

# Möglichkeiten und Grenzen im Druckstollenbau

Autor(en): **Seeber, Gerhard**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **99 (1981)**

Heft 29

PDF erstellt am: **25.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-74528>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Möglichkeiten und Grenzen im Druckstollenbau

Von Gerhard Seeber, Innsbruck

Der gegenwärtige Trend zu möglichst vollkommener Ausnützung vorhandener Energiereserven führt auch im Ausbau unserer Wasserkräfte zu immer kühneren Konstruktionen. Neue Techniken im Talsperrenbau erlauben einerseits den Bau von Talsperren mit Höhen bis über 300 m und erzwingen andererseits den Bau von Druckstollen für entsprechend hohe Innendrucke. Einfache Betonauskleidungen können diese Beanspruchungen auch bei bestem Gebirge nicht mehr rissefrei aufnehmen.

Eine Möglichkeit zur Beherrschung höherer Drücke sind Vorspannverfahren; eine weitere Verbesserung bringt eine Kombination von Kunststoffolie mit Vorspannung. Schliesslich bleibt bei höchsten Drücken, wie sie in den Druckschächten auftreten, nur mehr die Möglichkeit einer Stahlpanzerung. Aber auch hier lassen sich durch moderne Berechnungsmethoden und die Anwendung hochfester Stahlsorten wirtschaftliche Vorteile erzielen, ohne die Sicherheit zu vermindern.

In allen Fällen bringt der mechanische Ausbruch mittels Fräse bessere Bedingungen sowohl für die bauliche Ausführung als auch für die statische Wirksamkeit der Auskleidung. An vier Beispielen wird diese Entwicklung erläutert.

## Auskleidungsarten

Der Trend zu besserer Wirtschaftlichkeit führt sowohl zu grösseren Dimensionen als auch zu besserer Ausnutzung der bekannten Baumaterialien einschliesslich des Gebirges sowie zur Verwendung neuer Baustoffe und neuer Techniken. Einen Massstab für die Grösse der Beanspruchung dieser Druckstollen gibt die *Umfangszugkraft Z*, das ist das Produkt aus Radius  $r_i$  und Innendruck  $p_i$ . Bild 1 zeigt diese Daten für eine Auswahl hochbeanspruchter Druckstollen.

Die verschiedenen *Auskleidungsarten*, die sich in den Kosten und in der Wirkung sehr wesentlich unterscheiden, sind nun den Verhältnissen entsprechend optimal einzusetzen.

Sieht man von *unausgekleideten Druckstollen* ab, die in *Norwegen* auch bereits bis zu Innendruck von rd. 500 m gebaut wurden – allerdings meist in besserem Gebirge als in unseren tektonisch mitgenommenen Alpen –, so stehen uns folgende *Auskleidungsarten* zur Verfügung:

- Einfache Betonauskleidung,
- Vorgespannte Betonauskleidung,
- Vorgespannte Betonauskleidung mit Dichtungsfolie,
- Dünnwandige Panzerung mit Beul-sicherung,
- Dickwandige Panzerung.

Der schematische Höhenplan eines Druckstollens nach Bild 2 soll nun die Einsatzbereiche der verschiedenen Auskleidungsarten deutlich machen [1]:

Wesentlich sind dabei

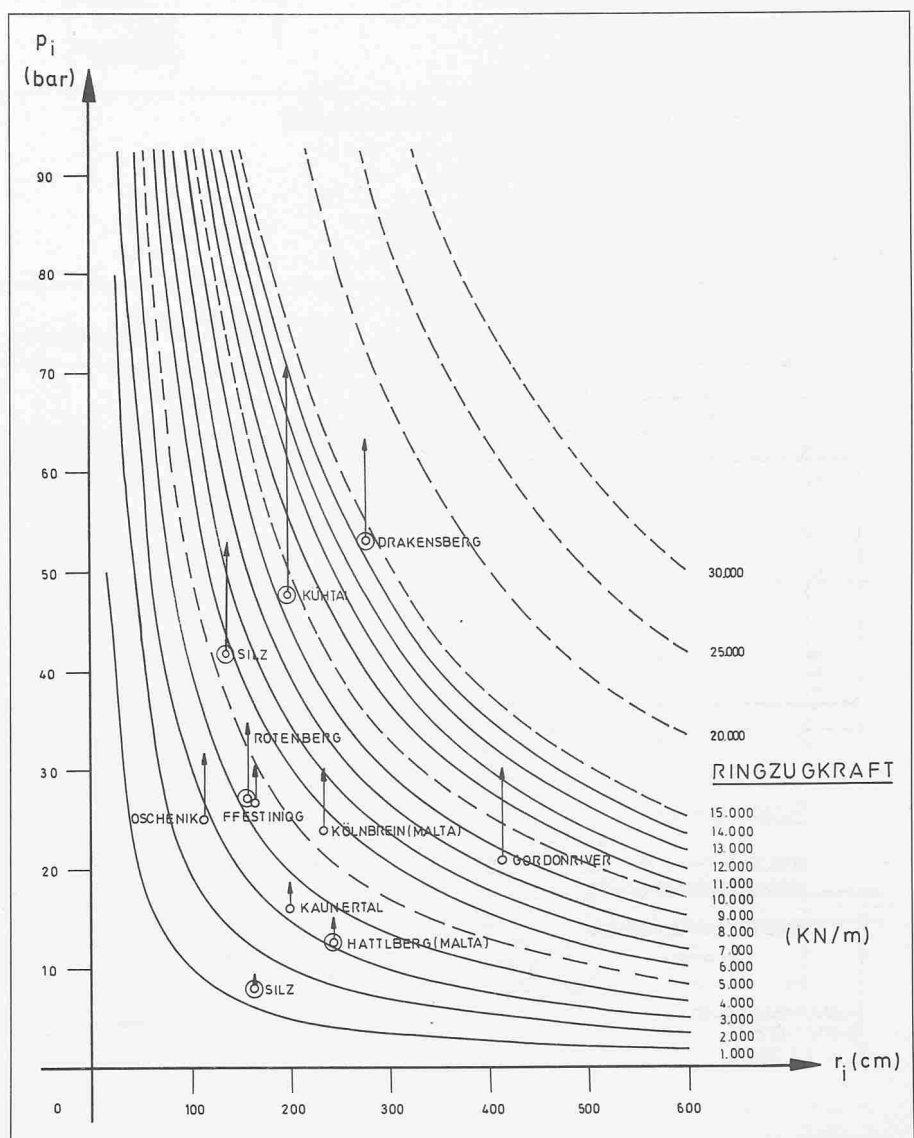
- die *Tiefenlage* des Stollens im Gebirge, d. h. das Verhältnis zwischen Innendruck und dem primären Spannungszustand des Gebirges und

- die *Lage zum Bergwasserspiegel*, d. h. das Verhältnis zwischen Innendruck und einem entgegenwirkenden, entlastenden Aussendruck.

Zumindest die *Vertikalkomponente* des Gebirgsdruckes kann relativ gut aus der Überlagerungshöhe abgeschätzt werden; etwas schwieriger ist die Abschätzung des *Seitendruckes*: Hierzu ist einige Erfahrung nötig; besser sind Messungen, da besonders tektonische Einflüsse schwer abschätzbar sind.

Viel leichter erfassbar bzw. messbar erscheint im ersten Augenblick die *Höhe des Bergwasserdruckes*. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass dies insbesondere während des Vortriebs auf grosse Schwierigkeiten stösst. Andererseits wäre gerade zu diesem Zeitpunkt die Kenntnis des Bergwasserdruckes sehr wichtig, um die Auskleidung möglichst wirtschaftlich bemessen zu können, denn jener Teil des Druckstollens, der hinter dem Gleichgewichtspunkt zwischen Innen- und Aussendruck, der sogenannten *Walchschen Grenze* [2], liegt, braucht ja eigentlich in bezug auf Wasserverluste nicht ausgekleidet zu werden, wenn das Gebirge standfest ist. Wird aus statischen Gründen und im

