

Geol.Paläont.Mitt.Innsbruck	Bd.10	5	S.173-215	Innsbruck, Okt.1980
-----------------------------	-------	---	-----------	---------------------

IV. Bodensee-Tagung für Ingenieurgeologie Bregenz
30./31. Oktober 1980

Exkursionsführer und Kurzfassungen der Vorträge

Inhalt

Vorwort 174

K. Czurda: Abriß der Geologie Vorarlbergs 175

H. Lange, H. Pfeifer und H. Rest: Das Gebirgsverhalten
um die Maschinenkaverne des Kavernenkraftwerkes Wehr 187

J.P. Jenni: Zur Vorhersage von Vortriebsleistungen von
Tunnelfräsmaschinen 188

W. Ryf: Geologische Probleme bei Kraftwerk-Vorstudien
in Guatemala 192

H.Hönig: Refraktionsseismik und Klüftigkeitskoeffizient ... 197

H. Loacker: Geologische Vorarbeiten für den Bau des 21 km
langen Walgaustollens der Vorarlberger Illwerke AG 200

E. Tentschert: Kraftwerksgruppe Sellrain-Silz:
Kluftwasserhaushalt der Druckschächte 204

E.H. Weiss, H.W. Müller, G. Riedmüller und B. Schwaighofer:
Zum Problem quellfähiger Gesteine im Tunnelbau 207

H. Litscher: Geologische und geotechnische Erkundungen im
Untergrund hochalpiner Sperrstellen 211

Liste der Subventionsgeber und Spender 215

V O R W O R T

Die Ingenieurgeologen der Bodenseestaaten sind 1975 in Konstanz zum ersten Male zusammengetreten und behandelten dort ingenieur-geologische Probleme beim Untertagebau im Sulfatgestein. Im Jahre 1976 war das Tagungsthema in Basel auf die geologischen, felsmechanischen und geotechnischen Prognosen im Untertagebau ausgerichtet. Die letzte Tagung fand 1978 in Singen statt, wo die Anwendung geophysikalischer Methoden in der Baugrunderkundung erörtert wurden.

Die vierte internationale Bodenseetagung findet nun zum ersten Male auf österreichischem Boden in Bregenz statt und behandelt die Ingenieurgeologie im Kraftwerksbau.

Der Bodensee als markantes glaziales Relikt stellt die Drehscheibe und die Verbindung des gemeinsamen Voralpengebietes dar - Bregenz als Landeshauptstadt am Ostende ist der westliche Pfeiler Österreichs.

Die Tagungsteilnehmer aller drei Länder befassen sich mit ingenieur-geologischen und geotechnischen Problemen und es erscheint daher sinnvoll, die Tagung in diesem Jahr im Lande Vorarlberg durchzuführen, wo der 14 km lange Arlbergtunnel bereits fertiggestellt ist, der verkehrstechnisch wichtige Pfändertunnel noch im Dezember dieses Jahres dem Verkehr übergeben wird und die Rheintalautobahn mit schwierigen Gründungsproblemen zu kämpfen hat. Der Kraftwerksbau von Langenegg ist beendet, der Ausbau der Kraftwerksgruppe Walgau ist vor geraumer Zeit angelaufen. Die geotechnischen Arbeiten unserer Kollegen im Lande Tirol und Vorarlberg sind sehr vielgestaltig und beinhalten auch zahlreiche Bauvorhaben mit beträchtlichen Gründungsschwierigkeiten, von denen nur das große Festspielhaus in Bregenz erwähnt werden soll.

Zur besseren Orientierung und damit in den betreffenden Diskussionen gezielte Fragen gestellt werden können, werden die Vorträge in Kurzfassungen in diesem Sonderheft vorgelegt. Für die Exkursionsteilnehmer ist ein eigener Führer angeschlossen.

Die Landesgruppe Tirol-Vorarlberg und die Arbeitsgruppe Ingenieurgeologie der Österreichischen Geologischen Gesellschaft schätzen sich glücklich, die Kollegen aus der Bundesrepublik Deutschland und der Schweiz willkommen zu heißen! Wir wünschen ihnen und unseren österreichischen Kollegen einen schönen Aufenthalt, einen intensiven Gedankenaustausch und eine Bereicherung ihrer praktischen Kenntnisse durch die Exkursion zu den Kraftwerksanlagen der Vorarlberger Illwerke AG

Glück auf!

Univ.-Prof. Dr. Ernst Weiss
Vorsitzender der Arbeitsgruppe
Ingenieurgeologie der ÖGG

Abriß der Geologie Vorarlbergs

von K. Czurda⁺⁾

Inhaltsverzeichnis

1. Exkursionsroute
 - 1.1. Das Rheintal
 - 1.2. Der Walgau
2. Großgeologische Einheiten
 - 2.1. Molassezone
 - 2.2. Helvetikum
 - 2.3. Vorarlberger Flysch
 - 2.4. Nördliche Kalkalpen
 - 2.5. Silvretta-Altkristallin

Die Exkursion zu diversen Kraftwerksanlagen der Vorarlberger Illwerke AG im Montafon, die aus Anlaß der vierten Bodensee-tagung für Ingenieurgeologie von Bregenz aus durchgeführt wird, quert fast alle geologischen Großeinheiten der Voralpen und des westlichen Endes des Ostalpenkörpers. Sie führt aus der Molasse heraus durch das Helvetikum, den Flysch und die Nördlichen Kalkalpen, und endet im Silvretta-Kristallin des inneren Montafons, wo sich die zu besuchenden Kraftwerksanlagen befinden. Eine kurze überblicksmäßige Charakterisierung und die Erläuterung lokaler Besonderheiten sind Ziel dieses Aufsatzes. Er soll für das Publikum der Tagung: Geologen und Bauingenieure, in gleicher Weise verständlich sein.

1. Exkursionsroute

Bregenz-Dornbirn-Feldkirch = Rheintal
Feldkirch-Bludenz = Walgau
Bludenz-Partenen = Montafon

Die Talschaften, denen der Exkursionsweg von Bregenz aus folgt, queren die geologischen Bau- und Faziesseinheiten in der erdschichtlich umgekehrten Reihenfolge. Das zuletzt und am weitesten südlich erreichte Silvretta-Altkristallin ist älter als alle anderen Stockwerke, die vorher gequert werden, und die weiter im Norden liegen. Die unmittelbar anschließenden Kalkalpen sind jünger, d.h. sie sind Bildungen der alpidischen Geosynklinalzeit, die im Permoskyth, also an der Wende Paläozoikum/Mesozoikum beginnt, und die ihren tektonischen Bau im Tertiär mit den letzten Orogenphasen beenden. Es schließt sich der noch jüngere Flysch an, dessen Schichtglieder Unterkreide- bis Alttertiäralter haben. Das das Rheintal beherrschende Helvetikum beginnt mit seiner Sedimentationsgeschichte schon

<sup>+) Anschrift des Verfassers: Univ.-Doz. DDR. Kurt Czurda,
Institut für Geologie und Paläontologie, Universitätsstr. 4,
A-6020 Innsbruck</sup>

früher, d.h. im oberen Jura, und durchläuft seinen Ablagerungsabschnitt und die tektonische Formung zeitgleich mit dem Flysch bis ins Alttertiär. Zeitlich am jüngsten im Alpen- bzw. Voralpenbau ist die Molasse, gebildet in einem dem Kalkalpin, Helvetikum und Flysch parallelen Meerestrog, dem Alpenkörper am weitesten nördlich vorgelagert und nur teilweise noch von der Gebirgsbildung erfaßt.

Die Behandlung der einzelnen Einheiten folgt aber der Exkursionsroute und beginnt daher in Bregenz mit der Molasse und endet im Montafon mit dem Altkristallin.

1.1. Das Rheintal

Das Rheintal selbst geht in seiner ursprünglichen Anlage als alpine Quersenke auf die Zeit der alpinen Gebirgsbildung zurück. Großverwerfungen, gebündelte Verwerfungsscharen und Verbiegungen durchbrachen das dominierende SW-NE-Streichen des Alpenwalles. Achsendepressionen des helvetischen Gebirges, unterstützt von Bruchdeformationen, legten das Alpenrheintal an. Die quartären Vereisungen und Interglazialzeiten bewirkten ungeheure Wasser- und Schuttmassentransporte durch das Alpenrheintal in das Vorland von Oberschwaben und Hegau bzw. in die vor allem glazial eingetiefte Bodenseefurche. Vor allem die letzte Vereisung - Würm - räumte mit ihren vorstoßenden Eismassen das Rheintal aus, das dann durch den Rhein erneut aufgeschottert bzw. durch den postquartär erweiterten Bodensee = Rheintalsee mit Seesedimenten aufgefüllt wurde. Sicher reichte dieser See bis zur Felsschwelle des Semelenberg - Kummberg. Südlich davon breiteten sich kleinere lokale Seen aus, die Verbindung zu Walensee und Zürichsee als einzige große Seenbildung ist jedoch nicht nachzuweisen.

Eiszeitliche Bildungen wie z.B. Grund- oder Seitenmoränenablagerungen oder interglaziale Terrassensedimente sind im Rheintal nicht mehr zu finden. Nur im Raume Bregenz sind im Niveau Ölrain - Oberstadt - Weissenreute spätwürmzeitliche, randglaziale Terrassen erhalten geblieben.

1.2. Der Walgau

Auch die Talfurche der Ill, der Walgau, hat sich wesentlich während der letzten 15 Millionen Jahre, im Jungtertiär und Frühquartär, gestaltet. Ablagerungen aus dieser Zeit - ausgenommen das Bürser Konglomerat - sind nicht erhalten geblieben. Man kann annehmen, daß während der letzten Vereisung ein etwa 1500 m mächtiger Eispanzer das Walgaubecken unter sich begraben hatte. Mächtige Moränenmassen wurden während dieser Zeit abgelagert und teilweise von den Schmelzwässern wieder umgelagert. Als sogenannte Verbauungsschotter liegen sie heute in Talrandlagen. Auch im Walgau hatte sich postglazial ein See ausgebreitet und seine Sedimente dort hinterlassen. Rezente bis subrezente Illaufschotterungen füllen zusätzlich das Tal. Der Durchstich der Ill durch die Felsenau bei Feldkirch ist jung. Frühere Illentwässerungen führten über die Letze nach Tisis bzw. über Göfis nach Rankweil.

2. Großgeologische Einheiten

2.1. Molassezone

Entlang der Fahrtroute zwischen Bregenz und Dornbirn.

Der Pfänderstock, der die Bregenzer Bucht einrahmt, und die Berge des vorderen Bregenzer Waldes gehören der ungefalteten Vorlandmolasse an. Sie begleitet den Exkursionsweg rheintalaufwärts im Osten (linker Hand) und wird etwa in der Höhe von Bildstein, oberhalb Wolfurt, von der gefalteten subalpinen Molasse abgelöst. Sie reicht bis Dornbirn.

Die E-W orientierten Bergrücken der Molasse sind von Gesteinseinheiten aufgebaut, deren paläogeographische Geschichte vor etwa 30 Millionen Jahren, im Oligozän, begann. Zu dieser Zeit bestanden im südlichen Vorarlberg bereits Gebirge des eigentlichen Alpenkörpers. Die Alpen im Süden, aber auch Altkristallgebirge im Norden, wie z.B. Schwarzwald, Bayrischer Wald oder die Böhmisches Masse, haben in die dazwischen liegende Meeressenke abgetragene und verwitterte Lockermassen als Flußfracht eingeschüttet. Demgemäß bestehen die Gesteine der Molasseabfolge aus klastischen Sedimenten: Konglomerate, Sandsteine, Mergel und Schieferstone.

Den Pfänder und Gebhardsberg bauen Gesteine auf, die dem Miozän (Burdigal, Helvet und Torton) angehören. In diesen Zeitabschnitt, und zwar am Übergang vom Helvet ins Torton, fällt ein milieumäßiger Umschwung innerhalb des Meerestages: Durch Abschnürung von den Weltmeeren kommt es zur Aussüßung und die Zeit der sogenannten "oberen Meeresmolasse" mit den Schichtgliedern des südlichen Pfänderstockes (Gebhardsberg - Fluh): Basisnagelfluh, Glaukonitsandstein, Kanzelfelsnagelfluh und Gebhardsberg-Nagelfluh, endet. Ihr mariner Charakter ist fossilbelegt. Die Hauptmasse des Pfänders im engeren Sinne wird von den älteren Anteilen der "oberen Süßwassermolasse" eingenommen. Sie gehört dem Torton an und wird bis zu 700 m mächtig. Sandsteine und Konglomerate (Nagelfluh) überwiegen.

Die älteren Anteile der Molasse, die im oberen Oligozän bis unteren Miozän (Lattorf, Rupel, Chatt, Aquitan) abgelagert wurden, finden sich in den Bergen zwischen Wolfurt und Dornbirn. Dieser Molasseanteil ist gefaltet, d.h. er wurde von den jüngeren alpidischen Gebirgsbildungsphasen stärker betroffen als die Molasse weiter südlich (Pfänder). Auch diese älteren Molassegesteine bilden einen paläogeographischen Umschwung von marin zu limnisch ab: Der Übergang "untere Meeresmolasse" zu "unterer Süßwassermolasse" vollzieht sich an der Zeitgrenze Rupel/Chatt. Die Bausteinschichten des oberen Rupel sind marin, die Weissachsichten des Chatt limnisch. Sie wurden, infolge ihrer Steilstellung, in großer Mächtigkeit anlässlich einer Erdölaufschlußbohrung nördlich Dornbirn (Endteufe 2920,6 m) im Rheintaluntergrund erbohrt.

2.2. Helvetikum

Entlang der Fahrtroute zwischen Dornbirn und Frastanz.

Beiderseits des Rheintales sind nun gut die Faltenstrukturen des Helvetikums zu sehen, wobei die Berge rechter Hand (Rhein-

Westufer): Säntis, Wildhauser Mulde und Churfirsten auf Schweizer Staatsgebiet liegen. Die Sedimentation der Kalke, Mergel und Sandsteine der reich gegliederten stratigraphischen Abfolge des Helvetikums erfolgte in einem Meerestrog, der seine Entwicklung zwischen dem Oxford (oberes Malm) und dem Mitteleozän (unteres Tertiär) durchmachte. Die paläogeographische Entwicklung nahm somit einen Zeitraum von etwa 100 Millionen Jahren ein, d.h. sie begann etwa vor 150 Millionen Jahren und endete vor etwa 50 Millionen Jahren.

Im wesentlichen handelt es sich bei den Gebirgen, die als östliche Fortsetzung des Säntis und der Churfirsten den Rheintalrand und die Berge des mittleren Bregenzer Waldes bilden, um Sattel- und Muldenstrukturen, die sich über das Rheintal weg parallelisieren lassen. Als wohl markanteste Struktur zieht die Wildhauser Mulde (zwischen Säntis und Churfirsten) mit nordöstlichem Achsenstreichen nach Vorarlberg herüber und setzt sich zwischen den Sätteln des Kuppenberges und dem breiten Antiklinorium des Hohen Freschen als Mulde von Fraxern - Bizau - Riezlern fort. Die Sattelstruktur des Hohen Freschen weist mit dem Malm-Aufbruch im Kanisfluh-Mittagsfluhgewölbe die ältesten helvetischen Schichtglieder in den Ostalpen auf. Die über das Rheintal hinweg streichenden Faltenachsen tauchen in Vorarlberg in südwestlicher Richtung unter die Talalluvionen ab und steigen auf der Schweizer Seite in gleicher Richtung wieder an. Diese Flexur wird noch durch Staffelbrüche betont, von denen das Churer Lineament am augenfälligsten ist. Die erwähnten Faltenstrukturen sind nun nicht autochthon eingewurzelt, sondern sind deckenförmig in ihre heutige Position verschoben worden. Das Vorarlberger Helvetikum ist die Fortsetzung der obersten helvetischen Decke der Schweiz, der Säntisdecke. Darüber liegt tektonisch noch das Ultrahelvetikum, die sog. Liebensteiner Decke. Sie war ursprünglich noch südlicher beheimatet als die Säntisdecke. Beim Ultrahelvetikum handelt es sich eher um eine Schuppenzone denn um eine geschlossene Decke; eingeschaltet zwischen Säntisdecke im Norden und Flysch im Süden (von Satteln in nordöstlicher Richtung das Laternser Tal querend, bis etwa südlich der Damülser Mittagsspitze) bzw. im Norden nahe der Grenze zur Molasse (zwischen Egg und Sibratsgfall).

