

Studienbericht über die Abdichtung von wasserdurch- lässigem Fels und Mauerwerk in Eisenbahntunnels

Von

Professor K. E. Hilgard

Ing., Mitglied der Abdichtungskommission des Schweizerischen
Wasserwirtschaftsverbandes



Berlin
Verlag von Julius Springer
1928

**Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung
in fremde Sprachen, vorbehalten.**

ISBN-13: 978-3-642-98573-7 e-ISBN-13: 978-3-642-99388-6
DOI:10.1007/978-3-642-99388-6

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Einleitung.	
Ursachen der Undichtigkeiten	1
Weitere schlimme Folgen der Nässe in Tunnels	2
Gefahren in nassen Tunnels bei elektrischer Traktion	3
Maßnahmen zur Abdichtung von längst bestehenden und neu erbauten Eisenbahntunnels	5
1. Ausfugen mit Grenoble-Zement	6
2. Ausstemmen der Fugen mit Bleiwolle	6
3. Hornemannsche Abdichtung	6
4. Aufgehängte Schutzdecken	7
5. Wasserdichte Überdeckung des Gewölberückens	7
6. Hinterpressung von Zementmörtel hinter das Tunnelgewölbe	8
7. Sika-Abdichtungen	10
a) Fugendichtungen	11
b) Sika-Verputz	12

Einleitung.

Vor allem ist es wichtig, durch eingehende Untersuchungen die Ursachen der Undichtigkeiten festzustellen und zu erkennen, um dann Mittel und Wege zu finden, wie dieselben behoben werden können.

Schon seit der Erstellung der ersten Eisenbahntunnels ist es trotz vorsichtiger Bauweise, trotz aller Vorsichtsmaßregeln oder Anwendung besonderer Mittel, und trotz beständiger, kompetenter Bauaufsicht in den wenigsten Fällen gelungen, in nassen Tunnelstrecken ein trockenes Gewölbe zu erhalten. — Beinahe immer konnte beobachtet werden, daß durchsickerndes Wasser austrat; sei es aus einzelnen Ritzen, Rissen, Poren oder Fugen dringend, sei es in Form eines Tropfenregens oder oft aus größeren Öffnungen in geschlossenem Strahl.

Ursachen der Undichtigkeiten.

Die Ursachen können sehr verschiedener Art sein; sie sind meist gar nicht nur etwa in nachlässiger und mangelhaft beaufsichtigter oder unzuweckmäßiger Bauausführung zu suchen. Unter den undichten Tunnels sind denn auch selbst diejenigen, welche mit Mauerwerk ausgewölbt sind, nicht selten. Ein Grund liegt darin, daß in allen ausgewölbten Tunnels, selbst bei sorgfältiger Bauausführung, eine, wenn auch nur geringfügige Senkung des Gewölbes nach dessen Ausrüstung nicht zu vermeiden ist. Dadurch wird eine mehr oder weniger starke Rißbildung im Gewölbe und evtl. in der Hintermauerung verursacht.

Diese feine Rißbildung kann verstärkt werden durch eventuelle Deformation der Gewölbe, verursacht durch Gebirgsdruck, des weiteren durch die ständige Erschütterung infolge des Bahnverkehrs.

Eine Schädigung des Gewölbemauerwerks wurde allein schon konstatiert durch die mechanische, also erodierende Wirkung der Rauch- und Dampfgase, welche in ansteigenden Tunnels mit großer

Vehemenz, mit glühenden Schlacken- und Kohletheilchen vermischt, ausgestoßen werden.

In ganz ähnlicher Weise leidet auch armerter oder nicht armerter Beton, der für Tunnelmauerwerk allerdings nur in selteneren Fällen Verwendung findet.

Des weiteren kann es auch vorkommen, daß Tunnels, welche während des Baues vollkommen trocken waren, später, infolge von tektonischen Vorgängen im Gebirge selbst, oder infolge von äußeren, auch künstlichen Einflüssen, wie Abholzen, Lawinen usw., Wasser erhalten, und sich dann als undicht erweisen.

Eine besonders wichtige Ursache für spätere Undichtigkeiten der Tunnelgewölbe liegt darin, daß schon zur Zeit der Erstellung des Mauerwerkes Wasser von der Decke in größeren oder kleineren Mengen herabtropft. Dadurch wird der gewöhnlich aus hydraulischem Kalk oder Zement zubereitete Fugenmörtel schon während der Abbindezeit gestört; dies hat mangelnde Erhärtung zur Folge.

