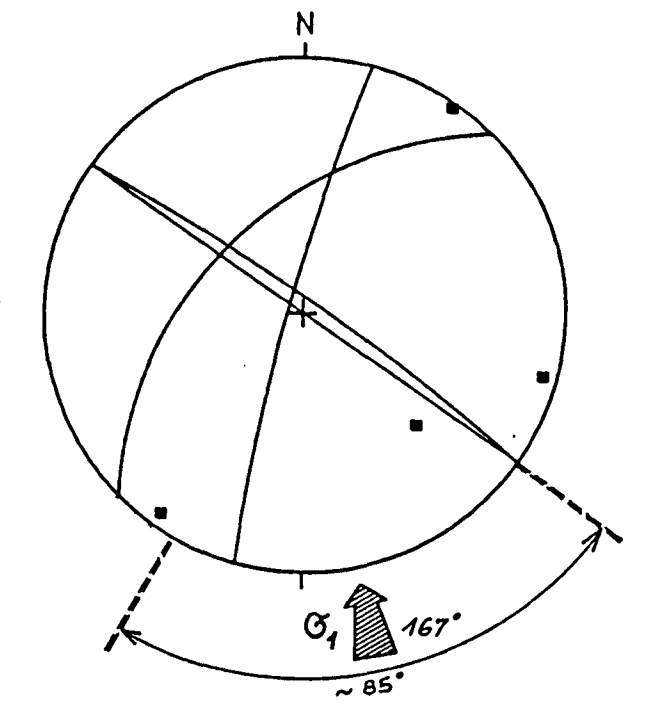
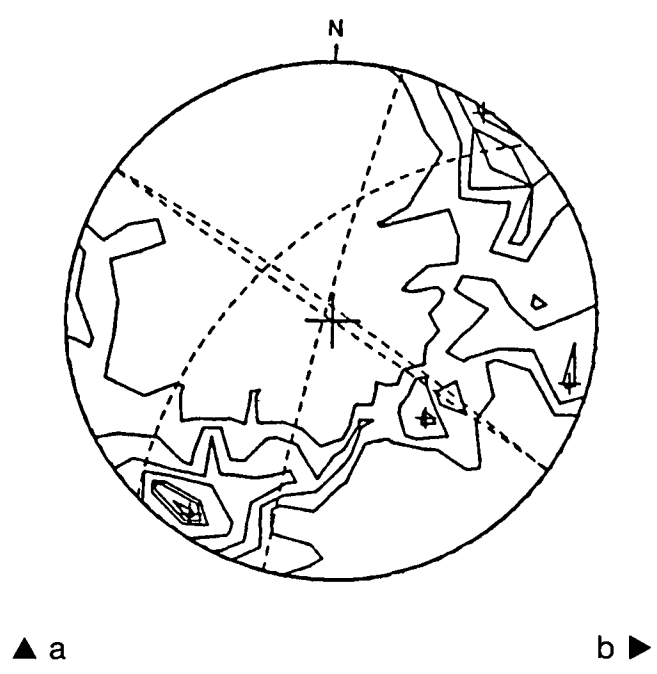


Abb. 8. Isoliniendarstellung und  $\sigma_1$ -Hauptspannungsrichtung im Gründungsfels des Donaukraftwerkes.

schungen ohne Sicherung nicht allzu lange standfest. Daher wurden, um eine Bewegung erst gar nicht entstehen zu lassen, am Böschungsfuß sogenannte Stützblöcke angeordnet (Abb. 7a).

Felsstatisch problematische Eckenausbildungen im Flyschgebirge führten oft zu einem Wettlauf mit der Zeit, da bei Fehlen eines Stützungsfußes und bei ungünstig liegenden, tonig besetzten Trennflächen, Sandsteinkeile (Abb. 7b) nur mehr durch einen Rest von Haftfestigkeit gerade noch „kleben“ blieben.

Die Gleitsicherheit äußerst positiv beeinflussend haben sich neben anderen Klufflächen die N-S- und die NE-SW-streichenden, steilstehenden Kluffscharen erwiesen. Sie bewirkten nämlich mit dem Fundamentbeton eine innige Verzahnung, sodaß der auf das Bauwerk von Westen her angreifende Wasserdruck erst die Schichtköpfe der harten Sandsteine hätte abscheren müssen, um eine Gleitbewegung in der Fuge zwischen Bauwerk und Gründungsgestein zu ermöglichen.

Aus drei Kluffanalysen, welche zunächst getrennt für die Krafthaus-, Wehr- und Schleusenanlage durchgeführt wurden, ergaben sich drei unterschiedlich orientierte Beanspruchungsrichtungen. In der Summendarstellung (alle Klüfte im Gründungsfels sind in einem einzigen Diagramm statistisch erfaßt) erkennt man, daß der Flysch in diesem Abschnitt von SSE nach NNW beansprucht wurde. Nach der Isolinienauswertung (Abb. 8) konnte eine Hauptkluffschar etwa nach NNE-SSW und die zweite nach NW-SE streichend ermittelt werden. Der spitze Winkel zwischen den beiden Kluffstellungen beträgt 65 bzw. 85°. Die in der Winkelhalbierenden angreifende  $\sigma_1$ -Spannung liegt bei 167° (SSE), die überdies ihre Gleitstriemungsspuren auf den einzelnen Sandsteinlagen deutlich hinterließ.

Nach Vorliegen der geologischen Karte der Gründungsfläche sowie einer großen Anzahl an Meßergebnissen konnten auch felsmechanische Überlegungen über die Fundierung des Hauptbauwerkes angestellt werden.

Im Krafthausbereich traten durch tonige Gesteine bedingt nur geringfügige Setzungen auf.

Im Wehrbereich stehen etwa 50 % Sandsteine und 50 % Wechsellagerungen an (d.s. Schiefertone/Sandsteine/Mergel). Durch die gleichmäßige Lasteinwirkung und das einheitliche Tragvermögen der Konstruktion gab es hier keinerlei Setzungen.

Bei der Schleusenanlage liegt der östliche Teil (das Schleusenunterhaupt) fast ausschließlich in alttertiären Sandsteinen, welche durch den erosiv bedingten Lastwegfall stark zur Entspannung neigten. Erkennbar war dies in einer sich bis zur Beendigung des Bauwerkes bzw. bis zum 4. Betriebsjahr ergebenden, bleibenden 4 mm-Hebung. Vermutlich dürfte eine geologisch alte Horizontalkomponente, aus der Über- bzw. Anschiebung von Flysch auf Molasse stammend, zum „Einfrieren“ beträchtlicher Horizontalspannungen in diesem Sandsteinkomplex geführt haben.

#### 4.2.1.4. Bruchstrukturen im Flysch der Kahlenberger Schichten

Zum Vergleich für die beiden Felsbauvorhaben Donaukraftwerk Greifenstein und Westautobahn SW Dürrwien habe ich einen kleinen Abschnitt der Kahlenberger Teildecke bruchtektonisch kartiert. Dieser ist morphologisch durch einen nach NE zeigenden Graben in den Ostabhängen des Wienerwaldes geprägt. Litholo-

gisch handelt es sich hier um Kalksandsteine, Mergel und Reiselsberger Sandsteine. Tektonisch gesehen liegt eine Faltenanordnung vor, deren Achse die Anlage dieses Grabens bedingte. Kluffmessungen ergaben nun, daß eine Hauptkluffschar straff geregelt ca. WNW bis ESE streicht und SSW abtaucht. Die Nebenschar zeigt nach NNE-SSW und fällt steil nach ESE ein. Der Bruchflächenwinkel  $2\alpha$  beträgt 105 Grad, das bedeutet eine aus etwa 158 Grad angreifende Hauptspannung  $\sigma_1$ , was sich gut mit der regionalgeologischen Geschichte dieses Raumes deckt. Obwohl nach der Theorie der spitze Winkel zwischen den Kluffscharen als Einengungssektor maßgebend wäre, ist aber nach erfolgter langsamer Rotation des Kluffgefüges dieser einst spitze zum stumpfen Winkel vergrößert worden.

Gerade die Frage des Bruchflächenwinkels soll in diesem Zusammenhang etwas näher behandelt werden. Beim Scherbruch unter einer Druckbelastung wird für die Bruchentstehung der Unterschied zwischen der  $\sigma_1$ - und  $\sigma_3$ -Spannung herangezogen (vgl. J.C. JAEGER & N.G.W. COOK, 1976). Bei duktilem Materialverhalten vergrößert sich der Bruchflächenwinkel durch eine Änderung der Verformungsgeschwindigkeit auf 90 Grad(!) Bei sprödem Material hingegen (d.s. größere Verformungs- und Beanspruchungsgeschwindigkeit) entstehen nicht Gleitungs-, sondern Verschiebungsbrüche.

Die Bruchbildung ist generell als Abschluß der geotektonischen Formung eines Orogens anzusehen. In den ostalpinen Deckengebirgen gilt nun, für den Flysch im besonderen, daß bei der Überschiebungsmechanik die einengende Kraft (das  $\sigma_1$ ) horizontal wirksam und sehr viel größer als  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$  gewesen sein muß.

Unter der Annahme, daß auch die späten, horizontalen Einengungen noch wesentlich stärker als die vertikalen waren, ist eine Kluffgenese vom Typus der Scherbrüche erklärbar. Auch die Differenz der kleinsten und größten Hauptspannung wäre noch groß genug gewesen.

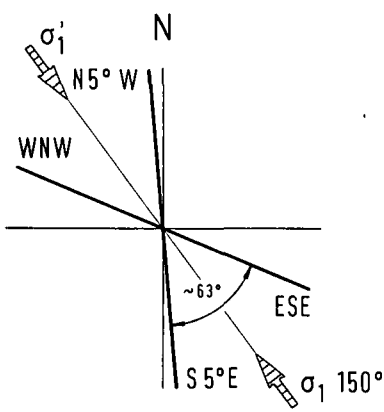
#### 4.2.2. Vergleich der ausgewählten Trennflächenlagen im östlichen Flyschgebiet

Die Kluffsysteme gehören klastischen Gesteinsserien an, welche in der östlichen Flyschzone liegen. Gemeinsam ist diesen Scharen, zumindest gilt dies für Abb. 9a und 9b, daß die  $\sigma_1$ -Komponente ihre Richtung eindeutig aus dem spitzen Bruchwinkel ableitet. Es sind dies gleichwertige Scherkluffsysteme (R. SCHWINGENSCHLÖGL, 1988, Tafel 5).

Die Richtungen bei Abb. 9c sind als nicht gleichwertig anzusehen, da zwischen dem WNW-ESE- und dem N30°E-S30°W-Streichen die weiter anhaltende Krafteinwirkung eine Rotation des Trennflächengefüges bewirkt haben muß. Ob dies eine Folge von dem in der Flyschserie vermehrt auftretenden, duktilen Gesteinsmaterial ist, kann hier nicht zweifelsfrei beantwortet werden.

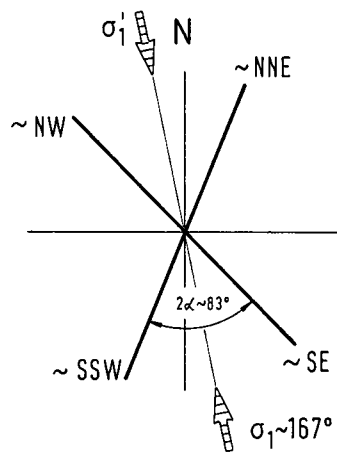
Kluffmessungen (Abb. 9d,9e) im Dambachgraben und in den Gspöttgraben-Steinbrüchen erbrachten zwei  $\sigma_1$ -Komponenten aus südöstlicher Richtung. Der spitze Winkel spricht für eine Sprödverformung dieser Sedimentgesteine. Begründen läßt sich dies damit, daß die

GRÜN et al. (1961)  
Flysch - A1 (Westeinfahrt)



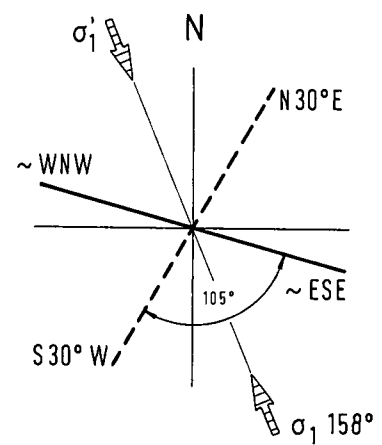
a ▲  
d ▼

SCHWINGENSCHLÖGL (1988)  
Flysch, DOKW - Greifenstein



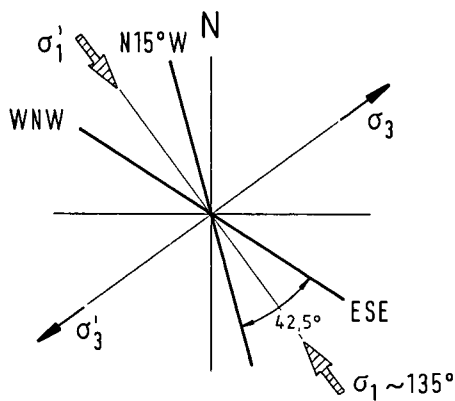
b ▲

SCHWINGENSCHLÖGL (1989)  
Kartierung, Kahlenberger Schichten



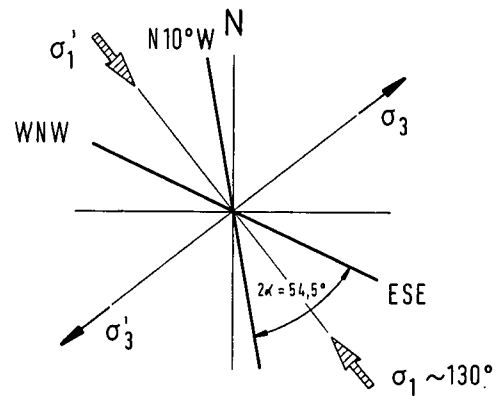
e ▼  
c ▲

ROCKENSCHAUB M. (1989)  
Flysch, Dambachgraben



61 Messungen

SCHWINGENSCHLÖGL, R. (1990)  
Flysch, Gspöttgraben



511 Messungen

Abb. 9.  
Trennflächen (Klüfte) und Streichrichtungen.  
a,b,c) Künstliche und natürliche Flyschaufschlüsse.  
d,e) Flysch der Kahlenberger Teildecke (= Ostabschnitt der Flyschzone).

duktile verformbaren Mergel und Schiefertone an beiden Lokalitäten wesentlich geringmächtiger vorliegen, als die Quarzsandsteine.

Die Aufschlüsse (Abb. 9a-9e) liegen bereits in jenem Teil der Flyscheinheit, welcher durch seine Karpatische Streichrichtung (das ist NE-SW) gekennzeichnet ist. Von den Klufthauptrichtungen sind jene nach NW bis SE zeigenden Scharen mit den großen Querstörungen (siehe geologische Karte Wien und Umgebung, 1984) in der Greifensteiner Teildecke gut vergleichbar.

#### 4.3. Bemerkungen zur Bruchtektonik an der Überschiebungszone Nördliche Kalkalpen auf Flysch

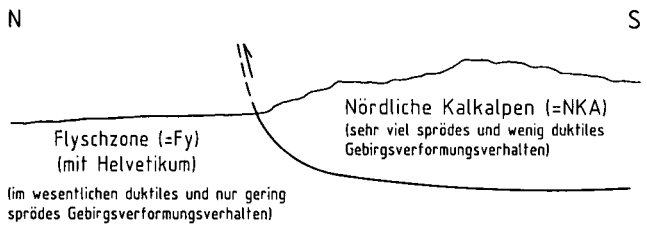
Wahrscheinlich sind es lokal auftretende Entspannungserscheinungen, welche an der Überschiebungsfrent der Nordkalkalpen auf die Flyschzone als Ursache

für die weithin beobachteten Rutschungen oder/und Großhanggleitungen gelten können. In vielen Teilen Österreichs ist diese Überschiebungsfrent bereits als steile Aufschiebungsbahn im Gelände zu beobachten. Meist sind sogenannte lystrische Flächen als Bewegungsbahnen kartierbar. Durch einen stetigen, wohl abklingenden Anschlag der Nordkalkalpen auf den Flysch kam es zu sehr steilen Aufpressungsflächen, welche Fallwinkel bis zu 80° aufweisen können (Abb. 10a-10c).

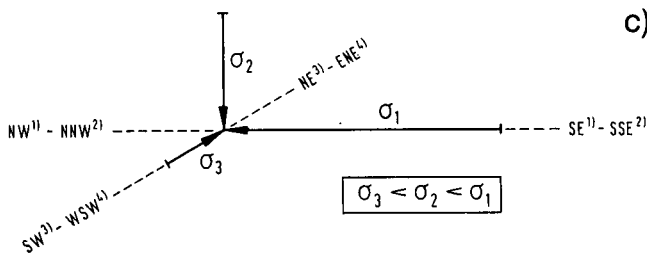
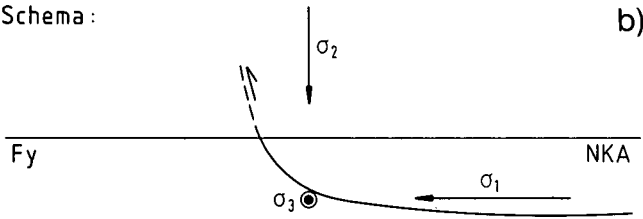
Um einen geologischen Körper über oder auf einen anderen zu schieben, muß die Hauptspannung  $\sigma_1$  horizontal angreifen. Senkrecht darauf steht  $\sigma_3$ .

Die  $\sigma_2$ -Richtung wird im betrachteten Fall etwa in E-W-Richtung verlaufen. Nur so wäre es mechanisch möglich, eine enorm schwere Masse trotz des Widerstandes durch Haft- und Gleitreibung auf ihre Unterlage in eine Position zu bringen, die einer Überschiebung entspricht (vgl. G. MANDL, 1980).

Übersichtsprofil:



Schema:



NW<sup>1)</sup>..... ENE<sup>4)</sup>..... korrespondierende Himmelsrichtungen

- $\sigma_1$  ..... aus der Gebirgseinengung stammende rein tektonische Spannung
- $\sigma_2$  ..... aus dem Überlagerungsdruck ableitbare Spannung
- $\sigma_3$  ..... verantwortlich für seitliche Stauchungen im Gebirgstrischen (? Querfaltenbildung)

Abb. 10.

a,b) Schematische Darstellung und Anordnung der Hauptnormalspannungen bei einer Über- bzw. Aufschiebung im Sedimentgebirge der Deckenfronten Nördliche Kalkalpen auf die Flyschzone.  
c) Größenverhältnis der maßgebenden Hauptspannungen im Gebirgskörper.

Wenn nun durch langandauernde Verwitterungsvorgänge Hänge geschaffen werden, so beeinflusst die kleinste Hauptspannung ( $\sigma_3$ ) die freie Felsoberfläche. Es muß dabei nicht eine meßbare Bewegung, aus der Überschiebung herrührend, die Deckenstirn beanspruchen. Vielmehr genügt der Einfluß des  $\sigma_1$ ! Durch die große Spannungsdifferenz von  $\sigma_1$  zu  $\sigma_3$  ( $\sigma_2$  hier aus der Überlagerungsmasse abgeleitet) wird eine Auflockerung des Gebirges mit Bildung von neuen Klüften und Schwächestellen eingeleitet, und die Hänge werden in ein instabiles Gleichgewicht gebracht. Ständige Erosions- und Gravitationskräfte sorgen weiters dafür, daß bei geringfügigen baulichen Eingriffen in diese Felskörper Massenbewegungen ausgelöst werden. Auch Erdbebenwellen können durch ihre Schwingungsenergie die aufgelockerten Felsmassen in Bewegung versetzen.

Es ist somit nicht verwunderlich, daß gerade an der Deckenfront zum Flysch sehr häufig Rutschungen und Gleitungen auftreten. Regionale Geologie und Gefügeausbildung (Klüfte) begünstigen unter dem Einfluß von Wasser diese Vorgänge.

### 4.3.1. Felsbauaufgaben im Grenzbereich der Überschiebung Nördliche Kalkalpen/Flysch

Da Felsbauvorhaben im Grenzbereich dieser tektonischen Einheiten eher selten sind, wurden nur zwei Standorte miteinander verglichen.

- Massenbewegungen bei Plankenstein, NÖ (Kartierung: R. SCHWINGENSCHLÖGL, 1987/88).
- Massenbewegungen an der Flysch/Kalkalpengrenze in Vorarlberg (K.A. CZURDA & D. JESINGER, 1983).

#### 4.3.1.1. Massenbewegungen bei Plankenstein, NÖ (Kartierung: R. SCHWINGENSCHLÖGL, 1987/88)

Durch einen Felsanschnitt im Zuge einer Straßenverbreiterung in den Jahren 1970/71 wurde in einem N-exponierten Einhang nahe der Ortschaft Plankenstein eine beträchtliche Rutschung ausgelöst. Ein schon im Jahre 1895 angelegter Karrenweg mußte nach nur 25 Jahren bereits zum erstenmal saniert werden. Als die eingangs erwähnte Verbreiterung einsetzte, war von nun an der Böschungsabschnitt nach jedem Jahr instabil geworden. Es erhob sich nun die Frage, ob hier nicht schon eine geologisch sehr alte Rutschung vorläge. So zeigt die topographische Karte eine deutlich nach N offene „Hufeisenform“, welche beidseits von

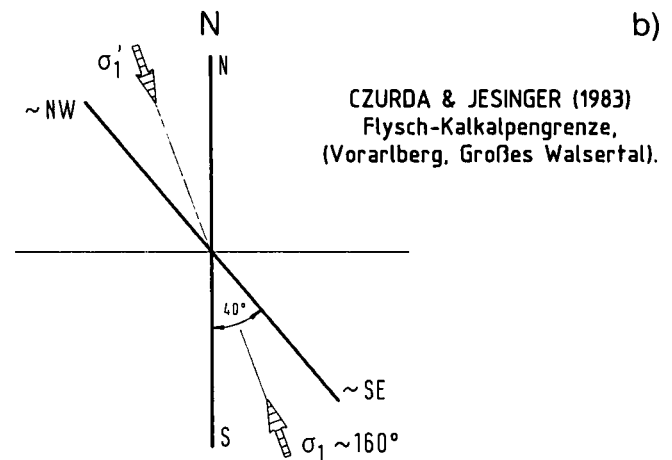
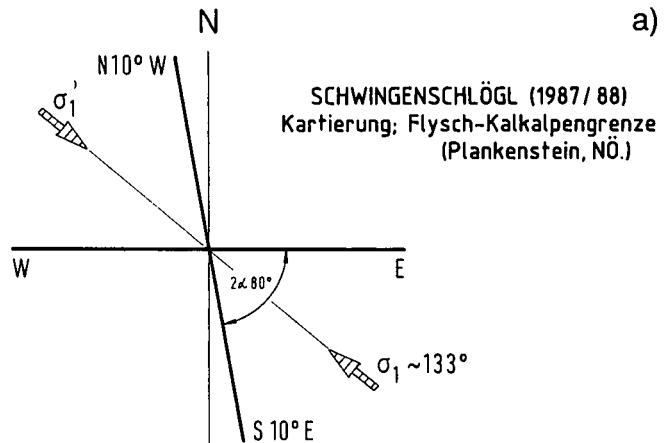


Abb. 11.

Trennflächen und Streichrichtungen von Klufscharen an natürlichen Felsaufschlüssen der Flysch-Kalkalpengrenze.

- a) Östlicher Abschnitt.
- b) Westlicher Abschnitt.

Hartgesteinsriegeln flankiert wird und im Zentrum eine typische „Rutschbuckelmorphologie“ hat. Tektonisch gesehen ist hier der Nordrand der Frankenfelder Decke/Cenoman-Randschuppe auf den Flysch und das Helvetikum aufgeschoben worden (E. PARLOW, 1950).