Die Gesteine des Helvetikums, abgelagert zwischen oberem Jura und Alttertiär (siehe oben), gehören, trotz der relativ geringen Breite des Meerestrog, verschiedenen Fazieszonen an. Sie sind vor allem Ausdruck unterschiedlicher Meerestiefen. Ein nördlicher, mittlerer und südlicher Faziesbereich können unterschieden werden; noch weiter südlich schließt der Bildungsraum der ultrahelvetischen Gesteine an. Im Norden ist der Schichtstapel unvollständig, d.h. von Schichtlücken unterbrochen, die einzelnen Serien geringer mächtig und Riffbildungen sind gegenüber Tiefwasserbildungen vorherrschend. Mergelige Gesteine treten im Mittelhelvetikum mehr und mehr in den Vordergrund und herrschen im Süden schließlich vor.

Nicht nur die Steinbrüche, vor allem aber auch die Inselberge im Rheintal, geben guten Einblick in den Bau des Helvetikums. Den markantesten dieser Inselberge, den Kuppenberg bei Götzis, durchquert der Exkursionsweg (Autobahn A 14, Udelberg Durchstich).

Hier sind Drusbergmergel, Schrattenkalk und Gault-Grünsandstein des Götzner Gewölbes gut aufgeschlossen. Die Abzweigung der Straße von Feldkirch in den Walgau (Tal der Ill zwischen Feldkirch und Bludenz) hinein durchquert im Schattenburgtunnel und in der Felsenau (südl. Illschlucht) noch einmal helvetische Gesteine: Drusbergmergel, Schrattenkalk und Gamerschichten. Ab Frastanz begleiten den Exkursionsweg beiderseits der Ill Flyschberge.

2.3. Vorarlberger Flysch

Entlang der Fahrtroute zwischen Frastanz und Nüziders (westlich Bludenz).

Der rhenodanubische Flysch begleitet als schmaler Streifen den Nordrand der Ostalpen. Seine Hauptverbreitung in Vorarlberg liegt zwischen den Nördlichen Kalkalpen und dem Helvetikum, ein Streifen, den der Exkursionsweg in seiner ganzen Breite quert. Das Große Walsertal schneidet in ihn ein. Aber auch zwischen Helvetikum und Molasse bzw. als Deckschollen am Hoch-Älpele und der Hohen Kugel sind Flyschgesteine vorhanden. Auch der Flysch ist tektonisch von seiner Unterlage fortbewegt worden und liegt in einzelnen größeren Einheiten - Decken - weiter im Norden auf dem Helvetikum auf.

Unter rhenodanubischem Flysch versteht man eine Sedimentfolge, die als Abtragsprodukt des werdenden Alpenkörpers, also während der Orogenese, in einen langen, schmalen, aber tiefen Meerestrog nördlich der Ostalpenkette geschüttet worden ist. Gradierte Schichtung als Ausfällung aus Trübströmen, Strömungsmarken und Gleitspuren an der Unterseite der Gesteinsbänke, Armut an Fossilien mit Ausnahme von Foraminiferen (Globotruncanen, diverse Sandschaler) in den Mergeln sowie Kriech- und Weidespuren (z. B. Helminthoiden und Chondriten) sind für die Sandstein-Mergelfolgen des Flysch typisch. Das Material wurde aus den Alpen in den nördlich vorgelagerten schmalen Trog geschüttet und vor allem trogparallel bis in seinen Ablagerungsraum verfrachtet. Die Flyschsedimentation dauerte von der höheren Unterkreide bis ins Alttertiär.

Sanfte, bewaldete Bergformen bilden die Talkulisse beiderseitig des Walgaus - typische Flyschberge, die im Süden von den Gipfeln des Rätikon, der den Kalkalpen angehört, überragt werden. Gehört der Flysch im Norden (um Sibratsgfall) der sogenannten Feuerstätter Decke an, so ist der den Walgau querende Streifen der südlichen Flyschzone, der Hauptflyschdecke zuzuschreiben.

Der Aufbau des Gebirges im Walgau besteht aus einer typischen Wechsellagerung von härteren Sandsteinen und Kalken mit weichen Mergeln bzw. Schiefertönen. Die einzelnen Gesteinszüge schneiden die Talachse ungefähr unter einem Winkel von 45° . Die Reiselberger Sandsteine sind wohl das härteste Schichtglied. Sie queren das Tal östlich Satteins und bilden wahrscheinlich auch im Untergrund eine Felsschwelle. Neben diesen Sandsteinen bauen die Piesenkopfschichten die Talkulisse auf, vor allem Kalke, die über die Saminaschlucht von Liechtenstein in den Walgau herüberziehen. Die Mergel der Planknerbrücken-Serie bilden auf der Walgausüdseite die Hänge der Rätikonbasis

und im Norden die Bergrücken hinter Gais, Bludesch, Thüringen sowie den Hochgerach und das vordere Große Walsertal. Das Vorhandensein von Kohlenwasserstoffen in diesen Gesteinen beweist eine Erdgasexplosion, die sich beim Vortrieb des Lutzkraftwerkstollens der VKW in der Planknerbrücken-Serie ereignete.

2.4. Nördliche Kalkalpen

Entlang der Exkursionsroute zwischen Bludenz und Schruns.

Vor allem sind es die Gesteine der oberostalpinen Trias und des Jura, die schon ab der Einmündung der Lutz in die Ill die beiderseitige Talbegrenzung - zunächst noch Walgau, dann äußeres Montafon - bilden. Bei Nüziders am sogenannten Hangenden Stein (im Norden = linker Hand in Fahrtrichtung Bludenz) ragt der westlichste Ausläufer der Klostertaler Alpen mit einem Hauptdolomit-Sporn weit ins Tal vor. Im Flußdreieck Alfenz/Ill bei Lorüns zieht von den Zalum Mädern im Süden, nach Osten umbiegend, eine Jungschichten-Mulde herab, die von Kössener Schichten, Oberrhätkalk, rotem Liaskalk und Kreideschiefern aufgebaut wird. Sie wird in einem Steinbruch für die Zementindustrie abgebaut. Die Lokalität liegt unmittelbar am Eingang zum Montafon, das zunächst beidseitig vom Hauptfelsbildner der westlichen Nördlichen Kalkalpen, dem Hauptdolomit, beherrscht wird. Linker Hand in Fahrtrichtung Schruns (= im Norden) der Davenna-Stock und im Süden die Vandanser Steinwand. Es schließt sich ein E-W streichender Zug von älteren Triasgesteinen in ihrer normal stratigraphischen Abfolge an: Raibler Schichten, Arlbergkalk, Partnachmergel und Muschelkalk. Ein Buntsandsteinstreifen bei Vandans - Permoskyth - trennt schließlich das Kalkalpin vom Silvretta-Altkristallin.

Die erwähnten Tias- und Juragesteine, die dem Rätikon bzw. den Klostertaler Alpen angehören, widerspiegeln die paläogeographischen Entwicklungstendenzen des Tethysmeeres: Allmähliche Eintiefung eines Meeresbeckens (Buntsandstein), voll marine Bildungen mit Riffen im Muschelkalk, marine Faziesdifferenzierungen in Becken- und Schwellenbereiche (Partnachmergel, Arlbergkalk), terrigen beeinflusste Phase im Karn (Raibler Schichten), extreme Flachmeersedimentation im Hauptdolomit, erneute Eintiefung und terrigene Einschüttung in den Kössener Schichten und mit den Schichtgliedern der Jura- und Kreidezeit durch die Faziesheteropie Zeugnis der beginnenden alpinen Orogenese durch Oszillationen des Meeresbodens.

Selbstverständlich sind auch die Kalkalpen als Decken nach Norden vorbewegt worden. Klostertaler Alpen und Rätikon sind der Lechtaldecke zuzuschreiben.

2.5. Silvretta-Altkristallin

An der Exkursionsroute von Vandans bis Partenen.

Das Silvrettakristallin ist eine polymetamorphe Schubmasse, die als Teil des Oberostalpins (tektonische Großeinheit, der unter anderem auch die Kalkalpen angehören) ebenfalls nach Norden verfrachtet wurde. Eine vielmalige Wechsellagerung von Schiefergneisen, Glimmerschiefern, Amphibolgneisen und Amphiboliten in Verbindung mit Orthogneiskörpern zeichnen diese

Kristallinmasse aus, die im übrigen in Gesteinsbestand, Metamorphosegrad und tektonischer Stellung der östlich benachbarten Ötztaler Masse gleich ist. Das metamorphe Gepräge haben die Gesteine der Silvrettamasse in sehr tiefen Zonen der Erdkruste erhalten. Die letzte gefügeprägende Metamorphose muß, wegen der stellenweisen Auflagerung von oberkarbonisch-permischen und mesozoischen Sedimenten, im Oberkarbon abgeschlossen worden sein. Diese Gesteinsumwandlung hat sich also in Zusammenhang mit der variszischen Gebirgsbildung vollzogen. In manchen Zonen beweisen radiometrische Altersbestimmungen, daß auch die alpidische Gebirgsbildung nicht spurlos am altkristallinen Fundament vorübergegangen ist. Die jüngsten Gesteine des Silvrettakristallins sind die Diabasgänge. Sie durchschlagen das Nebengestein meist diskordant und reichen nicht in die mesozoische Sedimentüberlagerung hinein. Sie sind von der variszischen Metamorphose nicht mehr erfaßt worden. Die Gesteine, die beiderseits der Straße von Schruns in Richtung Partenen anstehen, sind bis St. Gallenkirch als Hornblendeschiefer bzw. als schiefrige Biotitplagioklasgneise anzusprechen. Es sind Paragesteine, die durch hohen Biotitgehalt sehr dunkel erscheinen. Ab St. Gallenkirch bis Partenen sind es dann im wesentlichen Biotitglimmerschiefer, gelegentlich mit Biotit-PorphYROblasten und dickeren quarzitischen Bänken. Die Schieferung fällt mit den ursprünglichen Sedimentationsflächen zusammen. Amphibolite stehen in Fahrtrichtung Partenen rechter Hand (orographisch links) bei St. Gallenkirch, Gaschurn und Partenen an.

Eine Straßenabzweigung von St. Gallenkirch nach Süden führt in das Gargellental hin, wo südlich des Weilers Sarotla im Fenster von Gargellen die penninische Unterlage der oberostalpinen Silvrettamasse sichtbar wird. Der Fensterinhalt zeigt Arosadecke, Sulzfluhdecke und Falknisdecke. Diese Serien fallen gegen Osten hin ein. An der Ostseite gegenüber Gargellen erkennt man die mit etwa 12° E einfallende und NW-SE streichende Überschiebungsbasis der Silvrettadecke.

Literaturauswahl

- BERTLE, H. (1972): Zur Geologie des Fensters von Gargellen (Vorarlberg) und seines kristallinen Rahmens. - Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud., 22, Wien.
- CZURDA, K.; HANTKE, R.; OBERHAUSER, R. & W. RESCH (1979): Molasse, Helvetikum, Flysch und Nördliche Kalkalpen im Bregenzer Wald. - Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F. 61, Stuttgart.
- GWINNER, M.P. (1979): Zur Geologie von Vorarlberg (Daten zu den Exkursionen des oberrhein. geol. Ver., April 1979). - Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F. 61, Stuttgart.
- OBERHAUSER, R. (1965): Zur Geologie der West-Ostalpen - Grenzzone in Vorarlberg und im Prätigau etc. - Verh. Geol. A.-B., Sonderh. 6, Wien.
- PIRKL, H.R. (1980): Die westlichen Zentralalpen (von der Silvretta zum Brenner); aus Geol. B.-A.: Der geologische Aufbau Österreichs. Wien.
- RESCH, W.; HANTKE, R. & H. LOACKER (1979): Molasse und Quartär im Vorderen Bregenzerwald etc. - Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F. 61, Stuttgart.

RICHTER, M. (1969): Vorarlberger Alpen. - Sammlung geolog. Führer 49, Gebr. Borntraeger, Berlin-Stuttgart.
 SCHREINER, A. (1974): Erläuterungen zur geologischen Karte des Landkreises Konstanz. - Herausgeber: Geolog. Landesamt Baden-Württemberg, Freiburg i. Br.

Miozän	Torton	Obere Süßwasser-Molasse (Pfänder), Mergel und Sandsteine, Konglomerate	OSM ⁺)
	Helvet	Mergel und Sandsteine, Konglomerate (+ Wirtatobel Kohleflöz)	OMM ⁺)
	Burdigal	Gebhardsberg Nagelfluh Kanzelfels Nagelfluh Galaukonitsandstein Basisnagelfluh	
	Aquitän	Granitische Molasse	USM ⁺)
Oligozän	Chatt	Steigbach-Schichten Weissach-Schichten	
	Rupel	Baustein-Schichten Tönmergel-Schichten	UMM ⁺)
	Lattorf	Deutenhausener Schichten	

⁺) OSM = obere Süßwassermolasse USM = untere Süßwassermolasse
 OMM = obere Meeresmolasse UMM = untere Meeresmolasse

Tabelle 1: Stratigraphie der Vorarlberger Molasse
 (nach M. RICHTER, 1969)

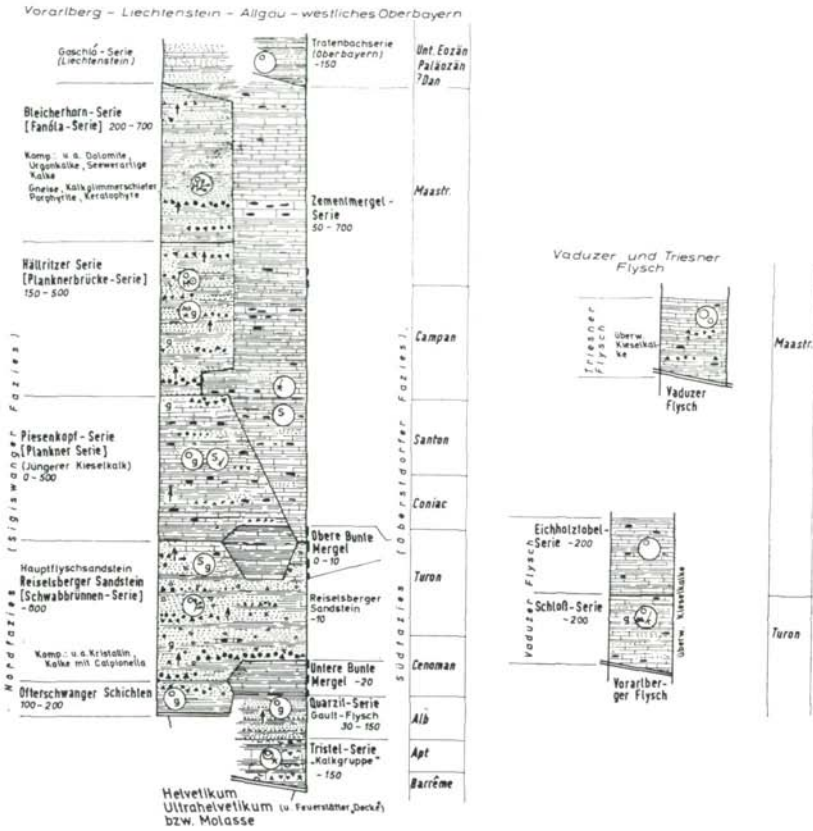


Abb. 1: Sammelprofil der Schichtfolge im Helvetikum von Vorarlberg (nach M.P. GWINNER, 1978)