Bild 1. Einige Beispiele vorgespannter Druckstollen und Druckschächte



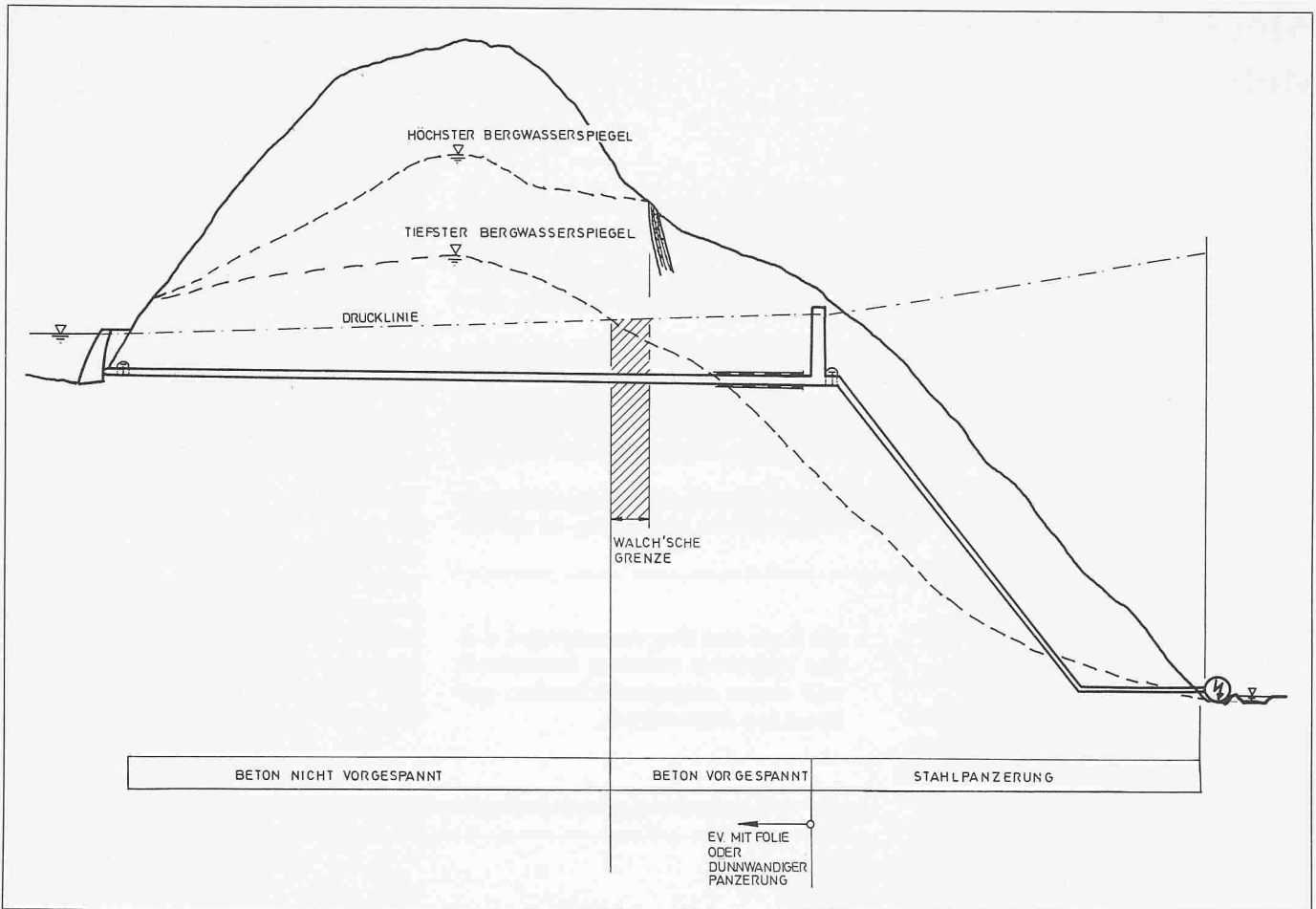
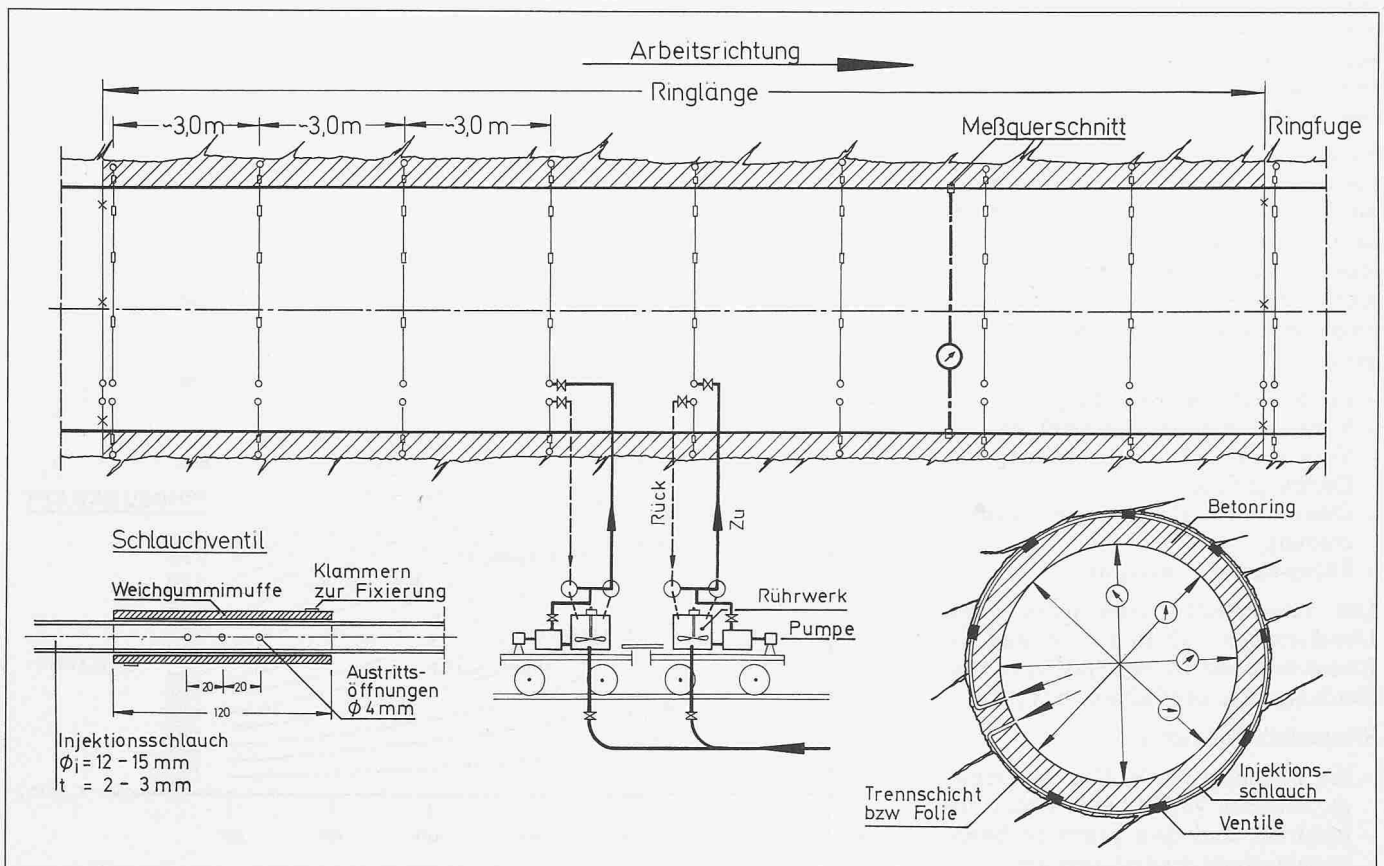


