

**Die Bedeutung der Strukturgeologie anhand einiger Beispiele
im Tunnel- und Kraftwerkebau**

von

W. NOWY

mit 23 Abbildungen

Anschrift des Verfassers:

Dr. Walter Nowy
Ingenieurkonsulent für technische Geologie
Max Kahrergasse 25
A-3400 Klosterneuburg

Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud. Österr.	33	S. 159–185	Wien, 1986
---------------------------------------	----	------------	------------

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung, Summary	160
1. Einleitung – Definition und Ziel einer strukturgeologischen Untersuchung für geologisch-geomechanische Betrachtungen	161
2. Unterschiedliche Ausgangsbedingungen der Gebirgsverformungszustände und deren Berücksichtigung für das weitere Verhalten im Bereich bautechnischer Veränderungen	164
2.1. Beispiele von Gebirgskörpern, deren jetziger Verformungszustand nicht entscheidend durch ein Trennflächengefüge geprägt wird	165
2.2. Beispiele von Gebirgskörpern, deren jetziger Verformungszustand durch ein Trennflächengefüge geprägt wird	168
2.3. Beispiele von Gebirgskörpern, deren jetziger Verformungszustand entschei- dend von jungen Verformungen wie Entspannungen und daraus resultieren- den Lockerungen gekennzeichnet sind	176
3. Literaturverzeichnis	183

Zusammenfassung

Die aufgezeigten Beispiele sollen veranschaulichen, daß eine genau durchgeföhrte Gefügeanalyse unumgänglich ist, um den Einfluß der Strukturen des jeweilig betrachteten Gebirgskörpers auf sein geomechanisches Verhalten hin zu beschreiben, zu beurteilen oder vorherzusagen. Aus der Summe aller Strukturdaten und -informationen soll letztlich ein Vorstellungsbild vermittelt werden, aus welchem bei technischen Eingriffen mit großer Wahrscheinlichkeit ein gewisses geomechanisches Felsverhalten sowie aller anderen daraus resultierenden Vorstellungen abgeleitet werden kann. Dabei sind die jeweilig in verschiedenen Dimensionen auftretenden und definierbaren Strukturelemente nicht nur in absoluter Größe, sondern vor allem in ihrem Größenverhältnis zwischen den einzelnen Elementen sowie ihres Größenverhältnisses zu den technischen Bauwerken zu sehen.

Summary

The examples pointed out have the task to illustrate that a petrofabric analysis exactly passed through is absolutely necessary. It's necessary for describing, judging or predicting the influence of the structures of the rock mass respectively inspected on to its geomechanical behaviour. The sum of all structure data and structure informations has to arrange an image out of which could be lead a certain geomechanical rock behaviour as well as all other conceptions resulting out of it. To realize these ideas technical operations are necessary which should lead to results by great possibility. The structural elements, which respectively are occurring and are definde in various demension need not only to be seen in absolutely size. Mainly they have to be seen in their proportion between isolated elements as well as in their proportions to technical edifices.

1. Einleitung – Definition und Ziel einer strukturgeologischen Untersuchung für geologisch-geomechanische Betrachtungen

Der Ausdruck Strukturgeologie kommt vom Englischen "structural geology" und befaßt sich mit der Frage, wie Gesteinskörper bei Einwirken von äußeren Kräften reagieren und mit der Beschreibung der aus dieser Beanspruchung resultierenden Strukturen, die dem Gesteins- oder betrachteten Gebirgskörper aufgeprägt wurden.

Dabei liegt die geologische Aufgabe in der Erkundung und Erfassung der dem Gebirge aufgeprägten Struktur- oder Gefügemerkmale, um unter anderem die Grundlage für eine Aufbereitung geomechanischer Kriterien oder weitere geologisch-geomechanische Überlegungen zu liefern. Die Untersuchungen des geologischen Aufbaues konzentrieren sich sowohl auf den mikroskopischen Bereich, um die Form und Orientierung der Mineralkomponenten des Gesteins zu erfassen als auch auf die im Handstück- sowie Planmaßstab erkennbaren Strukturmerkmale. Das sind unter anderem die Trennflächen und Trennfugen als Schichtung oder als verschiedene Arten von Schieferung, die Zug- und Scherrisse oder Trennflächen unklarer Entstehung sowie deren Richtungsgruppen, die Linearen von Fließstrukturen oder Achsen von Faltenformen und schließlich der Wechsel der Orientierung sämtlicher solcher Raum- und Strukturdaten von Ort zu Ort.

Die Bedeutung liegt aber nicht nur in der möglichst lückenlosen Erfassung dieser grundsätzlichen geologischen Daten und Merkmale, sondern insbesondere auch darin, Informationen über die räumliche Verteilung der Strukturen sowie ihrer Beziehungen untereinander und zueinander zu erhalten. Dadurch können kinematische Zusammenhänge der verschiedenen geologischen Verformungsakte erfaßt, abgegrenzt und sogar zeitlich unterschieden werden und vor allem Richtungsbeziehungen, wie eine gefügebedingte Anisotropie, klar zum Ausdruck gebracht und veranschaulicht werden.

Der große Wert der Strukturgeologie für technisch-geologische Fragen liegt also darin, daß aus der Summe der erfaßten und gewonnenen Struktur- und Gefügedaten, Aussagen und vor allem Rückschlüsse auf das weitere Verhalten des verformten und beanspruchten Gebirgskomplexes bei künstlichen Eingriffen, erwartet werden können. Die Beantwortung gerade dieser Fragen, das zu erwartende Verformungsverhalten eines Gebirgskörpers oder Aussagen über seine Gebirgseigenschaften im allgemeinen, hängt ganz wesentlich von den Strukturdaten, wie z.B. der Trennflächen, Klüfte, Schieferungsflächen u. v. m. ab. Das geht schon allein aus dem Umstand hervor, daß die mechanische Charakteristik des jeweilig betrachteten Gebirgskörpers von der räumlichen Anordnung der Trennflächen zur freien Oberfläche, der Zahl dieser Trennflächen, u. v. m. weit mehr bestimmt wird als von der Gesteinsart. Diese Faktoren und Parameter bestimmen letztendlich das Verhalten des Gebirgskörpers bei künstlichen Eingriffen wie Unterschneidungen, Felsanschnitten oder bei Einleitung von Kräften und Bauwerksbelastungen in den Untergrund sowie im Zuge von Hohlräumausbrüchen.

Als Ausgangsbasis für weitere geomechanische und felsmechanische Betrachtungen ist es daher notwendig, die dem Gebirgskörper aufgeprägten Strukturen zu erfassen und zu den jeweiligen technisch-geologisch-geomechanischen Gesichtspunkten in Beziehung zu setzen. Dabei liegt die Schwierigkeit in der Erfassung jener wirksamen Gefügeeigenschaften, die das weitere Verhalten des jeweilig betrachteten Gebirgskörpers entscheidend beeinflussen können. Hier konnte die Arbeitsweise der Gefügekunde im Sinne von B. SANDER, mit ihrer von der geologisch-genetischen Vorstellung befreiten



Abb. 1:

Bedeutung der räumlichen Anordnung und der Zerlegungsintensität der Trennflächen gegenüber dem Einfluß der Gesteinsart auf das zu erwartende Verhalten des Gebirgskörpers.

Beschreibung der Gebirgskörperstrukturen, die wesentliche Grundlage liefern und damit zu einem der Ausgangspunkte für die Entwicklung spezieller felsmechanischer Überlegungen werden.

Die Aufgabe bzw. das Ziel einer strukturgeologischen Analyse ist es aber auch zu versuchen, aus den Strukturmerkmalen und Strukturdaten auf die Faktoren zurückzuschließen, die diese Strukturen prägten.

Dabei liegt die Schwierigkeit zweifellos darin, daß die Ausbildung der meisten Strukturmerkmale von mehreren Faktoren abhängig ist, so daß wir an ihnen nicht erkennen können ob dieser oder jener Faktor für die Entstehung des erkannten Merkmals verantwortlich ist oder nicht. Als Beispiel dafür, wo wir sehen können, daß die meisten Strukturmerkmale nicht nur von einem Faktor abhängig sind, sei angeführt, daß z. B. ein Körper bei Änderung der Temperatur sich einmal rupturell, ein anderes Mal plastisch bzw. fließend deformiert. Rupturelle oder fließende Deformationen können wir aber auch erhalten, wenn wir bei sonst konstanten Bedingungen den hydrostatischen Druck oder die Geschwindigkeit der Deformation variieren, oder den Körper einmal trocken, ein anderes mal mit Lösungen getränkt verformen (HOEPPENER, 1963). Wenn wir aus dem Gefüge auf die prägenden Faktoren zurückschließen wollen, bleibt für unsere Deutung in diesen Fällen ein erheblicher Spielraum. Wie Beispiele zeigen können, ist die Ableitung von der Wirkung äußerer Kräfte auf einen gedachten Körper und dessen Gefüge nicht eindeutig lösbar. Wir müssen im Gegenteil feststellen, daß bei Wirkung äußerer Kräfte aus den Gefügemerkmalen keine eindeutige Aussage über diese Kräfte möglich sind. So sehen wir, daß wohl Kraftansätze voneinander ab-

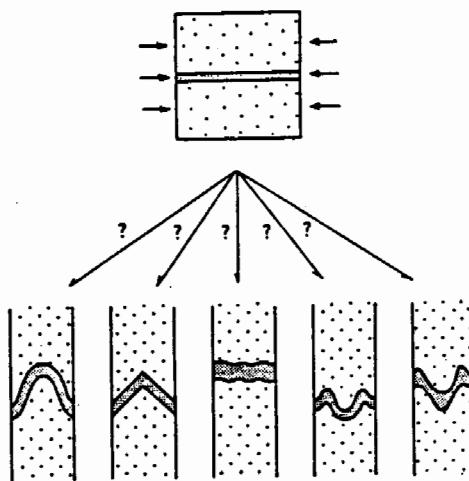


Abb. 2:
Problematik über die Entstehung von Falten, gezeigt am Beispiel einer eingebetteten dünnen Gesteinslage, die parallel zu ihrer Lagerung beansprucht wird. Welche Einflußfaktoren sind maßgeblich, daß überhaupt eine Faltung entsteht? Welche Einflußfaktoren sind dafür verantwortlich, daß einmal Rundfalten, Knickfalten, Knitterungsfalten und Falten verschiedenster geometrischer Formen entstehen? (aus HOBBS, B. E. et al., 1976).