Das generelle Lagerungsgefüge kann mit mittelsteilem Einfallen nach NE angegeben werden. Steil nach N bzw. S einfallende Klüfte prägen die Mergel bis Kalkmergel dieses Anschnittes. Die Klufflächenausbildung, dünnschichtige Mergelschieferzwischenlagen, wie auch der hohe Auflockerungsgrad des Gebirges förderten die Bewegungskomplexität des Hangabschnittes.

Insgesamt kann man diese Massenbewegung als eine Kombination von Gleiten und Kriechen des Verwitterungsmaterials mit einem Anteil aufgelockerten Gebirges bezeichnen.

Nach Auswertung von mehr als 330 Kluffmessungen konnten zwei Hauptrichtungen ermittelt werden. Die N10°W/S10°E-streichende Schar nimmt zur beinahe E-W-verlaufenden einen Winkel von 85° ein und entspricht einem ausgewogenen Kraftfeld. Die duktil reagierenden, häufigen Mergelgesteine haben zu einer Vergrößerung des Bruchwinkels  $2\alpha$  beigetragen. Die Hauptspannung  $\sigma_1$  ist demnach mit 133° fast genau aus SE nach NW anzusetzen (Abb. 11a).

#### **4.3.1.2. Massenbewegungen an der Flysch/Kalkalpen-Grenze in Vorarlberg**

Im hinteren Großen Walsertal wurden von K.A. CZURDA & D. JESINGER in den Jahren 1979–83 umfangreiche Studien über die Bildung von weitklaffenden Klüften und Doppelgratbildungen unmittelbar an der Überschiebungsbahn durchgeführt. In diesen stark durchbewegten Schuppenzonen sind Lineamentauswertungen mit Kompaßmessungen verglichen worden, um verzerrungsbedingte Fehler aus dem Luftbild zu korrigieren.

Die offenen Großklüfte werden nach CZURDA & JESINGER mit dem Vorschub der Nordkalkalpen auf den Flysch begründet. Als Ergebnisse von Kluffmessungen sind zwei Hauptrichtungen erarbeitet worden. Ein Maximum liegt bei N40°W- zu S40°E-Streichen, ein zweites bildete sich etwa in N-S Richtung. Das ergibt eine Schubrichtung in der Winkelhalbierenden von ca. 160 nach 340°. Ein fast aus SSE kommendes  $\sigma_1$  hat hier das als spröde geltende Material des Dolomites unter dem spitzen Winkel von  $2\alpha = 40^\circ$  zerbrochen (Abb. 11b).

Die Klüftung wurde während der alpinen Orogenese angelegt. Der kalkalpine Hauptdolomit der Allgäu-Decke ist hier auf die Flyscheinheiten fast saiger aufgeschoben worden. Aus Konvergenzmessungen, welche Informationen über die Mechanik und die zeitliche Abfolge dieser Massenbewegung erbrachten, läßt sich eine Schollenzerlegung mit gegenseitiger Rotation erkennen. Die Kluffbildung wird direkt mit der Überschiebung in Zusammenhang gebracht. Abweichende  $2\alpha$ -Werte werden durch eine gesicherte Schubrichtung aus SSE mit einer Änderung des lokalen Kraftfeldes erklärt.

#### **4.3.2. Zusammenfassung und Vergleich**

Die Kluffstellungen und die Lage des  $\sigma_1$  ergeben für den westlichen und östlichen Flysch-Kalkalpenanteil zwei unterschiedliche Richtungen (Abb. 11a,b). Be-

trachtet man die generelle Streichrichtung der Flyscheinheiten in Vorarlberg, so geht jene von CZURDA & JESINGER (1983) im Großen Walsertal ermittelte Hauptspannung mit dem von SSE nach NNW weisenden Vorschub der Nördlichen Kalkalpen konform.

Die Flysch-Kalkalpen-Einheiten bei Plankenstein in NÖ hingegen, bereits beeinflusst durch das allmähliche Umbiegen des Ostalpenkörpers in die karpatische Streichrichtung, werden eher aus SE nach NW beansprucht. Beide Ergebnisse fügen sich gut in den Bauplan des jeweiligen Flyschabschnittes ein.

### **4.4. Bemerkungen zur Bruchtektonik der Nördlichen Kalkalpen**

Das Phänomen der Klüftung tritt überaus deutlich in den Sedimenten der Nördlichen Kalkalpen (= NKA) hervor. Obwohl gerade in diesem Alpenabschnitt seit dem Beginn der Anerkennung der Deckentheorie – besonders eingeleitet für das oberostalpine Deckenstockwerk durch A. TOLLMANN (1963) – die Frage nach den Überschiebungsmechanismen eher vordringlich war, ist dem Trennflächengefüge bloß als Ergebnis des Sedimentationsvorganges Beachtung geschenkt worden.

Nun sind aber klufftektonische Untersuchungen gerade in der lithologischen Vielfalt der Sedimentabfolge der NKA ein wichtiger Hinweis für die Ermittlung des jeweils lokalen Kraftfeldes bzw. seiner Hauptnormalspannungsrichtungen. P. SCHMIDT-THOMÉ hat erstmals in den Bayrischen Kalkalpen Bruchstrukturen und ihre Genese in großer Anzahl 1954 untersucht. Sein Beobachtungsgebiet reichte von der Iller bis zur Salzach, sodaß für die statistische Behandlung ein genügend großer Ausschnitt der NKA zur Verfügung stand. Er konnte auch einen deutlichen Zusammenhang zwischen den großen, diagonal zum Alpenstreichen verlaufenden Störungen und dem Scherkluffsystem im Gebirgskörper herausarbeiten.

#### **4.4.1. Betrachtungen über die Verformbarkeit von Sedimentgesteinen**

Bei den für diese tektonische Einheit ausgewählten Beispielen und Felsbauaufgaben fällt auf, daß der Bruchflächenwinkel  $2\alpha$  meist kleiner als 80° ist.

So zeigte die statistische Auswertung von Kluffflächen der Frankenfelder Decke in den Kalkalpen (Abschnitt Pielachtal) nach Ausplotten von 474 Klüften einen Bruchflächenwinkel von  $2\alpha = 30^\circ$ . Kleinere Winkel als 45° weisen für gewöhnlich auf sprödes Materialverhalten während einer Beanspruchung durch Druck hin (R. SCHWINGENSCHLÖGL, 1981).

SCHMID-THOMÉ hat 1954 an neun verschiedenen Abschnitten der Allgäu- bzw. der Lechtal- und Berchtesgadener Decke Kluffrosen erarbeitet, die im Mittel den spitzen Bruchflächenwinkel von ca. 40° aufweisen. Dies deutet insgesamt auf eine Sprödverformung dieser Deckeneinheiten hin.

In vielleicht ähnlicher Art und Weise ist die Frankenfelder Decke mit ihrer Gesteinsvielfalt ausgebildet. Be-

Tabelle 1.

Versuch einer Einschätzung des Verformungsverhaltens der Schichtfolge in der Frankfurter Decke (Kalkvorpalen, NÖ). Nicht berücksichtigt wurden dabei die bei einer Gesteinsdeformation auftretenden Bedingungen, wie Deformationsart, der Zeitfaktor, Temperatur, Spannungszustand sowie Lösungen und Wasserdampf (s. dazu auch G.D. ASHGREI, 1963).

	Gestein	Mächtigkeit	Erwartetes Verformungsverhalten		In Rechnung gestellte Mächtigkeit	
			spröde (S)	duktil (D)	spröde (S)	duktil (D)
kr	Losensteiner Schichten	≈ 2 m	—	—		
kr	Roßfeld-Schichten	20 m	S		20 m	
kr	Schrambach-Schichten	≈ 100 m	S	D	50 m	50 m
j	Mühlbergkalk	5 m	S			
j	Haselbergkalk	10 m		D		
j	Plassenkalk	20 m	S		20 m	
j	Ammergauer Schichten	≈ 100 m		D		100 m
j	Tegernseer Kalk	40 m		D		40 m
j	Agathakalk	1 m	—	—		
j	Radiolarit	40 m	S		40 m	
j	Filamentkalk	5 m		D		
j	Vilser Kalk	linsig	—	—		
j	Doggerkalk	10 m	S			
j	Adneter Kalk	20 m		D		20 m
j	Kieselkalk	80 m		S	80 m	
j	Liasfleckenmergel	≈ 150 m		D		150 m
j	Kalksburger Kalk	linsig	—	—		
t	Schattwalder Schichten	8 m		D		
t	Kössener Kalk	≈ 100 m	S	D	50 m	50 m
t	Bunter Keuper	20 m		D		20 m
t	Hauptdolomit	≈ 300 m	S		300 m	
t	Opponitzer Kalk	≈ 80 m		D		80 m
t	Opponitzer Rauhwacke	linsig	—	—		
					560 m	510 m

wertet man nun all jene Schichten, welche mächtiger als 20 m sind, ob sie sich spröde oder duktil verformen lassen, so erhält man ca. 510 m Gesteinsmächtigkeit mit duktilem Verformungsverhalten (Tab. 1). Dem stehen etwa 560 m mächtige Schichtpakete gegenüber, die als spröde verformbar eingestuft werden. Von den nicht in die Bewertung miteingetragenen Schichten abgesehen, halten sich diese Mächtigkeiten etwa die Waage.

Geht man nun von einem allgemein bekannten Grundsatz in der Festigkeitslehre aus, demzufolge bei einer Verformung die Kraft von den sich als steifer verhaltendem Material „angezogen“ wird, so haben die 560 m „Sprödmächtigkeit“ offenbar genügt, um einen kleinen Bruchwinkel  $2\alpha$  hervorzubringen. Den dazwischen liegenden, duktil verformungswilligen Gesteinen wurde daher beim Zerbrechen unter den jeweils angreifenden Druckkräften das im Sprödgestein gebildete Scherflächensystem mit gleicher Richtung und Lage aufgezungen.

Da aber kaum die Art der Verformungsbereitschaft bei den üblichen Kluffstatistiken über Sedimentgesteine miteinbezogen wird, könnte man bei Einhalten gewisser Randbedingungen vom aufgetretenen Bruchflächenwinkel  $2\alpha$  unter Umständen auf die Art der Verformung rückschließen.

#### 4.4.2. Felsbauaufgaben in den Nördlichen Kalkalpen

Zur Erläuterung und zum Vergleich von Trennflächenausbildungen in den NKA wurden folgende Aufschlüsse und Felsbaubeispiele herangezogen:

- Bruchtektonik im Toten Gebirge (R. SCHWINGENSCHLÖGL, 1986).
- Die geplante Bogensperre „Kaiblingmauer“ (W. DEMMER, 1983).
- Der Wetterin-Stollen (Ost) (W. NOWY, 1988).
- Die Hochsteg-Brücke im Schwarzatal, NÖ (Kartierung: R. SCHWINGENSCHLÖGL, 1988).
- Lawingalerie Schwarzatal, NÖ (Kartierung: R. SCHWINGENSCHLÖGL, 1988).
- Hangbrücke Piestingtal, NÖ (Kartierung: R. SCHWINGENSCHLÖGL, 1989).
- Gscheidl-Stollen, NÖ (Kartierung: R. SCHWINGENSCHLÖGL, M. ROCKENSCHAUB und H. HELLER, 1987/88).

##### 4.4.2.1. Bruchtektonik im Toten Gebirge (R. SCHWINGENSCHLÖGL, 1986)

Ausgehend von einer photogeologischen Interpretation des Hochplateaus des Toten Gebirges wurden eine Erfassung des Störungsmusters, die Anlage und

SCHWINGENSCHLÖGL (1986)  
Totes Gebirge (Westteil, Ostteil)

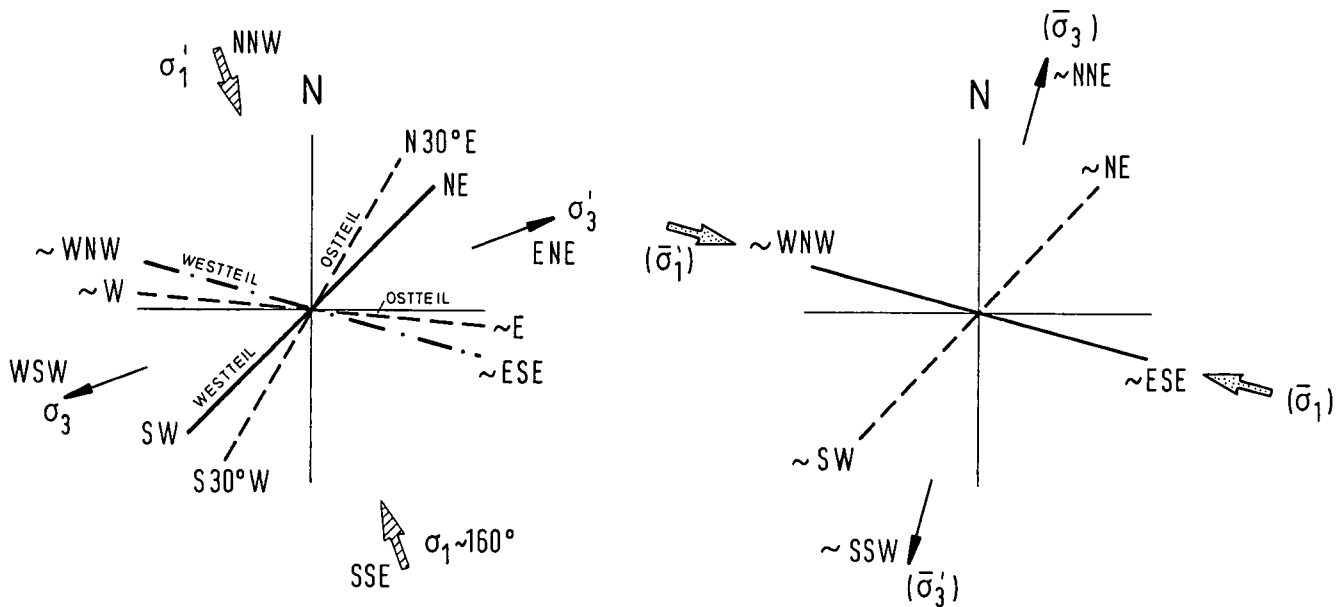


Abb. 12.  
Kluftdiagramme der Störungen und der Liasspalten in Bezug zum regionalen Spannungsfeld.  
a) Störungen mit den zugehörigen Hauptnormalspannungsrichtungen.  
b) Liasspalten mit dem für die Bildung der Hauptrichtungen notwendigen Spannungsfeld.  
—— = Hauptrichtungen; - - - - = Nebenrichtungen; schraffierte Pfeile = tatsächliche Spannungsrichtungen; gepunktete Pfeile = hypothetische Spannungsrichtungen.

Richtungsverteilung der Liasspalten sowie die Ermittlung des vorgefundenen Spannungszustandes angestrebt.

Die Hochfläche des Toten Gebirges wurde durch eine deutliche Höhenstufe morphogenetisch in zwei Teile getrennt und daher auch statistisch so ausgewertet. Zeigen die Kluftdiagramme „Störungen-Ost“ und jene der „Störungen-West“ auch das Erscheinungsbild einer duktilen Verformung, so muß doch zugegeben werden, daß hier hauptsächlich Gesteine, die als spröde anzusehen sind, verformt wurden (Abb. 12a).

Setzt man aber den Zeitfaktor, welcher bei einer Gesteinsdeformation gegenüber einem Laborversuch an einer Probe als „gegen unendlich ansteigend“ angesehen werden kann, ein, so spielen Relaxationserscheinungen bei diesen langandauernden tektonischen Prozessen eine sehr wichtige Rolle. Bei einer Relaxation erfährt die angreifende Kraft nämlich eine gewisse Abnahme, bei welcher die Deformation aber konstant weiterläuft. Das hieße, ein langanhaltender Kraftangriff bewirkt auch eine langsame Änderung des Bruchflächenwinkels bei der Bildung von Scherklüften (Abb. 12a).

Was in diesem Zusammenhang leider noch nicht untersucht wurde, ist die Frage, ob der sich von der Erdoberfläche in die Tiefe der Erdkruste stetig ändernde Spannungszustand die Bildung und die Art der Kluftentstehung sehr wesentlich beeinflusst. Aufschluß darüber könnten Tiefbohrungen geben, wie sie auf der Halbinsel Kola erfolgten, und jene in der Bayrischen Oberpfalz, die zur Zeit bei etwa 4000 m Tiefe angelangt ist.

Was in diesem Zusammenhang leider noch nicht untersucht wurde, ist die Frage, ob der sich von der Erdoberfläche in die Tiefe der Erdkruste stetig ändernde Spannungszustand die Bildung und die Art der Kluft-

entstehung sehr wesentlich beeinflusst. Aufschluß darüber könnten Tiefbohrungen geben, wie sie auf der Halbinsel Kola erfolgten, und jene in der Bayrischen Oberpfalz, die zur Zeit bei etwa 4000 m Tiefe angelangt ist.

Betrachtet man die Kluftdiagramme der Störungen für die westliche, tiefere Totengebirgs-Hochfläche, so ist das gekreuzte Scherflächensystem nicht gleichwertig ausgeprägt. Aus der Geländebeobachtung ergab sich, daß zu dem NE-SW-Ast das zugeordnete Flächensystem etwa WNW-ESE gerichtet ist. Daraus resultiert eine  $\sigma_1$ -Spannung von ca.  $160^\circ$  nach  $340^\circ$ , welche mit dem von A.R. RITSEMA (1974) konstruierten Spannungsfeld für den Ostalpenraum gut übereinstimmt. Das gleiche gilt auch für die Richtungen der „Störungen-Ost“. Die kleinste Hauptnormalspannung (=  $\sigma_3$ ) würde dabei in ENE-WSW liegen (Abb. 12a).

Vergleicht man nun das „Kluftsystem der Störungen Ost und West“ mit den Richtungen der Liasspalten, so läßt sich folgendes ableiten: Da zur Bildung von Spalten sehr kleine  $\sigma_3$  oder regelrechte Zugspannungen notwendig sind, müßte die Verteilung der Haupteinengungsrichtung ein Kräftefeld vorgeben, in dem sich noch geschlossene Trennflächen zu Spalten ausbilden können (Abb. 12a,b).

Nach der Auswertung der Liasspalten im östlichen Hochplateau des Toten Gebirges liegt nun eine WNW-ESE-Häufung der Hauptrichtungen vor. Das zur Spaltenbildung notwendige  $\sigma_3$ , aus den Störungen erarbeitet (Abb. 12a), zeigt aber in WSW-ENE-Richtung – müßte jedoch in der NNE-SSW-Achse liegen! Ich habe 1986 die Auffassung vertreten, daß die Anlage dieser Bruchsysteme auf ein Diagonalscherflächensystem zurückgeht. Heute meine ich, diese Zerrklüfte sind doch eher einem gesonderten Kräfteplan zuzuordnen



und haben mit dem übrigen System der Klüfte und Störungen des Plateaus keine genetische Gemeinsamkeit. Es sind ausschließlich durch Dehnung entstandene Trennklüfte, welche nachfolgend zu Spalten erweitert wurden. Wie Abb. 12b zeigt, müßten die Liasspalten bzw. deren Hauptrichtungen etwa in Richtung eines anzunehmenden ( $\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}'_1$ ) liegen, um sich dann normal dazu ( $\bar{\sigma}_3, \bar{\sigma}'_3$ ) zu öffnen.

Da aber das Bildungsalter der Klüfte und der Störungen jünger als jenes der Liasspalten anzusetzen ist, kann nur ein eigenes Kraftfeld für die Anlage und Bildung dieser in den NKA so auffälligen Erscheinungen angenommen werden (R. SCHWINGENSCHLÖGL, 1986, S. 91ff.). Diese Vorstellung wird durch die Geländebefunde erhärtet und weist auf eine Klüftbildung nach Entstehen der Liasspalten hin (Abb. 13a-d)!

Es sind in der Arbeit über die Zugspalten im Dachsteingbiet von O. GANSS (1938) gewiß manche Ungeheimheiten enthalten, wie das Fehlen jener Beobachtungen, die zur Annahme von Zugspalten berechtigen und auch die Frage der Kinematik der Dachsteinmasse. Die Vorstellung der Zerrungstektonik ist aber weiterhin aufrechtzuhalten, wie dies meine Geländeerkundungen auf der östlichen Totengebirgsfläche bestätigen. Es sind dies in ihrer Längsrichtung verzweigte, immer dünner werdende Spalten. Manchmal auch an beiden Enden fast spitz zulaufende Trennbrüche.

Andere Vorstellungen, diese Spaltenbildung betreffend, wie jüngst von A. TOLLMANN (1987, S. 56) so ausgeführt, daß auf keinen Fall Dehnung als Bildungsmodus in Frage kommt, können hier nicht undiskutiert bleiben. Man braucht nicht unbedingt W-E-orientierte Verschiebungen, um Pressungen aus dieser Richtung zu erhalten. Es genügen vielleicht auch jene Zerrungskräfte, welche bei der Bildung eines neuen Ozeans (A. TOLLMANN, 1987, S. 105, Abb. 3 – der angegebene „nachmalige Ozean“ im Süden der Kalkhochalpen!) zwischen Afrika und Eurasien wirksam werden könnten. Dabei käme es zur Bildung von  $\sigma_3$ , normal zur Längsrichtung der Geosynklinale. Diese Zugspannungskomponente ermöglichte nun – unter Umständen schon submarin (?) – die Spaltenbildung an der Trias/Jura-Wende. Die Richtungen korrespondieren nicht ganz mit dem späteren, tertiären Trennflächensystem. Dies kann wiederum als Folge des damals herrschenden Kraftfeldes interpretiert werden.

TOLLMANN meint weiters, daß bei Öffnung der alpinen Geosynklinale keine Pressung wirksam werden konnte und somit die Frage nach der Herkunft der Kräfte zur Ausbildung des Spaltensystems bis heute unbeantwortet blieb. Dies stimmt nur bedingt, denn eine Geosynklinalbildung ist ja eine allseitig „grabenartige“, sehr langgestreckte Einsenkung der Erdkruste und kann nur bei Zerrungstektonik entstehen (s. dazu besonders H.-G. WUNDERLICH, 1966, S. 36ff sowie R. SCHÖNENBERG, 1980, S. 13).

Bei Dehnung der Erdkruste steht aber die  $\sigma_1$ -Komponente bekanntlich senkrecht und die kleinste,  $\sigma_3$ , horizontal! Ebenso  $\sigma_2$ , die mittlere Hauptnormalspannung. Es ist aber gerade dieses  $\sigma_3$ , welches Zugspannungen hervorruft, die für die Bildung von Trennbrüchen in den verschiedenen Kalkhochplateaus heranzuziehen sind.

