

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 81 (1963)  
**Heft:** 27

**Artikel:** Neue Möglichkeiten zur wasserdichten Druckstollenauskleidung  
**Autor:** Wenzel, Klaus  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-66830>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 15.03.2025

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

## Neue Möglichkeiten zur wasserdichten Druckstollenauskleidung

Von Klaus Wenzel, Dr.-Ing., Baden

DK 627.842

### 2. Grossversuche

Nach den generellen Eignungsprüfungen in Laboratoriumsversuchen wurden die Stoffe, die eine erfolgreiche Anwendung als elastische Dichtungshaut versprochen, in mehreren Grossversuchen im Stollen erprobt. Der Zweck war einerseits die Prüfung des stofflichen Verhaltens der Dichtung unter stufenweise gesteigertem Wasserdruck und brüskten Entlastungen bei gleichzeitiger Messung der Deformationen der Stollenwandungen und der ständigen Kontrolle der Wasserverluste. Andererseits sollte die technische und wirtschaftliche Anwendungsmöglichkeit der Auskleidungsverfahren im Stollen erprobt werden.

Die Versuchsstollen waren nicht weit voneinander entfernt und lagen im gleichen Rofnagneis, so dass die Messergebnisse ohne weiteres miteinander vergleichbar sind.

Der anstehende Fels in den Stollen war mit 20 bis 30 cm Beton verkleidet. Zwischen Fels und Beton erfolgten am ganzen Umfang Kontaktinjektionen. Der Fels wurde danach noch mit den üblichen Hochdruckinjektionen konsolidiert.

Die Versuchsstollen wurden mit folgenden Dichtungsbälgen ausgekleidet: Kupfer-«Flexolite»-Folie; «Rhepanol»-Folie; Glasfaserarmerter Polyester. Die Auskleidung eines Probestollens mit «Sinmast» konnte im Rahmen des ersten Versuchsprogramms nicht mehr durchgeführt werden. Die Erprobung dieses Materials in einem Versuchsstollen ist für die nächste Zukunft vorgesehen.

Die auf jeden Fall niedrige Haftung der aufgeklebten Folien am Beton verlangten einen inneren Stützring aus Gunit oder Spritzbeton, um eine Zerstörung der Folie durch das Bergwasser bei entleertem Stollen zu verhindern. Diese Massnahme wurde sicherheitshalber auch für die Polyesterbeschichtung angeordnet.

#### a) Flexoliteauskleidung (Bild 14)

Der Versuchsstollen lag in unmittelbarer Nähe der Maschinenkaverne Ferrera. Da über diesen Versuch ein eingehender Aufsatz im nächsten Heft der Schweizer Bauzeitung folgt, wird hier auf diesen Bericht verwiesen. Um des Zusammenhanges willen sei nur mitgeteilt, dass die spezifischen Wasserverluste bei einem Druck von 80 kg/cm<sup>2</sup> nur 0,05 bis 0,010 l/s und 1000 m<sup>2</sup> benetzter Oberfläche betragen, also ausserordentlich gering waren.

Die Kosten für die im Jahre 1959 doppelagig verlegte

Kupfer-Flexolitefolie beliefen sich auf Fr. 40.20 pro m<sup>2</sup>, ohne die Kosten für den Gunitstrichring (Fr. 17.— pro m<sup>2</sup>) und die Nebenkosten für Gerüste, Energie usw.

#### b) «Rhepanol»-Folie

Zwei andere Versuchsstollen für die Erprobung der «Rhepanol»- (früher «Oppanol»-)Folie lagen gleichfalls in der Nähe der Maschinenkaverne Ferrera.

Der für den ersten Versuch im Jahre 1958 benutzte Versuchsstollen war 20 m lang, mit einem lichten Durchmesser von 3,60 m. Die Betonoberfläche der Felsverkleidung machte mit Ausnahme eines etwa 2 m<sup>2</sup> grossen Fleckens einen durchaus trockenen Eindruck. Die Betonverkleidung wurde mit einer alle Unebenheiten und Poren ausgleichenden Mörtelschicht versehen. Die 1 m breiten Kunststoffolien klebte man mittels eines Bitumenanstriches auf, der unmittelbar vor dem Verlegen und Andrücken der Folien auf den Auskleidungsbeton durch Gasflämmenerhitzer wiedererwärmt wurde (Bild 15). Die Stösse der einzelnen Bahnen überlappte man 5 bis 10 cm und verschweisste sie kalt mit Hilfe eines Lösungsmittels. Kurz nachdem der Stollen mit der Folie ausgekleidet war, löste sich diese an einigen Stellen wieder vom Beton und bildete wassergefüllte Blasen von 10 bis 30 cm Durchmesser. Diese wurden aufgeschlitzt und nach dem Herausdrücken des Wassers neu verklebt. Offenbar war die Oberflächenfeuchtigkeit der Betonverkleidung durch die Folie am Verdunsten verhindert, so dass sich die Blasen bildeten. Deshalb brachte man rasch den vorgesehenen inneren Betonstützring ein. Um ein Ankleben der Kunststoffolie an jenem zu verhindern und damit die freie Beweglichkeit an diesem Betonstützring zu gewährleisten, wurde zunächst nach den Erfahrungen aus dem Tunnelbau eine unbesandete Dachpappe auf die Folie geklebt und erst gegen diese der Stützring betoniert, teils als Beton hinter Schalung, teils als schichtweise aufgetragener Spritzbeton. Letzterer war wirtschaftlicher und technisch besser (Scheitelschluss). Die aufgeklebte Dachpappe erwies sich jedoch als ungeeignet. Sie bildete Wellen und Unebenheiten.

