Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 78 (1986)
Heft: 1-2

Artikel: Neuzeitliche Ausbildung von Druckstollen
Autor: Schleiss, Anton
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940834

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 02.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Neuzeitliche Ausbildung von Druckstollen

Anton Schleiss

Zusammenfassung

Dank einer über hundertjährigen Erfahrung ist der Wissensstand im weltweiten Druckstollenbau sehr ausgereift. Besonders die letzten zwei Jahrzehnte sind durch eindrückliche Entwicklungen gekennzeichnet: Innenwasserdrücke über 50 bar, neuartige Auskleidungen, tiefliegende Linienführungen und maschineller Ausbruch mit Vollvortriebsmaschinen.

Abstract: Modern trends in designing pressure tunnels

Due to over a hundred years of experience, today's know-how in constructing pressure tunnels is at a very advanced stage. The evolutions of the last twenty years have been spectacular: Pressure heads of more than 50 bars, new lining techniques, placement deep underground and mechanical driving by full-face tunnel boring machines are the main developments.

Résumé: Tendances actuelles dans la construction des galeries en charge

Grâce à une expérience plus que centenaire, le niveau des connaissances dans la construction des galeries en charge est très élevé. En particulier les deux dernières décennies sont caractérisées par une évolution impressionnante: des pressions d'eau intérieures dépassant 50 bars, mise en place des nouveaux revêtements, des tracés à grande profondeur et excavation par tunneliers à attaque globale.

1. Einleitung

Erste Druckstollen für Wasserkraftanlagen wurden in der Schweiz bereits um die letzte Jahrhundertwende gebaut. In den zwanziger Jahren haben Schweizer Ingenieure beim Versuch, das Druckstollenproblem wissenschaftlich zu ergründen, Pionierarbeit geleistet. Anstoss dazu gab das Versagen des Ritomstollens (Kraftwerk der Schweiz. Bundesbahnen im Kanton Tessin) im Jahre 1920 [1]. Die zur Abklärung dieses Schadenfalles eingesetzte Druckstollenkommission verfasste ein international vielbeachtetes Gutachten. Auch die erstmaligen Grossversuche im Stollen des Kraftwerkes Amsteg (1921) waren bezüglich Durchführung und Interpretation eine Pionierleistung. Der entsprechende Versuchsbericht diente in der Folge vielen Fachleuten als Grundlage zur Entwicklung einer eigentlichen Druckstollenstatik.

Dank dieser langjährigen Erfahrung ist der Wissensstand im weltweiten Druckstollenbau sehr ausgereift. Besonders eindrücklich sind die Entwicklungen der letzten zwei Jahrzehnte: Innenwasserdrücke über 50 bar, neuartige Auskleidungen, tiefliegende Linienführungen und maschineller Ausbruch mit Vollvortriebsmaschinen sind die wesentlichen Merkmale. Diese neuzeitliche Ausbildung von Druckstollen wird im folgenden mit ihren Tendenzen vorgestellt.

2. Zunahme der Beanspruchung von ungepanzerten Druckstollen im Laufe der Zeit

Für den Vergleich von verschiedenen Druckstollen bezüglich Beanspruchung wird üblicherweise die Ringzugkraft herangezogen [2, 3, 4]. Die Ringzugkraft entspricht dem Produkt von Innenwasserdruck und Innenradius des Druckstollens.

In Bild 1 sind einige hochbeanspruchte Druckstollen über die Ringzugkraft einander gegenübergestellt worden. Die heutigen «Spitzenreiter» wie Helms, Bath County, Racoon Mountain, Dinorwic und Drakensberg sind alles Druckstollen, die zum Triebwassersystem von Pumpspeicherwerken gehören. Die höchsten Innendrücke erreichen heute nahezu 100 bar: erstaunlicherweise geschieht dies beim unverkleideten Druckstollen Nyset-Steggie in Norwegen. Die grössten Durchmesser der bis heute realisierten Druckstollen sind im Bereich von 10 bis 12 m. Betrachtet man das Vergleichskriterium für die Beanspruchung, die Ringzugkraft, so ist aus dem Diagramm ersichtlich, dass der Druckstollen des Pumpspeicherwerkes Dinorwic (Wales) mit 24000 kN/m (statisch), resp. 28500 kN/m (dynamisch) am höchsten beansprucht ist. Um auch der Gebirgsqualität bei einem Vergleich Rechnung zu tragen, wurde in Bild 2 die Ringzugkraft durch den mittleren Gebirgsmodul dividiert. Der so erhaltene Wert entspricht bis auf einen konstanten Faktor der Radialverschiebung der unverkleideten, dichten Stollenlaibung. Betrachtet man diese «relative Ringzugkraft» für die am höchsten beanspruchten Druckstollen, so muss wohl der Druckstollen des Pumpspeicherwerkes Drakensberg (Südafrika) als momentaner «Spitzenreiter» bezeichnet werden [5].

Bild 3 zeigt die Zunahme der statischen Ringzugkraft im Laufe der Zeit. Einer der ersten stark beanspruchten Druckstollen war derjenige für die Trinkwasserversorgung von New York (1890) mit der Ringzugkraft von 2800 kN/m [6]. Bis zum 2. Weltkrieg war keine wesentliche Steigerung zu verzeichnen. Der damals höchstbeanspruchte Druckstollen in der Schweiz (Rossens) wies beispielsweise nur eine Ringzugkraft von ca. 3000 kN/m auf. Auch die Verdoppe-

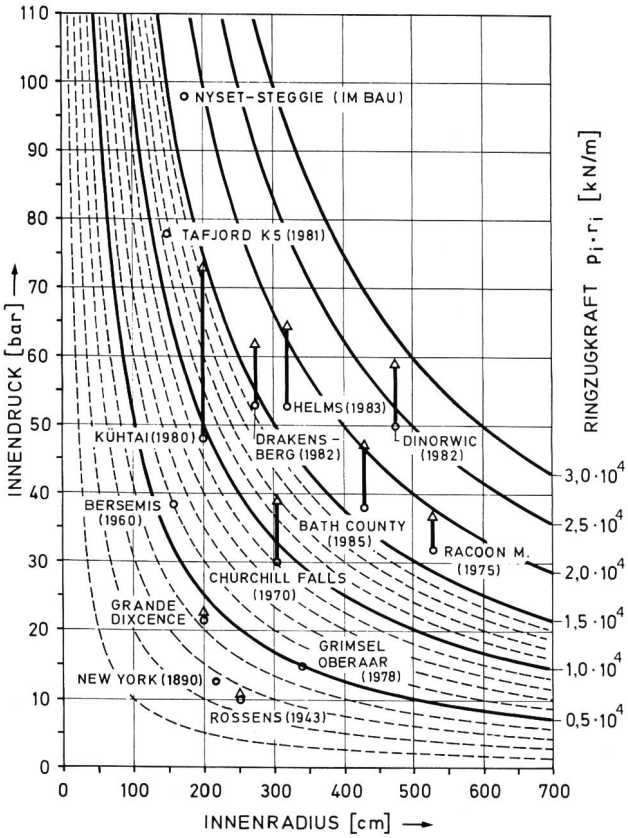


Bild 1. Beanspruchung von ungepanzerten Druckstollen und Druckschächten. Ringzugkraft als Produkt von Innendruck und Innenradius. Der Kreis bezeichnet den statischen Innenwasserdruck, der Pfeil den dynamischen.

