Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 68 (1950)
Heft: 23

Artikel: Wasserdichte Druckstollen und Druckschächte mit Kernring-Auskleidung

Autor: Kieser, Alois

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-58026

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: 12.07.2025

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

68. Jahrgang Nachdruck von Bild oder Text nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet Nr. 23

Wasserdichte Druckstollen und Druckschächte mit Kernring-Auskleidung

DK 627.842

Von Dipl. Ing. Dr. techn. ALOIS KIESER, behördl. aut. Zivilingenieur für Bauwesen, Bregenz (Oesterreich)

I. Das Wesen der Kernring-Auskleidung

Die Unzulänglichkeit der bisherigen Baumethoden für die Auskleidung von Druckstollen und Druckschächten ist hauptsächlich darin begründet, dass die Wasserdichtheit durch den auf Zug beanspruchten Auskleidungsring gewährleistet werden soll. Beton ist aber als spröder Baustoff für eine Beanspruchung auf Zug denkbar ungeeignet und kommt daher auch bei anderen Ingenieurbauten für diesen Zweck nicht zur Anwendung. Die Ringzugfestigkeit ist im Verhältnis zu den in Druckstollen auftretenden Beanspruchungen viel zu klein und unzuverlässig, als dass sich darauf eine gewährleistete Bruchsicherheit stützen könnte. Sie beträgt theoretisch bestenfalls 20 bis 30 kg/cm²; in Wirklichkeit besteht aber in Arbeitsfugen überhaupt kein Verband, der einen nennenswerten Ringzug aufnehmen könnte.

Im Gegensatz zur mangelnden Zugfestigkeit besitzt Beton aber ein sehr grosses Widerstandsvermögen gegen Druck. Seine Würfelfestigkeit beträgt im Mittel etwa das 14- bis 18fache der Zugfestigkeit. Noch wesentlich grösser ist die Bruchfestigkeit eines fachgemäss ausgeführten Betonringes, der von aussen hydraulisch gedrückt wird, weil sich bei diesem Belastungszustand die Deformationen an der inneren Leibung in radialer Richtung frei auswirken können und die Hinderung der Querdehnung, die beim Abdrücken von Probewürfeln den Bruch verursacht, gar nicht vorkommt.

Daraus ergibt sich als Schlüssel zur Lösung des Druckstollenproblems die eindeutige Erkenntnis, dass Beton seine Aufgabe als Baustoff in bezug auf die Abdichtung von Druckstollen gegen dauernde Wasserverluste nur dann erfüllen kann, wenn seine Festigkeit nicht nach der Zug-, sondern nach der Druckrichtung ausgenützt wird. Demzufolge ist ein grundlegendes Konstruktionserfordernis für eine rissichere Auskleidung die Anwendung von vorgespanntem Beton.

Nachdem die Auskleidung von tragfähigem Gebirge umschlossen ist, sind die Voraussetzungen dafür gegeben, die Vorspannung ohne Einsatz von Stahl durch eine auf das Gebirge abgestützte Zwangsbettung zu erzielen. Bei der vom Verfasser entwickelten und erprobten Kernring-Auskleidung[1]) wird dieser angestrebte und für die Rissicherheit entscheidende Verbund zwischen Auskleidung und Gebirge auf eine einfache und bautechnisch einwandfreie Weise hergestellt.

Bild 1 zeigt das Prinzip der neuen Bauweise in schematischer Darstellung. Der Querschnitt setzt sich aus fünf Konstruktionsgliedern zusammen, von denen jedes einzelne im Rahmen der Verbundkonstruktion eindeutig umrissene Aufgaben zu erfüllen hat. Das Gebirge a bildet das Widerlager. Die Gebirgsverkleidung b hat der Ausbruchröhre die für den weiteren Ausbau benötigte zylindrische Form zu geben, den Stollen — wo er nicht standfest ist — gegen Nachbrüche zu sichern und im fertigen Bauwerk als Zwangsbettung zu dienen. Der Hohlring c stellt das entscheidende Konstruktionsglied zum Ansatz des aktiven Spanndruckes zwischen dem verkleideten Widerlager und dem Kernring d dar, der den eigentlichen dichtenden Teil der Auskleidung bildet. Die Hinterpressung erfolgt durch pneumatisches Eindrücken von Zementmörtel und nachfolgendes Einpumpen von Zementbrei in die weiche Masse, bis der gewünschte Spanndruck erreicht und das Ueberschusswasser ausgepresst ist. Dabei entsteht im Hohlring ein auf die Höhe des Hinterpressdruckes dreidimensional vorgespannter, ausserordentlich dichter Mörtelring, der den anfänglich hydraulischen Spanndruck bei Erhaltung des Vorspanngleichgewichtes durch den Bettungsdruck des verfestigten Mörtels ablöst. Die Drainage e, die den Stollen während der Bauausführung zu entwässern hat, wird nach Erfüllung dieser Aufgabe ebenfalls verpresst, um das Bergwasser wieder in seine alten Fliesswege zu verdrängen. In trockenen Stollenstrecken entfällt die Drainage ganz, sofern sie nicht als Vorflut benötigt wird.

Der Hohlraum für den Hinterpressring c wird durch abstandhaltende Erhöhungen an der äusseren Leibung des Kernringes gewahrt. Diese verbürgen die stabile Lagerung des Letztgenannten bis zur vollzogenen Hinterpressung und vor allem auch während ihrer Durchführung. Der Hohlraum wird im übrigen in geeigneten Abständen durch ringförmige Abschlüsse der Länge nach in Pumpzonen unterteilt.