Betrachtet man die tektonischen Wirkungen der drei Hauptspannungsrichtungen im Gebirge:  $\sigma_1, \sigma_2$  und  $\sigma_3$ , so sind die Erkenntnisse der Seismotektonik ebenfalls heranzuziehen. Hier gibt das sogenannte „ANDERSON-Diagramm“ wichtige Hinweise (s. dazu G. SCHNEIDER,

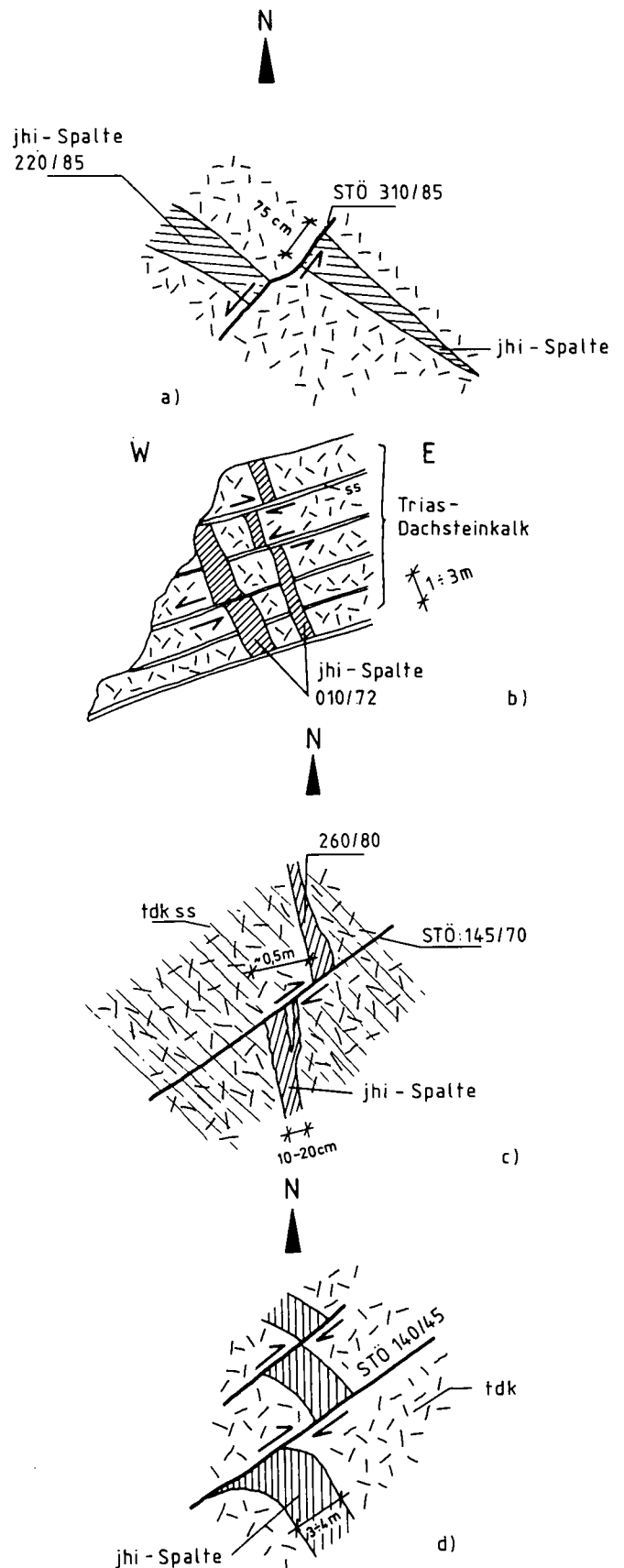


Abb. 13. Beispiele für gestörte Liasspalten, welche ausschließlich im östlichen Hochplateau des Totes Gebirges vorliegen. a,c und d = Rotkogelsattel; b = Rotgeschirr-Westabschnitt; jhi = Jura-Hierlatzkalk.

1975, S. 69ff.). Es ist nämlich entscheidend, welche der drei Hauptspannungen die Rolle der Auflastspannung übernimmt, denn diese dominiert den tektonischen Deformationsakt.

Bei einer Abschiebung beispielsweise bildet die größte Hauptspannung ( $\sigma_1$ ) die Auflastspannung. Nimmt man eine grabenartige Struktur an, so entsteht (im Querprofil!) an beiden Seiten eine Abschiebung –  $\sigma_1$  ist senkrecht gerichtet. Dieses „ANDERSON-Diagramm“ ist für eine Tiefe von 10 km erstellt worden, da Krustenbeben in Mitteleuropa meist in dieser Tiefe ihre Herdfläche besitzen. Es kann auch für die Frage des räumlichen Spannungssystems herangezogen werden.

Wie nahe liegen dabei Horizontalverschiebung und Abschiebung bzw. Grabenbildung (s.l.) und wie klein sind doch die Unterschiede der Hauptspannungen. Die räumliche Orientierung und die enge Beziehung zu den verschiedensten Übergängen werden somit klarer. Weiters ist bemerkenswert, daß in gleichen Tiefenbereichen (s. G. SCHNEIDER, 1975) verschiedene Bewegungstypen nebeneinander vorkommen können.

Insgesamt ist der Schluß zulässig, daß ein vielphasiges Spannungsgeschehen in einem derart komplexen Modell, wie dem der Plattentektonik und den damit verbundenen regionalen bis lokalen tektonischen Spannungsfeldern, den Einfluß auf die Bildung der Liasspalten als erweiterte Trennbrüche folgerichtig erscheinen läßt.

#### 4.4.2.2. Die geplante Bogensperre „Kaiblingmauer“

Diese Sperre war im Reichraminger Hintergebirge (OÖ) etwa 5 km südlich der Ortschaft Reichraming/Enns projektiert. Die Talsperre hätte in der Reichraminger Decke der NKA nahezu ganz in Hauptdolomit ge-

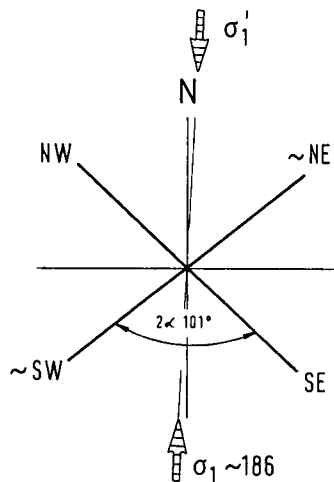
gründet werden können. Sie würde rund 101 m Gesamthöhe haben, doppelt gekrümmt, an der Krone 4,5 m und an der Mauerbasis ca. 26 m stark sein. Bei einer Kronenlänge von ca. 337 m diese dieser Sperrentypus eine Mauerspreizung von 3 : 1 auf. Diese Geometrie wäre für die Lasteinleitung in dem vorgefundenen V-Tal als äußerst günstig anzusehen.

Tektonisch gesehen läge eine zukünftige Sperre im Bereich einer Sattelstruktur oder, wie A. TOLLMANN (1976, Tafel 4) angibt, in der sogenannten Kaibling-Antiklinale. Die Gründungsfläche würde somit auf der Zerurzungszone dieser Struktur zu liegen kommen. Daraus ergibt sich die Frage nach den dabei aufgerissenen Längsklüften in Ost-West-Richtung und deren Tiefenerstreckung. Daß die Sperrstelle auf einem Gewölbescheitel liegen könnte, wird auch von W. DEMMER (1983) nicht ausgeschlossen. Diese Tatsache wäre bei einer Untergrundversiegelung und bei möglichen Verkarstungen von entscheidender Bedeutung.

Nach einer kluftstatistischen Auswertung der im geologischen Bericht von W. DEMMER (1983) angegebenen Trennflächenverteilung erhält man eine deutliche NW-SE-Haupttrichtung. Im geplanten Sperrnenabschnitt ist sie für den Bachverlauf verantwortlich. Die Nebenrichtung in NE-SW ist dagegen nicht scharf ausgeprägt. Ermittelt man den Bruchwinkel  $2\alpha$ , so ergeben die  $101^\circ$  den zwingenden Hinweis, daß hier eine duktile Verformung vorliegt. Die  $\sigma_1$ -Richtung – aus  $186^\circ$  kommend – liegt im größeren Öffnungswinkel! Dies zeigen auch die Vergenzen der nahezu W-E-verlaufenden Faltenzüge im Bereich des geplanten Sperrnenobjektes (Abb. 14a).

Die einengende Hauptkomponente wird im kalkalpinen Raum häufig über die aus der regionalen Tektonik bekannten Erscheinungen (Falten, Flexuren, Überschiebungsrichtungen etc.) abgeleitet. Diese Vorgangsweise

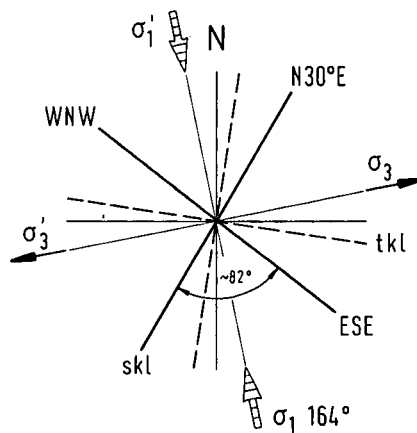
Sperre Kaiblingmauer  
W. DEMMER (1983)



48 Messungen

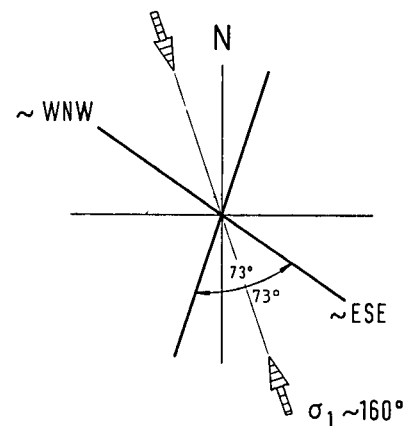
a)

Wetterinstollen – Ost  
W. NOWY (1988)



b)

Hochstegbrücke, Schwarzatal  
R. SCHWINGENSCHLÖGL (1988)



480 Messungen

c)

Abb. 14.

Kluftlagen im Ostabschnitt der Nördlichen Kalkalpen.

a) Klufttrichtungen im Hauptdolomit der Kaibling-Antiklinale.

b) Das lokale Spannungsfeld im Wetterinstollen-Ost, zur Zeit der Kluftbildung.

———— = Scherklüfte (skl), - - - - = Trennklüfte (tkl).

c) Trennflächenausbildung im Wettersteindolomit des Schwarzatales.

stellt ein subjektives, aber unerläßliches Hilfsmittel bei der Beanspruchungsanalyse dar. Sie ist aber rein deduktiv und wurzelt in der regionalgeologischen Kenntnis und der Tatsache, daß die Ostalpen ihre Hauptbeanspruchung aus Süden bis Südosten erfahren haben. Wenn eine Schar des konjugierten Flächensystems dabei nicht ausgebildet ist, so kann dies auf unterschiedliche Kräfteinwirkungen hindeuten.

#### 4.4.2.3. Der Wetterin-Stollen Ost

Anders als bei der Kartierung von Klüften in der geplanten Gründungsfläche der Bogenstaumauer Kaibling, ist im Wetterin-Stollen, welcher einen Abschnitt des westlichen Teiles der 1. Wiener Hochquellenwasserleitung darstellt, vom kartierenden Geologen zwischen Scherklüften und Trennklüften schon vor Ort genau unterschieden worden.

Nach einer Auswertung der von W. Nowy (1988) zur Verfügung gestellten Stollenbänder zeigte sich eine statistische Verteilung der Trennklüfte mit einem deutlichen Maximum jeweils in N-S- bzw. E-W-Richtung.

Die im gleichen Stollenabschnitt beobachteten Scherklüfte zeigen einen Verlauf von etwa N 30° E und einen anderen Ast mit dem Maximum in ESE-WNW-Richtung.

Die  $\sigma_1$ -Hauptspannung, zur Zeit der Klüftbildung, liegt von 164° nach 344° gerichtet. Das zugehörige  $\sigma_3$  ist bei 254° bzw. 074° postiert.

Vergleicht man nun die Anlage der Trennklüfte und der Scherklüfte miteinander, so ist gut zu erkennen, daß die Hauptverteilung der Zugklüfte nahezu in  $\sigma_1$ -Richtung liegt (eine Unschärfe wäre geologisch bedingt) und sich normal dazu diese Klüfte unter einer Zugspannung oder minimalen Druckspannung ( $\sigma_3$ ) öffnen konnten (s. auch Abb. 14b).

Bei der Beteiligung von Haselgebirge, Gips und Anhydrit, wie für diesen Bereich im Wetterin-Stollen angegeben, kann die Beanspruchung im Kalkalpenabschnitt des Tonion mit einem Bruchwinkel von  $2\alpha = 82^\circ$  als duktil angesehen werden. Also auch hier ist der hohe Anteil an sprödem Hauptdolomit durch die duktil ver-

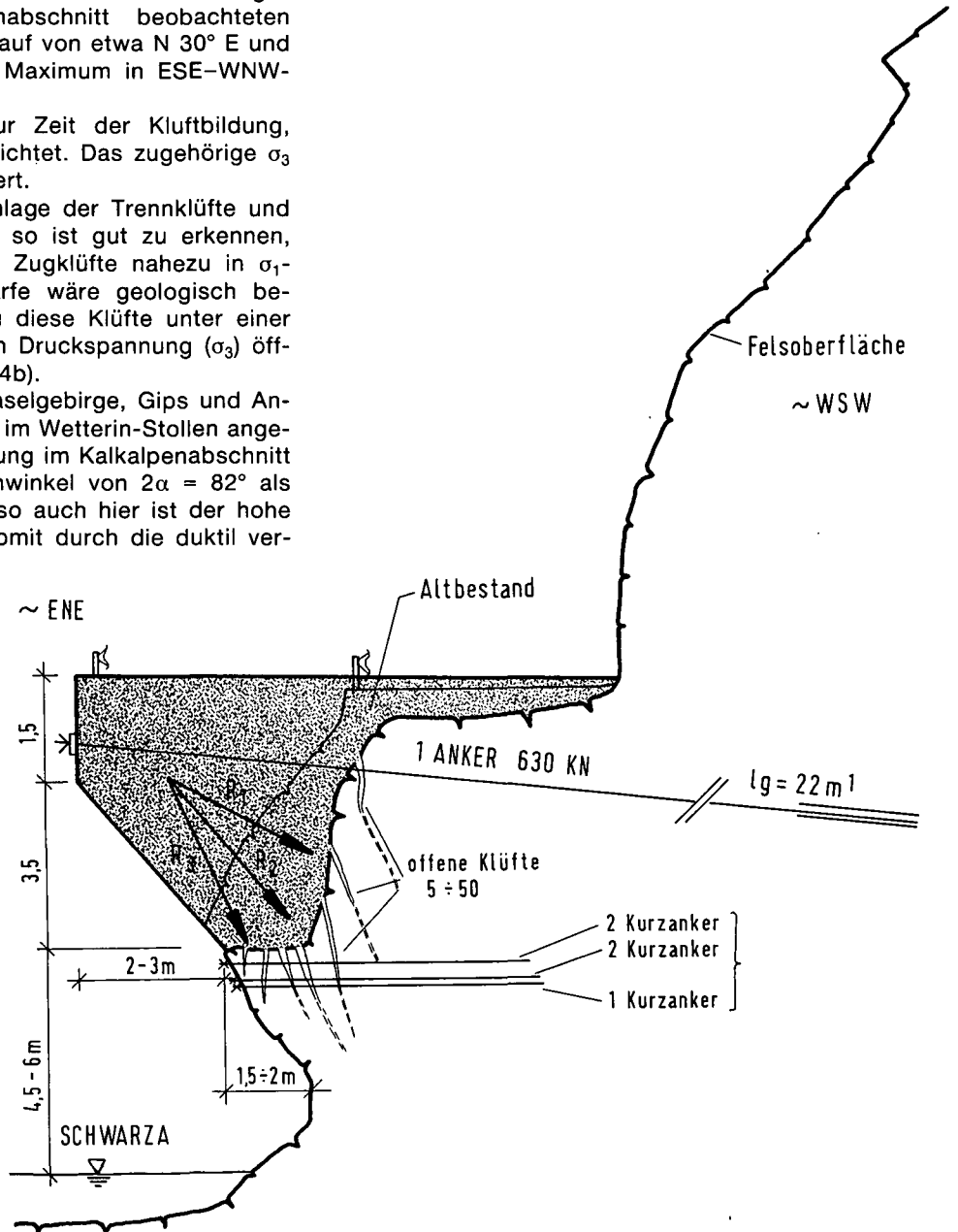
formungswilligen Gesteinsserien zu einer Erweiterung des Bruchflächenwinkels  $2\alpha$  „gezwungen“ worden.

Als geotechnisch-praktische Konsequenz von im Kartierungsstadium schon gesondert ausgeschiedenen Klüften konnte W. Nowy (1983) aufzeigen, daß die Wasserzutritte im Wetterin-Stollen meist aus den senkrecht zur Stollenachse stehenden Trennflächen stammen. Dies waren jene Trennklüfte, welche etwa N-S streichen (s. W. NOWY & H. PLACHY, 1989). Hingegen sind die WNW-ESE-verlaufenden Klüfte (hier Scherklüfte) geschlossene Fugen, da sie durch die  $\sigma_1$ -Komponente zusammengepreßt wurden.

#### 4.4.2.4. Die Hochstegbrücke im Schwarzatal, NÖ

Das enge, vielfach gewundene tiefe Tal des Schwarzaflusses teilt den großen Karbonatstock im Osten Österreichs in zwei Massive: In das Raxmassiv südwestlich und in den Schneebergblock nordöstlich der Schwarzta.

Abb. 15.  
Profil durch den orographisch rechten Einhang im Schwarzatal. Die am weitesten auskragende Konsole wird dabei geschnitten. Lage der möglichen Resultante je nach Lastfall:  
 $R_1$ : günstig, die Klüfte schließen sich.  
 $R_2$ : ungünstig, Kerbwirkung entsteht.  
 $R_3$ : ungünstig, die Klüftöffnung wird gefördert.



Im Zuge eines Brückenneubaus in einem sehr schmalen Talabschnitt wurden als Tragelemente für ein anschließendes Straßenstück Konsolenscheiben in den meist überhängenden Wettersteinkalkkomplexen vorgesehen. Aus der Anlage der Taleinhänge und wegen der exponierten Lage des Brückentragwerkes, wurde schon im Planungsstadium mit der Existenz von talparallelen Klüften gerechnet.

Eine ingenieurgeologische Feldaufnahme der Konsolenflächen erbrachte zahlreiche offene Klüfte, z.T. durchwurzelt und mit limonitischem Verwitterungsmaterial gefüllt. Diese Trennflächen konnten unzweifelhaft als Entspannungsklüfte eingestuft werden, da auch die gravitative Komponente durch überhängende Felspartien einen ebenso wichtigen Faktor darstellt.

Es wurden 480 Klüftstellungen gemessen, welche statistisch gesichert zwei Klüftscharen gleicher Besetzungsdichte erbrachten. Eine NNE-SSW Richtung kombiniert mit einer zweiten, etwa WNW-ESE-verlaufenden Klüftchar fordert eine Haupteinengung aus  $160^\circ$  nach  $340^\circ$ . Da außer dem Wettersteindolomit keine anderen Gesteine vorkommen, ist die Sprödverformung dieser Karbonatgesteine damit gut belegt,  $2\alpha = 73^\circ$  (Abb. 14c).

Die NNE-SSW-dominierende Klufttrichtung stimmt gut mit dem „Weichtal“-Bruch bzw. „Höllental“-Bruch (H.-P. CORNELIUS, 1951) überein. Durch die Kenntnis der lokalen Tektonik kann man hier die Hauptnormalspannung aus den beiden gleichwertigen Klüftscharen genau mit der Richtung des Deckentransportes im Rax-Schneeberg-Gebiet in Einklang bringen.

Die als Entspannungsklüfte bezeichneten WNW-ESE-gerichteten Trennflächen stimmen im Projektabschnitt genau mit dem Talverlauf der Schwarzza überein. Da bei der Einleitung der Konsolenresultierenden (Abb. 15) befürchtet werden mußte, daß sich diese

Klüfte durch eine Spaltzugkraft noch mehr erweitern, vielleicht sogar zum Abplatzen von Teilen der freien Felsböschung Anlaß geben könnten, wurden entsprechende technische Maßnahmen vorgesehen. Knapp neben und unterhalb der Konsolensohle wurden insgesamt fünf Anker angeordnet, welche die Aufgabe hatten, ein weiteres Klüftöffnen zu verhindern. Um beim Ankerspannen das Gebirge infolge der offenen Klüfte nicht zu zerbrechen, wurden die Trennflächen ausgeräumt und mit einer Zementsuspension drucklos gefüllt. So konnte ein für die Ankerlasteinleitung einheitliches Gründungsgebirge geschaffen werden.

#### 4.4.2.5. Lawingalerie Schwarzatal

Durch Felsfreileigungsarbeiten im Schwarzatal für eine Lawingalerie nahe dem Großen Höllental konnten für die Deutung bruchhafter Deformationsvorgänge im Gebirge weitere Aufschlüsse im Karbonatgestein benützt und kartiert werden. Die als Gewölbe konzipierte Lawingalerie wurde berg- und talseits in Wettersteinkalke eingebunden. Zum Teil mußte hierfür die Überlagerungszone einer bis zu 8 m mächtigen Randmoräne beseitigt werden.

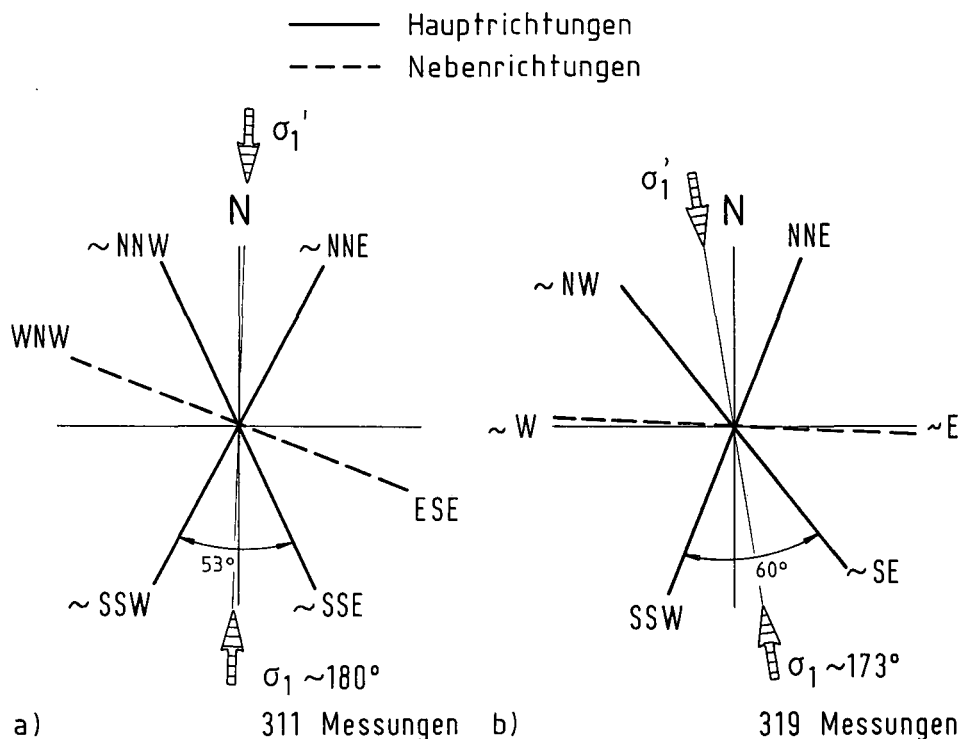
Aus 311 Kluftmessungen in den Sohlflächen der Pfeilerfundamente wurde ein bezüglich der N-S-Achse symmetrisches Klüftsystem vorgefunden, welches auch morphologisch als gleichwertig anzusehen war und eine Hauptspannungsrichtung ( $\sigma_1$ ) von S nach N impliziert. Die dritte Klufttrichtung nach WNW-ESE entspricht der Schwarzatalung (Abb. 16a).

Aus dem Öffnungswinkel  $2\alpha = 53^\circ$  zwischen den entsprechenden Klüftscharen ist eindeutig eine spröde Gesteinsdeformation abzulesen. Die Lithologie des Wettersteinkalkes mit seinen dolomitischen Bereichen spricht ebenfalls für diese Verformungscharakteristik.

