
Erfahrungen mit einschaligen Spritzbetonverkleidungen bei Tunnelanierungen in der Schweiz

SINGLE-SHELL SHOTCRETE LININGS USED IN TUNNEL REPAIR IN SWITZERLAND

ALEX SALA

In der Schweiz liegt das Durchschnittsalter der Bahntunnels bei 80 Jahren. Viele davon befinden sich in einem schlechten Zustand. Sie sind deshalb sanierungsbedürftig, weil ihnen das Bergwasser, der Frost und manchmal auch der anhaltende Gebirgsdruck zugesetzt hat oder weil sie zu eng sind.

Wenn die Profilverhältnisse knapp sind, werden die alten, meist gemauerten Gewölbe abgebrochen und durch einschalige Spritzbetonverkleidungen ersetzt. Diese müssen oft unter Betrieb und damit unter erschwerten Bedingungen eingebracht werden. Was das insbesondere für die Spritzbetonarbeiten bedeutet und wie sich dies auf deren Qualität auswirken kann, wird an einigen Beispielen gezeigt.

Auch die geforderte Wasserdichtigkeit wird nicht immer erreicht. Spezielle Betonrezepturen und konstruktive Massnahmen, neu entwickelte Drains und Formstücke sollen helfen, das Ziel zu erreichen.

Railway tunnels in Switzerland are on average about 80 years old. Many of them are in a bad state of repair. They are in need of rehabilitation as a result of the damage done by underground water, frost and - in some places - persistent ground pressure, or simply because the tunnels are too narrow.

If cross-sections are small, the old masonry is torn down and replaced by single-shell shotcrete linings. The sprayed concrete often has to be applied while tunnels are in operation. What such difficult conditions mean in particular for shotcrete work and how all this may affect quality will be shown by means of a few examples.

The requirements in terms of watertightness cannot always be met. Special concrete mix designs and structural measures, newly developed drains and fittings are designed to overcome this problem.

1. Einleitung

In der Schweiz sind rund 170 km Nationalstrassentunnels in Betrieb. Die Schweizerischen Bundesbahnen nutzen 255 Tunnels mit einer Gesamtlänge

von 205 km. Bei den Schweizerischen Privatbahnen sind weitere 425 Tunnels mit einer Gesamtlänge von nochmals 103 km in Betrieb. Dies ergibt total 478 km Tunnel. Der Ausdruck "Tunnelland Schweiz" ist sicher berechtigt.

Mit dieser stolzen Zahl Tunnels sind heute aber grosse Probleme behaftet. Das Durchschnittsalter der Bahntunnels liegt zur Zeit bei 80 Jahren, wobei der älteste noch in Betrieb stehende Tunnel bereits 1856 eröffnet wurde. Die Autobahntunnels sind im Mittel lediglich 25 Jahre alt. Bei diesen führt jedoch die Beanspruchung durch Motorfahrzeuge und der Salzeintrag zu Schäden.

Die Aussagen des Referates beschränken sich hauptsächlich auf die meist einspurigen Tunnels der Schweizerischen Privatbahnen.

2. Tunnelzustand

Woran leiden die alten Bahntunnels in der Schweiz?

Ganz einfach: an akuter Altersschwäche und an zu kleinem Profil (Bild 1). Die meisten Schweizer Bahn-



Bild 1: Enge Profilverhältnisse

tunnels sind mit Natursteinen oder Tunnelsteinen ausgemauert. Vereinzelt sind auch schon unbewehrte Ortbetonschalen oder Kombinationen von verschiedenen Materialien verwendet worden.

Bis in die dreissiger Jahre dieses Jahrhunderts wurden die Bahnstrecken mit Dampf betrieben. Dies hat dem Fugenmörtel oder dem Beton der Tunnelverkleidung ähnlich stark zugesetzt, wie es heute die Autoabgase bei den Strassentunnels tun. Bergwasser und Frost schwächen das Tunnelgewölbe durch Zersetzung des Fugenmörtels zusätzlich (Bild 2).

Das eindringende Gebirgswasser führt nicht selten gelöste Mineralstoffe (Calcium, Sulfate etc.) mit. An der Tunnelinnenseite der Verkleidung verdunstet das Wasser. Dies führt zu einer Mineralstoffanreicherung in den obersten Zentimetern der Verkleidung und zu einem entsprechendem Kristallisationsdruck, was Abplatzungen zur Folge haben kann (Bild 3).