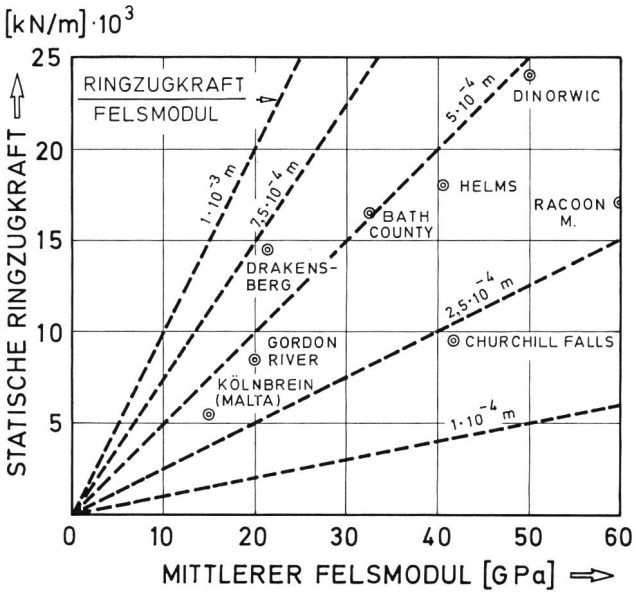


Bild 2. Ringzugkraft und Felsmodul für hochbeanspruchte Druckstollen.

lung der Ringzugkraft auf 6000 kN/m bis 1960 verlief relativ gemächlich. Doch in den sechziger Jahren setzte eine sprunghafte Zunahme der Ringzugkraft ein, die eigentlich bis heute andauert. Zu erwähnen in diesem Zusammenhang ist, dass auch die dynamische Beanspruchung von Druckstollen bei Wasserkraftanlagen mit Netzregelung und Pumpspeicherbetrieb stark zugenommen hat [28].

3. Horizontale Linienführung

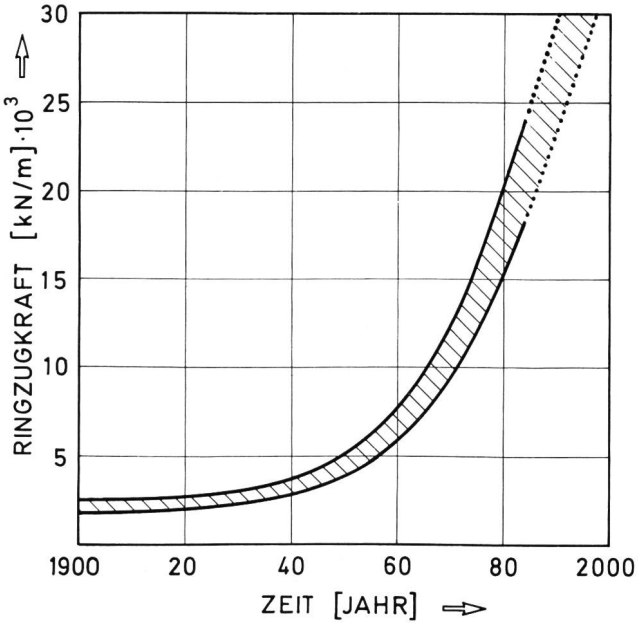
Die horizontale Linienführung einer Triebwasserleitung wird von folgenden Faktoren beeinflusst:

- Ausbruchsquerschnitt resp. Beanspruchung
- Geologie
- Topographie, d.h. vertikale und seitliche Gebirgsüberdeckung
- Hydrogeologie
- Zwangspunkte

Ziel einer jeden Projektierung ist es, unter Berücksichtigung sämtlicher Faktoren die wirtschaftlichste Linienführung zu finden.

Bei Triebwasserleitungen mit hohen Innendrücken sucht man vorteilhaft grosse Gebirgsüberdeckungen, um durch den Gebirgsdruck eine gewisse Entlastung zu erhalten. Die Probleme beim Vortrieb nehmen aber mit steigendem Gebirgsdruck je nach Grösse des Ausbruchquerschnitts erheblich zu.

Bild 3. Zunahme der Ringzugkraft im Laufe der Zeit.



Extrem schlechte geologische Verhältnisse können gewisse Linienführungen zum vornherein ausschliessen. So wie sich etwa ein Lichtstrahl seinen Weg durch optisch mehr oder weniger dichtes Material sucht (Fermatisches Prinzip), soll ein Druckstollen möglichst lange im guten Gestein verlaufen und schlechte Gebirgszonen entsprechend direkt durchqueren. Stark beanspruchte Leistungsstrekken, wie z. B. der Druckschacht, werden nach Möglichkeit in guten Gebirgszonen plaziert.

Zur Gewährleistung der Stabilität eines Stollens beim Ausbruch sowie dessen Dichtigkeit im Betrieb ist eine bestimmte seitliche und vertikale Gebirgsüberdeckung notwendig. Die hydrogeologischen Verhältnisse, vor allem die Lage des Gebirgswasserspiegels, können eine Linienführung ebenfalls entscheidend beeinflussen.

Durch das Bauprogramm und den Baubetrieb bedingte Fensterstollen sowie Deponieorte sind bei der Wahl der Linienführung oftmals als Zwangspunkte zu betrachten. Normalerweise unumgängliche Zwangspunkte sind zudem die Triebwasserfassung, Zwischenbeileitungen, Standort von Wasserschloss und Zentrale sowie der Rückgabeort ins Unterwasser.

Bei neuzeitlichen Triebwasserführungen wird auf möglichst viele der beschriebenen Einflüsse Rücksicht genommen, was oft zu komplexen Trassierungen führt. Als illustratives Beispiel einer modernen Triebwasserführung sei das Kraftwerk Walgau im Vorarlberg (Österreich) erwähnt [7].

4. Vertikale Linienführung

Grundsätzlich hängt die vertikale Linienführung von den gleichen Faktoren ab wie die horizontale. Weitere Randbedingungen ergeben sich aus der Entwässerung während des Baus sowie der Entlüftungsmöglichkeit des Systems bei Füll- und Entleervorgängen. Massgebenden Einfluss auf die vertikale Linienführung hat zudem die Bauweise der Zentrale (Kaverne, Maschinenhaus oder Schachtzentrale).

Die Projektierung einer Linienführung ist ein räumliches Problem und führt demzufolge zu einer mehrdimensionalen Optimierung. In der Praxis erfolgt die Optimierung meistens für die vertikale und horizontale Linienführung getrennt, also in einem stufenweisen Iterationsprozess.

Für die vertikalen Linienführungen im Hochdruckbereich ergeben sich grundsätzlich fünf in Bild 4 skizzierte Möglichkeiten. In der Schweiz begann die Entwicklung des Kraftwerkbaus vor allem mit Linienführung 1 (Bild 4). Bei Ausführungen um die Jahrhundertwende war der Stollen meistens als Freispiegelstollen oder Kanal ausgebildet, und die Funktion des Wasserschlosses übernahm der sogenannte Vorhof, ein künstliches Becken vor der Druckleitung. Die Linienführung 1 wurde nach dem 2. Weltkrieg zusehends durch 2 und 3 abgelöst.

Vor 1950 wurden in Norwegen [8] vorwiegend Linienführungen der Art 1 verwirklicht und zwischen 1950 und 1960 die Linienführung 3, bei welcher ab 1960 der gepanzerte Druckschacht durch einen unverkleideten Schacht ersetzt wurde. Seit 1975 gelangt 5 am häufigsten zur Ausführung, wobei auch hier auf eine Auskleidung des Druckstollens verzichtet wird. Diese für den Alpenraum geradezu sensationelle Entwicklung ist in erster Linie der durchwegs ausgezeichneten Felsqualität in Norwegen zuzuschreiben. Die Linienführung 4 wurde im steil gegen die Küsten oder Fjorde abfallenden Tafelgebirge von Skandinavien entwikkelt und wäre auch in der Schweiz bei Pumpspeicherwerken denkbar.