Bild 2. Schematischer Höhenplan eines Druckstollens und Druckschachtes

Bild 3. Das Tiwag-Spaltinjektionsverfahren



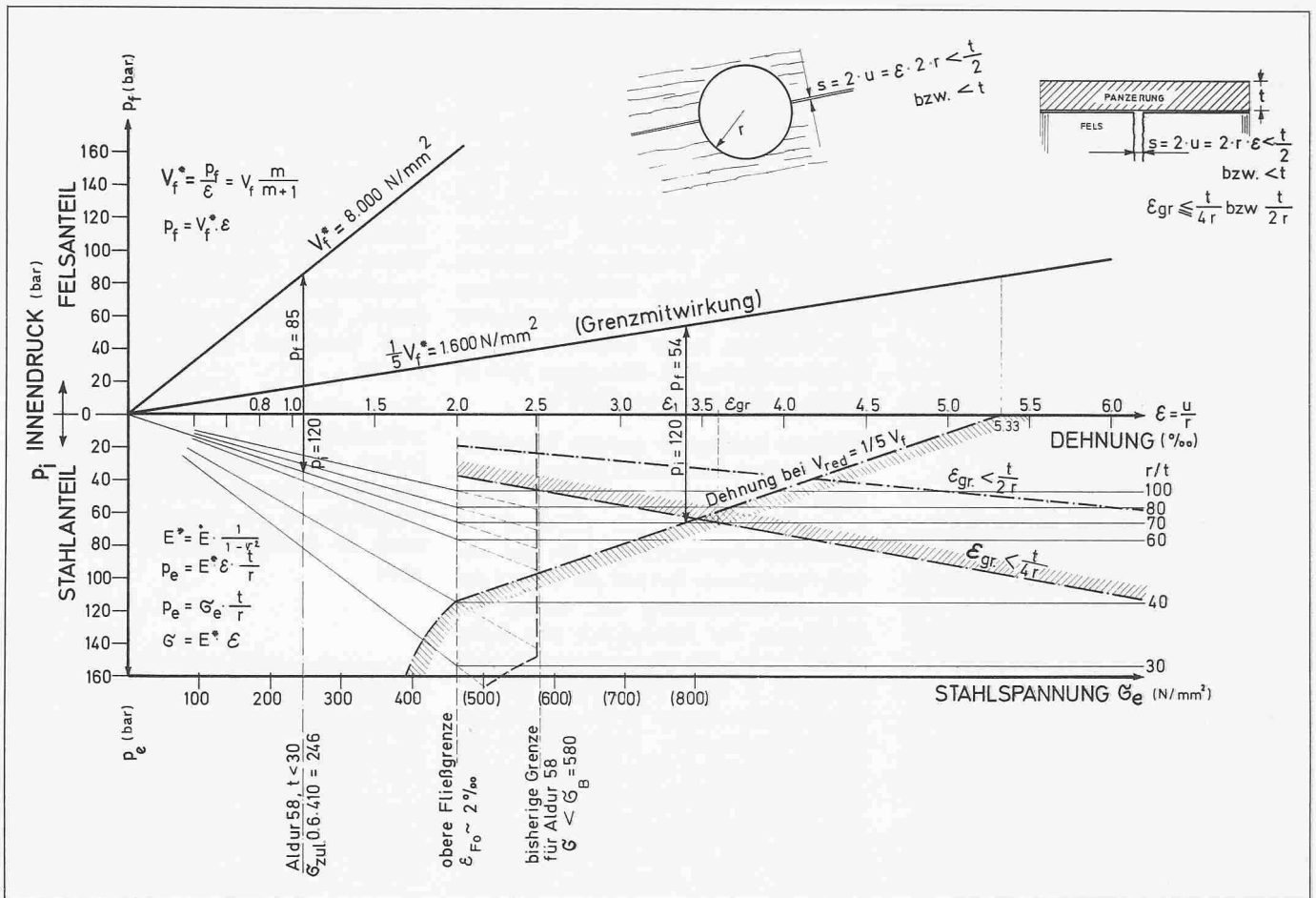


Bild 4. Bemessungsdiagramm für Druckschachtpanzerungen mit Grenzbedingungen

Hinblick auf die hydraulischen Reibungsverluste eine *Betonauskleidung* erforderlich, so sind zumindest keine weiteren zusätzlichen Massnahmen wie Vorspannung erforderlich.

Der folgende Abschnitt ist dadurch gekennzeichnet, dass der Bergwasserdruck nicht mehr in ausreichender Höhe ansteht oder nicht immer gesichert ist (z. B. infolge jahreszeitlicher Schwankungen oder indem er in einem klüftigen, drainierten Felsbereich absinkt). Hier kommt in erster Linie eine *vorgespannte Betonauskleidung* in Frage [3]. Für Vorspannverfahren mit Abstützung gegen das Gebirge wie das *Tiwag-Spaltinjektionsverfahren* [4, 20] (Bild 3) oder Vorspannung durch dichte Bohrlochinjektionen muss wieder eine genügende primäre Gebirgsspannung zur Erhaltung des Gleichgewichtes vorhanden sein. Interessanterweise zeigte sich immer wieder, dass diese Gebirgsspannung bei schlechterem Gebirge und genügender Überlagerung viel eher und gleichmässiger wirksam ist als in sehr gutem Gestein. Insbesondere bei *stollenparalleler Klüftung* und *geringem Seitendruck*, wie es eben bei gutem Gestein leichter möglich ist, tritt dann unter Umständen als Folge einer primären Undichtheit die Wirkung einer «*Hydraulischen Presse*» auf und führt zu Rissen in der Auskleidung.

Mit abnehmender Gebirgsüberlagerung und mit Annäherung an den gepanzerten Druckschacht erhebt sich die Frage, wie weit die teure Panzerung in den Berg hineingezogen werden muss. Bis vor wenigen Jahren war diese Frage immer am schwersten zu beantworten, da der Sprung in der sicheren Aufnahmefähigkeit des Innendruckes wie auch der Sprung in den Kosten zwischen einer Beton- und einer Stahlauskleidung sehr gross ist. Inzwischen ergab sich mit dem Einsatz von *Kunststoff-Folien* eine neue Auskleidungsart, die gerade für diese Übergangsstrecke eine ideale Lösung darstellt. Die Folie gewährt eine Dichtheit der Auskleidung, auch wenn durch zu grosse Nachgiebigkeit des Gebirges im Beton Risse auftreten sollten. Die Kombination der Dichtungsfolie mit Schutzfolien oder *Polypropylen-Vliesen* als mechanischem Schutz sowie die Kombination mit einer Zementmilchverpressung bzw. Vorspannung ergibt ein Auskleidungssystem, das mit grosser Sicherheit auch bei relativ hohen Drücken dicht bleibt. Die Folie ist beidseits glatt gebettet und der Betonring fest mit dem Gebirge verspannt.

Im Hinblick auf die Applikation der Folie und deren mechanische Beanspruchung bringt natürlich der sich mehr und mehr durchsetzende *maschi-*

*nelle Ausbruch* [5, 6] grosse Vorteile. Aber auch die statische Wirkung der Auskleidung wird durch die gleichmässige Kreisringform wesentlich verbessert – was übrigens auch für die einfache und besonders für die vorgespannte Betonauskleidung gilt.

Mit diesen vorgespannten Betonauskleidungen mit Dichtungsfolie wären wir heute ohne weiteres in der Lage, auch Druckschächte bis zu Innendrucken von rd. 500 m WS und mehr auszukleiden. Dass dies bisher noch nicht geschah, liegt weniger am mangelnden Vertrauen in die Technik als in der Schwierigkeit der Applizierung der Folien und der Durchführung der nötigen Arbeitsgänge im geneigten Druckschacht, wo sämtliche Arbeiten von einem Schrägaufzug aus vorgenommen werden müssen. Es ist sicher aber nur eine Frage der Zeit, bis auch dieses Problem gelöst sein wird – vielleicht bereits beim nächsten in *Österreich* gebauten Druckschacht.

Für *Druckschachtauskleidungen* bei hohen Gefällstufen kamen bisher praktisch nur *Stahlpanzerungen* in Betracht. *Moderne Bemessungsverfahren* (Bild 4) [7, 8, 9], beruhend auf *in situ gemessener Gebirgsmitwirkung*, die Verwendung vergüteter Feinkornstähle mit Streckgrenzen bis über 600  $N/mm^2$ , verbunden mit einer Spaltinjektion, welche die

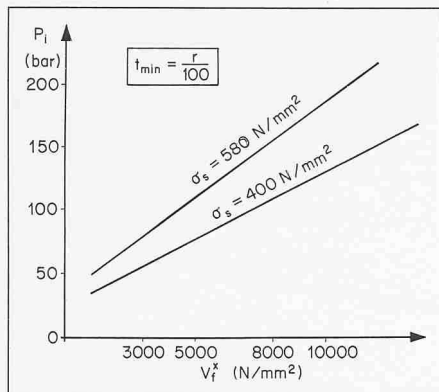
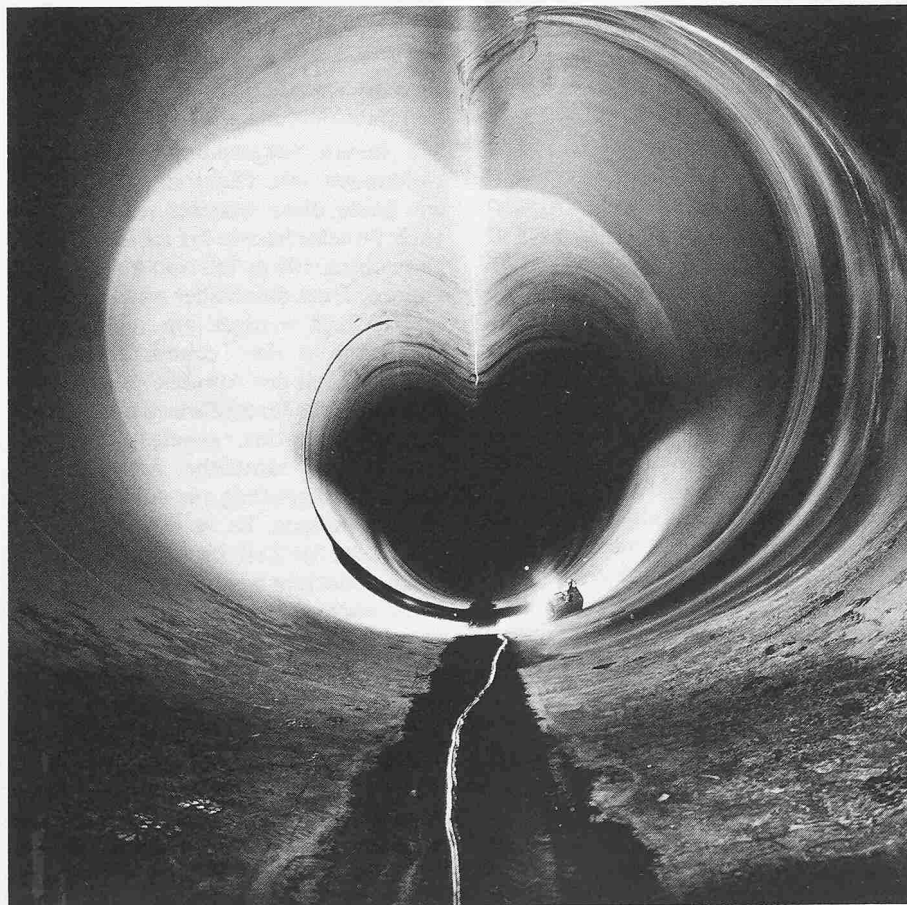


Bild 5. Mögliche Innendruckaufnahme einer Panzerung in Abhängigkeit von Stahlqualität und Verformungsmodul des Gebirges ( $t_{\min} = 1/100$ )

Gebirgsmitwirkung von Anfang an erzwingt, erbringen bei gutem Gebirge extrem dünne Wanddicken. So würde die konstruktive Mindestwanddicke für glatte Rohre von etwa einem Hundertstel des Radius ( $t/R = 1/100$ ) bei einem  $V$ -Modul des Gebirges von z. B. 8000  $N/mm^2$  und einer zulässigen Spannung von 60% der Streckgrenze (0,60  $F$ ) infolge der hohen Dehnung einen Innendruck von rd. 155 bar aufnehmen; davon entfielen auf das Gebirge allein rd. 120 bar. Das Beispiel (Bild 5) zeigt deutlich, dass heute der grösste Teil der Druckschächte mit der Minimalwanddicke gepanzert werden könnte.