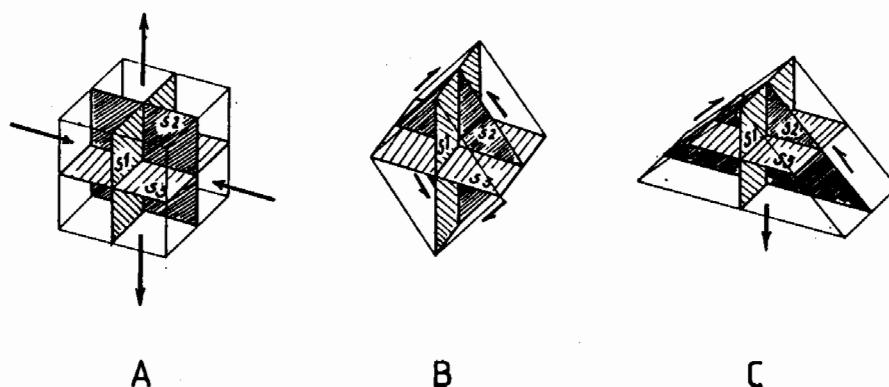


Abb. 3: Beziehung zwischen äußeren Kräften und der Symmetrie des Gefüges. Im Fall A greifen nur Normalkräfte an, im Fall B nur Tangentialkräfte und im Fall C Normal- und Tangentialkräfte. In allen drei Fällen weist das Gefüge drei gleich orientierte, senkrecht aufeinander stehende Symmetrieebenen auf (aus HOEPENER, R., 1963).

weichen können, die Lage der Symmetrieelemente wie auch die Richtung der Größenkürzungen und -dehnungen bleiben jedoch konstant (s. Abb. 3).

Um zu einer Erklärung des Mechanismus und damit zu verwertbaren Grundlagen für eine weitere geomechanische Bearbeitung zu kommen, muß die Struktureogeologie versuchen, die jeweiligen struktureogeologischen Daten und Informationen als „Ganzes“ zu erfassen und sie quantitativ zu beschreiben, so daß das Verhalten des Gebirgskörpers unter geänderten Gleichgewichtsbedingungen, wenn nicht vorausgesagt, so doch „vorausgeföhlt“ werden kann. Dabei sollte die mathematische Analyse helfen, die Vorgänge im Gebirge zu verstehen. Dies gelingt wiederum nur dann, wenn aus der geologischen Detailaufnahme gewisse geologisch-gefügekundliche Gesetzmäßigkeiten her-

ausgefunden werden können, die eine rechnerische Aufbereitung erlauben. Aus der Sicht der Geologie liegt aber gerade die Gefahr und die Problematik in der Vereinfachung und Schematisierung der einzelnen geologischen und felsmechanischen Parameter.

Neben dem Trend, die Vielfalt der geologisch-geomechanischen Parameter wie Kluftstellung, Durchtrennungsgrad, Kohäsion, innere Reibung, Kluftwasserschub u. v. m. zu einer Qualitätsziffer zusammenzuschmelzen, können nämlich dieselben Parameter durch An- oder Abwesenheit gewisser Faktoren in den Vordergrund treten, durch An- oder Abwesenheit anderer Faktoren wiederum ganz unwirksam gemacht werden (MÜLLER, L., 1982).

Es ist daher auch kein Zufall, daß trotz gewaltigem Fortschritt in der rechnerischen Umsetzung felsmechanischer Probleme (MALINA, 1967; FAIRHURST, 1976) Mißerfolge nicht auf eine ungenügende oder fehlerhafte Berechnung, sondern zumeist auf unzutreffende Eingangswerte oder auf Unverständnis der geologisch-strukturellen Gesamtsituation zurückzuführen sind.

2. Unterschiedliche Ausgangsbedingungen der Gebirgsverformungszustände und deren Berücksichtigung für das weitere Verhalten im Bereich bautechnischer Veränderungen

Da nahezu alle geologischen Vorgänge der Gesteinsbildung und Gesteinsverformung irgendwelche gerichtete Einflüsse beinhalten, stellen wirklich isotrope geologische Körper eine Ausnahme dar. Es liegen daher für unsere geologisch-geotechnischen Überlegungen fast ausnahmslos Gebirgskörper vor, die entweder unter der großen Belastung der überlagerten Gesteinsmassen plastisch verformt wurden oder durch ihre jetzige Nähe an der Oberfläche in einen Bereich gekommen sind, in dem sie aufgrund ihres spröden Verhaltens durch Trennflächen und Klüfte zerbrochen worden sind. Das heißt aber auch, daß das weitere Verhalten des jeweilig betrachteten Gebirgskörpers ganz wesentlich von seinem momentanen Verformungszustand abhängt. Als Ausgangsbasis für weitere Überlegungen muß daher vorher einmal dieser vorhandene Verformungszustand in all seinen Details erfaßt werden. Hierfür hilft eine Einteilung, die dem geologischen Bestreben nach einer zeitlichen Aufgliederung der Verformungen entspricht, aber auch gleichzeitig das weitere mechanische Verhalten der schon unterschiedlich verformten Gebirgskörper in den Bereichen bautechnischer Veränderungen kennzeichnen kann (CLAR, 1965).

- Verformungen, die unter wesentlich höheren Belastungen und Temperaturen vor sich gegangen sein müssen als sie heute für gefügetechnisch interessierende Bereiche herrschen. Diese Verformungsbilder entsprechen meistens den Vorgängen der Tiefentektonik. Hier liegt die Problematik weniger im künftigen technischen Verhalten, bezogen auf das Trennflächengefüge, sondern eher z. B. im Einfluß der im Zuge der Metamorphosevorgänge aufgeprägten Anisotropie im Bereich des mikroskopischen Korngefüges, wie die Form und die geometrische Abstufung sowie die räumliche Ausrichtung der einzelnen Mineralaggregate und ihre Anordnung zueinander oder der bestehenden Eigenspannungsverhältnisse.
- Verformungen, die den Großteil der heute wirksamen Kluft- und Trennflächensysteme erzeugt haben. Hierzu ist für unsere Betrachtungen die Zerklüftung der geologischen Körper zu zählen. Diese Verformungen treten im allgemeinen gegen En-

- de der diagenetischen Verfestigung oder metamorphen Kristallisation auf.
- c. Verformungen des Gebirgsverbandes, die bereits einen zerbrochenen, diskontinuierlichen Kluftkörperverband vorgefunden haben. Das sind Verformungen, die zu den heutigen Geländeformen geführt haben, also komplexe Vorgänge, die als Resultat von Spannungsumlagerungsprozessen vorliegen (Entspannungsvorgänge, Lockerrung des Gefügeverbandes, Fließ- und Kriechvorgänge u. v. m.).

Entsprechend dieser Einteilung sollen einige Beispiele die Bedeutung und den Einfluß der Strukturen veranschaulichen.

2.1. Beispiele von Gebirgskörpern, deren jetziger Verformungszustand nicht entscheidend durch ein Trennflächengefüge geprägt wird

Zur ersten Gruppe, jenen Verformungen, die unter wesentlich erhöhten Belastungen und Temperaturen stattfanden, soll ein Gebirgstyp vorgestellt werden, der in diese Gruppeneinteilung nicht ganz paßt, aber aufgrund seines angenäherten „isotropen“ Gebirgszustandes am ehesten dieser Gruppe zuzuordnen ist. Es handelt sich um das alpine Haselgebirge, welches nach seinem sedimentären und strukturellen Habitus als Pseudokonglomerat anzusprechen ist. Dieses, vermutlich aus wiederholter Aufarbeitung und Resedimentation hervorgegangene Gestein, setzt sich aus den Hauptmineralen Chlorit, Glimmer, Quarz und Salz zusammen. In der Grundmasse sind deutlich gerundete und in ihrer Größe variierende Gesteinskomponenten und Schollen eingebettet, die aus Fremdgesteinen wie Siltstein, Quarzit und Tonschiefer sowie aus Gemengen von Dolomit und Anhydrit, Mergelton, Salzton und Anhydrit- bzw. Gips-schollen bestehen können.

Es soll nun nicht näher auf die bekannten Auswirkungen des Gebirgsverhaltens bei Herstellung eines Hohlraumes im Haselgebirge, wie die des Quellens, der Fähigkeit sich unter Druck plastisch zu verformen, Spannungen zu konservieren u. ä. m. eingegangen werden, sondern auf eine strukturelle Unterscheidbarkeit dieses Haselgebirgstypes und dem daraus resultierenden unterschiedlichen Gebirgsverhalten.

Im Zuge der Ausbruchsarbeiten für den Bosruck-Autobahn-Erkundungsstollen wurden auf nahezu 1000 m Stollenlänge jener vorhin beschriebene Haselgebirgstyp angetroffen. Die konventionell aufgefahrene Haselgebirgsstrecke verhielt sich unmittelbar nach Ausbruch, ausgenommen einige wenige Zehnermeterabschnitte, entlang denen Einschüttungsbrekzien sowie aufgeweichte Tonschiefer angetroffen wurden, vorerst standfest.

Während die mineralogische Zusammensetzung des Haselgebirges entlang dieser Stollenstrecke keine wesentliche Änderung zeigte, konnte es jedoch in zwei grundsätzlich strukturell unterscheidbare Typen unterteilt werden. Einem „homogen-isotropen“ Haselgebirge, welches frei von Trennflächen und jeglicher Einregelung der Mineralaggregate sowie der eingebetteten Fremdgesteinskomponenten war, konnte ein deutlich „anisotropes-inhomogenes“ strukturiertes Haselgebirge gegenübergestellt werden. Dieses unterscheidet sich vor allem durch das Vorhandensein vereinzelter, fasergipsgefüllter Trennflächen sowie mit fließenden Übergängen, einer sehr deutlichen Einregelung der Mineralaggregate und der Fremdgesteinskomponenten (NOWY & LEIN, 1984).

