

# DIE BEDEUTUNG DER GEWÖLBEWIRKUNG IN DER BAUGEOLOGIE

Wolfgang DEMMER

## Inhaltsverzeichnis

- 1.0. EINLEITUNG
- 2.0. GEWÖLBE, GEWÖLBEWIRKUNG
- 3.0. GEWÖLBE IN ABHÄNGIGKEIT VON IHRER RÄUMLICHEN LAGE
- 4.0. VERTIKALE GEWÖLBE
  - 4.1. Naturbögen
  - 4.2. Halbhöhlen
  - 4.3. Unterirdische Gänge, Höhlen und Kavernen
  - 4.4. Vertikale Gewölbe und Baukunst
    - 4.4.1. Stollen, Tunnel und Kavernen
    - 4.4.2. Brücken
- 5.0. SCHRÄGE GEWÖLBE
  - 5.1. Kare und ähnliche Geländeformen
  - 5.2. Bergsturnischen
  - 5.3. Rutschnischen, Bergsackungsnischen
    - 5.3.1. Rutschnischen
    - 5.3.2. Bergsackungsnischen
  - 5.4. Schlußfolgerungen auf die Baupraxis
    - 5.4.1. Bauen in Rutsch- und Bergsturzmassen
    - 5.4.2. Bauen mit Ausnützung schräger Gewölbe
- 6.0. HORIZONTALE GEWÖLBE
  - 6.1. Horizontale Gewölbe und Baukunst
- 7.0. SCHLUSSWORT

## 1.0. EINLEITUNG

Die Intention der vorliegenden Überlegungen und Darstellungen ist es, für alle Planenden und Ausführenden im Tiefbau Anregungen zu vermitteln, daß die **Gewölbewirkung** nicht nur bei vertikalen Lastabtragungen sicherheitserhöhend und kostensparend genutzt werden kann, wie das im modernen Hohlraumbau allgemein Stand der Technik ist, sondern praktisch auch in allen räumlichen Lagen Vorteile bringt, wenn die Voraussetzungen dazu gegeben sind.

Es hat vieler Jahrtausende in der Menschheitsgeschichte bedurft, bis das Gewölbe in das Bewußtsein des Menschen eingedrungen ist. Das ist umso erstaunlicher, zumal die Natur eindrucksvolle Beispiele in den verschiedensten Größenordnungen und räumlichen Ausrichtungen auf Schritt und Tritt bietet.

So gräbt der Maulwurf instinktiv seinen Laufgang als Röhre und der Fuchs seinen Bau als Minikaverne. Selbst ein Kind macht im Sandkasten bald die Erfahrung, daß nur ein oben abgerundetes Loch hält und Karstschläuche und Höhlen von Bestand schließen fast immer mit einem gewölbten Dach ab. Unsere Urahnen haben zwar solche Höhlen schon als sichere Zuflucht- und Wohnstätten genutzt, aber es hat noch sehr lange gedauert, bis man das Gewölbe als Möglichkeit einer Dach- oder Brückenkonstruktion entdeckte.

Am hartnäckigsten wurde das Gewölbe im Bergbau abgelehnt. Eine Jahrtausende lange Tradition, die Zugänge zu den begehrten Erzen oder Bergsalzen sowie deren Abbaue mit Holz abzusichern, was zwangsläufig zu gerader Firstausbildung führen mußte – als klassisches Beispiel gilt die sogenannte „Türstockzimmerung“ – konnte weltweit nur äußerst zögernd auf die Erkenntnisse der modernen Stollen- und Tunnelbautechniken umgestellt werden. Dieser Prozeß ist bis heute noch nicht abgeschlossen.

Im Hochbau wurde hingegen das Gewölbe zwar schon wesentlich früher entdeckt, doch anetrachts der geistigen und handwerklichen Leistungen früher Hochkulturen immer noch reichlich spät. Weder die alten Kulturen des Orients noch die Ägypter oder die Kulturvölker Amerikas, ja nicht einmal die Griechen nutzten in der Baukunst bewußt die Vorteile der Gewölbewirkung. Alle Dach- und Brückenkonstruktionen waren vorwiegend von der Länge der verfügbaren, relativ leichten und auch gut zu bearbeitenden Baumstämme abhängig oder von der gewinnbaren Länge und dem limitierten Transportgewicht von Natursteinblöcken. Dort und da gab es Ansätze, auch mit Steinbaustoffen Hohlräume zu überdachen, indem man den nächsthöheren Quader von beiden Hohlraumseiten etwas vorschob, bis der Zusammenschluß erreicht war. Doch mit diesen „falschen Gewölben“, wie wir sie insbesondere von den Mayas aber auch von den Azteken - seltener von den Inkas - kennen, blieben die Spannweiten der Dachkonstruktionen eher bescheiden.

Die ersten, die die Gewölbewirkung nach unserem Verständnis begriffen und in der Baukunst genutzt haben, waren angeblich die ETRUSKER, jene, die sie exzessiv genutzt haben, die RÖMER. Wir staunen heute noch über die kilometerlangen, manchmal sogar mehrstöckigen Bogengalerien für Wasserleitungen oder das Bogennetzwerk der Amphitheater. Den allergrößten Respekt verdienen jedoch die Kuppelbauten. Das prominenteste Beispiel ist das Pantheon in Rom, schon im frühen 2. Jh. unter Kaiser Hadrian errichtet, mit den für damalige Verhältnisse unvorstellbaren Abmessungen von 43m in Durchmesser und Höhe. Selbstverständlich gingen die Römer mit dem Gewölbe auch in die Tiefe, womit die eigentliche Heimat des Geologen und die Rückkehr zu dem gegenständlichen Thema wieder erreicht wäre.

## 2.0. GEWÖLBE UND GEWÖLBEBWIRKUNG

Ein Gewölbe wird lt. Brockhaus definiert als „eine räumlich gekrümmte, massive Raumüberdeckung, die so geformt ist, daß ihre Querschnitte nur auf Druck beansprucht werden. Gewölbe üben auf ihre Widerlager einen Schub aus“.

Bei dieser Definition denkt man selbstverständlich in erster Linie an alle Möglichkeiten, einen Hohlraum zu überbrücken. Mehr oder weniger vertikal einwirkende Lasten müssen über gewölbte Konstruktionen in die Widerlagerbereiche umgelenkt und dort abgetragen werden. Dies wird in gewölbten Stollen-, Tunnel- oder Kavernendächern genauso vollzogen wie bei Bogenbrücken oder Kuppelbauten, nur daß letztere in den wenigsten Fällen direkt den Gründungsboden beanspruchen. Eine der wenigen Ausnahmen sind die Iglus der Eskimos.

Da diese Gruppe von Gewölben jedem im Tiefbau Tätigen geläufig sein dürfte, soll zusätzlich noch auf andere Gewölbe mit schräger oder horizontaler Raumlage aufmerksam gemacht werden. Zumal dabei die eingangs zitierte Definition des Gewölbes nicht mehr ganz zutrifft, muß die Erweiterung mit dem Begriff „Gewölbewirkung“ erfolgen. Für alle drei Gruppen der Gewölbewirkungen, nämlich mit  $\pm$ vertikaler, geneigter und  $\pm$ horizontaler Lastabtragung zeigt uns die Natur den Weg zum besseren Verständnis. Auf die Modelle in der Natur muß die Aufmerksamkeit gelenkt werden, um ein statisches Gefühl für die Umsetzung in der Baukunst zu entwickeln. Der Dialog zwischen Geologen und Bauingenieur soll dadurch bereichert werden.

## 3.0. GEWÖLBE IN ABHÄNGIGKEIT VON IHRER RÄUMLICHEN LAGE

In der folgenden Tabelle wurde versucht, die wichtigsten Kenndaten für die drei Gewölbegruppen in bezug auf ihre räumliche Lage und Wirkungsweise zusammenzufassen. Dabei stand nicht die exakte Definition der Spannungsabtragung in den jeweiligen Widerlagerbereich im Vordergrund, sondern die Vergleichbarkeit mit Beispielen in der Natur. Dem Verfasser ist bewußt, daß es im Wesen eines Gewölbes liegt, einwirkende Spannungen umzulenken und daß es im jeweiligen Widerlagerbereich abermals zu einer Auffächerung in Druck- und Zugkräfte kommen kann, wenn die morphologischen Verhältnisse dies zulassen. Darüberhinaus ändert sich bei variierender Lastaufbringung auch noch die Richtung der resultierenden Kräfte im Widerlagerbereich, wie das zwar kaum in der Natur vorkommt, bei Kunstbauten, wie Brücken oder insbesondere bei Bogenstaumauern, aber statisch und geomechanisch zu beachten ist.

Als ein Naturbeispiel für eine variierende Lasteinwirkung auf ein Gewölbe könnte mit Einschränkungen eine jahreszeitlich bedingte, variierende Bergwasserspiegellage angesehen werden.

## Die Gewölbewirkung in Natur und Technik

		STOFFLICHE VORAUSSETZUNGEN	NATURBEISPIELE	BAUWERKE	
± Vertikale	Belastung und Lastabtragung	Feste und halbfeste Materialien, jedoch keine Flüssigkeiten oder Emulsionen	Diverse Böden und Lockergesteine	Stollen	
			Halbfeste Gesteine	Grabgänge und Baue von Kleintieren Halbhöhlen, Wandnischen etc.	Tunnel (z.B. U-Bahn) Tunnelportalausbildungen
			Festgesteine (Eis)	Karstschläuche und Höhlen Naturbögen mit unterschiedlicher Spannweite in Fels und Eis Gletschertore Halbhöhlen (Eis- Wasser- Winderosion)	Kavernen Bogenbrücken
			Minderwertiger Fels - Böden	Rutschnischen Bergsackungsnischen Kare	Berücksichtigung bei allen Verbauungsplänen (Flächenwidmungsplänen) und Bauvorhaben Geneigte Bogen-Stützmauern Schrägschächte
			Fels, Gebirge ± kompakt	Bergsturz nischen Kare	
			± Horizontale		keine (mit Einschränkung Verkläuerungen in Bach- oder Flußläufen)

Die Einschränkung bezieht sich darauf, daß bei temporären Ereignissen, wie nach Starkregen oder im Verlaufe der Schneeschmelze, beispielsweise Karsthohlräume streckenweise den unterschiedlichsten Belastungsfällen ausgesetzt sein können. Die Bandbreite kann zwischen erhöhtem Außendruck bei ungenügender Drainwirkung des Hohlraumsystems über Druckausgleich bei Vollenfüllung bis erhöhtem Innendruck bei Vollenfüllung des Hohlraumes in einem relativ dichten Streckenabschnitt in Kombination mit einem hochliegenden Einzugsgebiet variieren.

Die vorgenommene **Dreiteilung der Gewölbe** in vertikale, schräge und horizontale Typen erhebt nicht Anspruch auf exakte Definitionstreue. Sie erleichtert aber die angestrebte interdisziplinäre Auseinandersetzung zwischen geologischen Beobachtungen und den Schlußfolgerungen auf technische Maßnahmen.

## 4.0. VERTIKALE GEWÖLBE

In diese Gruppe fallen im wesentlichen die von Menschenhand geschaffenen Bauwerke Stollen, Tunnel, Kavernen – längsgestreckt oder seltener in Kuppelform – und Bogenbrücken. Mit ihnen assoziiert man automatisch den Begriff GEWÖLBE, sodaß detailliertere Erläuterungen über das Kräftespiel entbehrlich erscheinen. Dennoch sind an geeigneter Stelle ein paar grundlegende Gedanken in Erinnerung zu rufen. Zunächst soll aber die Aufmerksamkeit auf anschauliche Beispiele in der Natur gelenkt werden.

### 4.1. Naturbögen

Diesbezüglich sind an prominentester Stelle die faszinierenden Naturbögen des Arches National Parks im Bundesstaat Utah, USA, zu erwähnen. Hier hat die Winderosion in den Sandsteinen großartige Modelle aller unter die Gruppe der vertikalen Gewölbe fallenden Beispiele geschaffen. Stollen- oder Tunnelquerschnitte mit vertikalen oder eingezogenen Ulmen sind zu erkennen, an anderer Stelle sogar Kreisquerschnitte und nicht zuletzt in einem dreibeinigen Naturmonument die Ansätze von Kuppelbauten (Abb. 1 – 3, siehe Anhang). Auf dieses letztgenannte Sandsteingebilde wird nochmals im Kapitel der geneigten Gewölbe hingewiesen, denn so mancher Hochgebirgsgipfel scheint auf sternförmig zusammenlaufenden Felsgraten zu ruhen, zwischen denen schön ausgerundete Steilkare eingebettet sind (Abb. 4).

Im Arches Nationalpark hat die Winderosion aber auch faszinierende Brückengebilde aus dem Sandstein modelliert. Am imposantesten ist der Landscape Arch mit seiner atemberaubenden Spannweite von 93 m bei filigranem Gewölbescheitel (Abb. 5). Seine Standfestigkeit verdankt er einzig der Bogenform.

Felsenfenster gibt es aber auch in den Alpen oder in zerklüfteten Küstengebieten. Wenngleich deren Entstehung nicht durch Winderosion, sondern durch Witterungs- oder Wassereinwirkungen verursacht ist, so vereint all diese weit sichtbaren Naturgebilde das Gemeinsame, daß sie ihre Stabilität der Gewölbewirkung verdanken. Gleiches gilt für Torformen aus Eis, wie Gletschertore am Ende von Gletscherzungen oder seltener von schwimmenden Eisbergen (Abb. 6 - 8).

## 4.2. Halbhöhlen

Auf dem Weg von den mehr oder weniger freistehenden Torbögen und Naturbrücken zu unterirdischen Gewölbebeispielen in der Natur gilt unsere Aufmerksamkeit zunächst allen **Halbhöhlen** und **Felsnischen**. Für deren Entstehung kann neben den vorgenannten Ursachen da oder dort auch noch die schürfende Tätigkeit des Gletschereises verantwortlich sein. Wieder ist in den meisten Fällen ihr Bestand in erster Linie der günstigen Spannungsumlenkung zufolge eines gewölbten Scheitelbereiches zuzuschreiben. Während aber bei den beschriebenen Torbogengebilden eher die zweidimensionale Betrachtung im Vordergrund stand, gewinnt nunmehr auch die räumliche Stützung eine immer größere Bedeutung.