Abb. 16. Klüftdiagramme aus den östlichen Kalkalpen mit der ermittelten Hauptnormalspannungsrichtung. Man beachte die gute Übereinstimmung im Bruchflächenwinkel  $2\alpha$ . Gründungsgesteine bei beiden Felsbauaufgaben waren mitteltriadische Wettersteinkalke/dolomite.

#### R. SCHWINGENSCHLÖGL (1988) Lawingalerie, Schwarzatal

#### R. SCHWINGENSCHLÖGL (1988) Hangbrücke, Piestingtal



Aus der Richtungsanalyse der größten Hauptnormalspannungen leitet sich eine Ost-West-Komponente für die kleinste Hauptspannung  $\sigma_3$  ab.

#### 4.4.2.6 Hangbrücke – Piestingtal

Als Beispiel für ein Felsbauvorhaben im östlichen Abschnitt der Nördlichen Kalkalpen werden die Gebirgs- und Fundierungsverhältnisse einer am orographisch rechten Einhang errichteten Hangbrücke (= Nordhang des Dürrenberges) des unteren Piestingtales herangezogen.

Als Gründungsgesteine sind mitteltriadische Kalke und Dolomite bis zu mergeligen Kössener Schichten der Obertrias anzugeben. Die Brückenpfeiler wurden in einem vermuteten, alten Bergsturzareal zum Teil in 10–14 m tiefen Brunnen gegründet. Der Fundamentkörper selbst bindet noch zusätzlich mehr als 2 m in das Karbonatgebirge ein.

Die Bergsturzmasse äußerte sich allerdings weder in einer auffälligen Hangoberfläche, noch in einem besonders tektonisch beanspruchten Gründungsfels. Es wurden bis auf den Abschnitt in den Kössener Schichten meist ausreichende mächtige Kalke bis Dolomite mit einem durchwegs guten Erhaltungszustand vorgefunden.

Die statistische Trennflächenanalyse erbrachte eine Nebenkluftschär, welche in W–E Richtung verläuft. Diese sind bis zu 10 cm geöffnet, nicht verfüllt und rühren aus der gravitativen Komponente des Hanges her.

Es sind keine Trennklüfte, sondern sie resultieren aus der noch aktiven, langsam kriechenden Bewegung dieses Hangteiles. Davon zeugen auch Klüfte mit sehr scharfen, bestens zueinanderpassenden Kluftufern in den Mergelkalken der Kössener Schichten. Die konjugierten und in ihrer Häufigkeit gleich stark vertretenen Trennflächenscharen der Kalke und Dolomite liegen einerseits in der NNE–SSW und andererseits in der NW–SE Richtung. Die sich daraus ergebende Hauptnormalspannung  $\sigma_1$  liegt bei  $173^\circ$  gegen  $353^\circ$ . Das  $\sigma_3$  ist fast E–W orientiert (Abb. 16b).

Ein Vergleich der  $\sigma_1$ -Komponente mit der tektonischen Karte von A. TOLLMANN (1976) zeigt, daß die Deckenstirn der Göllerdecke mit der Mandling-Schuppe – in diesem Abschnitt liegt dieses Felsbauvorhaben – ungefähr SW–NE verläuft. Dies müßte schon eine Drehung der Einengungsrichtung von S bis SE nach N bis NW fordern, wenn man die Vergenzen als richtungsrelevant ansieht.

Tatsächlich herrscht, wie dies auch die beiden Felsbauvorhaben im Schwarzatal bruchtektonisch erhärten, eine deutliche Druckrichtung von S nach N vor. Das Abbiegen im östlichen Teil der NKA in die karpatische Richtung (nach Nordosten) liegt eben in der Unnachebigkeit des konsolidierten Blockes der Böhmisches Masse im Untergrund begründet.

Was die Verformbarkeit der Gesteine betrifft, so ist der Umstand der spröden Deformation von Kalk- und Dolomitgesteinen mit einem Bruchflächenwinkel von  $2\alpha = 60^\circ$  gut belegt. Ebenso ist die Richtung der Haupteinengung von etwa S nach N anzusetzen.

Dieser Bereich des Hanges zeigt sehr deutlich, daß hier doch eine einheitliche Karbonatgesteinsmasse vorliegt, welche in Form einer den Verband währenden Bewegung abgegangen ist (?).

Um die meist quer zur Pfeilerschaftrichtung verlaufenden offenen Klüfte bei Lasteinleitung bautechnisch

besser beherrschen zu können, wurden in drei Fundamenten umfangreiche Injektions- und Ankermaßnahmen vorgenommen. Da sich die Klüftöffnungen in Richtung Talgrund rasch verkleinern, mußten die Ankerrichtungen normal zu diesen Trennflächen angesetzt werden, um so eine weitere Öffnung zu vermeiden. Einen Teil der Pfeilerlasten konnte dadurch tiefer in das Karbonatgebirge eingeleitet werden.

Häufig auftretende Kleinkarsterscheinungen bewirkten eine hohe Gebirgsdurchlässigkeit. Diese wurde durch erhebliche Injektionsgutmenen weitgehend vermindert und bildete die Voraussetzungen, die erforderlichen Ankerhaftkräfte in das Gebirge zu übertragen.

#### 4.4.2.7 Gscheidl-Stollen

Der hohe Brennholzbedarf für die Hammerwerke im niederösterreichischen Alpenvorland führte bereits in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts zu einem eklatanten Mangel dieses Energieträgers. Auch die Großstadt Wien wurde zunehmend mit Klafterholz aus dem Raum Göller-, Gippel-, Rax- und Schneeberg-Gebiet versorgt (H. KILLIAN, 1977).

Um die nötigen Holzmengen aus dem Gebiet des Neuwaldes rasch zu den Verbrauchern im Schwarzatal (Abb. 17) und an den Kaiserhof in Wien zu bringen, ersann ein einfacher Holzknecht namens Georg HUEBMER zu Beginn des 19. Jahrhunderts einen Durchschlag unter das Gscheidl (das ist ein Sattel zwischen Gippel, 1669 m, und Lahnberg, 1594 m). Unter Ausnützung der Quellen im Tal der Stillen Mürz, welche HUEBMER geschickt schon kurz nach dem Quellaustritt aufstaute, leitete er zur Zeit der Frühjahrsschneesmelze diese Wässer gesammelt zu einem Stollen, welcher 45 m unterhalb des 1134 m hohen Gscheidl-Sattels lag.

Auf diese Weise wollte HUEBMER, auch unter dem Namen „Raxkönig“ bekannt, das Klafterholz „durch den

Legende :

- ☒ Gscheidl - Stollen
- P Preinbach

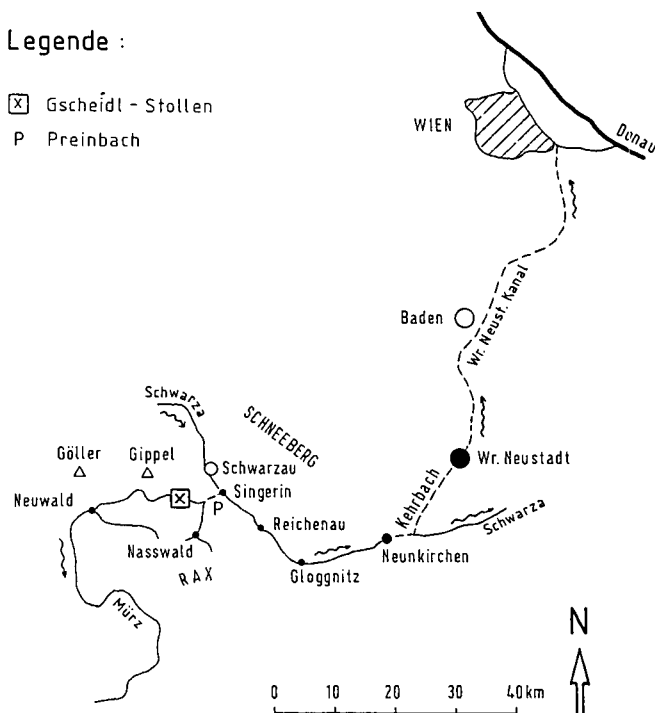


Abb. 17. Übersichtsskizze zur Lage des Gscheidl-Stollens und der Gewässersituation im Rax-Schneeberggebiet. Nach H. KILLIAN (1977), verändert umgezeichnet.

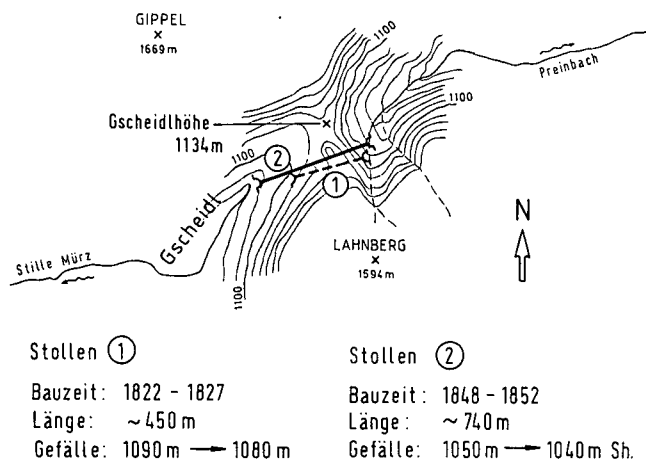


Abb. 18.  
Lage der beiden Schwemmstollen unterhalb der Gscheidhöhe.

Berg“ in das östlich angrenzende Preintal schwemmen. Mit einfachen geodätischen Meßinstrumenten bewerkstelligte es HUEBMER am 18. 8. 1822, den Ansteckpunkt an der Westseite des Gscheid-Sattels zu fixieren (H. KILLIAN, 1977), (Abb. 18).

Nach nur fünf Jahren wurde 1827 der Durchschlag eines 450 m langen Stollens, welcher in Richtung von 245° nach 065° leicht fallend angelegt war, vollzogen.

Von diesem damals (?) längsten Stollen Österreichs, der nach KILLIAN 3,8 m breit und ebenso hoch gewesen sein soll, fehlte im Jahre 1987 jedoch jede Spur. Auch über die vermutliche Lage dieses Stollens konnte die zuständige Forstverwaltung in Kernhof nur ungefähr Auskunft geben. Bei einer Begehung im Sommer 1987 hatte ich erstmals Gelegenheit, die Lage der beiden Stollenportale des sogenannten „unteren Stollens“ zu betreten (Abb. 18).

Der Sohn des großen G. HUEBMER hatte nämlich in den Jahren 1848–52 einen zweiten Schwemmstollen angelegt, welcher bereits die respektable Länge von ca. 740 m aufwies. Da er auch eine Richtung von 250° nach 070° gewählt hatte, ist der Höhenunterschied zwischen der Sohle des oberen (älteren) und dem First des unteren (jüngeren) Stollens etwa 36 m. Das Westportal dieses Stollens liegt in 1050 m Sh, jenes des älteren in 1090 m Sh (Abb. 18).

Der 740 m lange Stollen hat heute noch eine lichte Weite von etwa 2,5 bis 2 m, eine lichte Höhe von ebenfalls 2 bis 2,5 m und ist noch etwa 150 m tief vom Westportal begehbar.

#### 4.4.2.7.1. Petrographie des Gscheid-Stollens (Westlichster Abschnitt)

Die angefahrenen Gesteinsserien sind Brekzien bis Konglomerate der Gosau (Oberkreide). Es sind meist matrixgestützte, schlecht sortierte Grobklastika, welche Komponenten von dunkel- bis hellgrauen Kalken bis zu 30 cm Durchmesser führen. Das Bindemittel ist ein feinsandiges, schluffig-toniges, ziegelrotes Material. Der Erhaltungszustand dieser Klastika bis zum Stollenmeter 42 war als sehr gut bis gut zu bezeichnen. Ab dieser Stationierung ändert sich der Gebirgs habitus und geht in ein nur mäßig verfestigtes, ebenfalls matrixgeschütztes Konglomerat mit Geröllen bis zu 40 cm Korndurchmesser über. Als Matrix fungiert hier feinsandiger Schluff. Bis zum Kartierungsende bei 103 m wechselt der Gesteinszustand mehrfach.

Im Abschnitt 69–78 m sind beide Ulmen und die Firste mit einer 2–5 mm dünnen, auffällig genarbt Kalksinterschicht überzogen. Sie ist von ziegelroter Färbung und trägt auf ihrer Innenseite (= Bergseite) kantige und gerundete, feinkiesgroße Gesteinsteilchen. Die Außenseite ist abgerundet und nuppig.

Interessant dabei ist ein stabilisierender Effekt. In den Konglomeratabschnitten gibt es nämlich oft m<sup>2</sup>-große Flächen, die nur aus Matrix bestehen und deren Bergfeuchte relativ hoch ist. Beim Herausbrechen floß sandig-toniges Bindemittel regelrecht aus. Auch in Abschnitten mit normaler Komponentenhäufigkeit (d.s. etwa 60 % Komponenten, der Rest ist Bindemittel) ist bei Wegschlagen dieser Sinterschale Gesteinsmaterial sofort nachgebrochen. Diese Karbonathaut hat sich nämlich, wie es eine aufgespritzte Torkretschale nicht besser könnte, insgesamt um beide Ulmen und den First satt angelegt. Sie stützt damit entscheidend „den alten Mann“, der sich in fast 140 Jahren Standzeit gebirgsmechanisch wohl etwas verändert hatte. Diese kurzen Stollenabschnitte sind aber trotz der stark kalkigen Sickerwässer und gerade wegen des „Sinterteppichs“ noch immer als ausreichend standsicher zu bezeichnen. Im Abschnitt 50–60 m liegen die Konglomeratkomponenten gut eingeregelt vor. Desweiteren sind bis zu 60 cm mächtige Sandsteinbänke im feinkörnigen Konglomerat zwischengelagert.

#### 4.4.2.7.2. Betrachtungen zur Stollengeometrie

Im Abschnitt zwischen Stollenportal und dem 1. Verbruch bei 43 m (Abb. 19) liegt ein massiges Gebirge vor. Der Verwitterungszustand ist als frisch, die Gesteinsfestigkeit als gut, die Verbandsfestigkeit als sehr gut und die Klüftung als mittelständig anzugeben. Aus einigen noch ausgezeichnet erhaltenen Bohrlöchern, die mit dem Meißel leicht drehend geschlagen wurden, erkennt man, daß die Abschlagstiefe im Durchschnitt 60 cm betrug.

Der Stollenquerschnitt 2,5x2,5 m kann im portalnahen Teil noch immer als maßhaltig bezeichnet werden. Das bedeutet, daß der Auflagerungsdruck bei Überlagerungshöhe von 20 m, bzw. die Druck-Trajektorien trotz der Anweisungswirkung (im Sinne von L. MÜLLER, 1963) der beiden oberen Ecken, problemlos in die Ulme abgeleitet wurden. Nach dem 1. Verbruch (Abb. 19) liegt, bedingt durch den Gesteinswechsel zu einem nur mäßig gefestigten Konglomerat, ein Stollenquerschnitt von 2x2 m vor.

Bedenkt man, daß HUEBMER von 1848–1852 wahrscheinlich einen Stollen von 2,5x2,5 m ausgebrochen hatte und auf die Stollensohle im Verlauf von 140 Jahren Gesteinsschutt und Schlamm abgelagert wurden, so ist die ursprüngliche Stollenhöhe noch einigermaßen rekonstruierbar – die Breite hingegen nicht.

Entweder wurde der Ausbruchquerschnitt schon mit 2,5 bzw. abschnittsweise 2 m angesetzt, oder die Tektonik dieser eingeklemmten Gosau-Ablagerung hat zu einer Querschnittsverkleinerung beigetragen? Man sieht es offenbar auch daran, daß das Stollenprofil, je weiter man in den Berg hinein kommt, sich immer mehr der Kreisform nähert. Nach F. MOHR (1963) läßt sich diese Formänderung vom Quadrat- zum Kreisquerschnitt auch mit den Spannungsverläufen um ein Rechteckprofil erklären, bei dem das Gebirge wegen einer Festigkeitsüberschreitung die in den Ecken auftretenden



als nachbrüchig zu klassifizieren und wird von unterschiedlich ausgebildeten Klüften geprägt (siehe Stollenband = Karte 1). Durch die lange Standzeit (fast 140 Jahre) hat sich bereits ein neuer Spannungszustand eingestellt.

Im Abschnitt W-Portal bis Station 40 m liegt im Profil folgender schematischer Spannungsverlauf vor: (Abb. 20).

Der mit „2“ bezeichnete Abschnitt stützt sich an den Kämpfern ab.

Durch die gute Gebirgsqualität ist der First weitgehend spannungsfrei und daher standfest. Die grobblockigen Kluffkörper haben außerdem noch genug Verspannung, um das Gewölbe auszubilden.

Von Station 48–103 m gibt es nur mehr eine einzige offene Kluft – der Rest der Trennflächen ist geschlossen. Hier kam es aber trotzdem zu echten Nachbrüchen, denn die Matrixfestigkeit hat sich im Laufe der Jahrzehnte und unter dem Einfluß der Verwitterung (Temperaturschwankungen und Bergwasser) stark erniedrigt, sodaß aus der Stollenleibung vor allem in den matrixreichen Abschnitten Konglomeratkomponenten herausbrachen.

Das Spannungsschema für diesen Abschnitt kann wie folgt interpretiert werden (Abb. 21):

Die Stützzlinie des Gewölbes liegt flach und die in ihrer Richtung wirkenden Normalkräfte drücken die Klüfte zusammen. Offenbar sind in diesem Bereich die horizontal wirkenden Spannungen aus der „Quetschtektonik“ des Gosaaustreifens noch so groß, um den für die gute Verspannung notwendigen Druck aufzubringen.

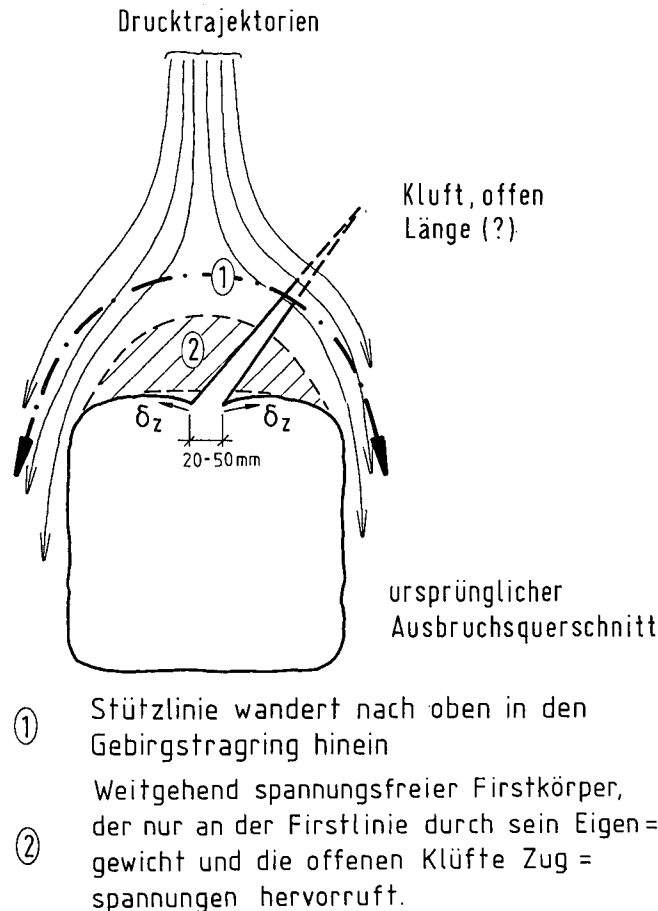


Abb. 20. Schematische Darstellung der Lastübertragung von der Firste in die Ulme bei einer offenen Kluft in der Stollenkalotte.

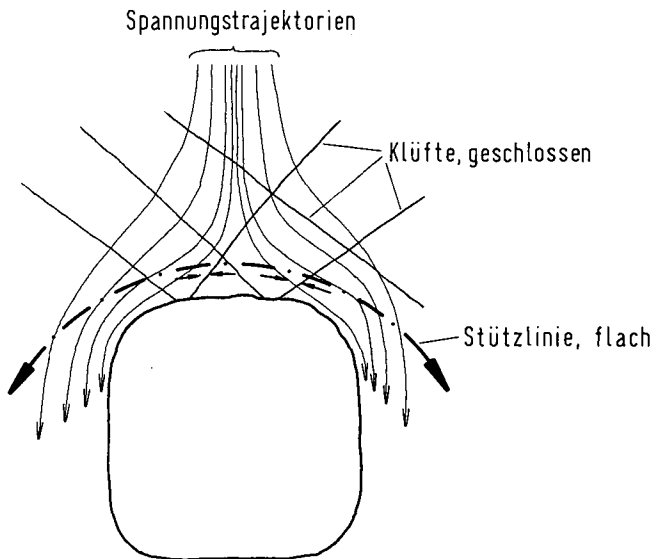


Abb. 21. Verlauf der Spannungstrajektorien sowie die Lage der Stützzlinie bei geschlossenen Klüften.

Der leichte Türstockausbau in den druckhaften Bereichen hat offenbar ausgereicht, das Gosagebirge in den matrixreichen Stollenabschnitten zu stützen.

#### 4.4.3. Zusammenfassung und Vergleich von Klufsystemen im Ostteil der Nördlichen Kalkalpen

Kluftstatistische Analysen aus dem behandelten Gebiet zeigen fast nur aus dem Süden angreifende Kräfte, von denen eine  $\sigma_1$ -Hauptnormalspannung abzuleiten ist (Abb. 12,14,16). Dazu seien aber einige kritische Gedanken angebracht:

Ist nun das Mohr-Coulomb-Kriterium alleine geeignet zur Beantwortung der Frage, ob immer aus dem kleineren Bruchflächenwinkel  $2\alpha$  die Lage der größten Hauptnormalspannung abzuleiten ist? Oder bringt nicht die regionalgeologische Kenntnis des Bearbeiters hier schon eine Antwort. Die Vergenzen, die Harnischstrieungen, die Styolithen und die Überschiebungs- bzw. Aufschiebungsbahnen bieten ja schließlich genug Möglichkeiten!

Nach G.D. ASHGIREI (1963) ist zur Ermittlung der Deformationsachsen in einem räumlichen Spannungszustand die Verschiebungsrichtung von mindestens einer Scherflächenschar notwendig. Nur so wären Zug- und Druckquadranten festzulegen. Leider ist dies im Gelände nicht immer möglich. Zusätzliche Kenntnisse von Harnischstrieungen – so umstritten ihre mechanische Deutung auch sein mag – Styolithen und Vergenzen sind damit unumgänglich, um so die Lage der drei Verformungsachsen einigermaßen festzulegen. Wird diese Zusatzinformation in die mechanische Erklärung mit einbezogen, so könnte man zumindest über die Größe des Bruchflächenwinkels  $2\alpha$  diskutieren. Daraus wäre dann eine Spröd- oder Duktilverformung abzuleiten. Aus mehreren kluftstatistischen Analysen in den Bayerischen Nördlichen Kalkalpen ergibt sich, daß in jenem Kalkalpenabschnitt, welchen SCHMIDT-THOMÉ (1954) erstmals bruchtektonisch bearbeitet hatte, der Bruchflächenwinkel  $2\alpha$  im Durchschnitt etwa  $40^\circ$  beträgt.