Bild 6. Eingebeulte Druckschachtpanzerung



Zwei Gesichtspunkte müssen dabei jedoch beachtet werden: Erstens muss sichergestellt sein, dass das Gebirge die hohe Belastung sicher aufnehmen kann und dass dieser Belastung auch eine entsprechende *Primärspannung* entgegenwirkt. (Dies gilt vor allem für weichere, kriechfähige Gebirgsarten.) Besteht die Möglichkeit örtlicher Schwachstellen, so muss nachgewiesen werden, dass unter Berücksichtigung einer gewissen *grösseren Nachgiebigkeit* des Gebirges keine kritischen Spannungszustände, z. B. über einem Riss im Beton, auftreten können (Bild 4).

Zweitens bedingt die geringe Wanddicke trotz der hohen Streckgrenze eine *geringe Beulfestigkeit* des Rohres. Nicht umsonst traten *Unfälle* (Bild 6) bei Druckschachtpanzerungen bis auf wenige Ausnahmen fast nur auf Grund der *Aussendruckbelastung* auf. Neben der Bemessung auf Innendruck tritt daher immer mehr die Bemessung auf Aussendruck in den Vordergrund [10, 11, 12]. Daneben werden Wege gesucht, um durch konstruktive Massnahmen die *Beulfestigkeit* der Panzerrohre zu *erhöhen*. Ringversteifungen, Schubpratzen und Dübel bringen zwar eine erhöhte Beulfestigkeit, jedoch auch erhöhte Kosten für deren Montage, Mehrverbrauch, Mehrbeton und diverse Schwierigkeiten beim Einbau.

Als recht praktikable Lösung erwiesen sich *dünnwandige Rohre mit vorgefertigtem Beton-Innenring*, wie sie bereits im Schrägschacht des Wasserschlosses des *Kaunertalkraftwerkes* eingesetzt wurden [13]. Der Vorteil liegt in derselben Einbaumethode wie bei den glatten, dickwandigen Rohren, sodass der Bauablauf nicht geändert werden muss. Diese Rohre widerstehen hohen Bergwasserdrücken, können mit ebenfalls hohen Drücken hinterpresst werden und benötigen keinen Korrosionsschutz.

Nach wie vor geht die Entwicklung wirtschaftlicher Auskleidungssysteme jedoch dahin, die Technik der vorgespannten Betonauskleidung mit Dichtungsfolie so zu verbessern, dass sie auch in Schrägschächten anwendbar wird.

### Erfahrungen mit hochbeanspruchten Druckstollen- und Druckschachtauskleidungen

**Malta-Kraftwerk der Österreichischen Draukraftwerke AG** (Leistung rd. 900 MW)

Die grosse Stauhöhe von 200 m und die Morphologie des Geländes erzwangen eine Aufteilung der Rohfallhöhe von rd. 1300 m in zwei Stufen, eine Oberstufe knapp unter der *Kölnbreinsperre* und einer Hauptstufe mit einem rd. 20 km langen Druckstollen mit einem Durchmesser von 4,9 m, mit einem Innendruck bis rd. 10 bar (Bild 7) [14]. An das Wasserschloss schliesst ein rd. 200 m langer Schrägschacht an, der über einen rd. 1000 m langen Druckstollen, dem *Burgstallstollen*, zur oberflächlich verlegten *Druckrohrleitung* führt. Die den Zentralgneisen vorgelagerte Schieferhülle liess es ratsam erscheinen, den in einem Druckschacht zu erwartenden geotechnischen Schwierigkeiten auszuweichen.

#### Vorgespannte Betonauskleidung

Interessant ist für uns vor allem der letzte, rd. 1 km lange, vor dem Wasserschloss liegende Abschnitt des sogenannten *Hattelbergstollens* [15]. Etwa 1100 m vor dem Wasserschloss wurde beim Vortrieb eine Störung angefahren, die als Wasserstau wirkte und offensichtlich die *Walchsche Grenze* markierte.

Bis dorthin sah man eine einfache Betonauskleidung vor. Die anschliessende Strecke bis zum Beginn der Panzerung kurz vor dem Wasserschloss wurde nach dem *Tiwag-Spaltinjektionssystem* vorgespannt, wobei die letzten 100 m



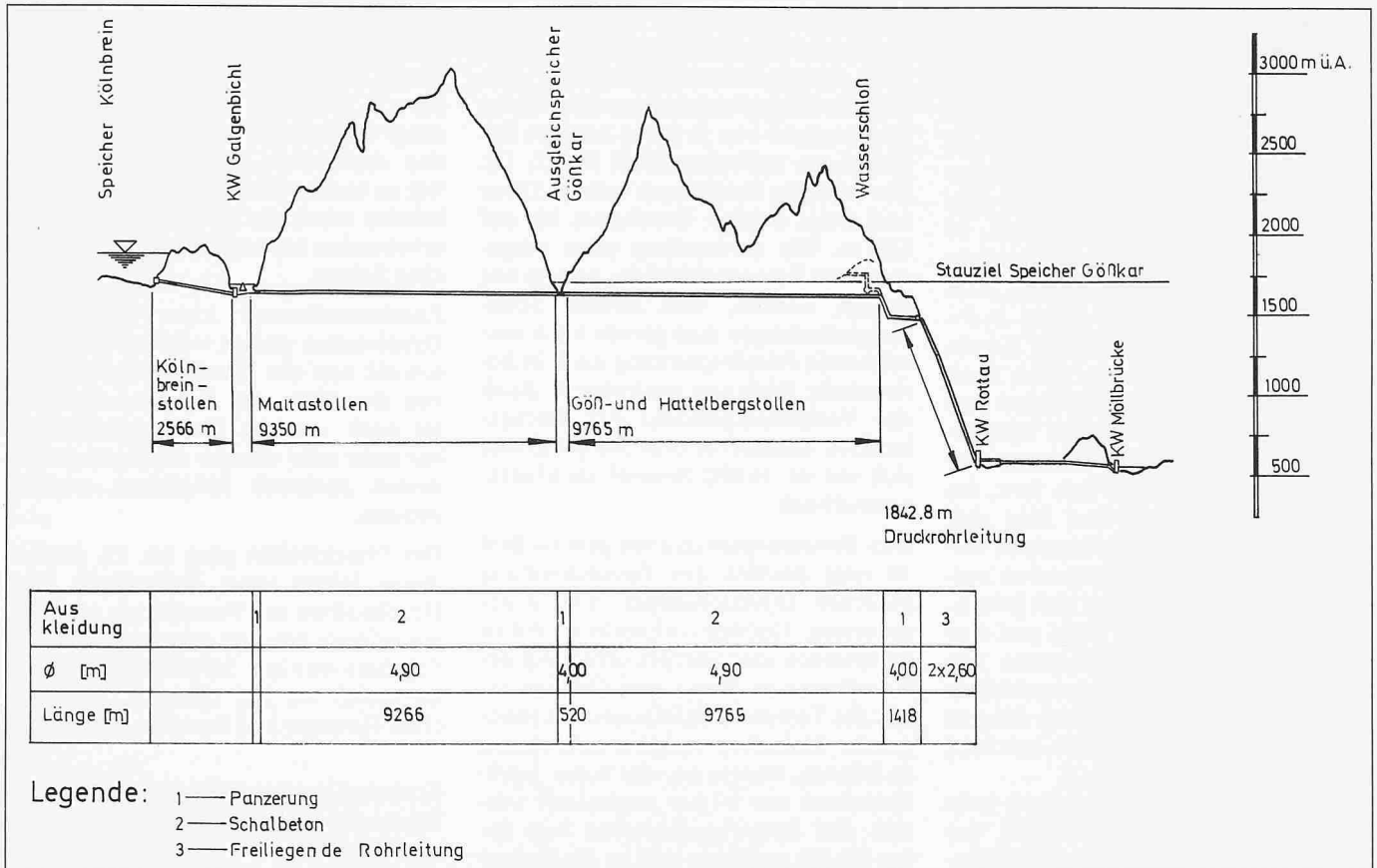


Bild 7. Malta Kraftwerk: Höhenplan

zusätzlich eine Dichtungsfolie erhielten. Der mehr oder weniger standfeste bis gebräuche, steil geklüftete Granitgneis wies zwar einige offene Klüfte auf, doch hofften wir durch sorgfältige Vorinjektionen und mehrfache Vorspanninjektionen mit entsprechend hohem Druck die Verhältnisse zu beherrschen. Bei der ersten Füllung traten jedoch zahlreiche Risse auf, die zu untragbaren Wasserverlusten führten und auch durch nachträgliche Injektionen nicht abzudichten waren. Letzten Endes musste dieser Abschnitt wohl oder übel gepanzert werden. Was waren nun die Ursachen für dieses ungünstige Verhalten der Auskleidung? [16]