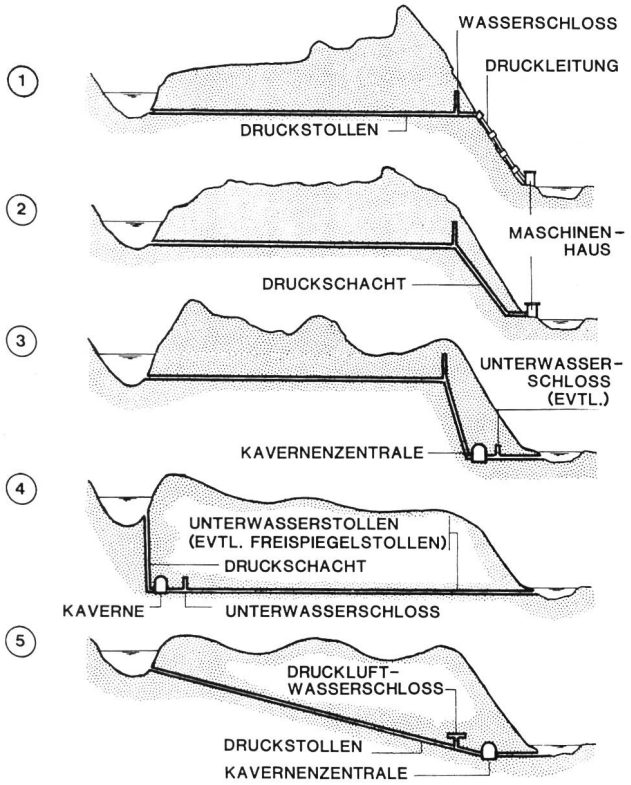


Bild 4. Verschiedene Möglichkeiten für die vertikale Linienführung des Triebwassersystems einer Hochdruckanlage.

Vertikale Linienführungen im Mitteldruckbereich, wie etwa bei Talsperrenkraftwerken, besitzen im wesentlichen dieselben Grundelemente (Druckstollen, Druckschacht, Wasserschloss). Von den eher kurzen Distanzen und geringen Gebirgsüberdeckungen her ergeben sich aber einige Besonderheiten, wie z.B. die Grenze der mittragenden Wirkung des Gebirges.

5. Querschnittsform

Für die üblicherweise höher beanspruchten Druckschächte hat sich schon zu Beginn des Kraftwerkbaus ein kreisförmiges Profil durchgesetzt.

Im Druckstollenbau überwogen bis nach dem 1. Weltkrieg die bei Eisenbahntunnels angewendeten hufeisen- und eiförmigen Querschnittsformen. Über die Bedeutung des Kreisprofiles wurde man sich erst durch das Versagen des Ritomstollens der SBB (1920) bewusst. Obwohl der Schaden an diesem Stollen nur untergeordnet durch die Abweichung von der Kreisform verursacht wurde, festigte sich doch die Erkenntnis, dass dadurch die Sicherheit nachteilig beeinflusst wird [9]. Heute kommt bis auf wenige Fälle bei Druckstollen nur noch das Kreisprofil zur Ausführung, welches sowohl statisch wie hydraulisch und somit auch wirtschaftlich gesehen als Idealform zu betrachten ist. Der maschinelle Ausbruch und die neuzeitlichen vorgespannten Auskleidungen verlangen zudem einen kreisförmigen Querschnitt. Bei konventionellem Vortrieb des Druckstollens wird mehrheitlich hufeisenförmiges Profil ausgebrochen, da die horizontale Sohle die Herstellung erleichtert. Mit der Auskleidung erhält der Stollen aber wieder einen Kreisquerschnitt (Bild 5 links). Aus baubetrieblichen Gründen wurde neuerdings bei einigen Druckstollen im Sohlenbereich durch Anordnung eines vorgefertigten Sohltübbings leicht von der idealen Kreisform abgewichen (Bild 5 rechts). Zusammenfassend kann gesagt werden, dass heute im Druckstollenbau durchwegs der Kreisquerschnitt vorherrscht.

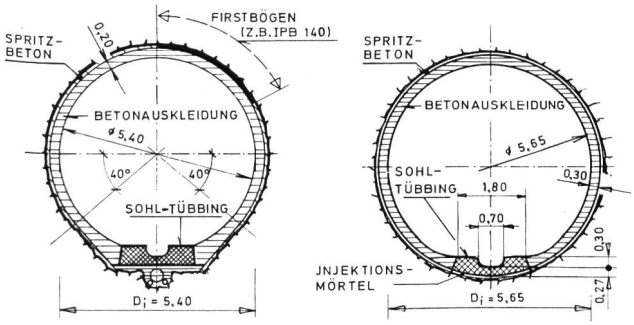


Bild 5. Querschnitte des Walgaustollens im Vorarlberg (1984).
Links: Konventioneller Ausbruch, Betonauskleidung, Vorauskleidung mit Spritzbeton und Firstbögen.
Rechts: Maschineller Ausbruch, Betonauskleidung, Vorauskleidung mit Spritzbeton.

6. Querschnittsabmessungen

Die optimale Ausbauwassermenge eines Triebwassersystems, die Auskleidungsart sowie die optimale Ausbaugeschwindigkeit für bestimmte Stollen- und Schachtabschnitte ergeben sich aus einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Diese vorgängigen Untersuchungen liefern somit beispielsweise auch den wirtschaftlichsten Durchmesser für einen Druckstollen. In letzter Zeit ist in Fachkreisen vermehrt die Frage erläutert worden, ob die Grenzen im Druckstollen- und Druckschachtbau erreicht sind. Aufgrund der momentanen Entwicklung muss diese Frage verneint werden. Wie im Sport dürften auch im Druckstollenbau weiterhin Weltrekorde gebrochen werden. Von maximal zulässigen Stollendurchmessern und Innendrücken kann also durchaus noch nicht die Rede sein. Unumstritten hingegen ist der minimale lichte Durchmesser, der aus baubetrieblichen Gründen etwa 2,4 m beträgt [10].

7. Zweck von Druckstollenauskleidungen

Das übergeordnete Ziel einer Auskleidung besteht in der Gewährleistung einer wirtschaftlichen Betriebssicherheit während der ganzen Lebensdauer eines Druckstollens. Dies kann erreicht werden, falls die Auskleidung entsprechend den örtlichen Bedürfnissen eine bestimmte Kombination der nachfolgenden Anforderungen erfüllt:

- Dichtigkeit
- Beschränkung der Wasserverluste
- Erhaltung der hydrogeologischen Verhältnisse im Gebirge
- Einschränkung der Druckverluste
- Dauerhaftigkeit
- Vermeidung von Unterhaltsarbeiten
- Erhaltung der mechanischen und chemischen Festigkeit des Gebirges
- Gewährleistung der Stabilität des Hohlraumes im Betrieb.

Die absolute Dichtigkeit einer Auskleidung ist nicht in allen Fällen erforderlich. Vielfach genügt es, die Wasserverluste klein zu halten. Eine Dichtung ist unumgänglich, falls eine chemische Zersetzung des Gesteins bei Wasserzutritt zu erwarten ist (z.B. Anhydrit, mylonisierte Kluftfüllungen). Das Verlustwasser kann auch die Stabilität des Hohlraumes gefährden, indem es einen Druck analog der hydraulischen Presse in den Felsklüften aufbaut oder durch seine Strömungskraft Kluftfüllungen auswäscht und so die Gleitfestigkeit abmindert. Durch die Undichtigkeit eines Druckstollens kann also auch die chemische und mechanische Festigkeit des Gesteins verändert werden.

Nicht nur der Wasserverlust, sondern auch der Wasserzutritt in einen Stollen kann unerwünscht sein. Eine allzu starke Störung der hydrogeologischen Verhältnisse kann

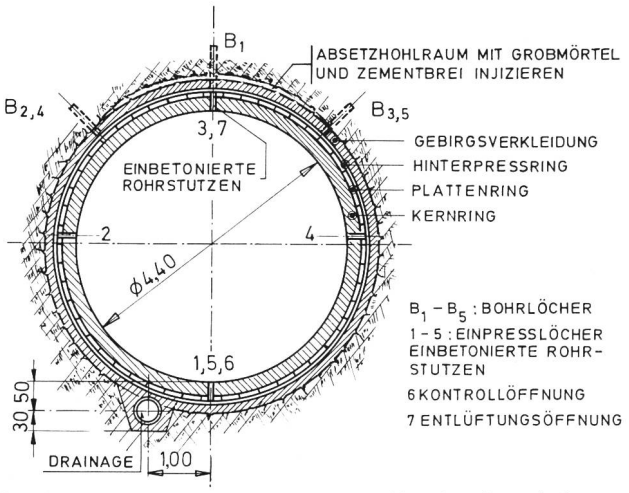


Bild 6. Kernringauskleidung mit betoniertem Kernring, Querschnitt.