Zur Geologie von Vorarlberg

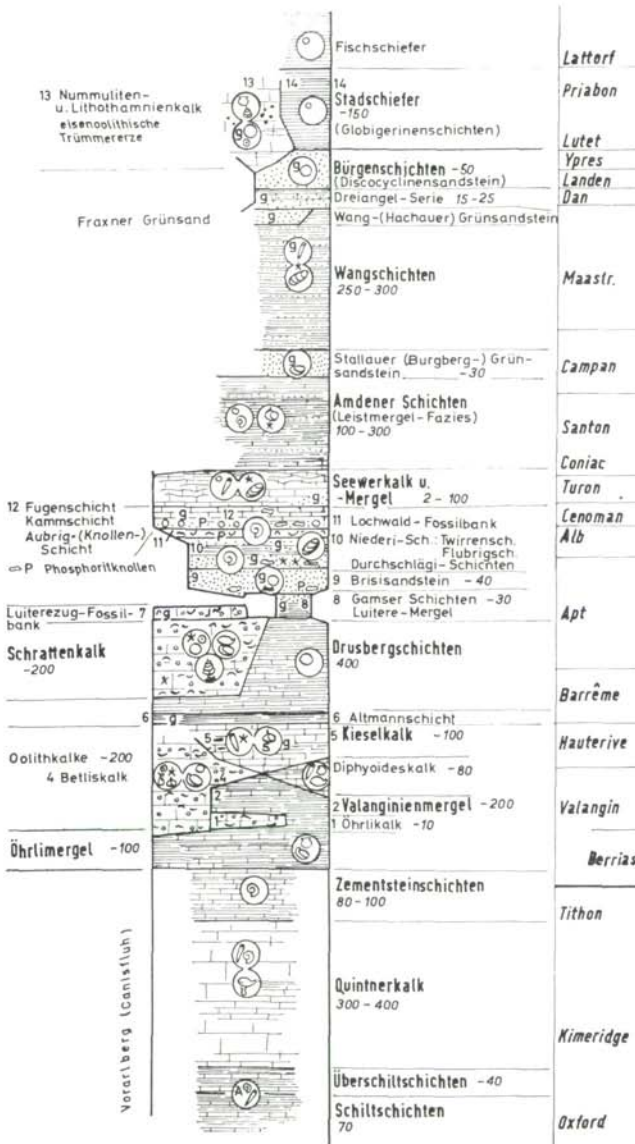


Abb. 2: Sammelprofil der Schichtenfolge des rheno-danubischen Flysch (nach M.P. GWINNER, 1978)

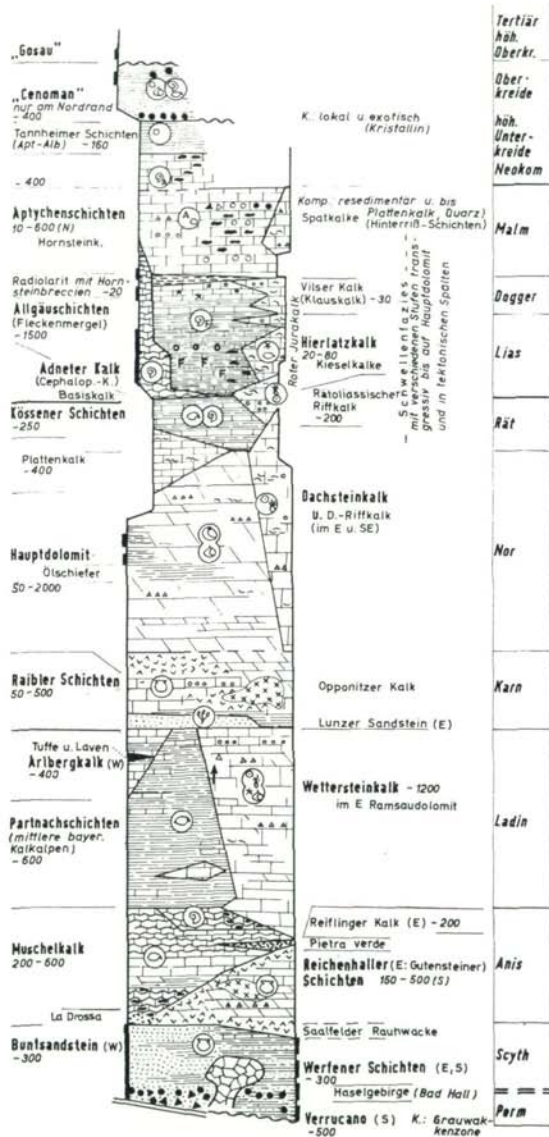


Abb. 3: Sammelprofil der Schichtfolge der Nördlichen Kalkalpen in Vorarlberg und Ostösterreich (nach M.P. GWINNER, 1978)

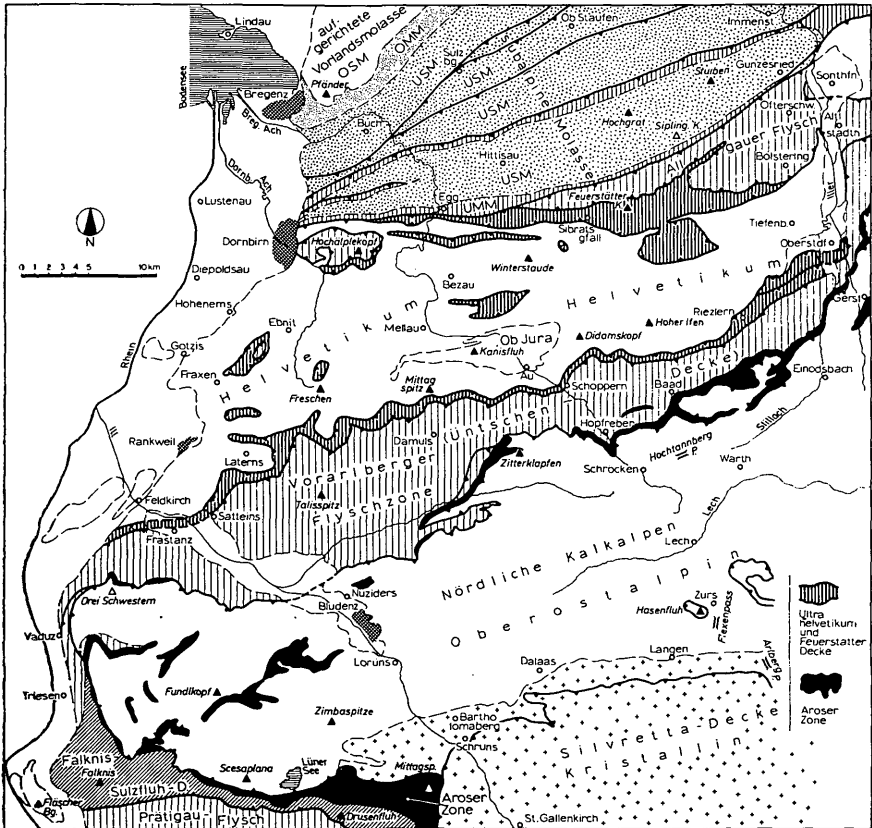


Abb. 4: Geologisch-tektonische Übersichtskarte von Vorarlberg und der angrenzenden Gebiete. Vereinfacht nach M. RICHTER, 1978

Das Gebirgsverhalten um die Maschinenkaverne des Kavernenkraftwerkes Wehr

von H. Lange, H. Pfeifer und H. Rest⁺⁾

Das 1000 MW-Pumpspeicherwerk Hornbergstufe mit den Kavernenkraftwerk Wehr wurde 1970 bis 1976 gebaut. Die Eigenschaften des Gebirges und die felsmechanischen Kennwerte wurden von einem Sondierstollen aus ermittelt, der bereits 10 Jahre zuvor in den Kavernenbereich vorgetrieben wurde. Entwurf und Bemessung der Sicherungen und des Ausbaus der Maschinenkaverne wurden nach der Methode der Finiten Elemente berechnet. Das Verhalten des Gebirges wird seit Ausbruch und Ausbau der Kaverne durch Extensometer und Meßanker überwacht. Die Form- und Laständerungen, die mit Ausbruchende praktisch beendet waren, blieben unter den vorausberechneten Beträgen zurück.

Die von Natur geringe Wasserwegigkeit des Gebirges wurde durch die Felshohlbaue nicht meßbar verändert. Während des Aubruchs versiegte Quellen erreichten ihre frühere Schüttung wieder, nachdem der stahlgepanzerte Druckschacht fertiggestellt war.

Über das Kavernenkraftwerk Wehr haben WITTKKE, PFISTERER und RISSLER bereits mehrmals veröffentlicht.

⁺⁾ Anschrift der Verfasser: Oberingenieur H. Lange, Ing. H. Pfeifer, Dr. H. Rest, Schluchseewerk Aktiengesellschaft, Postfach 1460, Rempartstr. 12-16, D-7800 Freiburg i. Br.

1. Einleitung

Der immer häufigere Einsatz von Fräsmaschinen im Tunnelbau bringt es mit sich, daß sich auch der beratende Geologe mit der Problematik des mechanischen Tunnelvortriebs auseinandersetzen muß. Drei Fragen stehen dabei im Vordergrund:

- 1) Die Bohrbarkeit eines gegebenen Gesteins
- 2) Die theoretisch mögliche Vortriebsgeschwindigkeit in diesem Gestein
- 3) Die geotechnischen Verhältnisse vor Ort (Felsstabilität, Wasseranfall, Tragfestigkeit des Bodens).

Alle drei Punkte sind natürlich auch beim konventionellen Vortrieb von großer Bedeutung, doch liegt die Gewichtung anders. Infolge der hohen Investitions- und Betriebskosten einer Fräsmaschine, ist der Unternehmer gezwungen, hohe Leistungsraten zu erbringen. Solche können leicht dadurch vereitelt werden, daß der Fels wesentlich schlechter bohrbar ist als erwartet (zu langsamer Vortrieb), oder zu abrasiv ist (kostenungünstiger Meißelverschleiß). Andererseits mag z.B. ein im Vergleich zum Sprengvortrieb teurerer mechanischer Vortrieb von Vorteil sein, weil die Bauzeit infolge der höheren täglichen Vortriebsleistung kürzer wird. All diese Fragen stehen naturgemäß in einem bestimmten Zusammenhang mit dem zu durchbohrenden Material - dem Fels - und dadurch wird auch der Geologe angesprochen.

Was kann dieser nun zur Lösung dieser Fragen beitragen? Da ist sicher einmal die Klassifizierung des zu durchfahrenden Gesteins zu erwähnen, nicht nur in petrographischer Hinsicht, sondern auch bezüglich seiner grundsätzlichen Bohrbarkeit (Basisbohrbarkeit). Zum zweiten wären dann die Daten beizutragen, die erlauben, die mittlere Schneidgeschwindigkeit für gegebene Gebirge zu ermitteln (die theoretisch mögliche maximale Vortriebsgeschwindigkeit) sowie die speziellen Schwierigkeiten zu definieren, die den mechanischen Vortrieb behindern bzw. die theoretische Vortriebsgeschwindigkeit reduzieren werden (Störzone, Stabilitätsprobleme, Wasseranfall). Letzterer Fall ist nicht ein spezifisches Problem des mechanischen Vortriebs, es ist genauso wichtig beim Sprengvortrieb und soll deshalb hier nicht diskutiert werden. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich somit auf die Klassifizierung der Gesteine bezüglich ihrer Bohrbarkeit sowie auf die Möglichkeit der Vorhersage der Schneidgeschwindigkeit.

⁺) Anschrift des Verfassers: Dr. J.P. Jenni, c/o MOTOR-COLUMBUS Ingenieurunternehmung AG, Parkstraße 27, CH-5401 Baden

2. Bohrbarkeitsklassifizierung

Davon ausgehend, daß Analysenmethoden, die zur Klassifizierung der Gesteine bezüglich ihrer Bohrbarkeit führen, schnell, einfach und billig sein sollten, ist ein Testverfahren entwickelt worden, das auf folgenden Parametern beruht:

- der Prellhärte H_R , bestimmt mit einem Schmidt'schen Prüfhammer (dimensionslos),
- der Druckfestigkeit bei punktförmiger Belastung, dem sog. Point-Load Strength Index I_S gemäß ISRM-Norm (in N/mm^2),
- einem Abrasionstest, dem sog. Los Angeles Abrasion Test ASTM-Norm L-131 (A, in %),
- der Ermittlung des Bestandes an Mineralien, die gleich oder härter als Quarz sind (qtz, in %); der Mineralbestand kann röntgenographisch, chemisch oder anhand von Dünnschliffen ermittelt werden.

Auf empirischem Weg ist folgende Beziehung abgeleitet und als Basis-Bohrbarkeitsindex b_q definiert worden:

$$b_q = \frac{I_S \cdot \sqrt{H_R}}{\frac{A}{1+qtz}}$$

Dieser stellt eine Materialcharakteristik des Gesteins und nicht etwa des Felses dar, da er keine Rücksicht auf die geotechnischen Verhältnisse vor Ort (Stabilität, Wasser, Klüftung) nimmt.

Aufgrund seines Index b_q läßt sich ein Gestein in eine der folgenden 4 Bohrbarkeitsklassen einteilen:

- (1) $b_q > 100.0$; extrem harte und/oder abrasive Gesteine, sehr ungünstig für den Fräsbetrieb
- (2) $b_q = 99.9-10.0$; ziemlich harte und/oder abrasive Gesteine, nicht ideal für den Fräsbetrieb
- (3) $b_q = 9.9-0.1$; wenig harte und/oder abrasive Gesteine, günstigste Klasse für den Fräsbetrieb
- (4) $b_q < 0.1$; sehr weiche kohäsionslose Gesteine, ungünstig für Hartgesteinsmaschinen

Diese Klassifizierung gilt streng genommen nur für Vollschnitt-Fräsmaschinen mit Disken- bzw. Rollenmeißel vom Typ Wirth oder Robbins, sollte sich aber unter Verschiebung der Grenzwerte auch auf andere Maschinentypen bzw. auf einzelne Fabrikate anwenden lassen.

In Figur 1 ist das hier besprochene Klassifizierungsdiagramm dargestellt. Es ist daraus ersichtlich, daß die 3 Sandsteinwerte in den Grenzbereich des Feldes 1 und 2 fallen, die meisten übrigen Werte (Kalke, Dolomite, Kalkbrekzien, Anhydrit etc.) dagegen in das günstige Feld 3. Diese Klassifizierung wurde später beim effektiven Tunnelausbruch weitgehend bestätigt, doch hat sich dann öfters sehr schön bestätigt, daß man nicht direkt vom Gestein (Handstücke) auf den Fels schließen

darf, wenn nicht auch noch andere Parameter berücksichtigt werden. So wurde z.B. in einem Sandstein eine Schneidleistung von 2.5 m/h erbracht, trotz dessen hoher Druckfestigkeit (130 N/mm²) und einem Quarzgehalt von 30%. Andererseits wurden im Dolomit des Feldes 2 nur 1.55 m/h geschnitten, was für normale Dolomite viel zu niedrig ist. In beiden Fällen läßt sich die anormale Schneidleistung durch die Gesteinstextur erklären.