Bei den folgenden Abpressversuchen zeigte sich, dass es trotz aller Sorgfalt nicht gelungen war, die Folie vollkommen dicht zu verlegen. Schon bei verhältnismässig kleinen Drücken traten Wasserverluste in der Kammer auf, die etwa im Verhältnis der Drucksteigerung anwuchsen. Bereits bei

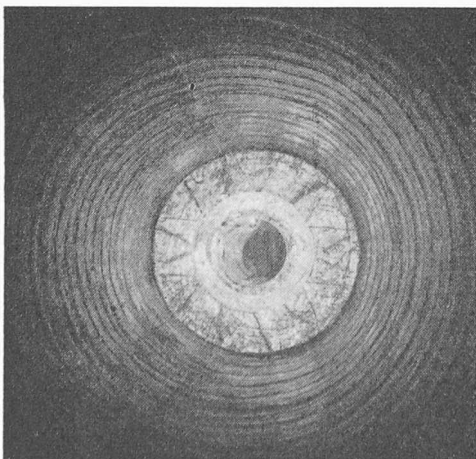


Bild 14. Versuchsstollen, mit Flexolitefolie ausgekleidet, Blick zum Mannloch

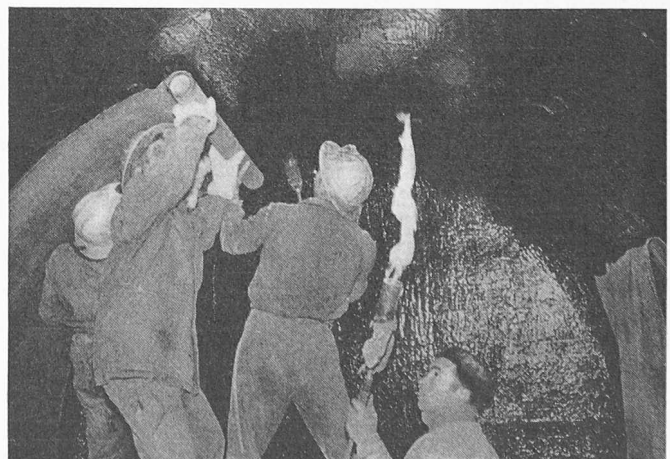


Bild 15. Aufkleben der Rhepanolfolie auf die bituminierte Stollenwandung

einem Innendruck von 36 kg/cm<sup>2</sup> waren die spezifischen Wasserverluste auf 1,8 l/s und 1000 m<sup>2</sup> angewachsen und damit zur Grösse der Leistungsfähigkeit der zur Verfügung stehenden Hochdruckpumpe angestiegen.

In einem anderen Versuchsstollen von 12 m Länge und 2,6 m lichtigem Durchmesser wurde im Jahre 1959 die Erprobung der gleichen Kunststoffolie unter Ausnutzung der Erfahrungen des früheren Versuchs wiederholt. Infolge der Verwendung einer Metallschalung war der 20 bis 30 cm dicke Auskleidungsbeton glatt genug, so dass man auf den Mörtelüberzug verzichten und auf den überall trocken erscheinenden Beton nach dem üblichen Voranstrich das Heissbitumen unmittelbar aufbringen konnte. Mit ihm klebte man eine 2 mm dicke Folienlage auf; diese erhielt wieder einen Heissbitumenanstrich, und darauf folgte eine zweite 1,5 mm dicke Folienlage, zur ersten versetzt. Anstelle der Dachpappe wurde diesmal ein weiterer Bitumenanstrich aufgebracht und besandet, um eine bessere Haftung mit dem folgenden inneren, 6 mm dicken Gunitmantel als Stützring zu erreichen. Den Innendruck im Abpressversuch steigerte man wiederum stufenweise um je 5 kg/cm<sup>2</sup> und hielt ihn einige Stunden konstant. Nach Erreichen von 30 kg/cm<sup>2</sup> und 50 kg/cm<sup>2</sup> wurde wieder entlastet. Der höchste erreichte Druck, den wiederum die Leistungsfähigkeit der Hochdruckpumpe bestimmte, betrug diesmal 76 kg/cm<sup>2</sup>. Die spezifischen Wasserverluste waren jedoch bereits bei sehr niedrigen Drücken so hoch, dass man die Folienauskleidung auch diesmal nicht als dicht bezeichnen konnte. Die Verluste hielten sich bis 25 kg/cm<sup>2</sup> mit 0,7 l/s · 1000 m<sup>2</sup> ziemlich konstant, sprangen beim Ueberschreiten eines Druckes von 30 kg/cm<sup>2</sup> auf 2 l/s · 1000 m<sup>2</sup> und beim weiteren Steigern des Druckes über 70 kg/cm<sup>2</sup> sofort auf das Doppelte, also 4 l/s · 1000 m<sup>2</sup>. Diese Sprünge standen zwar eindeutig mit ruckartigen Deformationen der Stollenwandung im Zusammenhang (Bild 16). Letztere blieben aber durchaus in der üblichen Grösse und zeigten am Ende 1,9 mm horizontale Durchmesserdehnung und 1,4 mm vertikale Zusammendrückung, entsprechend der Form eines liegenden Ovals (Einfluss der Felsschichtung).

Nach Entleerung der Versuchskammer zeichnete sich eine Schadenstelle deutlich ab, bei der offenbar durch undichte Stossnähte Wasser zwischen und hinter eine Folie eindringen konnte. Beim raschen Entleeren zeigte sich dann, dass der an dieser Stelle etwas zu dünne Gunitstützring dem Wasserdruck nicht standhielt. Die dadurch freiliegenden Folien hatten sich bis zum Reissen vorgebaucht. Sonst war nach Entfernen des Gunitmantels mit dem Auge keine Fehlerstelle erkennbar.