Die vermutlich eindruckvollsten Beispiele sind abermals in den USA zu finden, und zwar im Mesa Verde National Park des Bundesstaates Colorado. Dort haben zahlreiche Halbhöhlen prähistorischen Indianerstämmen Schutz vor Feind- und Witterungsangriffen geboten. Einige sind so groß, daß ganze Dörfer samt Kultstätten in ihnen Platz fanden (Abb. 9). Ihr schützendes Dach ist selbstverständlich gewölbt, aber zusätzlich auch noch bergseitig durchgehend abgestützt. In der Ansichtsilhouette erinnert die größte unter ihnen - besonders in bezug auf die Ausformung des Daches - an manche moderne Großkaverne, wie sie in den letzten Jahren im wesentlichen für Sportanlagen, Entsorgungsanlagen, Garagen (z.B. Großkavernen im Mönchsberg Salzburg mit je 16 m Gewölbespannweite für 1500 PKW-Abstellplätze) oder Mehrzweckhallen (z.B. "Dom im Berg" in Graz unter dem Schloßberg mit 600 m<sup>2</sup> Nutzfläche) gebaut wurden. Weitere Kavernenprojekte sind in Österreich für kulturelle Zwecke geplant, wie beispielsweise das Musiktheater Linz oder ein neues Salzburger Festspielhaus im Mönchsberg.

## 4.3. Unterirdische Gänge, Höhlen und Kavernen

Die Gewölbebetrachtung erlangt erst mit der vollständigen Verlegung des Hohlraumes in den Berg die uneingeschränkte Vergleichbarkeit mit dem modernen Untertagebau. Fündig kann man in der Natur praktisch weltweit in den Verkarstungsgebieten werden, wo der Variantenreichtum an Stollen-, Tunnel- und Kavernengebilden, ergänzt durch Vertikal- und Schrägschächte unübertroffen ist. Das geschulte Auge wird aber auch bald erkennen, welchen großen Einfluß das **Gefüge** auf die Stabilität der Hohlraumoberandung hat. Klammert man die faszinierenden Tropfsteinhöhlen aus, die den Blick auf das Muttergestein verdecken, so wird man im wesentlichen zwei Typen von **stabilen Hohlräumen** erkennen, nämlich jene mit gewölbter Firste und jene, wo weitständige Trennlinien massive Deckelbildungen zulassen. Letztere können einen horizontalen Firstabschluß bilden oder in Anpassung an die Raumlage der Strukturen einen beliebigen Hohlraumquerschnitt erzeugen. Die Spannweiten sind im zweiten Fall meist begrenzt. Bei größerer Ausdehnung gehen sie nahtlos in die Gruppe der instabilen Verbruchstrecken über.

Es gibt aber nicht nur im verkarsteten Kalk anschauliche Naturmodelle des modernen Hohlraumbaues, sondern - weit weniger bekannt - beispielsweise auch in erstarrten Lavagesteinen. Die mehr als 8 km lange, durch tektonische Scherbrüche in drei Streckenabschnitte geteilte **Leviathanhöhle im Rift Valley Kenias** zeigt ein perfektes liegendes Ei-Profil mit einer Horizontalachse zwischen 5,5 und 6 m und einer Vertikalachse von rd. 3 m. Dieses statisch optimale Profil dokumentiert sich auch darin,

daß am Höhlenboden kaum Felsbrocken von einem Nachbruch liegen – ausgenommen sind Streckenabschnitte, die durch aktive tektonische Einwirkungen gestört wurden.

Die Leistungsfähigkeit der Gewölbewirkung wird auch im sogenannten **Siloeffekt** sichtbar. Unter der Voraussetzung einer ausreichenden randlichen Abstützung werden immer wieder zum Teil gefährliche Kuppelbildungen aufgrund von Zufälligkeiten bei den Kornlagerungen beobachtet. Ihre Tragfähigkeit ist beachtlich und nähert sich manchmal sogar der Eigenfestigkeit des Einzelkornes. Kann man sich dieses Phänomen bei grobem, eckigem Korn, wie zum Beispiel Kohle, Erz, Bruchstein etc. noch vorstellen, so soll es auch schon in Getreidesilos zu Kuppelbildungen von mehreren Metern Spannweite gekommen sein – unvorstellbar, wenn man sich die Geometrie des Einzelkornes vergegenwärtigt.

Was durch Zufälligkeiten eine derart überzeugende Wirkung verursacht, kann man auch erzwingen. Im Untertagebau ist dafür die **Spritzbetontechnik** am geeignetsten. Beim Druckstollenbau für das Kraftwerk Prutz- Imst in Tirol weltweit erstmals angewandt, ist der moderne Stollen- und Tunnelbau ohne sie nicht mehr denkbar. Die Spritzbetontechnik ist in der Lage, besonders in minderwertigen Gebirgsformationen das Ausbrechen wichtiger „Schlußsteine“ im Gewölbedach eines Hohlraumes zu verhindern. Dadurch wird die Tragfähigkeit des Gewölbes unter maßgebender Mitwirkung des Gebirges unmittelbar nach der Hohlraumeröffnung aktiviert. Die grundsätzliche Formgebung des Gewölbes im Zuge der Ausbruchsarbeiten ist ebenso Voraussetzung wie eine Mindestfestigkeit des durchörterten Gebirges in Abhängigkeit von der Überlagerungshöhe und der Gewölbespannweite. Kontrollierte Verformungen müssen zugelassen werden. Zeigen diese Parameter Schwachstellen, können sie durch weitere Stützmitteleinbauten (wie durch Stahlbögen, Ankerungen etc.) kompensiert werden. Dies sind auch im wesentlichen die Merkmale der **Neuen Österreichischen Tunnelbauweise (NATM)**. In minderwertigen Gebirgsarten ist der Tübbingausbau der Spritzbetonbauweise überlegen, allerdings nicht so flexibel.

Im **Tagbaugeschehen** vermitteln die **Durchlässe in Stahlfertigteilmontagebauweise** am anschaulichsten die Leistungsfähigkeit eines Gewölbes. Ähnlich wie bei der Spritzbetonbauweise in Stollen und Tunnel erzwingt nur eine verhältnismäßig dünne Schale, nun aber aus Stahlblech, im gewünschten Gewölbequerschnitt vorgefertigt, selbst überschüttete Böden zur Ausbildung erstaunlich tragfähiger Gewölbe. Schon geringe Überdeckungen können große dynamische Lasten schadlos abtragen (Abb. 10), aber auch Überschüttungen bis 30 m Höhe sind dem Autor bekannt. Bei dieser Art der Gewölbeausbildung wird man zwangsläufig auch wieder an den Siloeffekt erinnert.

Ein klares Ende für die Mitwirkung des den Hohlraum umgebenden Mediums ist in Emulsionen und Flüssigkeiten zu sehen.

In dem vorstehenden Kapitel wurde versucht, einen groben Überblick darüber zu geben, was uns die Natur an **sichtbaren Gewölbeformen** anbietet. Mindestens ebenso bedeutend sind jedoch die **unsichtbaren Gewölbebildungen**. Es ist schon seit geraumer Zeit über genaue Spannungsmessungen nachweisbar, daß besonders in sehr kompakten Gebirgsformationen, namentlich in der Fußzone steiler Felsflanken, wesentlich größere Spannungen vorhanden sind, als sie aufgrund der jeweiligen Überlagerungshöhe zu erwarten wären. L. Müller hat dieses Phänomen mit dem bildlichen Begriff „Spreizdruck“ belegt, was nichts anderes bedeutet, als die natürliche Ausbildung von Gewölben im Berg, um Lasten besser zu verteilen. Die sichtbaren Auswirkungen sind

häufig oberflächenparallele Plattenbildungen als Ausdruck der Entspannungskomponente in Richtung freier Oberfläche. Mit deren Erforschung hat sich besonders A. Kieslinger befaßt.

Auch die mehrfach beobachteten, bergschlagähnlichen Entspannungserscheinungen in Talbodennähe und in diesem selbst, wie sie beispielsweise beim Felsaushub zur Gründung von Talsperren aufgetreten sind (u.a. Vajont, Kölnbrein etc.), müssen ursächlich mit den Umlenkkraften von Gewölbewirkungen im Berg in Verbindung gebracht werden. Würde es nicht so einen Spannungsfluß geben, könnten selbst in den härtesten Gesteinsarten keine Hohlräume unter hoher Gebirgsüberdeckung eröffnet werden.

#### 4.4. Vertikale Gewölbe und Baukunst

##### 4.4.1. Stollen, Tunnel und Kavernen

Die Natur hat es vorgezeigt und die Erfahrung hat es gelehrt, daß man im modernen Hohlraumbau ohne konsequente Einbeziehung der Gewölbewirkung weder dauerhaft standfeste noch kostengünstige Untertagebauten errichten kann.

**Die ersten großen Fortschritte** in der Tunnelbautechnik brachte die 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts mit der Erschließung selbst gebirgiger Regionen durch den Eisenbahnbau. Das Gewölbe in der Firste bestimmte schon damals den Regelquerschnitt der Tunnel.

**Die zweite Innovationsstufe** brachte der Kraftwerksbau und untergeordnet die Realisierung von Fernwasserleitungen, besonders in Verbindung mit Wasserversorgungen, und Kanalisationssystemen im 20. Jahrhundert. Neben kilometerlangen Beileitungstollen und Kavernenbauten waren es vor allem Druckstollen, die eine weitere Dimension in die Tunnelstatik brachten. Teilweise hohe **dynamische Beanspruchungen** von innen nach außen (gegen die Bergleibung) waren genauso zu bewältigen wie Standsicherheitsprobleme bei großen Überlagerungshöhen im entleerten Zustand. Auch hier wurde die Gewölbewirkung unverzichtbar und ein Kreisprofil zur Regel.

**Im Großkavernenbau** ist dem Verfasser weltweit kein einziges Beispiel bekannt geworden, wo nicht der Dachabschluß gewölbt ausgeführt wurde. Hingegen gibt es zu viele Großkavernen, bei denen die Erkenntnisse des modernen Untertagebaues unterhalb der Firstzone nicht mehr konsequent genug umgesetzt worden sind. Die Kritik zielt hierbei auf die Ulmen- und Sohlgestaltung. In Abhängigkeit von der einachsialen Gebirgsdruckfestigkeit und der Überlagerungshöhe sind hohe vertikale Ulmenwände oft überfordert, ohne künstliche Stützung die über die Kämpferzone abgeleiteten Gewölbepressungen bruchlos aufzunehmen. Hier hätte in zahlreichen Fällen schon eine leichte Ausrundung Abhilfe schaffen können oder zumindest wären kosten- und wartungsintensive Ankerungen deutlich zu reduzieren gewesen. Ähnliche Überlegungen gelten auch für die Ausgestaltung der Sohle, die zusätzlich zu den Einflüssen der Spannungsumlagerung aus dem Gewölbe auch gelegentlich dem Kluftwasserauftrieb oder manchmal auch Quellerscheinungen standzuhalten hat. Die Pflicht des Geologen ist es, rechtzeitig und überzeugend darauf aufmerksam zu machen, auch wenn eine Befolgung seiner Ratschläge nicht gesichert ist.



**Die dritte Innovationsstufe** im Untertagebau ist mit dem modernen Verkehrswegebau, wie er in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts eingeleitet wurde und bis zur Gegenwart andauert, untrennbar verbunden. Dies gilt gleichermaßen für Straßen wie auch für schienengebundene Verkehrswege. Beiden ist gemein, daß nun wieder große Querschnitte zu bewältigen sind.

Die Zwänge einer dicht bebauten Kulturlandschaft im Verein mit den geforderten großen Radien bedeuten eine weitere Herausforderung. Die Frage an den Baueologen lautet nun nicht mehr, wo die günstigsten Untergrundbedingungen zu finden sind, sondern sie reduziert sich auf die Auskunft, wie groß die Ausbruchsschwierigkeiten entlang einer kaum nennenswert verrückbaren Tunnelachse sein werden.

Diese Zwänge beflügelten die Geomechaniker und Tunnelstatiker unter maximaler Ausnutzung der Computer zu wahren Höchstleistungen in der numerischen Erfassung geomechanischer und tunnelstatischer Modelle. Die diesbezüglichen Fortschritte werden jährlich in zahlreichen nationalen und internationalen Kongressen vorgestellt und sind längst auch fester Bestand der Ausschreibungsunterlagen.

In die gleiche Epoche fällt die rasante Entwicklung von Teil- und Vollschnittmaschinen. Heute sind bereits die ersten Tunnelfräsen mit großen Durchmessern für Bahn- und Straßentunnelquerschnitte im Einsatz (z.B. der Elbtunnel in Hamburg mit 14,2 m Ø) und es ist absehbar, daß sie in naher Zukunft auch bei den großvolumigen Tunnelbauten die konventionelle Ausbruchsmethode genauso verdrängen, wie dies bereits im Stollenbau vollzogen ist.

Aufgrund des großen Bekanntheitsgrades in Fachkreisen kann auf die Präsentation konkreter Beispiele verzichtet werden. Hinzuweisen ist lediglich auf die extremen Anforderungen bei allen Tunnelausbrüchen unter geringer Überdeckung und besonders mit Überbauung, wie sie der städtische U-Bahnbau erfordert, ferner auf unterirdische Verkehrswege unter See- oder Meeresspiegel und nicht zuletzt unter extremen Überlagerungshöhen. Alle diese Bauten sind nur unter konsequenter Nutzung der Gewölbewirkung realisierbar.

**Die vierte Innovationsstufe** für den Untertagebau ist bereits eingeleitet und wird sich nach Meinung des Verfassers schwerpunktmäßig auf den Großkavernenbau konzentrieren. Wir werden es uns in naher Zukunft bald nicht mehr leisten können, weiterhin fruchtbarstes Ackerland bedenkenlos zu überbauen, zumindest nicht für Lagerhaltungen oder weitgehend automatisierte Produktionsstätten. Auch die steigenden Energiekosten werden bei diesen Überlegungen eine immer wichtigere Rolle spielen. Schon heute ist nachweisbar, daß sich beispielsweise unterirdische **Flüssiggaslager** alleine über die Energieeinsparung rechnen. Bei weiter steigenden Energiepreisen wird sich die Rentabilität von unterirdischen Lager- oder Produktionsstätten auf immer mehr Anwendungsfälle ausdehnen – die Sicherheitsaspekte noch nicht miteingerechnet.