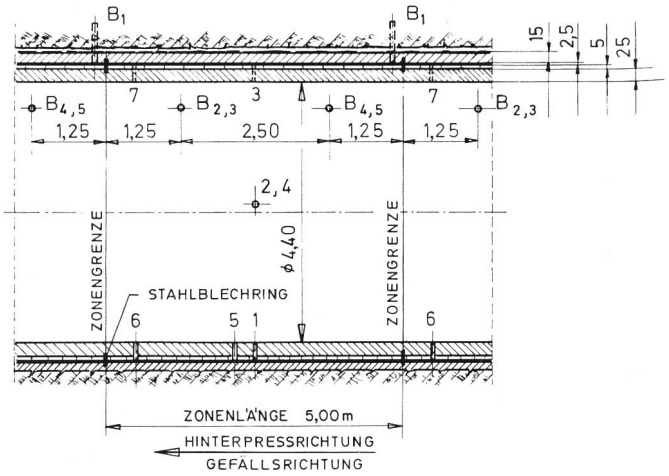


Bild 7. Kernringauskleidung mit betoniertem Kernring, Längsschnitt.

beispielsweise zum Versiegen von Trinkwasser- und Thermalquellen führen.

Neben den Erstellungskosten haben die durch die Rauhigkeit des Stollens verursachten Druckverluste und die Unterhaltskosten einen direkten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Eine Auskleidung soll also nicht nur billig, sondern auch noch möglichst glatt und dauerhaft sein. Die letztgenannte Eigenschaft steht auch im Zusammenhang mit dem Wunsch nach einem unterhaltsfreien Betrieb des Druckstollens.

Bis heute gibt es keine Druckstollenauskleidung, die alle erwähnten Anforderungen erfüllen kann und muss. Gewisse Anforderungen widersprechen sich auch, so dass normalerweise jede Auskleidung eine Kompromisslösung darstellt.

8. Arten von Druckstollenauskleidungen

Die Palette der in Vergangenheit vorgeschlagenen und teilweise ausgeführten Druckstollenauskleidungen ist äusserst vielfältig. Besonders nach den ersten Misserfolgen im Druckstollenbau in den zwanziger Jahren setzte eine Erfinderwelle ein, aus welcher bezüglich Material und Verfahren mehrere Auskleidungsarten hervorgingen, die teilweise auch patentiert wurden [10, 11, 12, 13]. Viele dieser Vorschläge konnten sich in der rauhen Baupraxis nicht durchsetzen und werden deshalb in diesem Abschnitt nicht beschrieben.

Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf Auskleidungen, die speziell aus den Bedürfnissen des Druckstollenbaus entstanden sind. Einige davon finden auch vermehrt Anwendung bei Druckschächten.

Spricht man von Druckstollenauskleidungen, so meint man in erster Linie die definitive Auskleidung der Stollenröhre im Hinblick auf die Unterdrucksetzung. Je nach Felsqualität erfordert der Ausbruchsquerschnitt natürlich vorgängig eine Sicherung mit Felsanker, Spritzbeton, Stahlbögen usw. Die definitive Auskleidung erfährt aber durch das Gebirge keine oder nur noch eine geringe Belastung, da zum Zeitpunkt deren Einbaues die Hohlraumdeformationen grösstenteils abgeklungen sind.

8.1 Unausgekleidete Druckstollen

Der Verzicht auf eine Auskleidung wird etwa von der Tiefenlage des Stollens sowie von der Standfestigkeit und Dichtigkeit des Gebirges abhängig gemacht [10, 11]. Die Dichtigkeit ist bei im Vergleich zum Betriebswasserdruck höheren Bergwasserspiegel nicht unbedingt nötig. Im Alpenraum war anfänglich der Anteil an unausgekleideten Druckstollen relativ hoch. Doch mit der Zunahme der Beanspruchung im Laufe der Entwicklung wurden die Ausführungsbeispiele immer seltener. Heute scheint vor allem für gefräste Stollen der Verzicht auf eine Auskleidung mindestens auf Teilabschnitten wieder interessant zu werden. Musste der Durchmesser eines konventionell ausgebrochenen Stollens (k-Wert nach Strickler $\sim 30\,m^{1/3}/s$) noch etwa um 50% vergrössert werden, falls er die selben Reibungsverluste aufweisen sollte wie ein betonverkleideter ($k \sim 90$), so sind es beim gefrästen nur noch 15 bis 25% ($k \sim 50$ bis 65) [4, 14, 15].

Eine sehr grosse Bedeutung haben unausgekleidete Druckstollen in Skandinavien. Besonders in Norwegen ist eine erstaunliche Entwicklung im Gange, die auch Druckschächte betrifft [8, 16, 17, 18].

8.2 Spritzbetonauskleidungen

Neben der Ausbruchsicherung wird Spritzbeton auch als definitive Stollenauskleidung verwendet. Die Auftragsstärken bewegen sich normalerweise in der Grössenordnung von 3 bis 10 cm. Das Dichtungsvermögen dieser Auskleidungsart dürfte wohl nur in Gebirgen mit sehr hohem Verformungsmodul gegeben sein. Hingegen bietet Spritzbeton einen guten Schutz gegen Steinfall bei geklüftetem, aber sonst stabilem Fels. Bei konventionellem Ausbruch kann mit Spritzbeton auch die Wandrauhigkeit vermindert werden; der k-Wert nach Strickler erhöht sich etwa von 30 auf 40 bis 45. Eine weitere Verbesserung lässt sich durch eine Glättung des frisch aufgebrachten Spritzbetons erzielen. Zur Erhöhung der Zug- und Biegezugfestigkeit sowie der Dichtigkeit werden Spritzbetonauskleidungen oft armiert. Neuerdings kommt auch mit Stahlfasern verstärkter Spritzbeton zur Anwendung.

8.3 Einfache und bewehrte Betonauskleidungen

Eine Betonauskleidung kann wohl die Stabilität des Stollens während des Betriebes gewährleisten und die Reibungsverluste vermindern, nicht aber die Dichtigkeit garantieren. In diesem Zusammenhang spricht *Kieser* [10] von einer «Ausfütterung der Gebirgslaibung, der man in bezug auf den Innendruck keine statische Funktion zuordnen darf». Die Dehnfähigkeit einer Betonauskleidung wird auch bei einem hohen Gebirgsmodul schon für geringe Innendrücke überschritten, so dass Risse entstehen. Ursprünglich versuchte man mit Stahleinlagen im Beton oder durch eine zusätzliche armierte Spritzbetonauskleidung diesen Nachteil auszumerzen. Armierungen erhöhen aber die mechanische Zugfestigkeit der Betonauskleidung nur unbedeutend und sind zudem sowohl im gerissenen wie ungerissenen Zustand nur unwirtschaftlich ausgenützt. Der einzige positive