Das einwandfreie Zusammenschweissen der vielen Folienstösse ergab sich demnach als die schwache Stelle des Verfahrens. Es stellt bei sonst sehr guten Materialvoraussetzungen die Anwendung im Druckstollen in Frage, zumindest bis ein wirklich einwandfrei und wirtschaftlich arbeitendes Nahtprüfgerät entwickelt ist. Wie auf der Sondertagung für Kunststoffschweissen 1959 in Düsseldorf öfter zum Ausdruck kam, ist das Schweissen thermoplastischer Kunststoffe, zu denen das Polyisobutylen «Rhepanol» gehört, noch mit sehr viel Empirie und ungelösten Problemen behaftet.

Die Kosten der doppelt verlegten Rhepanolfolie betragen 1959 52.— Fr./m<sup>2</sup> ohne das Aufbringen des Gunitstützringes (rd. 17.— Fr./m<sup>2</sup>) und ohne Nebenkosten für Energie, Ventilation usw.

### c) Polyester-Beschichtung

Der Stollen für den Versuch mit Polyesterauskleidung mass 12,3 m in der lichten Länge und 2,60 m im inneren Durchmesser. Die Versuchsanordnung entsprach der bereits beschriebenen.

Auch bei diesem Verfahren ist eine trockene Betonoberfläche unerlässlich. Die Betonunterlage darf keine lokalen Unebenheiten aufweisen, die grösser sind als etwa die Schichtdicke, sie braucht aber keineswegs eben zu sein. Hierin liegt neben der Fugenlosigkeit und einfachen Anwendung ein weiterer grosser Vorteil gegenüber den fertigen Folien, die nur auf ebenen Flächen verlegt werden können. Abzweigungen und Anschlüsse bilden bei aufgespritzten

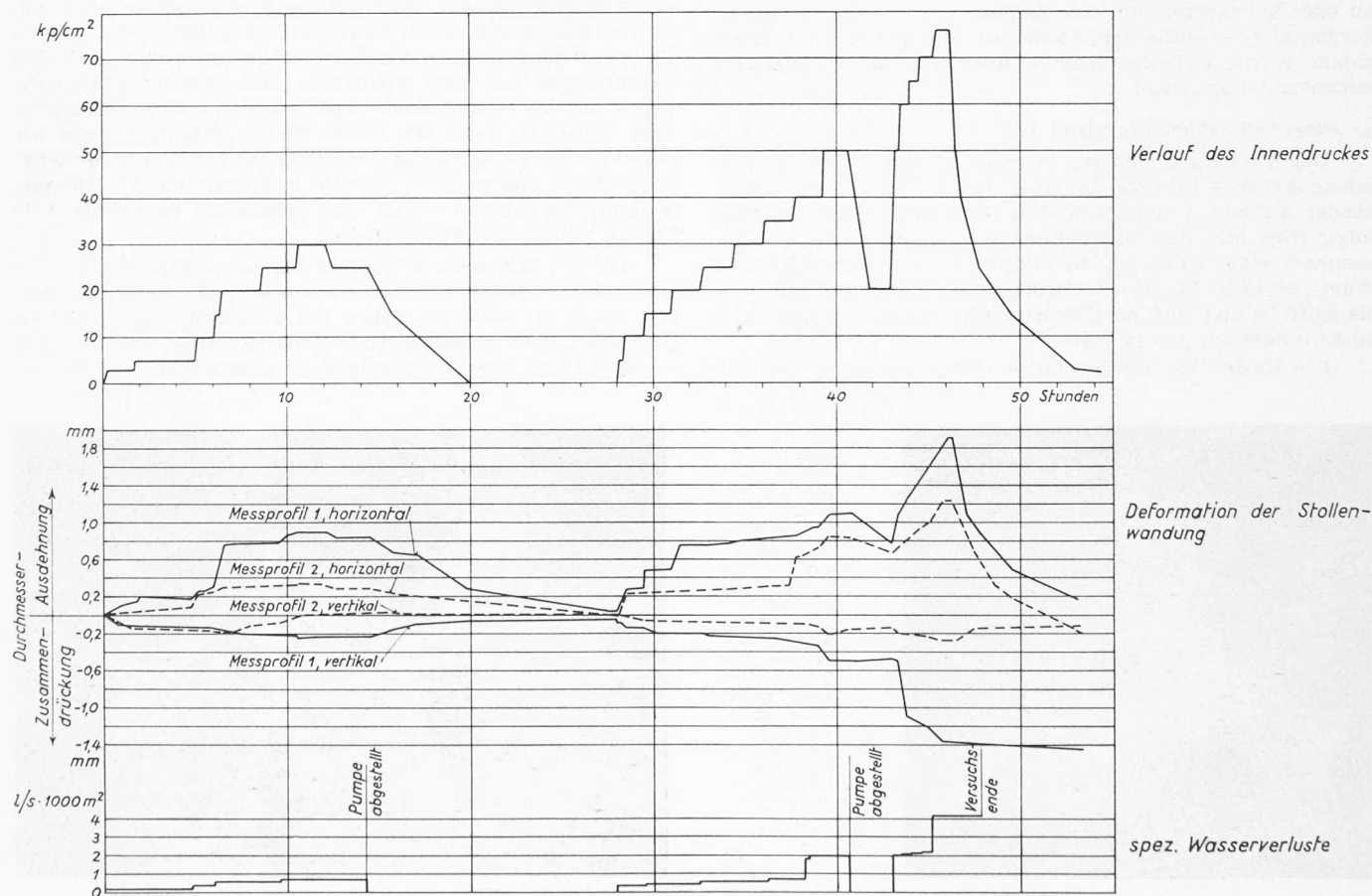


Bild 16. Messergebnisse beim Stollenabpressversuch mit Rhepanolfolie

Schichten keine Erschwernisse. Eine gute Stollenventilation ist unbedingt erforderlich.