Einerseits zeigten bergschlagähnliche Erscheinungen hohe Vertikalspannungen an, andererseits deuteten offene, steilstehende Klüfte auf nicht vorhandene Horizontalspannungen. Direkte Spannungs- bzw. Verformungsmessungen wurden aus verschiedenen Gründen leider unterlassen. Aus einer Langzeitbeobachtung des nahegelegenen Tauerntunnels der Österr. Bundesbahnen war bekannt, dass sich der Südrand der Tauern gegen den Nordrand im Mittel um etwa 1 m/m pro Jahr hob. Um einen allfälligen Einfluss dieser langsamen Hebung auf den Druckstollen zu erfassen, wurde auch durch den Druckstollen des Maltakraftwerkes ein Nivellementzug gelegt (Bild 8). Die erste Wiederholungsmessung nach der er-

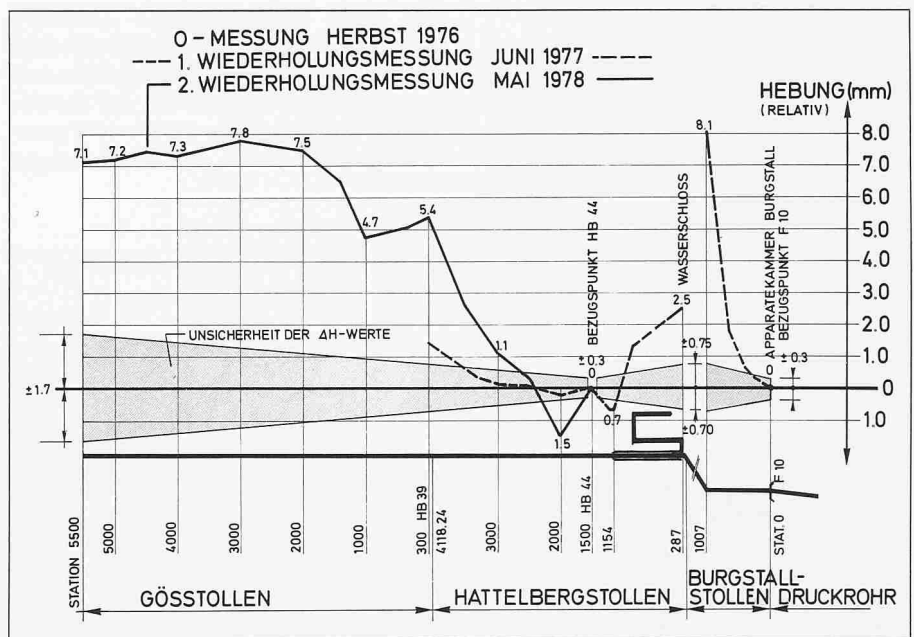


Bild 8. Nivellement im Hattelbergstollen: tektonische Hebung

sten Füllung zeigte nun überraschend eine ruckartige Hebung des vorderen Abschnittes während dieser ersten Füllung von nicht weniger als maximal 8 m/m. Möglicherweise haben gewisse Ausführungsmängel, wie wenig sorgfältige Vorinjektion der offenen Klüftbereiche und auch ein zu geringer Vorspanndruck von rd. 20 bar in den klüftigen Strecken, zu ersten Rissen und Wasseraustritten geführt. Vielleicht ha-

ben diese Wasseraustritte wiederum vorhandene gespeicherte tektonische Spannungen ausgelöst, wobei durch die Relativverschiebungen eine Auflockerung des Gefügeverbandes eintrat. Risse im Wasserschloß, das in sehr kompaktem Granitgneis liegt und keine Ausführungsmängel zeigt, weisen darauf hin, dass die Vorspannung nur auf Grund der tektonisch bedingten Auflockerung verloren gegangen sein kann.

**Vorgespannte Betonauskleidung mit Dichtfolie**

In der Übergangsstrecke zur Panzerung sollte nun erstmals eine stärkere Dichtungsfolie die Funktion einer dünnwandigen Panzerung übernehmen. Voraussetzung war, dass diese Folie unter dem vorhandenen Innendruck von rd. 10 bar auch Risse von einigen Millimetern überbrückt. Vorversuche zeigten, dass eine Kombination von einem P.-P.-Vlies mit einer 3 mm dicken Kunststoff-Folie in der Lage ist, einen Spalt von 5 mm Weite bis zu Drücken von 100 bar zu überbrücken. Das Vlies ergibt dabei eine günstige Schutzunterlage, lässt sich leicht am Fels bzw. am Spritzbeton befestigen und lässt sich auch leicht mit der Dichtungsfolie verschweissen. Bei der Spaltinjektion zwischen Vlies und Fels zeigte sich jedoch, dass das Vlies als Filter wirkt und eine Ausbreitung des Injektionsgutes verhindert. Um dem entgegenzuwirken, musste das Vlies noch mit einer dünnen PVC-Folie auf der Rückseite kaschiert werden.

Dieses System hat sich dann auch trotz der geschilderten Nachgiebigkeit des Gebirges bewährt und kam anschliessend auch beim jüngst in Betrieb gegangenen Sellrainkraftwerk auf rd. 1000 m Länge zum Einsatz.

**Pumpspeicherwerk Drakensberg der Electricity Supply Comm. of South Africa (Leistung rd. 1000 MW)**

An dem rd. 1500 m hohen *Absturz der*

*Drakensberge an der Ostgrenze des Oranje Freistaates* wird derzeit ein 1000 MW *Pumpspeicherwerk* errichtet, dessen *Zwillingsdruckstollen* mit einem Durchmesser von je 5,5 m extreme Bedingungen aufweisen (Bild 9) [17, 18]. Der statische Innendruck beträgt 530 m und steigt infolge Druckstoss bis auf 620 m. Die Anwendung einer vorgespannten Betonauskleidung konnte nur gewagt werden, weil direkte Spannungsmessungen eine gerade noch ausreichende Primärspannung auch in horizontaler Richtung nachwiesen. Auch der Verformungsmodul der flachgebauerten Sandsteine und Mergel erwies sich mit rd. 16 000 N/mm<sup>2</sup> als überraschend hoch.

Das *Bemessungsdiagramm* gemäss Bild 10 zeigt deutlich den Zusammenhang zwischen Injektionsdruck und Ringspannung. Um den vorhandenen hohen Innendruck unter Berücksichtigung des Kriechens von Beton und Gebirge sowie des Temperatureinflusses mit genügender Sicherheit rissefrei aufnehmen zu können, musste ein sehr hoher *Injektionsdruck* von 80 bar angewandt werden. Die Betonringspannung liegt daher für die verlangte und im Stollenbau praktikable Betongüte B 300 nahe der Bruchgrenze.

Das leicht *hufeisenförmige Ausbruchprofil* wurde zwar mit *Spritzbeton* sehr schön ausgeglichen, doch brachten nur geringe Abweichungen von der theoretischen Kreisringform bereits sehr grosse Biegespannungen, sodass an einigen

Stellen die Bruchgrenze überschritten wurde. Die Durchmesserkonvergenz betrug dabei bis über 15 mm, im Mittel etwa 8 mm. Die vorhandene Bewehrung verhinderte in diesem Fall aber das *Ausbrechen grösserer Betonkegel*, wie es sonst schon öfters geschah, und brachte somit der im Vorspannbereich arbeitenden Mannschaft einen zusätzlichen Schutz.

Zusammenfassend kann zu diesem Druckstollen gesagt werden, dass hier sowohl von der Betonbeanspruchung, von der Höhe des Injektionsdruckes, als auch von der Gebirgsmitwirkung her mehr oder weniger die Grenzen des derzeit praktisch Möglichen erreicht wurden.