Durch den Vorgang des hydraulischen Aufpumpens des Hinterpressringes vollzieht sich im Kernring die angestrebte Vorspannung auf Ringdruck bei gleichzeitiger Verschmelzung der einzelnen Konstruktionsglieder zu einer statischen Einheit, die als elastisch gespannter und in allen schädlichen Hohlräumen mit Presszement durchdrungener Verbundkörper die Auskleidung gegen durchgehende Zugrisse sichert und damit nennenswerte Wasserverluste dauernd wirksam verhindert.

Durch diese grundsätzlichen Anordnungen und Vorgänge, die in ihrer Kombination das Wesen der Kernring-Auskleidung bilden, werden erst die Voraussetzungen geschaffen, den billigen Baustoff Beton im Druckstollenbau so einzusetzen, dass er auch die ihm zugeordnete Aufgabe bei voller Ausnützung seiner besten Güteeigenschaften erfüllt. Auskleidungen mit vorgespanntem Beton wurden zwar schon wiederholt angeregt. Erstmalig kam beim Tauernkraftwerk ein Spannbetonverfahren zur Anwendung, bei dem ein Auskleidungsrohr aus kurzen mit Spezialdraht vorgespannten Ringeinheiten zusammengebaut und mit Pressmörtel hinterfüllt wurde. Diese Bauweise ist jedoch sehr teuer. Alle sonstigen diesbezüglichen früheren Vorschläge waren in verschiedener Hinsicht so mangelhaft und unzulänglich, dass ihre praktische Verwertung nicht in Betracht kam. Im Gegensatz dazu stellt die Kernring-Auskleidung eine neue Konstruktion dar, die ohne ausführungstechnische Schwierigkeiten und ohne verlorenen Aufwand für überflüssigen Armierungsstahl die Anwendung des Prinzips der Vorspannung im Druckstollenbau ermöglicht und wirtschaftlich rechtfertigt.

II. Statische Zusammenhänge und Bemessungsgrundsätze

Durch die Gestaltung der Auskleidung in der beschriebenen Form sind u. a. auch die bei allen bekannten Verfahren mangelnden Voraussetzungen für eine einwandfreie Bemessung auf Grund statischer Berechnungen und damit für einen sparsamen, den tatsächlichen Erfordernissen entsprechenden Einsatz der Baustoffe hergestellt. Der Kernring gehorcht bei der Hinterpressung und Vorspannung bis zum Zeitpunkt der Auflastung des Betriebsdruckes, abgesehen von untergeordneten Nebeneinflüssen, den mechanischen Gesetzen eines dickwandigen Rohres, das von aussen her hydraulisch gedrückt wird[2]). Die Gebirgsverkleidung ist in der Konstruktion nur als Bettung ohne Widerstandsvermögen gegen Ringzug zu werten und ihre statische Aufgabe daher lediglich die Uebertragung des radialen Pressdruckes auf das als Widerlager dienende Gebirge. Es wird sonach vorausgesetzt, dass sie beim Aufpumpen des Hinterpressringes reisst. Diese Erscheinung ist aber nicht

[1]) In verschiedenen Staaten patentiert oder zum Patent angemeldet.

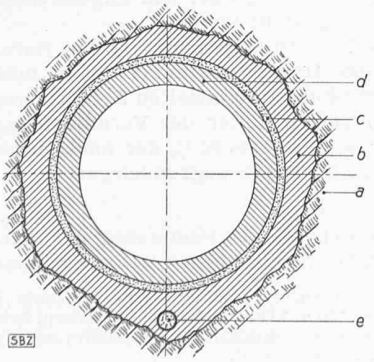

Bild 1. Kernringauskleidung in schematischer Darstellung

Erläuterung

Konstruktionsglieder:	Aufgabe:
a Gebirge	Widerlager
b Gebirgsverkleidung	Herstellung der Kreisform und Sicherung gegen Nachbrüche
c Hinterpressring	Zwangsbettung
d Kernring	Dichthaltung der Stollenröhre
e Drainage	Trockenhaltung bis zur Fertigstellung

[2]) Vgl. *August Föppl:* Vorlesungen über technische Mechanik. III. Bd., München und Berlin, 1943, Verlag von R. Oldenbourg, S. 331 u. ff.

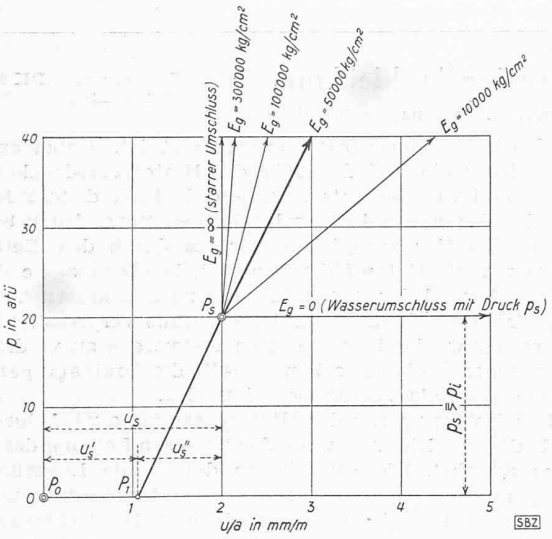

Bild 2. Schematischer Deformationsverlauf der Innenleibung der Gebirgsverkleidung

P_0 Ausgangslage
P_1 Lage nach vollzogenem Andruck
P_s Lage nach Vorspannung
a Halbmesser der Felsleibung in m
u radiale Deformation in mm
p Bettungsdruck an der Gebirgsverkleidung in atü
p_s Vorspann-Bettungsdruck in atü
u_s Vorspann-Deformation in mm *)
u_s' bleibender Anteil (Annahme)
u_s'' elastischer Anteil
p_i Betriebsdruck
*) nur für $E_g = 50000$ kg/cm² masstäblich