R. SCHWINGENSCHLÖGL (1981)  
Frankenfelder Decke

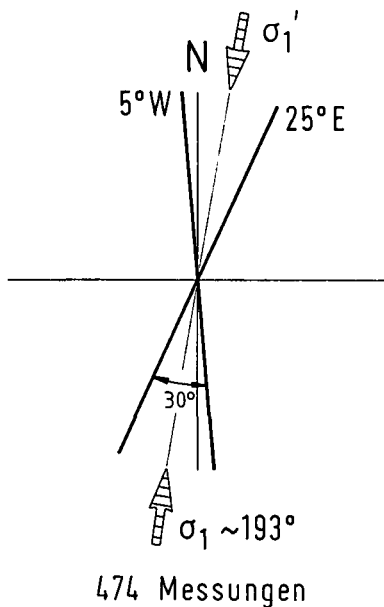


Abb. 22.  
Kluftrichtungen (Scherklüfte) in der Frankenfelder Decke (Abschnitt Pielachtal) als Beispiel einer erzwungenen Sprödverformung.  
Siehe auch Kapitel 4.4.1.

Dies deutet, bei annähernd gleicher Deformationsgeschwindigkeit, auf eine Sprödverformung des Gebirges hin. Eine Ausnahme bildet eine Kluftröse im Cenoman der Nördlichen Kalkalpen, deren  $2\alpha$  zwischen  $80-120^\circ$  liegen. Der Grund für diese offensichtlich duktile Gebirgsverformung ist im gehäuftem Auftreten von ton- und sandreichen Gesteinsabfolgen zu suchen.

Für die bruchmechanische Analyse des östlichen Kalkalpenabschnittes standen, einschließlich der Störungen, der Liasspalten und der Kluffstellungen aus den größten Höhlen im Toten Gebirge, nahezu 3000 Messungen zur Verfügung. Daraus leitet sich (Abb. 12, 14 und 16) eine generelle Haupteinengungsrichtung der Nördlichen Kalkalpen von SSE nach NNW ab. Ohne nun auf die bekannte Beanspruchungsrichtung hinsichtlich Bildung der Ostalpen hinzuweisen, ergibt sich

schon aus den zuordenbaren Scherflächenscharen eine, noch lange nach Beendigung der Orogenese wirkende Kraft – eben die aus SSE. Das ist genau jene Richtung, die auch durch die Plattentektonik und die seismisch ermittelten Herdflächenlösungen bestätigt wird (J. LETOUZEY & P. TRÉMOLIERES, 1980).

Die Bruchflächenwinkel liegen zwischen  $30$  und  $80^\circ$  (als Ausdruck einer typischen Sprödverformung, Abb. 22) und über  $100^\circ$  (als Ergebnis einer duktilen Verformung). Somit zeigt sich, daß in den Nördlichen Kalkalpen die Verformungsvorgänge oft schon innerhalb kleiner Abschnitte wechseln. Dies spricht für die außergewöhnlich vielfältige Kleintektonik in fast jedem einzelnen Faziesbezirk dieses von Karbonatgesteinen dominierten Gebirgszuges.

Trotz der beachtlichen Streuung der Bruchflächenwinkel  $2\alpha$  aus den bisher analysierten Diagrammen der NKA, wäre es von wissenschaftlichem Nutzen, generell die  $\sigma_1$ -Richtungen des gesamten Gebirgskomplexes zu ermitteln und mit dem regionalen Spannungsfeld des Kalkalpenstranges zu vergleichen.

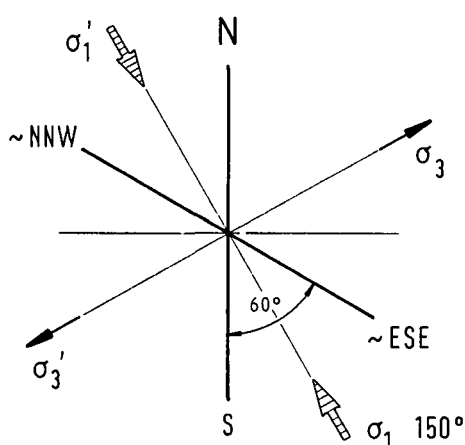
4.5. Bemerkungen zur Bruchtektonik  
in der nordöstlichen Zentralzone  
(Abschnitt Schottwien – Neunkirchen)

Der hier betrachtete Bereich gehört regionalgeologisch dem sogenannten Unterostalpin an. Für diesen Teil der Zentralzone scheint es außer den Arbeiten von G. RIEDMÜLLER (1967) und F. HABART (1978) wenig an bruchtektonischen Kartierungen zu geben. HABART hatte in den östlichen Ausläufern der Buckligen Welt (im Steinbruch Scheiblingkirchen) Kluftrichtungen gemessen, deren Maxima bei  $270/60$  und  $210/45$  liegen (Abb. 23a,b).

Vom Weg der Ortschaft Pitten zum Türkensturz im Pittental existieren ebenfalls kluffstatistische Auswertungen, deren maximale Kluffhäufigkeiten von HABART gleichwertig mit  $285/55$  und  $225/70$  angegeben werden.

Im NW-Teil der Buckligen Welt konnte G. RIEDMÜLLER N-S- bzw. NW-SE-gerichtete Krafrichtungen herausarbeiten, welche sich auch im Deckenbau sowie in der Hauptfaltung manifestierten. Die bruchtektonische Aus-

Steinbruch Scheiblingkirchen  
(F. HABART, 1978)



Türkensturz - Weg  
(F. HABART, 1978)

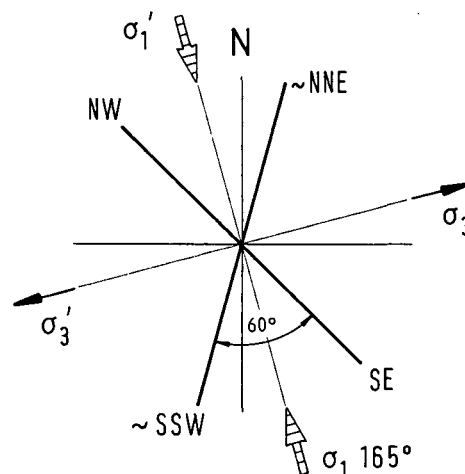


Abb. 23.  
Kluffdiagramme von Scherflächenscharen aus der östlichen Zentralzone.

wirkung zeigt sich auch im Verlauf der tief eingeschnittenen Täler.

Am südwestlichen Ende des Wiener Beckens wurden noch die jungen Bruchsysteme des Beckenrandes wirksam. Außerdem ist dieses Beckenende der Zerrungstektonik des spitz zulaufenden SW-Teiles unterworfen, welche auch für die enorme Gesteinszerlegung verantwortlich ist. Dieser Beckenabschnitt steht wie das Ende eines „cracks“ unter Zugspannungen (vgl. Abb. 25a). Dies beweisen auch die noch immer andauernden langsamen Einsenkungen des südlichen Wiener Beckens.

#### 4.5.1 Felsbauaufgaben in der Zentralzone

Für die bruchtektonische Besprechung dieser geologischen Einheit werden folgende Beispiele herangezogen:

- Böschungen in Phyllitgesteinen (R. SCHWINGENSCHLÖGL & G. PÜCHL, 1988).
- „Toppling failure“ („Kipp-Brüche“) in Phylliten (Kartierung: R. SCHWINGENSCHLÖGL, 1987).
- Der Einfluß von Gesteinstrennflächen bei der Boden- und Felsklassifizierung (R. SCHWINGENSCHLÖGL & E.H. WEISS, 1985).

##### 4.5.1.1. Böschungen in Phyllitgesteinen

Durch den Bau der Semmering-Schnellstraße, welche, aus dem Tertiär des Wiener Beckens kommend, sich über eine lange Strecke in Phylliten bishin zu den mitteltriadischen Karbonatgesteinsabfolgen erstreckt, konnten für die Erfassung des bruchtektonischen Inventars wertvolle Aufschlüsse herangezogen werden.

Zunächst ist allerdings festzuhalten, daß die Herstellung von Böschungen in diesen Phylliten hier weniger eine Frage des Trennflächengefüges, sondern vielmehr

#### Semmeringschnellstraße (R. SCHWINGENSCHLÖGL, 1988)

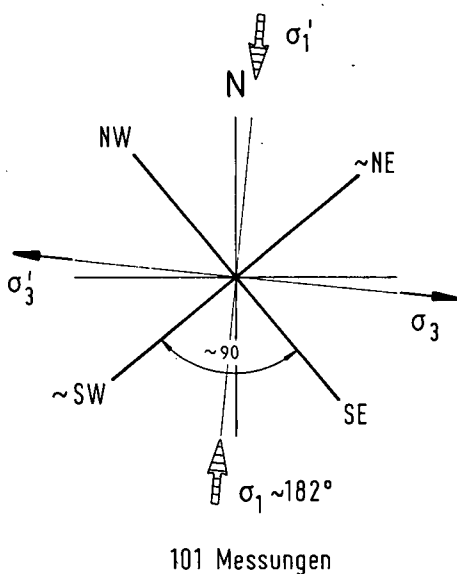
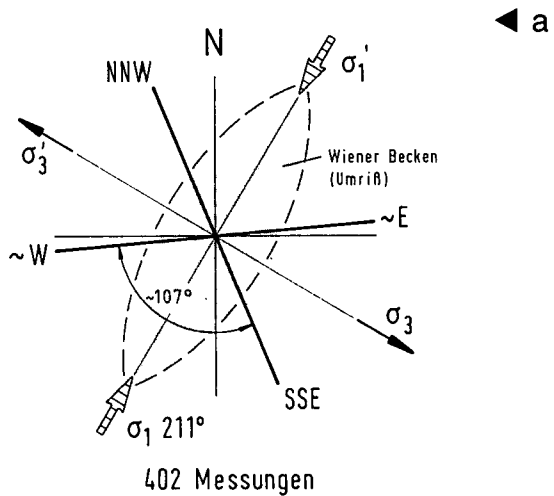


Abb. 24. Kluftdiagramme aus den Phylliten beim Bau der Semmering-Schnellstraße S6.

#### Semmeringschnellstraße (R. SCHWINGENSCHLÖGL, 1988)



#### Semmeringschnellstraße (R. SCHWINGENSCHLÖGL, 1987)

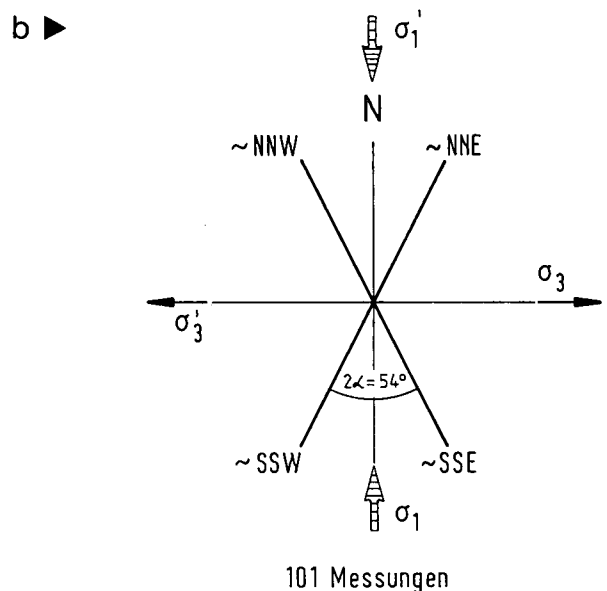


Abb. 25. Kluftdiagramme von der Semmering-Schnellstraße im Süden Niederösterreichs.

a) Aus einem 35 m tiefen Einschnitt (bei Gloggnitz).

b) Von der Ankerwand Grasberg-Ost (bei Schottwien).

eine des Erhaltungszustandes ist. So war es nicht immer eindeutig, ob ganze Hangteile nicht schon gravitativ verlagert wurden und so eingemessene Trennflächen nicht den in-situ-Zustand wiedergaben. Erst nach erfolgten Rutschungen, welche schon kurz nach den ersten Aushubphasen einsetzten, erhielt man einen guten Einblick in das manchmal sehr tiefgründig verwitterte Phyllitgebirge.

Die ausgewerteten Klüfte erbrachten zwei Hauptscharen, welche ihre Streichrichtungen in NW-SE und NE-SW haben. Dies ergibt eine  $\sigma_1$ -Hauptnormalspannung von S nach Nweisend (Abb. 24).

Um den Bewegungsvektor, der für die Anlage von Scherklüften maßgebend ist, einigermaßen zu rekonstruieren, bedient man sich auch häufig der Harnische mit ihren Gleitströmungen. Nur in diesem Gebirgstypus



Abb. 26. a) Rutschung in den Phylliten in der Böschung einer Auffahrtsrampe der Schnellstraße S6. "toppling failure" (Kippungsbruch) im Mittelteil der Massenbewegung. b) Blick von oben auf die verkippten Teilpakete der Phyllitgesteine.

konnten bloß auf den mit Myloniten belegten sf-Flächen Harnische eingemessen werden, die aber ausschließlich für die rezenten Bewegungen Aussagekraft hatten.

Aus einem weiteren Rutschgebiet – ein etwa 35 m tiefer Einschnitt – konnten zusätzliche Informationen über Kluffstellungen gewonnen werden. Die eine Schar ist in NNW–SSE- und die zweite fast in E–W-Richtung angelegt (Abb. 25a). Diese Anordnung liefert eine größte Hauptnormalspannung in der Richtung von 211 nach 031°, wenn man hier den größeren Bruchflächenwinkel als maßgebend ansieht und eine Rotation des Kluffgefüges sowie eine duktile Verformung annimmt. Des weiteren ist auch auffällig, daß diese ermittelte  $\sigma_1$ -Richtung mit der Längsachse des südlichen Wiener Beckens konform geht. Die dazu normal orientierte  $\sigma_3$ -Komponente ist ja für die Öffnung des jungtertiären Einbruchbeckens maßgebend.

Die Sanierung beider Rutschungen im Phyllitabschnitt der Zentralzone erfolgte durch umfangreiche

geotechnische Maßnahmen wie: Materialauswechslung, Ankerbalken mit bis zu 110 m langen Vorspannankern, Brunnengründungen und einem Stahlbetonriegel quer unter der Fahrbahn, um die beiden Einschnittshänge sozusagen „auf Distanz“ zu halten (R. SCHWINGENSCHLÖGL & G. PÜCHL, 1988).

Eine kluffstatistische Auswertung zuordenbarer Scherklüfte in der Ankerwand Grasberg Ost (Semmering-Schnellstraße) ergab eine Hauptkluffschar von NNE–SSW streichend und eine eindeutige Nebenschar von NNW nach SSE angelegt. Auch hier wird der S–N-Vorstoß der Ostalpen erkennbar (Abb. 25b).

#### 4.5.1.2. Kippungsbruch „toppling failure“ in Phylliten

Ein für Phyllitgesteine nicht alltägliches Phänomen bot eine Hangrutschung im Bereich der schon mehrmals genannten Semmering-Schnellstraße. So wurden bei einem Hanganschnitt für eine Auffahrtsrampe die

Phyllite ohne erkennbarer Schieferung, im Zentrum dieser Rutschmasse sägezahnähnlich nach oben verschoben (Abb. 26a,b). Man kennt diese Erscheinung vornehmlich bei eng geschieferten Gesteinen oder bei solchen mit steil stehenden Trennflächen (R. GOODMAN, 1970, S. 254ff).

Bewegen sich Gesteine in einer Rutschmasse nach unten und nach außen, so ist das sich ergebende Drehmoment für die sogenannte Sperrauflockerung im Hang verantwortlich. Es kann dadurch eine leichte Aufwölbung der Rutschmasse in Form einer lamellenartigen „Aufschiebung“ möglich werden (s. Schemata in Abb. 27a,b).

Der ursprünglich einheitlich geneigte Hang wird nach erfolgter Rutschung aus seiner Lage herausgedreht und in eine sägezahnähnliche bzw. stufige Oberfläche gebracht. Durch die Schwerkraft werden bei steilstehenden Trennflächen Einzelpakete, welche verschieden mächtig sein können, entsprechend der Gesamtbewegung verdreht. Dies geschieht gegensinnig zu dem „Rutschvektor“  $R_v$  (Abb. 26a,b).

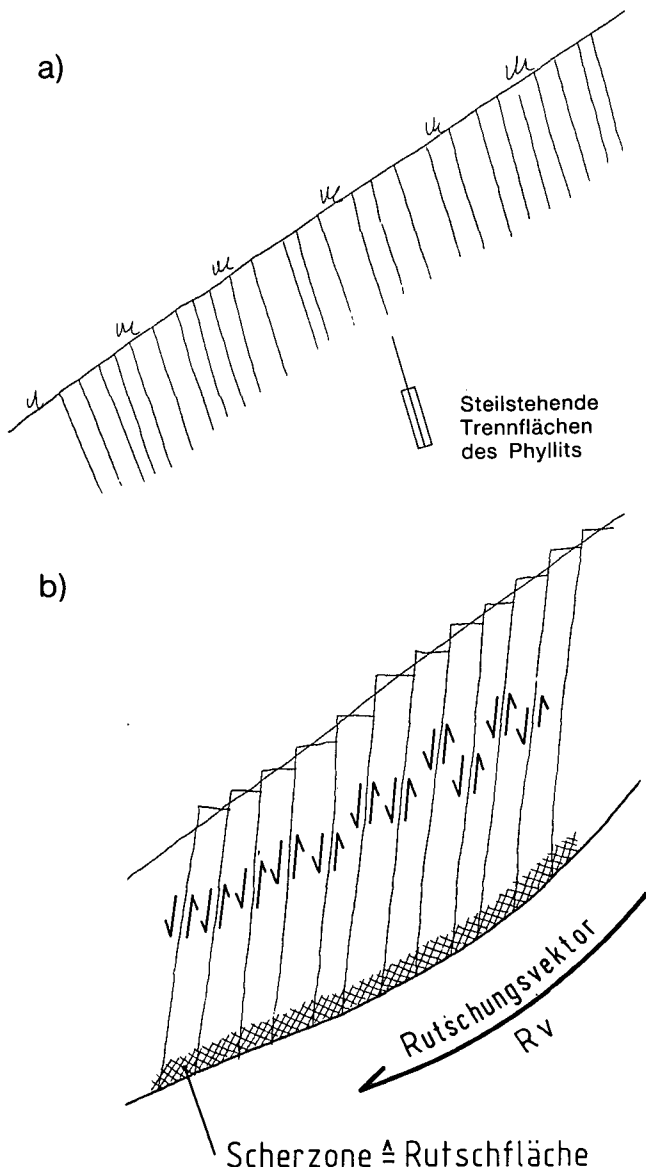


Abb. 27.  
Schema des Bewegungsvorganges in der Phyllitböschung.  
a) Böschung vor der Rutschung.  
b) Böschungsoberfläche nach erfolgter Bewegung.

Da eine Rutschung nur dann einsetzt, wenn die abschließenden Momente oder Kräfte größer sind als die widerstehenden, sind die bergseitigen Begrenzungen dieser steilstehenden „Teilplatten“ etwas schneller eingesunken als die talseitigen sich heben konnten. Dadurch bekommt die endgültige Hangoberfläche nach erfolgter Bewegung, dieses treppenartige Aussehen.

#### 4.5.1.3. Der Einfluß von Gesteinstrennflächen bei der Boden- und Felsklassifizierung

Für die Ermittlung von zutreffenden Boden- und Felsklassen werden häufig nach der geltenden Ö-NORM B2205 (Fassung 1986), nur die zur Lösearbeit eingesetzten Geräte als Klassifizierungsmerkmale herangezogen. Bei einem großen Verkehrswegebau, welcher im Unterostalpin der Wechsel-Einheit trassiert wurde, sind aus technischen Gründen diese Definitionsprobleme erneut aktuell geworden.

Generell läßt sich vorweg dazu sagen, daß für eine Klasseneinteilung die Verwitterung und das Kluftsystem die entscheidenden Kriterien darstellen.

Die Verwitterung insofern, als die Lösearbeit in jedem Gesteinstyp, welcher in Österreich vorliegt, sofort zur Arbeitsweise eines reinen Erdaushubes wird, wenn die Gesteine als völlig verwittert, oder schon gänzlich entfestigt vorliegen. Hier spielen die Trennflächen, sofern überhaupt noch welche sichtbar sind, fast keine Rolle mehr. Ganz egal ob es sich um sogenannte Hartgesteine oder um Gesteine mit niedrigen 1-achsialen Druckfestigkeiten handelt.

Anders ist die Situation jedoch, wenn die Gesteine bzw. das Gebirge im unverwitterten oder angewitterten Zustand vorliegen. Hier stellen die Trennflächen (sf, ss und kl) in Verbindung mit der Angriffsrichtung des Lösegerätes die entscheidenden Faktoren dar. Auch die Verspannung des Gebirges bildet einen wesentlichen Umstand, der in der schwer zu definierenden „Verbandsfestigkeit“ seinen Niederschlag findet. Zu dem Problemkreis der Verbandseigenschaften haben besonders Ch. LEMP & O. NATAU (1985) für den Granit eigene Stellung genommen.

Einen Versuch diese Problematik nach baugelogeischen Kriterien etwas enger zu fassen haben R. SCHWINGENSCHLÖGL & E.H. WEISS (1985) unternommen und dabei an typischen Aufschlüssen erprobt, die Klassifizierung nach einem Punktesystem vorzunehmen.

#### 4.5.2. Zusammenfassung und Vergleich

Die Kluftdiagramme in den ausgewählten Felsbauaufgaben in der Zentralzone zeigen Beanspruchungsrichtungen von der SSE/NNW-Lage in die SSW/NNE-Achse drehend (Abb. 23a,b; 24 und 25a,b).

Die Heterogenität der  $\sigma_1$ -Komponente mag durch die Beckengeometrie selbst (spitzes Ende und gegen SSW-SW aushebender Trog) und durch das Einschneiden des südlichen Beckenteiles zwischen dem Oberostalpin im NW und der Zentralzone im SE begründet sein.

Die Kluftdiagramme 23a und 23b geben einen Abschnitt der Zentralzone wieder, welcher schon etwas entfernter vom Randbereich liegt. Dadurch wird der Einfluß der eigenständigen Deformationsrichtung dieser Einheit sichtbar. Während die Diagramme 24 und 25

a,b noch deutlich einen Einfluß der Bruchtektonik des südlichen Beckenendes erkennen lassen.

Bei der Unterscheidung von Boden- und Felsklassen in diesem Gebirgsabschnitt spielen die oben genannten Hauptnormalspannungen nur insofern eine Rolle, als sie das intensive Zerlegen des Gesteins besorgen. Durch die Verwitterung wird die bruchtektonische Analyse allerdings nicht mehr so aussagekräftig wie oben. Der gebirgszerlegende Einfluß der Trennflächen ist jedoch sofort zu erkennen.

#### **4.6. Ingenieurgeologische Charakteristika zur Felsklassifizierung (Projekt 672)**

Klassifizierungsprobleme für die „Erdarbeiten“ bei einem großen Autobahnbau haben den Anstoß geliefert, den Einfluß von geologisch-geotechnischen Faktoren für eine möglichst objektive Bewertung bei der Unterscheidung von Boden- und Fels ingenieurgeologisch herauszuarbeiten, wobei besonders der Unterschied der Felsklassen 6 und 7 zu definieren war. Die Zielsetzung des Projektes war daher, Vorschläge für eine zeitgemäße Erneuerung der bestehenden Ö-Norm B2205 (Fassung 1986) zu erstellen.

Um ein breites Spektrum zu erfassen, haben R. SCHWINGENSCHLÖGL & M. ROCKENSCHAUB (1990) verschiedenartige Gesteine von der Böhmisches Masse bis zur Zentralzone (allerdings vorwiegend im Osten Österreichs) herangezogen. Die Aufschlüsse (künstlicher und natürlicher Art) wurden nach modernen baugewissenschaftlichen Methoden kartiert und statistisch ausgewertet. Da nur eine gute Reproduzierbarkeit von bestimmten Parametern eine Methode adelt, wurden die wichtigsten Gesteins- und Gebirgskennwerte zunächst möglichst genau definiert. Dazu war auch ein umfangreiches Literaturstudium – vor allem jenes des angloamerikanischen Schrifttums – notwendig.

