

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 73 (1955)
Heft: 14

Artikel: Der Panzerrohrversuch der Kraftwerke Zervreila
Autor: Kohn, Michael
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-61887>

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: 29.04.2026

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

Der Panzerrohrversuch der Kraftwerke Zervreila

Von Dipl. Ing. Michael Kohn, Motor-Columbus AG., Baden

DK 627.842.0014

I. Einleitung

Unter den Bauobjekten, die dem Schosse unserer Gebirge anvertraut werden, nehmen die Druckstollen und -schächte, vor allem die *gepanzerten Druckschächte*, eine Sonderstellung ein. Die in ihrem Innern sich abspielenden Vorgänge geniessen nicht nur, wie bei Kavernenzentralen oder unterirdischen Kammern, den Schutz des umgebenden Gebirges, sondern wirken durch den sich einstellenden beträchtlichen Innendruck aktiv auf das umliegende Gestein ein. Inwieweit nun dieses Gestein die ihm im Rahmen der Partnerschaft zwischen Panzer, Beton und Fels zugedachte Rolle als Tragelement übernehmen kann, hängt vor allem von dessen Materialeigenschaften ab. Ohne Kenntnis der elastischen und plastischen Verformungsfähigkeit des Felsmaterials, das in seinem petrographischen und geologischen Aufbau von Tal zu Tal, von Region zu Region wechselt, dürfte es schwer fallen, ein verlässliches Urteil über die Beanspruchungen und Sicherheitsreserven einer Druckschachtkonstruktion zu gewinnen. In dieser Einsicht wurde der *Panzerrohrversuch Rothenbrunnen* durchgeführt. Er hatte die Aufgabe, auf dem Versuchswege das für eine zuverlässige Dimensionierung der Druckschächte ¹⁾ der *Kraftwerkgruppe Zervreila* notwendige Unterlagenmaterial bereitzustellen und erlaubte, das Verhalten eines Druckschachtausschnittes im Modellmasstab 1:1 an Ort und Stelle zu beobachten. Ueber die Durchführung dieses Versuches und die wichtigsten Ergebnisse soll nachfolgend berichtet werden.

II. Versuchsaufbau und -durchführung

Vor Beginn der eigentlichen Bauarbeiten am Druckschacht der Werkstufe Safien Platz - Rothenbrunnen der Kraftwerkgruppe Zervreila (Graubünden) wurde bei Rothenbrunnen im Domleschg ein Sondierstollen in den Heinzenberg vorgetrieben. Quer dazu, nicht weit von jenem Punkt, in welchem die Horizontalstrecke des späteren Druckschachtes in den ansteigenden Schrägschacht übergehen sollte, wurde ein 25 m langer Versuchsstollen mit einem Durchmesser von rd. 3 m ausgebrochen und mit einem Panzerrohr ausgefüllert. Der kompakt anstehende, gesunde und trockene Fels bestand aus sandigem, mehr oder weniger tonigem Kalkschiefer, der intensiv gefältelt und mit Quarz-Calcit-Adern durchzogen war. In dieser Versuchskammer fand im Sommer 1954 der Panzerrohrversuch Rothenbrunnen statt, welcher von der *Motor-Columbus AG.* als Projektverfasserin und Bauleiterin

1) *Druckschacht Safien-Platz im Safiental*: Länge 740 m, Durchmesser 2,5/2,3 m, Neigung 75 %, max. Betriebsdruck 49 at inkl. Druckstosszuschlag, Ausbaugrösse 23 m³/s.

Druckschacht Rothenbrunnen im Domleschg: Länge 1120 m, Durchmesser 2,5/2,3/2,1 m, Neigung 65 %, max. Betriebsdruck 74 at inkl. Druckstosszuschlag, Ausbaugrösse 21,9 m³/s.

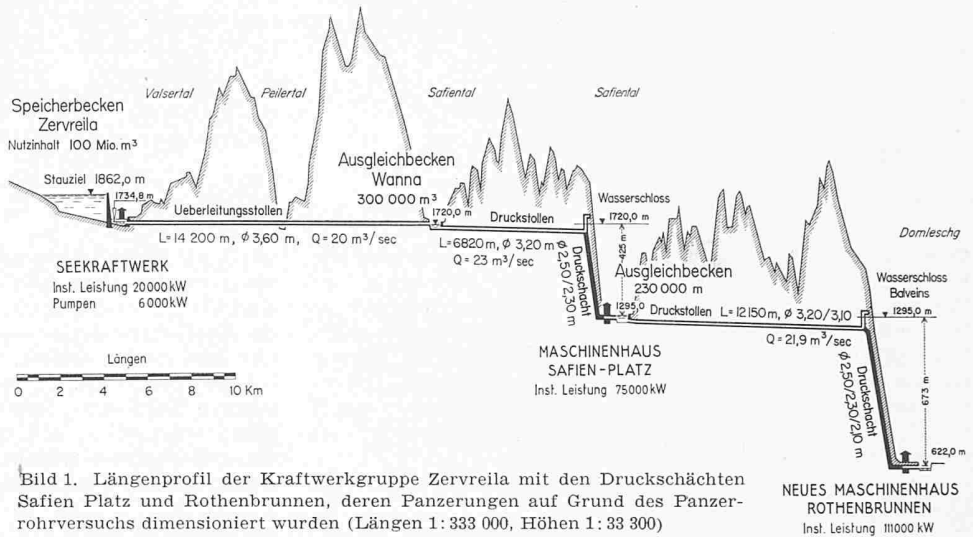


Bild 1. Längenprofil der Kraftwerkgruppe Zervreila mit den Druckschächten Safien Platz und Rothenbrunnen, deren Panzerungen auf Grund des Panzerrohrversuchs dimensioniert wurden (Längen 1: 333 000, Höhen 1: 33 300)

durchgeführt wurde, um im Sinne der einleitenden Ausführungen Einblick in die Felseigenschaften des Bündnerschiefers dieser Region gewinnen zu können.