Effekt einer Armierung ist wohl die Risseverteilung. Im Gegensatz zur einfachen Betonauskleidung entstehen nicht einzelne grosse, sondern mehrere kleine Risse. Dies drosselt sicher die Wasserverluste; der Aufwand an Armierung ist aber für eine eher mässige Dichtigkeit sehr hoch.
In der UdSSR wird für Stollenauskleidungen neuerdings die Verwendung von sogenanntem Latex-Beton propagiert, welcher einen 1,5 bis 2,5mal geringeren E-Modul (10 bis 12 GPa) als normaler Beton (20 bis 24 GPa) aufweist und deshalb auch länger rissfrei bleiben soll [19]. Der Betonmischung wird eine aus Butadien-Styrol-Latex bestehende Emulsion (Volumenanteil 15 bis 20%) beigegeben. Gemäss Versuchen beim Kraftwerk Nurek erhöht dieser Zusatz neben der Verringerung des E-Moduls auch die Zugfestigkeit, Querdehnung sowie Dichtigkeit des Betons. Über Anwendungen von Latex-Beton in Westeuropa ist bis heute nichts bekannt.
Einfache Betonauskleidungen sind heute im Stollenbau ohne Injektionen nicht mehr denkbar. Die Injektionen sollen einerseits die Hohlräume zwischen Auskleidung und Fels mit Injektionsgut verpressen, andererseits erhofft man sich auch eine Vergütung der aufgelockerten Felspartien um den Stollen. Die Bedeutung von Injektionen ist sicher mit derjenigen einer Auskleidung selbst vergleichbar. Üblicherweise werden diese Injektionen über radiale, bis in den Fels reichende Bohrlöcher ausgeführt. Mit den üblichen Injektionsdrücken erfährt der Betonring auch eine geringfügige, rechnerisch meist nicht berücksichtigte Vorspannung.

8.4 Passiv vorgespannte Betonauskleidungen

Das Wort «passiv» soll zum Ausdruck bringen, dass sich die Injektionsvorspannung auf das umgebende Gebirge abstützt, also sozusagen den passiven Gebirgsdruck mobilisiert. Die Vorspannung der Auskleidung ist eine Folge dieses Reaktionsdruckes. Der Gegendruck des Gebirges wird durch Auspressen eines vorgängig freigehaltenen, spaltartigen Hohlraumes zwischen Auskleidung (Innenring) und Gebirge resp. Vorauskleidung (Aussenring) mit Injektionsgut unter hohem Druck aktiviert. Ziel dieses Verfahrens ist es, die Betonverkleidung so stark vorzuspannen, dass sie unter der Belastung des Innenwasserdruckes zug- resp. rissfrei und somit auch nahezu dicht bleibt. Die passive Vorspannung ist also ein zweckmässiges Mittel, um auch mit einer Betonauskleidung eine genügende Dichtigkeit des Stollens zu erreichen.
Das erste Verfahren, das sich in der Praxis bewährt hat, ist die sogenannte Kernringhinterpressung (Bild 6) nach *Kieser* [10]. Bei älteren Ausführungen des Kernringverfahrens wies der Stollen eine kreisrunde betonierte Vorauskleidung auf. Innerhalb dieser erfolgte eine Ausmauerung mit Betonformsteinen und -platten, die zur Vorauskleidung hin Nokken besassen. Der so zwischen Vorauskleidung und dem Kernring entstandene Hohlraum wurde anschliessend über einbetonierte Rohrstutzen mit Mörtel und Zementmilch ausgepresst (Bild 6). Bei höheren Verpressdrücken trat anstelle der Betonformsteine ein betonierter Innenring, welcher mit Buckelblechen oder Höckerfolien gegen die Vorauskleidung abgeschalt war, um den notwendigen ringförmigen Verpressraum zu schaffen. Die Abdichtung der Verpresszonen in Längsrichtung des Stollens erfolgte mit Stahlblechringen (Bild 7).
Bei neueren Ausführungen des Kernringverfahrens wird die Betonvorauskleidung durch Spritzbeton ersetzt oder fehlt ganz [7]. Letztere Vereinfachung beschränkt sich vorwiegend auf maschinell vorgetriebene Stollen. Auch verzichtet man heute aus Kostengründen auf einen durch Nockensteine oder Buckelbleche künstlich geschaffenen Ringraum. Anstelle dieser teuren Massnahmen tritt eine zwischen Kernring und Vorauskleidung resp. Fels aufgebrachte Folie. Diese Folie dient im wesentlichen dazu, das einwandfreie Öffnen des Spaltes während der Injektion zu ermöglichen. Die Folie kann zudem das Abfliessen des Injektionsgutes ins Gebirge hemmen, falls die Einpressung zwischen Betonring und Folie erfolgt. Eine absolute Dichtigkeit der Folie ist für diesen Zweck nicht erforderlich, so dass sich eine Prüfung der Schweissnähte erübrigt. Im dichteren Gebirge kann sogar auf ein Verschweissen der Folie verzichtet werden, ein Überlappen und Falten der Folie an deren Ende hemmt den Injektionsfluss genügend. Normalerweise wirkt sich ein beschränktes Abfliessen des Injektionsgutes ins Gebirge günstig aus, weil dadurch offene Klüfte und Trennfugen verfüllt werden und sich somit das Deformationsverhalten verbessert.
Die älteren Ausführungen des Kernringverfahrens hatten den Nachteil, dass sie durch die Vorauskleidung den Injektionsfluss ins umgebende Gebirge gänzlich verhinderten oder nur bei Rissen in beschränktem Masse zuliessen. Reisst die Vorauskleidung bei der Injektion nicht, so entstehen in ihr Zugspannungen, die den auf das Gebirge wirkenden Injektionsdruck abbauen [20].
Die Erfahrungen mit den im Kernringverfahren ausgekleideten Stollen waren bis heute durchwegs gut, und auch ausgiebige Messungen bestätigen die Erwartungen [21].
Die Tiroler Wasserkraftwerke AG entwickelten etwas später ihr eigenes, sogenanntes Spaltinjektionsverfahren zur passiven Vorspannung von Druckstollen [2]. Ähnlich wie bei den erwähnten neueren Anwendungen des Kernringverfahrens besteht die Auskleidung nur aus einem einzigen Betonring, der unmittelbar an das Gebirge resp. Ausbruchsicherung anbetoniert ist. Das Öffnen des Injektionsspaltes zwischen Auskleidung und Gebirge wird durch Besprühen der Felsoberfläche mit Dispersionsfarbe, Kalkmilch usw. oder durch Abdecken mit einer Kunststoff-Folie gewährleistet. Falls diese Folie auch als Dichtung dienen soll, ist sie zum Schutz gegen Kerbwirkungen auf der Rückseite mit einem Vlies beschichtet [3]. Die Injektion der Trennfuge erfolgt über ein eigenes Injektionssystem [22]. Dieses besteht aus Kunststoffschläuchen, welche im Abstand von 1 bis 3 m an der Stollenlaibung befestigt sind (Bild 8). Die Schläuche sind in Abständen von 1 m mit Löchern perforiert. Ein darübergeschobenes Stück Weichgummischlauch übernimmt die Funktion eines Ventiles, indem es die Zementmilch austreten, aber nicht mehr zurückfliessen lässt. Nach Abschluss der Injektion werden die Schläuche durchgespült, so dass sich die Injektion, falls erforderlich, wiederholen resp. fortsetzen lässt. Damit die Trennfuge zu Beginn der Injektion leichter aufreisst, sind die Injektionsschläuche von einer 0,1 mm dünnen, 20 cm breiten PVC-Folie umhüllt, die flach in der Trennfuge liegt. In dieser Hüllfolie kann sich die Zementmilch gleichmässig ausbreiten und so den zur Öffnung der Trennfuge nötigen Druck ausüben. Befestigt werden die Injektionsschläuche am Fels resp. an der Spritzbetonauskleidung mit Blechlaschen und Schussbolzen. Die Arbeitsfugen in der Betonauskleidung werden durch einen zusätzlich zum Injektionsschlauch eingelegten, nicht gelochten Sperrschlauch abgedichtet. Dieser wird während der Injektion zu diesem Zwecke mit Wasser ebenfalls unter Druck gesetzt. Dieser Sperrschlauch verhindert auch ein übermässiges Abfliessen des Injektionsgutes in Stollenlängsrichtung. Normalerweise werden 2 bis 3 Injektionsschläuche gleichzeitig injiziert; pro Schlauch ist eine Pumpe nötig. Der Arbeitsgang verläuft vollkommen kontinuierlich. Ist in einem Injektionsschlauch der gewünschte