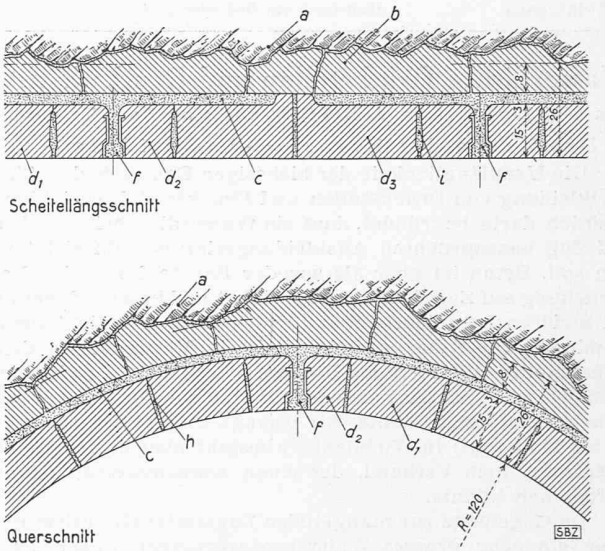

Bild 3. Einzelheiten der Auskleidung mit gemauertem Kernring

a Gebirge
b Gebirgsverkleidung
c Hinterpressring
d_1 Normalstein
d_2 Lochstein
d_3 Zonenrandstein
f Gasrohr mit Gewinde
h Längsfugen
i Ringfugen

nachteilig, sondern sowohl vom statischen, als auch vom ausführungstechnischen Standpunkt aus erwünscht. Es ist vorteilhaft, wenn der Vorspanndruck ohne Widerstand durch etwaigen, doch nicht stabilen Ringzug in der Bettungsschale zur Gänze auf das Gebirge übertragen wird und sich ausserdem für den Zementfluss durch die aufgehenden Risse Wege in die hinter dem Beton verbliebenen Hohlräume öffnen.

Die Kernring-Auskleidung ist durch ein im Vergleich zu anderen Bauweisen in bezug auf die Rissicherheit besonders gewichtiges Merkmal ausgezeichnet. Bei ihr sind nämlich die Voraussetzungen dafür gegeben, die Bemessung ohne Gefährdung der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens von vornherein auf die denkbar ungünstigste Beschaffenheit der Gebirgshülle abzustellen. Dann verbleiben für die statische Berechnung — die sich ohnedies nur auf den Kernring beschränkt — als einzige drei Bestimmungsgrössen: der Stollendurchmesser, der grösste zu beherrschende Betriebsdruck und die zulässige Ringdruckspannung. Damit ist die einwandfreie Bemessung der Auskleidung auf eine ebenso einfache wie übersichtliche Rechenaufgabe zurückgeführt.

Für das Gebirge gilt dabei folgende Ueberlegung. Ob gut oder schlecht, ist es imstande, den hydraulischen Andruck im Gleichgewicht zu halten, wenn eine ausreichende Ueberdekkung den Verbruch bis zur Oberfläche verhindert. Wenn dieser Druck im Hinterpressring bei leerem Stollen mindestens auf der Höhe des grössten Betriebsdruckes gehalten werden kann, ist die Sicherheit gegen Zugrisse auch in schlechtestem Gebirge gewährleistet. Um dies verständlich zu machen, ist in Bild 2 der theoretische Verlauf der radialen Deformation u der Innenleibung der Gebirgsverkleidung bei Annahme eines unendlich dicken isotropen Rohres vom Halbmesser a für verschiedene Elastizitätszahlen und $m = 5$ in Abhängigkeit des Bettungsdruckes p als Funktionswert $u : a$ dargestellt. Für ein solches Rohr ist

$$\frac{u}{a} = \frac{p_s}{E_g}\,\frac{m+1}{m} = \frac{p_s}{E_g}\,\frac{6}{5}$$

Das Gebirge arbeitet erst elastisch mit, wenn der bleibende Anteil der Deformationen u_s' durch die erstmalige Belastung überwunden ist [3]). Dieser Bewegungsvorgang vollzieht sich im Gegensatz zu allen sonstigen Bauweisen bei der Kernring-Auskleidung vollkommen unschädlich.

Die Auflastung des Betriebsdruckes p_i im fertigen Stollen weckt in dem durch den Bettungsdruck p_s vorgespannten Kernring einen radialen Dehnungsdrang. Dieser verursacht einen Abbau der Vorspannung im Kernring und steigert gleichzeitig den passiven Bettungsdruck p nach Massgabe der örtlichen Güteeigenschaft des Gebirges. Im Grenzfall $E_g = \infty$, entsprechend starrem Umschluss, bleibt die Vorspannung im Kernring unverändert, während der Bettungsdruck von $p = p_s$ auf $p = p_s + p_i$ wächst; im andern Grenzfall $E_g = 0$, der bei Ersatz des Gebirges durch Wasserumschluss mit dem Druck p_s vorliegen würde, bleibt der Bettungsdruck $p = p_s$ unverändert, während p_i die Vorspannung abbaut.

Die Bemessung der Auskleidung erhält somit eine sichere Grundlage, wenn man ohne Rücksicht auf die Güte des Gebirges den ungünstigsten Fall, nämlich $E_g = 0$ annimmt und die Zunahme des passiven Bettungsdruckes p unter dem Einfluss des Innendruckes p_i ganz vernachlässigt.

Durch die Hinterpressung wird der Kernring nicht nur tangential, sondern auch axial vorgespannt, weil die lückenlose Aufeinanderfolge der Ringe eine Querdehnung hindert. Dadurch ergibt sich zwangläufig eine Zusammenpressung und zuverlässige Abdichtung der Ringfugen.

Nach der Hinterpressung ist der weitere Verlauf der Deformations- und Spannungsvorgänge unter der Einwirkung der verschiedenen Belastungseinflüsse, wie Innendruck, Kaltwasser und elastische Nachwirkungen, infolge der von Ort zu Ort wechselnden Eigenschaften des Gebirges rechnerisch nicht mehr verfolgbar. Im Rahmen dieses Aufsatzes kann auf alle massgebenden Zusammenhänge nicht eingegangen werden. Der Verfasser muss sich daher darauf beschränken, hiewegen auf seine einschlägige wissenschaftliche Arbeit zu verweisen [4]).