Nach dem Aufspritzen einer Harzgrundierung folgte das Auftragen der glasfaserarmierten Polyesterschichten. Hierfür war von der Firma Aust & Schüttler, Düsseldorf, ein geeignetes Gerät entwickelt worden, mit dem die Motor-Columbus AG. erstmals 1959 einen Versuch zur Auskleidung eines Druckstollens unternahm.

Bei diesem Verfahren werden mittels Druckluft aus kleinen Druckkesseln zwei Harzkomponenten, ein mit einem «Beschleuniger» und ein mit einem «Katalysator» versetzter Anteil, durch Düsen einer Pistole auf den Auskleidungsbeton aufgespritzt, während steuerbar aus einer dritten Öffnung der gleichen Pistole die auf Längen von etwa 10 cm geschnittenen vorbehandelten Glasfasern herausfliegen und in das Harz miteingespritzt werden (Bild 17). Der Glasfasergehalt beeinflusst den Elastizitätsmodul und die Bruchdehnung und damit die Zug- und Schlitzdruckfestigkeit. Durch die Vorversuche war ermittelt worden, dass etwa 20 % Glasfasern für die Auskleidungszwecke am günstigsten sind: Die Beschichtung ist einerseits noch elastisch genug, um Risse gut zu überbrücken, andererseits steif genug, um nicht vom Wasserdruck in den Riss gedrückt zu werden. Der Glasfasergehalt und die Faserlänge kann durch entsprechende Geschwindigkeiten der Transport- und Messerwalzen im Schneidwerk des Gerätes variiert werden. Nach Vermischung der beiden Harzkomponenten vor der Pistolendüse beginnt die Erhärtung durch die mittels «Katalysator» ausgelöste chemische Reaktion. Die Reaktionszeit wird durch den «Beschleuniger» geregelt.

Zur Verdichtung der Harzglasfaser-schicht und zur besseren Durchtränkung der Glasfaser mit Harz wird die frische Schicht mit Lammfellrollen auf der Betonunterlage festgewalzt (Bild 18). Das Ueberkopfspritzen und Festrollen der Schichten im Stollenscheitel (Bild 19) machte nach Vorversuchen im Druckstollen der Gouggra-Kraftwerke keine Schwierigkeiten. Nach dem Festrollen der Schicht wurde diese mit einer Harzdeckschicht überspritzt und mit reinem Sand angeworfen, um eine bessere Haftung für den später aufgespritzten 5 bis 6 cm dicken Gunitring zu erhalten.

Die Solldicke der mehrlagig aufgetragenen Polyester-schicht war mit 3 mm festgelegt. Die Leistung pro Arbeitsschicht und Gerät betrug hierbei etwa 50 m<sup>2</sup>.

Nach dem Einbau von Messgebern zur Kontrolle der Stollenwanddeformationen nahm man den Abpressversuch vor, wiederum in Druckstufen von je 5 kg/cm<sup>2</sup> und 10 kg/cm<sup>2</sup> mit dazwischenliegenden Entlastungen auf Null. Die Stollen-deformationen blieben bis zu einem Wasserdruck von 20 kg/cm<sup>2</sup> ungefähr konstant (mittlere Durchmesserdehnung 0,3 mm) und nahmen später etwa im Verhältnis der Drücke zu (maximale Durchmesserdehnungen rd. 1 mm). Die Wasserverluste hielten sich anfangs bis 10 kg/cm<sup>2</sup> niedrig, stiegen jedoch bei 20 kg/cm<sup>2</sup> auf den Wert von 0,51/s · 1000 m<sup>2</sup> an. Bei den höheren Drücken wuchsen sie rasch an und er-