Die Panzerung aus Kesselblech Qualität M II mit einer Streckgrenze von 2400 kg/cm² wurde in Rohrschüssen von 3,5 m montiert, zu einem zylindrischen Behälter von 16 m Länge zusammengefügt und mit einem Beton P 350 auf pneumatischem Wege hinterfüllt. Der Stirnpartie der gepanzerten Kammer, bestehend aus einem Uebergangskonus und einem gewölbten Boden, schloss sich ein Mannlochstützen an, der während der Dauer der Abpressversuche durch einen kräftigen Deckel geschlossen blieb (Bild 2). Zum weiteren Installationsmaterial gehörten eine Hochdruckpumpe, Füll- und Entleerungsrohre mit zugehörigen Schiebern und eine Entlüftungseinrichtung. Zur Füllung des Versuchsbehälters wurde das Wasser von aussen durch den 100 m langen Sondierstollen bis zur Versuchsstelle gepumpt, während im Versuchsbetrieb die Hochdruckpumpe durch Einpressen kleiner, bereitgestellter Wassermengen für die Erzielung der nötigen Innendrucke sorgte.

Der Innendurchmesser des Panzerrohres wurde dem Durchmesser des Druckschachtes Rothenbrunnen in seinem untersten Drittel entsprechend mit 2100 mm gewählt. Für die Wahl der Blechstärke, die zu 16 mm angenommen wurde, war die Ueberlegung massgebend, dass es zur Abschätzung der Lastaufteilung zwischen Panzer und Fels belanglos ist, ob das Rohr die gleiche oder kleinere Wandstärken aufweist als der zu dimensionierende Druckschacht. Was dagegen vom messtechnischen Standpunkt aus die Wahl eines relativ dünnen Panzerblechs befürworten liess, war die bekannte Tatsache, dass grössere Deformationen entsprechend stärkere Ausschläge der Messinstrumente verursachen und damit genauere Ablesungen im normalen Geltungsbereich der Eichkurven erlauben.

Der eigentliche Versuch bestand darin, das Panzerrohr durch Erzeugung verschiedener Innendrucke zur Ausdehnung zu bringen und den Verlauf der Deformationen laufend zu registrieren. Während am Anfang die Laststeigerungen in

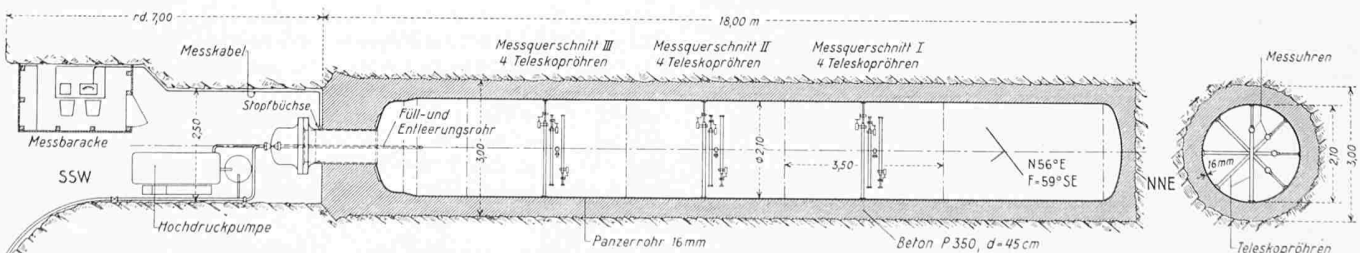


Bild 2. Installationsskizze des Panzerrohrversuchs Rothenbrunnen. Masstab 1:160

kleinen Stufen erfolgten, um den Bereich bis zum satten Anliegen der Panzerung an die Betonhülle zu erfassen, wurden die Laststufen im späteren Versuchsablauf vergrößert. Bild 4 gibt das Druckdiagramm des Versuches wieder. Nach den verschiedenen Belastungszyklen wurden in regelmässigen Intervallen partielle oder totale Entlastungen von verschiedener Zeitdauer eingeschaltet, um auch die Grössenordnungen der bleibenden, plastischen Verformungen messen zu können. Der grösste Innendruck, mit dem das Versuchsrohr strapaziert wurde, betrug 70 at, welche Grösse angenähert dem maximalen Betriebsdruck des Druckschachtes Rothenbrunnen entspricht. Die radialen Deformationen des Panzerrohres wurden in drei verschiedenen Messquerschnitten durch Beobachtung der Längenänderungen verschiedener Durchmesser untersucht. In jeder dieser Sektionen wurden, wie Bild 3 zeigt, vier Teleskoprohre aufgestellt (eine in Vertikal- und eine in Horizontalrichtung, die beiden übrigen unter 45° geneigt) und am Panzerrohr fixiert. Die Messung der Relativbewegung zwischen den beiden ineinander verschiebbaren Rohrteilen erfolgte mit Stollenprüfungs-Messuhren Typ MCH²⁾, die sich schon bei früheren Druckversuchen in Stollen und Panzerkammern bewährt hatten³⁾ und seither konstruktiv verbessert werden konnten. Diese für das Funktionieren in hohen Wasserdrücken speziell gebauten Geber übertragen die Verschiebungen der Teleskoprohre über ein mechanisches Messwerk und eine für die Fernübertragung konstruierte elektrische Einrichtung (Potentiometer) nach aussen und erlauben damit, an einem Empfangsgerät die Deformationen des Panzers zu verfolgen.