Um einen gleichmässigen Spanndruck zu gewährleisten, soll die Hinterpressung durch mehrere über den Umfang verteilte Löcher erfolgen. Den entspannenden Nebeneinflüssen wird dadurch Rechnung getragen, dass die Pumpen auf den Enddruck $p_z = 1{,}5\,p_i$, somit auf 50 % über den angestrebten Vorspannbettungsdruck p_s eingestellt werden.

Als mittlere zulässige Ringdruckspannung s_k des Kernringes beim Aufpumpen des Hinterpressraumes kann man nach den anlässlich der Erprobung gesammelten Erfahrungen bei Anwendung von Formsteinen unter der Voraussetzung sachgemässer Ausführung mindestens 80 % der nachgewiesenen Würfelfestigkeit nach 28 Tagen zugrundelegen.

III. Bemessungsbeispiel

Nachstehend wird als Beispiel die Bemessung der Auskleidung für den im folgenden beschriebenen Versuchsstollen

[3]) Vgl. auch Dipl. Ing. *O. Frey-Baer:* Die Dehnungsmessungen im Druckstollen des Kraftwerks Lucendro, «SBZ» 1947, Nr. 41, S. 557* u. ff.

[4]) «Die Lösung der Druckstollenfrage», Manuskript im Umfang von etwa 800 Maschinenschriftseiten mit zahlreichen Abbildungen, Zahlentafeln und Lichtbildern, als Dissertationsarbeit der Bibliothek der Technischen Hochschule in Graz einverleibt.

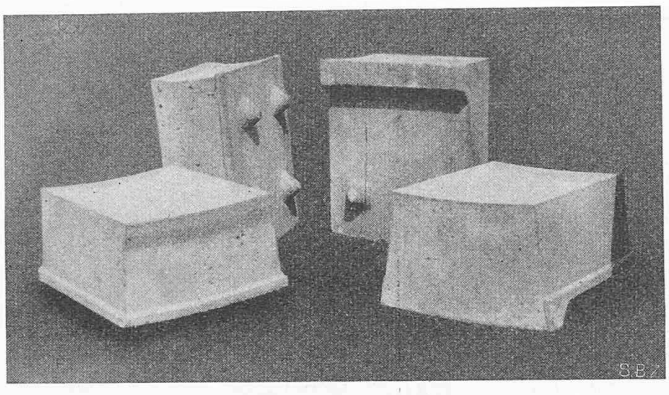

Bild 4. Normalsteine (d_1) und Zonenrandsteine (d_3)

entwickelt, bei dem der Kernring aus Formsteinmauerwerk hergestellt wurde. Gegebene Grössen: Stollendurchmesser $D_1 = 2{,}40$ m, Betriebsdruck $p_i = 20$ atü.

Mit 400 kg Portlandzement je m³ wurde eine mittlere Festigkeit des Steinbetons von $W_{28} = 380$ kg/cm² erreicht. Daher konnte die mittlere zulässige Ringdruckspannung des Kernringes mit

$$s_k = 0{,}80\, W_{28} = 0{,}80 \cdot 380 = 304 \text{ kg/cm}^2 \text{ oder rund } 300 \text{ kg/cm}^2$$

angenommen werden.

Setzt man probeweise für die Kernringstärke $d = 15$ cm, dann ist der Durchmesser der äusseren Leibung des Kernringes

$$D_2 = 240 + 2 \cdot 15 = 270 \text{ cm}$$

für

$$p_z = 1{,}5\, p_i = 1{,}5 \cdot 20 = 30 \text{ atü}$$

wird schliesslich

$$d = \frac{p_z D_2}{2\, s_k} = \frac{30 \cdot 270}{2 \cdot 300} = 13{,}5 \text{ cm}$$

Gewählt wurde aufgerundet $d = 15$ cm, weil die Kernringstärken vom Verfasser von 2,5 zu 2,5 cm typisiert wurden.

Damit ist die Bemessungsaufgabe eigentlich schon erledigt. Die Nachrechnung mittels der Formeln für das dickwandige Rohr mit den Halbmessern a_1 (innen) und a_2 (aussen) ergibt an der inneren Stollenleibung bei Erreichung des Pumpenenddrucks p_z eine Ringdruckspannung von

$$\sigma_1 = -\, p_z \frac{2\, a_2^2}{a_2^2 - a_1^2} = -\, 30 \cdot \frac{2 \cdot 135^2}{135^2 - 120^2} = -\, 286 \text{ kg/cm}^2$$

und eine radiale elastische Deformation

$$u = -\, p_z \frac{2\, a_2^2\, a_1}{E_b\, (a_2^2 - a_1^2)} = -\, 30 \cdot \frac{2 \cdot 135^2 \cdot 120}{250\,000 \cdot (135^2 - 120^2)} = -\, 0{,}137 \text{ cm}$$

oder rund $-\, 1{,}4$ mm;

wobei für den Beton des Kernrings $E_b = 250\,000$ kg/cm² angenommen worden ist.

Infolge der in der Regel ovalen Verformung des Kernringes beim Einspielen auf die Gleichgewichtslage unter dem Einfluss des Pumpendruckes darf die radiale Deformation u aber nicht absolut, sondern als Mittel über den ganzen Umfang, entsprechend etwa dem Mittel von zwei aufeinander senkrecht stehenden Durchmessern, gewertet werden.