3. Vorhersage der Vortriebsleistung

Die laufenden Untersuchungen haben schnell gezeigt, daß die Vortriebsleistung einer Fräsmaschine nicht nur vom Basisbohrbarkeitsindex abhängt, sondern ebenso stark von der Textur des Felses und dem Anpreßdruck der Maschine. Nur wenn man diese beiden Parameter ebenfalls berücksichtigt, läßt sich eine Beziehung zwischen Felseigenschaften und Vortriebsleistung ermitteln.

Es hat sich gezeigt, daß das Vorhandensein von Trennflächen einen enormen Einfluß auf die Vortriebsleistung hat. Im Prinzip läßt sich sagen, daß die Leistung umso höher ist, je mehr Trennflächen vorhanden sind, sofern die Stabilität des Tunnels nicht gefährdet ist. So wurde im oben erwähnten Beispiel die gute Fräsleistung im Sandstein dadurch erreicht, daß derselbige sehr gut in dm-Abstände geschichtet war; der Dolomit dagegen war ausgesprochen massig und wies über Distanzen von mehreren Metern überhaupt keine Klüfte auf.

Auf empirischem Wege sind zahlreiche mögliche Beziehungen zwischen Bohrbarkeitsindex b_q , Klüftung und Vortriebsleistung geprüft worden und es hat sich schlußendlich gezeigt, daß die Einführung des Faktors k/b_q die besten Resultate ergab. k ist die Klüftfrequenz bzw. die Anzahl Trennflächen pro Laufmeter in Bohrrichtung. Die räumliche Orientierung der Trennflächen ist nicht berücksichtigt.

Trägt man die Vortriebsgeschwindigkeit in cm pro Maschinenstunde und Bruttoanpreßdruck gegen die Bohrbarkeit k/b_q auf, so liegen die entsprechenden Werte bei Verwendung logarithmischer Skalen angenähert auf einer Geraden (Figur 2). Die bis anhin ermittelten 9 Werte lassen noch keine exakte Formel ableiten, doch stimmen die bisherigen Resultate optimistisch. Es scheint erwiesen zu sein, daß man mit Hilfe 5 einfach zu bestimmender Parameter, 4 längst eingeführter, schneller und billiger Versuche sowie der ebenfalls leicht zu ermittelnden Klüftfrequenz die Vortriebsleistung einer Fräsmaschine für Hartgestein vom Typ Wirth oder Robbins recht genau voraussagen kann. Allerdings berücksichtigt diese Beziehung zusätzliche leistungsmindernde Einflüsse wie Sicherungsarbeiten und Wasseranfall nicht. Diese müssen gesondert ermittelt werden. Die errechnete Vortriebsleistung entspricht deshalb der theoretisch möglichen Maximalleistung der Maschine für ein gegebenes Gebirge.

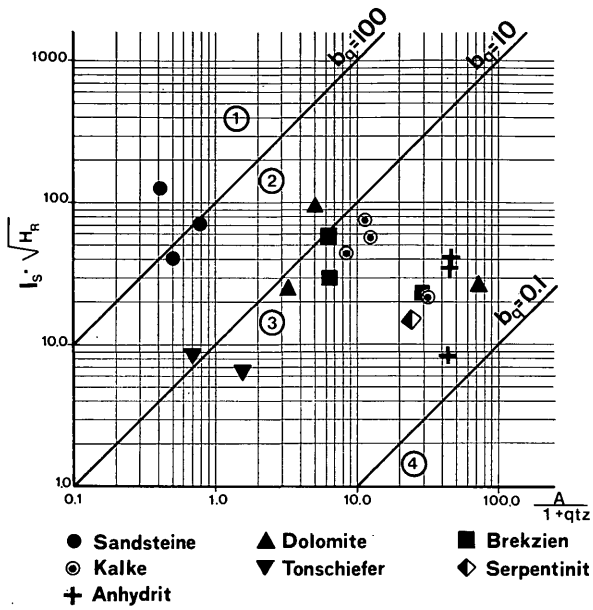


Fig. 1: Klassifizierungsdiagramm

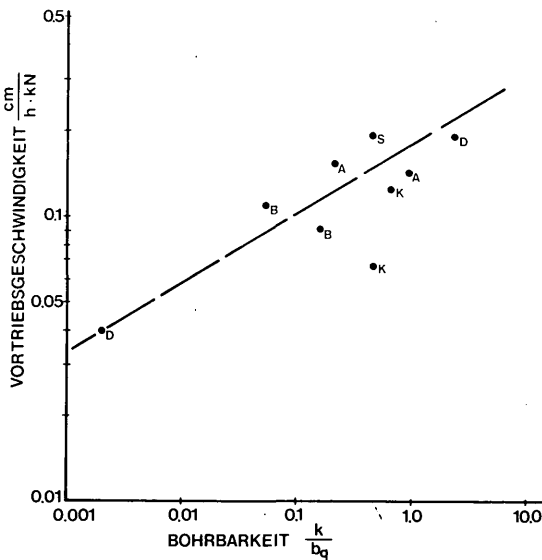


Fig. 2: Zusammenhang zwischen Vortriebsgeschwindigkeit und Bohrbarkeit, d.h. Kluftfrequenz (k) und Basisbohrbarkeitsindex (b_q). A = Anhydrit, B = Kalkbrekzie, D = Dolomit, K = Kalke, S = Sandstein.

1. Einleitung

In den Jahren 1975/76 wurde eine generelle Studie über die Möglichkeiten der Wasserkraftentwicklung (Masterplan) für das gesamte Territorium von Guatemala durchgeführt. Träger der Studie war die Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) und die guatemalteckischen Regierung, ausgeführt wurde sie durch die staatliche Elektrizitätsgesellschaft (INDE), unterstützt durch ein Konsortium deutscher Ingenieurunternehmen (LSE). Der Autor hatte Gelegenheit, zusammen mit einem deutschen und einem guatemalteckischen Kollegen die geologischen Grundlagen für diese Studie zu erarbeiten.

2. Aufgabenstellung

Die von Wasserkraftingnieuren aufgrund hydrologischer Untersuchungen und rein theoretischer Überlegungen provisorisch aufgezeigten Projektideen sollten durch die Geologen in einer ersten Phase im Feld überprüft und vom geologischen Standpunkt aus evaluiert werden. Unmögliche oder eindeutig unwirtschaftliche Projekte mußten so früh als möglich als solche erkannt und ausgetauscht oder durch hoffnungsvollere Lösungen ersetzt werden. Durch wiederholte Selektion sollten sich im Verlauf der Studie diejenigen Projekte herauskristallisieren, für die eine nähere Untersuchung angezeigt erschien, und es sollte die ideale, der Bedarfskurve des Landes angepaßte, Reihenfolge dieser zukünftigen Studien ermittelt werden. Die anfänglich rund 500 Projekte mit ca. 700 Sperrstellen und ca. 400 Tunneltrassen lagen im ganzen Land verstreut, in sämtlichen Flußsystemen. Entsprechend breit mußte die geologische Studie angelegt werden, um überhaupt Vergleiche anstellen zu können. Die Kenntnis der größeren geologischen Zusammenhänge war Voraussetzung. Als Grundlage diente die glücklicherweise vorhandene geologische Übersichtskarte sowie die einschlägige, nicht allzu reichlich vorliegende geologische Literatur.

3. Geologische Übersicht

Das zwischen Pazifik und Karibischem Meer liegende Land wird orographisch in vier etwa West-Ost laufende Gürtel unterteilt, wobei man von Süd nach Nord unterscheidet:

- die junge pazifische Küstenebene, eine zur Hauptsache aus Detritus der anschließenden Vulkankette aufgebaute Schwemmebene;

⁺) Anschrift des Verfassers: Dr. Walter Ryf, c/o Büro Dr. Jäckli, Limmattalstr. 289, CH-8049 Zürich-Höngg

- den Vulkangürtel tertiären bis rezenten Alters, eine steil aus der Küstenebene aufsteigende Bergkette mit höchsten Erhebungen von über 4000 m;
- die zentralamerikanische Kordillere, ein Faltengebirge aus metamorphen und plutonischen Gesteinen mit einer zum Teil mächtigen Sedimentbedeckung;
- das Tiefland von Petén, ein Becken mit nur leicht deformierter, mächtiger kretazischer und tertiärer Sedimentfüllung.

Über dem metamorphen paläozoischen Grundgebirge wird in der zentralamerikanischen Kordillere und im Tiefland von Petén die folgende Sedimentabfolge angetroffen:

- bis 3000 m Schiefer und Kalke (Pennsylvanian bis Perm),
- bis 1000 m Redbeds (Jura bis evtl. Unterkreide),
- bis über 3000 m Kalke, Dolomite und Evaporite,
- bis 1000 m klastische Sedimente und Redbeds (Oberkreide bis Alttertiär),
- bis 1000 m klastische und karbonatische Sedimente (Jungtertiär).

Die Sedimente werden stellenweise intrudiert von ultrabasischen und sauren Plutoniten, die zum Teil große Massive bilden, und andererseits werden sie breitflächig bedeckt von jungen vulkanischen Ablagerungen (Laven und vor allem Tuffe). Diese Tuffe bilden teilweise ausgedehnte, oft durch die Erosion sekundär wieder stark gegliederte und zertalte Hochflächen.

T e k t o n i s c h liegt Guatemala im Kontaktbereich dreier großtektonischer Platten - der Nordamerikanischen Platte im Norden, der Cocosplatte im Südwesten und der Karibischen Platte im Osten. Der Bewegungssinn zwischen den drei Elementen ist der folgende: Die Karibische und die Nordamerikanische Platte driften relativ gegen Westen über die Cocosplatte, mit der gegen NE abtauchenden, vor der Pazifikküste Guatemalas liegenden Benioffzone als Kontaktfläche (Subduktion). Die Nordamerikanische Platte bewegt sich linkssinnig an der Karibischen Platte vorbei, d.h. sie driftet rascher als diese gegen Westen. Die Kontaktfläche erscheint in Form von einigen parallelen, praktisch ganz Guatemala durchschneidenden, Großbrüchen (Blattverschiebungen). Als Folge seiner Lage in dieser tektonischen Zone ist Guatemala ein ausgesprochenes Erdbebengebiet.

4. Angewandte Methoden

a) Erste Phase

Da eine sehr große Zahl von Projektideen in dem großen, verkehrsmäßig nur mittel bis schlecht erschlossenen Gebiet im Zeitraum von nur einigen wenigen Monaten beurteilt werden mußte, kam für die Feldarbeit nur der intensive Einsatz eines Helikopters in Frage. Mit anfänglichen Versuchen, die Projektzonen auf dem Landweg zu erreichen, wurde viel wertvolle Zeit verloren. Zudem war die anfallende Information infolge der schlechten Einsicht ins Gelände wegen oft starker tropischer

Vegetation im Vergleich zur eingesetzten Energie und Arbeitszeit oftmals unverhältnismäßig gering. Der Helikopter erlaubte nicht nur, die Arbeitsgebiete rasch und mühelos zu erreichen, er machte es auch möglich:

- größere, nur aus gewisser Distanz erkennbare Strukturen sofort aufzufinden und damit großräumige Zusammenhänge zu erkennen;
- versteckte, vom Boden aus kaum auffindbare Aufschlüsse einzusehen;
- sich durch Standflüge an Steiflanken sonst kaum erreichbaren Aufschlüssen zu nähern;
- eine Fotodokumentation mit Ansichten aus den verschiedensten Blickwinkeln für die weiteren Projektierungsarbeiten zu beschaffen.

Selbstverständlich aber wurde, wo immer möglich, gelandet, was in der Trockenzeit selten Probleme stellte, da die Flußbette entsprechende Möglichkeiten boten. Dann konnte die übliche Feldgeologie betrieben werden. Wenn immer aber in der Luft gearbeitet wurde, mußte die Arbeitstechnik umgestellt werden. Ein wichtiger Punkt ist der völlige Ersatz des Feldbuches durch ein Diktiergerät. Die Beobachtungszeit ist zu kostbar, um sie mit Aufschreiben zu vergeuden. Zudem ist der Helikopter im Normalfall ständig in Bewegung und man würde den Faden und die Orientierung verlieren, müßte man noch aufschreiben. Die Informationsdichte ist so groß, daß man ununterbrochen sprechen muß, um alles festzuhalten, was man sieht. All die Information über Geologie, Morphologie, Topographie, Wasserführung, gelegentlich aber auch Angaben über Besiedelung, Vegetation und Verkehrswege festzuhalten, sich gleichzeitig im Gelände zu orientieren und den Piloten zu leiten, ist eine Konzentrationsarbeit, die einige Übung erfordert.

Der Vergleich der vielen Projekte, deren mögliche Kombinationen und Variationen zu rund 8000 Varianten führten, konnte selbstverständlich nur noch mit einem Computer durchgeführt werden. Die aus verständlichen Gründen nicht überreiche geologische Information sollte damit noch weiter vereinfacht werden, um sie in das Programm einfügen zu können. Die von den Computerfachleuten geforderte Vereinfachung war aber so weitreichend, daß wir Geologen darauf bestanden, nebst der verlangten Codifizierung eine geologische Beschreibung der Sperrstellen, der Beckengebiete und der eventuellen Stollenstrecken zu verfassen, in der Überzeugung, daß sich die gewonnene Information nicht vernünftig in ihrer ganzen Tragweite verschlüsseln läßt und für zukünftige Studien damit verloren wäre.

In die Computer-Evaluation floß nur Information über folgende vier Problemkreise ein:

- Eignung der Sperrstelle für die verschiedenen Sperrrentypen,
- Dichtigkeit der Sperrstelle resp. Aufwand zur Abdichtung derselben,
- zu erwartender prozentualer Anteil der verschiedenen Felssicherungsklassen in den Stollen,

- Beurteilung des Beckens (Dichtheit, Stabilität der Hänge).

Den innerhalb dieser Gruppen vorgenommenen Klassierungen entsprachen im Computerprogramm gewisse Kostenfaktoren, welche die Wirtschaftlichkeit des Projekts beeinflussten. Gegen 100 Projekte mußten aus geologischen Gründen ganz verworfen werden.

b) Zweite Phase

Aus der Evaluation der ersten Phase gingen etwa 90 Projekte hervor, welche genauer zu untersuchen waren. Grundsätzlich wurden die gleichen Arbeitsmethoden angewandt, wobei der Helikopter nur noch als Transportmittel verwendet und die Untersuchungszeit für jedes Projekt ausgedehnt wurde. Auch die Auswertung geschah in analoger Weise, doch sollten nun auch Kostenfaktoren für die Beschaffung von Konstruktionsmaterial und die Erstellung von Nebenbauwerken, wie Hochwasserentlastungen, Umleitstollen, Wasserschlösser und Zentralen erarbeitet werden. Aus diesem Grund wurden die Geologen in dieser Phase im Feld von einem Wasserkraftingenieur begleitet. Detailprobleme konnten so an Ort und Stelle diskutiert und die Projekte angepaßt werden.

Aus der Evaluation dieser zweiten Phase resultierten vier Projekte, von denen zwei momentan im Detail studiert werden, eines wohl in der nächsten Zeit in Bau geht.