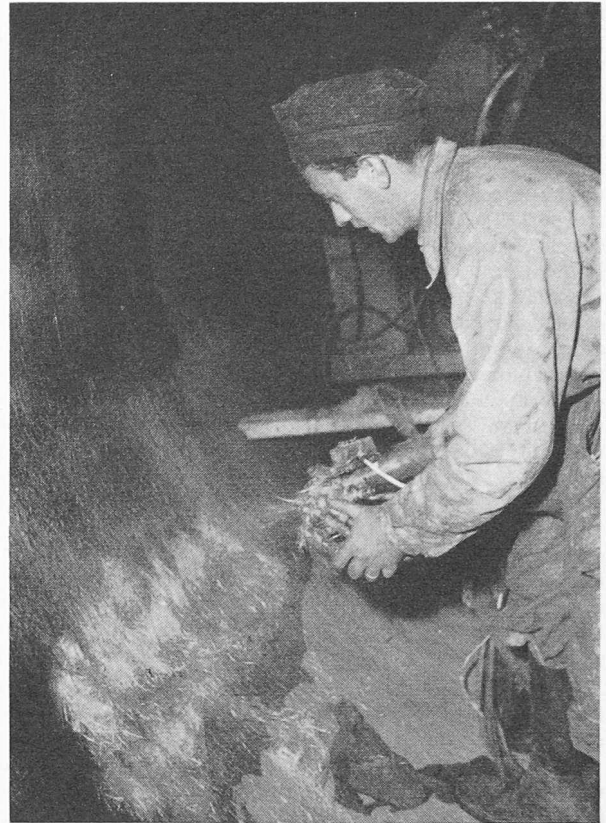


Bild 17. Aufspritzen des glasfaserarmierten Polyesters auf die Stollenwandung

reichten bei 56 kg/cm<sup>2</sup> Wasserdruck mit Verlusten von 4,2 l/s · 1000 m<sup>2</sup> die Leistungsgrenze der Pumpe. Interessant war jedoch, dass nach der Entlastung und Wiederbelastung am folgenden Tage auf 20 kg/cm<sup>2</sup> Innendruck die Wasserverluste nicht nennenswert grösser waren als zu Beginn des Abpressversuchs. Das zeigte, dass die Dichtungshaut zwar fehlerhaft war, aber während des Versuchs keine Zerstörung erlitten hatte.

Nach der sehr raschen Entlastung und folgenden Entleerung zeigte der Gunitstützring zahlreiche Längsspalten. Aus den Rissen trat kein Wasser aus. An einzelnen Stellen, an denen der Gunit nicht die geforderte Dicke aufwies, war er von der Wandung losgesprengt. An den sichtbar gewordenen Stellen lag der Polyesterbelag noch glatt an der äusseren Betonverkleidung, hatte sich aber, wie durch Abklopfen feststellbar, von der Unterlage gelöst. An einem herausgestemten Stück des Belages hing eine Betonschicht (Bild 5), was bewies, dass hier die Haftung des Belages am Beton grösser war als die Betonzugfestigkeit. Leider musste

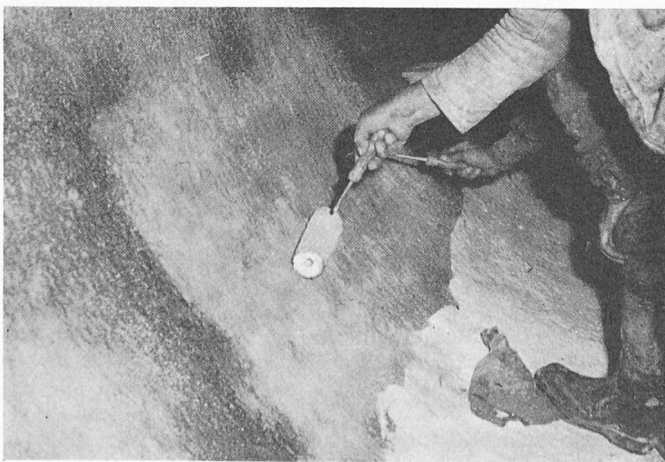


Bild 18. Festrollen der glasfaserarmierten Polyesterbeschichtung mit Lammfellrollen



Bild 19. Beschichtung mit glasfaserarmiertem Polyester im Stollenscheitel

man aber feststellen, dass die Solldicke der Schicht selten vorhanden und teilweise weniger als zur Hälfte eingehalten war. Herausgeschnittene Stücke des Belages waren porös und wasserdurchlässig.

Hier stellt sich das schon an den Vorversuchen erkennbare Problem der wirksamen Schichtdickenkontrolle. Verschiedene Firmen stellen heute betriebssichere Hochspannungs-Porenprüfgeräte her, die folgendermassen funktionieren: Eine Elektrode des Gerätes verbindet man mit dem durch seine Feuchtigkeit leitenden Unterlagsbeton und streicht mit der andern bürstenartigen Elektrode über die Oberfläche der Dichtungshaut. Poren oder zu dünne Beschichtung bewirken Funkendurchschläge, die entweder mit Glimmlampe oder einem «Monitor» angezeigt oder mittels angeschlossenem Zählgerät summiert werden können. Um die Brauchbarkeit eines derartigen Gerätes zu erproben, wurden an Polyester-Probekörpern die Funkendurchschläge und die Wasserdichtigkeit miteinander in Beziehung gebracht. Infolge der verschiedenen Schichtdicken zeigte eine Elektrodenspannung von 20 kV 1 bis 14 Durchschläge pro dm<sup>2</sup>. Die gleichen Beschichtungen, im Presstopf auf Wasserdichtigkeit geprüft, ergaben, dass nur die Beschichtungen mit 1 bis 3 Durchschlägen als praktisch wasserdicht angesprochen werden können. Diese elektrische Prüfmethode ist auf alle Fälle sicherer und einfacher als das Heraus-sägen von einzelnen Proben aus dem aufgetragenen Belag.

Zur Kontrolle der Schichtdicke allein genügt ein einfaches Gerät, bei dem eine Nadel die frische Beschichtung durchsticht und ihre Dicke misst.

Auch die Möglichkeit, die einzelnen Schichtenlagen etwa mit zwei Geräten, deren Harze verschieden eingefärbt sind, abwechselnd nacheinander aufzuspritzen, sowie die genaue Kontrolle des Materialverbrauchs für einen vorgezeichneten Abschnitt können ein Bild über die Schwankungen der Schichtdicke geben.

Die Kosten für den Quadratmeter glasfaserarmierten Belag von 3 mm Solldicke betragen 1959 53.50 Fr./m<sup>2</sup>. Ein Belag mit einer Solldicke von 4 bis 4,5 mm hätte etwa 70.— Fr./m<sup>2</sup> gekostet. In diesen Angaben sind, wie in den früher genannten, keine Nebenkosten eingerechnet.