Es findet zudem eine Auswaschung des Mörtels statt, die anfänglich auch nur geringfügig sein mag. Aber die dadurch entstehenden feinen Rinnen und Hohlräume eröffnen dem herabtropfenden Wasser den Durchgang. Es tritt ein Auslaugen des Mörtels ein, der freie Kalk wird gelöst und die leicht löslichen Kalkverbindungen im Zement werden weggeschwemmt. Weitere Förderungen erfährt die dadurch eingeleitete Schädigung des Mauerwerkes durch die schwefligen und chlorhaltigen heißen Rauchgase der Lokomotiven und durch Aggressivwässer, welche den Mörtel blähen oder erweichen, und so dessen Zweckerfüllung unterbinden.

Neben den säure-, gips- oder magnesiumhaltigen Wässern verdienen die kalkarmen und daher kalkhungrigen Wässer der Hochgebirge besondere Aufmerksamkeit.

Tritt überdies Frostwirkung dazu, so verursachen alle diese Momente eine vollständige Zerstörung und das Ausbröckeln des Mörtels in den Fugen, das Wasser hat freien Durchgang und die Zerstörungen können sich bis auf so große Tiefe der Mörtelfugen erstrecken, daß dadurch die Stabilität der Tunnelgewölbe ernstlich gefährdet wird.

Weitere schlimme Folgen der Nässe in Tunnels.

In allen der Einwirkung des Frostes ausgesetzten Tunnelstrecken bilden sich Eiszapfen an der Gewölbeleibung, Eisstalag-

miten auf dem Boden; Schienen und Schwellen werden bedeckt von einer äußerst festen Kruste von Glatteis. Der Eisenbahnbetrieb wird dadurch erschwert, teilweise direkt gefährdet.

In nassen Tunnelstrecken ist der gesamte Oberbau weit mehr der Abnutzung und Schädigung ausgesetzt als in trockenen, und es ergeben sich daraus weit höhere Unterhaltungskosten. Ganz besonders sind es die Schienen, Laschen, Lagerplatten und Befestigungsmaterial, die infolge von Rost und Nässe und unter der Einwirkung der Lokomotivgase erhöhten Schaden erleiden und entsprechend kürzere Lebensdauer aufweisen. Nach Angabe der Schweizerischen Bundesbahnen sind die Abrostungserscheinungen an solchen Stellen am größten, wo ein periodischer Wechsel zwischen Nässe und Trockenheit erfolgt.

Aus all diesen Feststellungen erhellt zur Genüge, daß nasse Tunnelstrecken sowohl im Interesse der Erhaltung des Mauerwerkes und des Oberbaues, als auch im Interesse der Betriebssicherheit größere Wachsamkeit und beständige Beobachtung selbst der geringfügigsten Veränderungen erfordern.

Auf Grund der vorgenannten, im Laufe der Zeit stets stärker auftretenden Erscheinungen, welche schon seit Betrieb der ersten Eisenbahntunnels beobachtet wurden, aber nur sukzessive zur Erklärung und Auswirkung gelangten, hat auch das Bedürfnis und die Notwendigkeit einer wirksamen Abdichtung, sowohl bei neuen, als auch bei bestehenden, nassen Eisenbahntunnels immer mehr Beachtung gefunden.

Gefahren in nassen Tunnels bei elektrischer Traktion.

Ganz besonders ist dies mit dem Beginn der Einführung der elektrischen Traktion auf Hauptbahnen und damit auch bei den Schweiz. Bundesbahnen zur Tatsache geworden.

Obwohl bei den elektrischen Lokomotiven eine wichtige Quelle vermehrter Schäden an Mauerwerk und Geleise, die Rauchgase, in Wegfall kommen, so ist die Gefahr von Betriebsstörungen in nassen Tunnels noch eine weit größere als bei Dampflokotivbetrieb. Die Fahrleitung nebst den Isolatoren müssen in erster Linie geschützt werden vor dem Ansatz von Inkrustationen durch heruntertropfendes kalkhaltiges Wasser. Wasserfäden oder von Wasser über- oder durchflossene Eiszapfen und Kalkstalaktiten, und deren direkter Kontakt mit dem Fahrdraht oder dessen Be-

festigung und Aufhängekonstruktion, wie auch Eisbildung auf den Isolatoren, können bei den üblichen hohen elektrischen Spannungen zu Kurzschlüssen und damit zu namhaften Zerstörungen an der Fahrleitung und dem Tunnelgewölbe führen. Es ist daher notwendig geworden, in allen dem Frost ausgesetzten nassen Tunnelstrecken, während betriebsstiller Stunden, jeweils die wiederum entstandenen Eiszapfen zu entfernen, um einesteils Kurzschluß, andernteils aber auch die Beschädigung der Stromabnehmer der Lokomotiven zu vermeiden. Andererseits hat sich gezeigt, daß trotz der Abwesenheit der Rauchgase die Abnutzung und Schädigung der Geleise bei elektrischem Betrieb infolge größerer Radrücke und Geschwindigkeit der Lokomotiven keineswegs geringer geworden ist und unter dem schädlichen Einfluß von *Nässe* eher noch zugenommen hat.