Diese grundsätzliche strukturelle Verschiedenartigkeit fand ihren Niederschlag



Abb. 4: „Homogener-isotroper“ Haselgebirgstyp.



Abb. 5: „Anisotroper-inhomogener“ Haselgebirgstyp.

auch in einem deutlich unterscheidbaren Verformungsverhalten des Gebirges unmittelbar nach dem Ausbruch. Aus den Konvergenzverformungsmessungen ließ sich ableiten, daß im sogenannten „isotropen“ Haselgebirge nur geringe Anfangsdeformationen gemessen wurden, während in den „anisotropen“ Haselgebirgsabschnitten deutlich größere Anfangsdeformationen stattfanden.

Diese Regel bestätigte sich fast unabhängig von der Überlagerungsmächtigkeit. Die unterschiedlichen Anfangsverformungen waren jedoch deutlich von der jeweiligen tektonischen Position der betrachteten Abschnitte abhängig. Das Verformungsverhalten über einen längeren Zeitabschnitt hinweg ließ dann bei den beiden unterschiedlichen Strukturtypen keinen wesentlichen Unterschied mehr erkennen. Es bestätigte sich jedoch das dem Haselgebirge zuordenbare Phänomen, daß auch nach einer längeren Beobachtungsdauer keine endgültige Stabilisierung des Gebirges eintrat. Die monatlichen Verformungsbeträge lagen auch nach einer Beobachtungszeit von mehr als neun Monaten zwischen 1 und 3 mm (s. Abb. 6).

Diese unterschiedliche Ausbildung der Haselgebirgsstrukturen muß auf ein beziehsweise unterschiedliches Wirken von Spannungen und damit Einfließen einer Anisotropie zurückzuführen sein. Dabei konnten Abschnitte, in denen diese Spannungen ungehindert ins Gebirge einflossen, von Abschnitten, in denen die Übertragung infolge z. B. eingebetteter Dolomitgroßschollen verhindert wurden („Spannungs-

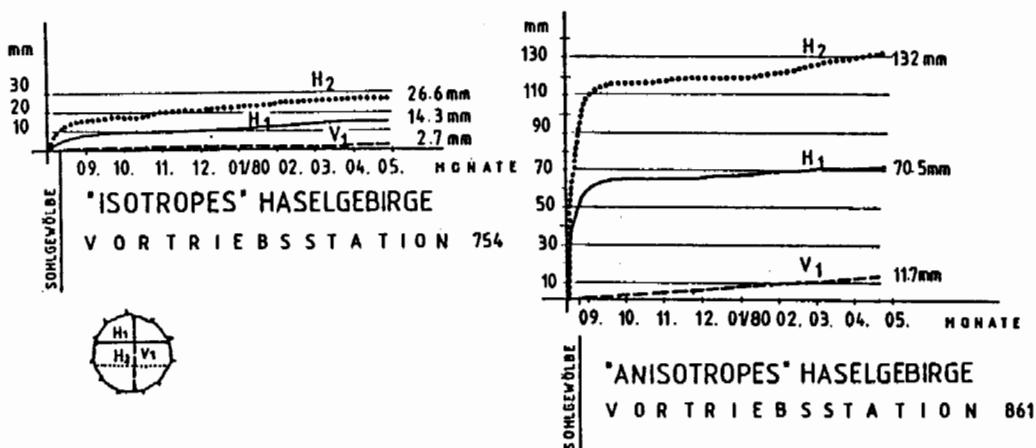


Abb. 6: Unterschiedliche Anfangskonvergenzmeßergebnisse zwischen dem „isotropen“ und dem „anisotropen“ Haselgebirge.



Abb. 7:
Bei gleichem Mineralbestand stark unterschiedlicher Grad der Verzahnung und der räumlichen Ausrichtung der einzelnen Mineralaggregate.

schatten“), unterschieden werden. Es ist anzunehmen, daß diese Spannungen, die nicht nur aus dem Überlagerungsdruck herstammen, sondern auch auf das langsame gravitative Einsinken der steifen, sich kompetent verhaltenden Bosruckkalkscholle in das weiche, sich inkompetent verhaltende und die Kalkscholle umfließendes Haselgebirge, zurückzuführen sind.

Diese im Zuge des Erkundungsstollenausbruches (Ausbruchsquerschnitt $\sim 36 \text{ m}^2$) gewonnenen Erkenntnisse, dienten letztlich als Grundlage für eine unterschiedliche Vorausdimensionierung der Stützmittel in den entsprechenden Haselgebirgsstrecken des nachfolgenden Ausbruches der Haupttunnelröhre (Ausbruchsquerschnitt $\sim 90 \text{ m}^2$)

Durch den vermehrten Einsatz mechanischer Tunnelbohrmaschinen kommt jenen Verformungen, die unter wesentlich höheren Belastungen und Temperaturen vor sich gegangen sind, insbesondere durch den Einfluß der im Zuge dieser Metamorphosevorgänge ausgeprägten Anisotropie, eine entscheidende Bedeutung zu. Gerade beim vollmechanischen Tunnelvortrieb können sich aus Einflußgrößen wie der Größe, Gestalt und Verband der Mineralaggregate sowie der räumlichen Ausrichtung und ihrer Anordnung zueinander (Textur – im Sinne von B. SANDER) sehr schnell Änderungen der erforderlichen Arbeitsleistung und damit Kostensteigerungen um hundert oder sogar um mehr als hundert Prozent ergeben.

Dies führt zu gesteigerten Ansprüchen an die Genauigkeit und Detailliertheit der geologisch-geotechnischen Prognose. Daher ist die Ermittlung und Angabe der einachsigen Druckfestigkeit aus verschiedenen Richtungen, der Scherfestigkeit, der Spalt-

zugfestigkeit, der Gesteinsabrasivität oder des Verformungsmoduls bereits fester Bestandteil eines geologisch-geotechnischen Untersuchungsprogrammes. Der Einfluß dieser geotechnischen Parameter auf die Fräsbarekeit ist der Tendenz nach bekannt und erwiesen, die Quantifizierbarkeit und Umlegung auf eine Angabe des Nettobohrfortschrittes ist aber schwierig und im Grund noch ungelöst (PIRCHER, 1980).

Noch komplexer werden jedoch die Verhältnisse um den Einfluß der richtungsabhängigen Anordnung der einzelnen Mineralaggregate in die Beurteilung der Fräsbarekeit miteinzubeziehen. Vor allem stengelige oder blättrige Minerale zeigen eine ausgeprägte gerichtete Textur. Diese kann den mechanischen Vortrieb zusätzlich enorm beeinflussen. Solche Erfahrungen wurden z. B. im Druckschacht Kühtai als auch beim mechanischen Vortrieb der Gletscherbahn Kaprun gemacht. Hier zeigte sich, daß die quer zur Schieferung orientierten Minerale (Hornblende, Epidot) eine deutliche Verminderung der Bohrgeschwindigkeit verbunden mit einem wesentlich höheren Energieverbrauch erbrachten (PIRCHER, 1980; RIENÖSSL, 1980). Aber ebenso unterschiedliche Bohrfortschrittsergebnisse sind, bei sonst gleichen petrologischen Ausgangsbedingungen, auf unterschiedliche Mikrostrukturverhältnisse wie veränderliche Richtung, ein unterschiedlicher Grad der Verzahnung und vor allem eine unterschiedliche Art der Anisotropie (Druckstollen Zillergründl) zurückzuführen. Diese sehr entscheidenden und beschreibbaren Einflußgrößen bleiben mangels ihrer Quantifizierbarkeit meist unberücksichtigt (s. Abb. 7).

2.2. Beispiele von Gebirgskörpern, deren jetziger Verformungszustand entscheidend durch ein Trennflächengefüge geprägt wird.

Zur zweiten Gruppe von Verformungen, jenen, die den Großteil der heute wirksamen Kluft- und Trennflächensysteme erzeugt haben, gelten im Vergleich zur ersten Gruppe im allgemeinen als jünger.

Ihre Anlage ist teilweise noch verbunden mit bruchlosen Verformungen des Korngefüges bzw. diese Verformungen sind zeitlich unabhängige jüngere Deformationsakte. Hierzu sind sämtliche Trennflächen teils primärer Anlage oder als Ergebnis einer tektonischen Verformung zuzuordnen. Hier erscheint es auch grundlegend wichtig zu sein, zwischen Gestein und Gebirge zu unterscheiden, da hier die Gebirgs-eigenschaften nur gering von der Gesteinssubstanz aber ganz wesentlich vom Gefüge, den Trennflächen, ihrer Raumstellung, ihrer Zerlegungsintensität, ihrer Ausbildung u.v.m. abhängen.

Die statistische Erfassung der Trennflächen geringer Erstreckungslänge und die örtliche Erfassung der Trennflächen großer Ausdehnung spielt eine entscheidende Rolle. Es liegt zumeist ein Vielkörpersystem vor, welches das Ergebnis tektonischer Gebirgszerbrechung ist und dessen einzelne Individuen, die Kluftkörper, sich an den Diskontinuitätsflächen gegeneinander verschieben oder auch verdrehen können. Der vorliegende und zu beurteilende Gebirgskörper oder Kluftkörperverband weist eigentlich nur noch eine „Restfestigkeit“ auf (CLAR, 1965; MÜLLER, 1982) deren Größe durch den Verband der Kluftkörper bestimmt wird.

Die Bedeutung der hohen Anisotropie eines so zerlegten und zerbrochenen Gebirges in bezug auf seine mechanischen Eigenschaften soll an zwei Beispielen, die ebenfalls aus dem Tunnel- und Stollenbau herstammen, veranschaulicht werden. Beide

Beispiele sind aus geologisch-tektonisch hochbeanspruchten Gebirgsabschnitten – dem Grazer Paläozoikum und aus der Grauwackenzone.