Auch die Baustoffgewinnung wird in Zukunft immer mehr zufolge des Natur- und Landschaftschutzes unter die Erdoberfläche abgedrängt werden. Es ist ja schon gegenwärtig kaum mehr ein neuer Steinbruch oder eine Kiesgrube politisch durchzusetzen, doch andererseits wird auch in Zukunft das Baugeschehen nicht wegzudenken sein. Ein Lösungsansatz wären da **Geo-Kombinationsprojekte**. Im Zuge einer untertägigen Baustoffgewinnung könnte beispielsweise schon auf konkrete Nachnutzungen der Hohlräume Rücksicht genommen werden, sodaß schließlich eine Kostenteilung für beide Interessensgruppen wirtschaftlich verkraftbare Projekte

ermöglichen wird. Da für derartige Zukunftsvisionen der Kavernenbau den gegenwärtigen Boom im Tunnelbau ablösen könnte, würde der geologisch – technischen Nutzung der Gewölbewirkung in allen erdenklichen Varianten ein besonderer Stellenwert zukommen. Österreich hätte für eine solche Entwicklung sowohl geologisch als auch technisch die allerbesten Voraussetzungen.

#### 4.4.2. Brücken

Von den Bergtiefen an die Oberfläche zurückkehrend sind vertikale Gewölbebeanspruchungen namentlich bei **Bogenbrücken** zu finden. Anders als im Untertagebau wird das Gewölbe zur Gänze künstlich errichtet. Nur im Bereich der beiden Widerlager wird der Baugrund erreicht und entsprechend beansprucht. In den meisten Fällen wird es sich um Felsgebirge handeln, es müssen aber auch Böden nicht von vornherein für die Aufnahme und Abtragung der Bogenkräfte ausgeklammert werden. Eine entsprechende Widerlagergestaltung, die im wesentlichen auf eine Ermäßigung der spezifischen Bodenpressungen auszurichten ist, wird dazu Voraussetzung sein. Grundsätzlich tritt im Widerlagerbereich von Bogenbrücken ein durchaus vergleichbares Kräftespiel auf wie im Kämpferbereich von Tunnel oder Stollen. In beiden Fällen muß danach getrachtet werden, die Spannungen möglichst stumpfwinkelig zur freien Oberfläche in den Berg einzuleiten. Wo das nicht schon von vornherein durch die Morphologie eindeutig definiert ist, kann technisch nachgeholfen werden.

Bogenbrücken haben die Aufgabe, weite oder enge Talkerben mit flachen oder steilen Flanken zu überspannen. Symmetrische Talquerschnitte sind gefragt, aber nicht unbedingt Voraussetzung. Zu starke Asymmetrieverhältnisse können Bogenbrückenkonstruktionen durch technische Speziallösungen stark verteuern bis verhindern.

Aus der Sicht des Baugeologen haben Bogenbrückenlösungen mehr Vor- als Nachteile. Der Auftraggeber wird hingegen immer die Kostenseite im Auge haben und diesbezügliche Nachteile zu konventionellen Brückenlösungen feststellen. Die Mehrkosten dürften 10-15 % ausmachen und werden hauptsächlich mit dem erhöhten Schalungsaufwand begründet. Die Untergrundverhältnisse sind hingegen in den frühen, oft aber maßgebenden Planungsstadien fast nie ein Thema.

Die Auftragsvergabe an den planenden Ingenieur geschieht meistens nach den günstigsten Kosten für die Ingenieurarbeit und das Kunstbauwerk und da ist zweifellos ein horizontaler Strich über eine Talkerbe mit vertikalen Pfeilern in x-fach definierten gegenseitigen Abständen einfacher und billiger als noch ein zusätzlicher Bogen. Ist dieses sich immer wiederholende Bild erst fertig zu Papier gebracht, werden die Geologen oder Bodenmechaniker zugezogen, zumal ja jetzt erst die Bohrungen, an „richtiger Stelle“ angesetzt, nämlich immer unter den – oft zahlreichen – Pfeilern, Auskunft über deren Gründungsbedingungen geben können. Ab diesem Zeitpunkt ist aber in 90 von 100 Fällen eine noch so überzeugend begründete Umplanung, etwa in eine Bogenbrücke, nicht mehr durchzusetzen.

Was sind aus geologischer Sicht die Vorteile einer Bogenbrücke gegenüber einer konventionellen Pfeilerbrücke:

- es gibt weniger Kontaktstellen mit dem Untergrund,
- eine Bogenbrücke wird die Talflanken eher stützen als ungünstig belasten,

- der häufig geologisch eher kritische Talbodenbereich mit möglichen Alluvialakkumulationen und hohem Grundwasserspiegel, Rutschmassen und / oder Schutthalden am Hangfuß, der Hochwassergefahr etc. kann vom Bauwerk gänzlich ausgeklammert werden.

Kommen nur einige der aufgezählten Nachteile für Bauwerksgründungen zum Tragen, sind die Kostenvorteile einer Pfeilerbrücke bald aufgezehrt.

Am Beispiel der zur Bauzeit nach der „Europabrücke“ mit 121 m Konstruktionshöhe zwischen Gründungssohle und Fahrbahndecke zweithöchsten Brücke in Österreich, der **Larzenbachquerung im Zuge der Tauernautobahn**, können vorstehende Überlegungen anschaulich demonstriert werden (siehe Abb. 13, Anhang). Dabei besteht keinerlei Absicht zu irgendeiner Kritik an dem ausgeführten Bauwerk.

Der mehrere Kilometer lange Trassenabschnitt im Fritzbachtal im Bundesland Salzburg ist richtigerweise schon im Zuge der Vorplanung von einem Geologen begangen worden, wobei die grundsätzliche Eignung der rechten Talflanke für die Errichtung einer Autobahn festgestellt werden konnte. Es waren allerdings zahlreiche Geländekorrekturen mit Hanganschnitten erforderlich, aber auch eine Reihe von Brückenbauwerken. Für letztere wurden in der Folge offensichtlich aus Zeit- und Kostengründen ausnahmslos nur Pfeilerbrücken entworfen, unter ihnen auch der Talübergang Larzenbach. Daraufhin sind im Gründungsbereich jeder Stütze Kernbohrungen abgeteuft und vom bearbeitenden Geologen aufgenommen worden.

Dann erfolgte die Übertragung des Ausbaues der Teilstrecke Hüttau-Eben vom Land Salzburg an die Tauernautobahn AG, die als geologischen Berater den Verfasser beauftragte. Ab nun stand alles unter großem Zeitdruck.

Eine erste Übersichtsbegehung des Geländes entlang der geplanten Trasse hat zahlreiche Hinweise auf Hanginstabilitäten gegeben, die bis dahin nicht bekannt waren, so auch im Bereich des gegenständlichen Talüberganges. Eine sofort in Angriff genommene baugeologische Kartierung festigte den ersten Befund. Unabhängig davon wurde auch noch die Stützenausteilung der Brücke verändert, ohne daß Mittel und Zeit vorhanden gewesen waren, zusätzliche Bohrungen abzuteufen. So blieb dem bearbeitenden Geologen nichts anderes übrig, als aus seinem Geländebefund und den vorhandenen Bohrprofilen seines Vorgängers eine Gründungsprognose für die Stützen und Widerlager zu erarbeiten. Es ist durchaus kein Ausnahmefall, daß schon zu dieser frühen Projektierungsphase eine Überprüfung der Bohrproben nicht mehr möglich war, weil diese entweder unauffindbar oder in einem katastrophalen Zustand waren.

Eindeutig ergab sich, daß in der Fußzone des linken Talhanges eine Rutschmasse lag, deren Mächtigkeit nur aus dem Ergebnis einer einzigen Bohrung, nämlich der Kernbohrung 9 indirekt ermittelt werden konnte (Abb. 11). Diese Bohrung ließ aufgrund von zwei ausgewiesenen Störzonen in unterschiedlicher Teufe wieder zwei Möglichkeiten offen, nämlich eine eher seichte und eine tiefe Lage der Gleitfläche. In beiden Fällen war aber auch noch eine Schubbeanspruchung auf die Stützen beziehungsweise ihre Gründungselemente zu befürchten. Trotz der sich abzeichnenden massiven Gründungsschwierigkeiten konnte aber einer vom Geologen sofort in Diskussion gebrachten Bogenbrückenvariante nicht mehr näher getreten werden. Nur sie hätte den gesamten sensiblen unteren Talabschnitt aus dem Baugeschehen ausklammern können.

Jetzt, da sich schon abgezeichnet hat, mit welchem technischen Aufwand die Brückengründung nur zu bewältigen sein würde, war nicht mehr der ursprüngliche Kostennachteil einer Bogenbrücke das maßgebende Argument, sondern nur mehr der Zeitfaktor. Auch die sich abzeichnenden, späteren Wartungsarbeiten der zahlreichen Meß- und Beobachtungseinrichtungen und umfangreiche Auswertungen der Meßergebnisse sowie ein gewisses Restrisiko im Hinblick auf allenfalls notwendige Nachbesserungen, konnten das Pfeilerbrückenprojekt nicht mehr verhindern.

Wie das Ausführungsprojekt schließlich gegründet, gesichert und mit Meßeinrichtungen ausgestattet werden mußte, zeigt der Talquerschnitt der Abbildung 12.

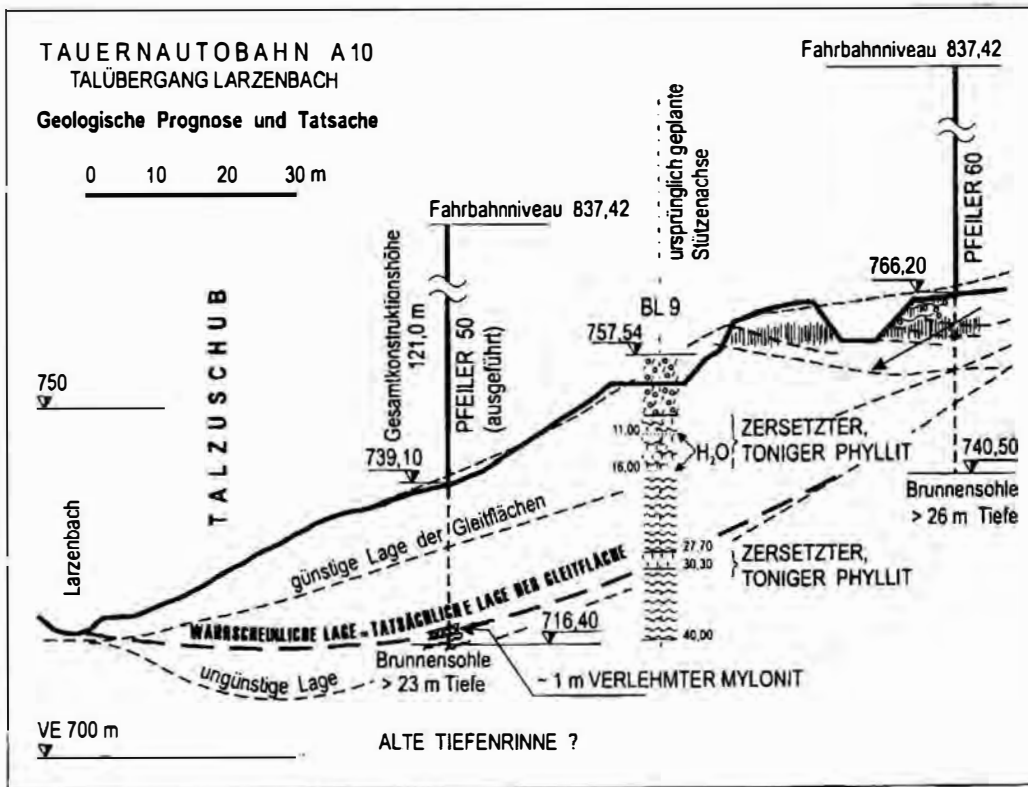
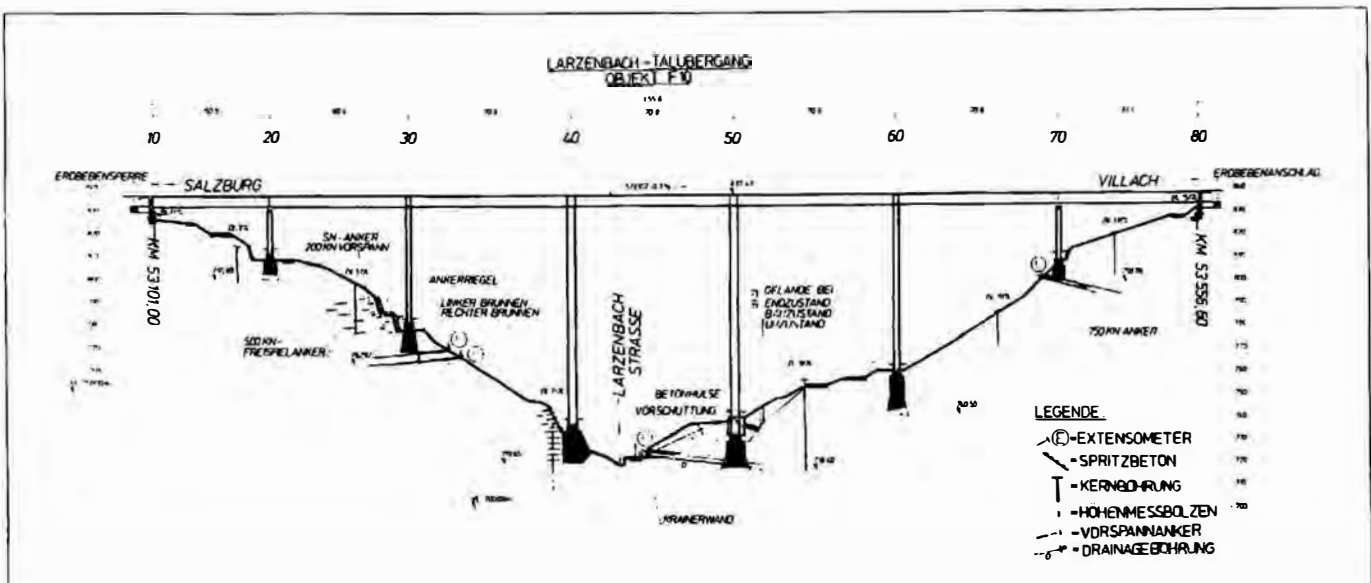


Abb. 11:  
Detailansicht

Abb. 12:  
Übersicht



- LEGENDE
- - EXTENSOMETER
  - - - - SPRITZBETON
  - T - KERNDIHRUNG
  - - HOHNMESSBOLZEN
  - - - - VDRSPANNANKER
  - - DRAINAGEBOHRUNG

Ursprünglich nicht vorgesehene, bis zu 26 m tiefe Brunnengründungen mußten unter teilweise gefährlichen Rahmenbedingungen ausgeführt werden. So ist während der Aushubarbeiten des 23 m tiefen Brunnenschachtes für den Pfeiler 50 dieser einmal halb und ein zweites Mal zur Gänze durch Rutschmassen verschüttet worden. Es war nur der gewissenhaften Beobachtung des Hangverhaltens durch einen erfahrenen Bauleiter während der gesamten kritischen Bauphase zu verdanken, daß keine Menschen zu Schaden kamen.