IV. Einzelheiten über Konstruktion und Bauausführung

Nach Vollausbruch der Stollenröhre und Bettung der Drainage wird die Gebirgsverkleidung fortschreitend eingebaut. Für diese genügt die ausführungstechnisch mögliche und im Hinblick auf eine zureichende Absicherung der Gebirgswandung vertretbare Mindeststärke. Wo der Ausbruch ohne Zimmerung zulässig ist, kann diese bei etwas sorgfältiger Einhaltung des Profils etwa auf 10 bis 12 cm im Mittel und 6 bis 8 cm im Minimum beschränkt werden. Vor Einbau des Kernringes wird das Gewölbe zunächst an jeder Zonengrenze sorgfältig hinterpresst und dann innerhalb der Zonen an entsprechend verteilten Stellen bis in den Fels durchbohrt, um Fliesswege für den Zementbrei in die verbliebenen kleineren Hohlräume und in die beim Spannen aufgehenden Gebirgsspalten vorzubereiten. Der Hinterpressring erhält eine Stärke von 2,5 bis 3 cm.

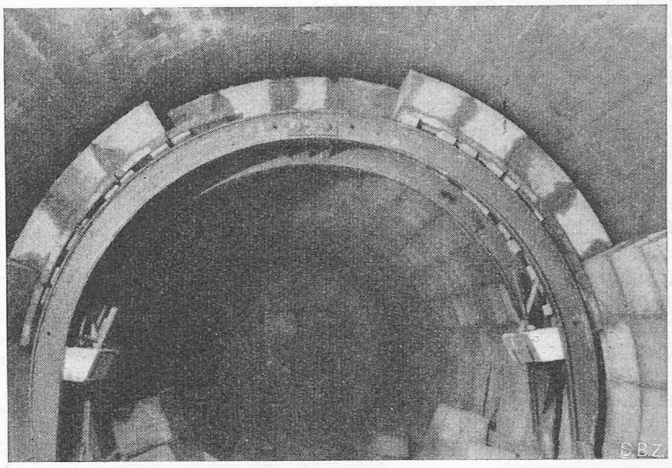

Bild 5. Fahrbarer Rüstbogen für die Mauerung des Kernringgewölbes

Der Kernring kann entweder an Ort und Stelle betoniert oder aus Spezialformsteinen gemauert werden. Bei kleinen Stollen ist die letzte Ausführungsart besonders einfach und hinsichtlich der praktisch erreichbaren Bruchfestigkeit im allgemeinen dem betonierten Ring überlegen. Diese wurde auch in dem zur Erprobung des Verfahrens gebauten Versuchsstollen angewandt. Einzelheiten hiervon zeigen die in Bild 3 dargestellten Schnitte.

Die Normalsteine d_1 und Zonenrandsteine d_3 sind auf Bild 4 ersichtlich. Einige Lochsteine d_2 mit einbetonierten Gasrohren dienen für den Anschluss der Einpressgarnituren, der Ausstosshähne und allfälliger Druckprüfmanometer.

Bild 5 veranschaulicht den Einbau des Kernringes. In Anlehnung an die zuerst betonierte Gebirgsverkleidung werden die Steine voreilend in Sohle und Ulmen ohne Rüstungsbehelfe versetzt. Das Gewölbe wird ringweise mittels eines fahrbaren Rüstbogens eingebaut. Die planen Längsfugen h und die keilförmigen Ringfugen i werden beim Versetzen der Steine möglichst sorgfältig mit Zementmörtel gestopft und an der inneren Leibung ausgestrichen. Die Anlehnungsnasen am Rücken der Steine verhindern das Eindringen des Mörtels in den Hohlring c.

Die bekannten Methoden der Mörtel- und Zementinjektionen waren nicht ohne weiteres verwertbar. Für den praktischen Erfolg der Kernring-Auskleidung ist vielmehr das neue Hinterpressverfahren des Verfassers entscheidend, das auf einem kombinierten Einsatz von pneumatischen Injektionsgeräten und Hochdruck-Zementpumpen üblicher Bauart beruht. Neben diesen Geräten ist für die Hinterpressung noch eine Wasserleitung mit einem Druck, der etwa dem Enddruck der Zementpumpen entspricht, bereitzustellen.

Die Arbeit beginnt mit dem Einschrauben der aus Dreiweghahnen und Verteilstücken bestehenden Einpressgarnituren in die Gewinde der einbetonierten Injektionsrohre, sowie dem Anschluss der Schlauchverbindungen mit der Wasserleitung, den Mörtelinjektionsgeräten und den Zementpumpen. Diese erhalten auch einen Rücklaufschlauch, damit sie schon bei Beginn der Injektionsarbeit auf Umlauf in Gang gesetzt werden können. Im Scheitel einer Zone wird mittels eines Hahnes ein Ablaufschlauch angeschlossen.

Zuerst wird in den Hinterpressring Druckwasser eingelassen. Dann folgt durch die Sohlenöffnungen die pneumatische Eindrückung von Grobmörtel mit 3 bis 5 mm Korngrösse, bis ein geschlossener Mörtelstrom aus dem Ablaufschlauch die vollzogene Füllung anzeigt. Nach Umstellung der betreffenden Hahnen besorgen die Zementpumpen den Spannungsvorgang ganz selbsttätig bis zum Stillstand beim verlangten Enddruck. Hierauf kann vorsorglicherweise noch bis zum Erhärten Wasserdruck aufgelastet wird.

Der Grobmörtel bildet an allen wasserdurchlässigen Stellen des Injektionsraumes einen Filter, der zwar ein Auspressen des Ueberschusswassers ermöglicht, hingegen dem Sand und Zement den Austritt verwehrt.