Abb. 8: Dünn-schiefrig ausgebildete Chloritphyllite mit zwischengeschalteten karbonatischen und serizitischen Lagen.

In Gesteinen des Grazer Paläozoikum – etwa 30 km nördlich von Graz – erfolgte im Zuge des Baues der Pyhrn-Autobahn die Untertunnelung des westlich von Deutschfeistritz gelegenen Höhenrückens. Dieser Höhenrücken liegt in einer Chloritschieferserie mit wechselnden Einschaltungen von gering mächtigen, karbonatischen und serizitischen Lagen. Durch die tektonischen Beanspruchungen ist es jedoch entlang schieferungsflächenparalleler Zonen zu Mineralumwandlungen gekommen. Es entstanden örtlich Lagen von Talk-Chloritschiefern, Serizitphylliten und Myloniten, in denen wasserempfindliche, quellfähige Tonminerale wie Montmorillonit nachgewiesen wurden. Zusätzlich ist die ganze Gesteinsserie von einer sehr engständigen, ausgeprägten Schieferung überprägt, die dem ehemaligen stofflichen Lagenbau folgt und deren Intensität bis zur Aufblätterung und damit bis zur totalen Entfestigung der Gesteine führte. Aus der Gefüge- und Strukturanalyse konnte erkennbar gemacht werden, daß das Trennflächengefüge nicht aus einer einzigen Verformung ableitbar war, sondern aus mehreren, in unterschiedlicher zeitlicher Folge, die sich mit veränderter Orientierung überprägten.

Ursprünglich war vorgesehen, dem Tunnelvollausbruch einen Erkundungsstollen vorauselen zu lassen. Die sich aber bereits am Beginn der Ausbruchsarbeiten einstellenden geologischen Schwierigkeiten ließen es jedoch ratsam erscheinen, von diesem beabsichtigten Vorhaben Abstand zu nehmen und auf einen Kalottenausbruch umzustellen. Erst nach Fertigstellung des Kalottenausbruches sollte der Vollausbruch der Haupttunnelröhre mit 90 m^2 Profilquerschnitt folgen.

Im Zuge des konventionellen Kalottenausbruches reagierte das tektonisch hochgradig und intensiv zerlegte Gebirge, während des Spannungsumlagerungsprozesses bereits sichtbar in Form kleinster Teilbewegungen oder Teilverschiebungen entlang der vorliegenden Trenn- und Kluftflächen. Die Summe dieser Bewegungen drückte sich in relativ großen Konvergenzen aus. Die Bereitschaft zu solchen Teilbewegungen im Kluftkörperverband, die sich in einer Art „Hereinfließen“ des Gebirges in den

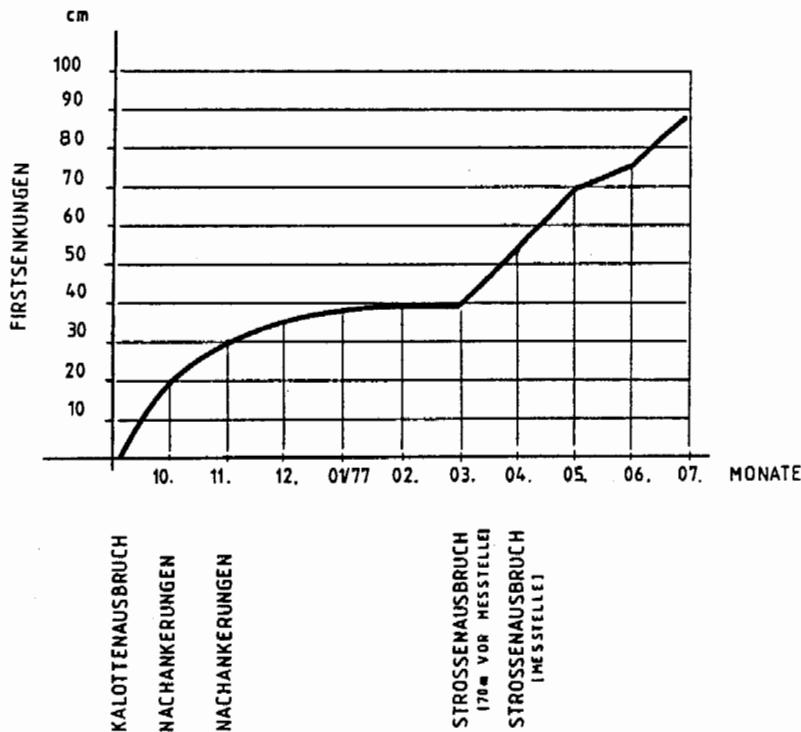


Abb. 9: Firstsetzungsdiagramm im Zuge des Kalottenausbruches sowie des nachfolgenden Vollausbruches.

Hohlraum äußerte, wurde noch zusätzlich durch den Zutritt von Bergwasser sowie insbesondere durch das Einpressen von Bohrspülwasser während des Abbohrens der Ortsbrust bzw. der zu versetzenden Anker gefördert. Das daraus resultierende druckhafte Gebirgsverhalten erzwang in solchen Abschnitten, trotz geringer Überlagerung, auch noch in der Kalotte einen Teilausbruch.

Es wurde deutlich sichtbar, daß die Teilbewegungen des Gefügeverbandes durch die eingebrachten Vortriebssicherungsmaßnahmen, die zumeist nur auf das Kurzzeitverhalten des Gebirges ausgelegt waren, nur bis zu einem gewissen Grad verhindert werden konnten. Sie reichten letztlich in Teilabschnitten nicht aus, um in der Kalotte eine Beruhigung des Gebirges herbeizuführen. Um ein Überfirsten zu vermeiden, wurde je nach Gebirgsgütekasse im gesamten Tunnelbereich eine Überhöhung zwischen 30 und 60 cm in radialer Richtung angeordnet. In der geologischen Prognose für die zu erwartenden Firstsetzungen wurde angeführt, daß diese vorgegebenen Überhöhungen jedoch, bei Belassen des Kalottenausbruches und nicht sofortigem Sohlschluß, nach fünf bis sieben Monaten, ohne Berücksichtigung der Setzungen infolge des Strossenaushubes, aufgebraucht sein würden.

Diese Befürchtungen bestätigten sich beim später nachfolgenden Vollausbruch. Die vorgesehenen Überhöhungen reichten in einzelnen Streckenabschnitten nicht aus, um eine Überfirstung zu vermeiden. Im Gegenteil mußte beobachtet werden, daß bereits 50 m bevor der Strossenabbau die kritisch einzustufenden Bereiche erreichte, in die-



Abb. 10:
Pölzung in Teilabschnitten der Kalotte zur Verhinderung einer weiteren Zunahme von Firstsenkungen und eines Verbruches.

sen Zonen die Firstsetzungen plötzlich stark zunahmen, so daß das Profil bis zu einem Meter und mehr in den Hohlräum hereinwuchs. Die Spritzbetonschale wurde fast gänzlich zertrümmert, die Bögen verdrückt, viele Anker abgerissen und andere wurden herausgezogen. Der Gebirgstragring verlor durch das Bruchfließen und Absinken des Gebirgsreibungswinkels seine Tragkraft, und ein Verbruch größeren Umfangs schien unvermeidlich. Die Ausbaustärke der Stützmittel war zu gering gewesen und das Bruchfließen wurde wahrscheinlich noch zusätzlich durch die höhere Gebirgsfeuchtigkeit infolge Schneeschmelze, Frühjahrsniederschläge und vor allem durch die Erschütterung des Strossenaushubes begünstigt. Wegen

der akuten Verbruchsgefahr wurde ein Bohren zum Versetzen von 9 m langen Ankers nicht gestattet, sondern sofort eine Pölzung eingebracht. Der Strossenaushub wurde eingestellt und die Mannschaft zur Sanierung dieser Strecke eingesetzt. Die Überfirstungsarbeiten erfolgten schlitzweise an verschiedenen Ansatzpunkten. Die Mächtigkeit der Überfirstung betrug im Mittel 1 m, maximal bis zu 1.50 m.

Die bei der Überfirstung sichtbar gewordenen Gebirgsverformungsbilder, im unmittelbaren Nahbereich der Stollenlaibung, zeigten eindrucksvoll, die während des Spannungsumlagerungsprozesses im Kleinstbereich stattgefundenen, diskontinuierlichen Teilbewegungen und Verschiebungen entlang den einzelnen Trennflächen. Bei Betrachtung im Maßstab der Tunnelquerschnittsdimension ließ sich die Verformung, die aus den Teilbewegungen der einzelnen mm–cm großen Kluftkörper zusammengesetzt war, als ein „Bruchfließen“ im Sinne von MÜLLER interpretieren (MÜLLER, L., 1960).

Ein früherer Ringschluß hätte maßgeblich dazu beigetragen, die Gebirgsdeformation in engeren Grenzen zu halten (DEMMER & NOWY, 1979).

Ein völlig anderes Gebirgs- und Verformungsverhalten zeigte sich in jenen Abschnitten, in denen keine feinstgeschieferte, dünnblättrige Ausbildung des Gebirges vorlag, sondern eine dünnplattige und z. T. grobplattige Ausbildung vorherrschte. In diesen Abschnitten wurde das Ausbruchsverhalten des Gebirges durch die kluftkörperbestimmenden Trennflächen geprägt.

Im Gegensatz zum Erscheinungsbild des „pseudoplastischen“ Hereinwanderns des engständig zerklüfteten Gebirges, bestand in diesen Abschnitten die Gebirgsverformung primär im Verschieben und Verdrehen der einzelnen Kluftkörper entlang der jeweiligen vorgegebenen Kluftflächen. Die Größe der einzelnen Kluftkörper, definiert durch die Kluftabstände sowie deren Bezug zur Dimension des Tunnelhohlraumes, be-



Abb. 11:
Bruchfließerscheinungen des Felsverban-
des am Ausbruchsrand des Kalottenge-
wölbes.

stimmten in Summe einen Verformungsablauf, der im wesentlichen durch Unstetigkeiten im Verschiebungsfeld dieses Vielkörpersystems charakterisiert war. Durch Zutreten von Bergwasser in das aufgelockerte Gefüge mit Aufbau von Kluftwasserdruk bestand stets die Gefahr von großen Verbrüchen, die in der Folge auch nicht zu vermeiden waren.