Bild 2: Mörtelschäden



Bild 3: Abplatzungen im Ortbeton

Diese Umwelteinflüsse verschlechtern den Ausbawiderstand zusehends.

Bis in die Fünfzigerjahre verwendeten die Tunnelbauer zur Vortriebsicherung Holzeinbauten, welche mittlerweile verfault sind und deshalb das Gebirge nicht mehr tragen. Dieses lastet nun auf dem geschwächten Ausbau. Mit steigender Belastung reduziert sich die Tragsicherheit des Ausbaus, was die Betriebssicherheit gefährdet.

Zudem wird dadurch die "natürliche" Drainage zerstört, die hinter dem Mauerwerk durch unsorgfältige Hinterfüllung bestand. Diese fehlende Drainage führt dann dazu, dass sich ein Wasserdruck aufbauen kann. Dadurch kann Bergwasser durch die beschädigten Mauerwerksfugen eintreten, was zu Vernässungen des Bahnkörpers und zu Eisproblemen in Portalnähe führen kann.

Steigende Raumbedürfnisse der modernen Bahn mit leistungsfähigeren Loks, Panoramawagen und Huckepackverkehr verursachen durch grössere Achslasten mehr Erschütterungen und erfordern

grössere Lichtraumprofile. Höhere Ausbaugeschwindigkeiten verlangen gestrecktere Linienführungen oder - bei gleichbleibenden Radien - die Verbreiterung des Lichtraumprofils aus kinematischen Gründen. Zusätzliche Transit- oder Werkleitungen brauchen mehr Platz.

Oft reicht es, wenn die Sohle abgesenkt wird und/oder das Profil in den drei kritischen Bereichen

- Stromabnehmer
- obere Ecke des Wagenkastens
- Paramentfuss

aufgeweitet wird. Dazu gibt es heute sehr präzise geführte Fräsen, mit denen mit einer Genauigkeit von einem Zentimeter der notwendige Platz geschaffen werden kann.

Reicht dies nicht, gibt es zwei Möglichkeiten:

- Abbruch der bestehenden Verkleidung und Verkleidungseratz
- Aufbringen einer Dünnschichtverkleidung (≤ 30 mm)

Die Dünnschichtverkleidungen enthalten Probleme, die in einem separaten Referat behandelt werden könnten. Mit der Dünnschichtverkleidung wird wohl eine vorübergehende Abdichtung und Konsolidierung des Ausbaus erreicht und allenfalls noch eine Versiegelung der Verkleidungs Oberfläche zur Verhinderung weiterer Verwitterung, aber keine dauerhafte Sanierung eines Tunnels.

Und hier beginnt schon das erste Problem. Was wird unter einer "dauerhaften Sanierung" eines Tunnels verstanden?

3. Sanierungskonzept

Der Bauherr investiert in die Sanierung eines Tunnels viel Geld, welches er lieber in attraktives Rollmaterial stecken möchte. Er erwartet deshalb, mit dem sanierten Tunnel die nächsten hundert Jahre keine weiteren Probleme mehr zu haben. Die Nutzungsziele der Sanierung sind deshalb vor Inangriffnahme des Sanierungskonzeptes mit dem Bauherrn zu vereinbaren. Am besten wird das Resultat dieser Abmachungen als Basis für die weitere Projektierung in einem Nutzungs- und Sicherheitsplan festgehalten.

Als weitere unabdingbare Voraussetzung für ein gutes Sanierungskonzept muss der Ist-Zustand des zu sanierenden Bauwerks möglichst umfassend bekannt sein. Dazu gehören mindestens die folgenden Angaben:

- Bestehende Profilverhältnisse

- Gleislage
- Auskleidungsart
- Stärke der Auskleidung und des Bahnoberbaus
- Zustand der Auskleidung und Hinterfüllung
- Geologie
- Schadensbild
- Schadensanalyse
- Wassereintritte (Anzahl und Intensität)
- Wasserchemismus
- Temperaturbedingungen