Die Dispositionen für die Bereitstellung der Einrichtungen und ihrer Bedienung sind so zu treffen, dass die Hinterpressung von Zone zu Zone zügig fortschreiten kann. In der Regel wird mit dem Pumpen auf Druck in einer Zone erst begonnen, wenn die nächste schon mit Mörtel gefüllt ist, um allfällige Durchbrüche von Zementbrei leicht beherrschen zu können. Die Kernring-Hinterpressung ist im übrigen eine Spezialarbeit, die nur unter der Aufsicht von erfahrenen, mit allen einschlägigen Vorgängen richtig vertrauten Fachkräften ausgeführt werden soll.

Um die Drainage sachgemäss auspressen zu können, werden beim Einbau des Kernringes in Abständen von z. B. 20 bis 30 m Schlitze ausgespart, in die man zunächst gelochte Stahlplatten einführt. Diese werden nach vollzogener Hinterpressung des betreffenden Stollenstückes durch volle Platten ersetzt. Die Auspressung des Drainagerohres erfolgt dann durch inzwischen angelegte Bohrlöcher, wobei das gleiche Pumpverfahren, wie bei der Kernring-Hinterpressung zur Anwendung gelangt. Dadurch erzielt man eine zuverlässige Abdämmung aller Fliesswege bis in das Gebirge und die Beseitigung aller schädlichen Resthohlräume im Bereiche der Auskleidung.

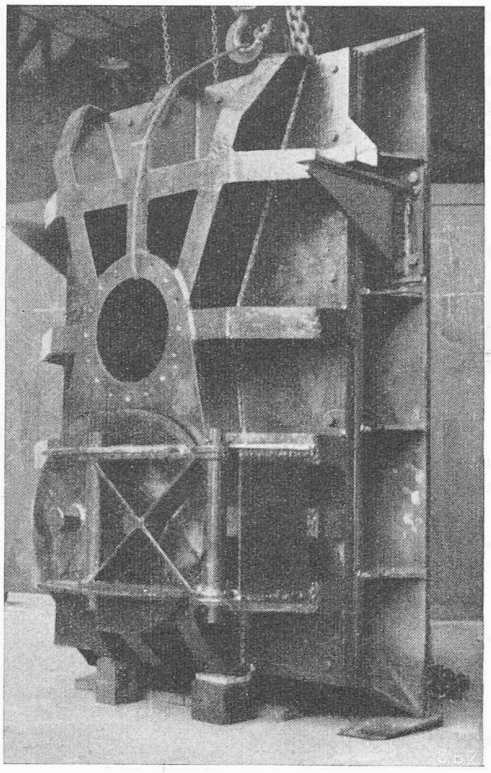

Bild 7. Stahltor für 20 atü Betriebsdruck

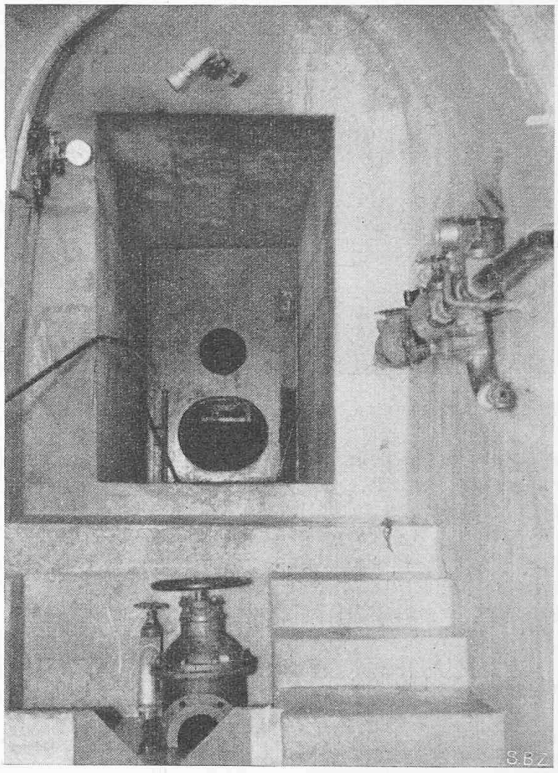

Bild 8. Torblock von der Luftseite

V. Erprobung des Verfahrens und Versuchsergebnisse

Um die Wirkung der Kernring-Auskleidung durch eine zureichende Erprobung unter Beweis zu stellen, wurde mit Unterstützung durch die Vorarlberger Illwerke Aktiengesellschaft (Bregenz) in Zusammenarbeit mit der Bauunternehmung Ing. K. Jäger (Schruns) mit einem Kostenaufwand von rd. 1/2 Mio S ein umfangreiches Versuchsprogramm verwirklicht.

Nach zahlreichen Vorversuchen in der Materialprüfanstalt der Illwerke erfolgte die Erprobung des Verfahrens zunächst an einem 1 m langen Probering in einem ehemaligen Luftschutzstollen in Rodund und schliesslich in einem eigenen *Versuchsstollen*, abzweigend vom Fenster Muleritsch der Rellsbachüberleitung des Rodundwerkes.

In dem 250 m langen Fenster wurde 200 m vom Portal entfernt ein rd. 40 m langer Seitenstollen angelegt. Dieser liegt, ebenso wie der Fensterstollen, in der Gesteinszone der Phyllitgneise und Glimmerschiefer, unweit des Uebergangs vom Urgestein auf Trias. Die Ueberlagerung beträgt etwa 100 m. In Bild 6 ist der Versuchsstollen in seiner endgültigen baulichen Ausgestaltung dargestellt.

Im Bereiche des Torblockes und der Kammer I ist das Gebirge sehr stark gestört, z. T. mylonitisch, graphitisch und weich. Der Ausbruch musste unter dem Schutze von Zimmerung erfolgen. Im Bereich der Zone 1 war der Einbau einer etwa 20 cm starken Gebirgsverkleidung nötig, bevor die Felsröhre abgedrückt werden konnte.