Die in diesen beiden Beispielen beschriebenen und dargestellten unterschiedlichen Verformungsabläufe im Zuge des Ausbruches veranschaulichen deutlich, daß sie nicht durch die Unterschiede in ihrer tatsächlichen Bewegungsform gekennzeichnet waren, sondern nur durch solche des Maßstabes relativ zur Größe der Gefügeelemente und deren Dimension im Hohlraumquerschnitt.

In ähnlichen Gesteinen, in **phyllitischen Gesteinen der Grauwackenzone**, erfolgt derzeit der Ausbruch eines 5,5 km langen Druckstollens. Die angenähert Ost-West ausgerichtete Stollentrasse liegt nördlich der Tauernnordrandstörung, einem geologischen Längsbruch, an dem der nördlich dieses Bruches gelegene Krustenteil gegenüber dem südlichen abgesenkt wurde. Diese ausgeprägte Großstörung, zwischen Wagrain im Osten und Mittersill im Westen, entstand in der letzten Phase der alpidischen Gebirgsbildung (TOLLMANN, 1977). Sie ist durch bis zu 200 m dicke und steilstehende, tonig-mylonitisch aufgearbeitete Phyllite gekennzeichnet. Im Zuge der geologischen Voruntersuchung bestand das Problem darin, eine Stollentrasse zu finden, die

- eventuell vorhandenen, parallelen und mehreren Meter breiten Mylonitzonen der Tauernnordrandstörung ausweicht und
- festere, ausbruchsfreundlichere Gesteinseinschaltungen, wie eingelagerte Kalkphylite und Karbonatlagen, ausnützen sollte.



Abb. 12: Zerlegung des Gebirges durch Trennflächen in geometrisch wohldefinierte Teilkörper.

Nach Auffahren des Stollens mit einer mechanischen Tunnelbohrmaschine (Durchmesser: 3,10 m) vom westlichen Stollenportal (St. Johann) wurden nach zirka 700 m Vortriebslänge geologische Bedingungen vorgefunden, die nur mehr eine sehr geringe Vortriebsleistung ermöglichten. Die Ausbruchsleistung sank auf 0,7–0,9 m pro Tag. Ursache dieser verminderten Leistung war das Auftreten eines zirka 1 m mächtigen Graphitschieferbandes im Firstbereich des Stollens. Während diese Graphitschieferbandeinschaltung eine durchaus zu erwartende Gesteinszwischeneinschaltung war, bestand das Unerwartete darin, daß die räumliche Schichtlage dieser Einschaltung, flach bis horizontal ausgerichtet war.

Zur Abklärung dieser unerwarteten Strukturverhältnisse, insbesondere im Hinblick auf den weiteren mechanischen Vortrieb, sollte mittels einer obertägigen strukturgeologischen Aufnahme versucht werden, Aufklärung über das Vorhandensein dieser flachen Strukturen zu bekommen.

Das Resultat der strukturgeologischen Aufnahme erbrachte deutlich eine Unterscheidung von verschiedenen charakteristischen tektonischen Bauformen entlang der Stollentrasse. Im westlichen und mittleren Stollentrassenabschnitt dominieren flache

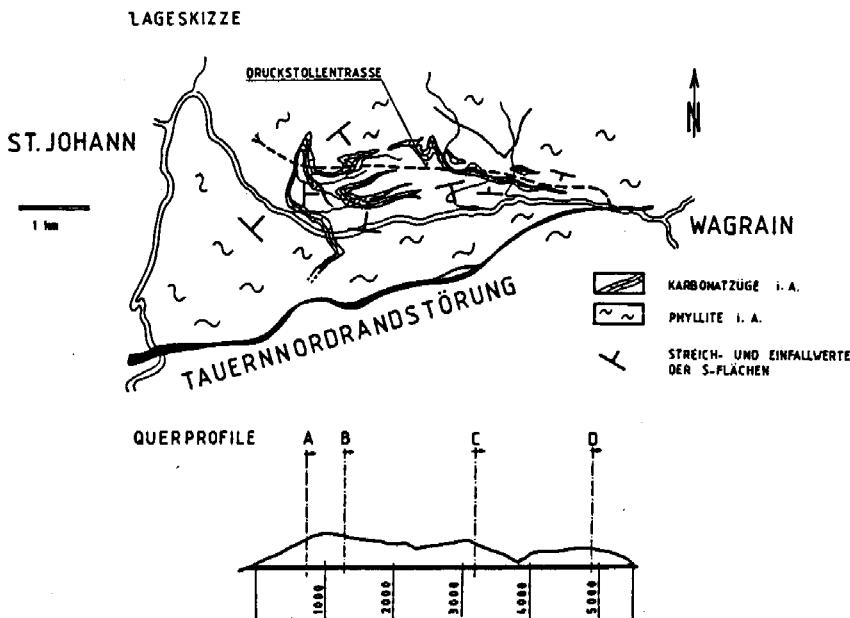


Abb. 13: Verlauf der Tauernnordrandstörung von Wagrain in Richtung St. Johann (aus MOSTLER, 1964) und räumliche Beziehungen der Strukturen zur Druckstollentrassse.

bis mittelsteile Strukturen, die aus einem liegenden bis nordeintauchenden Großfaltenbau ableitbar sind. Gänzlich unterschiedliche Verhältnisse, bezogen auf die Orientierung und Charakteristik des Gefüges, liegen hingegen im östlichen Stollentrassenabschnitt vor. Hier dominieren, bei gleichem Gesteinsbestand, tektonisch hochgradig zerlegte und mehrfach in unterschiedlicher zeitlicher Folge und Intensität überprägte Gesteine. Es überwiegt eine im Kleinstbereich intensiv verfärbte, steilstehende Verformung, die von flachen, jüngeren Strukturen überprägt wird. Diese deutlich räumlich in Ost-West-Richtung des Stollentrassenverlaufes unterscheidbaren, charakteristischen Bewegungsbilder waren und sind eindeutig in Abhängigkeit der Stollentrasensensitivierung zur Tauernnordrandstörung zu sehen.

Die Auflösung der unterschiedlich intensiv tektonisch verschuppten Teilabschnitte und deren Interpretation zu einem ganzheitlichen und widerspruchsfreien Bewegungsbild in den einzelnen Schnitten gelang vor allem durch den Bezug zu einem tektonischen Koordinatensystem (SANDER, 1948). Unter Zugrundelegung dieser Verformungsbilder lassen sich verformungshomogene Bereiche abgrenzen, die eine Übertragung der Gefügeverhältnisse bis auf Stollenniveau zulassen. Damit kann und konnte eine Wiedergabe der erfassbaren Daten und deren unterschiedliche Auswertung nach ihren technischen oder mechanischen Werten, versucht werden.

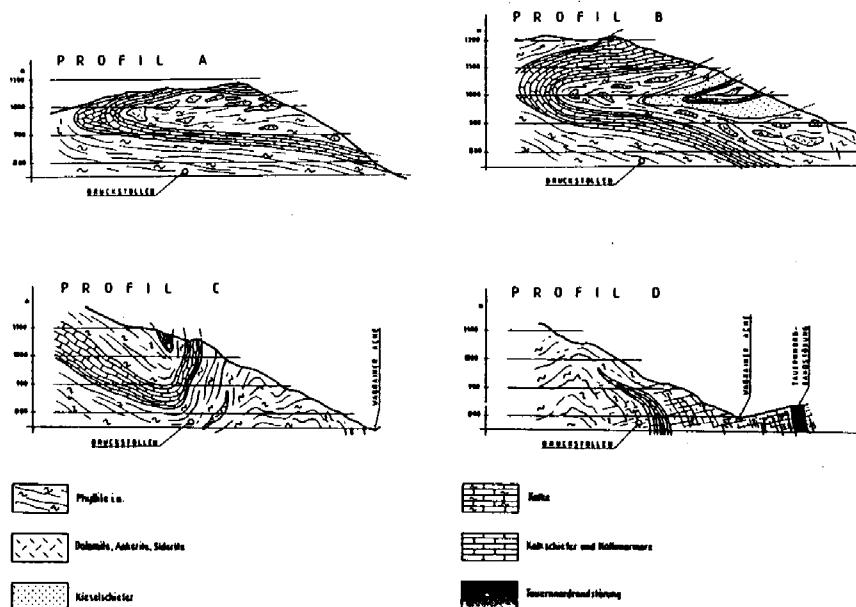


Abb. 14: Geologische Querprofile A, B, C und D zur Veranschaulichung des zunehmend veränderlichen Verformungsbildes in Abhängigkeit der Lage des Stollens zur Tauernnordrandstörung.

PHYLLITE i. a. – (Schwarzphyllite, Tonschiefer, Alaunschiefer, Serizitphyllite, Serizitquarzite sowie Diabasrelikte); DOLOMITE, ANKERITE, SIDERITE; KIESEL-SCHIEFER – In plattiger, fester und sehr harter Ausbildung; KALKE – Dickbankige bis massive, meist quarzdurchzogene, dunkelgrau gefärbte Kalklagen (Crinoidenkalke) z. T. eisenhaltig und in Wechsellagerung mit Schiefern; KALKSCHIEFER UND KALK-MARMORE – Gebankte, hell-mittelgrau, teilweise intensiv glimmerführende Karbonatgesteine, stets mit zwischengeschalteten m-dicken, stark schiefrigen Lagen.