Zur abtragskonformen Bewertung des Gebirges gehören in erster Linie quantifizierbare Parameter, wie die in fast allen generellen Gebirgsklassifikationen aufscheinende einachsiale Druckfestigkeit, weiters der lineare Auflockerungsgrad, der Trennflächenabstand und die Kluftkörpergröße.

Entscheidend für uns war das „Sich-loslösen“ vom schon geotechnisch beeinflussten Begriff „Felsklasse, Bodenklasse“ und das Einführen des neutralen Ausdrucks „Abtragsklasse“.

Zur endgültigen Einstufung wurde ein Punktesystem vorgeschlagen, dessen praktische Grundlage 97 verschiedene Gesteins- bzw. Gebirgsaufschlüsse bildeten.

Zur Bewertung eines Felsaufschlusses dienen nun folgende Kennwerte:

- Die Verwitterung.
- Die Gesteinsfestigkeit.
- Der Punktlastindex oder die Rückprallhärte oder die einachsiale Druckfestigkeit: diese drei Untersuchungsmethoden sind hier als gleichwertig zu betrachten.
- Die Verbandsfestigkeit.
- Der Trennflächenabstand.
- Die Kluftkörpergröße.
- Der lineare Auflockerungsgrad.

Diese Parameter ermöglichten je nach Wichtigkeit die Punkteanzahlen festzulegen, um so eine objektive Bewertung vornehmen zu können. Einige Ausnahmen verdienen allerdings eine gesonderte Behandlung, wie geringfeste, massige Gesteine, die noch dazu unverwittert vorliegen und keine Auflockerung zeigen (z.B. Leithakalke)!

#### **4.7. Bemerkungen zur Bruchtektonik im Tertiär des südlichen Wiener Beckens**

Bei der Betrachtung einer geologisch-tektonischen Karte des Wiener Beckens fällt auf, daß die hauptsächlich von der ÖMV (= Österreichische Mineralölverwaltung) erkundeten Tiefenbruchsysteme (s. G. WESSELY, 1984) in Form und Anlage deutlich eingezeichnet sind. Hingegen wird das zugehörige Trennflächeninventar dieser jungtertiären Sedimente nur am Rande erwähnt.

Josef STINY hat bereits 1932 auf die Klüftung und junge Krustenbewegungen hingewiesen. In einer weiteren Arbeit aus dem Jahre 1951 ist er auf Kluftmessungen in Lockersedimenten eingegangen und hat die eklatante Ähnlichkeit von Kluftrichtungen in klastischen Sedimenten und darunterliegenden Metamorphiten, an einem Beispiel im südburgenländischen Raum, eindeutig aufgezeigt. Auch die Störungen in diesem Gebiet wiesen die gleichen Stellungen auf.

##### **4.7.1. Felsbauaufgaben in den tertiären Ablagerungen des Wiener Beckens**

Als geeignete Beispiele bieten sich zwei Tegelgruben am Westrande der Beckenfüllung an.

Für diesen Zweck wurden zwei Lokalitäten einer bruchtektonischen Analyse unterzogen:

- Die Tegelgrube Leopoldsdorf (Kartierung: E.H. WEISS & R. SCHWINGENSCHLÖGL, 1988).
- Die Tegelgrube Sooß (Kartierung: R. SCHWINGENSCHLÖGL, 1989).

Des Weiteren wird auf die Verknüpfung von Oberflächengeologie, den Trennflächen, einigen sogenannten „aktiven“ Störungen und auf Fragen der Ingenieurgeologie eingegangen.

##### **4.7.1.1. Die Tegelgrube Leopoldsdorf**

Für die Errichtung einer Mineralstoffdeponie in der aufgelassenen Tegelgrube 15 km südöstlich von Wien waren umfangreiche baugewissenschaftliche Erkundungen notwendig. Eine geologische Kernfrage für die Situierung dieser Deponie bildete die Position des „Leopoldsdorfer Verwurfes“, welcher in der geologischen Karte, Blatt 59 Wien (W. FUCHS; 1985) klar eingezeichnet ist.

Es galt nun zunächst zu prüfen, ob der Verlauf dieser Störung – in der Karte bis an die Geländeoberfläche(!) reichend – auch in einem fast 100 m langen Bagger-schlitz, quer zur angegebenen Streichrichtung der Störung, zu finden sei.

In diesem Aufschluß wurden nun Anzeichen für eine stattgefundene Bewegung gesucht, um daraus die Relativbewegung und eine Gebirgsauflockerung angeben zu können.

Tegelgrube Leopoldsdorf  
(R. SCHWINGENSCHLÖGL, 1988)

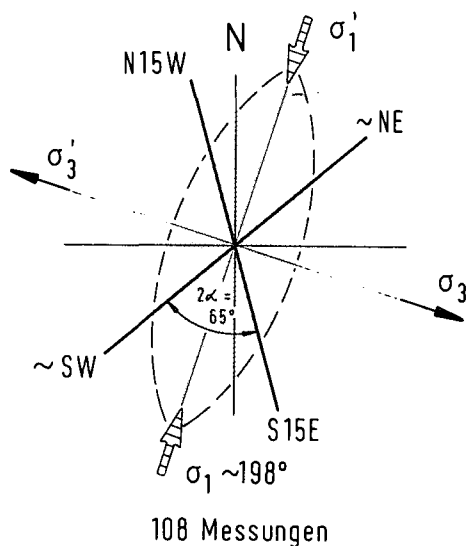


Abb. 28.  
Kluftdiagramme aus den Gesteinen der Tegelgrube Leopoldsdorf südöstlich von Wien.  
Der Verlauf des Wiener Beckens ist grau unterlegt.

Die Tegel sind normalerweise durch ihre feine Schichtung, die kleine Korngröße und den grau bis graubraunen Habitus charakterisiert. Bemerkenswert war die ziemlich regelmäßige Klüftung.

Kluftmessungen und deren Analyse zeigten eine Übereinstimmung in der  $\sigma_1$ -Richtung mit der von NNE-NE nach SSW-SW gerichteten Kompressionszone im Wiener Becken (Abb. 28). Als größte Hauptnormalspannung ist die Richtung  $\sigma_1$  (N18°E/S18°W) fast in der NNE-SSW-Orientierung angelegt. Normal zu dieser Richtung ist die kleinste Hauptspannung  $\sigma_3$  als Zugspannung aufzufassen. Diese steht mit den bekannten und gemessenen Absenkvorgängen im südlichen Wiener Becken im Einklang (s. dazu N. HÖGGERL, 1980 und P. STEINHAUSER & n. HÖGGERL, 1988).

Dolomitsteinbruch, W - Mödling  
(SCHWINGENSCHLÖGL, 1987)

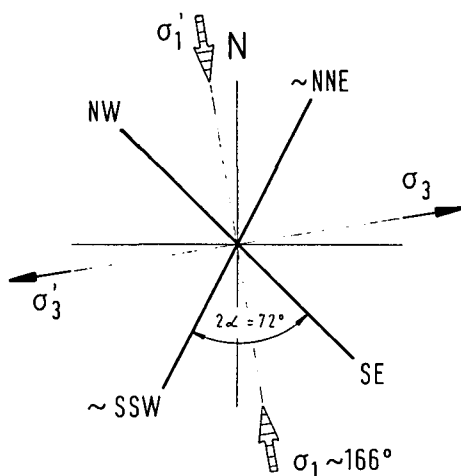


Abb. 29.  
Kluftdiagramm mit der größten und kleinsten Hauptnormalspannungsrichtung eines Dolomitsteinbruches bei Mödling.

Was den Bruchflächenwinkel  $2\alpha = 65^\circ$  betrifft, so ist dieser für die sicherlich duktil verformbaren Gesteine nicht gerade typisch. Eine gewisse Affinität zu spröde verformbaren Dolomitgesteinen am Westrand des Wiener Beckens läßt sich aber dennoch herstellen. Kluftmessungen in einem aufgelassenen Dolomitsteinbruch bei Mödling erbrachten zwei Hauptklüftscharen, deren Verlauf mit NNE-SW und NW-SE anzugeben ist (Abb. 29). Dieses Bruchsystem zeigt nur im NNE-SSW-Ast einen gleichen Verlauf wie die Kompressionsrichtung des Wiener Beckens und zum anderen aber einen  $2\alpha$ -Winkel von  $72^\circ$ . Eine Sprödverformung ist daher gut erkennbar. Die Tegel- und Dolomitgesteine sind mit ihren Bruchwinkeln dadurch fast vergleichbar. Richtungsabweichungen in den Hauptklüftscharen sind in der komplizierten Beanspruchungsart am Westrand des südlichen Beckenabschnittes begründet.

Aus Beobachtungen in einem Flyschsteinbruch bei Wien ist zum Problem kongruenter Kluftrichtungen zu nennen, daß sich dort auch die inkompetenten Pelitlagen genau nach den kompetenten, spröden Quarzsandsteinen deformierten – sie haben gleiche Kluftstellungen!

J. STINY, hat diesen Effekt der „tektonischen Zwänge“ (Anmerkung des Verfassers) aufgezeigt, wo ein metamorphes Gestein dem darüberliegenden Deckgebirge (ein Tegel) sein Verformungsverhalten aufgezwungen und gleiche Kluftstellungen geschaffen hat.

Vergleiche von Großstrukturen (Störungen) mit Kleinklüftung sind gewiß problematisch, wie H. PLACHY (1981) deutlich beschreibt, doch geben Störungsverläufe und Kluftrichtungen, genetisch wohl zeitlich versetzt abgelaufen, brauchbare Hinweise auf die Beanspruchungsrichtungen bzw. auf das regionale Spannungsfeld.

4.7.1.2. Die Tegelgrube Soob

Auch durch diesen Aufschluß streicht fast genau in N-S-Richtung eine Störung, welche in der geologischen Karte, Blatt 76 Wiener Neustadt, eingetragen ist. Nach A. PAPP et al. (1970) ist dieser Bruch in der Soob-er Ziegelei sogar „direkt“ aufgeschlossen.

Um möglichst genau die Lage dieses Verwurfes zu eruieren, wurde ein 2,5 m tiefer und 111 m langer, E-W-orientierter Schürfschlitz angelegt. Als Ergebnis konnten zwei Schleppungen kartiert werden, deren gleichsinnige Tendenz nach Osten ins Becken zeigt. Die Streichrichtung stimmt mit den Hauptrandbrüchen des südlichen Wiener Beckens weitgehend überein. Die Brüche manifestieren sich in mm-dünnen, schwarzen Schluff-Tonlagen in einem Sandsteinhorizont.

Die vorgefundenen Klüfte erbrachten zwei straff geordnete Hauptscharen mit einem  $2\alpha$ -Winkel von  $80^\circ$  (Abb. 30). Aus den zuordenbaren Scherklüften leitet sich eine Hauptbeanspruchungsrichtung von  $187^\circ$  nach  $007^\circ$ , also fast in S-N-Richtung ab. Die kleinste Hauptspannung zeigt somit in W-E-Richtung.

Die übereinstimmenden Kompressions- und Dehnungszonen mit der Form des Wiener Beckens, können auch an diesem Aufschluß erkannt werden.

Die Frage von Riß-Neubildungen im Tegel bei einem Bebenereignis kann hier eine wichtige Rolle spielen. Entscheidend dürfte dabei auch sein, daß die abgestrahlte Schwingungsenergie eines Bebens zu beiden Seiten eines Verwurfes die gleichen Möglichkeiten der Dämpfung oder Energiedissipation vorfindet.

## Tegelgrube Sooss (R. SCHWINGENSCHLÖGL, 1988)

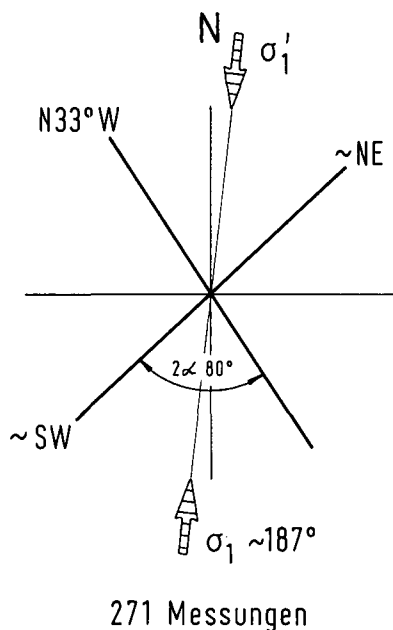


Abb. 30.  
Kluftrichtungen in der Tegelgrube Sooss bei Baden.

### 4.7.1.3. Klüftung und Störungen in Peliten des Wiener Beckens

Bekanntlich verläuft eine Erdbebenzone durch den Ostteil des Wiener Beckens, die westlich angelegten Störungssysteme wie der Leopoldsdorfer Verwurf liegen jedoch schon in einer nahezu „aseismischen“ Zone (s. J. DRIMMEL, 1988).

Eine überaus wichtige Frage, war nun das Verhalten der Störung, bei einem Schadbeben und einem möglichen Durchreißen der Herdfläche bis an die Erdoberfläche. Auch die Möglichkeit eines Versatzes an dieser Diskontinuität wurde diskutiert.

Eine Durchsicht der Gesteinsmächtigkeiten in diesem Abschnitt des Wiener Beckens zeigt, daß gerade die duktil verformbaren Tegel eine Gesamtdicke von nahezu 500 m aufweisen. Somit sind diese Sedimente sicherlich im Stande Bebenschwingungen zu dämpfen und Bruchverformungen im kristallinen Untergrund des Beckens zunächst durch langsame Entfestigung über Teilbrüche, Mikrobrüche oder Bruchfließen plastisch abzubauen. Also wird ein Durchreißen der Beben-Herdfläche aus diesen Gründen nicht sehr wahrscheinlich sein (s. dazu besonders G. GANGL, 1969 und R. GUTDEUTSCH & K. ARIC, 1976). Zu bemerken ist auch, daß in größeren Tiefen duktil reagierende Gesteine offenbar durch den zunehmenden Überlagerungsdruck in ein sprödes Verformungsverhalten überzugehen scheinen. Deswegen sind manche Störungen bis einige 10er bzw. 100er Meter unter der Erdoberfläche meist als Flexur angelegt und erst ab einer Tiefe („Duktil-Sprödruch-Tiefe“) regelrecht als echter Verwurf zu betrachten. Dieser Umstand hat in vielen Kartenausfertigungen dazu geführt, daß nachgewiesene, tiefliegende Brüche und Störungssysteme einfach als theoretische Ausbisslinie bis an die Geländeoberfläche durchgezeichnet wurden.

Das Kartieren einer sogenannten „aktiven Störung“ müßte ausschließlich nach B. BOLT (1984) und nach Vorschlägen der Internationalen Atomenergiebehörde erfolgen (IAEA, 1979). Vom Aufnahmegeologen ist in diesem Sinne besonders das Erfassen des Trennflächengefüges zu beachten. Nach B. BOLT ist es sogar durchaus möglich, daß an „aseismisch“ eingestuft Störungen gerade ein langsames Kriechen als Anzeichen für vorhandene Scherspannungen in der Tiefe gilt. Ein Beben würde demnach in der Tiefe den tatsächlichen Bruch (Herdfläche) aufweisen, und an der Erdoberfläche die Bebenenergie durch weitgehend mylonitisierte und tonreiche Gesteine abschwächen oder gänzlich abbauen.

Eine Hauptfrage bei einer möglichen Störungsaktivität stellt die sogenannte „Triggerung“ von Bebenenergie dar. Darunter wird allgemein jene Energiemenge verstanden, welche nötig ist, einen potentiellen Bebenbereich zum Schwingen zu bringen. Ausgangspunkt wäre dabei ein nicht allzuweit entferntes Hypozentrum. Diese Energiemenge könnte dann an einer Störung, so die Vorstellung, zu entsprechenden Dislokationen führen oder ein weiteres Beben anregen.

Eine „Triggerung“ bzw. Auslösung von Erdbeben setzt nach gängiger Auffassung aber erst dann ein, wenn die tektonischen Hauptspannungsrichtungen mit den, durch ein Beben freiwerdenden Ausbreit- oder Stoßrichtungen übereinstimmen. Dies allerdings nur dann, wenn ein labiles Gleichgewicht hinsichtlich des herrschenden Scherwiderstandes an der Störung vorliegt oder wenn der Spannungsverlauf sich bereits der kritischen Spannung nähert. Bei als „aseismisch“ geltenden Brüchen ist aber die Scherspannung ständig abgebaut worden und äußert sich in der eher weniger gefährlichen Verformungsarbeit – dem Kriechen. Für diesen Problemkreis gibt G. GANGL (1969) an, daß die Erdbeben im südlichen Wiener Becken aus dem Jahre 1964 und 1972 ein recht uneinheitliches Spannungsfeld – abgeleitet aus Herdflächenlösungen – ergaben, und daher nur mit kurzzeitigen Veränderungen im lokalen Spannungsfeld erklärt werden können. Dies träfe dann auch für eine Koinkidenz von Bruchrichtung und Spannungsfeld zu. Wiewohl G. SCHNEIDER (1975) anmerkt, daß alle Aussagen über wirkende Spannungsrichtungen aus Herdflächenlösungen, Kluftrichtungen und Scherbrüchen ermittelt, unter Umständen mit einem beträchtlichen Fehler behaftet sind. Andererseits ist das regionale Spannungsfeld eines Gebirgskörpers nach SCHNEIDER zeitlich sehr konservativ und zeigt an etlichen Beispielen (G. GREINER, 1973) durchaus Übereinstimmung zwischen seismotektonisch oder tektonisch ermittelten Hauptspannungsrichtungen und direkten Messungen in rezenten Erdbebengebieten.

### 4.7.2. Zusammenfassung und Vergleich

Beide Felsbauaufgaben (Leopoldsdorf und Sooss) zeigen deutlich, daß diese Lockersedimente ein ausgeprägtes Trennflächengefüge aufweisen. Gewisse tektonogenetische Zusammenhänge lassen sich auch über die Anlage und die Form des Wiener Beckens und den Klüftstellungen in den Tegelgruben erkennen.

So sind zum Beispiel die NNE–SSW–Orientierung des Wiener Beckens und die ermittelten  $\sigma_1$ -Richtungen aus den beiden Aufschlüssen gut vergleichbar.

Zur generellen Kompressionsrichtung in Mitteleuropa (A.R. RITSEMA, 1974) passen die ermittelten Spannungsrichtungen allerdings nicht, was allein dadurch erklärt werden kann, daß die Scherklüfte ein anderes Alter haben als das zur Bildungszeit des Beckens herrschende Spannungsfeld. Es kann aber auch mit dem bekannten Phänomen der unterschiedlichen Herdflächenlage und Energieausbreitung eines Bebens im Ostalpenraum zusammenhängen. So weist denn nach J. DRIMMEL (1980) die große Achse des Seebensteiner Bebengebietes mit ihrer aktiven Herdfläche die gleiche Richtung auf wie die NNE–SSW–Strukturen des Wiener Beckens. Die abgegebene Energie verteilt sich jedoch bevorzugt in N–NW-Richtung! Dieses fast quer zum Alpenstreichen liegende Ausbreitmaximum von Erdbebenwellen, könnte auch ein Anzeichen für die unterschiedlichen  $\sigma_1$ -Richtungen im Ostteil der Alpen sein.

Zu abweichenden Richtungen der größten Hauptnormalspannungen wäre zu bemerken, daß das seismotektonische Spannungsfeld mit seiner N–NW-Komponente postpleistozän angelegt ist, während die durch Klufftanalysen gewonnenen Beanspruchungsrichtungen ein Spannungsfeld zur Zeit der Klufftentstehung wiedergeben. Die Klufftgenese kann mit tertiär bis altpleistozän abgeschätzt werden und hängt mit der Einbruchmechanik am Alpenostrand zusammen. A. TOLLMANN (1986) nimmt dafür plattentektonisch bedingte Krusten-

zerrungen an. Meiner Meinung nach sind auch Stauungen hinsichtlich des  $\sigma_1$  wirksam gewesen (Abb. 28).

Die Form des Wiener Beckens ist zweifelsfrei durch reine Zerrungstektonik entstanden. Die konjugierten Scherklüfte zeigen aber eine der Zerrungstektonik entgegengesetzte  $\sigma_1$ -Richtung. Hier liegt folgender Schluß nahe: Die  $\sigma_1$ -Komponente, welche die Scherklüfte erzeugte, ist jünger als jene aus der gezerzten Erdkruste. Außerdem steht das  $\sigma_1$  im räumlichen Spannungszustand bei einer Grabenbildung senkrecht und das  $\sigma_1$  bei der Klufftentstehung ist mehr oder weniger geneigt zur Horizontalen.

Die Klüfte im Tegel sind nicht durch Zugspannungen entstanden. Sie haben jene, für Scherklüfte typischen, messerscharfen und ebenen Bruchstrukturen.

An Bauwerken, welche in den Tegelablagerungen des südlichen Wiener Beckens liegen, müßten Baugrundeinflüsse aus Gründen der Dämpfung bei allfälligen Bebenbeanspruchungen eher auszuschließen sein.

Die genannten Felsbauvorhaben Leopoldsdorf und Sooß gründen im gleichen Gestein beidseits der Störungszonen und würden demnach im selben Ausmaß ausschlagen. Somit sind unterschiedliche Setzungen ebenfalls auszuschließen. Die Böschungen in den Peliten wären dabei eher betroffen.

## 5. Interpretation der ermittelten $\sigma_1$ -Richtungen

Um für die richtungsmäßige Interpretation der gewonnenen Daten aus den Trennflächenanalysen Aussagen zu treffen, wurden sämtliche Horizontalprojektionen der  $\sigma_1$ -Richtungen in einer geologischen Übersichtskarte im Maßstab 1 : 1.000.000 eingezeichnet. So konnte das zur Zeit der Klufftentstehung herrschende Spannungsfeld erfaßt und für die tektonischen Einheiten der östlichen Ostalpen dargestellt werden (s. beiliegende Karte 1 : 1.000.000 = Karte 2).

Die Daten ergeben sich aus zuordenbaren Scherklüften und sind von Aufschluß zu Aufschluß verschieden dicht. In jenen Fällen, wo der zweite Hauptast der Scherklüfte nicht eindeutig ausgeprägt vorlag, wurde auf die Angabe einer  $\sigma_1$ -Richtung verzichtet.

Insgesamt ergeben die vorliegenden Messungen ein gut erklärbares Bild – nämlich die generelle Haupteinengungsrichtung von Süd bzw. Südsüdost (Südost) nach Nord bzw. Nordnordwest (Nordwest).

Betrachtet man die geologischen Einheiten im Einzelnen, so sind bei der Böhmischen Masse drei Richtungen erkennbar. Obwohl in meiner Statistik der  $\sigma_1$ -Richtungen nur ein kleiner Teil dieser Einheit behandelt und auch bei den anderen Gebirgsabschnitten nicht der Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden kann, sind bevorzugte Richtungen zu erkennen.

Der Hauptteil der horizontalen  $\sigma_1$ -Orientierungen zeigt von 229° nach 049° (d.h. von SW nach NE). Eine zweite Richtung ergibt sich aus einer kleineren Datenmenge, nämlich von 181 nach 001°, also fast genau Süd-Nord. Untergeordnet, auch statistisch nicht aus-

reichend gestützt, erscheint eine  $\sigma_1$ -Komponente aus 274 nach 094°, das ist beinahe West–Ost-orientiert (s. dazu Karte 2 und Tab. 2).