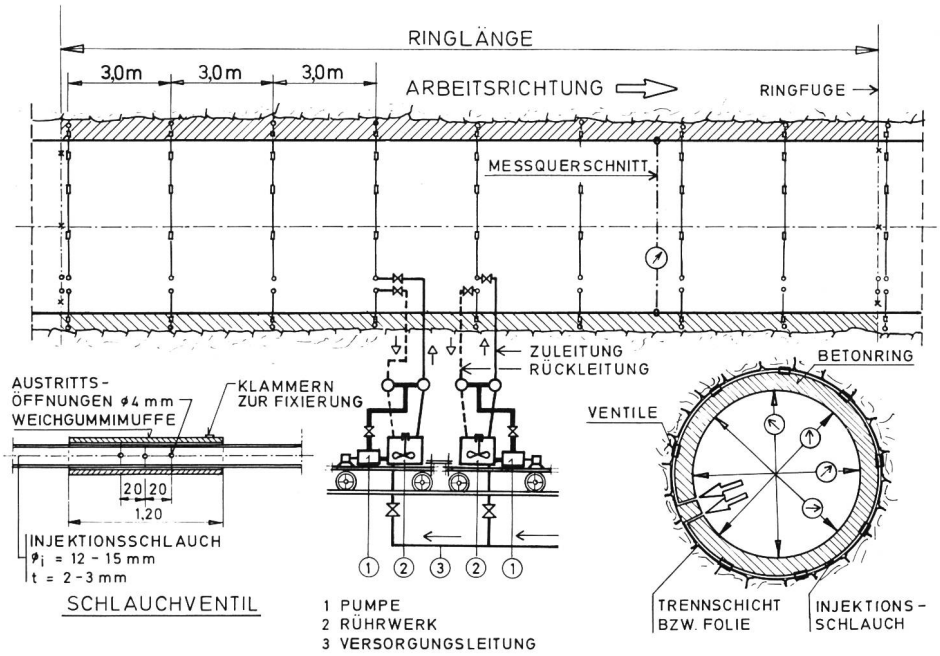


Bild 8. Vorspann-Spaltinjektion nach Verfahren TIWAG.

Druck erreicht, wird die Pumpe nach kurzer Druckhaltung an den nächsten freien Schlauch gehängt. Das Injektionsgut füllt in erster Linie den Spalt, aber auch die Klüfte der Auflockerungszone und erhöht so die Festigkeit in diesem Bereich. Um die Wirksamkeit der Vorspannung zu überprüfen, wird die Deformation der Betonauskleidung in regelmässigen Abständen (10 bis 20 m) mit Teleskopmessstangen gemessen und mit den rechnerischen Soll-Deformationen verglichen.

Das Spaltinjektionsverfahren ist auch im Gebirge mit geringer Festigkeit möglich [28]. Wichtigste Voraussetzung für seine Anwendung ist eine genügend grosse natürliche Gebirgsspannung. Diese soll der Vorspannung sozusagen als dauerhaftes Widerlager dienen. Ist die Gebirgsüberlagerung nicht ausreichend, so kann die Vorspannung durch «Kriechen» des Gebirges verloren gehen. Aus diesem Grunde entstanden beispielsweise beim Druckstollen des Pumpspeicherwerkes Hongrin-Léman vor dem Wasserschloss auf einer Länge von 600 m Längsrisse in der Sohle.

Über ein Dutzend mit dem Spaltinjektionsverfahren vorgespannte Druckstollen sind seit mehreren Jahren ohne nennenswerte Störungen in Betrieb. Kürzlich überstand der mit 62 bar zurzeit höchstbeanspruchte vorgespannte Druckstollen (Durchmesser 5,5 m) des Pumpspeicherwerkes Drakensberg (Südafrika) seine Bewährungsprobe [3, 4, 23].

Neben diesen zwei beschriebenen Verfahren lässt sich auch eine Druckvorspannung der Auskleidung durch gruppenweise Bohrlochinjektionen erzielen. Diese Vorspannmethode ist vor allem in Osteuropa stark verbreitet [24].

8.5 Aktiv vorgespannte Betonauskleidungen

Ist die Gewähr für eine mittragende Wirkung des Gebirges nicht vorhanden, so bietet sich als Lösung die aktive Vorspannung an, also eine mit Hilfe von Einzelspanngliedern vorgespannte Druckstollenauskleidung. Das von der VSL (Vorspann-System Losinger) entwickelte Ringspannglied, welches wie ein Fassreifen wirkt und ohne Lisenen auskommt, hat sich in mehreren Ausführungen bewährt (Bild 9). Die sogenannte Zwischenverankerung, in der sich das Kabel zu einem Ring schliesst, liegt ohne Abstützung auf dem Beton, frei in einer Verankerungsnische und bewegt sich während des Spannvorganges entlang der Längsachse des Kabels [25]. Das Kabel besteht aus einem Bündel hochfester Spannstahllitzen, die entweder in einem nachträglich injizierten Hüllrohr verlaufen oder aber mit Korrosionsschutzfett und Polyäthylenumhüllung versehen und einzeln im Beton eingebettet sind. Zum Spannen der Kabel werden die Litzen mit Hilfe eines gekrümmten Stuhls, der sich direkt auf die Ankerbüchse abstützt, aus der Nische heraus ins Innere des Stollens abgelenkt (Bild 10). Auf diesen Stuhl wird dann die hydraulische Presse aufgesetzt und das Kabel wie im Hochbau üblich vorgespannt.

Während des Vorspannens öffnet sich zwischen Auskleidung und Fels ein Spalt, welcher anschliessend ausinjiziert werden muss. Eine leichte, schlaffe Bewehrung ist zusätzlich erforderlich, um die infolge der ungleichmässig verteilten Umlenkkräfte entstehenden Biegemomente aufzunehmen.

Die aktive Vorspannung stellt vor allem zur Stahlpanzerung eine wirtschaftliche Alternative dar, lassen sich doch beim Stahlverbrauch und Transport Einsparungen erzielen. Da die Spannglieder nicht an lange Lieferfristen gebunden sind, können sie der Geologie entsprechend flexibel angewandt werden. Eine Spannbetonauskleidung ist im Gegensatz zu einer Stahlpanzerung nicht durch Beulen gefährdet. Zudem ist nach einer erheblichen Überbelastung eine vollständige Erholung der Spannglieder möglich, indem sich in der Auskleidung entstandene Risse wieder schliessen. Dank der Flexibilität der Spannglieder lassen sich auch komplizierte Durchdringungen, wie sie etwa im Abzweigungsbereich zwischen Druckstollen und unterer Kammer des Wasserschlosses vorkommen, sicher vorspannen [26].

8.6 Betonauskleidungen mit Foliendichtung

Auf der Suche nach neuen Möglichkeiten zur wasserdichten Druckstollenauskleidung hat die Motor Columbus AG zu Beginn der sechziger Jahre umfangreiche Labor- und Grossversuche mit diversen Folien- und Beschichtungsarten durchgeführt [27]. Bis heute sind nur Druckstollenauskleidungen mit Kunststoffolien technisch ausgereift; die Ausführungsbeispiele beschränken sich dementsprechend auf diese Art.

Die Befestigung der dünnen, elastischen Kunststoffolie erfolgt mit Haftbolzen an der Vorauskleidung oder bei gefrästen Stollen etwa auch direkt an der Felslaibung. Anschliessend wird die Kunststoffolie mit einem Betoninnenring versehen. Deshalb spricht man etwa auch von einer «Sandwichbauweise». Die Folie selbst übernimmt keine statische

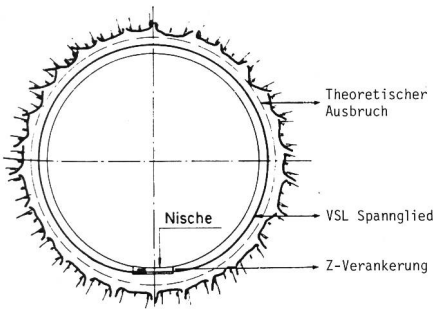


Bild 9, links. Aktive Vorspannung nach System VSL: Stollenquerschnitt mit Spannglied.