5. Regionale Probleme

In Guatemala fallen 90% der Niederschläge im Zeitraum von nur fünf Monaten. Eine vordringliche Erfordernis für ein wirtschaftliches Wasserkraftwerk ist deshalb meist von vornherein die Errichtung eines möglichst großen Speichers, wenn immer möglich sogar eines Jahresspeichers.

Damit entfallen für Großprojekte praktisch die pazifische Küstenebene mit ihren sehr kleinen Gefällen und dem stark aufgesplitterten Flußnetz, wie auch das Tiefland von Petén, das nebst den geringen Gefällsverhältnissen noch eine hochgradige und tiefgründige Verkarstung des Untergrunds aufweist.

Der Westabfall der Vulkankeette besitzt zwar außerordentlich große Gefälle und Fallhöhen, doch ist das Flußnetz wenig entwickelt und die Entwässerung vollzieht sich über hunderte von kleinen Flüssen und Flüssen, die in der Trockenzeit praktisch trocken liegen. Die Möglichkeit der Errichtung von Speichern ist sehr beschränkt, da die Täler im allgemeinen sehr eng und steil sind.

Dazu kommen in dieser Zone die Gefahren und Erschwernisse des Vulkanismus (Lavaströme, große Sedimentfracht infolge der Tuffe, Erdbeben) und der postvulkanischen Erscheinungen (heiße Zonen für Stollenbauten)

Bleibt als Hauptinteressegebiet die zentralamerikanische Kordillere, wo größere Talsysteme ausgebildet sind. Aber auch hier wird die Planung außergewöhnlich stark eingeschränkt, einerseits durch die Verkarstung der großen Gebiete aufbauenden Kalke und andererseits durch das Vorhandensein der

großen aktiven Bruchzonen, die den morphologisch am besten ausgebildeten Tälern entsprechen. Anlässlich des großen Erdbebens vom Februar 1976, welches durch eine spontane Bewegung des Motagua-Bruches verursacht wurde, konnten horizontale Verstellungen von über 2 m gemessen werden. Es versteht sich von selbst, daß Talsperren solche Zonen zu meiden haben, und daß vor Errichtung einer Sperre neben den geologischen auch intensive seismische und mikroseismische Studien nötig sind.

Betrachtet man die erwähnten Erschwernisse gesamthaft, so kommt man zum Schluß, daß Guatemala für die Erstellung von großen hydroelektrischen Kraftwerken aus geologischen Gründen eher ungeeignet ist, so günstig das Land mit seinen Strukturen und seinem gegenwärtigen Entwicklungsstand auf den ersten Blick erscheint.

Refraktionsseismik und Klüftigkeitskoeffizient

von H. Hönig⁺⁾.

Gerade für Kraftwerksbauten werden an der Sperrenstelle oder im Bereich des Krafthauses neben den üblichen Bohrungen zur Erkundung des Baugrundes auch refraktionsseismische Messungen eingesetzt. Man erhält vom Baugrund Querprofile in der üblichen Form. In der weiteren Folge lassen sich daraus Isogeschwindigkeiten entwickeln, indem eben alle im Arbeitsgebiet gemessenen Geschwindigkeitswerte durch Interpolation zusammengefaßt werden. Diese Karten haben oftmals keinen allzu großen Aussagewert.

Am Beispiel der Abb. 1, es handelt sich im wesentlichen um Dolomite und Kalke des Devons, wobei die Dolomit-Kalk-Grenze aufgrund der obertägigen Aufschlüsse etwa der stark ausgezogenen Linie entspricht, zeigt sich, daß eine Gliederung einzig aufgrund der Geschwindigkeitswerte alleine nicht durchgeführt werden kann. Sowohl Dolomite als auch Kalke weisen Fortpflanzungsgeschwindigkeiten auf, die sich nicht unterscheiden; auf der Karte lassen sich lediglich Minimum- und Maximumzonen erkennen, die völlig unabhängig von der Gesteinsart zu sein scheinen.

Der Gedanke liegt nahe, die Geschwindigkeitsdifferenzen mit Gesteinsauflockerung infolge erhöhter Klüftigkeit zu erklären. Tatsächlich liegt südlich des in Abb. 1 dargestellten Gebietes ein Bündel WSW-ENE streichender steilstehender Störungen, das von F. HERITSCH, 1906, als Göstinger Verwurf bezeichnet wird und das die karbonatische Gesteinsfolge des Grazer Paläozoikums gegen Süden unter die tertiären Sedimente absenkt. Dieses Störungssystem wird von einem zweiten, dem im Osten in annähernd NS-Richtung durchstreichenden Leberbruch mit einer Reihe parallel liegender kleinerer Verwerfungen gekreuzt.

Ganz im Osten der Abb. 1 wurde 1979 mit den Gründungsarbeiten für ein Murkraftwerk begonnen. Bereits beim Aushub zeigten sich die beschriebenen Bruchsysteme an der Baugrubensohle in Form starker Klüftigkeit des Gebirges. Zum Schutz vor Umläufigkeit der Baugrubenumschließung wurde eine Vergütung mittels Injektionen durchgeführt. Interessanterweise erhöhte sich der Injektionsmittelverbrauch auf das Vierfache der vorher, alleine aufgrund der Bohrkernanalysen, geschätzten Menge.

Unter Zuhilfenahme der eingangs erwähnten Isogeschwindigkeitskarte läßt sich der erhöhte Injektionsmittelverbrauch vermuten. Einen direkten Zusammenhang zwischen Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Longitudinalwelle im gestörten klüftigen Medium mit

^{+) Anschrift des Verfassers: Dipl.-Ing. Dr. Heinrich Hönig, Institut für Technische Geologie, Petrographie und Mineralogie, Technische Universität Graz, Rechbauerstr. 12, A-8010 Graz}

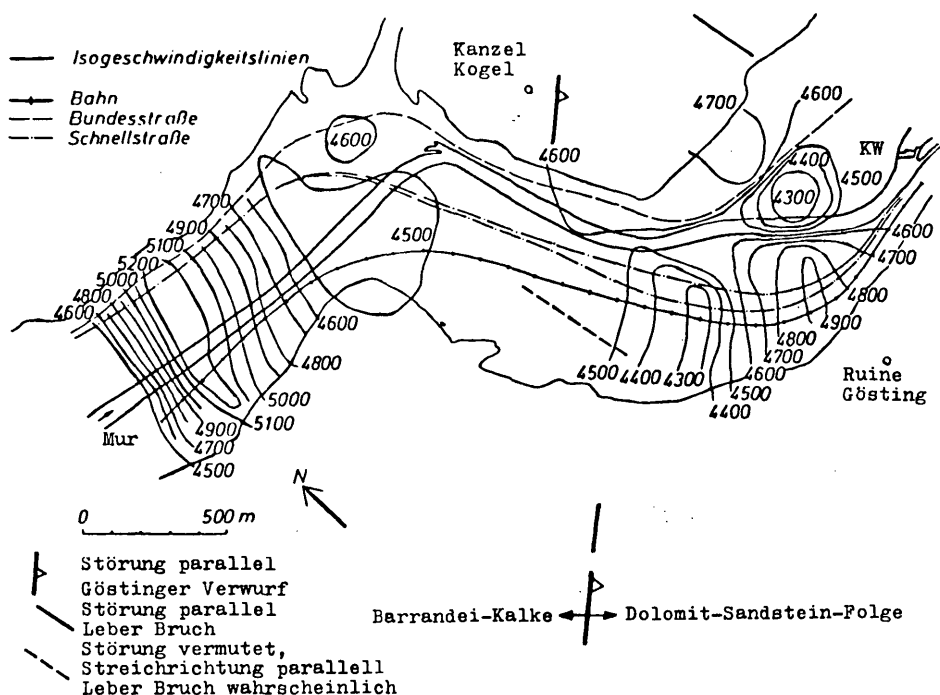


Abb. 1: Isogeschwindigkeitskarte der Karbonatgesteine des Devons im Murtal nördlich Graz.

dem Klüftigkeitskoeffizienten liefert die Formel von WYLLIE, GREGORY & GARDNER, 1956:

$$k = \frac{v_{st} (v_u - v_g)}{v_g (v_u - v_{st})}$$

v_g = Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Longitudinalwelle im gestörten klüftigen Medium

v_u = Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Longitudinalwelle im ungestörten klüftfreien Medium

v_{st} = Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Longitudinalwelle in den Klüften

Unter der Annahme einer Fortpflanzungsgeschwindigkeit v_u der Longitudinalwelle im klüftfreien Medium von 6000 m/s für die vorliegende Karbonatgesteinsfolge, ein Wert, der den Angaben von H. REICH, 1943, für vergleichbare paläozoische Kalke entspricht, der Klüftfüllung Wasser ($v_{st} = 1500$ m/s) und der gemessenen Geschwindigkeit im geklüfteten Medium von 4500 m/s

errechnet sich ein Klüftigkeitskoeffizient von 0,11. Dieser Wert wurde von H. HÖNIG, 1978, für den Bereich der erwähnten Kraftwerksbaustelle errechnet. Er besagt, daß etwa 11% eines injizierenden Gesteinskörpers mit Injektionsgut auszufüllen sind.

Eine Überprüfung des tatsächlichen Injektionsmittelverbrauchs für den gesamten unter der Baugrubenumschließung injizierten Bereich ergibt folgendes Bild:

Verbrauch 8340 kN (850 Mp) Injiziermittel entsprechend 660 cbm laut Abrechnung.¹⁾

Die Länge des Injektionsschleiers beträgt 424 m, seine Tiefe generell 15,0 m, der theoretische Injektionsradius ist 0,5 m. Somit war ein Gesteinskörper von 6360 cbm zu injizieren, dem bei einer Klüftigkeit von 11% ein Injektionsvolumen von 700 cbm entspricht. Tatsächlich wurden 660 cbm Zement-Betonitsuspension injiziert.

Die aufgezeigte Methode kann daher bei Vorliegen refraktionsseismischer Werte rasch zur überschlägigen Bewertung der Klüftigkeit eines Gesteinskörpers führen.

Literatur

- CLAR, E. (1933): Der Bau des Gebietes der Hohen Rannach bei Graz. - Mitt. naturw. Ver. Stmk., 70, 24-47, Karte 1:25 000, Graz.
- FLÜGEL, H.W. (1975): Die Geologie des Grazer Berglandes. - Mitt. Abt. Geol. Paläont. Bergb. Landesmus. Joanneum, SH 1, Graz.
- HADITSCH, J.G. (1964): Bericht über eine hydrogeologische Aufnahme des Steinkogel-Frauenkogelzuges nordwestlich von Graz. - Steir. Beitr. Hydrogeol., 15/16, 155-174, Graz.
- HERITSCH, F. (1906): Studien über die Tektonik der paläozoischen Ablagerungen des Grazer Beckens. - Mitt. naturw. Ver. Stmk., 42, 170-224, Graz.
- HÖNIG, H. (1978): Refraktionsseismische Erkundung der verdeckten Felsoberfläche im Bereich des Murtales zwischen Judendorf und Gösting nördlich Graz. - Mitt. Inst. f. Baugeologie, Tech. Univ. Graz, H. 1, Graz.
- HÖNIG, H. (in Druck): Bestimmung von elastischen Gesteinskennwerten mittels refraktionsseismischer Messungen. - Berichte, Band 3, Internationaler Kongreß für Felsmechanik, Montreux.
- REICH, H. & R. v. ZWERRER (1943): Taschenbuch der angewandten Geophysik. - 407 S., Akad. Verl. Ges., Leipzig.
- WYLLIE, M.R.J., GREGORY, A.R. & L.W.I. GARDNER (1965): Elastic wave velocities in heterogenous and porous media. - Geophysics, 21, 41-70, Tulsa.

¹⁾ Herrn Ing. Peter HELFRICH von der Firma Austrobohr, Graz, danke ich sehr herzlich, daß er mir die Abrechnungsdaten mitgeteilt hat.

Geologische Vorarbeiten für den Bau des 21 km langen
Walgaustollens der Vorarlberger Illwerke AG

von H. Loacker⁺)

Die Vorarlberger Illwerke AG bauen seit 1925 die Wasserkräfte der Ill aus. Durch die Errichtung der Speicher Kops, Vermunt, Silvretta und Lünensee wurde das Wasserangebot veredelt - Umlagerung von 160 Mio m³ von Sommer- auf Winterwasser - und durch die Beileitung aus dem Inngebiet um 226 Mio m³ im Regeljahr vermehrt. Das so veredelte und vermehrte Wasserangebot soll nun zum größten Teil durch das im Bau befindliche Walgauwerk in einer zusätzlichen Gefällsstrecke von ca. 150 m genutzt werden.

In den Jahren während und nach dem letzten Krieg wurde eine Mehrstufenlösung mit hangnahen Freispiegelstollen zum Ausbau dieser Flußstrecke studiert. AMPFERER, REITHOFER & KRASSER begutachteten diese Projekte von geologischer Sicht.

Im Jahre 1965 wurde neuerlich mit Projektierungsarbeiten für das Walgauwerk begonnen. Grundgedanke für die nun auszuarbeitenden Varianten war, den ganzen oder den größten Teil des zur Verfügung stehenden Höhenunterschiedes mit einem Ausleitungsstollen abzuarbeiten. Da dieser lange Stollen der bedeutendste Kostenfaktor des Gesamtprojektes war und die Stollenbaukosten stark von den geologischen Verhältnissen abhängen, wurde frühzeitig mit eingehenden geologischen Erkundigungen begonnen. Die beiden geologischen Karten "Geologische Karte des Rätikons" und "Geologische Karte des Walgaues, 1:25.000" von HEISSEL, OBERHAUSER, REITHOFER & SCHMIDEGG der Geologischen Bundesanstalt, Wien, bildeten die Grundlage für die weitere geologische Bearbeitung des Projektes. Um die geologisch günstigste Linienführung der Stollentrasse - die ja nicht unbedingt die kürzeste Verbindung sein muß - ausfindig machen zu können, wurden in engen Rastern vergitterte Profile (westlich der Alvier, von Dr. R. OBERHAUSER, GBA, Wien) entworfen. Diese vergitterten Profile zwingen zur räumlichen Anschauung des Gebirgsaufbaus, und aus ihnen wurden in den damals interessierenden Höhenlagen Horizontalschnitte und als weiterer Schritt auf Profilen und Horizontalschnitten zusammen ein geologisches Modell erstellt. Gleichzeitig wurde versucht, aus vorliegenden Beschreibungen und Besichtigungen bestehender Stollen, Begehung der möglichen Stollentrassen, Bestimmung der Gesteinsfestigkeiten und des Quarzgehalts und Klassifizierung nach Klüftigkeit, einen Katalog über Standfestigkeit und die notwendigen Sicherungen und die eventuelle Fräsbarkeit der im Bereich des Walgaustollens vorkommenden Gesteine und Gesteinsserien zu erhalten. Neben der sehr zeitraubenden Untersuchung der Grundwasserverhältnisse in den Illalluvionen als Beweissicherung für die Möglichkeit

⁺) Anschrift des Verfassers: Dr. Hermann Loacker, Vorarlberger Illwerke AG, A-6780 Schruns

der Ausleitung der Ill, wurden auch die Bergwasserverhältnisse im Rätikon untersucht, um Anhaltspunkte für den zu erwartenden Wasserandrang beim Stollenbau zu erhalten. Gleichzeitig wurden die im Bereich der Stollentrasse gelegenen Quellen aufgenommen und ein Meßprogramm erstellt.