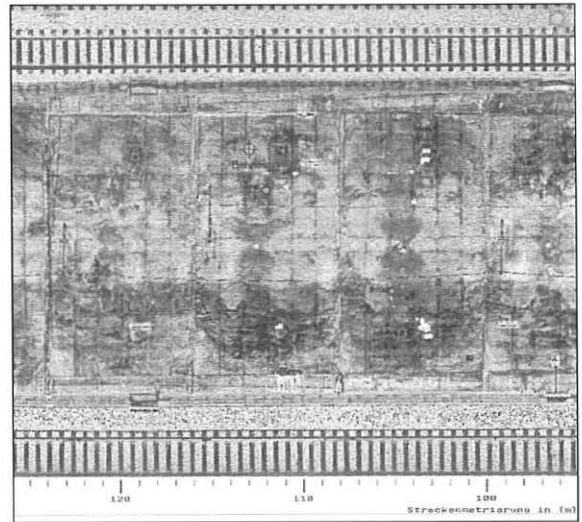


Bild 4: Sichtbares Bild einer Scanner-Aufnahme

Wichtig und oft massgebend sind auch die betrieblichen Anforderungen während der Sanierung.

Mit diesen Angaben kann nun ein Sanierungskonzept erarbeitet werden. Oft gleicht diese Aufgabe der Quadratur des Kreises.

4. Besonderheiten der Ausführung

Bis auf wenige Ausnahmen kann der Bahnbetrieb während der Sanierung nicht unterbrochen werden, d.h. die Sanierung ist in der nächtlichen Betriebspause durchzuführen. Am Morgen nach einer zehn- bis zwölfstündigen Schicht muss der Tunnel wieder mit den fahrplanmässigen Zügen befahrbar sein. Daraus ergibt sich unter anderem, dass als Sicherungs- und Verkleidungsmittel wegen der platzver-sperrenden Schalung nur in Ausnahmefällen Ort-beton verwendet werden kann. Es bleibt in den meisten Fällen nur der Einsatz von Spritzbeton.

Das Aufweiten eines baufälligen Tunnels durch Abbrechen der schadhafte Verkleidung kann unter Betrieb nur in kleinen, kurzen Etappen erfolgen. Wir haben schon erlebt, dass solche Etappen mit 60 bis 80 cm Länge trotz vorseilender Verfestigungs-

massnahmen mit Polyurethan-Injektionen in Querrichtung noch unterteilt werden mussten.

In der Regel sind aber die Angriffsetappen einen bis zwei Meter lang. Oft sind aus Sicherheitsgründen oder zur Gebirgsverbesserung Felsanker nötig.



Bild 5: Anpassbare Gitterträger

Stahleinbau in Form von speziell für diesen Zweck entwickelten, anpassbaren Gitterträgern oder ausfahrbaren Thyssen-Heinzmann-Profilen wird in schwierigen Gebirgsverhältnissen oder bei nicht ankerfähigem Gebirge eingesetzt. Damit wird ein sofort tragendes Element eingesetzt. Wir bauen in der Schweiz die aus dem Bergbau stammenden TH-Profile "verkehrt" ein, d.h. mit der Öffnung zum Tunnel hin. Dadurch lassen sie sich besser einspritzen. Dieser Bereich ist zudem sehr anfällig auf Risse, wie die Erfahrung gezeigt hat, insbesondere wenn unsorgfältig gearbeitet wurde oder wenn die Bögen mit zuwenig bewehrtem Spritzbeton überdeckt wurden.

Um tagsüber einen sicheren Bahnbetrieb zu garantieren, ist die frisch aufgeweitete und mit Ankern oder Stahlbögen gesicherte Etappe zusätzlich mit schnellbindendem Trockenspritzbeton zu sichern. Es werden dazu je nach Objekt Fertigprodukte oder spezielle Baustellengemische verwendet. An diese werden die folgenden Anforderungen gestellt:

- Verwendung von alkalifreien Beschleunigern (Arbeitshygiene; Versinterung)
- Druckfestigkeit nach 4 Stunden:
mind. 2 N/mm^2 bei 20°C
- Druckfestigkeit nach 24 Stunden:
mind. 10 N/mm^2 bei 20°C
- Druckfestigkeit nach 28 Tagen:
mind. 30 N/mm^2

Das Erreichen dieser Vorgaben stellt in der Regel kein Problem dar. Zwingend sind jedoch auch hier

Vorversuche zur Festlegung der geeigneten Rezeptur und zur Ermittlung der Steuergrößen für die laufende Qualitätskontrolle durch den Unternehmer.