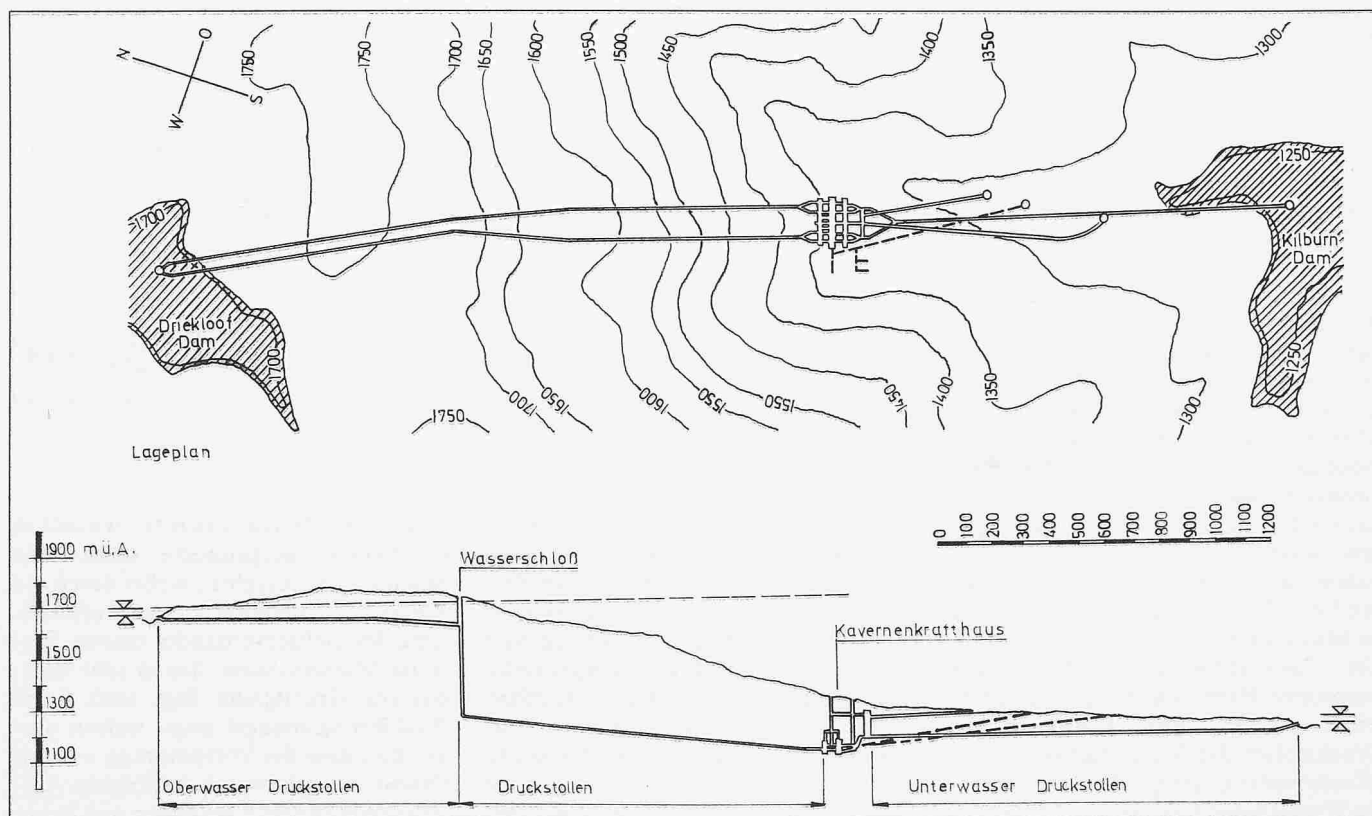
Der Druckstollen ging am 15. Januar dieses Jahres unter Probedruck. Der Druckaufbau zur Vermeidung von Rissen erfolgte bewusst sehr langsam. Das Ergebnis war laut Mitteilung der Bauherrschaft «a big success»; (Projekt: Gibb Hawkins and Partners, Rivonia).

**Kraftwerksgruppe Sellrain-Silz der Tiroler Wasserkraftwerke AG (Leistung rd. 760 MW)**

*Druckschacht der Oberstufe Kühtai*

Ein Grossteil des dem Zwischenspeicher Längental zufließenden Wassers muss in den Hauptspeicher Finsteral hochgepumpt werden (Bild 11) [5]. Die besonderen Betriebszustände der beiden je 150 MW starken Pumpturbinen bewirken im Druckschacht eine über-

Bild 9. Pumpspeicherwerk Drakensberg: Lage- und Höhenplan



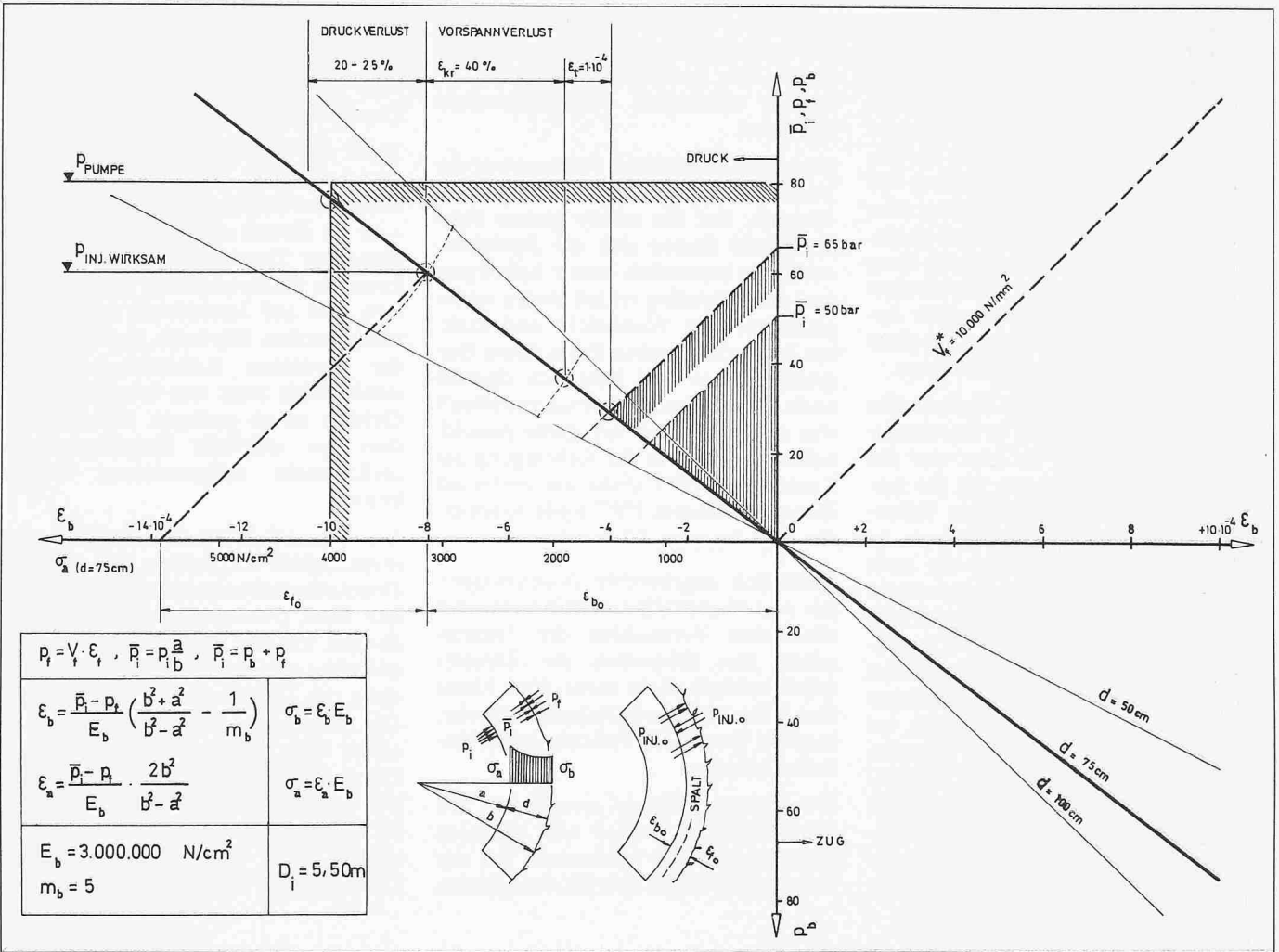
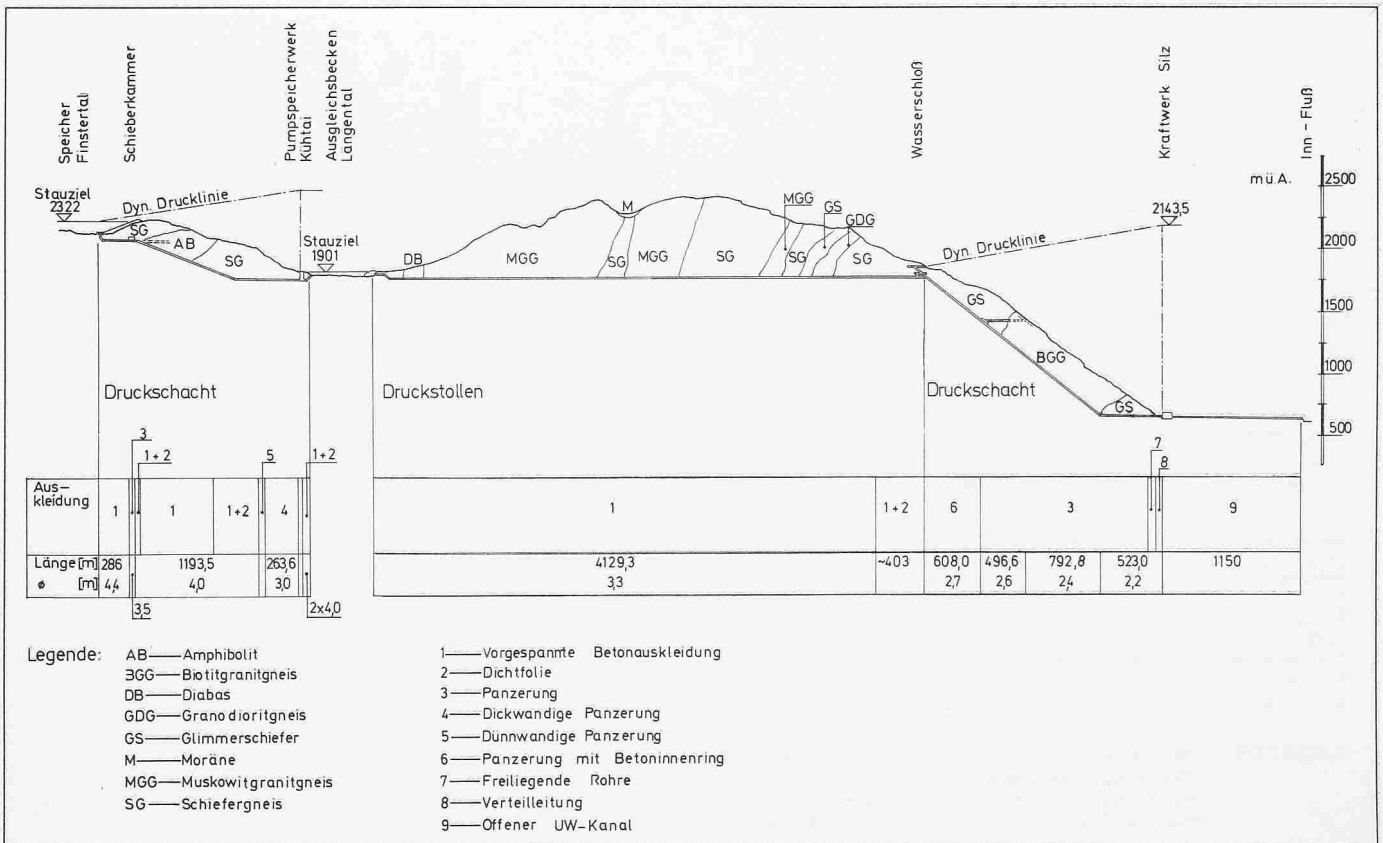