Auf die zahlreichen Vorspannanker und Meßeinrichtungen, besonders jene mit langen Mehrfachextensometern, sei mit Blick auf Abb. 12 nur hingewiesen.

Das Beispiel Talübergang Larzenbach (Objekt F10 der Tauernautobahn) eignet sich mehrfach für eine Diskussion Pfeiler- oder Bogenbrücke. Zunächst ist keinesfalls sichergestellt, weil nie ernstlich untersucht, ob eine Bogenbrückenvariante tatsächlich die erwarteten Vorteile gebracht hätte.

Die natürlichen Rahmenbedingungen einschließlich der nur unvollständig skizzierten Planungs- und Ausführungserfahrungen untermauern aber gut das, was der Verfasser in bezug auf die Vorteile einer Bogenbrücke gegenüber konventionellen Brücken aussagen möchte. Zusammengefaßt sind das

- die stützende Wirkung auf die Talflanke aufgrund der stumpfwinkligen Spannungseinleitung im Bogenwiderlagerbereich und
- die Möglichkeit, den manchmal sensiblen Talbereich vom Baugeschehen völlig ausklammern zu können.

Aus persönlicher Sicht wäre noch das ästhetische Moment anzuführen. Es ist denkbar, daß die Mehrzahl der Menschen gemäß eines Ausspruchs von Friedensreich Hundertwasser „daß nämlich die Natur keine Gerade kennt“ rein gefühlsmäßig eine Bogenbrücke schöner in die Landschaft eingefügt findet. Die Gegenüberstellung scheint dies zu beweisen (Abb. 13 + 14, Anhang).

Bogenbrücken können in einzelnen Fällen überhaupt nur die einzige wirtschaftliche Alternative zu Hängebrücken sein, um ein steil eingeschnittenes Tal oder eine unzugängliche Schlucht zu überbrücken. Bei solchen extremen topographischen Vorgaben sind meistens hoch beanspruchte Stützen nicht, oder nur mit unverhältnismäßig hohem Kosteneinsatz für Sicherungs- und Stützmaßnahmen zu gründen.

Einfach ist die Baudurchführung aber auch für Bogenbrücken nicht (Abb. 15). Je steiler nämlich die Bergflanken sind, desto weiter wird sich die resultierende Krafteinleitung der freien Oberfläche nähern. Dann ist nicht mehr der bereits erwähnte, stumpfe Winkel zur Talflanke gesichert, sondern unter Umständen ein wesentlich kleinerer geotechnisch zu beherrschen. Bei Bogenstaumauern soll dieser Winkel  $30^\circ$  nicht unterschreiten. Ungünstige Gefügekonstellationen können eher noch größere Winkel erzwingen. Grundsätzlich Gleiches sollte auch für die Einleitung der Spannungen in die Widerlager bei Bogenbrücken gelten. In jedem Fall ist jedoch dem beratenden Geologen zu empfehlen, auch bei schwierigsten Geländebedingungen eine sorgfältige Gefügeanalyse zu erstellen. Aufgrund des Ergebnisses ist im Dialog mit dem Statiker die Geometrie des Widerlagerblockes und somit auch jene des Gründungsaushubs festzulegen. Gleichzeitig sind die flankierenden Sicherungs- und Stützmaßnahmen sowohl für die

Bau- als auch die Betriebszeit zu planen. Es kann sich nämlich als vorteilhaft erweisen, wenn man beispielsweise rechtzeitig - etwa für Ankerungen oder Extensometer - Leerrohre in den Bewehrungskorb einlegt und diesen nicht durch nachträgliche Bohrungen schwächt.

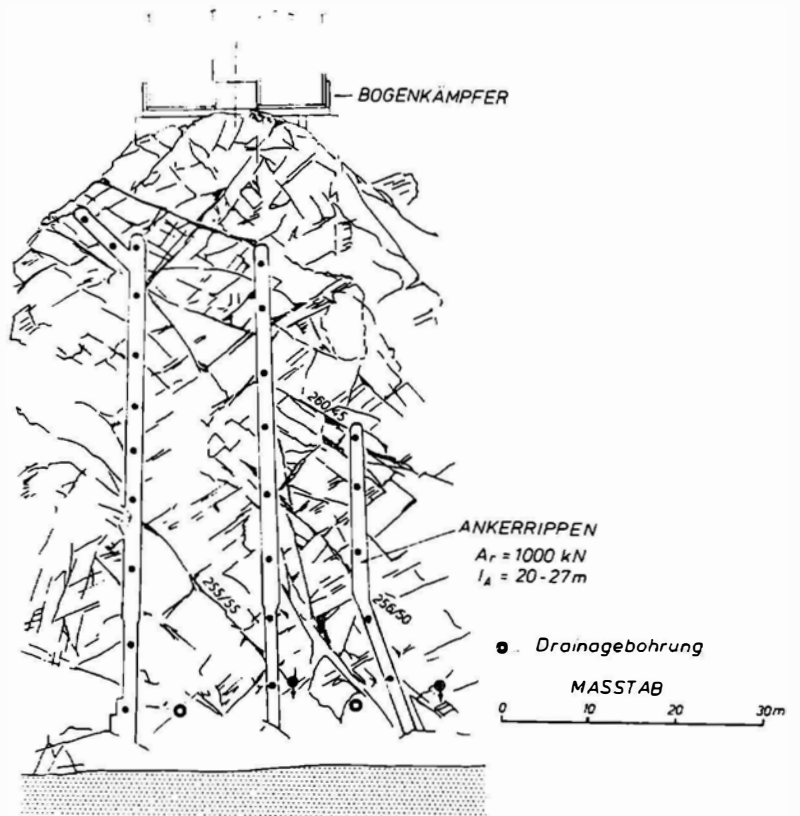
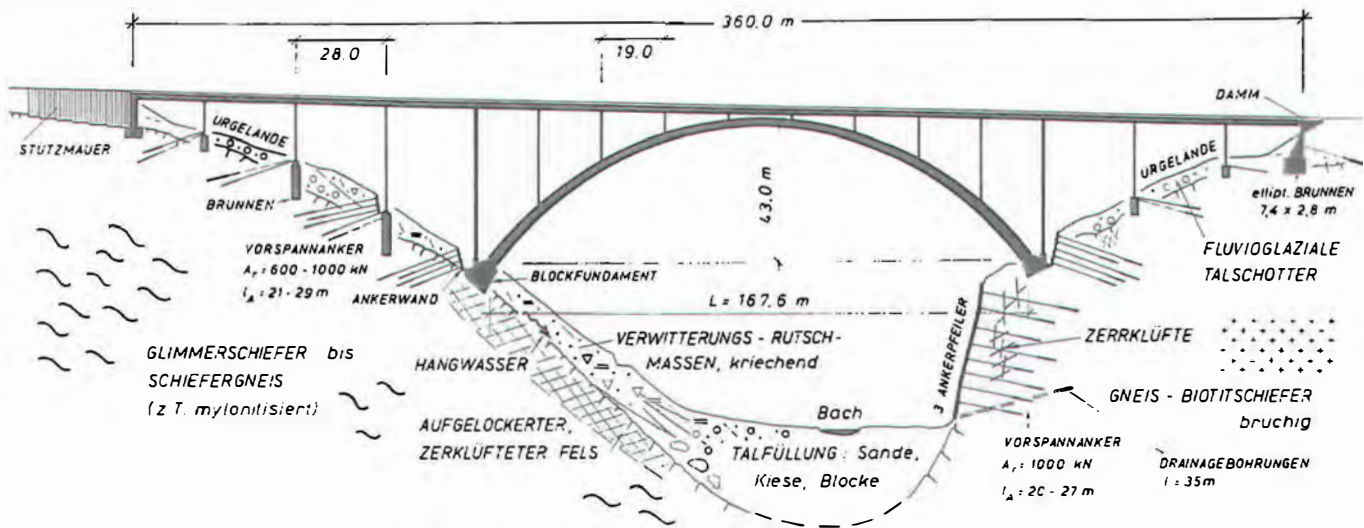


Abb. 15: Tauernautobahn Talübergang Leoben

## 5.0. SCHRÄGE GEWÖLBE

Diese Gruppe von Gewölben wird selbst von Geologen in der Natur am wenigsten bewußt registriert. In der Baukunst sind hingegen Lastabtragungen über schrägliegende Gewölbe schon lange integrierender Bestandteil von Architektenplanungen oder statischen Auseinandersetzungen. Die Fußzone des Eiffelturmes wäre eines von vielen Beispielen (Abb. 16, Anhang). Dies zur Kenntnis nehmend werden sich die folgenden Ausführungen besonders mit Naturbeobachtungen beschäftigen, zumal damit auch nützliche Schlußfolgerungen für die verschiedensten angewandten Bereiche gezogen werden können.

### 5.1. Kare und ähnliche Geländeformen

Kare sind nicht ausschließlich durch gravitative Massenverfrachtungen entstanden, wie das beispielsweise für Talzuschübe oder Bergstürze zutrifft. Es handelt sich vielmehr um Nischen- oder kesselförmige Geländehohlformen, die maßgeblich durch das Gletschereis geprägt wurden. Charakteristisch ist die gute Ausrundung der sie umfassenden Felswände, die allerdings das Produkt der Frostverwitterung und nicht der schürfenden Tätigkeit des Eises sind. Daher können sich Karnischen bis in die Gipfelregionen ausbilden, wo sie allseitig zusammenlaufend pyramidenförmige, oft sehr exponierte Felspitzen (Karlinge) modellieren (vgl. Abb. 4).

Man wird daher das morphologisch Gemeinsame nicht unbedingt im Karboden finden, denn dieser kann beckenförmig eingetieft oder flach bis steil ansteigend ausgebildet sein und eine eher runde oder langgestreckte Form haben (Abb. 17). Das Gemeinsame ist vielmehr stets die gute Ausrundung der Umrahmung, in welcher man eine Aktivierung einer Gewölbewirkung erahnen kann.

Der Autor hat hunderte Kare durchwandert und keinen einzigen Fall in Erinnerung, daß irgendwo augenfällige Anzeichen von größeren Instabilitäten zu erkennen gewesen wären. Der natürliche Abtrag oder Einebnungsprozeß beschränkt sich stets auf eine oberflächennahe Felslockerungszone, die nur Ausgangspunkt für Felsstürze oder Stein-schlag ist. Bei minderwertigen Gesteinsarten werden sich von vornherein flachere Böschungswinkel einstellen, so daß hier auch lokale Rutschungen vorkommen können. Katastrophalen Bergstürzen oder Talzuschüben dürften sich hingegen Karformen nachhaltig entgegenstemmen.

Diese Beobachtungen scheinen die bereits erwähnte Annahme zu bestätigen, daß sich in ausgerundeten Geländehohlformen, wie sie Kare am besten repräsentieren, Gewölbewirkungen einstellen. Sie werden stets ein stützendes Widerlager suchen und daher immer einen schräg nach unten gerichteten Spannungsfluß zeigen.

Verschränkt man den ebenfalls schon erwähnten „Spreizdruck“ in steilen Bergflanken mit den schrägen Gewölbegirlanden von Karlingen, also Felsgipfel, bei denen steile Karnischen von mehreren Seiten bis in die Gipfelregionen klettern, dann ergeben sich zwangsläufig auch für solche zum Teil sehr exponierte Gipfel relativ stabile Verhältnisse (vgl. Abb. 4).

Die **Großstrukturen** werden selbstverständlich bei einer solchen Einschätzung zu beachten sein. So ist der **Gipfelabbruch des Ankogels** im Jänner 1932 ausschließlich auf gleitwillige phyllitische Glimmerschieferzwischenlagen in den Amphiboliten zurückzuführen, obwohl die Gipfelpyramide dem Augenschein nach die vorerwähnten Kriterien einer guten Abstützung hat.

Massenmäßig begrenzte Felsabstürze sind besonders im Hochgebirge immer und überall möglich. Ganze Gipfelniederbrüche, wie sie sich beispielsweise vor wenigen Jahren bei der **Bischofsmütze im Dachsteinmassiv** zugetragen haben, sind hingegen hauptsächlich auf turmartige Felspfeiler beschränkt, die von hohen, angenähert vertikalen Wandfluchten begrenzt werden. Die Höhe solcher Felszähne, Türme und Pfeiler und somit der Schlankheitsgrad, lassen eine wirksame Ausbildung von Bogenkräften nicht zu.

Die hohen spezifischen Spannungen setzen stets große Eigenfestigkeiten des Felses voraus. Vertikale Kluftbildungen sind – ähnlich wie in einem einachsialen Druckversuch – die Regel. Durch den natürlichen Abtrag werden daher nie breite, tragfähige Fußzonen modelliert, in denen sich die angesprochene, spannungsverteilende Bogenwirkung einstellen kann. Das Ende ist der vollständige Kollaps. Ein solcher kann wesentlich größere Felsmassen in Bewegung setzen als etwa ein Felssturz, bei dem ja gewöhnlich nur ein paar Kubikmeter Gesteinsmassen in die Tiefe donnern.

## 5.2. Bergsturznischen

Bergstürze setzen zunächst festes Felsgebirge voraus, das wandbildend auftritt. Die stürzende Massenverfrachtung überwiegt, die gleitende hat untergeordnete Bedeutung. Bei umgekehrter Gewichtung spricht man von Bergsackungen.

In der gegenständlichen Betrachtung ist jedoch nicht das Ereignis selbst Gegenstand einer eingehenderen Analyse, sondern die Geometrie des zurückgelassenen Felsverbandes. Diesbezüglich sind zwei Formen der Abbruchwände zu unterscheiden, nämlich

- eine mehr oder weniger ungegliederte Wandflucht, oder
- eine Ausbruchsnische, eine Nischenkette bis hin zu einer tief in die Flanke eingreifenden halbzyklindrischen Kesselform.

Je ein bekanntes Beispiel soll zum besseren Verständnis der Schlußfolgerungen angeführt werden.

Der **Dobratsch-Bergsturz** bei Villach im Jahr 1348 als Folge eines vorangegangenen Erdbebens hat schreckliche Auswirkungen gehabt. Mehrere Dörfer sind nach der Chronik unter gigantischen Felsmassen begraben worden. Zurückgeblieben ist wieder eine Felswand, die vermutlich jener vor dem Bergsturz sehr ähnlich ist, nämlich eine wenig gegliederte, langgestreckte Wandflucht (Abb. 18). Die Abbruchflächen bilden eine Kulisse von talparallelen Steilwänden ohne die Möglichkeit einer seitlichen Abstützung. Es wundert daher nicht, daß sich am Oberrand der Abbrüche örtlich schon wieder offene Spalten aufgetan haben. Da am Fuße dieser Wandflucht inzwischen auch



eine Autobahntrasse vorbeiführt, wäre eine genaue Dokumentation und messende Beobachtung der augenscheinlich sensibelsten Spalten zu empfehlen.