Nur in ganz geringem Maße und unter besonders ungünstigen Fällen konnte vermehrtes Abrosten elektrolytischen Einflüssen zugeschrieben werden. Diesbezügliche Untersuchungen im Simplon- und anderen schweiz. Eisenbahntunnels haben u. a. zu folgenden Erkenntnissen geführt¹:

1. Der elektrische Betrieb mit Wechselstrom übt auf die Abnutzungs- und Abrostungserscheinungen des Oberbaues im Simplontunnel keinen wesentlichen Einfluß aus.

2. Zu den bis jetzt bekannten Einflüssen, die die Abnutzungen in langen Tunnels verursachen, wie Feuchtigkeit, rollende Last, Rauchgase der Lokomotiven, Steigung der Bahn, tritt als neuerkannter, die Abnutzung sehr ausgesprochen beeinflussender Faktor die Temperatur der Tunnelluft hinzu, indem mit steigender Temperatur und Luftfeuchtigkeit die Abnutzung zunimmt. Durch diesen Einfluß lassen sich die Ungleichheiten erklären, die die mittleren kilometrischen Abnutzungen in verschiedenen langen Tunnels bei gegebenen Feuchtigkeitsverhältnissen erleiden. Beobachtungen im Gotthard- und im Hauensteintunnel zeigen, daß dies auch für Tunnel mit Dampftrieb zutreffend ist. Der Einfluß der Rauchgase scheint geringer zu sein, als man gemeinhin anzunehmen geneigt ist.

3. Die lokalen starken Abnutzungen treffen überall mit *nassen* Stellen, insbesondere mit *Tropfwasserstellen* im Tunnel zusammen.

¹ Siehe Schweiz. Bauzg. Nr. 15 v. 13. IV. 1912: Über die Abrostungserscheinungen am eisernen Oberbau im Simplontunnel, v. Ing. A. Dänzer, S. B. B. Bern.

4. Die chemische Zusammensetzung des Tropfwassers scheint auf die Stärke der Abnützungen, Korrosionen und Abrostungen, soweit es wenigstens Sulfate und Chloride betrifft, keinen merklichen Einfluß auszuüben usw.

Parallelversuche mit Flußeisenstücken haben u. a. zu folgenden Schlüssen geführt:

1. Für den Angriff des Eisens durch Wasser ist die Mitwirkung freien Sauerstoffs, der im Wasser und in der Luft vorhanden ist, wesentliche Bedingung.

2. Ist das Eisen vollständig in Wasser eingetaucht, so wird, nachdem der ursprünglich im Wasser vorhandene freie Sauerstoff durch den Rostvorgang verbraucht ist, von der Wasseroberfläche her atmosphärischer Sauerstoff in die Flüssigkeit eintreten; es geschieht dies durch Diffusion. Das Rosten nimmt also seinen Fortgang. Die Geschwindigkeit des Rostens ist dann abhängig von der Schnelligkeit, mit der der atmosphärische Sauerstoff durch die Wasseroberfläche in das Wasser und durch das Wasser zum Eisen diffundiert.

3. Ragt das Eisenstück zum Teil in die atmosphärische Luft, so spielt die unmittelbare Einwirkung des atmosphärischen Sauerstoffes an der Berührungsstelle zwischen Wasser, Luft und Eisen eine wichtige Rolle. Es zeigen sich an dieser Stelle außerordentlich kräftige Rostangriffe.

Alle diese Untersuchungen zeigen, daß auch bei elektrischer Traktion oder um so eher noch gerade wegen Einführung derselben, die Verhütung von Nässe in Eisenbahntunnels, d. h. deren wirksame Abdichtung gegen Wassereintritt sowohl zum Zwecke der direkten Ermöglichung eines sicheren Betriebes, als auch zum Zweck einer länger dauernden Erhaltung von Fahrleitung und Oberbau ein Gebot der Notwendigkeit geworden ist.

Maßnahmen zur Abdichtung von längst bestehenden und neu erbauten Eisenbahntunnels.