Bild 10. Bemessungsdiagramm für vorgespannte Betonauskleidungen von Druckstollen

Bild 11. Kraftwerksgruppe Sellrain-Silz: Höhenplan



- Legende:
- AB—Amphibolit
  - 3GG—Biotitgranitgneis
  - DB—Diabas
  - GDG—Grano dioritgneis
  - GS—Glimmerschiefer
  - M—Moräne
  - MGG—Muskowitgranitgneis
  - SG—Schiefergneis
  - 1—Vorgespannte Betonauskleidung
  - 2—Dichtfolie
  - 3—Panzerung
  - 4—Dickwandige Panzerung
  - 5—Dünnwandige Panzerung
  - 6—Panzerung mit Betoninnenring
  - 7—Freiliegende Rohre
  - 8—Verteilung
  - 9—Offener UW-Kanal



durchschnittlich grosse dynamische Druckerhöhung von etwa 80% des statischen Druckes. Dies brachte für die Auskleidung dieses Druckschachtes eine extrem hohe Belastung: maximaler statischer Innendruck rd. 380 m WS, maximaler dynamischer Druck rd. 700 m WS. Die Trassierung erfolgte so, dass einerseits der innere, mit Beton auszukleidende Abschnitt tief genug im Berg lag, andererseits für den maschinellen Ausbruch und die nachfolgenden Arbeiten eine günstige Neigung bei einer möglichst kurzen Länge gegeben war.

Auf rd. 300 m erhielt die Flachstrecke des Druckschachtes bei 3 m Durchmesser eine Panzerung; ab hier war die Überlagerung gross genug für die Anwendung einer vorgespannten Betonauskleidung mit 4 m Durchmesser. In den anschliessenden 400 m, die auch noch rd. 200 m in den Schrägschacht hochreichen, war der Schiefergneis teilweise gestört, weshalb hier noch zusätzlich eine Dichtungsfolie angeordnet wurde. Trotz des hohen Innendruckes wurde versucht, die Wanddicke so dünn als möglich zu halten, um eine möglichst hohe Elastizität der Auskleidung zu erreichen. Ein Injektionsdruck von 30–45 bar erzeugte in der 30 cm dicken Betonauskleidung eine Druckspannung hart an der Grenze der Druckfe-

stigkeit des Betons. Um die Vorspannung voll auszunützen, wurde der Injektionsdruck den jeweiligen tatsächlich an Proben ermittelten Festigkeitswerten angepasst.

Eine ganz wesentliche *Verbesserung* der Verhältnisse erbrachte der *maschinelle Vortrieb*: Auf der relativ glatten Felsoberfläche liessen sich die *Injektions-schläuche* wesentlich besser befestigen, und der Betonring erhielt wegen seiner gleichmässigen Wanddicke und exakten kreiszylindrischen Form kaum Biegespannungen und liess sich deshalb auch höher belasten. Ebenso vorteilhaft war natürlich auch der glatte maschinelle Ausbruch für die Anbringung der 3 mm starken *PVC-Folie*, die wieder auf einem mit dünner *PVC-Folie* kaschiereten *Poly-Propylen-Vlies* verlegt wurde.

Zusätzlich angebrachte *Injektionssperren* aus Vliesstreifen verhinderten ein allzuweites Vorauseilen der Zementmilch. Das Einpressen der Zementmilch erfolgte nicht mehr über hinter dem Vlies verlegte Injektionsschläuche, sondern über in die *Folie eingeschweisste Rohrstutzen*.

Der Druckschacht ist nun bereits seit Herbst 1980 in Betrieb und hat seine Bewährungsprobe bestanden. Bei der Druckprobe zeigte sich für den ganzen,

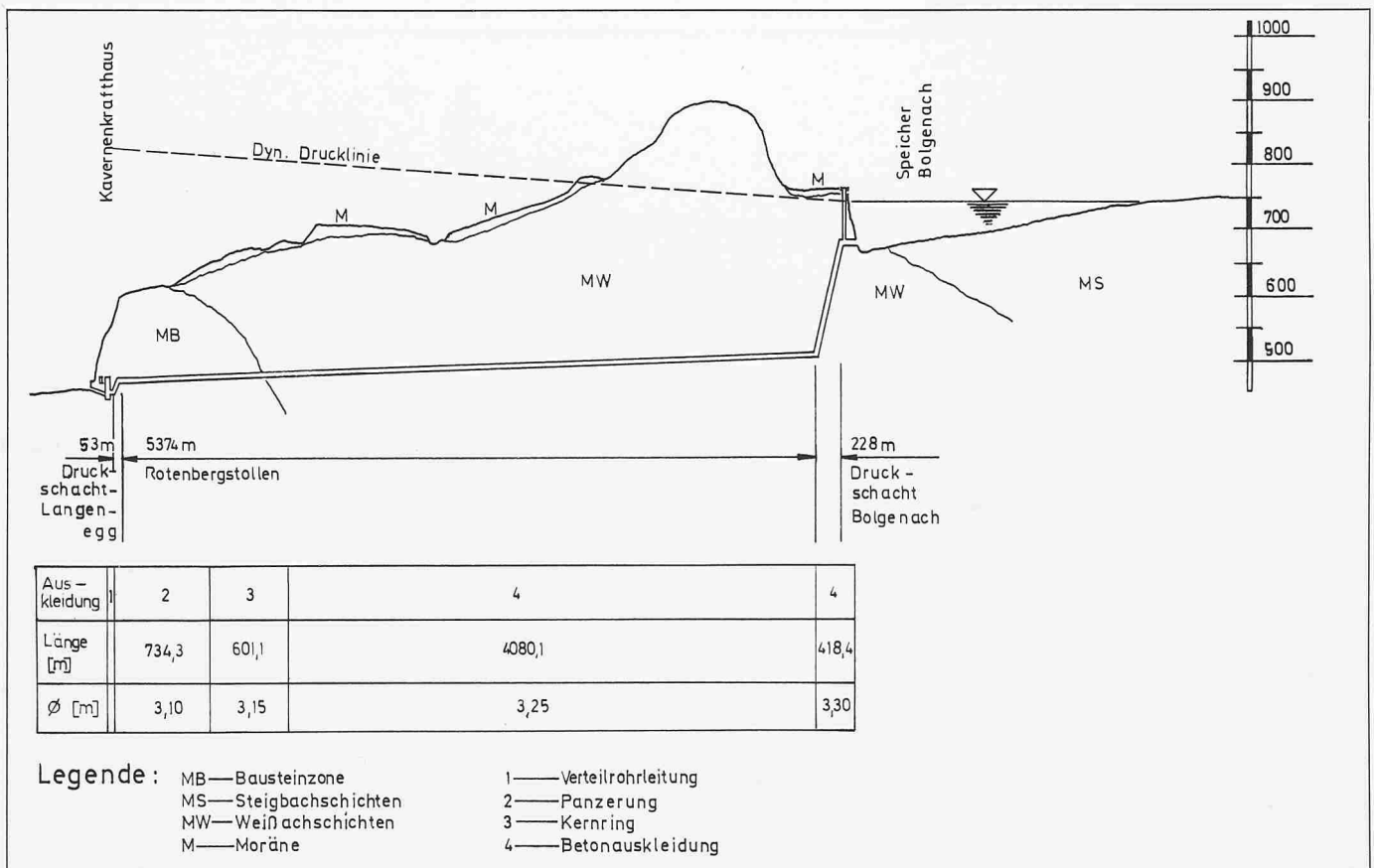
950 m langen, betonverkleideten Abschnitt ein Wasserverlust von lediglich rd. 1,61/s.