Die Innentemperatur der Expansionskammer wurde während des Versuches laufend registriert. Nach Einfüllung des Wassers von durchschnittlich 8° C wurde durch Einschalten einer längeren Wartefrist vor Beginn der Messungen ein vollständiger Temperatureausgleich hergestellt. Die Versuche begannen sechs Wochen nach Hinterfüllung des letzten Rohrschusses und dauerten, vom Moment der fertigen Montage der Messinstrumente an gerechnet, zwei Wochen. Der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt, dass zur Ausfüllung der nach der Hinterbetonierung des Panzerrohres unvermeidbar auftretenden Hohlräume zwischen Fels und Beton im Scheitel Mörtelinjektionen angeordnet wurden. Wie aus den weiteren Ausführungen hervorgehen wird, empfiehlt es sich, diese Injektionen kontrollweise auch in der Sohle durchzuführen. Von Injektionen zwischen Panzer und Beton wurde in Beachtung der damit verbundenen Beulgefahr abgesehen. Die Lieferung und Montage des Panzerrohres und weiteren Installationsmaterials erfolgte durch die Firma Gebrüder Sulzer AG., Winterthur, die sich auch mit wertvollen Beiträgen an der Versuchsdurchführung beteiligte.

III. Versuchsergebnisse und Diskussion

Vor der Diskussion der eigentlichen Versuchsergebnisse sollen zur Erleichterung ihrer Interpretation in kurzen Zügen die verschiedenen Phasen des Zusammenwirkens von Panzer,

2) Von der Motor-Columbus AG und Dr. Huggerberger, Zürich, gemeinsam entwickelt und von letzterem gebaut.

3) Druckstollen Lucendro (SEZ Nr. 41 vom 11. Oktober 1947), Druckstollen Juliawerk (SEZ, heutige Ausgabe), Panzerrohrversuch des Kraftwerkes Lysefjord (Norwegen) u. a. m.

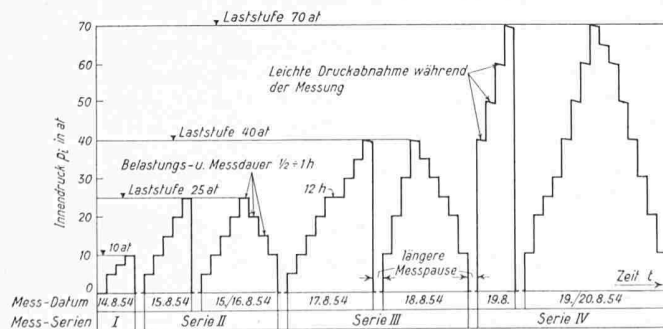


Bild 4. Belastungsdiagramm des Panzerrohrversuchs Rothenbrunnen (ohne Vorbelastungen im Bereich von 0 bis 8 at, zur Ermittlung der Klaffung)

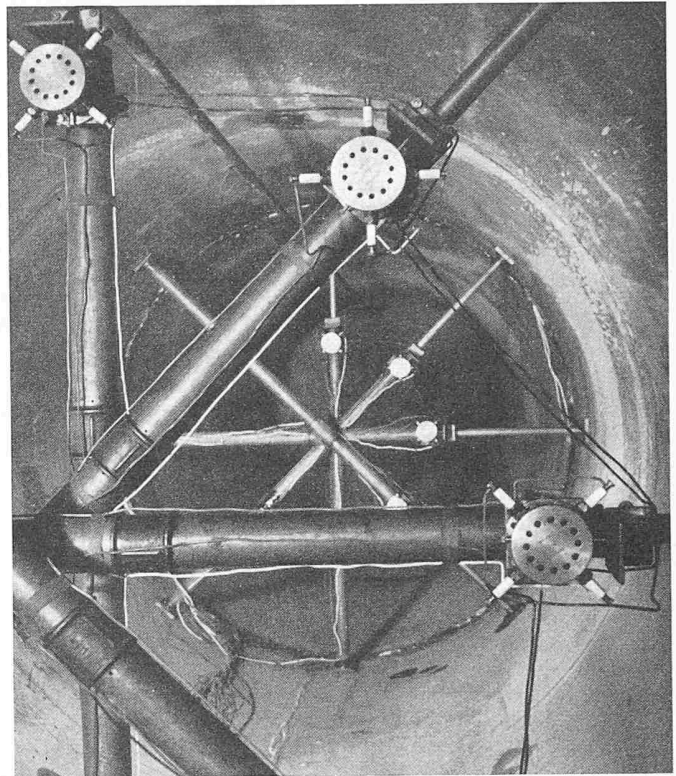


Bild 3. Einrichtungen zum Messen der radialen Deformationen des Panzerrohres in der Versuchskammer Rothenbrunnen

Beton und Fels während des Versuchsablaufes geschildert werden:

Im unberührten Zustand klafft zwischen Panzerung und Betonhülle eine kleine Lücke, deren Existenz allein schon durch Abklopfen der Blechschalung nachgewiesen werden kann und deren Entstehung vor allem Temperatureinflüssen zuzuschreiben ist. Wird nun das Panzerrohr in einer ersten Phase mit kleinen Innendrücken belastet, so wird es sich wie ein freies Rohr ungezwungen verformen können, solange jedenfalls, bis die Klaffung durch einen Innendruck p_0 nicht überwunden ist. Im Moment des satten Anliegens der Panzerung an die Betonhülle tritt der Versuch in eine zweite Phase: das Verbundsystem beginnt zu wirken und Beton wie Fels beteiligen sich an der Lastaufnahme. Trägt man in einer schematischen Skizze, die den qualitativen, nicht aber den quantitativen Deformationsvorgang zu veranschaulichen versucht, die Vergrößerung des Rohrquerschnittes in Funktion des Innendruckes auf, so ergibt sich die im Bild 5 dargestellte idealisierte Charakteristik. Die Zunahme der Deformation pro Lasteinheit vermindert sich in der zweiten Phase durch die Verbundwirkung der gesamten Konstruktion spürbar. In jenem Augenblick, in welchem die Betonhülle radial zu reissen beginnt und für die Aufnahme von tangentialen Ringzugspannungen verloren geht, beginnt die dritte und letzte Phase, die bis zum Bruchzustand dauert, und die sich durch ein verstärktes Ansteigen des entsprechenden Kurvenastes auszeichnet. In dieser Versuchsphase wirkt der gerissene Betonmantel lediglich als Zwischenglied zur Uebertragung von Druckkräften vom Panzerrohr auf das Gebirge.