Aus maßgebender einschlägiger Fachliteratur¹ geht mit aller Deutlichkeit hervor, daß schon unzählige Versuche gemacht,

¹ Dolezalek, Prof. Dr.-Ing.: „Der Eisenbahntunnel“ 1919; sowie derselbe: „Dichtung des Tunnelmauerwerkes“ im Organ f. d. Fortschritte des Eisenbahnwesens, Bd. 47, H. 8, 1910; wie auch Prof. C. Andreae: „Der Bau tiefliegender

sowie Mittel und Wege vorgeschlagen wurden, um das Tunnelmauerwerk dicht zu machen und trocken zu erhalten, daß aber in den wenigsten Fällen und nur ganz wenige Mittel, und auch von diesen nur einzelne in ganz besonderen Fällen zu dem ersehnten Ziel geführt haben. Es sei hier nur einiger der bekanntesten und oft mit großer Zuversicht angewandter Mittel Erwähnung getan.

1. Ausfugen mit Grenoblezement.

Die Gewölbefugen wurden ausgekratzt, gereinigt und mit schnellbindendem Grenoblezement auf 2—3 cm geschlossen. Darüber kam zur gänzlichen Ausfugung bis zur Gewölbeleibung eine Schicht von Portlandzement. Im Laufe der Zeit erfolgte aber unter dem Einfluß des Wassers hinter dem Gewölbe ein Aufweichen und Aufquillen des Grenoblezementes und ein Herauspressen des letzteren aus den Fugen.

2. Abdichtung der Fugen mit Bleiwolle.

Nach dem Vorgehen bei verschiedenen Eisenbahntunneln in Deutschland, wo das Einstemmen von Bleiwolle in die Gewölbefugen in den ersten Jahren scheinbar einen Erfolg gezeitigt hatte, wurde auch im großen St. Gotthardtunnel schon im Jahre 1911 versuchsweise auf ganzen Strecken in die Gewölbefugen bis eben mit der Leibung Bleiwolle eingestemmt. Der anfängliche Erfolg erwies sich aber schon nach 4—5 Jahren als das Gegenteil, indem infolge der Erschütterungen vom Zugverkehr und geringfügiger Deformationen des Gewölbes das absolut keine Adhäsion besitzende Blei herausfiel, und schon im Jahre 1916 war von dieser Dichtung nichts mehr zu sehen; in der Folge wurde die Methode bei den Schweiz. Bundesbahnen nicht mehr angewandt. Das Lockerwerden des Bleies in den Fugen ist sicher auch infolge der Auflösung des Bleies durch die alkalischen Wasser und unter dem Einfluß der feuchten Luft und der Schwefelgase gefördert worden.

3. „Hornemannsche Abdichtung“.

Eine ähnliche, aber weit kompliziertere Dichtungsmethode war im Jahre 1913 im Gütschtunnel der Schweiz. Bundesbahn (Luzern) anzuwenden versucht worden, indem in die bis auf 15—20 cm

langer Gebirgstunnel“, (Berlin: Julius Springer 1926) und Ing. Fr. Rothpletz „Woran leiden unsere Eisenbahntunnel, wie kann abgeholfen und wie vorgebeugt werden“, Schweiz. Bauz. Bd. 71, Nr. 6. 1918.

Tiefe ausgeräumten Gewölbefugen zunächst Grenoblezement, dann eine patentierte harte und darüber eine weiche „Moßhumido-Masse“, darüber Bleiwolfe, dann ein Teerstrick und als Abschluß der Fuge ein Isolierkitt eingedrückt wurde. Obwohl damals noch an die Bewährung von Grenoblezement und Bleiwolfe geglaubt wurde, ist diese Dichtungsmethode nach dem Patentsystem „Hornemann“ der hohen Kosten sowie der Schwierigkeit allfälliger Reparaturen solcher Dichtungen wegen für eine weitergehende Verwendung nicht in Frage gekommen. Auch anderweitige Versuche von Kalfatierung der Gewölbefugen mit Teerstricken haben sich als ungenügend und im Vergleich mit anderen weiteren Dichtungsmitteln auch der hohen Kosten wegen als unbefriedigend erwiesen.

4. Aufgehängte Schutzdecken.

Das in verschiedenen Tunnels angewandte Aufhängen von gebogenen, verzinkten Eisenblech- oder auch von Eternitplatten über den Geleisen zum Zwecke der Abweisung des Wassers gegen die Tunnelwände hin gebietet der fortschreitenden Zerstörung des Fugenmörtels doch keinen Einhalt. Die Befestigungsart der Platten ist keineswegs einwandfrei gelöst und bringt Betriebsgefahren mit sich, indem zu verschiedenen Malen Teile solcher Platten oder ganze Bleche auf die Geleise heruntergefallen sind. Im Falle elektrischer Traktion mit oben hängendem Fahrdrabt könnte diese, in allen Fällen nur provisorische Lösung sowieso wohl gar nicht in Frage kommen.