Anhand dieser Daten wurden für verschiedene Vorprojekte Kosten ermittelt und ungünstige Varianten ausgeschieden. Die aufgrund dieser Vorstudien ausgewählte Stollentrasse - Druckstollen mit geringem Innendruck von 6,25 m Ausbruchdurchmesser - verläuft zuerst durch die Mitteltrias der Kristakopfschuppe, dann durch die Glimmerschiefer und Gneise der Phyllitgneisdecke und nach Queren der Rellstalistörung durchörtert der Stollen die Valbona-mulde der Zimba-Schesaplanascholle, die knapp östlich der Alvier von einem Aufbruch der Arosazone abgeschnitten wird. Westlich dieses Arosazonenaufbruchs liegen in einer flachen Schüssel (Mulde von Bürserberg der Fundelkopf-Alpilascholle) Raibler Schichten, unterlagert von mitteltriadischen Kalken und Mergeln. Nach Queren des Überschiebungshorizonts Nördliche Kalkalpen-Vorarlberger Flysch verbleibt der Stollen in der Flyschzone. Es wurde angestrebt, diesen Stollen mittels Vollschnittmaschinen auszubrechen.

Bei der Festlegung der Linienführung wurde versucht, geologisch ungünstige Gesteine oder Störzonen auf kürzestem Weg zu queren. Um stärkere Gebirgsdruckerscheinungen, die sich in gefrästen Stollen ungünstiger auswirken können als in konventionellen, möglichst zu vermeiden, wurde versucht, die Überlagerungshöhen in Grenzen zu halten. Andererseits wurde die Stollentrasse doch so weit in den Berg hineinverlegt, daß der Gebirgswasserspiegel über dem Innendruck des Stollens liegt, um teure Abdichtungsmaßnahmen zu vermeiden. Um die Wasserabfuhr in den Stollen zu erleichtern, wurden die Stollenneigungen den möglichen Bergwassereintritten angepaßt. Der Fensterstollen Bürs bildet einen Tiefpunkt und entwässert den östlich des Alvier gelegenen Teil des Stollens, in dem besonders viel Wasser erwartet wird. Der sich dadurch ergebende Hochpunkt wird durch einen kurzen Schacht in der Alvierschluht entlüftet.

Im Bereich des Stollenfensters Bürs war es fraglich, ob der erforderliche Gebirgswasserdruck vorhanden war. Es traten hier am Fuß der Vandanser Steinwand große, jedoch stark schwankende Quellen aus, die auf eine Verkarstung im Gebirgsinneren hindeuten. Man entschloß sich daher, den Fensterstollen Bürs als Sondierstollen noch vor Baubeschluß des Walgauwerkes zu errichten. Der Sondierstollen wurde mit einem Durchmesser von 3,90 m von einer Robbins-Vollschnittmaschine aufgefahren; seine Länge beträgt 1570 m. Der Sondierstollen beginnt im Kreidemergel, quert den hier stark kondensierten Jura, den Oberrhätischen Riffkalk, die Kössener Schichten, den Plattenkalk und endet im Hauptdolomit. Die angenommenen geologischen Grenzen zwischen den einzelnen Schichtpaketen wurden in der Natur bestätigt.

Von den dichten Kössener Schichten aus wurde der, wie nachträglich beobachtet werden konnte, stark verkarstete Plattenkalk angebohrt und ein Wasserdruck von 9,4 b im Winter bei niedrigstem Bergwasserspiegel gemessen, d.h. daß ein genügend hoher Bergwasser-

druck im zukünftigen Stollen vorliegt.

Nach Ausbruch des Sondierstollens im Plattenkalk folgte der Wasserandrang an diesen bis 1 m dicken Karstschläuchen mit einer Verzögerung von ca. 12 Stunden den Niederschlägen. Die maximal gemessene Schüttung betrug 1200 l/s, die Minimalschüttungen betragen im Winter ca. 70 l/s. An drei weiteren Stellen (Einlauf Rodund, Verebnung Latz und im Bereich des Wasserschlosses Beschling) wurde der Bergwasserspiegel durch Piezometer ermittelt. Die Erfahrungen im Sondierstollen erlaubten es, die früher gemachten Annahmen über Standfestigkeit, Wasserverhältnisse und Gebirgsdruck zu verbessern.

Trotz der langjährigen Untersuchungen sind im Bereich dieses 21 km langen Stollens mit tektonisch komplizierten Verhältnissen noch sehr große Unwägbarkeiten vorhanden. Das am wenigsten bekannte Gebiet ist die schlecht aufgeschlossene Mulde von Bürserberg mit Raibler Schichten und Gips und den sie einengenden Aufbrüchen von Arosazone. Bohrungen entlang der Stollen-trasse, die - in kurzen Abständen angebracht - einen genauen Aufschluß über die geologischen Verhältnisse untertags gegeben hätten, wurden durch die zu hohe Gebirgsüberlagerung verhindert.

Die Ausschreibung erfolgte in zwei Varianten, konventionell und Vortrieb mittels Vortriebsmaschine. Um die Risiken für den Auftragsnehmer im Rahmen zu halten, wurde in der Ausschreibung auf die Gebirgsklassifizierung besonderes Augenmerk gelegt. Der Gebirgsklasseneinteilung liegt nur indirekt die geologische Beschaffenheit des Gebirges zugrunde, das Hauptaugenmerk wurde auf die durch sie verursachten stollenbaulichen Maßnahmen gelegt. Die insgesamt sechs Gebirgsklassen sind gekennzeichnet durch die Art der erforderlichen Stützungsmaßnahmen und den Ort und den Zeitpunkt ihres Einbaus. Um sich den sehr unterschiedlichen Gebirgsverhältnissen im Walgaustollen anzupassen, wurde zusätzlich zu den sechs Gebirgsklassen noch eine Unterteilung in fünf geologische Bereiche (Kristallin, Buntsandstein, Karbonate, Mergel und Tonschiefer, Flysch) mit Aufschlägen für höheren Quarzgehalt in den Bereichen 2 und 4 vorgenommen. Die Gebirgsklassen V und VI, die für Bereiche vorgesehen sind, wo in extrem gestörtem Gestein der Vortrieb mittels Vortriebsmaschine nur mehr schlecht oder gar nicht mehr möglich ist, und die daher sehr schlecht kalkulierbar sind, werden in Regie abgerechnet und die zur Verfügung stehende Bauzeit hängt von den im Stollen angefahrenen Gebirgsverhältnissen ab. Wenn im Bereich des Zalumstollens auf längere Strecke schlechtes Gebirge (Arosazone, Raibler Schichten) angefahren wird, ist vorgesehen, die Maschine abzubauen und konventionell weiter vorzutreiben.

Verwendete geologische Karten

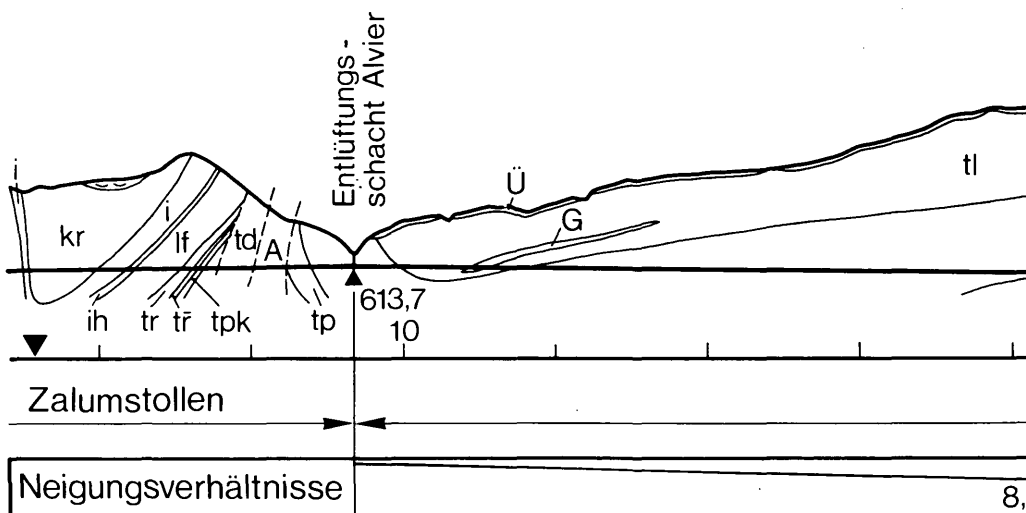
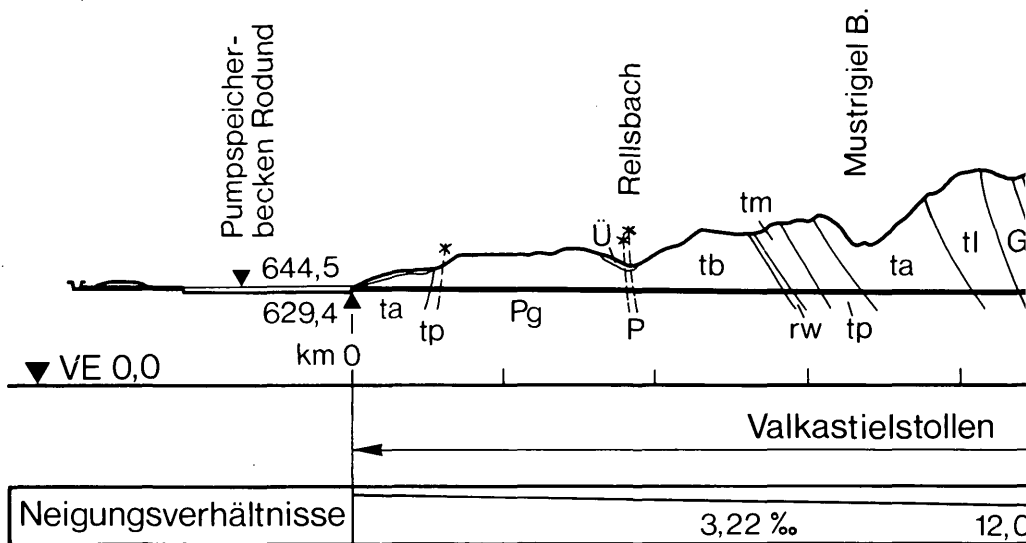
Geologische Karte des Rätikons, 1:25.000 (W. HEISSEL, R. OBERHAUSER, O. SCHMIDEGG, O. REITHOFER, 1953-1961), Geologische Bundesanstalt, Wien, 1965.

Geologische Karte des Walgaues, 1:25.000 (W. HEISSEL, R. OBERHAUSER, O. SCHMIDEGG, 1953-1964), Geologische Bundesanstalt, Wien, 1967.

Geologische Karte des Fürstentums Liechtenstein, 1:25.000
(F. ALLEMANN, R. BLASER, H. SCHAETTI), herausgegeben von
der Regierung des Fürstentums Liechtenstein, 1953.

Schrifttum

- BLASER, R. (1952): Geologie des Fürstentums Liechtenstein. - Selbstverl. Histor. Verein f.d. Fsm. Liechtenstein, Vaduz.
- KOBEL, M. (1969): Lithostratigraphische und sedimentologische Untersuchungen in der Kalkalpinen Mitteltrias des Rätikons. - Mitt. aus dem Geol. Inst. E.T.H., N.F. 118, Zürich.
- LEUTENEGGER, O.W. (1928): Geologische Untersuchungen im mittleren nordöstlichen Rätikon. - Druckerei Gebr. Leemann, Zürich.
- LOACKER, H. (1971): Berg- und Grundwasserverhältnisse im Illgebiet. - Verh. Geol. B.A., H. 3, Wien.
- MIGNON, K. (1962): Ergebnisse der geolog. Stollenaufnahme für das Lünserseerkraftwerk. Abschnitt Salonien-Latschau. - Jb.Geol.B.-A., 105, Wien.
- OBERHAUSER, R. (1970): Die Überkipppungserscheinungen des Kalkalpen-Südrandes im Rätikon und im Arlberg-Gebiet. - Verh. Geol. B.-A., H. 3, Wien.
- REITHOFER, O. (1960): Über die geologischen Erfahrungen beim Bau des Alfenzkraftwerkes Braz der Österr. Bundesbahnen. - Verh. Geol. B.-A., H. 2, Wien.
- SCHAETTI, H. (1951): Geologie des Fürstentums Liechtenstein, 1. Teil. - Selbstverl. Histor. Verein des Fsm. Liechtenstein, Vaduz.



≈≈≈ Rutschung in den Kreideschiefern

Ü Überlagerung (Hangschutt, Bergsturz, Moräne und Ver-
 ---* Störzone, Deckengrenze bauungsschotter)

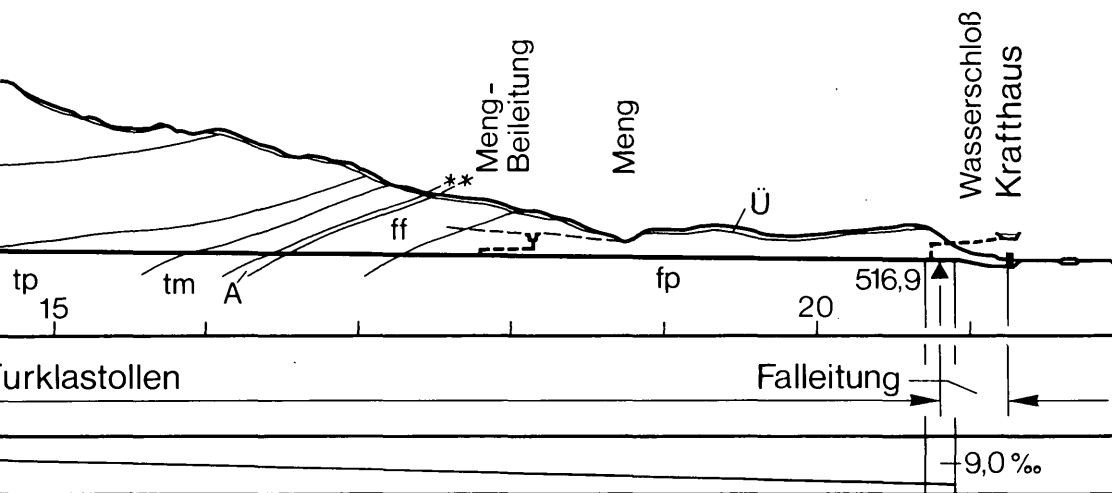
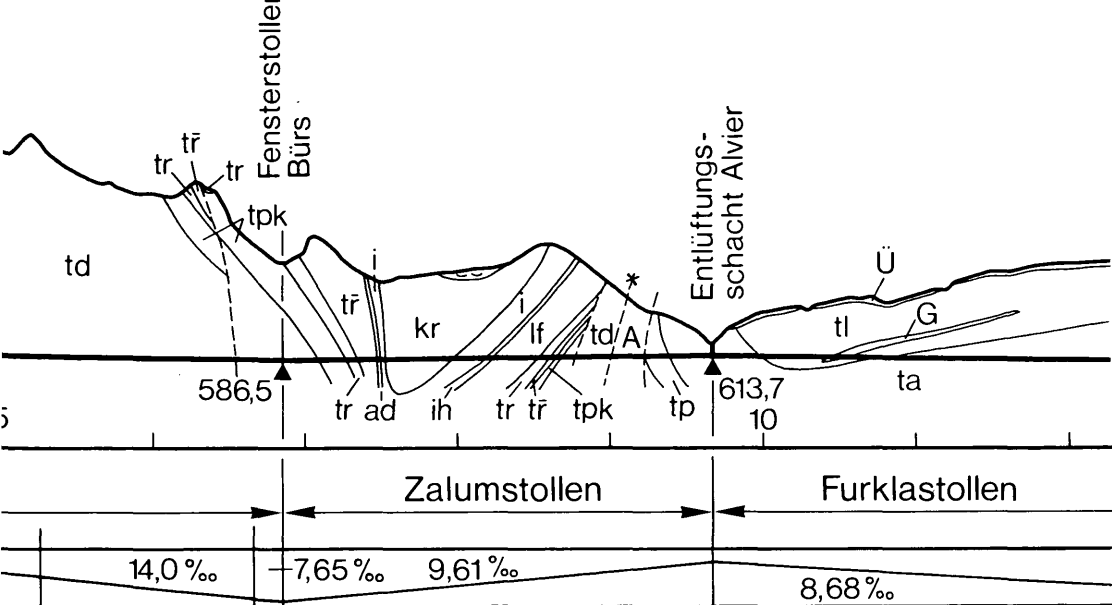
Penninikum Vorarlberger Flysch

ff Fanola Serie

fp Plankner-Brücke Serie

Unterostalpin

A Arosa-Zone



Verostalpin Lechtaldecke und Basisschollen

Quaderschiefer	tl	Raibler Schichten
Styryenkalke	G	Raibler Gips
Diolarite und rote Kalkmergel	ta	Arlbergschichten
Streifenmergel	tp	Partnachschieben
Basal Schichten	tm	Muschelkalk
Verhätischer Riffkalk	rw	Reichenhaller Rauhwacken
Basener Schichten	tb	Buntsandstein
Styryenkalke	P	Paläozoische Schiefer
Styryenkalke	Pg	Pyllitgneis und Glimmerschiefer