## VI. Praktische Ausführungen

Auf Grund der gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse wurden auf Anregung der Motor-Columbus AG. verschiedene Auskleidungen mit der Flexolite-Kupferfolie und dem glasfaserarmierten Polyester für die Kraftwerke Hinterrhein AG.<sup>1)</sup> ausgeführt.

Die untere Wasserschlosskammer des Kraftwerkes Valle di Lei-Ferrera liegt im Rofnagneis. Der gesunde Fels zeigte zwei Hauptkluftsysteme. Meist handelte es sich zwar um sogenannte geschlossene Klüfte. Aber das Vorhandensein einzelner breiter Mylonitizonen und die Tatsache, dass der Felsverband beim Ausbruch mit Felsankern gesichert werden musste, mahnten hinsichtlich der Gewähr der Dichtigkeit einer nur betonverkleideten Kammer unter einem Druck von maximal 14 kg/cm<sup>2</sup> und der Gefahr einer Auswaschung durch Wasseraustritte an die relativ nahe Geländeoberfläche doch zur Vorsicht. Das gleiche galt für die Druckstollen-Endzone, vor Apparatekammer und Druckschacht. Aus diesem Grunde wurde eine wasserdichte Auskleidung vorgesehen.

Statt eine Stahlblech-Auskleidung oder eine Auskleidung mit Vorspannung anzubringen, beschloss man, die untere Wasserschlosskammer von 9 m Durchmesser und 100 m Länge und die Druckstollenendzone von 3,9 m Durchmesser und 250 m Länge, insgesamt rund 6600 m<sup>2</sup>, mit doppellagiger Flexolite-Kupferfolie von 0,1 mm Dicke auszukleiden und darüber einen inneren Betonschutzring von 30 bzw. 20 cm Dicke einzubringen. Die Arbeit wurde im Jahre 1960 ausgeführt und hat sich bisher bewährt.

Eine weitere Anwendung elastischer Dichtungen ergab sich bei der Auskleidung des Zuleitungsstollens (Durchmesser 2,50 bis 2,60 m) zwischen Ausgleichsbecken und Kavernenzentrale Ferrera der Kraftwerke Hinterrhein AG. Von

<sup>1)</sup> Beschreibung der Anlagen siehe SEZ 1957, Hefte 5 und 6, Seiten 65 und 79.

dem insgesamt etwa 1120 m langen Stollen, der meist dem Hang entlang führt und das Tal mit einer Trogbücke kreuzt, wurden 100 m mit der Flexolite-Kupferfolie in gleicher Art wie im Wasserschloss gedichtet, jedoch mit einem inneren Gunitring geschützt. Weitere 236 m wurden mit 3 mm dickem, glasfaserarmiertem Polyester beschichtet. In dieser Strecke liegt auch die talüberquerende Trogbücke aus ursprünglich nicht genügend wasserdichtem Stahlbeton.

Da auf diesen Strecken kein Bergwasserdruck zu befürchten war, konnte auf den Gunitstützring verzichtet werden. Auf diese Weise konnte der Belag bei der Polyesterbeschichtung kontrolliert werden. Ausserdem musste sich an der Aussenseite der Trogbücke der Effekt der Wasserdichtung durch die Polyesterbeschichtung zeigen. Die heikle Ueberbrückung der Fugen an den Brückenauflagern mit dem Polyester wurde von der Firma Isores S. A. mit Hilfe einer elastischen Grundsicht sehr gut gelöst. Die Arbeiten erfolgten im Jahre 1960. Nachher fand ein mehrtägiger Abpressversuch statt. Die angewendeten Drücke von etwa 3 kg/cm<sup>2</sup> waren gering. Dennoch hätten Fehler in der gerade an den gefährdeten Stollenstrecken angewendeten neuen Auskleidungsart sowohl in den gemessenen Wasserverlusten sich ausdrücken als auch an den Aussenflächen der Trogbücke offen zu Tage treten müssen. Die Wasserverluste betragen bei dem genannten Druck 0,116 l/s · 1000 m<sup>2</sup> als Mittelwert des ganzen, rund 1,1 km langen Stollens. Auch diese Anwendung der Auskleidung hat sich bisher bewährt.

## VII. Ergebnis, Kritik, weitere Entwicklung

Aus der grossen Anzahl von Isolations- und Abdichtungsstoffen, die auf dem Baumarkt erhältlich sind, wurden für den Zweck der wasserdichten elastischen Auskleidung von Druckstollen verschiedene Materialien ausgesucht und ihre Eignung zunächst in kleineren Versuchen im Laboratorium geprüft. Die an eine derartige Auskleidung gestellten Anforderungen sind sehr mannigfaltig. Ihre Erfüllung verlangt zum Beispiel in bezug auf das Verhältnis Elastizität zu Schlitzdruckfestigkeit und Haftfestigkeit zu freier Beweglichkeit bei der Rissüberbrückung die Einhaltung gewisser Kompromisse, die nur in grösseren Versuchsreihen bestimmt werden können. Die Eigenschaften der untersuchten Auskleidungstoffe und ihre Eignungsprüfung wurden näher beschrieben.

Bei den Erprobungen in den Versuchsstollen zeigten sich erwartungsgemäss die Schwierigkeiten und Fehlermöglichkeiten in der Ausführung am Bauwerk. Zu einer ersten praktischen Anwendung gelangten nur zwei Stoffe, bei denen nun die Fehler aus den gewonnenen Erfahrungen vermieden und Schwierigkeiten überwunden werden konnten.