Da im außeralpinen Abschnitt Österreichs die tektonischen Verhältnisse anders gelagert sind, werden diese Richtungen etwas näher betrachtet. Zur Zeit der Klufftgenese und der Bildung der beiden Hauptstörungsgäste werden nach A. TOLLMANN (1985, S. 667ff.) nur Einengungen aus der SSE in die NNW-Richtung angegeben. Da aber das System der großen Störungen orthogonal angelegt ist (Abb. 31), sind auch Beanspruchungen aus WSW nach ENE möglich, wie auch dieses Störungsmuster offenbar durch ein ausgewogenes Kraftfeld entstanden scheint, da keine Richtung bevorzugt auftritt. Um zu entscheiden aus welcher Richtung die Kraft kam, könnte auch ein zusätzlicher, tektonischer Parameter herangezogen werden, nämlich jener des Deckentransportes. So ist die primäre, strukturbildende Kraft (n. A. TOLLMANN, 1986) für die Bildung von Falten und Decken verantwortlich. Für die spätorogene Bruchtektonik macht er aber einen stark nachlassenden Druck geltend – unter Beibehaltung der ursprünglichen Einengungsrichtung!

Wenn aber die Richtung der für die Klufftbildung maßgebenden Kräfte das verkleinerte Abbild der großen deckenbildenden darstellt – den Azimut der Druckrichtung beibehaltend – so kann man folglich aus den  $\sigma_1$ -Richtungen auch einiges über die Tektonik insgesamt ablesen. Für die Böhmisches Masse heißt dies, daß zumindest zwei Beanspruchungsrichtungen Gel-



Tabelle 2.

Liste der natürlichen und künstlichen Aufschlüsse (Hauptnormalspannungsrichtung  $\sigma_1$ ).

Nr.	Lokalität	Tektonische Einheit	Gestein	Azimut*)
1	Primmersdorf, NÖ.	Böhmische Masse	Gneise	101°
2	SW' Melk, NÖ	Böhmische Masse	Granulit	180°
3	S' und N' der Diendorfer Störung	Böhmische Masse	Granulit, Gföhler Gneis	158°
4	Ottenstein, NÖ	Böhmische Masse	Rastenberger Granodiorit	191°
5	Dobra, NÖ	Böhmische Masse	Dobragneis	113°
6	Thurnberg-Wegscheid, NÖ	Böhmische Masse	Dobra-Spitzergneis	198°
7	Alt-Weitra, NÖ	Böhmische Masse	Eisgarner Granit	173°
8	Aschach/Donau	Böhmische Masse	Aschacher Granit	180°
9	Greifenstein – Kraftwerk	Flyschzone	Sandsteine, (Mergel)	167°
10	A1 – Westeinfahrt	Flyschzone	Sandsteine	150°
11	Kahlenberg-Ostabfall	Flyschzone	Sandsteine, Mergel	158°
12	Dambachgraben	Flyschzone	Sandsteine, Mergel	135°
13	Gspöttgraben	Flyschzone	Sandsteine, Mergel	130°
14	Gr. Walsertal – Zitterklapfen, Vbg.	Kalkalpen-Flyschzone	Hauptdolomit	160°
15	Plankenstein, NÖ	Kalkalpen-Flyschzone	Sandsteine, Mergel, Radiolarite	133°
16	Geplante Sperre Kaiblingmauer	Nördliche Kalkalpen	Hauptdolomit	186°
17	Pielachtal: Kirchberg bis Frankenfels	Nördliche Kalkalpen	Schichtfolge M-Trias bis U-Kreide	193°
18	Schwarzatal, Nähe Weichtalhaus	Nördliche Kalkalpen	Wettersteinkalk	160°
19	Schwarzatal, Nähe Gr. Höllental	Nördliche Kalkalpen	Wettersteinkalk	180°
20	Piestingtal, Nähe Waldegg	Nördliche Kalkalpen	Wettersteinkalk und -dolomit	173°
21	Totes Gebirge, West- u. Ostteil	Nördliche Kalkalpen	Dachsteinkalk	160°
22	Wetterinstollen-Ost, Nähe Tonion	Nördliche Kalkalpen	Hauptdolomit, Haselgebirge	164°
23	Gscheidl-Stollen, Nähe Gippel	Nördliche Kalkalpen	Gosau-Konglomerate	175°
24	Steinbruch – Scheiblingkirchen	Zentralzone	Karbonatsedimente	150°
25	Türkensturz-Weg	Zentralzone	Karbonatsedimente	165°
26	Semmeringschnellstraße Nähe Gloggnitz	Zentralzone	Phyllite	180°
27	Semmeringschnellstraße Nähe Gloggnitz	Zentralzone	Phyllite	211°
28	Semmeringschnellstraße Nähe Schottwien	Zentralzone	Karbonatgesteine	182°
29	Leopoldsdorf (Wiener Becken)	Wiener Becken	Tegel	198°
30	Mödling-Westrand	Nördliche Kalkalpen	Hauptdolomit	166°
31	Sooß bei Baden	Wiener Becken	Tegel	187°
32	Lengenfeld, NÖ	Böhmische Masse	Gföhler Gneis	205°
33	Gießhübl	Nördliche Kalkalpen	Jura-Kalke	209°
34	Bad Tatzmannsdorf (n. J. STINY, 1951)	Steirisches Tertiär	Tegel, Phyllite	169°
35	Lindabrunn	Wiener Becken	Konglomerate	133°
36	Rotheau, NÖ	Flyschzone	Sandsteine	185°
37	Maissau, NÖ	Böhmische Masse	Maissauer Granit	235°
38	Pauliberg, Bgld.	Tertiärer Vulkanit	Basalt	085°
39	Pauliberg, Bgld.	Tertiärer Vulkanit	Basalt	110°
40	Rottenegg, OÖ	Böhmische Masse	Granit	242°
41	Eibenstein, NÖ	Böhmische Masse	Marmor	268°
42	Steinegg, NÖ	Böhmische Masse	Granulit	243°
43	Urfahrwänd', OÖ	Böhmische Masse	Perlgneis	255°
44	Echsenbach, NÖ	Böhmische Masse	Rastenberger Granodiorit	224°
45	Demutsgraben bei Zwettl	Böhmische Masse	Feinkorngranit	231°
46	Gschwendt, NÖ	Böhmische Masse	Rastenberger Granodiorit	219°
47	Rastenfeld – Straßenböschung	Böhmische Masse	Rastenberger Granodiorit	171°
48	Stausee Ottenstein/Zwettler Arm	Böhmische Masse	Rastenberger Granodiorit	216°
49	Stausee Ottenstein/Purzelkamp	Böhmische Masse	Rastenberger Granodiorit	234°
50	Kleehof, NÖ	Böhmische Masse	Rastenberger Granodiorit	197°
51	Poigen, NÖ	Böhmische Masse	Glimmerschiefer	235°
52	Schrems, NÖ	Böhmische Masse	Schremser Granit	210°
53	Göllersdorf, NÖ	Molassezone	Tegel	140°

\*) Azimut der  $\sigma_1$ -Richtungen (Horizontalprojektion).

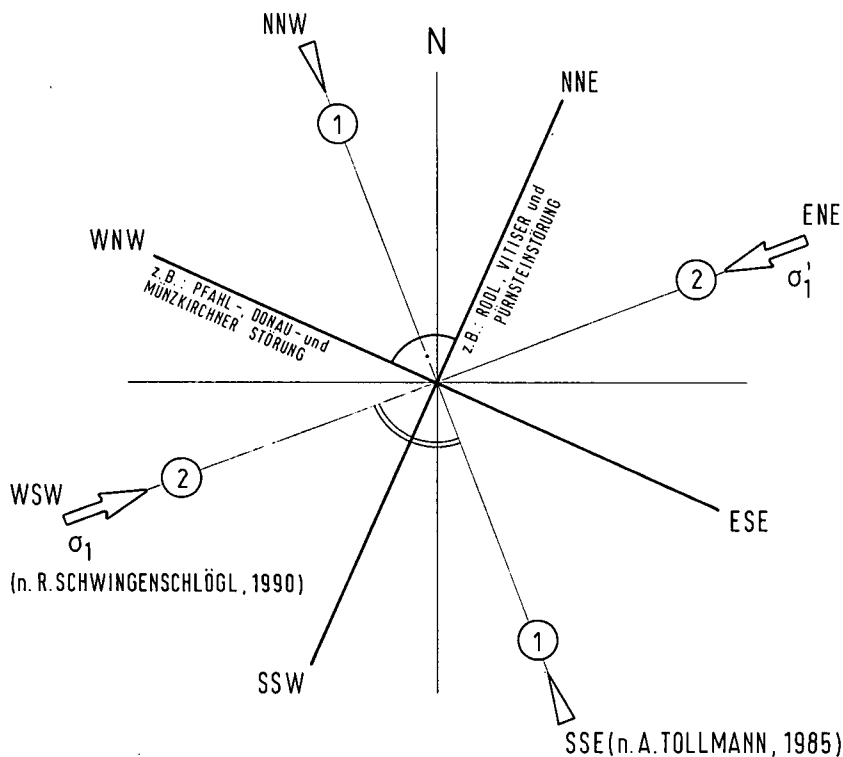


Abb. 31.  
Das orthogonale Großstörungssystem in der Böhmisches Masse (Moldanubikum).  
Die Einengungsrichtung (1) liegt nach A. TOLLMANN (1985) zunächst in der SSE-NNW-Achse.  
Nach den bruchtektonisch ermittelten Hauptnormalspannungsverläufen wäre auch eine Beanspruchung in (2) möglich!

tung hätten. Aus der  $\sigma_1$ -Anordnung in der Böhmisches Masse (s. Karte 2) erhält man eine aus SW nach NE und eine andere von S nach N.

Analog verhält es sich mit den größten Hauptspannungen im Flysch, in den Nördlichen Kalkalpen und auch in den Ausläufern der Zentralalpen. Die ermittelten  $\sigma_1$ -Richtungen, in der Spätphase des Orogens entstanden, zeichnen dies bruchtektonisch deutlich nach. Die generelle Richtung in diesen drei genannten Einheiten ist von SSE nach NNW bzw. SE nach NW.

Auch am Pauliberg-Basalt (Bgd.) waren Spannungen wirksam, welche teilweise zur Ausbildung von Scherklüften beigetragen haben. Die etwa west-ost-gerichtete Komponente in dem jungtertiären Vulkanit, hebt sich deutlich von der umgebenden, generellen

SSE-NNW-Beanspruchung des östlichen Alpenkörpers ab.

Zu den  $\sigma_1$ -Orientierungen ist weiters anzugeben, daß hier ausschließlich die horizontale Komponente einer Hauptnormalspannung eingetragen wurde.

Um die jetzt herrschenden  $\sigma_1$ -Richtungen einigermaßen nach Lage und Größe, also vektoriell, ermitteln zu können, wären in situ-Versuche erforderlich, um den Spannungstensor berechnen zu können.

Für die in dieser Arbeit gemachten Überlegungen war die Aufarbeitung von zahlreichen Trennflächenaufnahmen ausschlaggebend, um das bruchtektonische Inventar nach konservativen Spannungsindikatoren, wie den Winkel  $2\alpha$  zwischen konjugierten Bruchflächen, Harnischen und den Störungen zu untersuchen und auszuwerten.

## 6. Schlußbetrachtungen über tektonische Spannungen und Bruchmechanik

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die bruchhaften Deformationen, deren Erscheinungsformen im felsigen Untergrund und ihre Auswirkungen auf bestimmte Felsbauvorhaben beschrieben. Dazu sei noch angemerkt, daß die, in verschiedenen tektonischen Einheiten liegenden Beispiele hinsichtlich statistischer Erhebungen und allfälliger FEM-Behandlungen heuristisch verstanden werden sollten.

Die Verfahren zur Ermittlung des primären Spannungsfeldes sind heute gängiges Methodeninventar in der Felsmechanik. Trotzdem herrschen hinsichtlich der Meßergebnisse noch beträchtliche Auffassungsunterschiede. Alleine der Ansatz der Seitendruckziffer ist

von mehreren Faktoren wie: Gebirgsanisotropie, Überlagerungshöhe, Kluftwasserführung und Tektonik abhängig. Einer davon ist die jetzt wirkende Hauptnormalspannung, besser gesagt die residuelle Spannung im Gebirge. Beanspruchungen dieser Art üben auf Felsbauwerke eine äußere Belastung aus, deren Größe und Richtung für den im Felsbau Tätigen oft von entscheidender Bedeutung sein kann.

Es fehlt dazu nicht an einschlägigen Arbeiten, welche in situ-Messungen und vergleichende Berechnungen von Gesteins- bzw. Gebirgsspannungen beinhalten. So wird trotz vielfach geforderter Rechenmodelle und Messungen von manchen Felsmechanikern die rein nu-

merische Bestimmung des Seitendruckes, aus Auflast und elastischen Konstanten des Gebirges, schlicht als mechanisch „unsinnig“ bezeichnet (D. KIRSCHKE, 1989). Besser und ausreichend wäre die Schätzung der Primärspannung an Hand bekannter Randbedingungen wie Tektonik und Morphologie der betreffenden Region.

Die Geländeeinflüsse hat F. KOHLBECK (1990) eingehend untersucht und an mehreren Stellen in Österreich die Ermittlung des primären Spannungszustandes mit verschiedenen Methoden durchgeführt. Dabei sind von ihm die Topographie des jeweiligen Gebietes, die Wirkung des Gebirgsgewichtes sowie vereinfachte Parametervorgaben in die FE-Berechnung eingeflossen. Bemerkenswert war schließlich die Erkenntnis, daß langzeitige Änderungen des lokalen/regionalen Spannungsfeldes auf Ingenieurbauwerke ohne Bedeutung sind.

Weiterhin unbestritten ist aber die Tatsache, daß Hauptspannungsrichtungen aus den Bruchflächenwinkeln zweier konjugierter Scherflächen nicht den rezenten Spannungszustand eines Gebirges zeigen. Noch weniger sind die erhaltenen Richtungen aus dem Paläostressfeld mit heute ermittelten direkt vergleichbar.

Es sollte vielmehr die gesamte Vielfalt der zur Verfügung stehenden Möglichkeiten Spannungsrichtungen zu erheben, ausgeschöpft werden. So kann man beispielsweise in Steinbrüchen – vorwiegend mit spröden Gesteinstypen – Risse in vertikalen Sprengbohrlöchern heranziehen. Diese Spannungsindikatoren entstehen in Richtung der größten, horizontalen, rezenten Druckspannung (s. E. FECKER & G. REIK, 1987).

Auch Bohrlochrandausbrüche werden häufig zur Ermittlung des  $\sigma_1$  herangezogen, hier werden durch die Entfestigung der Bohrlochwandung normal zur größten Hauptspannung, also in Richtung des  $\sigma_3$ , deutliche Gesteinsauflockerungen sichtbar. Als Ausbruchmechanismus können für diese Erscheinung an einer Bohrlochwand nach P. BLÜMLING (1983) Scherbrüche verantwortlich gemacht werden.

Das Bruchgeschehen im Gestein bzw. im Gebirge ist heute ein aktuelles Forschungsgebiet. Dies jedoch nicht wie man meinen möchte, als eigenständige Teildisziplin der Erdwissenschaften, sondern sie hat sich von der Werkstoffmechanik her dem Fels genähert. Die Modellvorstellungen der Festigkeitstheoretiker sind an den Werkstoffen Stahl und Beton bereits ausgiebig erprobt und bewiesen. Doch ein Gestein, und noch komplizierter ein Fels, werden wohl nur sinnvoll über die Rheologie beschrieben werden können. Ob und wann überhaupt möglichst zutreffende Stoffgesetze für den Felskörper gefunden werden können, ist sicher eine Frage, welche die Fachgebiete der Bruchmechanik, des Bauingenieurwesens, der Geophysik und Angewandten Geologie gleichermaßen berührt.

Stoffgesetze zu erstellen ist das Ziel der Rheologie in Beziehung zu vorgegebenen Spannungen und Deformationen. Eine Deformation wird auch als eine Verformung mit einer Rotation und/oder Translation erklärt. Dazu ist aber die Kenntnis der Trennflächen im Gebirge und im Gestein unbedingt erforderlich.

So kann nach M. LANGER (1969) der Mechanismus von Deformationsabläufen im Felskörper nur aus den mechanischen Eigenschaften der Teilkörper (Kluftkörper) und ihrer räumlichen Anordnung zueinander untersucht werden.

Was die Entstehung von Klüften im Fels betrifft, so hat sich in jüngster Zeit auch die Angewandte Mecha-

nik diesem Fragenkreis zugewandt. Spannungsoptische Versuche, wie auch die Wirkung von Sprengenergie auf die Rißbildung im Gebirge, lieferten eine Reihe von wichtigen Untersuchungsergebnissen (H.P. ROSSMANITH, 1989).

Von besonderem Interesse ist dabei die sogenannte „Bruchzähigkeit“ des Gesteines, also die Ermittlung des Rißwiderstandes im noch intakten Material.

Die Bruchforschung im Gestein und Gebirge besitzt eine alte Tradition, dies zeigt eine Arbeit von D.D. POLLARD & A. AYDIN (1988). Hierin haben sich die Autoren der Aufgabe unterzogen, die Bruchmechanik und das Versuchswesen, von 1888–1988 kritisch zu beleuchten. Dabei sieht man sehr deutlich, daß gerade die Morphologie der Bruchstrukturen – also die geowissenschaftlich deskriptive Erfassung – einen entscheidenden Faktor darstellt. In weiterer Folge sollte aber einer immer wichtiger werdenden Forderung Rechnung getragen werden, nämlich jener, der mechanischen Erfassung und Deutung der Bruchstrukturen. Und diese muß letztlich wieder in die geologische Interpretation einmünden.

Eine ganz neue Betrachtungsweise an tektonischen Bruchlinien im Gebirge und Bruchflächen im Gestein könnte in der Anwendung der „Fraktalen Geometrie“ liegen. Darunter versteht man eine Beschreibung und zugleich ein mathematisches Modell für viele natürliche Strukturen wie z.B.: Küsten oder tektonische Bruchlinien, Felsen und Gebirge – um nur bei der unbelebten Natur zu bleiben (vgl. H. JÜRGENS et al., 1989 und D.L. TURCOTTE, 1989).

In der tektonischen Arbeitsweise werden bekanntlich Gefügeveränderungen im kleinsten Maßstab, und bei Klüften im Handstückbereich bisweilen mit großen Bewegungsf lächen in der Erdkruste, den Störungen, in Beziehung gebracht. Die bisherige Art der Beschreibung lag, sofern die Genese kleiner und großer Strukturen ähnlich und geklärt vorlag, in der statistischen Auswertung und im Vergleich von Richtungen und Raumstellungen. Es wird dabei von der Mikrotektonik im Dünnschliff über die Kleintektonik im Aufschluß auf die regionale Tektonik der Störungssysteme geschlossen.

Da bei solchen Überlegungen die Geometrie der einzelnen Gefügeformen beschrieben wird, ist es auch möglich, von dem Begriff der „Fraktale“ in der Geologie Gebrauch zu machen.

Die Ähnlichkeit der kleinen Gefügestrukturen mit Klüften und großen Störungen, liegt in der sogenannten Skaleninvarianz (s. dazu H. JÜRGENS et al., 1989). Das bedeutet, analysiert man Strukturen (hier Trennflächen) bei unterschiedlichen Größenmaßstäben, so stößt man immer wieder auf dieselben Grundelemente – auch „Selbstähnlichkeit“ genannt. Damit ist gemeint, daß jeder noch so kleine Teil des Objektes (hier eine Trennfläche im Gestein oder Gebirge) nach richtiger Skalierung wieder ein Ganzes bilden kann.

Der Zusammenhang der verschiedenen Maßstäbe wird in der sogenannten „Fraktalen Dimension“ ausreichend mathematisch beschrieben. So könnte man vielleicht wesentlich besser und genauer die geometrischen Beziehungen geologischer Strukturen im Kleinen und im Großen erkennen, als mit den herkömmlichen Methoden der statistischen Korrelation.