Mit zunehmender Entfernung vom Tor wurde das Gestein besser. Im Bereiche der Kammer II war es bereits einigermassen standfest und in den Zonen 5 und 6 fest und geschlossen. Der Versuchsstollen erfüllt sonach ganz die angestrebten Voraussetzungen für eine Erprobung in möglichst schlechtem

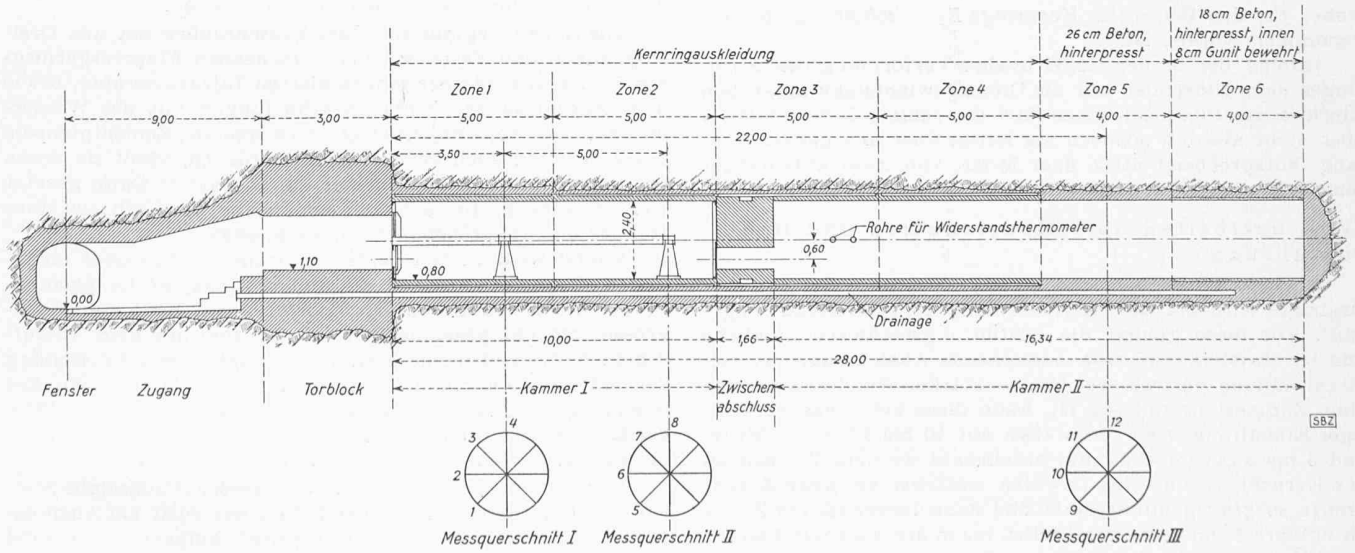

Bild 6. Versuchsstollen Muleritsch im fertigen Zustand

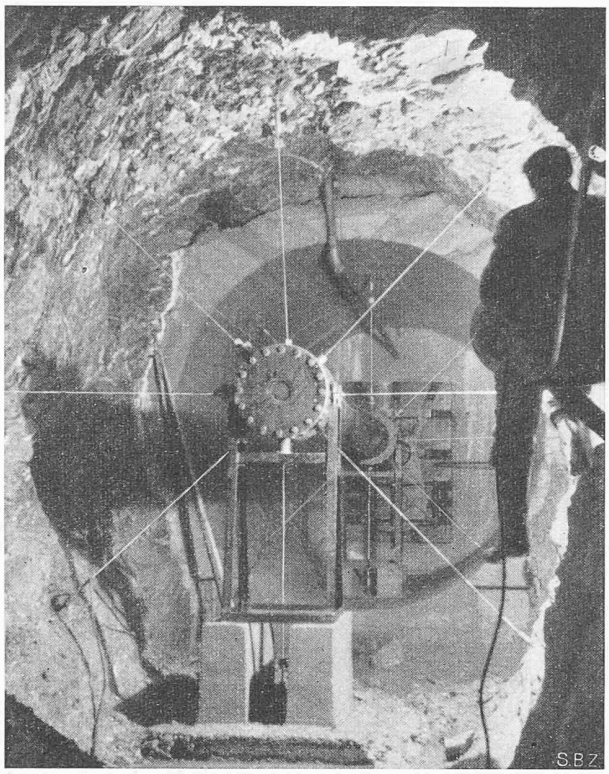

Bild 9. Deformationsmessgerät in Kammer I nach Belastung der Stollenröhre mit 13,6 atü

Gebirge und eine vergleichsweise Beurteilung in standfestem und gutem Fels.

Die Bereitstellung des Wassers für die Stollenfüllung und Druckhaltung erfolgte durch eine rd. 900 m lange, von einem Bach gespeiste 3″-Leitung mit rd. 230 m Gefälle, die bei der Füllung des Stollens bis zu 10 l/s lieferte.

Bild 7 zeigt das Abschlusstor, Bild 8 vermittelt eine Vorstellung vom Stollenzugang an der Luftseite.

Während der Dauerversuche wurde der Verlauf der Deformationen in Abhängigkeit des Druckes, der Zeit und sonstiger Einflüsse in der Kammer I in zwei Querschnitten in Abständen von 3,50 m bzw. 8,50 m vom Tor mittels eines Spezialgerätes gemessen, das auf Veranlassung des Verfassers für diesen Zweck entwickelt und gebaut wurde (Bilder 9 und 10). Dieses überträgt durch vorgespannte Drähte (Rundstäbe) die relativen radialen Verschiebungen der Endpunkte von vier, gegenseitig um 45° versetzten Druckmesser auf Messuhren, die in einem mit dem Tor verbundenen Schaurohr eingebaut und mittels eines im Eingang aufgestellten Instrumentes ablesbar waren. Nach Behebung einiger Anfangsmängel konnte mit diesem Gerät eine Messgenauigkeit von $^1/_{1000}$ mm erreicht werden.