Sobald Wasser nicht nur diffus, sondern tropfend oder fliessend austritt, muss es gefasst und abgeleitet werden. Dies erfolgte bisher mittels Kunststoffhalbschalen, welche zum Teil auf phantasievolle Art und Weise befestigt wurden. Da gibt's Metall-dorne, welche durch die Flanken der Drains in ein vorgängig erstelltes Bohrloch eingeschlagen und im schlechtesten Fall so umgebogen werden, dass sie gleich die Hälfte des Halbschalenquerschnitts wieder schliessen.

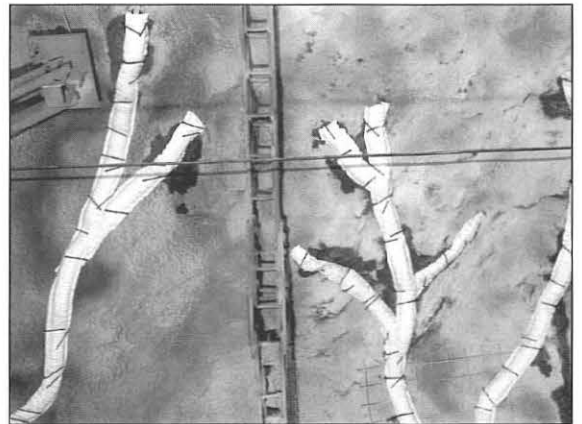


Bild 6: Drains mit Stahlbügel befestigt

Man findet Hilti-Schussdübel mit grossen Unterlagscheiben oder schnellbindenden Zementmörtel und viele andere Variationen. Oft wird dann beim Über-spitzen noch mit zuviel Druck gearbeitet, so dass dünnwandige Drains perforiert werden. Solche Drains sind undicht, weshalb noch während der Gewährleistungsfrist Feuchtstellen auftreten, die es zu beheben gilt. Ich nehme an, dass Sie mit ähnlichen Problemen und Unzulänglichkeiten zu kämpfen haben.

Aus diesem Grunde begrüssen wir sehr, dass eine Schweizer Firma dieses alte Problem nun mit einem neuartigen Entwässerungssystem gelöst hat.

Auf dem Bild 7 ist eine Auswahl der neuen Produkte, die auf einem ausgeklügelten Baukastensystem basieren und von Praktikern entwickelt wurden, dargestellt. Dies zeigt zum Beispiel auch das Formstück, welches bei undichten Ankerköpfen zum Einsatz gelangen kann. Zudem werden auch Drains angeboten, die auf die spezifischen Bedürfnisse von Sanierungen abgestimmt sind. Diese rechteckförmigen Profile werden in nachträglich gefräste Schlitzte geklemmt und können mit Spülöffnungen versehen

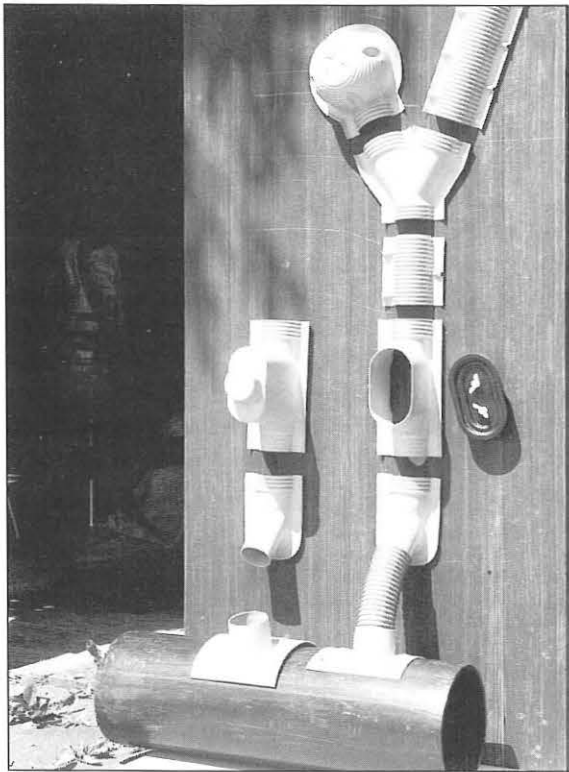


Bild 7: Alle Fromstücke der neu entwickelten Drains

werden, welche erstmals einen sinnvollen Unterhalt der Drains ermöglichen.

Oft werden Wassereintritte, insbesondere bei oberflächennahen Tunnels in Trockenperioden, nicht erkannt. Tropfstellen treten erst später auf. Im Zuge des weiteren Ausbaus ist dieses Bergwasser jedoch mit grosser Sorgfalt zu fassen und abzuleiten. Je nach Wasserchemismus, d.h. je nach dem, wie stark die Drains zur Versinterung neigen, können neuerdings auch spülbare Drains eingesetzt werden.