Die *Folien* haben die Vorteile des Fertigprodukts: Die gleichmässige Stoffqualität, die leicht anhand von Probestücken kontrolliert werden kann, und die gleichmässige Schichtdicke. Gewisse Schwierigkeiten sind bei der Verarbeitung zu überwinden. Die Aufbringung der Folien ist wegen der vielen notwendigen Arbeitsgänge umständlich. Die zahlreichen Stossüberlappungen bilden mögliche Fehlerquellen.

Selbst wenn der Grossversuch und die erste Anwendung der Flexolitefolie eine sehr gute Wasserdichtigkeit ergaben, so zeigt der Versuch mit der Kunststoffolie bei einer Kaltverschweissung der Folienstösse, trotz Wiederholung des Versuchs und entsprechender Sorgfalt der Firma, das Risiko bei derartigen Auskleidungen an. Ferner haben die Folien gegenüber den Beschichtungen eine geringere Anpassungsfähigkeit an Querschnittsänderungen, Krümmungen oder Abzweigungen im Stollen, die ein sehr zeitraubendes Zerschneiden und Ueberlappen der Folien bedingen. Die Verlegeleistung einer Gruppe betrug pro Schicht im Mittel etwa 20 m<sup>2</sup>. Der gegen den Bergwasserdruck und gegen eine Verletzung der Folie notwendige Gunitstützring hatte nicht immer die ausreichende Dicke, so dass der Aussenwasserdruck bei den Stollenentlastungen diese an den zu dünnen Stellen und damit auch die dahinter liegende Folie zerstörte. Eine Kontrolle der Schichtdicke des Gunits durch häufige Schichthöhenmarken ist daher notwendig.

*Beschichtungen* haben den Folien gegenüber manchen Vorteilen. Sie bilden eine kontinuierliche Haut und lassen sich

ohne Schwierigkeit auch auf unebene Flächen, wie z. B. eine Gunitfelsverkleidung, auftragen; Rigolen, Abzweigungen (scharfe Kanten und Kehlen etwas ausrunden!) können mit der Beschichtung ohne besonderen Mehraufwand überzogen werden. Die Tagesleistung war etwa doppelt so hoch wie beim Verlegen von Folien. Doch werfen die Beschichtungen eine Anzahl neuer Probleme auf. Da für die aufzutragenden Beschichtungen jedenfalls nur Stoffe auf Kunstharzbasis in Betracht kommen, und auf diesem Gebiet eine sich überstürzende Entwicklung zu erkennen ist, muss der projektierende Ingenieur schon bei der Materialauswahl über eine gewisse Stoffkenntnis verfügen, denn die Fabrikanten überblicken die baulichen Anforderungen und die technischen Möglichkeiten kaum genügend. Man muss sich zumindestens klar sein, auf welche massgebenden Punkte bei der Wahl zu achten ist. Zwischen gleichlautenden chemischen Bezeichnungen gibt es für bauliche Zwecke entscheidende Unterschiede. Es gibt Polyester, die flüchtige Stoffe enthalten und deshalb nie dicht werden. Dazu können sie ein sehr grosses Schrumpfmass aufweisen und ihre mechanischen Eigenschaften nach einiger Zeit ungünstig ändern. Es gibt Epoxyde, die nicht wasserbeständig sind, usw. Besondere Vorsicht gilt auch hier den auffallend billigen Produkten, die oft nur auf dem Weg der Verdünnung entstehen. Auf Vorversuche sollte man nie verzichten.

Ein weiteres Problem bildet bei den Beschichtungen die Einhaltung einer bestimmten Schichtdicke. Sie ist aber unbedingte Voraussetzung einer erfolgreichen Anwendung der Beschichtung. Einige Kontroll- und Prüfverfahren und ein Kriterium der Schichtdichtigkeit bei Benutzung eines Hochspannungs-Prüfgerätes wurden bei der Beschreibung des Polyester-Grossversuchs geschildert.

Hinsichtlich der praktischen Verarbeitung der Beschichtungsmassen gaben schon die geschilderten Laboratoriumsversuche gute Hinweise. Mehrlagige Anstriche dünnflüssiger Materialien sind zeitraubend, ein Aufspachteln von zäh-viskosen Pasten kommt wegen noch geringerer Tagesleistung nicht in Frage. Ferner besteht die Gefahr, dass beim Verstreichen zäh-viskoser Pasten Luftblasen eingeschlossen werden, die unter Wasserdruck die Beschichtung zerstören. Andererseits rinnen zu flüssige Massen nach dem Auftrag an Wänden bartartig herunter oder tropfen fadenziehend vom Ueberkopfauftrag ab. Es kommen daher nur spritzbare oder in wenigstens 1 mm Schichtdicke streichbare Harze in Betracht, die sich möglichst rasch nach dem Auftragen an der Betonauskleidung versteifen.

Bei der Ausführung fugenloser Polyesterbeläge ist eine gewisse Vorsicht geboten, da sowohl das Schwindmass wie der Wärmeausdehnungskoeffizient dieses Stoffes grösser als der des Betons ist. Die sich in der Literatur findende Angabe eines Schrumpfmasses von Polyester von 8 bis 10 % bezieht sich allerdings auf den Volumenschwund. Schichtweise aufgetragenes Polyester schwindet infolge der Behinderung durch die Haftung auf der Unterlage hauptsächlich in Richtung der Schichtdicke [3]. Der Wärmeausdehnungskoeffizient von Polyester hängt von seinem chemischen

Aufbau und seinem Glasfasergehalt ab und ist entsprechend zwei- bis viermal grösser als der des Betons. Temperaturwechsel und Schwinden erzeugen daher unter Umständen beträchtliche Schubspannungen in der Grenzfläche Polyester-Beton. Sie werden aber durch das elastische Verhalten und durch ein gewisses Kriechen des Polyesterbelages teilweise abgebaut. Daher haftet eine einwandfrei aufgetragene fugenlose Polyesterbeschichtung gut auf der Betonunterlage, wie die praktischen Ausführungen zeigten. Da jedoch die Bruchdehnung des Polyesters gering ist und sich der Belag bei einer Rissüberbrückung von der Betonunterlage löst, muss man bei möglichem Auftreten von Bergwasserdruck auch für die an sich gut haftende Polyesterbeschichtung einen Gunitstützring anordnen.