Gewisse Ähnlichkeiten, nur in einem kleineren Ausmaß des Ereignisses, wird man auch in dem aktuellen Beispiel des **Eiblschrofens** bei Schwaz in Tirol erkennen. In beiden Fällen wird sich nie eine natürliche Bogenverspannung einstellen.

Etwas anders ist die Situation beim **Tschirgant–Bergsturz** in Tirol einzuschätzen. Auch hier sind vor etwa 3000 Jahren gewaltige Felsmassen in das Inntal abgebrochen und haben noch den Ausgang des gegenüber einmündenden Ötztales verlegt. Während jedoch beim Dobratsch die relativ glatten Abbruchwände bis in die Nähe der Talsohle reichen, blieb beim Tschirgant-Abbruchgebiet ein gegliederter, gegen das Inntal vorspringender Stützsockel zurück. Der Schwerpunkt der Abbruchmassen ist der oberen Wandhälfte zuzuordnen, wo nischenförmige Abbruchwände zumindest angedeutet sind (Abb. 19). Durch diese Ausformung und starke Gliederung der Abbruchwand können sich natürliche Gewölbeverspannungen in verschiedenster Ausrichtung einstellen und wesentlich zur Gesamtstabilisierung beitragen.

Zu den eindruckvollsten Beispielen für **kesselförmige Abbruchnischen** zählen vermutlich jene im Bergsturzgebiet von Arco nördlich des Gardasees (Abb. 20). Hier spürt man förmlich die Bogenverspannung in größter Dimension.

### 5.3. Rutschnischen, Bergsackungsnischen

Im Gegensatz zu Fels- und Bergstürzen werden Rutschungen in der Natur kaum jemals ohne Mitwirkung von Wasser ausgelöst. Nur bei zu steilen Böschungen im Zuge künstlicher Hanganschnitte, die nicht nach den Bodeneigenschaften projiziert wurden, kommt es auch gelegentlich zu Rutschungen ohne sichtbare Beteiligung von Wasser. Vergleichbar in der Natur wären starke Hangunterschneidungen durch einen Bach- oder Flußlauf.

#### 5.3.1. Rutschnischen

Ist in einem Material der Reibungswiderstand nicht mehr ausreichend, um eine natürliche oder künstliche Böschung stabil zu halten, bricht diese entlang eines Teiles oder der ganzen Böschungsfrent nieder.

Ist hingegen in einer sonst ausreichend stabilen Böschung eine versteckte Wasserader vorhanden, kann diese maßgeblich dazu beitragen, daß es zu einer begrenzten Rutschung kommt. Diese wird in den meisten Fällen eine **halbkreisförmige Abrißnische** hinterlassen, deren Randstufe entweder senkrecht oder zumindest deutlich steiler sein wird als die ursprüngliche Böschung (Abb. 21).

Dieses morphologische Phänomen ist auch in vielen Bereichen des täglichen Lebens nachvollziehbar. Wenn man beispielsweise einen frisch geschütteten Sandkegel, dessen Mantelböschung den Grenzneigungswinkel darstellt, mit der Schaufel ansticht, um Material zu entnehmen, dann wird sich selbst bei minimaler Kohäsion ein ähnliches Bild ergeben. Unzählige vergleichbare Beispiele könnten noch angeführt werden. Den Anteil, den jedoch in bestimmten Materialien die Kohäsion bei der Gewölbeausbildung hat, erkennt man im völlig ausgetrockneten Wüstensand. Jeder kleinste Eingriff in die Böschung einer Düne, und sei es nur ein Fußtritt, wird eine Kettenreaktion von

Nachrutschungen bis zum Böschungsoberrand ohne bremsende Gewölbewirkung ergeben. Diese Eigenschaft nützt schließlich auch jede Sanduhr in der Sauna.

Die entlang ihres Oberrandes gerundeten Nischen sind daher nur über die Aktivierung einer Gewölbewirkung zu erklären. Ein oder zwei angedeutete Parallelstrukturen entlang des Oberrandes weisen häufig auf die dafür notwendige Verformung hin.

In der Natur erkennt das geschulte Auge aus der vorbeschriebenen Morphologie selbst alte, längst wieder stabilisierte Geländerutschungen, auch wenn eine üppige Vegetationsdecke sie verhüllt. Bei solchen Beobachtungen ist tunlichst jeder bauliche Eingriff, insbesondere in der Fußzone der Rutschmasse, zu vermeiden.

Rutschungen können und konnten in der Natur in allen Dimensionen vorkommen. Erlangen sie ein Ausmaß, das nur mehr aus einer deutlichen Entfernung zur Gänze überschaubar ist, spricht man von Bergsackungen oder nach J. Stini von Talzuschüben.

### 5.3.2. Bergsackungsnischen

Bergsackungen oder Talzuschübe sind gravitative Massenverfrachtungen, die entlang einer ausgeprägten **Gleitbahn** erfolgen. Sie können mitunter gigantische Ausmaße erreichen und diesbezüglich durchaus mit Bergstürzen verglichen werden. Im alpinen Raum kommen Bergsackungen wesentlich häufiger vor als Bergstürze, wofür großteils die eiszeitliche Vergletscherung der Alpen verantwortlich ist. In Regionen, die von harten, widerstandsfähigen Gebirgsarten wie Kalkgestein, Granit, Gneis oder Amphibolit etc. aufgebaut sind, blieben die von den Gletschern tief ausgeschürften Täler mit steilen begleitenden Wandfluchten stabil. In weicheren Gebirgsarten wie Glimmerschiefer, Phyllite oder in tektonisch gestörten Bereiche etc. haben hingegen die übersteilten Hänge nach dem Wegfall der stützenden Wirkung der Gletscher vielerorts mit talwärts gerichteten Massenverfrachtungen reagiert. Sie verraten sich schon aus der Ferne, wenn ein breites Trogtal unvermittelt durch einen gigantischen Bergwulst abgeschnürt oder einseitig stark eingeeengt wird (Abb. 22). Meist ist der Bach- oder Flußlauf auf das gegenüberliegende Talufer abgedrängt, wo er zufolge seiner Erosionsarbeit oft gute Einblicke in den inneren, zum Teil chaotischen Aufbau der Gleitmasse gewährt. Diese ist ja sonst fast ausnahmslos so gut in eine geschlossene Vegetationsdecke gehüllt und häufig auch bebaut, daß man gewöhnlich nicht die seinerzeitige Naturkatastrophe erahnt. Erst der Blick vom Gegenhang oder aus einem Luftfahrzeug und insbesondere durch die Stereobrille beim Betrachten von Luftbildpaaren eröffnet die umfassende Wahrnehmung des einstigen Ereignisses. Die gewaltigen Abrißnischen in den Bergflanken bestätigen dann paßgenau das Fehlen gerade jenes Massenberges, der nun das Tal abriegelt.

Die zweite und wesentlich interessantere Feststellung gilt jedoch der zurückbelassenen Umrahmung der Megarutschnische. In 90 von 100 Fällen gut ausgerundet sieht man schon aus der geschlossenen Vegetationsdecke, die manchmal sogar bis zum Oberrand der alten Abrißkante hinaufklettert und aus den bescheidenen Schuttansammlungen, daß der **Kesselrahmen stabil** blieb (Abb. 23). Ist die Bogenform einmal vorgegeben, scheint sie jeder Tendenz zu ausgedehnterer Nachrutschung durch sofortige Aktivierung einer Gewölbeverspannung entgegenzuwirken.

Die Spannungsumlenkung vom Gewölbescheitel zur seitlichen Umrahmung und dort in die Bogenwiderlager erfolgt mit schräg nach unten einfallenden Resultierenden. Es sind

dies grundsätzlich die gleichen Phänomene wie bei den Karen oder Bergsturznischen, sodaß hier von den größten Dimensionen schräger Gewölbe gesprochen werden kann.

Es gibt bei den Großrutschungen nicht nur halbkreisförmige „Kesselausbrüche“, sondern auch Massenverfrachtungen entlang planarer Gleitbahnen. Das eindruckvollste Beispiel dafür ist das Abgleiten der halben Bergflanke des Monte Toc im Zuge der Stauerrichtung des **Vajont-Speichers** am 9.10.1963. Die Folgen dieser gigantischen Massenverfrachtung von rd. 280 Mill. m<sup>3</sup> Fels und der dadurch ausgelösten Flutwelle waren katastrophal. Die Sperre hielt dieser Flutwelle, welche die rd. 260 m hohe, extrem schlanke Bogenstaumauer mit einer Wassersäule von etwa 50 m über der Sperrenkronen überschwappte, jedoch stand. Die umfangreichen Stützmaßnahmen in den luftseitigen Widerlagern haben dazu maßgeblich beigetragen (Abb. 24 und 25).

#### 5.4. Schlußfolgerungen auf die Baupraxis

Die Baupraxis nützt die schräge Gewölbewirkung bereits in vielerlei Anwendungsbereichen. Dennoch wäre eine noch konsequentere Berücksichtigung der Naturbeobachtungen wünschenswert.

Die vorstehenden Ausführungen lassen erahnen, welche stabilisierenden Kräfte die Natur einerseits zu mobilisieren vermag, aber andererseits auch, welche Gefahrenpotentiale da und dort lauern können. In der Folge sollen daher anhand von Beispielen aus der Praxis ein paar Hinweise geliefert werden.

##### 5.4.1. Bauen in Rutsch- und Bergsturzmassen

Es bedarf keiner detaillierten Ausführung, daß Rutsch – oder Bergsturzmassen alles andere als ein idealer Baugrund sind. Insbesondere Untertagebauten werden hier auf größte Schwierigkeiten stoßen, mit deren erfolgreichen oder mißglückten Bewältigung sich schon zahlreiche Kongresse und Publikationen auseinandergesetzt haben.

In Rutschmassen sollten aber tunlichst auch **Hanganschnitte**, wo immer es Alternativen dazu gibt, vermieden werden. Ist das nicht möglich, sind zuallererst die Bergwasserverhältnisse zu erkunden und Drainagekonzepte zu erstellen. Keine andere technische Maßnahme kann einen derart effektvollen Spannungsabbau bewirken, wie gut auf die örtlichen Verhältnisse abgestimmte Drainagen. Die danach einzubauenden Stützmittel werden in einem deutlich wirtschaftlicheren Rahmen bleiben als in einer Anschnittsböschung ohne eine solche Drainagierung.

Eines der abschreckendsten Beispiele stellt der rd. 200 m lange Abschnitt einer **Rutschmasse** durch die Trasse der Tauernautobahn **bei Flachau** dar (Abb. 26). Hier mußten schon in den frühen 70er Jahren des 20. Jahrhunderts rd. 200 Millionen Schilling alleine in den Stützmittelaufwand zur Stabilisierung der Anschnittsböschung investiert werden. Dennoch konnte die bergseitige Fahrspur erst lange nach der offiziellen Autobahneröffnung, die im Juni 1975 stattfand, für den Verkehr freigegeben werden. Dieses Beispiel ist deshalb so einprägsam, weil zur Bauzeit eine Umfahrung der alten Rutschmasse mit einem wesentlich geringeren Aufwand und dem Ausschalten eines gewissen Restrisikos möglich gewesen wäre.

Im Zederhaustal mußte die gleiche Autobahn an einer noch wesentlich größeren Bergsackungsmasse vorbeigeführt werden. Ohne nennenswerte Böschungsanschnitte in

der Fußzone konnte hier jedoch weitgehend auf künstliche Stützmaßnahmen verzichtet werden.

Eine andere Gefahr, alte, scheinbar längst stabilisierte Rutschmassen wiederzubeleben, lauert bei einem **Einstau der stützenden Fußzone** (vgl. Abb. 24). Es wurde schon an anderer Stelle dargelegt, daß sich Großrutschungen, Bergsackungen oder Talzuschübe im wesentlichen auf gleitwillige Gebirgsarten konzentrieren. Da die überwiegende Zahl der großen künstlichen Stauseen Österreichs in den Hochgebirgsregionen der Zentralalpen liegen und diese aus Granitgneisen aufgebaut werden, ist hier die Bereitschaft zu Großrutschungen relativ gering.

Aber nicht alle Speicher sind in Täler mit stabilen Hängen eingebettet, sodaß bei einem allfälligen Einstau alte Rutschungen zufolge der Gewichtsverminderung durch den Auftrieb wiederbelebt oder sogar neue ausgelöst werden können. In solchen Fällen ist äußerst verantwortungsvoll vorzugehen, denn künstliche Stützmaßnahmen können zwar bei kleinen, lokalen Instabilitäten eingeplant werden, nicht aber bei jenen Größenordnungen, die man mit Talzuschüben gleichsetzt.

#### 5.4.2. Bauen mit Ausnützung schräger Gewölbe

Zahlreiche Beobachtungen in der Natur haben zu der Überzeugung geführt, daß gut ausgerundete Naturnischen in allen Größenordnungen in den meisten Fällen eine auffallende Gesamtstabilität aufweisen. Der Verfasser nimmt als Ursache dafür die Ausbildung schräger Gewölbeverspannungen an. In logischer Folgerung sollten diese Erkenntnisse auch in **Raumordnungspläne** einfließen. Eine gründliche geologische Überprüfung müßte dennoch begleitend durchgeführt werden. Zu beachten sind selbstverständlich auch in höheren Lagen die Lawinengefahr und, unabhängig von der Höhenlage, daß solche Kessel auch bevorzugte Sammler von Murengängen sein können.

Aus jahrhundertelanger Beobachtung und Erfahrung sind auch große Talzuschübe ohne Folgeschäden überbaut worden. Eines von vielen Beispielen wäre die **Zarneischg-Riesensackung** am Beginn des oberen Liesertales in Kärnten (siehe Abb. 23). Taleinwärts folgen noch weitere Sackungen.

Wenngleich große unheilbringende Bergrutschungen oder Felsstürze aus alten Abbruchnischen mit guter Gewölbeverspannung nicht oder nur in Ausnahmefällen ihren Ausgang nehmen werden und daher „von oben“ kaum Gefahr droht, so können unbedachte Anschnitte in einer dem Augenschein nach völlig konsolidierten oder überhaupt nicht erkannten Rutschmasse wesentlich folgenschwerer sein.