Notfalls kann auch zum vornherein eine Wasserkonditionierung (Härttestabilisation) eingebaut werden. Diese mit einem gewissen Wartungsaufwand verbundenen Anlagen arbeiten heute grösstenteils störungsfrei und überzeugen durch ganz erstaunliche Resultate. Mit nur wenigen Tropfen pro Minute dieser Stabilisierungsmittel gelingt es heute, die jeweils nach wenigen Monaten bereits zugesinterten Drainageleitungen frei von Kalkablagerungen zu halten.

Diffus auftretendes Wasser wird zurückgedrängt und erfordert eine dichte Spritzbetonverkleidung. Dichten Spritzbeton herzustellen gehört heute zum Stand der Technik. Ein dichtes Bauwerk herzustellen

allerdings noch nicht, wie wir selber feststellen mussten.

5. Verwendete Spritzbetone

In der Schweiz wird dichter Spritzbeton bei Tunnel-sanierungen meist im Trockenspritzverfahren hergestellt, weil pro Schicht nur geringe Mengen verarbeitet werden können und innerhalb eines Sanierungsobjektes aus Zeitgründen an mehreren Arbeitsstellen parallel gearbeitet wird, was eine leichte und flexible Ausrüstung voraussetzt.

Die Verwendung von Siliziumstaub ist heute in der Schweiz üblich.

In Bezug auf die Applikation im Ausgangsgemisch werden zwei Wege besprochen:

1. Einsatz von sog. Tunnelzement, bei dem Mikrosilika mit einer Dosierung von ca. 5 % ab Werk beigemischt ist
2. Zudosierung von 10 % flüssigem Mikrosilika auf der Baustelle

Beide Mischungen werden mit weiteren Zusatzmitteln, wie Abbindebeschleuniger und/oder Staub-binder, den spezifischen Anforderungen angepasst.

Mit derlei hergestellten Mischungen haben wir in den vergangenen fünf Jahren auf unseren Sanierungsbaustellen die folgenden Werte erzielt (Tabelle 1), wobei es sich immer um den Durchschnittswert pro Baustelle handelt. Zu beachten ist, dass in der Schweiz bei Druckfestigkeitsuntersuchungen das Mittel aus fünf Bohrkernuntersuchungen einen Einzelwert ergibt.

Wenn man diese Werte sieht, könnte man sich eigentlich beruhigt zurücklehnen. Trotz dieser Resultate haben wir Sorgen mit der Dichtigkeit einzelner Bauwerke.

6. Probleme

Auf dem *Bild 8* ist ersichtlich, dass am sanierten Rufenen-Tunnel trotz netzbewehrtem Verkleidungsspritzbeton Risse mit Weiten zwischen 0.1 und 0.3 mm aufgetreten sind, durch die in vielen Fällen Wasser eintritt.

Der Spritzbeton wurde in einer gut konzipierten, gegen Witterung geschützten Aufbereitungsanlage auf dem Installationsplatz hergestellt. Es wurden folgende Rezepturen von einer ausgewiesenen Fachfirma angewandt:

Sofortsicherung: Sika Rock-Shot 3

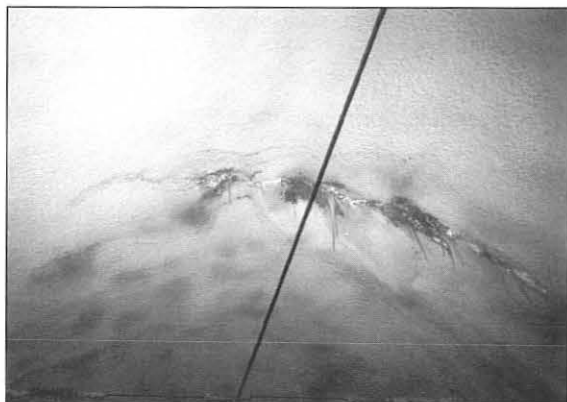


Bild 8: Risse im frisch sanierten Rufenen-Tunnel

Sicherungsspritzbeton: 350 kg Portlandzement auf 1000 l erdfeuchte Zuschlagstoffe, 5 % Beschleuniger SIKA Sigunit 49 AF (alkalifrei)
 Verkleidungsspritzbeton: 350 kg Portlandzement auf 1000 l erdfeuchte Zuschlagstoffe, 5 % Mikrosilika SIKA PP1 TU

Damit wurden die in Tabelle 1 dargestellten, ausgezeichneten Resultate erzielt.