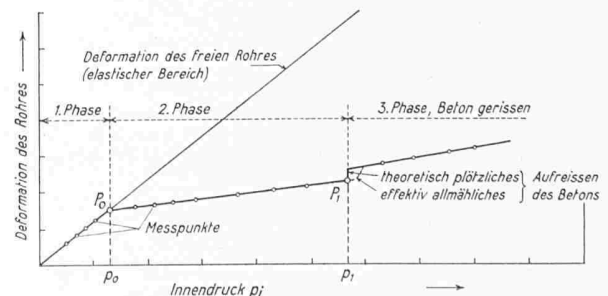


Bild 5. Idealisirtes Schema des Deformationsverlaufs bei steigendem Innendruck

Ein erstes, wenn auch nicht das wichtigste Ziel des Panzerrohrversuches lag in der Ermittlung der zwischen Rohrwand und Beton klaffenden Lücke k_0 . Es war von Interesse, unter den vorherrschenden, normalen Temperaturbedingungen jene Grösse, die bei der Berechnung des Einbeulens eines Druckschachtes eine bedeutende Rolle spielt⁴⁾, versuchsstechnisch zu ermitteln. Dieser Absicht stellte sich die Schwierigkeit in den Weg, auf direkte Weise denjenigen Innendruck p_0 festzuhalten, bei welchem sich das Anschmiegen der Rohrwandung an den umhüllenden Beton vollzog. Durch sukzessives Abtasten der Rohrbewegungen im unmittelbaren Grenzbereich der ersten und zweiten Phase (Punkt P_0) gelang es jedoch, auf dem Wege der Interpolation diesen Uebergangsbereich genau genug zu lokalisieren. Er bewegte sich im Falle Rothenbrunnen zwischen 5 und 6 at. Die Rohrstatik liefert für die Grösse des Innendruckes, den der Panzer zur Ueberwindung der Klaffung k_0 allein aufnehmen muss, den Wert:

$$(1a) \quad p_0 = \frac{k_0 \cdot \delta \cdot E_e \cdot m_e^2}{r^2 \cdot (m_e^2 - 1)}$$

δ = Wandstärke, r = Rohrradius, E_e = Elastizitätsmodul des Eisens. Dabei wird angenommen, dass die Längsverkürzung des Rohres aus Ringspannung verhindert ist (m_e = Poissonsche Zahl für Eisen = 10/3 im elastischen Bereich). Damit konnte im konkreten Fall auf ein $k_0 = 0,15 \div 0,18$ mm oder, auf den Rohrradius bezogen, $k_0/r = 0,14 \div 0,17$ ‰ geschlossen werden. Dieser Wert liefert eine Bestätigung des von andern Autoren⁵⁾ auf Grund rechnerischer Ueberlegungen ermittelten Schwankungsbereiches von $0,15$ ‰ $< k_0/r < 0,40$ ‰ und liegt an dessen unterer Grenze. Die entsprechende Tangentialspannung des Eisens

$$(1b) \quad \sigma_0 = \frac{k_0 \cdot E_e \cdot m_e^2}{r \cdot (m_e^2 - 1)}$$

belief sich auf 350 ÷ 400 kg/cm² und kann als «Vorspannung» des Panzerrohres vor dem eigentlichen Einsetzen der Verbundwirkung bezeichnet werden.

Unvergleichlich schwieriger war es, den Uebergang von der zweiten zur dritten Phase versuchsmässig festzuhalten. Ein Blick auf das in Bild 6 dargestellte Beispiel für das Deformationsdiagramm eines beliebig herausgegriffenen Rohrdurchmessers zeigt, dass sich die «Atmung» einer solchen Verbundkonstruktion bei abwechselnden Belastungen und Entlastungen von weit komplexerer Natur erweist, als das einer gedanklichen Vereinfachungstendenz entsprungene Idealbild 5 zu veranschaulichen sucht. Während bei den ersten Belastungssteigerungen das Rohr bei der Ausdehnung grösseren Widerstand findet, zeigen sich bei den Wiederbelastungen für gleiche Innendrucke grössere Deformationen (Bild 6). Dieser Hysteresiseffekt lässt sich mit den plastischen Verformungseigenschaften der Verbundkonstruktion deuten. Es darf auch nicht übersehen werden, dass das Ge-

4) E. Amstutz: Das Einbeulen von Schacht- und Stollenpanzerungen, SBZ Nr. 9 vom 4. März 1950.

5) A. Hutter und A. Sulser: Beitrag zur Theorie und Konstruktion gepanzerter Druckschächte, «Wasser- und Energiewirtschaft» 1947, Nr. 11/12.

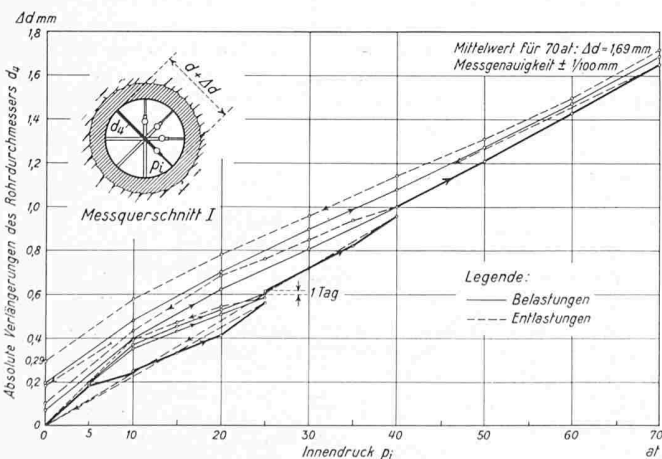


Bild 6. Beispiel für das Deformationsdiagramm eines Rohrdurchmessers (Teleskopröhre d_4 im Querschnitt I)