Weitere Deformationsmessungen wurden in einem 22 m vom Tor entfernten Querschnitt mit dem seinerzeit in Amsteg verwendeten und von der ETH Zürich dem Verfasser leihweise überlassenen Messgerät[5]) ausgeführt.

Tabelle 1. Durchmesser-Verformungen im unverkleideten Felsstollen

Druck im Stollen	Endwerte der gemessenen Durchmesser-Verlängerungen (+) bzw. Verkürzungen (—) im unverkleideten Felsstollen in $^1/_{100}$ mm									
	Messquerschnitt II					Messquerschnitt III				
	Durchmesser Nr.				Mittel	Durchmesser Nr.				Mittel
atü	5	6	7	8		9	10	11	12	
13,6	+238	+136	+ 2	+41	+104	+16	+32	—[2])	—[2])	—
0,0[1])	+ 29	+ 13	—45	—16	— 5	(—7)[3])	—[4])	—[4])	—[4])	—

[1]) Sieben Tage nach der letzten Entlastung; [2]) Schreibstift hat keine Spur gezeichnet; [3]) nach dem 3. Versuch mit 13,6 atü; [4]) nicht registriert.

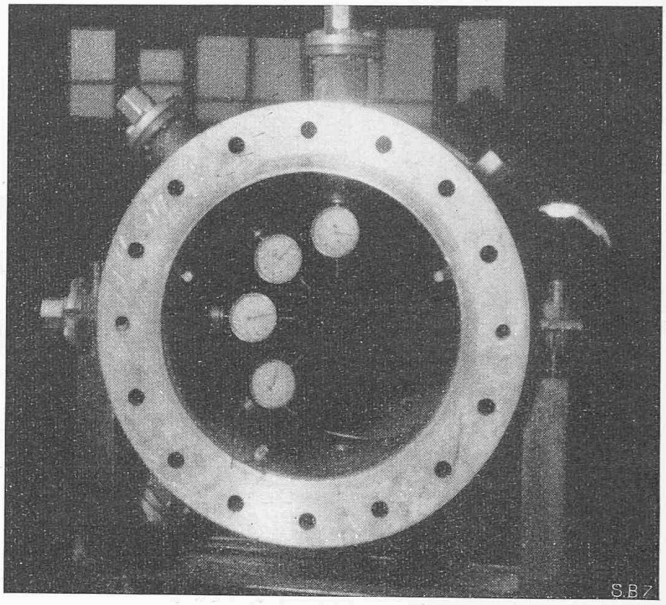

Bild 10. Deformationsmessgerät mit Messuhren im Schaurohr

Der Versuchsstollen war auch mit einem elektrischen Temperaturmessgerät ausgerüstet, das die Verfolgung der Abkühlung des Gesteins an sechs in waagrechten Bohrlöchern versetzten Widerstandsthermometern bis 6 m Tiefe ermöglichte.

Mit dem Vortrieb des Versuchsstollens wurde am 1. Februar 1947 begonnen. Die Messungen im rohen Felsstollen konnten allerdings erst am 18. März 1948 anlaufen, nachdem vorher der ganze Fensterstollen wegen Einbruchgefahr durch eine Betonverkleidung gesichert werden musste. Nach erfolgter Füllung des Stollens wurden am 20. und 23. März je zwei Druckversuche z. T. mit stufenweiser, z. T. mit rascher Be- und Entlastung vorgenommen. Dabei wurde der Druck im Stollen bis 13,6 atü gesteigert. Der Wasserverlust betrug bei dieser Belastung im Beharrungszustand 6,2 l/s. Er war im übrigen ungefähr proportional dem Druck.

Die Deformationen des Gebirges, die wegen der in der Zone 1 bereits eingebauten Betonverkleidung nur in den Messquerschnitten I und III erfassbar waren, sind in Tabelle 1 ausgewiesen.

Bemerkt wird, dass bei den Entlastungen dieser Versuchsreihe das Bewegungsspiel durch das Messuhrengerät infolge Reibungshemmungen, die erst später beseitigt werden konnten, verzerrt und ungenau wiedergegeben wurde. Die Durchmesser 5 und 9, die ungefähr senkrecht zur Schichtung gerichtet sind, ergaben erwartungsgemäss die grössten Durchmesserverlängerungen. Bei den in die Schichtung weisenden Durchmessern 7 und 9 stellten sich hingegen bleibende Verkürzungen ein, so dass man auf eine Umlagerung des Gleichgewichtzustandes durch das in das Gebirge eingedrungene und bei der Entlastung wieder auslaufende Druckwasser schliessen kann. Im Messquerschnitt II war die Deformation mit 2,38 mm fast achtmal so gross wie in dem 13,5 m entfernten Querschnitt III. Diese grosse Nachgiebigkeit kennzeichnet die schlechte Gebirgsbeschaffenheit im Bereiche der Kammer I und die strengen Bedingungen für die Erprobung der Auskleidung.

Die Besichtigung des entleerten Stollens ergab folgenden Befund. Hinter dem Messquerschnitt II war aus einer stark aufgeweichten Störungszone etwa 1 m³ Material ausgebrochen. Auch an anderen Stellen hatten sich Steine gelöst. An der Bergseite des Gewölbes zeigte sich ein bis zum Stollenende zu verfolgender klaffender Riss. Eine quer durch den Stollen verlaufende Kristallkluft, die vorher nicht wahrgenommen wurde, war aufgerissen. Alle Bohrlochpfeifen und Sprengklüfte hatten sich um 1 bis 3 mm geöffnet. Durch die Belastung mit 13,6 atü wurde also der anfängliche Gleichgewichtszustand der Stollenröhre augenfällig gestört. (Schluss folgt)

[5]) Siehe SBZ Bd. 83, S. 7* ff. (1924).