*Druckschacht der Hauptstufe Silz*

Trotz der enormen Druckhöhe dieses Druckschachtes von rd. 1250 m statischem und 1500 m dynamischem Druck – er ist derzeit einer der höchstbeanspruchten Druckschächte der Welt – kann die Stahlpanzerung nur im untersten Teil auf Innendruck voll ausgenützt werden. Die hohe Dehnfähigkeit der modernen Rohrleitungs-Sonderstähle führt trotz nur mittelmässigem Gebirge zu so geringen Wanddicken, dass der mögliche Bergwasserdruck nicht mehr aufgenommen werden könnte.

Um diesem Problem auszuweichen, war ursprünglich vorgesehen, den obersten Druckschachtabschnitt oberhalb Fenster Mais (Innendruck bis rd. 500 m) ähnlich wie den Druckschacht Kühtai mit einer vorgespannten Betonauskleidung mit Dichtungsfolie auszukleiden. Die Ergebnisse eines Versuches in einem 30 m langen Versuchsstollen im Fenster-Stollen Mais waren an und für sich befriedigend, doch zeigte sich, dass im Unterschied zu horizontalen Druckstollen oder dem flach geneigten Druckschacht Kühtai die Befestigung

Bild 12. Kraftwerk Langenegg: Höhenplan



der Folie und die nachfolgenden Arbeitsgänge von einem Schrägaufzugwagen aus äusserst schwierig würden. Die Tiwag entschloss sich daher, hier jenes System anzuwenden, das sich schon im Schrägschacht des Wasserschlosses des *Kaunertal-Kraftwerkes* bewährt hatte: Die *dünnwandigen Rohre* von 2,90 m Durchmesser wurden vor dem Einbau in einem Betonwerk mit einem 10 cm dicken Innenring aus hochfestem Beton B 500 versehen, der durch Vorwärmen des Stahlrohres leicht vorgespannt wurde.

Die Montage, Hinterbetonierung mit Gussbeton und Spaltinjektion erfolgte dann im Schacht auf dieselbe Weise wie bei den übrigen Panzerrohren, sodass keine Umstellung des Arbeitsablaufes erforderlich wurde. Lediglich der schmale Ring des Schweissnahtbereiches musste nachträglich noch ausbetoniert werden.

Der hochfeste Beton-Innenring erlaubt eine Spaltverpressung über die üblichen Injektionsleitungen mit einem Druck von 30–40 bar, sodass der Innenring eine weitere Vorspannung erhielt, die ein Reißen unter Innendruck verhinderte.

Gegenüber der Betonauskleidung mit Dichtungsfolie ist dieses System vollkommen unproblematisch beim Einbau im Steilschacht, und letzten Endes auch nicht wesentlich teurer.

#### Kraftwerk Langenegg der Vorarlberger Kraftwerke AG

Die relativ geringe mechanische Widerstandsfähigkeit der üblicherweise verwendeten Folien bringt im robusten Stollenbetrieb gewisse Probleme hinsichtlich der Verletzungsgefahr. Beim gefrästen, kreiszylindrischen glatten Ausbruch hat aber nun die bisher erforderliche hohe Flexibilität und Dehnfähigkeit nicht mehr die Bedeutung wie beim gesprengten Ausbruch, wo sich die Folie den Unregelmässigkeiten des rauen Ausbruchsprofiles anpassen musste.

Im Druckstollen des KW Langenegg (Bild 12) [19], dem Rotenbergstollen mit einem Durchmesser von 3,30 m und

**Literatur**

[1] *Seeber, G.*: «Neue Entwicklungen für Druckstollen und Druckschächte». ÖIZ, H. 5, 1975

[2] *Walch, O.*: «Die Auskleidung von Druckstollen und Druckschächten». Berlin 1926

[3] *Kieser, A.*: «Druckstollenbau». Wien 1968

[4] *Lauffer, H.*: «Vorspanninjektionen für Druckstollen». Der Bauingenieur, H. 7, 1968

[5] *Wanner, H.*: «Einsatz von Tunnelvortriebsmaschinen im kristallinen Gebirge». Diss. Nr. 5594, ETH Zürich, 1975

[6] *Pircher, W.*: «Erfahrungen im Fräsvortrieb bei der Kraftwerksgruppe Sellrain-Silz». Rock Mechanics, Suppl. 10, 127–154, 1980

[7] *Lauffer, H., Seeber, G.*: «Design and Control of Linings of Pressure Tunnels and Shafts, based on Measurement of the Deformability of the Rock». Bericht R. 91, 7. Icold-Kongress, Rom 1961

[8] *Lauffer, H., Seeber, G.*: «Die Messung der Felsnachgiebigkeit mit der Tiwag-Radialpresse und ihre Kontrolle durch Dehnungsmessungen an der Druckschachtpanzerung des Kaunertalkraftwerkes». Sitzungsberichte des 1. Kongresses der ISRM, Bd. II, Lissabon 1966

[9] *Seeber, G.*: «Die Sicherheit von Druckschachtpanzerungen». ÖIZ, H. 5, 1975

[10] *Amstutz, E.*: «Das Einbeulen von Schacht- und Stollenpanzerungen». Schweizer Bauzeitung, H. 28, 1969

[11] *Montel, R.*: «Formule semi-empirique pour la détermination de la pression extérieure limite d'instabilité des conduits métalliques lisses noyés dans du béton». La Houille Blanche, No 5, 1960

[12] *Finger, W., Wieser, H.*: «Zur Aufnahme des Aussendruckes bei Stollenpanzerungen – Neue Lösungen und ihre rechnerische Erfassung». Der Bauingenieur, H. 55, 1980

[13] *Lauffer, H.*: «Die Druckschacht- und Druckstollenpanzerungen des Kaunertalkraftwerkes». Der Bauingenieur, H. 2, 1966

[14] *Baustädter, K.*: «Kraftwerksgruppe Malta: Das Projekt und seine Verwirklichung». ÖZE, H. 1/2, 1979

[15] *Seeber, G., Heigerth, G., Bärenthaler, G., Finger, W.*: «Statische und hydraulische Bemessungsgrundlagen. Grundsätzliches über konstruktive Ausbildung (Druckstollen, Wasserschloss, Kraftabstieg)». ÖZE, H. 1/2, 1979

[16] *Seeber, G., Demmer, W., Finger, W.*: «Die Schäden im Hattelberg-Druckstollen als Folge eines aussergewöhnlichen Primärspannungszustandes». ISRM, Montreux, CH, 1979

[17] *Van der Walt, N.T., Graber, B.W.*: «Drakensberg Pumped Storage Scheme». Proceedings of the Tenth World Energy Conference, Istanbul, September 1977

[18] *Bowcock, J.B.*: «Drakensberg Pumped Storage Scheme». Tunnels & Tunneling, H. 1/2, 1979

[19] *Innerhofer, G.*: «Stress Measurements of the Rock Mass in the Headrace Tunnel Langenegg». Proceedings of the International Symposium on Field Mechanics, Zürich, 1977

[20] *Tiwag*: «Verfahren und Einrichtung zum Auskleiden von Druckstollen», Österreichisches Patent Nr. 265 980 und Auslandspatente

einem maximalen Innendruck von 350 m WS, der mechanisch in Sandsteinen und Mergeln vorgetrieben wurde, kam im Anschluss an die Stahlpanzerung in einer 700 m langen Übergangsstrecke im durchlässigen Sandstein eine dickere (5 mm) und festere und damit wesentlich widerstandsfähigere Folie zum Einsatz. Auf den Sohlstreifen der Folie wurde vorerst ein Sohlübbling mit den Schienen verlegt, sodass alle weiteren Arbeitsvorgänge und Transporte über dieses Gleis erfolgen konnten.

Die Anwendung dieser dicken, widerstandsfähigen Folien eröffnet voraussichtlich in den heute durchwegs mechanisch ausgebrochenen Druckschächten neue Möglichkeiten für den Einsatz wirtschaftlicher Betonauskleidungen mit Folienabdichtung bis zu Innendrücken von weit über 500 m WS.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. G. Seeber, dipl. Ing., Vorstand des Instituts für konstruktiven Wasserbau und Tunnelbau, Universität Innsbruck, Technikerstr. 13, A-6020 Innsbruck