Tabelle 1. Deformationen des Versuchsrohrs mit Durchmesser $d = 2100$ mm bei 70 at Innendruck

Querschnitt	I					II				
	d_1	d_2	d_3	d_4	d_m	d_1	d_2	d_3	d_4	d_m
Durchmesser- längerung Δd mm	1,76	1,85	1,53	1,69	1,70	1,52	1,65	1,22	1,33	1,43
Spez. Längenände- rung $\epsilon = \Delta d/d$ in ‰	0,84	0,88	0,73	0,80	0,81	0,72	0,79	0,58	0,63	0,68

füge des Felsens in den Randzonen der Versuchskammer durch die vorangegangenen Sprengarbeiten lokale Auflockerungen erleiden musste, die zusammen mit dem natürlichen, plastischen Verhalten von Fels und Beton für die bleibenden Deformationen nach den ersten Belastungen verantwortlich gemacht werden müssen. Mit all diesen Faktoren, wie auch dem Schicht- und Faltungscharakter des Gebirgsmassivs, können auch die Unterschiede zwischen den absoluten Längenänderungen der einzelnen Teleskopröhren begründet werden.

Es würde zu weit führen, im Rahmen dieses Berichtes den Deformationsverlauf aller beobachteten Durchmesser wiederzugeben. Abgesehen von der absoluten Grösse der Längenänderung (Tabelle 1) kann in bezug auf den qualitativen Deformationsverlauf das in Bild 6 gezeigte Diagramm des Durchmessers d_4 im Querschnitt I als typisch bezeichnet werden. Was die plastische Deformation des Durchmessers bei vollständiger Entlastung nach Versuchsabbruch betrifft, so wurde diese im dargelegten Beispiel am Eisenrohr rund mit $\Delta d_{pl} = 0,3$ mm bestimmt, was einem plastischen Deformationsanteil von $(\epsilon_{total} - \epsilon_{elastisch})/\epsilon_{total} = 0,18$ gleichkommt. Die entsprechenden Zahlen für die anderen Rohrdurchmesser schwankten zwischen 10 % und 20 %. Dabei soll nicht unbeachtet bleiben, dass in der umliegenden Gesteinshülle eher grössere bleibende Formänderungen nachgewiesen werden könnten. Es ist unwahrscheinlich, dass der weniger elastische Beton- und Felsmantel der Schrumpfbewegung des elastischen Eisenrohres bei der Druckwegnahme dichtauf zu folgen vermag. Auch die folgerichtige Deutung des Deformationsdiagramms gibt ein Indiz hierfür.

In diesem Zusammenhang mag auch der Hinweis eingeflochten werden, dass der Panzerrohrversuch Rothenbrunnen bereits acht Wochen nach Ausbruch der Versuchskammer zur Durchführung gelangte; da auf die Dauer jedes Gebirge, das durch Stollen- oder Kavernenbau einem Eingriff in sein inneres Gleichgewicht ausgesetzt ist, plastische Verformungen durch Kriecherscheinungen erleidet, muss bei der Beurteilung der remanenten Deformationen auch der Faktor Zeit berücksichtigt werden. Unter Umständen kann der von aussen wirkende Gebirgsdruck dem Innendruck entgegenwirken und die Panzerung entlasten. Für den im gegenwärtigen Zeitpunkt im Gang befindlichen Panzerrohrversuch Motec der Kraftwerke Gougra (Val d'Anniviers, Wallis) ist deshalb eine Versuchswiederholung nach Ablauf eines halben oder ganzen Jahres in Aussicht genommen.

Die Auswertung und Weiterbearbeitung der durch die Messinstrumente wiedergegebenen Verformungsgrössen erlauben nun die Beantwortung der wesentlichen Frage nach dem Anteil des Gebirges an der Lastaufnahme. Durch die Bildung von Mittelwerten und den Uebergang von den Deformationen zu den Beanspruchungen lassen sich für die einzelnen Messquerschnitte die tatsächlich vorhandenen Ringspannungen im Versuchsrohr in Funktion des Innendruckes eruieren. Im Lastverteilungsdiagramm des Bildes 7 sind die in den Sektionen I und II ermittelten tangentialen Ringzugspannungen σ_e des Eisenrohres verglichen mit der Spannungszunahme eines frei gedachten Rohres gleicher Abmessungen. Diese «Nenn- oder Nominalringspannungen» $N\sigma_e$ des unumhüllt gedachten Rohres bilden eine wertvolle Bezugsbasis für die Beurteilung der Lastverteilung im Verbundquerschnitt. Bildet man das Verhältnis

$$\alpha = \frac{\text{vorhandene Eisenringspannung } \sigma_e}{\text{Nominalringspannung } N\sigma_e}$$

so ist damit der durch den Felsen reduzierte Lastanteil des Rohres eindeutig charakterisiert. Der Ausdruck $(1 - \alpha)$ stellt sinngemäss die Entlastung des Panzerrohres durch die Stützwirkung der Betonhinterfüllung und des Felsens dar. Der auf diese Weise definierte Quotient α gibt treffend den Ver-