Es gibt aber auch immer wieder Fälle, bei denen erst durch geringfügige Unterschneidungen einer natürlichen Hangböschung eine Rutschung ausgelöst wird. Wenn man erkennt, daß die obere Berandung der Abrißkante ein natürliches Gewölbe abbildet, sollte man dieses in die Sanierungsüberlegungen miteinbeziehen. Sind höher den Hang hinauf keine Bauwerke, könnte man sich nach einer genauen geologischen Analyse unter Inkaufnahme eines vertretbaren Restrisikos im wesentlichen nur auf die bereits gerutschte Bergmasse konzentrieren.

Ein diesbezüglich erfolgreich gelöstes Beispiel ist die **Hangrutschung vor dem Westportal des Autobahntunnels Gratkorn Nord** in der Steiermark. Ein an sich harmloser Hanganschnitt in einem geologisch unverdächtigen Bergrücken hatte in der Bauzeit zu einer unerwarteten Hangrutschung von beachtlichem Ausmaß geführt. Zwei tiefe Schächte in der Rutschmasse sollten über die genaue Lage der Gleitfläche Auskunft geben, was mit Bohrungen nur selten gelingt. Sie wurden unter großen Schwierigkeiten gleich in Angriff genommen. Als der Autor beigezogen wurde, stellte er sofort die weiteren Schachtarbeiten wegen nicht zu verantwortenden Sicherheitsrisiken ein.

Als Lösung wurde vorgeschlagen:

- Verschluß der tiefen, offenen Randspalte, um das Einfließen von Niederschlagswässern zu verhindern,
- Abrunden der scharfen Abrißkante und Ausgleich der entstandenen Geländestufe,
- keine Materialentnahmen in der Fußzone der Rutschmasse, sondern großzügiger Massenabtrag von oben nach unten und konkave Ausformung der Endböschung,
- Drainagierung und künstliche Stützung des restlichen Rutschkuchens auf Trassenniveau.

Diese Maßnahmen haben sich bestens bewährt und können für ähnliche Fälle als die kostengünstigste Sanierungs- und Stabilisierungsmethode empfohlen werden (Abb. 27). Entscheidend ist, daß man den Abbau der gerutschten Massen von oben beginnt, um die „treibenden Kräfte“ zu vermindern. Parallel sind Drainagierungsmaßnahmen mitzuführen, sodaß zum Schluß die Fußzone mit einem angemessenen Aufwand an künstlichen Stützmaßnahmen gesichert und Überschußmaterial auch hier verführt werden kann.

Weniger Vertrauen auf eine wirksame Gewölbeverspannung hatte man offenbar bei der **Felsgleitung „Rauchenkatsch“** an der Katschberg-Bundesstraße. Stark von Gefügestrukturen geprägt ist etwa zur Bauzeit der Tauernautobahn, die entlang der linken Flanke des Liesertales errichtet wurde, auf der gegenüberliegenden rechten Talflanke eine Felsackung erfolgt, die auch die Katschberg-Bundesstraße verschüttet hatte. Daraufhin wurde diese mit aufwendigen Baumaßnahmen, die auch eine neue Brücke einschlossen, talwärts verlegt (Abb. 28).

Die Geometrie der Sackung läßt eine gut ausgerundete Abrißnische erkennen, die unter Einbeziehung der gegenständlichen Betrachtungen über natürliche Gewölbeverspannungen unter Umständen auch kostengünstigere Sanierungsmaßnahmen erlaubt hätte. Vermutlich rechtfertigt jedoch der sehr wichtige Verkehrsweg aus damaliger Sicht die getroffene Gesamtlösung, die ein völliges Abrücken vom Rutschhang zum Ziel hatte. In den folgenden 25 Jahren blieb jedenfalls der gesamte Sackungsbereich stabil!

Bauen unter bewußter Einbeziehung der Gewölbewirkung kann auch bei der Ausgestaltung von **Tunnelportalen** zu namhaften Stützmitteleinsparungen führen. Die meisten Verkehrswegetunnel, ob für Straße oder Bahn ist nicht entscheidend, entwickeln sich aus einem schleifenden Hanganschnitt, bis der volle Tunnelquerschnitt gesichert ist. Mit Ausnahme in sehr steilen Talhängen können sich gute Ausrundungen des bergseitigen Aushubverschnittes zwischen Längsböschung und meist rechtwinkelig zu ihr verlaufender Portalböschung sicherheitserhöhend und kostensparend auswirken.

Wichtig wäre vor allem, daß auch die Stützmauern der Bogenform folgen. Damit könnte zumindest ein Teil der sonst notwendigen Ankerungen entfallen.

Eine ganz besondere Bedeutung kommt der schrägen Gewölbewirkung bei **Steinbrüchen** zu. In großen Natursteingewinnungsstätten sind aufgrund des ständig fortschreitenden Abbaues künstliche Sicherungs- und Stützmaßnahmen bestenfalls bei permanenten Zufahrtsrampen, aber nie im Abbaubereich selbst, üblich. Hier kann ein wohl überlegtes Abbaukonzept, das die natürliche Gewölbeverspannung ganz bewußt einbezieht, eine deutliche Erhöhung der Sicherheit in den Abbaufrenten bewirken. Erfreulicherweise gibt es diesbezüglich schon zahlreiche Umsetzungsbeispiele (Abb. 29).

Wie es anders enden kann, zeigt der **Steinbruch** für die Betonschottergewinnung der 200 m hohen **Kölnbreinsperre**. In 30 m hohen Etagen ist der Abbau in gerader Ausrichtung der hohen Abbautreppen erfolgt, bis im letzten Baujahr der zentrale Teil niedergebrochen ist. Es kam glücklicherweise niemand zu Schaden, aus Sicherheitsgründen mußte aber danach der Steinbruch aufgegeben werden (Abb. 30). Wenige Jahre später wurden die Zuschlagkörnungen für weitere 500.000 m<sup>3</sup> Beton benötigt. Sie mußten aus einem neu erschlossenen Abbaubereich hangabwärts des verstürzten Steinbruchs gewonnen werden. Eine Reaktivierung des vorhandenen Steinbruchs war zu gefährlich. Die Naturschützer hatten mit der so erzwungenen Lösung einige Freude.

Schräge Gewölbeverspannungen haben in den letzten Jahrzehnten bei sogenannten „**Knopflochgründungen**“ vielfach ihre Wirksamkeit bewiesen. Kilometerlange Straßen- und Autobahnstrecken sind in engen oder verbauten alpinen Tälern in teilweise extreme Hanglagen abgedrängt worden. Große Hanganschnitte waren vom geologischen Untergundaufbau vielfach zu riskant, sodaß Hangbrücken oft die einzige Möglichkeit bieten, derartige Talabschnitte ohne lange und kostspielige Durchtunnelungen zu überwinden (Abb. 31, Anhang). Die Stützenreihen mußten aber auch sicher fundiert werden. Was in einem flachen oder ebenen Gelände meist nur eine Frage der Gründungstiefe ist, wird in problematischen Hanglagen häufig noch von der Gefahr eines einseitigen Hangschubes überlagert. Die mancherorts bis zu 10 m hohen bergseitigen Anschnittböschungen bis zum Gründungsplanum der Stützen oder Pfeiler werden daher immer gegen den Berg zu ausgerundet geplant, um schon beim ersten, höchstgelegenen Anschnittsteil die Mitwirkung des Gebirges über schräge Bogenverspannungen zu sichern. In minderwertigen Gebirgsarten müssen, gleich wie beim Tunnelbau, Spritzbetonschalen und, wo nötig, Ankerbalken, die der Gewölbeform folgen, mithelfen, das Gebirge zu zwingen, die Schubspannungen auf beide Seiten der Aushubnische umzulenken (Abb. 32). Daß grundsätzlich ähnliche Maßnahmen auch bei manchen Brunnen Gründungen gleiche Zielsetzungen haben, sei ergänzend erwähnt.

In weniger steilen Hängen sollten auch die ausgerundeten Anschnittsnischen für Pfeilergründungen flacher geböschet werden. Je mehr man sich nämlich der natürlichen Hangböschung nähert, desto weniger künstliche Stützmitteleinbauten werden nötig sein. Bei kleinem Winkel zwischen Natur- und gut ausgerundeter Anschnittböschung wird man zufolge der Bogenverspannung sogar gänzlich auf künstliche Stützmittel verzichten können.

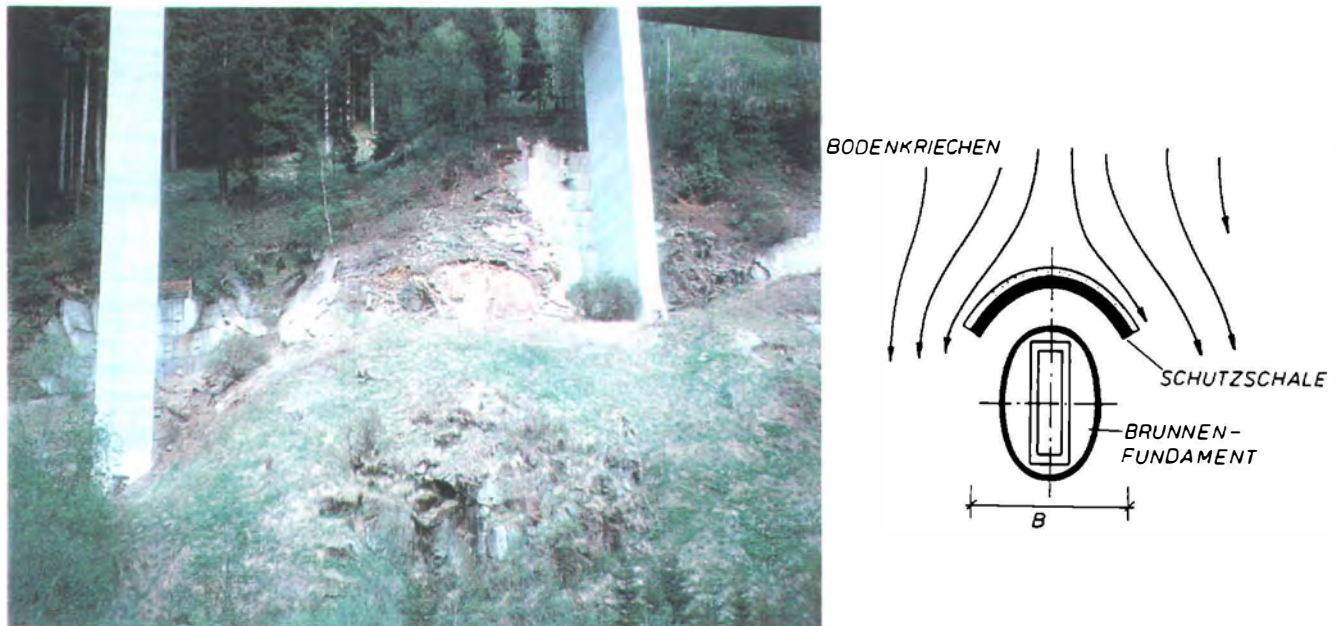


Abb. 32: "Knopfloch"-Gründungen, Tauernautobahn Liesertalstrecke

Während die vorerwähnten, eher punktuellen Sicherungsmöglichkeiten mit nischenförmiger Ausgestaltung fester Bestand des aktuellen Baugeschehens sind, werden bei linearen, großflächigen Böschungs- oder Hangstabilisierungsmaßnahmen die Vorzüge der Bogenwirkung kaum oder nur selten genützt. Der Grund dafür scheint in der etwas aufwendigeren Ausführung zu liegen, allenfalls aber auch darin, daß man schon bei der Planung nur auf Standardmuster zurückgreift.

Unter der Voraussetzung, daß man das Bau- und Stützungsvorhaben oberhalb der Grundwasserspiegellinie zu planen und auszuführen hat, sind gelegentlich schräge Gewölbewirkungen schon sehr erfolgreich in bezug auf Stabilität und Kostenersparnis genützt worden. Die dem Autor bekannten Beispiele beziehen sich auf **Bohrpfahl- oder Brunnenreihen**, die dem Massenabtrag vorausgehend nicht geschlossen niedergebracht wurden und bei denen die offenen Zwischenräume im Zuge der Aushubarbeiten leicht gegen die Bergseite ausgerundet, abschnittsweise mit Spritzbeton ohne oder mit Baustahlgitterarmierung gestützt wurden (Abb. 33). Da die Bohrpfähle oder Brunnen für diese Bögen die Widerlager bilden, sind besonders bei größeren freistehenden Höhen entsprechende technische Maßnahmen zu setzen. Dies können beispielsweise zusätzliche Rückverankerungen sein, um sicherzustellen, daß die Summe aller auf die Pfähle einwirkenden Spannungen schadlos aufgenommen wird. Das Kosteneinsparungspotential kann im Einzelfall, verglichen mit geschlossenen Bohrpfahl- oder Brunnenwänden beziehungsweise horizontalen Ankerbalkenreihen, ein beachtliches sein.

Die vorbeschriebene Stützmethod wird, wenn überhaupt, fast ausschließlich nur für temporäre Baugrubensicherungen angewandt. Ihre begrenzte Anwendbarkeit hat mehrere Gründe. Zunächst sind nur vertikale Stützwandgestaltungen möglich, sodaß höhere Hanganschnitte nicht bewältigt werden können. Weiters sind nur Böden oder bodenähnliche, minderwertige Gebirgsarten mit der Bohrpfahltechnik wirtschaftlich zu bewältigen und schließlich schränkt die relativ teure Baustelleneinrichtung ein derartiges Sicherungs- und Stützkonzept auf längere Streckenabschnitte ein.



Abb. 33: Blick in eine Baugrube. (Der elliptische Querschnitt zeigt, daß die links und rechts liegenden Brunnen bereits abgeteuft und ausbetoniert sind. Im Schutze einer Torkretschalung arbeitet sich die Aushubpartie bis zum tragfähigen Boden in 30 m Tiefe vor.)

Bei zahlreichen Hanganschnitten könnte sich jedoch eine Untersuchung lohnen, ob man nicht mit einem grundsätzlich gleichen Konzept wie das vorbeschriebene, eine kostengünstigere Alternative zu den sonst üblichen, horizontalen Ankerbalkenreihen entwickeln kann. Bei gleicher Neigung der Endböschung könnten bei entsprechenden Voraussetzungen **in der Fall-Linie angeordnete Ankerbalken** mit gut ausgerundeten Zwischenräumen effizienter und billiger sein. Einfachere Schalarbeiten und wirksamere Gewichtsauflast der Ankerbalken sowie stark reduzierter Stützmitteleinsatz für die Zwischengewölbe sind überlegenswerte Aspekte.