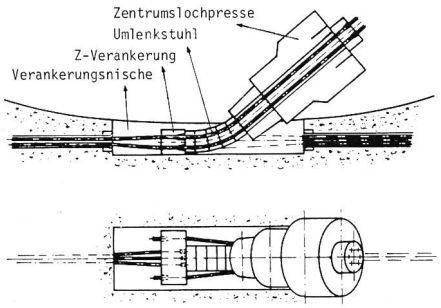


Bild 10, rechts. Aktive Vorspannung nach System VSL: Zwischenverankerung und schematische Darstellung des Spannvorgangs.

Funktion, sondern dient nur als Dichtungshaut. Sie muss so dehnbar sein, dass sie die infolge Innendruck entstehenden Radialrisse im Fels, resp. in der Vorauskleidung schadlos überbrücken kann. Der Betoninnenring muss neben dem Schutz der Folie auch dem Aussenwasserdruck bei allfälligen Stollenentleerungen widerstehen.
Neuerdings werden Kunststoffolien auch mit passiv vorgespannten Betonauskleidungen kombiniert [4, 22, 28].

8.7 Dünnwandige Panzerung mit Betoninnenring

Die dünnwandige Panzerung mit Betoninnenring ist wie die Betonauskleidung mit Foliendichtung ebenfalls eine Sandwichbauweise. Im Gegensatz zur Dichtungsfolie erfüllt aber die dünnwandige Panzerung auch eine statische Funktion, indem sie einen ihrer Streckgrenze und dem Verformungsverhalten des Gebirges entsprechenden Anteil des Innendruckes übernimmt. Als Beulsicherung gegen den Bergwasserdruck dient der Betoninnenring.
Da der Transport und Einbau von sehr dünnen Panzerungsschüssen (~ 5 mm) problematisch ist, werden sie bei einigen neueren Anwendungen bereits mit dem aus hochfestem Beton (~ BH 500) bestehenden Innenring (~ 10 cm) versehen. Dieser ist zudem durch Vorwärmen der dünnwandigen Panzerung leicht vorgespannt. Der Einbauvorgang im Stollen oder Schacht geschieht in der gleichen Art und Weise wie bei einer Vollpanzerung aus Stahl [3, 4, 28]. Falls erforderlich, kann mit der Verpressung des Spaltes zwischen dünnwandiger Panzerung und Vorauskleidung auch eine gewisse Vorspannung des Betoninnenringes erzielt werden.
Die Sandwichbauweise mit dünnwandiger Panzerung ist etwas teurer als diejenige mit Kunststoffolie, aber dafür in Steilschächten einfacher einzubauen [3]. Bei den Ausführungen in Druckstollen ist keine Bevorzugung der einen oder anderen Art festzustellen.

8.8 Vollpanzerung aus Stahl

Eine zugfeste Auskleidung kann aus folgenden Gründen unumgänglich sein:

- die Beanspruchung durch Innendruck ist sehr hoch
- dem Gebirge kann keine mittragende Wirkung zugemutet werden.

Sehr hohe Innendrücke lassen sich auch mit den erwähnten passiven Vorspannbauweisen wirtschaftlich beherrschen, sofern die technische Grenze des Injektionsdruckes an der Pumpe nicht erreicht ist (ca. 100 bar). Ist allerdings eine absolute Dichtheit der Auskleidung erwünscht, so drängt sich eine Vollpanzerung aus Stahl auf. Bei sehr schlechten Gebirgseigenschaften und geringen Felsüberdeckungen ist neben der Vollpanzerung auch noch eine aktive Vorspannung der Auskleidung zu erwägen.
Normalerweise ist man bestrebt, durch die Wahl der Linienführung eines Druckstollens die erwähnten zwei zwingenden Gründe für eine Vollpanzerung auszuschliessen. Deswegen ist die Vollpanzerung aus Stahl fast ausschliesslich bei Druckschächten anzutreffen. Die wenigen Beispiele von Stahlpanzerungen bei Druckstollen sind Ausnahmefälle, d.h. lokal beschränkt (z.B. in der Nähe des Wasserschlosses, bei Unterquerung von Tälern, oberflächennahen Teilstrecken) oder im Anschluss an Schadensfälle im Sinne einer Reparatur.

9. Tendenzen und Entwicklungen

Die wesentlichen Entwicklungen und Tendenzen im Druckstollenbau sollen kurz anhand der nachfolgenden Stichworte erläutert werden:

- Einsatzart, Einsatzbereich
- Linienführung
- Ausbruch
- Auskleidung

Die am stärksten beanspruchten Druckstollen wurden bei Pumpspeicherwerken realisiert. Es ist unverkennbar, dass im Druckstollenbau bezüglich Beanspruchung mit dem Einsatz bei den Pumpspeicherwerken ab 1960 eine sprunghafte Entwicklung begann (Bilder 1 und 3). Ein von der traditionellen Bauart (Druckstollen – Wasserschloss – Druckschacht) abweichender Einsatzbereich eröffnet sich für die Druckstollen bei den neuerdings zunehmend realisierten Talsperrenkraftwerken. Diese Stollen müssen sehr grosse Wassermengen bei geringer Felsüberdeckung der Zentrale zuführen. Bei den heutigen Turbinengrössen ergeben sich dementsprechend auch grosse Stollendurchmesser. Die Innendrücke erreichen bei Talsperrenhöhen von 200 bis 300 m ebenfalls ganz beträchtliche Ausmasse; so dass sich für die Ringzugkraft ebenfalls Spitzenwerte ergeben.
Auf die neueren Entwicklungen bei der Linienführung von Druckstollen wurde bereits im Abschnitt 2.2 hingewiesen. Vor allem die Norweger tendieren auf eine gradlinige Verbindung zwischen Speicher und Zentrale mit Einsatz eines Druckluftwasserschlosses (Bilder 4, Linienführung 5). Neuerdings wird auch im Alpenraum eine möglichst grosse Felsüberdeckung angestrebt, um Dichtungsmassnahmen zu umgehen und eine entlastende Wirkung durch das Gebirgswasser zu erhalten.
Beim Ausbruch von Druckstollen setzt sich zunehmend der maschinelle Fräsvortrieb durch. Die so entstehenden relativ glatten Kreisprofile eröffnen vor allem bei den Auskleidungsarten neue Möglichkeiten. Bei den Auskleidungen selbst gewinnen die vorgespannten Bauweisen an Bedeutung. Die Dichtung mit Kunststoffolien scheint in Zukunft die Verwendung von Stahlpanzerungen vermehrt abzulösen. Die Injektionen von Druckstollen besitzen heute den gleichen Stellenwert wie eine Auskleidungsmassnahme.

10. Problematik der Druckstollenbemessung

Beim Bau der ersten Druckstollen vor hundert Jahren hielten sich die Ingenieure an die Erfahrungen, welche sie bei den ersten Gebirgsdurchstichen für das Eisenbahnnetz gesammelt hatten. Da man das Gebirge bezüglich Innenwasserdruck als starr betrachtete, schien es im Druckstollen-

bau auch kein statisches Problem zu geben. Erst nach dem erwähnten Schadensfall im Ritomstollen (1920) vurde mit dem Aufbau einer eigentlichen Druckstollenstatik, also dem Versuch einer theoretischen Lösung des Druckstollenproblems, begonnen. Hauptmerkmal dieser traditionellen Druckstollenstatik ist die Annahme einer dichten Stollenlaibung und somit ihrer flächenhaften Beanspruchung. Mit Ausnahme der gepanzerten oder mit Kunststoffolien gedichteten Druckstollen trifft dies natürlich nicht zu, sondern es entsteht unter Innenwasserdruck eine Sickerströmung durch die Auskleidung ins Gebirge. Diese Strömung verursacht eine, im Gegensatz zum dichten Stollen, volumenhafte Beanspruchung von Auskleidung und Fels. Obwohl die quantitativen Auswirkungen der Strömungskräfte bei Druckstollen vor beinahe dreissig Jahren erstmals abgeschätzt wurden, behandelt die heutige Bemessungspraxis die Stollen meist als dicht.