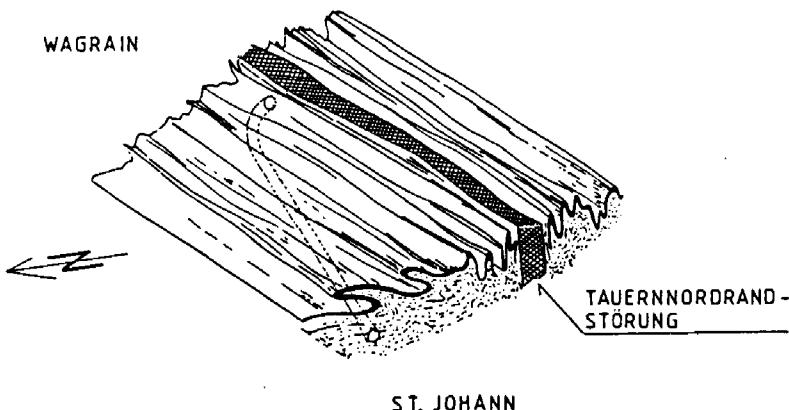


Abb. 15: Schematisiertes Blockdiagramm mit der Lage des Druckstollens in bezug zur Tauernnordrandstörung.

2.3. Beispiele von Gebirgskörpern, deren jetziger Verformungszustand entscheidend von jungen Verformungen wie Entspannungen und daraus resultierenden Lockerrungen gekennzeichnet sind

Zur dritten Gruppe, zu den Verformungen, die zu den heutigen Geländeformen geführt haben, zählen im wesentlichen jene tiefgreifenden Verformungen des Felskörpers, die unter dem Begriff der „Hangtektonik“ zusammengefaßt werden.

Diese Verformungen fanden nach Anlegung und Zerbrechung des Felskörpers zu einem diskontinuierlichen Kluftkörperverband statt. Die Bedeutung dieser geologisch jüngsten Verformungen und deren Einfluß in technischer Hinsicht soll an zwei Beispielen aus dem Kraftwerkebau aufgezeigt werden.

Bei beiden Beispielen handelte es sich um tiefgehende Hanglockerungen und den daraus resultierenden, geologisch zu berücksichtigenden, Problemen für die Situierung von Absperrbauwerken – einer 133 m hohen, doppelt gekrümmten Bogenstaumauer beim Wasserkraftwerk in Jiroft/Persien und der 186 m hohen Bogenstaumauer Zillergründl in Tirol.

Bei der Sperre Jiroft: bestand der geologische Einsatz darin, mit Hilfe einer neuen geologischen Beschreibung und Beratung der Unternehmensgruppe eine bessere Anpassung an die unerwartet vorgefundenen geologisch-geotechnischen Gegebenheiten zu ermöglichen. Dies war deshalb notwendig geworden, da die während der Bauaufschließung und nach Beginn der ersten Sperrenauhubarbeiten auftretenden geologischen Verhältnisse im Vergleich mit den geologisch-technischen Grundlagen des Angebotes, deutlich abwichen. Die Sperrenstelle liegt in einer zirka 150–200 m Schluchtstrecke, die im wesentlichen aus Kalken aufgebaut wird. Diese enge Durchbruchsstrecke konnte als ideale morphologische Voraussetzung für die Errichtung des Absperrbauwerkes angesehen werden.

Nach der geologischen Beschreibung des Projektanten – die Voruntersuchungen basierten auf zahlreichen Geländeaufnahmen, Bohrungen und Erkundungsstollen im Nahbereich der Sperreneinbindungsstelle – war zu erwarten, daß die gesamte Sperre in diesem mehr oder weniger einheitlich, massig ausgebildeten Riffkalk eingebunden werden kann. Im Hinblick auf das Großgefüge im Sperreneinbindusbereich und seiner näheren Umgebung wurde auf eine Großkluft, eine spitzwinkelig zur Schlucht verlaufende, offene Steilkluft an der linken Flanke – aufmerksam gemacht. Diese 20–30 cm offene Kluft war mit Schliffsand und Gesteinsbrocken verfüllt und wurde für so bedeutend erachtet, daß ein auf sie abgestimmter Sanierungsvorschlag bereits im Projekt enthalten war.

Mit fortschreitender Erschließung der Baustelle und damit Aufschlußtätigkeit wurde jedoch immer mehr zur Gewißheit, daß die aus den geologisch-geotechnischen Voruntersuchungen gezogenen Schlüsse nur bedingt qualitativ richtig waren, jedoch große, quantitative Abweichungen erkennbar wurden. Dies betraf vor allem die sehr unterschiedliche qualitative Einschätzung der Kalk- und Mergelgesteine sowie der strukturellen Gefügegegebenheiten. So wird der massive Riffkalk von meterdicken, brekziösen Mergelbänken durchsetzt, die entsprechend der örtlichen Schichtlagerung flach schluchtauswärts fallen. Durch die Kombination mit zahlreichen dezimeter- bis meterweit geöffneten oder sekundär verfüllten, schluchtparallelen Großklüften bestand eine 20 bis 30 m tiefgehende Gefügelockerung. Ein Umstand, der nicht nur bedeutende Auswirkungen in bezug auf die sichere Aufnahme der Kämpferkräfte hat, sondern auch für die Fragen der Aushubsicherung wesentlich erschien. Angesichts dieser Ge-



Abb. 16:
Sperre Jiroft – Detailaufnahme einer schluchtparallelen, schluffig bis steinig verfüllten Großklüft.

gebenheiten mußte man bald zur Überzeugung kommen, daß der tatsächliche Sperrenauhub über den dem Projekt beigegebenen und vorgesehenen Plan beachtlich hinausgehen werde. Darüber hinaus war auch mit einem enormen Mehraufwand an Felssicherungsmaßnahmen zu rechnen.

Die geologische Beratung bestand nun darin, unter diesen schwierigen geologischen Gegebenheiten grundsätzlich eine technisch befriedigende Lösung zwischen projektmäßiger Aushubgestaltung und vorgefundener, strukturbedingter Bruchformen der Gesteine zu finden. So mußte laufend beurteilt werden, ob man bestimmte Ausbruchssituationen noch mit künstlichen Felssicherungsmaß-

nahmen beherrschen könne oder die kritischen Felsbereiche abtragen müsse.

Insbesondere lufseitig der Sperrenaufstandsfläche waren unterschiedliche Strukturbereiche erkennbar. Abschnitte mit blockartiger Zerlegung nach schluchtparallelen, steilen Großklüften und flach auswärtsfallenden Schichtklüften wechselten mit Bereichen, die direkt in den Hauptstörungszonen lagen. In den äußeren Wandbereichen kam es zu derartigen Lockerungen nach Klufttreppen, daß die übersteilen Felspakete bereits deutliche Zeichen des Zergleitens zeigten. In solchen Fällen blieb nichts anderes übrig als großräumig abzuräumen. Je tiefere Niveaus in den Sperrenauhub einzubeziehen waren, umso häufiger trat man auf neue Steilklüfte, die spitzwinkelig oder angenehrt parallel zur Schluchtachse verliefen. Um ein Heraingleiten der lockeren Großschollen auf schichtparallelen Mergelbändern hintanzuhalten, mußten schon tieferreichende Felssicherungsmaßnahmen durchgeführt werden.

Die geologisch bedingten Schwierigkeiten nahmen in der Folge allmählich ein Maß an, daß der Projektant sich gezwungen sah, die aus den geologisch-strukturellen Aufnahmen resultierenden Erkenntnisse und Empfehlungen aufzunehmen und zur Klärung der weiteren Vorgangsweise einen zusätzlichen Erkundungsstollen herzustellen. Der Erkundungsstollen bestätigte deutlich das weite Durchstreichen der offenen Großklüfte und damit die Notwendigkeit, diese auch in tieferen Lagen sowohl von der Sperrenstatik als auch in bezug auf die Aushubsicherung voll berücksichtigen zu müssen. Damit zeichnete sich aber ab, daß der Aushub auf Bereiche ausgedehnt werden mußte, die mit dem Kabelkran nicht mehr erreichbar waren, sowie bestehende Baueinrichtungen wie Kübelpodest und Betonkai diesem Mehrausbruch zum Opfer fallen mußten (DEMMER, HORNINGER & NOWY, 1979).

Rückschauend mußte man zur Erkenntnis kommen, daß sich solche, aus den ungünstigen Gesteins- und Gefügestrukturen erwachsenen, gewaltigen Bauschwierigkei-



Abb. 17:
Sperre Jiroft – Ansicht der linken, luftseitigen Sperreneinbindungsflanke.



Abb. 18:
Sperre Jiroft – Ansicht der rechten, luftseitigen Sperreneinbindungsflanke.

ten durch rechtzeitige Berücksichtigung bereits im Projektierungsstadium, zumindest hätten mildern lassen.