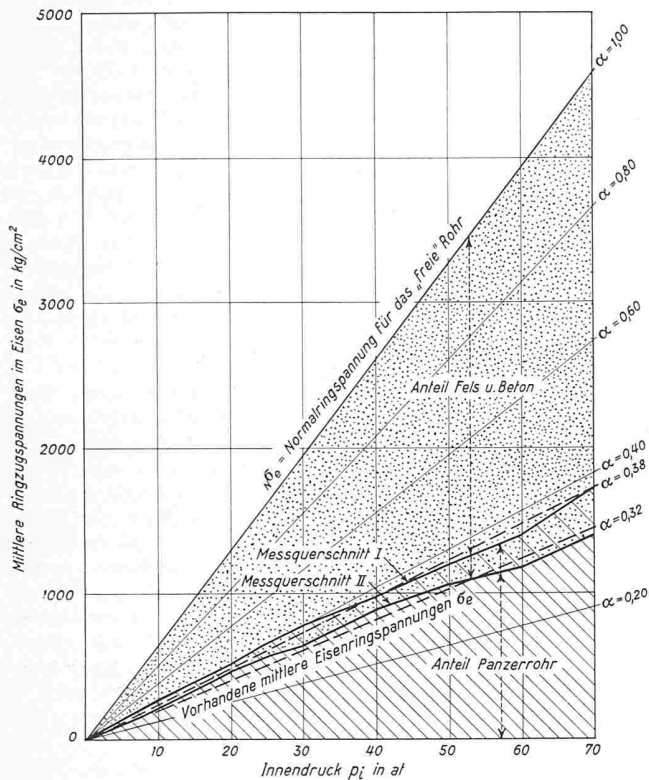


Bild 7. Lastverteilungsdiagramm des Panzerrohrversuchs Rothenbrunnen

teilschlüssel wieder, nach welchem sich Panzerung, Beton und Fels an der Lastaufnahme beteiligen. Er geht allein schon durch seine Betrachtungsweise realistischer auf den Charakter einer Verbundkonstruktion ein als jene häufige Gepflogenheit, bei der Dimensionierung eines Druckschachtes die Tragwirkung des Felsens summarisch durch eine Erhöhung der zulässigen Eisenspannung (z. B. 3000 kg/cm²) zu berücksichtigen und die Bemessung fiktiv wie für ein freies Rohr durchzuführen. Dies führt oft dazu, dass einem Stahl, wenn auch nur rechnerisch, eine zulässige Beanspruchung zugebilligt wird, die seine Streckgrenze übersteigt.

Für den Fall des Bündnerschiefers in Rothenbrunnen ergaben sich im Mittel folgende α -Werte:

- Messquerschnitt I: $\alpha = 0,38$
- Messquerschnitt II: $\alpha = 0,32$

Fels- und Betonmantel übernehmen somit an der Versuchsstelle rund 60 ÷ 70 % der Belastung. Zahlenwerte von dieser Größenordnung sind auch im Zusammenhang mit andern Abpressversuchen ermittelt worden; sie liefern eine Bestätigung der beträchtlichen Entlastungswirkung, die dem Gebirge dank den aus solchen Versuchen gewonnenen Erkenntnissen zugemutet werden kann. Dabei ist in den oben wiedergegebenen Zahlenwerten über die Stützwirkung des Felsens jener Belastungsanteil p_0 , den das Rohr allein ohne Mitwirkung des Gesteins aufnehmen musste, nicht ausgeschieden worden. Trägt man folgerichtig der Entlastungswirkung des Gebirges erst vom Augenblick des Anliegens der Panzerung an den Betonmantel an Rechnung, so ergeben sich aus naheliegenden Gründen noch kleinere α -Werte.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse zur Ermittlung der Elastizitätseigenschaften des Felsens sowie der Querschnittsbeanspruchungen in Panzer, Beton und Fels der Versuchskammer Rothenbrunnen ergab für einen Innendruck von 70 at die in Tabelle 2 wiedergegebenen mittleren Werte. Für die Entwicklung und Ableitung der Formeln sei auf einige Beiträge in der Literatur⁶⁾ verwiesen. Die Berechnung erfolgte unter der Annahme einer radial gerissenen Betonhülle (Phase 3) und eines zugfesten isotropen Felsens und beruhte auf den ebenfalls in Tabelle 2 angeführten geo-

⁶⁾ Föppl: Vorlesungen über Technische Mechanik, Band III: Festigkeitslehre. Frey-Baer: Berechnung der Betonauskleidung von Druckstollen, SBZ Nr. 14 vom 30. Sept. 1944. Hutter und Sulser: siehe unter 5) u. a. m.

Tabelle 2. Querschnittsbeanspruchungen und Elastizitätseigenschaften des Felsens in der Versuchskammer Rothenbrunnen bei 70 at Innendruck

Geometrische und materialtechnische Daten: (Bild 8)

Rohrdurchmesser $d = 2100$ mm Ausbruchdurchmesser $f = 3,0$ m
 Rohrwandstärke $\delta = 16$ mm Stärke des Betonrings $b/2 = 45$ cm
 Poissonsche Zahl $m_{Eisen} = 10/3$ Poissonsche Zahl $m_{Fels} = 3 \div 6$
 $E_e, E_b, E_f =$ Elastizitätsmoduli für Eisen, Beton, Fels

Beanspruchungen, bzw. Elastizitätseigenschaften	Querschnitt I	Querschnitt II
Ringspannung im Eisenrohr σ_e in kg/cm ² einschliesslich Vorspannung σ_0	1910	1610
Druckspannung an der Beton-Innenleibung σ_b in kg/cm ²	41	45,5
Radial, bzw. Tangentialspannungen $\sigma_r = -\sigma_t$ kg/cm ² an der Felloberfläche (Kontaktzone Fels-Beton)	± 29	± 32
Elastizitäts-, bzw. Verformungsmodul des Bündnerschiefers in kg/cm ² für $m_f = 6$	79 000	113 000
$m_f = 3$	88 000	126 000

metrischen und materialtechnischen Daten. Dabei mussten bei der Einführung der im Versuchsverfahren bestimmten Werte Δd des Eisenrohres die Einflüsse der Klaffung k_0 , der Deformation der Betonhülle ($E_B = 300\,000$ kg/cm²) und der verhinderten Längsbewegung des Rohres besonders berücksichtigt werden. Bestehen zwischen den Ausweitungen und den Innendruckanteilen (Bild 8) von Eisenrohr, Betonring und Felsmantel die folgenden Beziehungen:

- (2a) $\Delta d_{Rohr} = p_{Rohr} \cdot \frac{d^2 \cdot (m_e^2 - 1)}{2 \cdot E_e \cdot \delta \cdot m_e^2}$ (Rohrstatik),
- (2b) $\Delta b_{Beton} = p_{Beton} \cdot \frac{b \cdot (1 + d/f)}{2 \cdot E_b}$ und
- (2c) $\Delta f_{Fels} = p_{Fels} \cdot \frac{f \cdot (1 + m_f)}{E_f \cdot m_f}$ (Scheibentheorie)

und berücksichtigt man ferner mit einer Gleichgewichtsüberlegung, dass

(3) $p_f = p_b \cdot \frac{d + 2\delta}{f} \approx p_b \cdot \frac{d}{f}$ ist,

so gestattet die Formulierung der Gleichgewichtsbedingung:

(4) Gesamter Innendruck $p_i = p_r + p_b$

und der Elastizitätsbedingung:

(5) $\Delta d_{gemessen} = 2 \cdot k_0 + \Delta b + \Delta f$

die Ermittlung der Beanspruchungen und insbesondere des Elastizitätsmoduls E_f des Felsens. Dabei versteht sich p_r einschl. Vorspannung p_0 (Gl. 1a) zur Ueberwindung der Klaffung k_0 . Führt man in diese skizzenhaft wiedergegebenen statischen Zusammenhänge noch die Definition des Wertes $\alpha = p_r/p_i$ ein, so ergibt sich durch eine sinngemässe Verknüpfung der verschiedenen Gleichungen auf rechnerischem Wege die direkte Beziehung zwischen α und dem Elastizitätsmodul des Gebirges.

IV. Versuchsverwertung und Schlussbetrachtungen

Durch die Verwertung der aus den Messungen gewonnenen Unterlagen konnten nach Versuchsabschluss für den Druckschacht Rothenbrunnen und analog für denjenigen der oberen Stufe in Safien-Platz bei ähnlichen Gesteinsverhältnissen die Blechstärken entsprechend den variablen Schachtdurchmessern und Betriebsdrücken in verschiedenen Höhenlagen ermittelt und der rechnerische Spannungsnachweis er-

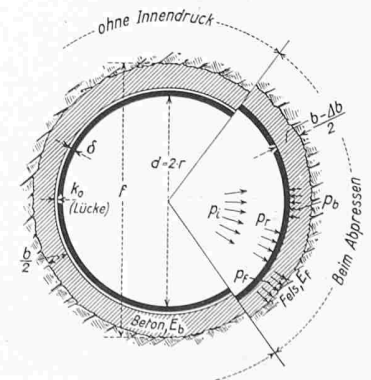


Bild 8. Bezeichnungen im Druckschachtquerschnitt

bracht werden. Das eigentliche Versuchsziel war damit erreicht. Man würde jedoch die Grenzen, die einem solchen Versuch durch seine ortsgebundenen geologischen Voraussetzungen gezogen sind, verkennen, wollte man sich bei der Dimensionierung nicht klar sein, dass der versuchstechnisch bestimmte α -Wert nicht unbedingt für die Verhältnisse auf der ganzen Länge des Druckschachtes Gültigkeit besitzen muss. Die nackten Versuchsergebnisse bedürfen einer geologischen und technologischen Interpretation, die dem wechselnden Schichtcharakter, dem allfälligen Auftreten von klüftartigen Zonen usw. im gesamten Gebirgsmassiv Rechnung tragen muss.

Im Falle der Druckschächte Safien-Platz und Rothenbrunnen konnten für das Felsmedium im Hinblick auf die Dimensionierung mit genügender Genauigkeit quasi-isotrope Eigenschaften vorausgesetzt werden. Trotz der Tatsache, dass der Versuchsstollen und die räumlich dazu abgewinkelten Druckschächte die Felspakete des Bündnerschiefers in stereometrisch verschiedenen Richtungen durchstossen, erlaubten die starken lokalen Verfälschungen, die sich dem tektonischen Schichtcharakter superponieren, die Annahme einer Gleichwertigkeit aller Raumrichtungen. Dagegen bewogen das Auftreten von klüftigen Strecken während des später einsetzenden Vortriebs einerseits und Ueberlegungen ausführungstechnischer Natur andererseits, der Dimensionierung ein korrigiertes $\alpha = 0,45$ zu legen. Auf dieser Basis und unter Einhaltung der notwendigen Sicherheitsmargen ergaben sich für die unteren Enden der beiden Schrägschächte die in nachstehender Datenzusammenstellung aufgeführten Blechstärken:

Druckschacht Safien-Platz:

Rohrdurchmesser: $d = 2300$ mm,

Berechnungsdruck: 49 at ($p_{stat} + 15\%$)

Stahlqualität: Spezialstahl mit einer Mindestzugfestigkeit von 44 kg/mm² und einer Streckgrenze von 27 kg/mm².

Maximale Wandstärke: $\delta = 17$ mm

Druckschacht Rothenbrunnen:

Rohrdurchmesser: $d = 2100$ mm,

Berechnungsdruck: 74 at ($p_{stat} + 10\%$)

Stahlqualität: Sonderstahl mit einer Mindestzugfestigkeit von 50 kg/mm² und einer Streckgrenze von 34 kg/mm².

Maximale Wandstärke: $\delta = 18$ mm.