Bei geringen Innenwasserdrücken und relativ zum Gebirge schwach durchlässiger Auskleidung liegt die Annahme einer absolut dichten Stollenlaibung im Genauigkeitsbereich der Ausgangsdaten. Solche Verhältnisse sind sehr häufig bei traditionellen Linienführungen anzutreffen, bei welchen der Druckstollen einem Innendruck von höchstens 20 bar ausgesetzt ist und die Betonauskleidung auf Rissfreiheit bemessen werden konnte. Solche Druckstollen liessen sich auch ohne umfangreiche Theorien aufgrund der langjährigen Erfahrungen mit sogenannten Faustformeln dimensionieren.

Neuerdings werden Druckstollen weit höhere Innendrücke zugemutet. Sind diese nicht speziell gedichtet (Panzerung, Kunststoffolien), ist die Annahme einer dichten Innenlaibung nicht mehr zulässig.

Neue Erkenntnisse auf dem Gebiete der Felsmechanik und vor allem der Felshydraulik zeigen, dass die Durchlässigkeit von klüftigem Fels ausgesprochen spannungsabhängig ist. Dieser Umstand bewirkt eine Wechselwirkung zwischen felsmechanischen und felshydraulischen Problemen. Bei einem Druckstollen beispielsweise beeinflussen also nicht nur die Kräfte infolge einer Sickerströmung die Spannungen, sondern die Sickerströmung selbst verändert sich wegen der spannungsabhängigen Durchlässigkeit. Eine wirklichkeitsnahe Bemessung von hochbeanspruchten Druckstollen müsste also dieser Wechselwirkung Rechnung tragen [29].

Literatur

[1] *Jegher C.:* Vom Ritom-Kraftwerk der SBB. «Schweizerische Bauzeitung» 29. Jhg., Bd. 76, Nr. 2, 1920.

[2] *Lauffer H.:* Vorspanninjektion von Druckstollen. «Der Bauingenieur» 1968, H. 7, S. 233–239.

[3] *Seeber G.:* Möglichkeiten und Grenzen im Druckstollenbau. «Schweizer Ingenieur und Architekt», Heft 29, 1981, S. 639–674.

[4] *Seeber G.:* Neue Entwicklungen im Druckstollenbau. ISRM-Symposium Aachen, 1982, Vol. 2, S. 705–716.

[5] *Sharp J.C., Gonano C.P.:* Rock engineering aspects of the concrete lined pressure tunnels of Drakensberg. ISRM-Symposium Aachen, 1982, Vol. 2, pp. 717–733.

[6] *Hilgard K.E.:* Wasserstollen unter hohem Innendruck. «Schweizerische Bauzeitung» 29. Jhg., Bd. 76, Nr. 19, 1920.

[7] *Innerhofer G.:* Die Wasserkraftanlage Walgauwerk der Vorarlberger Illwerke Aktiengesellschaft. «Österr. Wasserwirtschaft», Jhg. 35, Heft 5/6, 1983, S. 113–119.

[8] *Broch E.:* The development of unlined pressure shafts and tunnels in Norway. ISRM-Symposium Aachen, 1982, Vol. 2, p. 545–554.

[9] *Rothpletz F., Rohn A., Büchi J.:* Vom Ritom-Kraftwerk der SBB. «Schweizerische Bauzeitung» 29. Jhg., Bd. 76, Nr. 15, 16, 1920.

[10] *Kieser A.:* Druckstollenbau. Springer-Verlag Wien, 1960.

[11] *Walch O.:* Die Auskleidung von Druckstollen und Druckschächten. Springer Verlag Berlin, 1926.

[12] *Feller A.:* Beiträge zum Problem der Abdichtung von Druckstollen. «Schweizerische Bauzeitung», Band 86, Nr. 18, 1925, S. 217–220.

[13] *Hetzel K.:* Tunnel- und Stollenbau – Wandlungen und Erfolge. «Der Bauingenieur» 32 (1957), Heft 9, S. 333–344.

[14] *Lecocq R., Marin G.:* Evaluation des pertes de charge des galeries d'amenée d'eau forée au tunnelier et on revêtues. «Tunnels et ouvrages souterraines» 2, 1979.

[15] *Könemann N., Schröder R.C.M.:* Untersuchungen zur Rauhigkeit von gebohrten Stollen. «Wasser und Boden», H. 8, 1982, S. 358–360.

[16] *Broch E.:* Unlined high pressure tunnels in areas of complex topography. «Water Power & Dam Construction». November 1984.

[17] *Bergh-Christensen J.:* Design of unlined pressure shaft at Mauranger power plant, Norway. ISRM-Symposium Aachen, 1982, Vol. 2, p. 531–536.

[18] *Myrset Ø., Lien R.:* High pressure tunnel systems at Sima power plant. ISRM-Symposium Aachen, 1982, Vol. 2, pp. 667–676.

[19] *Rukin M. Sc.:* Investigation of latex concrete for use in tunnel construction. Tunneling: Proc. of an Int. Symposium London, 1976.

[20] *Innerhofer G.:* Gesichtspunkte und Methoden im Druckstollenbau. «Österr. Ingenieur-Zeitschrift», 1966, H. 3, S. 73–82.

[21] *Rapp R.:* Erfahrungen beim Betrieb des Druckstollens für das Speicherkraftwerk Rosshaupten aus felsmechanischer Sicht. ISRM-Symposium Aachen, 1982, Vol. 2, S. 683–691.

[22] *Seeber G.:* Neue Entwicklungen für Druckstollen und Druckschächte. «Österr. Ingenieur-Zeitschrift», 18 Jhg., 1975, H. 5, S. 140–149.

[23] *de Witt M.J.:* Constructing the Drakensberg pressure tunnels. «Water Power & Dam Construction», June 1983, pp. 13–22.

[24] *Kujundžić B., Ivanović K., Marković O., Nikolić Ž.:* Some results of research on lining prestressing for the pressure tunnel of a pumped storage hydroelectric plant. ISRM-Symposium, Aachen, 1982, Vol. 2, pp. 639–652.

[25] *Matt P., Thurnherr F., Uherkovich I.:* Vorgespannte Druckstollen. «Schweizerische Bauzeitung», 96. Jhg., Heft 5, 1978.

[26] *Rölli P.:* Galeries forcées précontraintes et chambres d'équilibre postcontraintes actives de revêtements en béton. ISRM-Symposium Aachen, 1982, Vol. 2, pp. 693–704.

[27] *Wenzel K.:* Neue Möglichkeiten zur wasserdichten Stollenauskleidung. «Schweizerische Bauzeitung» 81. Jhg., H. 26, 27, 28, 1963.

[28] *Seeber G.:* Power conduits for high-head plants. «Water Power & Dam Construction», June 1985, pp. 50–54; July 1985, pp. 95–98.

[29] *Schleiss A.:* Bemessung von Druckstollen.
Teil I: Literatur, Grundlagen, Felshydraulik, insbesondere Sickerströmungen durch Auskleidung und Fels. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich, Nr. 78, 1985.
Teil II: Berücksichtigung der Poren- und Kluftwasserdrücke, Einfluss einer spannungsabhängigen Durchlässigkeit, Bemessungskriterien. Erscheint 1986 als VAW-Mitteilung.

Adresse des Verfassers: *Anton Schleiss,* dipl. Bauing. ETH, Assistenz für Wasserbau / VAW, ETH Hönggerberg, 8093 Zürich