Nun, welches sind wohl die Gründe dieser vielen Risse? An der Spritzbetonqualität kann es nicht gelegen haben.

Der rund 300 m lange Tunnel liegt 1750 m ü.M. und weist eine Steigung von rund 10 % auf. Die Sanierung wurde 1994 und 1995 während 130 nächtlichen Betriebspausen ausgeführt. Die Bausaison auf dieser Höhe dauerte jeweils von Mai bis anfangs Oktober. Die höchste Temperatur betrug 15 °C, die tiefste -7 °C. Die Felsverhältnisse waren sehr anspruchsvoll, d.h. es musste in kleinen Etappen gearbeitet werden. Es wurde durchgehend Stahleinbau gestellt. Die durchschnittliche Ausbaustärke beträgt hier ca. 25 cm Spritzbeton.

Die Erklärung für diese grosse Zahl von Rissen (insgesamt 140 Stück, verteilt auf 250 Tunnelmeter mit einer gesamten Risslänge von 540 m, davon 320 m feucht und 111 m nass) können wir uns nur mit dem unkontrolliertem Schwinden und dem jeweils sehr schnell erfolgten Austrocknen des in dünnen Schichten aufgebrauchten Spritzbetons erklären.

Sanierungsobjekt	Rufenen	Grind	Schöllenen	Cavadürli	YSC
Statistische Werte Bohrkerndruckfestigkeiten nach 28 Tagen. (N / mm²)					
Anzahl Prüfungen, n =	8 Stk.	8 Stk.	4 Stk.	6 Stk.	2 Stk.
Mittelwert, \bar{x} =	43,3	50,6	47,9	56,6	53,4
Standardabweichung, s =	8,1	10,0	11,0	5,8	0,2
Variationskoeffizient, v (%) =	18,6	19,7	22,9	10,2	0,4
Geford. Mindestwert (gem. SIA 162)		30,0	30,0	30,0	
Geford. Mittelwert (gem. SIA 198)	31,25				31,25
Statistische Werte Frostbeständigkeit (Schnellporosität, FS-Werte)					
Anzahl Prüfungen, n =	20 Stk.	4 Stk.	17 Stk.	12 Stk.	3 Stk.
Mittelwert, \bar{x} =	1,7	1,1	1,6	1,5	1,6
Standardabweichung, s =	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
Variationskoeffizient, v (%) =	4,3	12,9	8,4	11,2	10,8
Geford. Mindestwert	> 1,0	> 1,0	> 1,0	> 1,0	> 1,0
Statistische Werte Wasserundurchlässigkeit nach DIN 1048 (max. Eindringtiefe in mm)					
Anzahl Prüfungen, n =	4 Stk.	* 3 Stk.	4 Stk.	4 Stk.	2 Stk.
Mittelwert, \bar{x} =	39,8	15,5	35,7	27,3	48,0
Standardabweichung, s =	7,4	4,1	11,0	21,2	11,3
Variationskoeffizient, v (%) =	18,6	* 26,3	30,9	77,8	23,6
Geford. Werte	max. 50	$q_w < q_d$ *	max. 50	max. 50	max. 50
* Grind-Tunnel: Prüfung auf Wasserdichtigkeit q_w = Wasserleitfähigkeit nach SIA 162/1, Prüf. Nr. 5 q_d = Verdampfte Wassermenge					

Tab. 1: Prüfwerte von 5 Sanierungsobjekten

Während den Sanierungsarbeiten wurde der Tunnel am unteren Ende abgeschlossen, um den Luftzug auf ein für die ausreichende Belüftung der Arbeitsstellen notwendiges Mass zu reduzieren. Der Tunnel wurde sogar beheizt, wenn die Lufttemperatur sich dem Gefrierpunkt näherte. Offenbar hatte die fehlende Nachbehandlung, die wegen des am Morgen einsetzenden Zugverkehrs nicht möglich war, und der starke Luftzug im steilen Tunnel genügt, den jungen Spritzbeton derart zu schädigen, dass diese Risse entstanden sind. Immerhin haben wir mit Nachkontrollen feststellen können, dass keine weitere Verschlechterung des Zustandes eintritt. Mittlerweile sind die Risse im letzten Sommer grösstenteils mit einem neuartigen System abgedichtet worden. Ob sich dieses bewährt, wird sich erst im Laufe der Zeit zeigen.