In den oberen Partien der Druckschächte werden Kesselbleche mit niedriger Zugfestigkeit, sonst aber gleichbleibender Qualitätsgüte verwendet. Als minimale Wandstärke der obersten Rohrschüsse sind in beiden Schächten aus transport- und montagetechnischen Gründen 9 mm vorgesehen. Der verminderten Tragwirkung einer gebrächen, zerklüfteten Vortriebsstrecke von rd. 40 m im untersten Teil des Druckschachtes Rothenbrunnen wurde durch eine Erhöhung der Panzerstärke auf 21 mm Rechnung getragen. Da im Zeitpunkt der Rohrbestellung der Schachtvortrieb in Safien-Platz im Gegensatz zu Rothenbrunnen noch nicht eingesetzt hatte, wurde dort der Panzerung mangels lückenloser Kenntnis der Felseigenschaften eine etwas erhöhte Sicherheitsreserve gegenüber der Streckgrenze eingeräumt. Berechnet man, gestützt auf diese Bemessungsergebnisse, die Eisen-Ringspannungen σ_e in den untersten Punkten der beiden Schrägschächte nach der Theorie des freien Rohres (Annahme $\alpha = 1$), so ergeben sich folgende Werte:

Druckschacht	σ_e für $\alpha = 1$
Safien-Platz	3300 kg/cm ² für St. 44
Rothenbrunnen	4300 kg/cm ² für St. 50

Auf die Dimensionierung auf Aussendruck soll im vorliegenden Bericht über einen Innendruckversuch nicht näher eingegangen werden, obwohl gerade die relativ schlanke Bemessung der Schachtpanzerungen den Stabilitätsproblemen vermehrtes Gewicht verleiht. Die durch den Vortrieb bestätigte Prognose, wonach die beiden Berghänge oberhalb Safien-Platz und Rothenbrunnen wenig Wasser führen, hatte jedoch Annahmen über den Aussendruck erlaubt, mit welchen im konkreten Fall auch der Sicherheitsnachweis hinsichtlich Einbeulen erbracht werden konnte. Einen wesentlichen Beitrag zur Verminderung der Beulgefahr leisten jedoch sorgfältig ausgeführte Injektionen, die den Druckschacht mit einer systematisch gedichteten Gesteinshülle zu umschliessen und seine Qualität ganz allgemein zu steigern gestatten.

Neben seiner Aufgabe, verfeinerte Dimensionierungsgrundlagen bereitzustellen, erhielt der Panzerrohrversuch Rothenbrunnen durch ein erwähnenswertes Detail eine höchst instruktive Bedeutung. Es mag aufgefallen sein, dass in der Schilderung des Versuchsaufbaus von drei Messquerschnitten die Rede war, die Diskussion der Versuchsergebnisse sich jedoch auf zwei Querschnitte beschränkte. Schon bei der Ablesung der Messinstrumente und später bei der Versuchsauswertung fiel in Messquerschnitt III eine ungewöhnlich starke Deformation des vertikalen Durchmessers und, in beschränkterem Masse, der beiden geeigneten Teleskoprohren auf. Ein Augenschein nach Versuchsabschluss führte zur Entdeckung einer Beule, die sich in unmittelbarer Umgebung der Sektion III rd. 150 cm lang und 50 cm breit über den Rohrboden ausbreitete und sich in ihrem tiefsten Punkte rd. 20 mm nach aussen wölbte. Durch Ausbrennen und Herauslösen der in Mitleidenschaft gezogenen Rohrpartie konnte das Geheimnis über die mit materialtechnischen und geologischen Ueberlegungen nicht mehr erklärbare Verzerrung der Rohrform gelüftet werden. In der Tat befand sich unter dem Panzerrohr an jener Stelle ein Hohlraum, der vom Beton trotz dessen plastischer Konsistenz unausgefüllt geblieben war und der den nackten Fels durchblicken liess. Die von innen her beanspruchte Rohrwandung fand durch das Fehlen des Betons keine entlastende Stützwirkung und das Zusammenwirken des Verbundquerschnittes ging an jener Stelle verloren.

Gerade um solche Diskontinuitäten der Betonhülle zu vermeiden, war schon vor dem Panzerrohrversuch der Entscheid getroffen worden, die Schrägschächte der Kraftwerke Zervreila in Prepekt-Beton auszuführen. Aus allen andern Vorteilen, die dieser Einbringungsart des Betons auf Grund von Erfahrungen⁷⁾ auf verschiedenen ausländischen Baustellen nachgerühmt werden, sticht derjenige der möglichst satten und lückenlosen Hinterfüllung des Panzers durch Einpressen von Prepekt-Mörtel zwischen das Kiesgerüst deutlich hervor. Der durch den Versuch gewährte Einblick in die gefährlichen Folgen einer mangelhaften Betonhinterfüllung gab Veranlassung, auch die Möglichkeit der Prepekt-Ausführung in den Flachstrecken der Druckschächte trotz ausführungstechnischer Hindernisse ernsthaft zu prüfen.

Jedenfalls geht aus dieser Episode mit aller wünschbaren Deutlichkeit hervor, welche Bedeutung einer sorgfältigen Bauausführung zugemessen werden muss. Dass ein einwandfreies Zusammenwirken der einzelnen Elemente Stahl, Beton, Fels auch eine enge Zusammenarbeit aller an der Ausführung des Druckschachtes beteiligten menschlichen Kräfte voraussetzt, hat der ungewollte, aber wertvolle Nebeneffekt dieses Panzerrohrversuches eindrücklich demonstriert.

⁷⁾ A. Brandestini: «Die Verwendung des Prepekt-Verfahrens bei Druckschachtauskleidungen», SBZ Nr. 52 vom 25. Dez. 1954.

Rechnerische Spannungsermittlung in Betonauskleidungen von Druckstollen

Von Dipl. Ing. Raoul Sabljak, Elektroprojekt, Zagreb (Jugoslawien)

DK 627.842.0012

Der projektierende Ingenieur sieht sich oft vor die Aufgabe gestellt, bei der Dimensionierung von Stollenverkleidungen einen Einblick in die Beanspruchungen zu gewinnen, denen Felsmantel und Betonverkleidung infolge Innendruck ausgesetzt sind. An dieser Stelle hat Dipl. Ing. Otto Frey-Baer die theoretischen Grundlagen zur Berechnung von

solchen Betonauskleidungen¹⁾ dargelegt. Darin wurden für verschiedene Verkleidungs- bzw. Profiltypen (armierte und unarmierte Betonauskleidung) und für verschiedene Stadien

¹⁾ SBZ Bd. 124, S. 177* und 194* (30. Sept. und 7. Okt. 1944) «Die Berechnung der Betonauskleidung von Druckstollen».