Auf eine traditionelle Nutzung der schrägen Gewölbewirkung sei bei (Form-) **Stein- oder Kiesgirlanden** in Böschungen hingewiesen. In Bogenketten in Böschungen eingesenkt, ist ihre stabilisierende Wirkung in erster Linie auf die Drainagierung einer oberflächennahen Bodenschicht zurückzuführen. Erst dadurch kommen auch Komponenten einer Bogenwirkung zum Tragen. Ein Abschälen oder Ausbrechen der Böschung kann dadurch verhindert werden. Schließlich müssen im Kapitel über schräge Gewölbewirkungen auch Bogengewichtsmauern und im Bogen gebaute Geschiebesperren erwähnt werden (vgl. Kap. 6.1).



## 6.0. HORIZONTALE GEWÖLBE

Im Gegensatz zu den vertikalen und schrägen Gewölben ist es schwierig, für horizontale Gewölbewirkungen Naturbeispiele anzuführen. Da die Krafteinwirkung und Spannungsabtragung in mehr oder weniger horizontaler Richtung erfolgen soll, kann dies in der Natur nur durch Wind oder Wasser verursacht werden. Auszuklammern sind horizontale Kräftekomponenten bei so manchen vertikalen und schrägen Gewölbebeispielen.

Die Kraftumlenkung über horizontale Gewölbe ist hingegen für beide Medien, Wind und Wasser, sehr erfolgreich durch Kunstbauwerke möglich (z.B. Brückenpfeiler).

Als zugegebenermaßen etwas weit hergegriffenes Beispiel in der Natur könnten Verklausungen durch Treibholz angeführt werden. Ohne Aktivierung einer gewissen Gewölbewirkung wäre es in breiteren Fließgewässern kaum möglich, daß es selbst hier zu Treibholzverklausungen kommen kann. Nur Gewölbewirkungen können den beachtlichen Staudruckbeanspruchungen standhalten.

Dies in die Sicherheitsbetrachtung von schlanken Bogenstaumauern übertragend, mußte beispielsweise bei der rd. 39 m hohen **Bogenstaumauer Großsölk** in der Steiermark das massive Holzgeländer entlang der Sperrkronen nachträglich mit Sollbruchstellen ausgestattet werden. Mit dieser Empfehlung wollte die zuständige Behörde verhindern, daß bei einem Extremhochwasser mit Treibholzfracht aufgrund von Verklausungen der Wasserspiegel angehoben und dadurch die Sperre einer zusätzlichen Belastung ausgesetzt wird. Bei einer geraden Geländeeranordnung – etwa entlang der Krone einer nicht im Bogen errichteten Gewichtsmauer – würde das gleiche Geländer auch ohne Sollbruchstellen vom Staudruck umgelegt werden. Bei dem im Bogen montierten Geländer wurde hingegen von Behördenseite die Gefahr gesehen, daß Trifholz zunächst im Bogen angelegt wird und sich später ein vom Geländer unabhängiges Gewölbe ausbildet. In diesem Fall hätte das Geländer nur die Formgebung für den Treibholzstapel bewirkt, selbst aber keine größeren Rückhaltekräfte aktiviert. Somit war ohne zusätzliche Sollbruchstellen das erwünschte Versagen des Geländers nicht sichergestellt.

### 6.1 Horizontale Gewölbe und Baukunst

Am augenfälligsten und dennoch bei näherer Betrachtung mit Einschränkungen wird die  $\pm$  horizontale Gewölbewirkung bei Bogenstaumauern genutzt (Abb. 34). Der horizontal angreifende Wasserdruck aktiviert in der im Bogen konstruierten Staumauer eine Gewölbespannung, sodaß die einwirkenden Kräfte gebündelt in Richtung der beiden Widerlagerflanken abgelenkt werden. Gleich wie im Tunnelbau geschieht dies nicht ohne Verformungen. Je schlanker eine solche Staumauer ist, desto größer werden die Verformungen sein. Bei der 200 m hohen Kölnbreinsperre betrug beispielsweise die Kronendurchbiegung beim 1. Vollstau im Jahr 1979, also vor der Errichtung des Stützgewölbes, 158 mm! Diese Verformungen sind selbstverständlich in der Statik berücksichtigt und werden mit Präzisionsmeßgeräten kontrolliert.

Die eingangs erwähnte Einschränkung bezieht sich darauf, daß die Einleitung der Bogenspannungen in die Widerlager theoretisch nur auf Kronenhöhe angenähert horizontal erfolgt, während hingegen in allen tieferliegenden Gewölbeabschnitten eine Vertikalkomponente aus dem Eigengewicht der Sperre hinzukommt. Beide Spannungskomponenten kann man in der resultierenden Kraft bündeln. Grafisch dargestellt ergibt sich daraus ein Bild, das im Talboden überhaupt keine Bogenwirkung aufzeigt (Abb. 35).

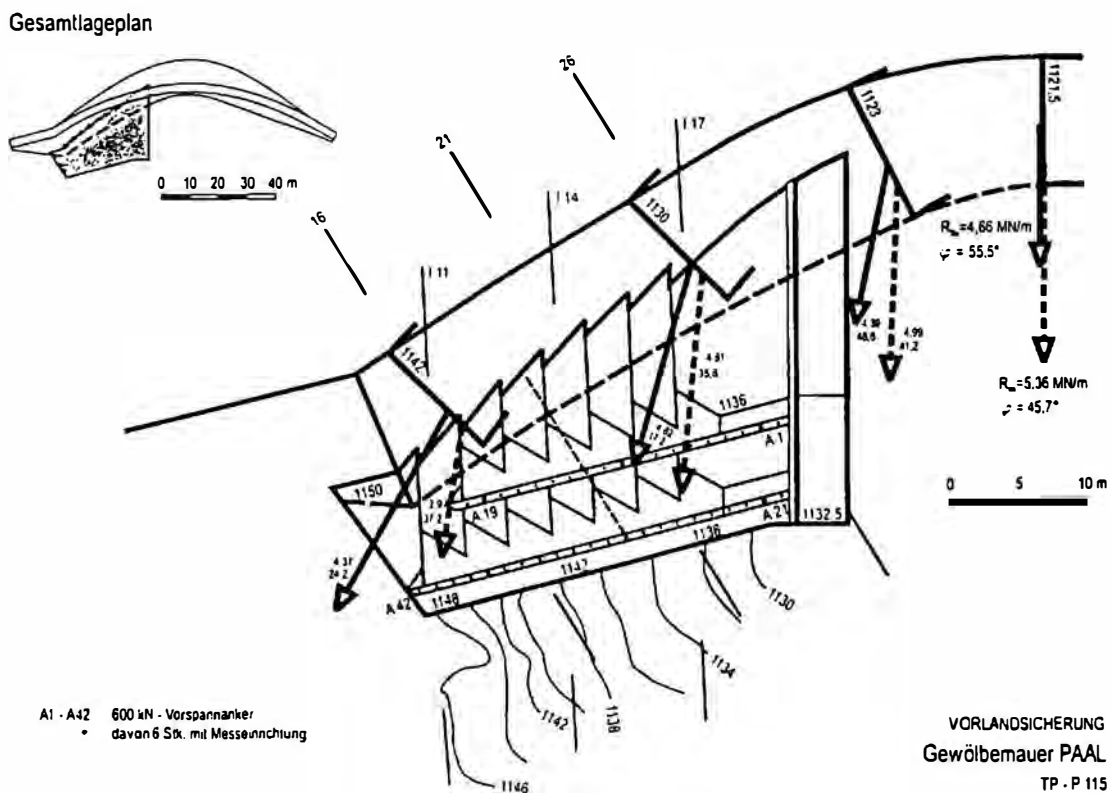


Abb. 35: Vorlandsicherung Gewölbemauer Paal

Es wurde bereits an anderer Stelle erwähnt, daß Bogenstaumauern einwandfreie Widerlager voraussetzen, um die in die Flanken abgelenkten Spannungen schadlos aufnehmen zu können. Weitere Details würden jedoch den Rahmen der gegenständlichen Betrachtung sprengen, und es ist auch der Geologe nicht berufen, sich eingehender mit der Baustatik zu befassen. Dennoch müssen für eine effiziente baugeologische Beratung zumindest die Ergebnisse einer statischen Berechnung in den wesentlichsten Auswirkungen auf den Gründungsfelsen verstanden werden. Grundsätzlich wird eine sehr schlanke Bogenstaumauer größere Spannungen bündeln als eine dicke, eine hohe größere Kräfte in die Widerlager einleiten als eine niedrige und die Bogenform in symmetrischen, engen Talquerschnitten wirksamer sein als in weiten und eventuell noch unsymmetrischen.

Dazwischen gibt es viele Möglichkeiten für eine optimale Einpassung in konkrete morphologische und geologische Verhältnisse. Die Grenzen für Bogenstaumauern in klassischer Ausbildung sind in weiten Talquerschnitten mit flachem Boden oder in ungenügend tragfähigem Felsuntergrund zu sehen.

Wenn die Untergrundverhältnisse nicht einmal mehr zur Gründung einer Gewichtsmauer geeignet sind, die ja aufgrund ihrer breiten Basis nicht mehr die hohen spezifischen Belastungen für den Gründungsfelsen bringt, dann bleibt nur mehr eine Schüttdammvariante zur Realisierung eines konkreten Stauraumes übrig.

Im Zusammenhang mit horizontalen Gewölbewirkungen soll weder von Wind- noch von Wasserabweisern (z.B. Fundamente für Brückenpfeiler) gesprochen werden, denn wie es diese Begriffe schon ausdrücken, handelt es sich hier nicht um Konstruktionen zur Bündelung von Spannungen, sondern nur zu deren Ablenkung. Wenn allerdings Wasser zum Spannungsverursacher wird, wie dies beispielsweise bei Abschlußbauwerken von Staubecken der Fall ist, dann kann die Bogenwirkung bei strenger Einhaltung aller dafür erforderlichen Parameter sicherheitserhöhend und kostensparend genutzt werden. Ein großer Vorteil, den eine im Bogen gebaute Talsperre beispielsweise gegenüber einer Gewichtsmauer mit gerader Achsenausrichtung hat, liegt in der gegenseitigen Abstützung der einzelnen Betonierblöcke. Trotz Verdübelung der Blockfugen wird nämlich die Sicherheitsbeurteilung einer geraden Gewichtsmauer, was den Gründungsfelsen betrifft, im wesentlichen nur auf die Gleitsicherheit jedes Einzelblockes konzentriert sein. Bei einer Bogenstaumauer wird hingegen eine gegenseitige Verspannung der einzelnen Blöcke aktiviert, sodaß sich die Sicherheitsbetrachtung auf ganze Mauerabschnitte erstrecken kann.

Die vorstehenden Überlegungen können am Beispiel der 39 m hohen **Bogengewichtsmauer Paal** in der Steiermark veranschaulicht werden. Gewisse Zwänge, die sich aus der Gesamtkonzeption des gegenständlichen Stauprojektes inklusive der Wirtschaftlichkeitskalkulationen einerseits und andererseits aus den topographischen Verhältnissen ergeben haben, grenzten den Standort der Talsperre Paal stark ein.

Die von technischer Seite ausgewählte Sperrenstelle bot eine gut aufgeschlossene linke Talflanke aus hartem Konglomerat, das auch im Talboden unter der Überlagerung mit 3 Bohrungen nachgewiesen werden konnte. Der rechte Talhang war hingegen von Schuttmassen bedeckt, aus denen nur zwei isolierte Felsrippen herausragten. Da ein kleiner Speicherraum einem großen Einzugsgebiet gegenüberstand, war die Hochwasserabfuhr ein besonders wichtiger Faktor in den Projektierungsüberlegungen. Man glaubte daher, daß eine Gewichtsmauer mit zentralem Hochwasserüberfall allen technischen und wirtschaftlichen Aspekten am gerechtesten wird.

Die Planung war schon so weit fortgeschritten, daß die Einreichung bei der zuständigen Behörde erfolgen konnte. Bei diesem Projektierungsstand wurde der Verfasser als geologischer Berater für die Detailplanung und Baubetreuung beigezogen. Da die rechte Einbindungsflanke aufgrund der Schuttüberdeckung nicht eindeutig beurteilt werden konnte, konzentrierten sich die folgenden Erkundungsarbeiten auf diesen Hangabschnitt. Frische Straßenanschnitte knapp oberhalb der künftigen Sperrenkrone hatten zudem einen stark gelockerten und streifenweise engständig geklüfteten Felsverband gezeigt, dessen mögliche Fortsetzung in den Bereich der künftigen Sperrereinbindung nicht auszuschließen war. Kernbohrungen und Felsfreilegungen in drei Schürfröschen sollten bald darauf diesen Verdacht bestätigen (Abb. 36 + Abb. 37, Anhang).

Einen hohen Zerlegungsgrad und große Wasserdurchlässigkeiten des künftigen Gründungsfelses zeigten die Bohrungen. Die bedenklichsten Ergebnisse brachten

jedoch die Felsfreilegungen. Zahlreiche Klüfte hatten weiche Lehmfüllungen von Millimeter bis Zentimeter Dicke. Über ausgedehnte Bereiche glich der würfelig zerlegte Fels einem Trockenmauerwerk mit weicher Bettung der einzelnen Quader (Abb. 38).

Die Schlußfolgerungen waren:

- Die Lehmfüllungen der Klüfte waren nicht verrottete Klufftone einer Scher- oder Störungszone, sondern es handelte sich um eingeschlammte Feinstoffe. Daher sollten sie gegen die Tiefe zu sowohl in ihrer Häufigkeit als auch Dicke abnehmen.
- Wasserabpreß- und Pressiometerversuche vor - und nach Bohrlochinjektionsversuchen mit Zementsuspensionen ergaben, daß die Lehmklüfte durch vorangegangene Spülungen nicht so weit gesäubert werden konnten, daß Injektionen eine nachhaltige Gebirgsverfestigung hätten bewirken können. Die Felsnachgiebigkeit konnte nur um etwa 15 % in Richtung größerer Steifigkeit verbessert werden. Dies war für höhere Belastungen des Gründungsfelses deutlich zu wenig.
- Eine befriedigende Untergrundabdichtung war hingegen möglich.
- Die Lehmklüfte haben den Gleitsicherheitsnachweis für konkrete Einzelblöcke einer geraden Gewichtsmauer sehr in Frage gestellt.

Aufgrund dieses Ergebnisses war das Einreichprojekt nicht mehr aufrechtzuerhalten. Es ging ja noch von ähnlich guten Gebirgsverhältnissen aus, wie sie der linke Einbindungshang zeigte.