7. Lösungsansätze

Lassen sich Risse und damit Undichtigkeiten des einschaligen Spritzbetonausbaus bei solchen Tunnelinstandsetzungen überhaupt vermeiden, wenn notgedrungenemassen in kleinen Abschnitten gearbeitet werden muss und keine Nachbehandlung möglich ist?

Vielleicht bringen uns schwindarme Rezepturen weiter, die weniger empfindlich auf vorzeitiges Austrocknen reagieren.

Ansätze dazu ergeben sich zum Beispiel durch das Beimischen von hydraulischem Kalk oder die Verwendung von HK-Cem-Zement, bei dem 10 % hydraulischer Kalk bereits in der Mischung enthalten ist. Mit beiden Lösungen kann das Hydratationsverhalten optimiert werden. Der Einsatz von Curing ist lediglich für die letzte Schicht Spritzbeton denkbar, weil sonst der Haftverbund zwischen den einzelnen Spritzbetonschichten in Frage gestellt ist.

Mit einem Kostensprung verbunden wäre der Einsatz von Abdichtungsfolien, die dann mit einer inneren Spritzbetonschale gestützt werden müssten. Solche Konstruktionen sind in geometrisch schwierigen Strecken, z.B. bei Profilübergängen in Strassentunnels, schon realisiert worden. Sie müssen sehr sorgfältig ausgeführt werden, wenn sie dicht sein sollen. Schon mehr versprechen wir uns von Spritzfolien, die vollflächig und im Verbund zwischen der Ausbruchsicherung und der inneren Schale ebenfalls "einschalig" wirken könnten. Leider sind bis heute unseres Wissens noch keine Produkte auf dem Markt, die alle gestellten Anforderungen erfüllen.

8. Zusammenfassung

Obwohl einige Mängel in Bezug auf die Wasserdichtigkeit aufgetreten sind, haben sich einschalige Spritzbetonverkleidungen für die Sanierung von Tunnels unter Betrieb als zweckmässig und wirtschaftlich erwiesen. Eine einschalige Spritzbetonverkleidung ist meistens die nach wie vor günstigste Lösung, da sie sich optimal der Profilform anpassen lässt, wenig Raum beansprucht, sich schneller realisieren und alternierend an verschiedenen Arbeitsstellen einsetzen lässt als eine geschaltete Lösung, die ja nicht in Frage kommt.

Bei den Problemen mit der Dichtigkeit besteht noch Handlungsbedarf, insbesondere bei den Zement und Zusatzmittelherstellern. Ich bin aber zuversichtlich, dass wir auch hier vorankommen. Wenn nicht, müssen wir unrealistische Erwartungen der Bauherren dämpfen und ein wirksames System zur nachträglichen Abdichtung solcher nicht vermeidbarer Risse entwickeln.

Dass sich eine Weiterentwicklung, in welche Richtung auch immer, lohnt, ja geradezu aufdrängt, ergibt sich aus der grossen Zahl der noch fälligen Instandsetzungen.

9. Literatur

[1] Laich SA (Hrsg):

Der einschalige Ausbau mit Spritzeton. Tagungsbericht des Spritzbeton-Kolloquium vom 29.9.1995. Laich SA, CH-Avegno, 1995.

[2] Neuhaus, J.; Teichert, P.:

Sanierung des Loppertunnels der Luzern-Stans-Engelberg-Bahn. Schweizer Baublatt, Heft 6/1979.

[3] Sala, A.:

Eingleisige Schmalspurbahntunnels, Sanierung unter Betrieb. Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 7 / 1990.

[4] Sala, A.:

Erneuerung Rufenen-Tunnel, Projekt-Präsentation vom 26./27.9.1994. Herausgeber: Amberg Ingenieurbüro AG, CH-Regensdorf-Watt, 1994.

[5] Cornejo-Malm, G.:

Schwinden von Spritzbeton. IB ETH-Forschungsbericht Nr. 077 / 91, Mai 1995.

[6] Schwarz, R.:

Tunnelentwässerung und Abwasserbehandlung im Tunnel Crapteig N13.VSS. Strasse und Verkehr, 11 / 96.