Kraftwerksgruppe Sellrain-Silz: Kluftwasserhaushalt der Druckschächte

von E. Tentschert⁺⁾

Die Kraftwerksgruppe Sellrain-Silz der TIWAG (im Bau, Betriebsaufnahme 1981) nützt den steilen N-Abfall der nördlichen Stubai-er Alpen zum Inntal (relativer Höhenunterschied der Gipfel ca. 2200 m). Durch ein Beileitungssystem von 26 km Stollen und 4,3 km Rohrleitungen wird das Wasser auf ca. 1900 m Seehöhe gefaßt und im Speicher Längental (3 Mio m³) gesammelt. Der Jahresspeicher Finstertal (60 Mio m³) mit dem gleichnamigen Steinschüttdamm (V = 4,4, Mio m³) wird größtenteils durch Pumpbetrieb gefüllt; die Abarbeitung des Wassers erfolgt in 2 Stufen über 8,9 km Druckschächte bzw. Stollen und erreicht mit einer maximalen Gesamtfallhöhe von 1678,5 m eine Werksleistung von 761 MW sowie ein Arbeitsvermögen von 720 GWh.

Die Stollen und Schächte durchörtern durchwegs Gesteine des sog. "Ötztaler - Stubai-er Altkristallins", einer hochmetamorphen Serie von kristallinen Schieferen (Gneise, Glimmerschiefer, Amphibolite, Granite usw.) und wurden teils konventionell, teils vollmechanisch aufgeföhren.

In diesen Stollen kam es zu z.T. größeren Wassereinbrüchen (bis max. 200 l/s). Außer der Vortriebserschwer- nis und ihrer Bedeutung für die Beweissicherung (Trockenfallen genutzter Obertagequellen) erlangt die Kenntnis des Wasserhaushalts zusätzliche Bedeutung wegen der Bemessung der Stahlauskleidung der Schächte auf Außendruck bzw. Beulsicherheit sowie zur Verhinderung größerer Wasserverluste in den betonausgekleideten Strecken.

Die einschlägige Literatur löst diese Probleme meist nur ansatzweise oder modellhaft idealisiert, weshalb detaillierte Beobachtungen und Messungen nötig waren, die allerdings durch teils günstige geologische, topographische und terminliche Voraussetzungen begünstigt wurden.

So war es beim Druckschacht der Unterstufe möglich, aus der Kombination von der Wasserganglinie des Sondierstollens mit geologisch-topographischen Daten, Druckmessungen und der Abnahme der Schüttungsmengen bzw. dem Ausbleiben von Obertagequellen das wassergefüllte Kluftvolumen eines Granitgneiskörpers zu rekonstruieren.

Nach einem vorübergehenden Beharrungszustand kam es durch den erst später erfolgten Ausbruch des Druckschachtes zu einer weiteren Absenkung. Seit der Injektion der Stollenquellen im Zuge der Vorspanninjektion der Auskleidung kann ein stetiges Ansteigen des Kluftwasserspiegels festgestellt werden.

⁺⁾ Anschrift des Verfassers: Dr. Ewald Tentschert, Tiroler Wasserkraftwerke AG, Landhausplatz 2, A-6020 Innsbruck

Im Druckschacht der Oberstufe (Schiefergneise und Hornblende-gneis) konnten die Schwankungen des Kluftwasserspiegels durch Manometermessungen verfolgt werden. Die Wassermengen lagen zwar nur bei max. 8 l/s vor Ort, bei der Druckprobe im fertig betonierten bzw. gepanzerten Schacht zeigten sich Wasserverluste von fast 7 l/s, welche über haarfeine Betonschwindrisse in das inzwischen teilweise entleerte Kluftsystem erfolgten.

Durch gezieltes Anbohren und Injizieren dieser Klüfte konnten die Wasserverluste auf 1,6 l/s reduziert werden. Der ursprüngliche Kluftwasserspiegel wurde damit wiederhergestellt.

An den zwei gezeigten Beispielen zeigt sich deutlich, daß eine Abschätzung von Wassereinbrüchen bzw. -verlusten weder mit einer "Ergiebigkeitsziffer" noch mit einem Durchströmungsmodell zuverlässig gemacht werden kann. Vielmehr gehen der örtlich zutreffende räumliche Durchtrennungsgrad (Kluftkommunikation) sowie vor allem die hydrogeologisch wirksame Kluftöffnungsweite und die Lage des Stollens zum Bergwasserspiegel als wesentlichste Parameter in die Überlegungen ein.

Tabelle:
Kluft Hohlräume verschiedener Gesteine

Gestein	Ort	Kluft Hohlräume (%)	ermittelt durch	Lit.	Anmerkung
Granitgneis	Silz	0.25 - 0.3	Stollenwasser, Quellen Kluftmessg.	TIWAG intern 1975	
Hornblendegneis (Amphibolit)	Kühtai	ca. 0.05	Stollenwasser, Kluftmessg.	TIWAG intern 1980	
Amphibolit	Kaunertal	0.17	Stollenwasser, Kluftmessg.	Detzlhofer 1969	
Granitgneis	Kaunertal	0.25	Felsinjektionen	TIWAG intern	Auflock.-Zone
Dolomit	Imst	0.3	Stollenwasser	TIWAG intern	tw. verkarstet
Kalk	Schneealpe	3 - 8	Stollenwasser, Kluftmessg.	Gattinger 1973	
Kalk	Rhein. Schiefergeb.	6.5	Injektion	Heitfeld 1965	
Schluffstein	Rhein-Schiefergeb.	0.1	Injektion	Heitfeld 1965	
Sandstein	Spessart	0.13	Quellen	Udluft 1972	
Sandstein	Schwarzwald	ca. 0.05	Quellen	Eissele 1966	
Granit	Capivari-Cacholera	0.25	Durchströmungsversuch	Bourvard/Pinto 1969	$k_F = 4.3 \times 10^{-7}$

Zum Problem quellfähiger Gesteine im Tunnelbau

von E.H. Weiss, H.W. Müller, G. Riedmüller & B. Schwaighofer⁺⁾

Die vorliegenden Ergebnisse entstammen der Zusammenarbeit des Instituts für Baugeologie mit dem Institut für Geotechnik der Universität für Bodenkultur. Es ist seit längerem bekannt, daß Quellerscheinungen insbesondere bei anhydritführenden und tonigen Gesteinen vorkommen (z.B. EINFALT, FECKER, GÖTZ 1978). Bei beiden Gesteinen findet der Quellvorgang durch Wasseraustritt statt. Beim Anhydrit werden über eine Lösungsphase Wassermoleküle in das Kristallgitter eingebaut, wobei unter Volumsvermehrung und einer Änderung der Kristallstruktur Gips gebildet wird. Die Quellung in Tongesteinen erfolgt durch eine reversible Wassereinlagerung in bestimmte quellfähige Tonminerale (z.B. Montmorillonit), wobei die Kristallstruktur erhalten bleibt und es zu einer Aufweitung des Schichtgitters kommt. Die von uns durchgeführten Untersuchungen erfolgten an Tongesteinen, die bei einem Tunnelprojekt in der Molassezone aufgefahren wurden. Der Tunnel durchörtert Gesteinsserien der subalpinen Molasse, die sich aus Süßwasser- und Meeresablagerungen zusammensetzt. Es handelt sich dabei um eine alttertiäre Wechselfolge von Konglomeraten, Sandsteinen, Mergeln und Tonmergeln mit geringmächtigen Kohleeinlagerungen.

Während Konglomerate und Sandsteine bautechnisch kaum Schwierigkeiten bereiteten, erwiesen sich die Tonmergel teilweise als sehr wasserempfindlich, wodurch Quelldruckerscheinungen hervorgerufen wurden. In diesen Tunnelstrecken kam es im Zuge der Bauausführung zu Sohlhebungen, die einerseits zu Hebungen in der Sohlmitte, andererseits zu Zerstörungen an den Auflagerändern geführt haben.

In den Abschnitten der stärksten Hebung ($25 \text{ cm} \pm 5 \text{ cm}$) wurden 9 Kernbohrungen abgeteuft, aus denen Probenmaterial für die mineralogischen und geotechnischen Untersuchungen gewonnen wurde. Durch mineralogische Analysen wurde der Gesamtmineralbestand sowie die Verteilung der Schichtsilikate in der Fraktion $< 2 \mu$ erfaßt (Abb. 1). Aus den Mineraldaten konnte ein für das Quellverhalten signifikanter Parameter abgeleitet werden. Er ergibt sich aus der Summe der Schichtsilikate (SCH), dem Gehalt an aufweitbaren Tonmineralen (MO) sowie dem Gesamtkarbonatgehalt (KA). Es ist anzunehmen, daß die aufweitbaren Tonminerale und der Schichtsilikatanteil direkt proportional zum Quellverhalten sind, während die hauptsächlich in der Grundmasse als Kittsubstanz auftretenden Karbonate der Quellung entgegenwirken ($\frac{\text{SCH} \times \text{MO}}{\text{KA}}$).

⁺⁾ Anschrift der Verfasser: Univ.-Prof. Dr. Ernst H. Weiss, Dipl.-Ing. Dr. Harald W. MÜLLER, Univ.-Prof. Dr. Gunther Riedmüller, Univ.-Prof. Dr. Bernd Schwaighofer, Institut für Bodenforschung und Baugeologie der Universität für Bodenkultur, Gregor-Mendel-Straße 33, A-1180 Wien

ABB. 1: MINERALOGISCHE ANALYSEN

PROBE NR.	SEMIQUANTITATIVER GESAMTMINERALBESTAND (REL.%)					TONMINERALVERTEILUNG IN DER FRAKTION <2μ (REL.%)					SCH X MO KA	
	SCH	QU	KA	FSP	DO	SONSTIGE	MO	ML	ILL	CHL	KAO	
3850/1	61	13	26	-	Sp	-	61	-	21	Sp	18	143,1
3850/2	70	10	20	-	Sp	-	64	Sp	19	-	17	224,0
5524	37	27	30	-	6	-	61	-	25	-	14	62,7
5596/1	56	18	20	1	3	-	62	Sp	25	4	9	151,0
5596/2	15	36	42	4	3	-	nicht bestimmt					-
5650	39	10	34	-	1	Ankerit _g	61	Sp	23	5	10	54,0
5750/1	22	43	30	-	5	-	57	-	21	Sp	18	35,8
5750/2	35	25	32	-	8	-	56	-	28	6	10	49,0
6170/1	10	Hauptgemengteil					Sp	5	-	nicht bestimmt		-
6170/2	13	44	37	6	Sp	-	80	-	11	-	9	28,1
6170/3	10	34	52	Sp	4	-	71	1	14	3	10	70,0
6270/1	38	25	32	Sp	5	-	62	Sp	25	3	11	63,7
6270/2	48	18	33	-	Sp	-	73	Sp	15	3	8	106,2
MQ I	47	21	27	-	5	-	64	--	22	Sp	14	94,0
MQ II	34	11	50	-	5	-	74	-	16	Sp	10	45,7
MQ III	41	24	32	-	3	-	43	-	45	5	6	50,4

ABB. 2: GEOTECHNISCHE ANALYSEN

PROBE NR.	DICHTE	WASSERGEHALT. (%)			SCHWELLDRUCK (MN/m ²)			max	✓	SCHWELLDEHNUNG (%)		
		Einbau	Ausbau	x	y	z	σ_s	$\bar{\sigma}_s$		x	y	z
3850/1	2,43	2,0	9,2	0,53	0,86	1,20	1,20	0,86		2,8	3,4	3,7
3850/2	2,41	2,6	12,0	1,50	1,58	1,80	1,80	1,63		4,7	4,9	5,8
5524	2,54	1,1	6,7	0,06	0,13	0,11	0,13	0,10		3,2	3,7	3,4
5596/1	2,40	3,4	15,3	0,91	1,14	1,21	1,21	1,09		5,2	6,2	6,8
5596/2	2,57	1,1	3,8	0,06	0,01	0,05	0,06	0,04		1,6	0,3	1,9
5650	2,51	1,9	7,8	0,34	0,49	0,26	0,49	0,36		2,7	3,8	3,2
5750/1	2,56	1,3	4,3	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01		0,5	0,5	0,5
5750/2	2,56	1,7	3,4	0,07	0,08	0,04	0,08	0,06		0,6	0,4	0,9
6170/1	2,44	1,0	4,1	0,09	0,16	0,13	0,16	0,13		0,4	0,5	0,4
6170/2	2,54	1,2	2,9	0,05	0,09	0,06	0,09	0,06		0,2	0,4	0,3
6170/3	2,43	3,2	9,7	0,50	0,42	0,64	0,64	0,52		4,1	3,7	4,8
6270/1	2,50	1,7	7,0	0,44	0,42	0,59	0,59	0,48		2,4	2,9	2,7
6270/2	2,50	0,8	8,8	0,52	0,78	0,85	0,85	0,72		3,9	4,5	5,2
MQ I	2,44	2,5	13,9	0,54	0,78	0,49	0,78	0,60		6,9	8,9	6,0
MQ II	2,48	2,4	8,8	0,55	0,71	0,36	0,71	0,54		3,6	4,8	3,3
MQ III	2,50	1,4	6,4	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02		3,0	5,0	3,0

Die geotechnischen Analysen des Quellverhaltens erfolgten mit Hilfe eines dreiaxialen Schwellgeräts (PREGL et al. 1979). Bestimmt wurden: Dichte, Wassergehalt, Quelldruck und Quellung (Abb. 2).

Die mineralogisch ermittelten Schwellparameter wurden mit den Ergebnissen der geotechnischen Analysen in Beziehung gebracht, wobei der maximale Quelldruck ($\max \sigma'_s$) und der aus den drei Quelldrücken berechnete Mittelwert ($\bar{\sigma}'_s$) Verwendung fanden.

Aus den ausgezeichneten Korrelationen der Mineralparameter mit den Quelldruckwerten läßt sich ableiten, daß Schichtsilikatführung und Montmorillonitgehalt in signifikanter Weise die Quelleigenschaften toniger Gesteine beeinflussen (Abb. 3).