## Literatur

- ASHGIREI, G.D. (1963): Strukturgeologie. – 572 S., 369 Abb., 22 Taf., Berlin-Ost (Dt. Verl. Wiss. ).
- BANKWITZ, P. (1966): Über Klüfte. II. Die Bildung der Kluffläche und eine Systematik ihrer Strukturen. – *Geologie*, **15/8**, 896–941, 34 Abb., 2 Tab., Berlin-Ost.
- BANKWITZ, P. (1976): Über Klüfte. IV. Aspekte einer bruchphysikalischen Interpretation geologischer Rupturen. – Vortr. Int. Rupturen-Tagung; *Z. geol. Wiss.*, **4/1976**, 301–311, Berlin-Ost.
- BANKWITZ, P. (1980): Zu einigen Parametern der Kluffbildung. – *Z. geol. Wiss.*, **8** (1980/3), 245–264, 10 Abb., Berlin-Ost.
- BARTON, N., LIEN, R. & LUNDE, J. (1974): Engineering classification of Rock for the Design of Tunnel Support. – *Rock Mech.*, **6/4**, 189–236, Wien.
- BARTON, N. & CHOUBEY, V. (1977): The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice. – *Rock Mech.*, **10**, 1–54, 20 Abb., Wien.
- BIENIAWSKI, Z.T. (1973): Engineering classification of jointed rock masses. – *Trans. South African Inst. Civ. Eng.*, **15**, 335–344, Johannesburg.
- BIENIAWSKI, Z.T. (1977): Rock Mass Classification in Rock Engineering. – *Proc. Symp. Expl. Rock Engin.*, Johannesburg 1976, **1**, 97–106, Rotterdam.
- BLÜMLING, P. (1983): Bohrlöcherkesselungen und ihre Beziehung zum regionalen Spannungsfeld. – *Berichtsb. V. Sonderforsch.-Ber.* **108**, Univ. Karlsruhe, 313–323, Karlsruhe.
- BOCK, H. (1972): Zur Mechanik der Kluffentstehung in Sedimentgesteinen. – *Veröff. Inst. Bodenmech. Felsmechanik, Univ. Karlsruhe*, **53**, 116 S., 45 Abb., Karlsruhe.
- BOCK, H. (1980): Die Rolle der Werkstoffkunde bei der mechanischen Interpretation geologischer Trennflächen. – *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.*, **160/3**, 380–405, 14 Abb., Stuttgart.
- BOCK, H. (1980): Das Fundamentale Kluffsystem. – *Z. dt. geol. Ges.*, **131**, 627–650, 13 Abb., 1 Tab., Hannover.
- BOLT, B. A. (1984): Erdbeben – Eine Einführung (übersetzt von R. GUTDEUTSCH). – XIII, 236, 78 Abb., Berlin (Springer).
- BRANDECKER, H. (1968): Baugeologie der Autobahn Mondsee-Seewalchen. – 47 S., 14 Abb., 3 Pläne, Wels, Linz (OÖ. Landesverlag).
- BREMER, H. (1989): Allgemeine Morphologie. – XIV, 450 S., 65 Abb., 8 Tab., Berlin (Borntraeger).
- BRIX, F. & PLÖCHINGER, B. (1988): Geologische Karte der Republik Österreich, Blatt 76 Wiener Neustadt, 1 : 50.000 nebst Erläuterungen. – *Geol. B.-A.*, Wien.
- BROSCH, F. & RIEDMÜLLER, G. (1988): Dünne, tonige Trennflächenbeläge als Ursache von Böschungsbewegungen in grobklastischen Sedimenten. – *Felsbau*, **6** (1988/2), 69–72, 4 Bilder, Essen (Glückauf-Verl.).
- CLAR, E. & HORNINGER, G. (1964): Exkursion I/6: Übersichtsexkursion Baugeologie. – *Mitt. Geol. Ges. Wien*, **57**, 107–145, 10 Abb., 1 Taf., Wien.
- CORNELIUS, H.-P. (1951): Die Geologie des Schneeberggebietes. – *Jb. Geol. B.-A.*, Sdbd. **2**, 111 S., 25 Abb., 1 Taf., 1 geol. Kt., Wien.
- CZURDA, K.A. & JESINGER, D. (1983): Bergzerreißung und Talzuschub an der Flysch/Kalkalpen-Grenze (Hinteres Großes Walsertal, Vorarlberg). – *Jb. Vorarlb. Landesmus. Ver.*, **1982**, 31–44, 8 Bilder, Bregenz.
- DEMME, W. (1983): Gewölbesperre Kaiblingmauer E 13. – *Unveröff. geol. Ber.*, **38** S., 3 Abb., Korneuburg.
- DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ERD- UND GRUNDBAU (Hrsg., 1982): Grundbegriffe der Felsmechanik und der Ingenieurgeologie. – 426 S., 46 Bilder, zahlr. Tab., Essen (Glückauf).
- DRIMMEL, J. (1980): Rezente Seismizität und Seismotektonik des Ostalpenraumes. – In: R. OBERHAUSER (Wiss. Red.): *Der geologische Aufbau Österreichs*, 507–527, 6 Abb. Wien (Springer).
- DRIMMEL, J. (1988): Seismologisches Gutachten für das Projekt Mineralstoffdeponie in der KG Leopoldsdorf. – *Unveröff. Gutachten, ZAMG, Hohe Warte (Wien)*, 10 S., 3 Abb., 4 Tab., Wien.
- DUDDECK, H. (1986): Leistungsfähigkeit und Grenzen der Methode der Finiten Elemente in der Geotechnik. – *Felsbau*, **4/3**, 126–133, Essen (Glückauf-Verlag).
- EINSTEIN, H.H. (1985): Unsicherheit in der Geotechnik. – *Zt. Schweizer Ing. Arch. Ver.*, **19**, 398–404, 10 Bilder, Zürich.
- FECKER, E. & RENGERS, N. (1971): Measurements of Large Scale Roughness of Rock Planes by Means of Profilograph and Geological Compass. – *Proc. Int. Symp. Rock Mech.*, **I-18**, Nancy.
- FECKER, E. & REIK, G. (1987): Baugeologie. – XIII + 418 S., 486 Abb., 69 Tab., Stuttgart (Enke).
- FUCHS, W. (1985): Geologische Karte der Republik Österreich, Blatt 59 Wien, 1 : 50000. – *Geol. B.-A.*, Wien.
- GANGL, G. (1969): Seismotektonische Untersuchungen am Alpenstrand. – *Mitt. Geol. Ges. Wien*, **66-67**, 33–48, 4 Abb., Wien.
- GANS, O. (1938): Zugspalten im Dachsteingebiet. – *Geol. Rdsch.*, **29** (1938), 584–593, 5 Abb., Stuttgart.
- GEOLOGISCHE BUNDESANSTALT (Hrsg., 1967): Göpffritz, Austria. Site for a 300 GeV-Synchrotron. – 37 S., 5 Abb., 7 Tab., 20 Bilder, Wien.
- GEOLOGISCHE BUNDESANSTALT (Hrsg., 1967): Göpffritz, Austria. Explanatory Notes for the Synoptic Map of Geology and Geotechnics. – 8 Beil., 18 well logs, Wien.
- GEOLOGISCHE BUNDESANSTALT (Hrsg., 1984): Geologische Karte von Wien und Umgebung, 1 : 200. 000, Blätter 48/16 und 48/17. – *Geol. B.-A.*, Wien.
- GOODMAN, R. (1980): Introduction to Rock Mechanics. – XII, 478 S., many figs., New York (Wiley & Sons).
- GRAMBERG, J. (1966): A Theory on the occurrence of various types of vertical joints in the earth crust. – *Proc. I. Congr. Int. Soc. Rock Mech.*, 443–450, Lissabon.
- GREINER, G. (1973): In situ stress measurements in Southwest Germany. – 6 S., *Inst. Geol. Univ. Karlsruhe*.
- GREINER, G. (1976): In situ-Spannungsmessungen und tektonischer Beanspruchungsplan in Südwestdeutschland. – *Geol. Rdsch.*, **65**, 55–65, 5 Abb., Stuttgart.
- GRIFFITH, A. A. (1921): The phenomena of rupture and flow in solids. – *Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A*, **221**, 163–198, London.
- GROMOV, V. K. (1970): Zur Frage der Öffnungsweite der Klüfte in der Tiefe. – In: *Issledovanija po problemu trescinnnyh kollektorov nefti i gaza*. – *Trudy VNIGRI, Leningrad*, **290**, 113–118, UDSSR.
- GRÜN, W. et al. (1961): Untersuchungen an der Autobahn (Westeinfahrt; km 281,985–282,350) SW Dürrwien (Flysch, Kahlenberger Decke). – *Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud.*, **12**, 105–112, 2 Taf., Wien.
- GUTDEUTSCH, R. & ARIC, K. (1976): Erdbeben im ostalpinen Raum. – *Arb. Zentralanst. Meteorol. Geol.*, **19**, 23 S., 13 Abb., 1 Tab., 3 Kt., Wien.
- HABARTH, F. (1978): Zur Geologie und Hydrogeologie des unteren Pittental (N.Ö.). – *Unveröff. Diss. Formal- u. Naturwiss. Fak. Univ. Wien*, 228 S., 36 Abb., 32 Taf.-Beil., Wien.
- HÖGGERL, n. (1980): Repeated Levelling and Vertical Crustal Movements. Problems and Results. – *Felsmechanik, Suppl.* **9**, 201–212, 5 figs., Wien (Springer).
- HORN, H. H. & DEERE, D. U. (1962): Frictional characteristics of minerals. – *Geotechnique*, **12**, 319–335, London.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (eds., 1979): Earthquakes and associated Topic in Relation to Nuclear Power Plant Siting. – *Safety Series 50-S6-S1*, 69 p., some tab. and diagr., Vienna (IAEA).
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (ISRM, 1978): Suggested Methods for the quantitative Description of Disconti-

- nities in Rock Masses. – Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., **15**, 319–368, 26 Abb., 1 Tab., Großbritannien (Pergamon Press).
- IRWIN, G. R. (1958): Fracture. – In: Handbuch Phys., **6**, 551–590, Berlin (Springer).
- JAEGER, J. C. & COOK, n. G. W. (1976): Fundamentals of Rock Mechanics (2. ed.). – XIV + 515 S., zahlr. Abb., London (Chapman & Hall Ltd.).
- JOHN, K. W. & DEUTSCH, R. (1974): Die Anwendung der Lagenkugel in der Geotechnik. – Festschrift L. Müller, 65. Geb. Tag, 137–159, 25 Abb., Karlsruhe.
- JOHN, K. W. (1977): Geologische und geotechnische Gebirgsklassifizierung im Zusammenhang mit dem Entwurf von Felsgründungen. – Ber. 1. Nat. Tagung Ing. Geol. Paderborn, 7–23, 3 Abb., 2 Tab., DGEG, Essen.
- JUMIKIS, A. R. (1983): Rock Mechanics (2. ed.). – 613 S., zahlr. Abb. u. Tab., Clausthal (Trans Tech Publications).
- JÜRGENS, H. et al. (1989): Fraktale – eine neue Sprache für komplexe Sturkturen. – 106–118, 13 Abb. – In: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT (Hrsg.): Chaos und Fraktale. – 206 S., zahlr. Abb. u. Fotos, Heidelberg (Spektrum der Wissenschaft).
- KALACEVA, V.N. (1968): Gesetzmäßigkeiten der Verbreitung tektonischer Klüftung und Prognose der Kluftspeicher. – Trudy VNIGRI, Leningrad, **264**, 63–79, UDSSR.
- KARL, F. (1954): Ein Beispiel für die Anwendung gefügeanalytischer Arbeitsmethoden in der Baugeologie. – Geol. Bauwesen, **21/1–2**, Wien.
- KASTNER, H. (1971): Statik des Tunnel- und Stollenbaus. – 2. Neubearb. Aufl., VII + 269 S., 121 Abb., Berlin – Heidelberg (Springer).
- KIESLINGER, A. (1958): Restspannung und Entspannung im Gestein. – Geol. Bauwesen, **24/2**, 95–112, Wien.
- KILLIAN, H. (1977): Georg Huebner und seine Werke im Spiegel zeitgenössischer Quellen. – Sonderdruck Centralblatt f. d. ges. Forstwesen, **94/4**, 195–224, 10 Abb., Wien.
- KIRSCHKE, D. (1989): Grundlegende Feststellungen zum Hohlraumbau als erste Stufe zur Entwicklung eines neuen Sicherheitskonzeptes. – 267–278. – In: EGGER, P. et al. (Hrsg., 1989): Geologie, Felsmechanik, Felsbau. – Festkoll. L. MÜLLER-SALZBURG, 1988, 358 S., zahlr. Abb., Clausthal (Trans Tech. Publ.).
- KLENGEL, K. J. & WAGENBRETH, O. W. (1982): Ingenieurgeologie für Bauingenieure. – 201 S., zahlr. Abb. u. Tab., Wiesbaden – Berlin (Bauerlag).
- KOHLBECK, F. & SCHEIDEGGER, A. E. (1977): On the Theory of the Evaluation of Joint Orientation Measurements. – Rock Mech., **9**, 9–25, 9 Abb., Wien.
- KOHLBECK, F. (1990): Tektonische Spannungen in den Ostalpen und ihr Nachweis durch in situ-Messungen. – Öff. Vortrag beim XXXIX. Geomech. Koll. 1990, Salzburg.
- KÜPPER, H. et al. (1971): Zur Geologie des Gebietes nordöstlich von Göpfritz a.d.W., NÖ. – Verh. Geol. B.-A., **1971**, 393–408, 2 Abb., 1 Beil., Wien.
- LAMA, R.D. & VUTUKURI, V. (1978): Handbook on Mechanical Properties of Rocks. Vol. II. – IX + 481 S., 89 Abb., 38 Tab., Clausthal (Trans Tech. Publications).
- LANGER, H. (1969): Rheologie der Gesteine. – Z. dt. geol. Ges., **119**, 313–425, 48 Abb., 9 Tab., Hannover.
- LEMPPE, Ch. & NATAU, O. (1985): Mechanische Eigenschaften von Störungen und Verwitterungszonen im Granitgebirge und deren genetische Charakterisierung. – Univ. Karlsruhe, 175–193, 13 Abb., Karlsruhe.
- LETOUZEY, J. & TRÉMOLIERES, P. (1980): Paleo-Stress Fields Around the Mediterranean Since the Mesozoic from Microtectonics. Comparison with Plate Tectonic Data. – Rock Mech., Suppl., **9**, 173–192, 9 figs. Wien.
- LINKWITZ, K. (1963): Terrestrisch-photogrammetrische Kluftmessung. – Felsmech. Ing. Geol., **1/2**, 152–159, Wien.
- LOUIS, C. (1967): Strömungsvorgänge in klüftigen Medien und ihre Wirkung auf die Standsicherheit von Bauwerken und Böschungen im Fels. – Veröff. Inst. Bodenmech. Felsmechanik, Univ. Karlsruhe, H. 30, 121, 66 Abb., Karlsruhe.
- MANDELBROT, B.B. (1987): Die fraktale Geometrie der Natur. – 491 S., zahlr. Abb., 334 Taf., Basel (Birkhäuser).
- MANDL, G. (1980): Einführung in die Bruchtektonik. – Blockkurs am Inst. Geowiss., Univ. Salzburg, März 1980, Salzburg.
- METZ, K. (1957): Lehrbuch der Tektonischen Geologie. – VII + 294 S., 188 Abb., Stuttgart (Enke).
- MOHR, F. (1963): Gebirgsmechanik. – XII + 392 S., 311 Abb., 57 Tab., Goslar (H. Hübner).
- MÜLLER, L. (1963): Der Felsbau. – 624 S., 307 Abb., 22 Taf., Stuttgart (Enke).
- MÜLLER, K.E.H. (1974): Zur Definition des Durchtrennungsgrades. – Rock Mech., Suppl. **3**, 17–29, 9 Abb., Wien (Springer).
- NOWY, W. (1988): Geologisch-geotechnisches Stollenband Wetterin-Ost. – Unveröff. Stollenbänder Wetterin-Ost, **1**: 100, Stollenstation 0–5557 m, Klosterneuburg.
- NOWY, W. & PLACHY, H. (1989): Zur Geologie des Wetterin-Lärchstein- und Scheiblingstollens. – Gas – Wasser – Wärme, Sd. Ausg. **2A**, 41–49, 10 Abb., Wien.
- ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSMINISTERIUM (Hrsg., 1985): Erdarbeiten ÖNORM B2205. – 37 S., Wien.
- PACHER, F. (1959): Kennziffern des Flächengefüges. Geol. Bauwesen, **24**, 223–227, 4 Abb., Wien.
- PAPP, A. et al. (1970): Führer zur Paratethys-Exkursion 1970 in die Neogen-Gebiete Österreichs. – Paläont. Inst. Wien, **57** S., Wien.
- PARLOW, E. (1950): Die Kalkalpen-Flyschgrenze zwischen Haifeld und Gresten (Abschnitt Scheibbs). – Unveröff. Diss. Phil. Fak. Univ. Wien, 121 S., Abb., 5 Beil., Wien.
- PETERS, K. (1980): Klüfte – Merkmale, Entstehungsdeutungen, ihre Verwendbarkeit für die Rekonstruktion von Spannungen sowie ihre Bedeutung für die Erdöl-Erdgas-Industrie. – Z. geol. Wiss., **8** (1980), 853–877, 5 Abb., 2 Tab., Berlin.
- PLACHY, H. (1981): Neue Erkenntnisse zur Tektonik im Wiener Raum. – Mitt. österr. geol. Ges., **74/75**, 231–243, 5 Abb., 1 Taf., Wien.
- POLLARD, D.D. & AYDIN, A. (1988): Process in understanding jointing over the past century. – Geol. Soc. Amer. Bull., **100**, 1181–1204, 28 figs., Boulder, Colorado.
- PREUSS, H.D. (1974): Numerisch-photogrammetrische Kluftmessung. – Rock Mech., Suppl. **3**, 5–15, 5 Abb., Wien.
- RENGERS, N. (1971): Unebenheit und Reibungswiderstand von Gesteinstrennflächen. – Veröff. Inst. Bodenmech. Felsmechanik, Univ. Karlsruhe, **47**, 192, 66 Abb., 4 Taf., Karlsruhe.
- REUTER, F., KLENGEL, J.K. & PAŠEK, J. (1980): Ingenieurgeologie. – 456 S., 263 Bilder, 133 Tab., Frankfurt (Harri Deutsch/Thun).
- RICHTER, H.Ch., MOLEK, H. & REUTER, F. (1976): Methodische Probleme bei der Ermittlung strukturgeologischer Primärdaten im Fels und ihrer Weiterleitung zu statistischen Kenngrößen des Gesteinsverbandes. – Zt. angew. Geol., **22** (1976), H. 5, 238–243, 6 Abb., 3 Tab., Berlin-Ost.
- RIEDMÜLLER, G. (1967): Zur Geologie des NW-Teiles der Bucklingen Welt. – Unveröff. Diss. Phil. Fak. Univ. Wien, 274 S., 26 Abb., 7 Beil., Wien.
- RITSEMA, A. R. (1974): The Earthquake Mechanisms of the Balkan Region. – UNESCO Survey of the Seismicity of the Balkan Region: UNDP Projekt REM/70/172, De Bilt.
- ROSSMANITH, H. P. (1989): Felsbruchmechanik – eine kurze Einführung. – ÖIAZ, **134**, (10), 515–527, 21 Abb., Wien.
- SANDER, B. (1948): Einführung in die Gefügekunde geologischer Körper. – Bd. I/II, Wien (Springer).

- SCHEIDEGGER, A.E. (1976): Untersuchungen des Beanspruchungsplanes im Einflußgebiet der Diendorfer Störung. – Jb. Geol. B.-A., **119**, 83–95, 22 Abb., Wien.
- SCHEIDEGGER, A.E. (1979): Beziehungen zwischen Orientationsstruktur der Talanlagen und der Kluffstellungen in Österreich. – Mitt. Ö. Geogr. Ges., **121** (II), 187–195, 8 Abb., Wien.
- SCHERMANN, O. (1966): Über Horizontalverschiebungen am Ostrand der Böhmisches Masse. – Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud., **16** (1965), 89–103, 8 Abb., Wien.
- SCHIMMER, R. E. (1975): Geotechnische Gebirgsklassifizierungen. – Unveröff. Dipl. Arbeit, Inst. Geol., Ruhr-Univ. Bochum, 200 S., zahlr. Abb. u. Tab., Bochum.
- SCHMIDT-THOMÉ, P. (1954): Klufftektonik und Großstrukturen in den Nördlichen Kalkalpen. – Geol. Rdsch., **42**, 172–187, 4 Abb., Stuttgart.
- SCHNEIDER, G. (1975): Erdbeben. – VIII + 406 S., 100 Abb., 35 Tab., Stuttgart (Enke).
- SCHÖNENBERG, R. (1980): Einführung in die Geologie Europas (3. unveränd. Aufl.). – 300 S., 37 Abb., Freiburg (Rombach).
- SCHWAIGHOFER, B. (1966): Talübergang Brenntenmais, Großraum und Einschnitt Bihaberg. – Unveröff. Exk. Führer, Inst. Geol., TH Wien, 4 S., Wien.
- SCHWINGENSCHLÖGL, R. (1981): Geologie der Kalkvoralpen und der subalpinen Zone im Raum Kirchberg/Pielach in Niederösterreich. – Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud., **27**, 39–86, 7 Abb., 2 Taf., 2 Beil., Wien.
- SCHWINGENSCHLÖGL, R. (1988): Die Geologie der Gründungsfläche des Donaukraftwerkes Greifenstein. – Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud., **34**, 1–32, 14 Abb., 5 Fototaf., 8 Beil., 4 Karten, Wien.
- SCHWINGENSCHLÖGL, R. & PÜCHL, G. (1988): Die Standsicherheit von künstlichen Böschungen in Phylliten. – Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud. Österr., **34/35**, 43–78, 23 Abb., Wien.
- SCHWINGENSCHLÖGL, R. (1990): Felsgleitung in metamorphen Gesteinen des Thayatales, NÖ. – Felsbau, **8/2**, 61–67, 8 Abb., 1 Tab., Essen (Glückauf).
- SCHWINGENSCHLÖGL, R. & ROCKENSCHAUB, H. (1990): Ingenieurgeologische Charakteristika zur Felsklassifizierung. – Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Straßenforschungsvorhaben Nr. 672, Heft **380**, 198, 51 Abb., 17 Tab., 16 Taf., 1 Karte (Republik Österreich, BfWA) Wien.
- SCHWINGENSCHLÖGL, R. & WEISS, E. H. (1985): Ingenieurgeologische Probleme bei der Boden- und Felsklassifikation im Autobahnabschnitt A2. – Felsbau, **3** (Nr. 4), 218–224, 8 Abb., Essen (Glückauf GmbH).
- STANGE, K. (1977): Bayes-Verfahren (Schätz- und Testverfahren bei Berücksichtigung von Vorinformationen). – VI + 312 S., 36 Abb., Berlin (Springer).
- STEINHAUSER, P. & HÖGGERL, n. (1988): On the Correlation between Recent Crustal Movements and Gravity Anomalies in Austria. – (in press), 16 p., 13 figs., Vienna.
- STINY, J. (1929): Technische Gesteinskunde. – 2. Aufl., 550 S., 422 Abb., Wien (Springer).
- STINY, J. (1930): Die Anlage von Steinbrüchen und Baustoffgruben. – Geol. Bauwesen, **2/1**, 78, 93 Abb., Wien.
- STINY, J. (1932): Zur Kenntnis jugendlicher Krustenbewegungen im Wiener Becken. – Jb. Geol. B.-A., **82**, 75–102, 7 Abb., Wien.
- STINY, J. (1941): Unsere Täler wachsen zu. – Geol. Bauwesen, **13**, 71–79, Wien.
- STINY, J. (1951): Haben Kluffmessungen in Lockermassen Sinn – Geol. u. Bauwesen, **18/1**, 47–51, 1 Tab., Wien.
- STINY, J. (1953): Behelfsmäßige Untersuchungen der Gebirgsfestigkeit. – Geol. Bauwesen, **20**, 34–36, 4 Abb., Wien.
- STINY, J. (1955): Die baugelologischen Verhältnisse der Österreichischen Talsperren. – Die Talsperren Österreichs, **5**, 98 S., 48 Abb., 9 Taf., Wien (Österr. W. W. Vbd.).
- STINY, J. & PETZNY, H. (1956): Wassersprengung und Sprengwasser. – Geol. Bauwesen, **22**, 141–169, 18 Abb., Wien.
- STINY, J. (1956): Felsgrundbrüche im Baugelände von Wasserkraftanlagen. – Geol. Bauwesen, **22**, 224–245, 8 Abb., Wien.
- TOLLMANN, A. (1963): Ostalpensynthese. – VIII + 256 S., 22 Abb., 11 Taf., Wien (Deuticke).
- TOLLMANN, A. (1969): Die Bruchtektonik in den Ostalpen. – Geol. Rdsch., **59**, 278–288, 1 Taf., Stuttgart.
- TOLLMANN, A. (1976): Der Bau der Nördlichen Kalkalpen. – IX + 449 S., 130 Abb., 7 Tafeln in separatem Anhang, Wien (Deuticke).
- TOLLMANN, A. (1977): Die Bruchtektonik Österreichs im Satellitenbild. – N. Jb. Geol. Paläont. Abh., **153**, 1–27, Taf. 1, Stuttgart.
- TOLLMANN, A. (1986): Geologie von Österreich. Bd. 3. – X + 718 S., 145 Abb., 8 Tab., 3 Falttaf., Wien (Deuticke).
- TOLLMANN, A. (1987): Neue Wege in der Ostalpengeologie und die Beziehungen zum Ostmediterrän. – Mitt. österr. geol. Ges., **80**, 47–113, 11 Abb., 1 Tab., 1 Taf., Wien.
- TURCOTTE, D. L. (1989): Fractals in Geology and Geophysics. – PAGEOPH, **131** (1/2), 171–196, 15 figs. – In: SCHOLZ, H. & MANDELROT, B.B. (eds., 1989): Fractals in Geophysics. – 313 p., many figs. and tables, Basel (Birkhäuser).
- WESSELY, G. (1983): Zur Geologie und Hydrodynamik im südlichen Wiener Becken und seiner Randzone. – Mitt. österr. geol. Ges., **76**, 27–68, 8 Taf., Wien.
- WESSELY, G. (1984): Der Aufschluß auf kalkalpine und subalpine Tiefenstrukturen im Untergrund des Wiener Beckens. – Erdoel-Erdgas, **100**, 285–292, 4 Abb., Hamburg – Wien.
- WITTKÉ, W. (1984): Felsmechanik (Grundlagen für wissenschaftliches Bauen im Fels). – XVII + 1050 S., 798 Abb., Berlin (Springer).
- WUNDERLICH, H.-G. (1966): Wesen und Ursachen der Gebirgsbildung. – 367, 60 Abb., Hochschultaschenbücher **339**, **339a**, **339b**, Mannheim (Bibliogr. Inst.).
- ZISCHINSKY, U. (1969). Über Berggreifung und Talzuschub. – Geol. Rdsch., **58** (3), 974–983, 7 Abb., Stuttgart.
- ZURKOV, n. (1965): Kinetic concept of the Strength of Solids. Intern. J. Fract. Mech., **1**, 311–323, Groningen.

Manuskript bei der Schriftleitung eingelangt am 18. Jänner 1991.