Die Lösung brachte schließlich der Vorschlag des beratenden Geologen, eine **Bogen-Gewichtsmauer** zu planen (Abb. 39). Für eine schlanke Bogenmauer waren die Fundierungsverhältnisse in der rechten Einbindungsflanke ungeeignet. Hohe konzentrierte Spannungsableitungen hätten hier zu unzulässigen Verformungen im Untergrund und folglich auch in der Mauerschale geführt. Eine Spannungsbegrenzung mit max. 200 N/cm<sup>2</sup> schien hingegen vertretbar. Dieser Wert wurde daher von geologischer Seite als äußerste Grenze für die Umplanung der Sperre angegeben. Zuzufolge der Bogenwirkung war nun auch eine Spannungsverteilung auf mehrere Blöcke sichergestellt. Allenfalls nachgiebigere Teilbereiche konnten überbrückt werden. An Stelle des Gleitsicherheitsnachweises eines jeden Einzelblockes war nunmehr eine räumliche Betrachtung des Gesamtsystems zulässig. Die schadlose Hochwasserabfuhr über die Sperrenkrone war ebenfalls gewährleistet (vgl. Abb. 39).

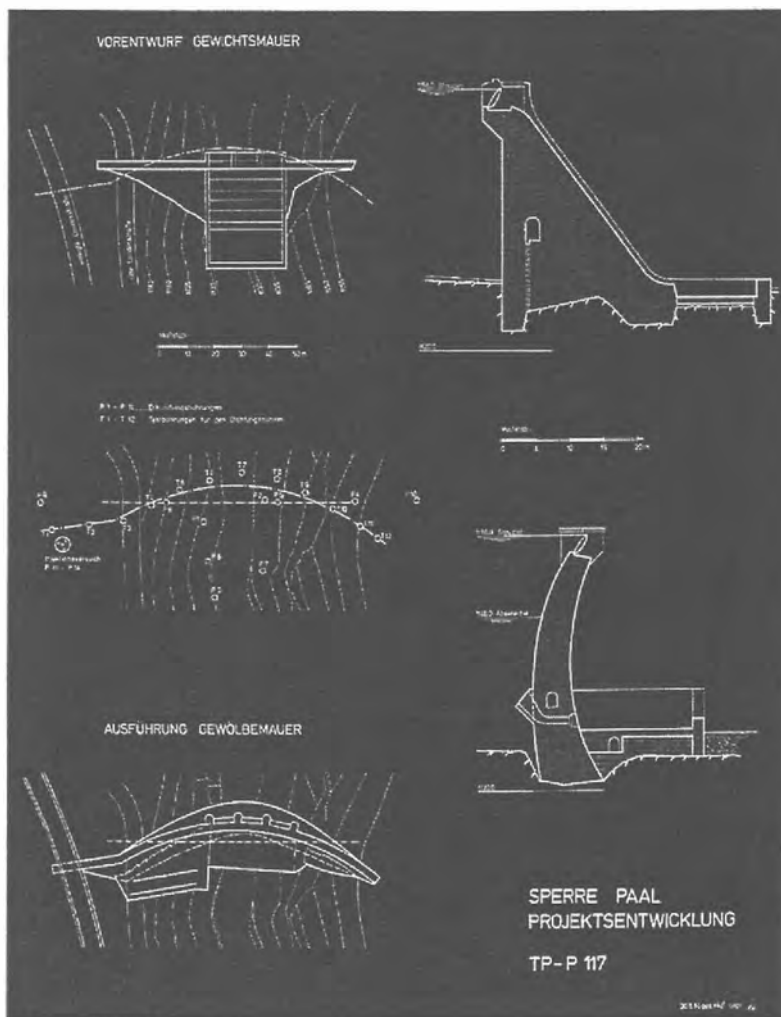


Abb. 39: Projektentwicklung

Der Erfolg war perfekt. Die zahlreichen hochempfindlichen Meßeinrichtungen, mit denen die Sperre Paal vorsorglich ausgestattet wurde, haben nach nunmehr schon 19 Betriebsjahren (erster Einstau Mitte Juli 1982) ein ausgezeichnetes Verhalten von Sperre und Untergrund bestätigt. Allerdings mußte der Felsaushub in der rechten Flanke zweimal kräftig vertieft werden.

Darüberhinaus hat der angetroffene, minderwertige Felszustand zu theoretischen Gleitkreisuntersuchungen Anlaß gegeben, deren Ergebnis es ratsam erscheinen ließ, den rechten Sperrenflügel noch zusätzlich mit einer rückverankerten Vorlandplombe zu sichern (Abb. 40 und 41 im Anhang).

Das Beispiel der Sperre Paal zeigt die Nützlichkeit der Bogenwirkung in einem eher ungewöhnlichen Bild auf. Hier trug sie nämlich maßgeblich dazu bei, daß ein Stauprojekt trotz gewisser geologischer Mängel in einer Talflanke überhaupt realisiert werden konnte. Im Normalfall müssen für die Gründung von Bogenstaumauern besonders die beiden Einbindungsflanken einwandfreie Gebirgsverhältnisse aufweisen. Hierzu scheint die Projektierungsgeschichte der Sperre Paal im Widerspruch zu stehen. Aber dieses Beispiel unterstreicht eben besonders die Leistungsvielfalt der Bogenwirkung.

Spannungsumlenkungen durch mehr oder weniger horizontale Bogenwirkungen sind zwar im Baugeschehen am transparentesten bei schlanken Bogenstaumauern, aber auch bei **Schüttdämmen für Stauhaltungen** nicht auszuschließen. Ruft man sich in Erinnerung, was eingangs über vertikale Lastenwirkungen auf Gewölbe in Lockersedimenten und deren Spannungsumlenkung über Gewölbebildungen beschrieben wurde (Siloeffekt, Stahlblech-Durchlässe, dünne Spritzbetonschalen etc.), dann kann man Gleiches auch um 90° verdreht bei im **Bogen geschütteten Staudämmen** annehmen (Abb. 42, Anhang).

Voraussetzung dafür sind aber vergleichbare Rahmenbedingungen. Das heißt, eine vertikale Schale oder Membran aus Beton, Kunststoff oder Bitumengemisch als zentrale, schlanke Dichtwand in einem im Bogen errichteten Schüttdamm würde vermutlich über begrenzte Verformungen, wie sie bei jedem Staudamm auftreten, Bogenwirkungen im luftseitigen Stützkörper aktivieren. Dadurch könnten zusätzliche Sicherheiten in das Bauwerk eingetragen, aber auch die Verformungen der zentralen Dichtwand reduziert werden. Dieser Aspekt erscheint besonders interessant für vertikale Dichtwände aus Beton, wie sie beispielsweise der Damm Bockhartsee aufweist. Nach Einschätzung des Verfassers ist dieser Gedanke einer bewußten Aktivierung einer Bogenwirkung bei Schüttdämmen noch nie ernstlich untersucht oder in Erwägung gezogen worden.

## 7.0 SCHLUSSWORT

Der Versuch einer umfassenden Darstellung der verschiedensten Wirkungsweisen von Gewölben in der Natur und Technik soll Anregungen vermitteln, wie die praktische Beratungstätigkeit des Geologen über die Beschreibung des Beurteilungsobjektes hinaus zur Mitgestaltung eines Bauprojektes erweitert werden kann. Als äußerst hilfreich hat sich dafür in einer langen Baupraxis die genaue Beobachtung von einschlägigen Phänomenen in der Natur erwiesen, die stets nach ihren Ursachen zu hinterfragen waren. Als zweite Säule eines vertieften Verständnisses muß rückblickend auch die oftmals intensive Mitarbeit in den Planungsbüros und auf Baustellen hervorgehoben werden. Das wertvollste dabei waren stets die Diskussionen mit den Bauingenieuren, um aus vielen Möglichkeiten die jeweils beste Lösung herauszufiltern. Dafür sollte dem Geologen im Vorfeld kein Detail so geringschätzig erscheinen, daß man seine Erhebung von vornherein delegiert. Nicht selten ist gerade der Schlüssel für eine gute Idee im Unscheinbaren oder nebensächlich Geglaubten zu finden. Dies ist insbesondere zu beherzigen, wenn man später als Erfahrener mit Prüfaufgaben betraut wird. Wenn daher in diesen Ausführungen auch einige Vergleiche zu einem Lächeln reizen, so ist zu hoffen, daß es kein spöttisches, sondern ein zustimmendes ist.

## QUELENNACHWEIS

BRANDL, H., BRANDECKER, H. (1982): Autobahnbau unter extremen geotechnischen Bedingungen (Die Tauernautobahn im Liesertal). [in:] BRANDL, H. (Hrsg.): Mitteilungen für Grundbau, Bodenmechanik und Felsbau, Technische Universität Wien, Heft 1, Wien.

(Abb. 15 und 32)

BRENNER-AUTOBAHN-AG (Hrsg., 1972): Die Brenner Autobahn. Die erste alpenüberquerende Vollautobahn. Verlag Tiroler Nachrichten, Innsbruck.

(Abb. 33)

DEMMER, W.: Zur Geologie der Tauernautobahn-Teilstrecke Hütttau – Eben (Abschnitt Fritzbachtal). [in:] TAUERNAUTOBAHN AG (Hrsg.): Tauernautobahn Scheitelsecke. Sonderdruck, Salzburg.

(Abb. 12)

INTERNET

(Abb. 8)

MANDL, G., Geologische Bundesanstalt Wien

(Abb. 6 und 7)

SZEPFALUSI, C., 1160 Wien

(Abb. 17)

Autor:

Dr. Wolfgang DEMMER  
A-2102 Bisamberg  
Rosengasse 12

## ANHANG



Abb. 1: Naturbogen, Utah



Abb. 2: Naturbogen



Abb. 3: Naturbogen, Utah



Abb. 4: Hafner



Abb. 5: Landscape Arch





Abb. 6: Eisbrücke



Abb. 10: Stahlfertigteildurchlaß

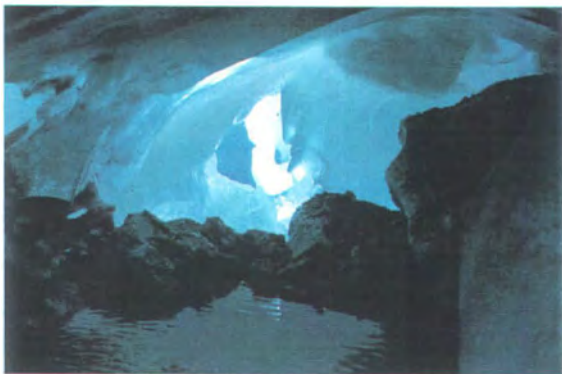


Abb. 7: Gletschereishöhle

Abb. 11 und 12 im Textteil



Abb. 8: Eisberg-Torbogen



Abb. 13: Larzenbachquerung



Abb. 9: Mesa Verde Nationalpark



Abb. 14: Tauernautobahn Talübergang Leoben

Abb. 15 im Textteil



Abb. 16: Eiffelturm



Abb. 19: Tschirgant-Bergsturz, Abbruchwand



Abb. 17: Schneeberg - Kar "Breite Ries"



Abb. 20: Gardasee, Arco-Bergsturz



Abb. 18: Dobratsch-Bergsturz

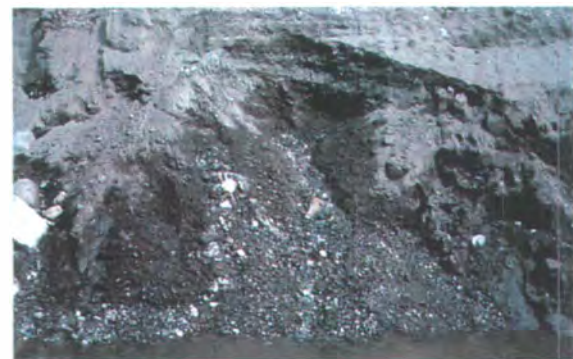


Abb. 21: Rutsch in Lockersedimenten



Abb. 22: Zarneschg-Sackung, Taleinengung



Abb. 23: Zarneschg-Sackung, Gesamtansicht



Abb. 24: Vajont-Sperre, Riesenbergrutschung im Zuge der Stauerichtung

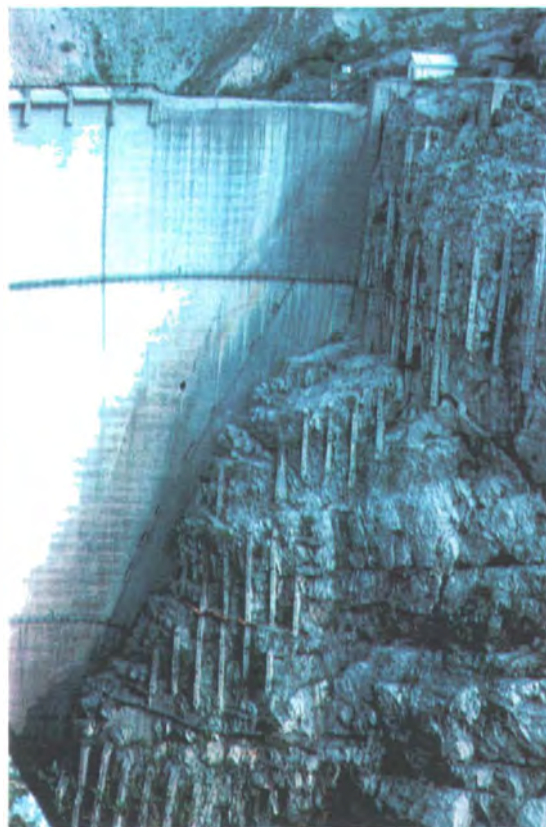


Abb. 25: Vajont-Sperre, massive künstliche Widerlagersicherungen



Abb. 26: Rutschhang Flachau



Abb. 27: Hangrutschung Gratkom-Tunnel Nord



Abb. 28: Rauchenkatsch-Rutschung



Abb. 29: Steinbruch im Bozener Quarzporphyr



Abb. 30: Steinbruch Kölnbrein



Abb. 31: Hangbrücke Liesertal

Abb. 32 und 33 im Textteil



Abb. 34: Kölnbreinsperre

Abb. 35 im Textteil



Abb. 37: Sperrre Paal, Felsfreilegungen



Abb. 36: KW Bodendorf, Sperrre Paal, Bohrkerne



Abb. 38: Sperrre Paal, starke Gefügauflockerungen

Abb. 39 im Textteil



Abb. 40: Sperre Paal, rechte Einbindung, ohne Vorlandplombe



Abb. 42: Feistritzbachdammbauwerk



Abb. 41: Sperre Paal, Vorlandplombe in Bau