Literatur

EINFALT, H.-C.; FECKER, E. & H.-P. GÖTZ (1979): Das Dreiphasensystem Ton, Anhydrit, Gips und dessen zeitabhängiges Verhalten bei Zugabe von wäßrigen Lösungen. - Intern. Kongr. ü. Felsmech. Proc. Vol. 1, Montreux.

PREGL, O.; FUCHS, M.; MÜLLER, H.; PETSCHL, G.; RIEDMÜLLER, G. & B. SCHWAIGHOFER (1980): Dreiaxiale Schwellversuche an Tongesteinen. - Geotechnik 1980/1.

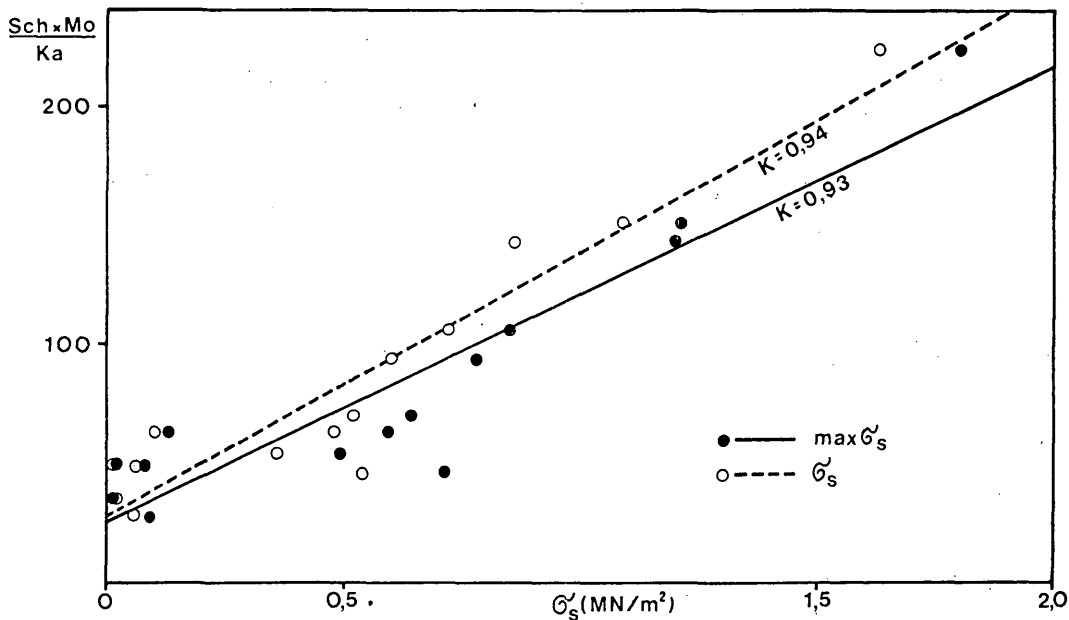


Abb. 3

Geologische und technische Erkundungen im Untergrund hochalpiner Sperrenstellen

von H. Litscher⁺⁾

Im Rahmen der KW-Gruppe Fragant wird das Wasserdargebot der zur Möll abfließenden Bäche der Sonnblickgruppe (3105 m) in den Hohen Tauern in mehreren Stufen über eine Gesamtfallhöhe von 1700 m genutzt. Die Werksgruppe gliedert sich im wesentlichen in drei Höhenstufen:

Das KW Außerfragant (700 m) als Unterstufe, welches das in den Oberstufen abgearbeitete Wasser nochmals bis zur Möll verwertet.

Das KW Innerfragant (1200 m) mit den drei Teilstufen Oscheniksee, Wurten und Haselstein, die untereinander hydraulisch in Verbindung stehen.

Das KW Zirknitz (1700 m) als Oberlieger der Wurtenstufe und die Nebestufen KW Gößnitz, KW Fleiß I und II.

Sämtliche Kraftwerke stehen bereits in Betrieb und werden zum Zeitpunkt des Endausbaus im Jahre 1985 mit einer Engpaßleistung von 343 MW und einem Jahresarbeitsvermögen von 571 Mio kWh der KELAG zur Verfügung stehen.

Die Bauarbeiten wurden im Jahre 1963 mit der Errichtung des KW Gößnitz an der Möll begonnen.

Die Aufschließung zur Nutzung der Wasserkraft in den hochalpinen Regionen der Alpen setzt eine gründliche geologische und morphologische Kartierung des in Frage kommenden Gebietes voraus. Bereits in den Jahren 1949 bis 1959 hat Ch. EXNER geologische Kartierungen im mittleren Abschnitt der Hohen Tauern durchgeführt und die Ergebnisse in der 1964 erschienenen "Geologischen Karte der Sonnblickgruppe" (mit Erläuterungen) veröffentlicht. In dieser Arbeit werden die geologischen und petrographischen Besonderheiten und ihre jeweiligen tektonischen Positionen im Gesamtaufbau eingehend erläutert.

Der ca. 40 km lange Sonnblickkern, der durch die Kalkphylliteinheiten der Mallnitzer Mulde im Norden sowie die umrahmende Schieferhülle und im Süden von der Matreier Schuppenzone und dem Altkristallin der Kreuzeckgruppe begrenzt wird, erstreckt sich in NW-SE-Richtung vom Gipfel des Hohen Sonnblicks (3105 m) bis nach Kolbitz im Mölltal. Diese geologische Einheit wird morphologisch in drei Geländestufen gegliedert (KIESSLING 1969):

- 1) Geländestufe in 2600 m - 2200 m
- 2) Langgezogene NW-SE streichende Verebnung in 1900 m - 1700 m
- 3) Tieferliegende Flur bei 1200 m

Im vorgelegten Bericht werden die geologischen und geotechnischen Untersuchungen im Untergrund zweier Sperrenstellen näher

⁺⁾ Anschrift des Verfassers: Dr. Heinz Litscher, Kärntner Elektrizitäts AG, Arnulfplatz 2, A-9020 Klagenfurt

besprochen.

I

In den Jahren 1969 bis 1971 wurde das Gebiet des Großsees (2300 m), das im Talschluß der Kleinen Zirknitz liegt, nach einer geologischen Übersichtskartierung in das KW-Projekt mit einbezogen. Bei nachfolgender Detailkartierung wurde vor allem die Karschwelle des Großsees untersucht. Diese geologischen Aufnahmen hatten den Zweck, die Beschaffenheit des SW-Ufers des Sees an der Oberfläche und im Untergrund sowie die Geologie in der Umrahmung des Sees und die tektonischen Strukturen zu klären. Nach Auswertung der vorliegenden Daten konnte die Möglichkeit eines Aufstaus (Steinschüttddamm) in Betracht gezogen werden. Die Oberflächenkartierung der Seeschwelle zeigte günstige Gebirgsverhältnisse und es wurden zur Erkundung des Felsaufbaus 15 Rotationskernbohrungen mit einem max. Durchmesser von 120 mm und bis zu einer Tiefe von 52,5 m abgeteuft. Gleichlaufend mit der Gewinnung der Bohrkerne und der damit verbundenen geologischen Interpretation wurde die Wasserdurchlässigkeit in der Karschwelle durch Wasserabpressungen in 5 m-Passen mitlaufend mit dem Bohrvortrieb bestimmt. Die Wasseraufnahmefähigkeit des Gebirges wurde nach LUGEON ermittelt.

Der zur Bestimmung der LUGEON-Werte benötigte Abpreßdruck von 10 kp/cm² setzt sich, wenn kein Bergwasserspiegel vorhanden ist, aus dem hydrostatischen Druck der Wassersäule im Bohrloch und dem mechanisch erzielten Restdruck zusammen. Bei vorhandenem Bergwasserspiegel wird nur die Differenz Bergwasserspiegel-Bohrlochoberkante zum mechanischen Druck dazugezählt.

1. Der geologische Schnitt durch die Sperrenachse

Durch die Bohraufschließung wurden die aus der Oberflächenkartierung bekannten Hauptstrukturen in ihrer Einfallsrichtung bestätigt. Das s-Flächengefüge fällt mit 10-20° nach SW; in Wechsellagerung sind Gneise und Granite aufgeschlossen. Zusätzlich liegt ein Augengneispaket in der orographisch rechten Sperrenflanke. Basische Lagen und aplitische Gänge wurden wiederholt angetroffen. Die Verwitterung reicht entlang von Klüften bis zu einer Tiefe von 10 m ab Geländeoberkante. Durch die orographisch rechte Sperrenflanke schneidet eine Mylonitzone, die einer regional deutlich ausgebildeten Störung zuzuordnen ist. Orographisch links sind Zerrüttungsstreifen festzustellen.

Die nur in Resten vorhandene Überlagerungsdecke setzt sich aus Blockwerk, aus Bergsturm Massen und im zentralen Sperrenbereich aus einer dünnen Grundmoränenlage (1,5 m) zusammen.

2. Auswertung der Wasserabpreßversuche

Generell ist festzustellen, daß die Wasserwegigkeit innerhalb der Karschwelle an s-parallel verlaufende Zonen (Flächengefüge) gebunden ist. Da die Kernbohrungen jeweils bis zu einer Tiefe vorgetrieben wurden, wo die Wasserdurchlässigkeit unter 1 l/m min bei 10 kp/cm² abgesunken ist, kann auch die Grenzlinie zum tieferliegenden undurchlässigen Fels im Untergrund gezogen werden.

3. Abdichtung der Seeschwelle durch Zementinjektionen

Da sich die Tiefe der Dichtungsfront nach der Höhe des darüberliegenden Sperrenbauwerks zu richten hat, wurde im gegebenen Fall eine Schleiertiefe von 25 m festgelegt. Die senkrecht abgeteufte Bohrungen im Abstand von 6 m durchstoßen mehrere s-Flächenscharen. Den Injektionslöchern (Hammerschlagbohrungen) wurde vorausseilend im Abstand von jeweils 36 m eine Rotationsbohrung bis zu einer Tiefe von 30 m zugeordnet. Auch hier wurden Wasserabpressungen vorgenommen.

Die Felsinjektionen erfolgten in Passen von jeweils 5 m von unten nach oben mit einem max. Injektionsdruck von 25 kp/cm^2 in der 20-25 m - Passe. Gleichzeitig wurde die Injektionsmenge mit 1000 kg Zement je lfm festgelegt. In Zonen mit größerer Aufnahme wurde im Abstand von 1-3 m rechts oder links des Bohrloches eine neue Injektionsbohrung abgeteuft. Damit wollte man eine flächige Ausbildung der Dichtfront erzielen. Mit diesem vorerst zurechtgelegten Injektionsschema wurde der Gesamtschleier eingebracht und es zeigte sich eine ausgezeichnete Übereinstimmung zwischen Injektionsgutaufnahme-Wasserdurchlässigkeit und Lagerung des Gebirges.

Durch zwei Piezometerbohrungen am luftseitigen Dammfuß konnte nachgewiesen werden, daß bei Vollstau (50 m über dem ursprünglichen Seespiegel) keine Hebung des Bergwasserspiegels erfolgte (Stauinhalt $26,5 \text{ hm}^3$). Am Beispiel des Großsees konnte in relativ einfacher Form die Kette der Voruntersuchungen bis zu den notwendigen baulichen Maßnahmen klar demonstriert werden. Im Gegensatz dazu steht ein zweiter Speicher, der ebenso in über 2000 m SH innerhalb der Kraftwerksgruppe Fragant liegt.

II

Bereits im Jahre 1967 wurde mit den Bauarbeiten am Großen Oscheniksee begonnen. Der 116 m tiefe Karsee, der im Schnittpunkt mehrerer Störungsbahnen im SE-Flügel des Sonnblickkerns liegt, wurde ausgepumpt und in weiterer Folge durch einen Schrägschacht von unten her angefahren. In 4 Ausbaustufen wurde dann auf die Seeschwelle ein über 100 m hoher Steinschüttdamm errichtet. Bevor es jedoch zum Bau dieses Damms kommen konnte, mußten umfangreiche geologische und geotechnische Untersuchungen vorgenommen werden.

1. In der Seeschwelle konnte schon bei der Oberflächenkartierung ein weit verzweigtes Netz von Klüften und Störungsbahnen in den jeweiligen Hauptstörungsrichtungen festgestellt werden. Durch Bohraufschlüsse und Wasserabpreßversuche wurden diese zum Teil auch im Untergrund nachgewiesen. Außerdem konnte auch eine petrographische Differenzierung des Gesteinsaufbaus erkundet werden. Es treten vorwiegend Augengneise und massige Granitgneise auf, untergeordnet Amphibolit- und Aplitgranite.

Aufgrund der Kartierungen und Bohrungen sowie der Kenntnis der regionalen Gefügeverhältnisse konnte eine Gliederung des geologisch-tektonischen Baus in der Seeschwelle durch ein Blockdiagramm veranschaulicht werden. Es stellte sich heraus, daß es im Zuge der tektonischen Ereignisse zu unterschiedlichen Verstellungen einzelner von Störungen und Klüften begrenzter

Teilkörperverbände gekommen ist. Dadurch waren auch für die nachfolgenden Abdichtungsarbeiten in der Seeschwelle uneinheitliche Injektionserfolge zu erwarten.

2. Ähnlich wie am Großsee wurde auch hier nach Feststellung einer generellen undurchlässigen Zone im Untergrund ein 25 m tiefer Injektionsschleier mit einem Bohrlochabstand von 6 m eingebracht. Auch wurde eine Verdichtung des Schleiers bei erhöhter Zementaufnahme vorgenommen. Durch die Aufnahme des Injektionsguts wurde deutlich das Kluftgefüge mit seinen auf- und absteigenden Ästen wiedergegeben. Der Nachweis dafür erfolgte durch Kontrollbohrungen.

Der Injektionserfolg wurde bei Vollaufstau durch eine max. Gesamtdurchlässigkeit in den Drainagen von unter 10 l bestätigt (Stauinhalt 33 hm³). Die Gegenüberstellung beider Sperrenstellen, die sich in der Oberfläche weder durch die Morphologie noch durch die Geologie wesentlich unterscheiden, zeigen im Untergrund, vor allem bedingt durch die tektonischen Ereignisse, deutliche Unterschiede. Diese Unterschiede konnten durch die geologischen Untersuchungen geklärt und nachgewiesen werden.

Liste der Subventionsgeber und Spender

Die IV. Bodensee-Tagung für Ingenieurgeologie in Bregenz wurde in großzügiger Weise unterstützt von:

AMT DER STADT BREGENZ
AMT DER TIROLER LANDESREGIERUNG
AMT DER VORARLBERGER LANDESREGIERUNG
ARLBERG STRASSENTUNNEL AG, INNSBRUCK
BETON- UND MONIERBAU GES.M.B.H., INNSBRUCK
KÄRNTNER ELEKTRIZITÄTS-AG, KLAGENFURT
OBERÖSTERREICHISCHE KRAFTWERKE AG, LINZ
ÖSTERREICHISCHE DONAUKRAFTWERKE AG, WIEN
ÖSTERREICHISCHE ELEKTRIZITÄTSWIRTSCHAFTS-AG, WIEN
A. PORR AG, ALLGEMEINE BAUGESELLSCHAFT, WIEN UND INNSBRUCK
TAUERNKRAFTWERKE AG, INNSBRUCK
VORARLBERGER KRAFTWERKE AG, BREGENZ
VORARLBERGER ILLWERKE AG, BREGENZ

Ferner haben gespendet:

ÖSTERREICHISCHE DRAUKRAFTWERKE AG, KLAGENFURT