Ob bei dem doppelschichtigen Sinmast-Belag auf einen Gunitstützring verzichtet werden kann, wird der vorgesehene Grossversuch zeigen. Bei der guten Haftung des Sinmast-Belages auch auf wassergetränktem Beton ist es immerhin möglich, dass der Bergwasserdruck die Harzschicht zusammen mit der anhaftenden Betonschicht absprengt. Die Oberfläche des hinter der üblichen Metallschalung eingebrachten Auskleidungsbetons besteht meist aus wenig fester Zementschlemme. Ein zweischichtig nach Bild 8 ausgeführter, 3 mm dicker Dichtungsbelag würde laut Offerte 1963 65.— Fr./m<sup>2</sup> kosten. Er ist also heute kaum teurer als andere Kunststoffbeschichtungen und bei möglichem Fortfall des Gunitüberzuges jedenfalls billiger.

Die Entwicklung der wasserdichten, elastischen Stollenauskleidungen wird wohl zu den nahtlosen Beschichtungen führen, die auf den Beton der Felsverkleidung aufgetragen werden. Die Kunststoffe bieten dafür, wie sich zeigte, gute Möglichkeiten. Im Hinblick auf die Tatsache, dass die Auskleidungen mit Stahlblech gegenüber einer elastischen Dichtungshaut einschliesslich Gunitstützring um wenigstens 50 % teurer und im Unterhalt nicht billiger sind, lohnt jedenfalls die Weiterverfolgung der gezeigten Wege. Pionierarbeit schliesst Risiko und auch Rückschläge ein, aber die Anfangsschwierigkeiten konnten nach einigem Lehrgeld überwunden werden, und erste, vorsichtige Anwendungen waren erfolgreich. Diese Ausführungen sollen zur Weiterentwicklung der elastischen Dichtungsbeläge im Sinne eines technischen und wirtschaftlichen Fortschrittes im Druckstollenbau anregen.

#### Bibliographie

- [1] J. Stini, Geologische Grundlagen des Tunnelbaus, «Fortschr. und Forschung im Bauwesen» 1944, Reihe A, H. 13.
- [2] A. Hutter und A. Sulser, Beitrag zur Theorie und Konstruktion gepanzerter Druckschächte, «Wasser- und Energiewirtschaft» 1947, H. 11 und 12.
- [3] G. Blunk, Verwendung von Kunststoffen im Beton- und Stahlbetonbau, «Umschau» 1962, H. 5.
- [4] F. Pilny, Stand der Kunststoffanwendung in der Bautechnik, «Bauingenieur» 1959, H. 4.
- [5] K. Ney und J. Postl, Sinmast, ein Kunstharz für die Baustelle, «Bauingenieur» 1962, H. 12.

Adresse des Verfassers: Dr.-Ing. Klaus Wenzel, bei Motor-Colombus AG, Baden AG.

## Transportrationalisierung durch kombinierten Verkehr

DK 565.9

Der grösstmögliche Rationalisierungseffekt im Transportwesen kann immer nur dann erzielt werden, wenn es gelingt, eine ununterbrochene Transportkette mit mechanisch behandelbaren Ladeeinheiten herzustellen. Diese Transportkette soll möglichst weit in die Betriebe von Versendern und Empfängern hineinreichen. Ladeeinheiten sollen zugleich Transport- und Lagereinheiten sein. Eine solche Verbindung des innerbetrieblichen und zwischenbetrieblichen Transports wird kombinierter Verkehr genannt. Die Mittel, derer man sich dabei bedient, wie zum Beispiel Paletten und Behälter, sind Medien des kombinierten Verkehrs und als solche dem Gedanken der ununterbrochenen Transportkette stets untergeordnet. Wirtschaftliche Vorteile einer Transportkette wirken sich für Verloader und Verkehrsträger stark aus, wenn sich alle beteiligten Glieder auf gleiche Ladeeinheiten einigen. Das

wiederum setzt ein gewisses Partnerschaftsdenken voraus. Die Bereitstellung für die Fertigung und der Vertrieb in der Marktwirtschaft diktieren bereits heute eine Transportrationalisierung in diesem Sinne. Die Studiengemeinschaft für den kombinierten Verkehr e. V., Frankfurt/Main, beschäftigt sich mit der Erforschung zahlreicher Fragen, die sich aus der Entwicklung des kombinierten Verkehrs ergeben. Sie führt ihre Forschungsarbeiten in enger Zusammenarbeit mit Verkehrsträgern, Herstellern von Fahrzeugen und Fördermitteln, der Verladerschaft durch eigene Kräfte sowie zusammen mit bekannten Industrieberatern und in Arbeitsgemeinschaften aus. Die Ergebnisse werden in der Schriftenreihe «Transportkette», Forschungsberichte der Studiengesellschaft für den kombinierten Verkehr e. V., im VDI-Verlag, Düsseldorf, veröffentlicht. Die beiden ersten Hefte sind soeben er-