Das zweite Beispiel, wo aufgrund spezifischer Strukturbedingungen Verhältnisse angetroffen wurden, die den Sperrenentwurf ebenfalls entscheidend beeinflußten, ist die Sperre Zillergründl in Tirol. Dieses hochalpine Speicherkraftwerk liegt im westlichen Teil des Zentralgneiskomplexes der Hohen Tauern, einer geologisch verhältnismäßig jungen Aufwölbung mit komplizierten Internstrukturen. Der Gesteinsinhalt

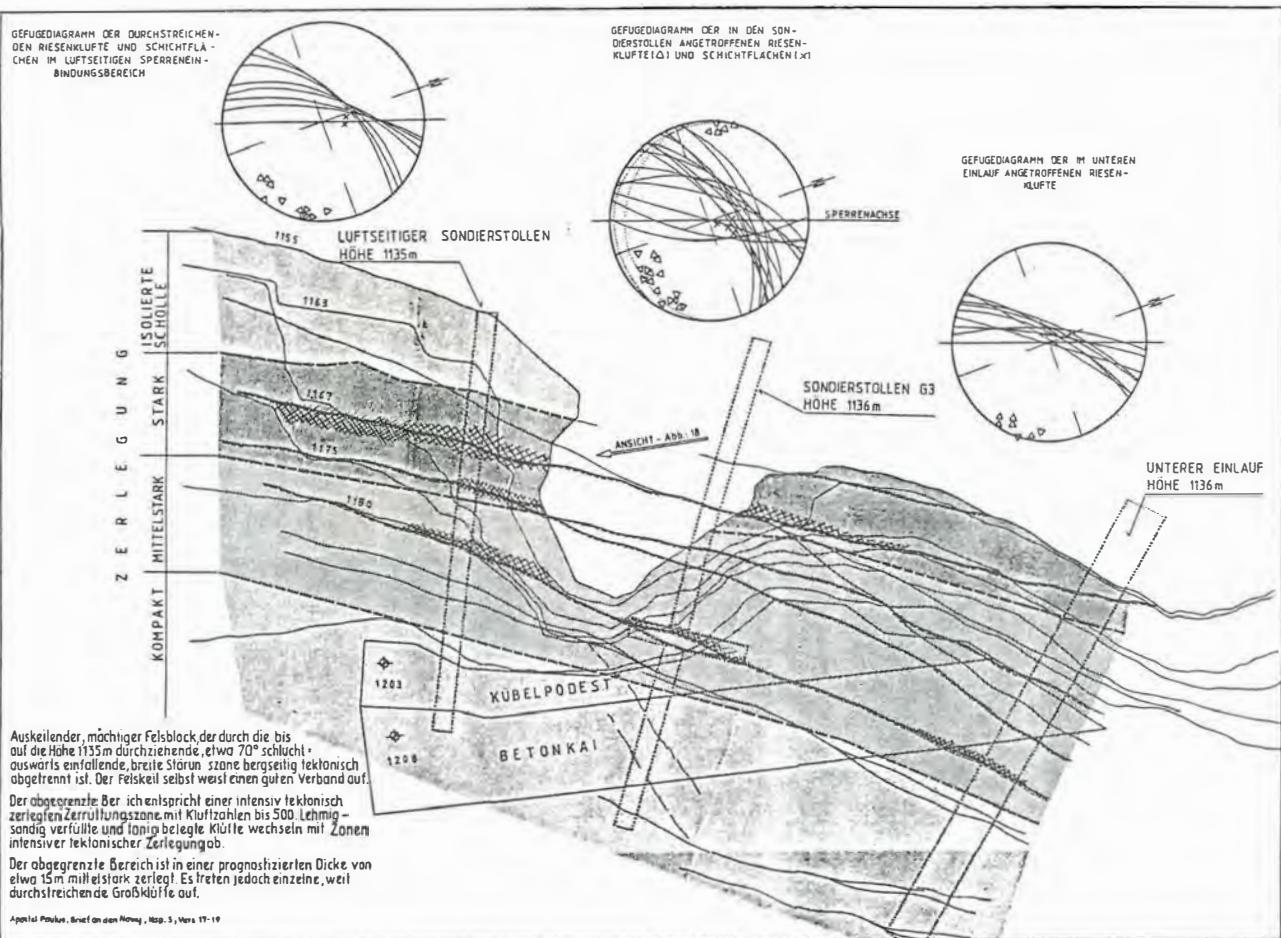


Abb. 19: Sperre Jiroft – Gefügesituation an der linken Einbindungsfläche.

des Zentralgneiskomplexes wird im wesentlichen von Graniten, Gneisen, Zweiglimmergneisen und zwischengeschalteten Biotitschieferlagen bestimmt.

Entgegen den bisherigen Gründungserfahrungen, der ebenfalls in diesem Zentralgneiskomplex liegenden Sperren Schlegeis und Kölnbrein, wurden bei der Sperre Zillergrndl Struktur- und Gefügeverhältnisse angetroffen, die für die Festlegung der Aushubtiefe bestimmend waren. Eingehende Gefügestudien, insbesondere im Zuge der intensivierten geologischen Untersuchungen während der eigentlichen Projektierungsphase, konnten in den Sperreneinbindungsflanken eine tiefgehende Hanglockerung feststellen. Diese Gefügelockerung, die speziell die rechte Sperrenflanke betraf, wurde primär durch die ungünstige Raumstellung der tektonisch angelegten Diskontinuitätsflächen verursacht und führte schließlich zu einer deutlich über das übliche Ausmaß gehende Sperreneinbindetiefe.

Bereits nach Freilegung der Felsoberfläche im Bereich der vorgesehenen rechten Sperreneinbindungsflanke zeigte sich ein stark morphologisch, treppenförmig ausgebildetes Relief, welches auf die Kombination flacher, in Richtung Tal einfallender Großklüfte mit talparallelen, steilstehenden Trennflächen zurückzuführen war. Zusammen mit den Bohrergebnissen sowie Wasserabpreßversuchen, die einer Erkundung für die Injizierfähigkeit des Sperrenuntergrundes dienten, verstärkte sich der Verdacht, daß in der rechten Einbindungsflanke eine tiefreichende Auflockerung vorliegt. Im Zuge der genauen Strukturanalyse ergab sich eindeutig eine begünstigte Bewegungsmöglichkeit der Kluftkörper in Richtung der freien Oberfläche (NOWY, 1984).

Zur Absicherung, ob die laut Projekt vorgesehene Einbindetiefe der Sperre am rechten Hang tatsächlich zu gering sein könnte, wurden daher weitere geologische Erkundungen notwendig. Hierzu wurden in der rechten Einbindesflanke in verschiedenen Höhenniveaus drei Sondierstollen aufgefahren, um letztlich Auskunft über den

tatsächlichen Tiefgang der Lockerung zu bekommen. Die Gefügeanalyse ergab, daß im wesentlichen drei Hauptkluftgruppen vorlagen, und zwar



Abb. 20:

Sperre Zillergrndl – Ansicht der rechten Sperreneinbindungsflanke nach Abraumung des Felsüberlagerungsmaterials. Stark morphologisch und treppenförmig ausgebildetes Felsrelief, welches auf Kombination der flach in Richtung Tal einfallenden Großklüfte mit den talparallelen Trennflächen zurückzuführen ist.



Abb. 21: Sperre Zillergründl – Flach talwärts in Richtung Luftseite ausfallende, sandig bis schluffig verfüllte Kluft am wasserseitigen Uml auf Stollenstation 5 m des Sondierstollens.

- steilstehende, im wesentlichen schieferungsparallele Klüfte und Scherzonen, die den Gebirgsverband scheibenförmig zerlegen. Diese Trennflächen können sandig bis schluffig verfüllt sein und reichen bis in eine Tiefe von 40–50 m von der Oberfläche.
- flach gegen die Luftseite einfallende Großklüfte, welche im oberflächennahen Bereich Öffnungsweiten bis 5 cm und Schluffsandverfüllungen zeigten. In größerer Tiefe liegen diese Klüfte in geschlossener Form und nur mehr in kurzer Erstreckung vor. Aufgrund der Stollenaufschlüsse und zusätzlicher Erkundungsbohrungen konnte nachgewiesen werden, daß die offenen Trennfugen bis in eine Tiefe von zirka 35–40 m, horizontal gemessen, reichten.
- steilstehende, meist quarzverheilte Trennflächen, die angenähert in der Falllinie des Hanges streichen und die Kluftkörper in bezug zur Sperre von der Wasserseite trennen.

Die gefügeanalytischen Untersuchungen erbrachten eindeutig den Nachweis, daß die tiefgehende Hanglockerung durch die Kombination dieser drei Kluftgruppen verursacht wurde. Da die parallel zu den geologischen Erkundungsarbeiten laufenden statischen Untersuchungen von der Voraussetzung ausgingen, daß die von der Sperre in den Untergrund eingeleiteten Kräfte primär über die flachen, in Richtung Luftseite einfallenden Trennflächen abgeleitet werden, kam diesen Klüften die größte Bedeutung für die sichere Einbindung der Sperre in den Untergrund zu. Aufgrund der ermittelten felsmechanischen Kennwerte an diesen maßgebenden Trennflächen (Direktscherversuche, in-situ-Scherversuch) und ihren Beziehungen zu den von der Sperre in den Untergrund einleitenden Kräften ergab sich daher die Forderung, daß die Gründungssohle zumindest in eine Tiefe verlegt werden mußte, die unterhalb der flach, in Richtung Luftseite einfallenden, verfüllten Trennflächen lag. Erst damit konnte die Standsicherheit des rechten Sperrenwiderlagers gewährleistet werden (WIDMANN, 1983; NOWY, 1984).

Als auslösendes Moment für diese tiefgreifende, asymmetrische Gefügelockerung muß der beim Rückzug der Eismassen aufgetretene Entspannungsvorgang angesehen werden. Die dadurch ausgelöste Verlagerung der einzelnen Kluftkörper zur freien Oberfläche hin, konnte am orographisch linken Hang durch die günstigere Raumlage

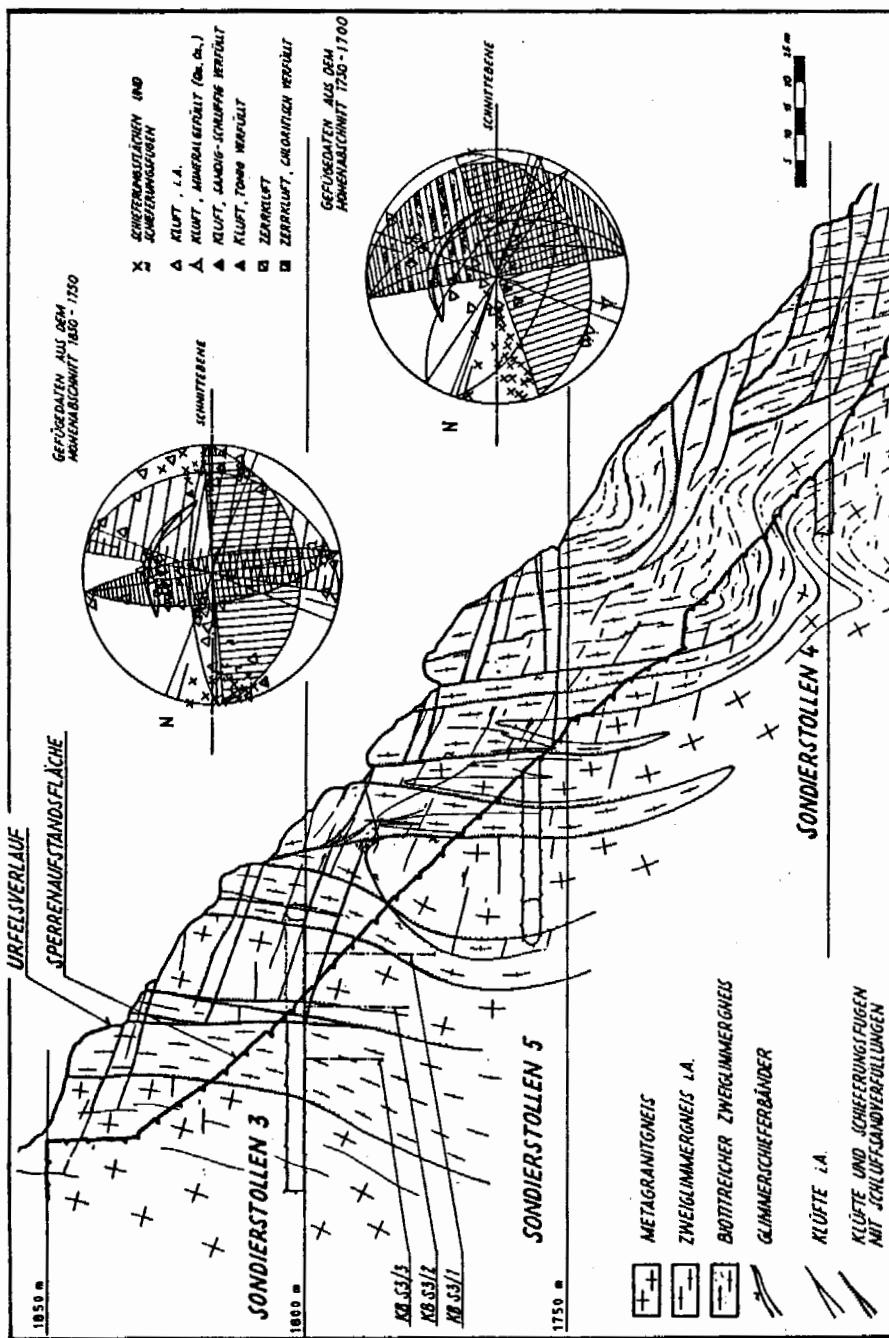


Abb. 22: Sperrte Zillergründl – Detailängenschnitt im luftseitigen Abschnitt der rechten Sperrenflanke Höhe 1850 m bis 1700 m aus: NOWY, 1984).

des Gefüges in bezug zur Talflanke weitgehend hintangehalten werden. Dagegen lagen am orographisch rechten Hang ideale Ausgangsbedingungen für die Lockerung vor. Die räumliche Orientierung und örtliche Lage der maßgeblichen Diskontinuitätsflächen war für die Reaktion einer ungehinderten Entspannung entscheidend und ließ damit eine Bewegungsmöglichkeit entlang der einzelnen vorgegebenen Kluftbahnen in den „freien Raum“ zu.

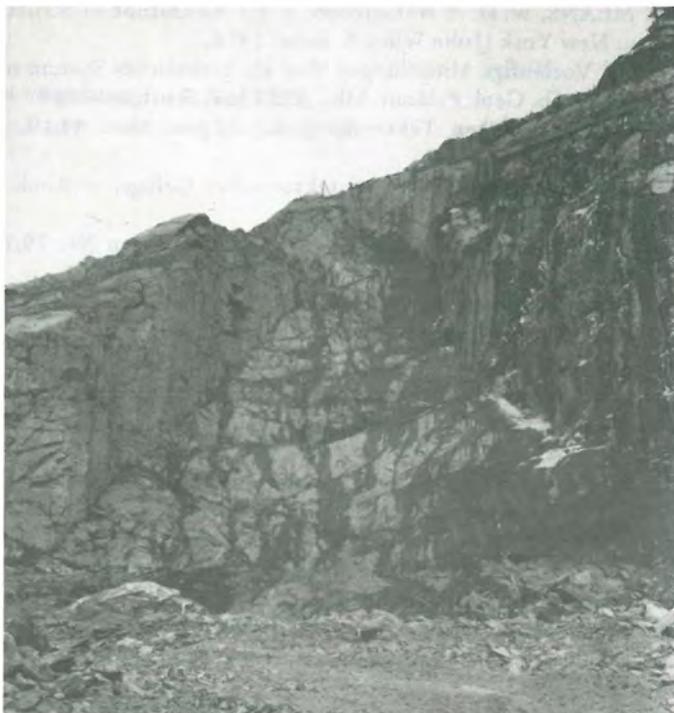


Abb. 23: Sperre Zillergründl – Tiefgehende Sperreneinbindung an der rechten Flanke.

3. Literaturverzeichnis sowie weitere empfehlenswerte Arbeiten

- CLAR, E.: Gebirgsbau und Geomechanik. – Geol. u. Bauwesen, 25(2–3), 186–190, Wien 1960.
- Gefüge und Verhalten von Felskörpern in geologischer Sicht. – Geol. u. Bauwesen, 28/1, 4–15, Wien 1963.
 - Über den Gegensatz von Gestein und Fels. – Mitt. Inst. f. Grundbau u. Bodenmechanik TH Wien, H. 6, 41–53, Wien 1965.
- DEMMER, W., HORNINGER, G. & NOWY, W.: Baugeologie beim Sperrenaushub –

- Ergänzende Erkenntnisse. — PORR-Nachrichten Nr. 79/80, 53–61, Wien 1979.
- NOWY, W.: Schartnerkogeltunnel — Baugeologie. — PORR-Nachrichten Nr. 77/78, 31–37, Wien 1979.
 - EISENMENGER, O.: Schartnerkogeltunnel — Baudurchführung. — PORR-Nachrichten Nr. 77/78, 37–41, Wien 1979.
 - FAIRHURST, C.: The Application of Mechanics to Rock Engineering. — Proc. Symp. on Exploration for Rock Engineering, 1–22, Johannesburg, 1976.
 - HOBBS, B. E., MEANS, W. D. & WILLIAMS, P. F.: An Outline of Structural Geology. — 571 pp., New York (John Wiley & Sons) 1976.
 - HOEPPENER, R.: Vorläufige Mitteilungen über ein genetisches System tektonischer Gefügetypen. — N. Jb. Geol. Paläont. Mh., 353–367, Stuttgart 1959.
 - Probleme der physikalischen Tektonik. — Z. dt. geol. Ges., 114/I. Teil, 206–227, Hannover 1963.
 - Probleme der mechanischen Deutung tektonischer Gefüge. — Rock Mechanics, Suppl. 4, 11–20, Wien – New York 1975.
 - LAUFFER, H.: Bogenstaumauer Jiroft. — PORR-Nachrichten Nr. 79/80, 50–53, Wien 1979.
 - MALINA, H.: Berechnung von Spannungsumlagerung in Fels und Boden mit Hilfe der Elementenmethode. — Veröff. Inst. f. Boden- u. Felsmech., Univ. Karlsruhe, H. 40, Karlsruhe 1969.
 - MOSTLER, H.: Einige Bemerkungen zur Salzach-Längstalstörung und der sie begleitenden Gesteine. — Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud. Österr., 14, 185–196, Wien 1964.
 - MÜLLER, L.: Brechen und Fließen in der geologischen und geomechanischen Terminologie. — Geol. u. Bauwesen, 25, Wien 1960.
 - Kriterien zur Erkennung der Bruchgefahr geklüfteter Medien. — Ein Versuch. — Rock Mechanics, Suppl. 2, 71–92, Wien – New York 1973.
 - Aktuelle Fragen auf dem Grenzbereich zwischen Ingenieurgeologie und Felsmechanik. — Rock Mechanics, Suppl. 10, 1–8, Wien – New York 1980.
 - Geomechanik-Felsbaumechanik-Felsbau. — Rock Mechanics, Suppl. 12, 1–18, Wien – New York 1982.
 - NOWY, W. & LEIN, R.: Zur Geologie des Bosruck-Autobahntunnels (Pyhrnautobahn, Österreich). — Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud. Österr., 30/31, 45–94, Wien 1984.
 - Sperre Zillergründl — Beeinflussung des Sperrenaushubes durch tiefgehende Hangauflockerung. — Felsbau 2/4, 200–207, Essen 1984.
 - PIRCHER, W.: Erfahrungen im Fräsvortrieb bei der Kraftwerksgruppe Sellrain–Silz. — Rock Mechanics, Suppl. 10, 127–154, Wien – New York 1980.
 - RIENÖSSL, K.: Normierungen in Bauverträgen für den maschinellen Tunnelvortrieb. — Rock Mechanics, Suppl. 10, 103–112, Wien – New York 1980.
 - SANDER, B.: Einführung in die Gefügekunde der geologischen Körper. I. Allgemeine Gefügekunde und Arbeiten im Bereich Handstück bis Profil. — 215 S. (Springer), Wien 1948.
 - Einführung in die Gefügekunde der geologischen Körper. II. Die Korngefüge. — 409 S. (Springer), Wien 1950.
 - SCHMIDT, W.: Tektonik und Verformungslehre. — 206 S. (Borntraeger), Berlin 1932.

- TOLLMANN, A.: Geologie von Österreich. – Bd. I, 766 S. (Deuticke) Wien 1977.
- TURNER, F. J. & WEISS, L. E.: Structural analysis of metamorphic tectonites. – 454 pp. (McGraw Hill), New York 1963.
- WEISS, L. E.: The Minor Structures of Deformed Rocks. A Photographic Atlas. – 431 S. (Springer), Berlin 1972.
- WIDMANN, R.: Die Gründungsprobleme bei der Bogenstaumauer Zillergründl. – Felsbau, 1(3–4), 99–106, Essen 1983.

Manuskript eingelangt am 5. Mai 1986
angenommen am 14. Juni 1986