5. Wasserdichte Überdeckung des Gewölberückens.

Ganz richtiger Überlegung folgend, schon den Eintritt des Wassers in das Gewölbe überhaupt zu verhindern, hat es nicht gefehlt an unzähligen Vorschlägen und Versuchen zu einer Überdeckung des Gewölberückens mit leicht biegsamen, wasserdichten Stoffen, wie Blei-, geteertes Well- oder verzinktes Eisenblech, Asphaltpappe, Kombinationen von asphaltierten oder verteernten Geweben (Jute) mit Zwischenlagen von Bleiblech, Asphalt-Filz- oder Wollpappen usw. In erster Linie ist zu sagen, daß eine solche Abdeckung in den meisten Fällen nur beim Neubau eines Tunnels oder bei Rekonstruktion des Gewölbes in Frage kommen kann, da die nachträgliche Freilegung des Gewölberückens zur Einbringung eines Belages allzu große Kosten verursacht und in vielen Fällen überhaupt nicht mit Erfolg gelingen dürfte, so daß bei bereits im

Betriebe befindlichen Tunnels hiervon abgesehen wurde. Aber auch bei neu erstellten, mit einer solchen Gewölbeabdeckung versehenen Tunnels bietet diese letztere in sehr vielen Fällen keine Gewähr für die Erreichung des beabsichtigten Zweckes.

Einmal ist es nicht möglich, des beschränkten Arbeitsraumes wegen, dieses Deckmaterial in größeren Stücken über dem Gewölbe zu verlegen, so daß eine sehr große Anzahl von übergreifenden Stößen oder Fugen entsteht, deren wirksame, zuverlässige Abdichtung selbst wieder große Schwierigkeiten verursacht und nicht durchwegs gelingt, namentlich dann nicht, wenn diese Beläge während der Wassersickerungen ausgeführt werden müssen. Des weiteren sind die wasserdichten Deckstoffe namentlich an den sich überdeckenden Randpartien der Beschädigung durch Wundrücken oder Zerreißen bei Deformation des Tunnelgewölbes ausgesetzt, selbst wenn sie auch mit besonderen Schutzschichten aus Zementmörtel, Flachziegeln, Zementsteinen usw. überdeckt werden.

Unter diesen verschiedenen elastischen Abdichtungsmaterialien, die auf die Dauer z. T. spröde und rissig werden, haben sich nur wenige bewährt, trotzdem deren Verwendung recht große Kosten verursacht. Diese Art der Abdichtung kann aber, wie gesagt, kaum in Frage kommen bei bereits in Betrieb stehenden Eisenbahntunnels.

6. Hinterpressung (Injektion) von Zementmörtel hinter das Tunnelgewölbe.

Um dennoch auch nach der Ausrüstung und stattgehabter Sackung der Gewölbe, oder bei schon längst im Betriebe befindlichen Tunnels, ohne nachträgliche Freilegung des Gewölberückens eine möglichst dichtende Abdeckung desselben zu erzielen, hat man die Injektion angewandt, wie sie zuerst bei Fundamenten von Wasserbauten und bei Wasserdruckstollen zur Verwendung gelangte. Es ist dadurch in vielen Fällen gelungen, beim Vorhandensein von Hohlräumen hinter dem Gewölbe die sonst durch eine satte Anmauerung erzielte nachträgliche Füllung derselben zu erreichen, oder eine vorhandene Steinhinterpackung in eine Art das Gewölbe bedeutend kräftigenden Beton zu verwandeln.

Durch solche Injektionen ist es in manchen Fällen möglich geworden, an gewissen Stellen in überraschender Weise eine erstaunlich große Menge von flüssigem Zementmörtel hinter das Tunnelgewölbe einzuspritzen.

Bei einer geologischen Untersuchung über Durchlässigkeit und Vorhandensein von Wasseradern oder -säcken im zu durchfahrenden Gebirge, sowie bei einer genauen Aufnahme von Tunnelprofilen, bei den Feststellungen von Deformationen der Gewölbe und Widerlager sollte auch stets durch Bohrlöcher im Gewölbe festgestellt werden, ob und wo sich Hohlräume hinter dem Gewölbe befinden. Diese Hohlräume sollten unter allen Umständen durch Hinterpressung von Zementmörtel durch diese Bohrlöcher gefüllt werden, auch wenn keine schon eingetretene Stabilitätsgefährdung des Gewölbemauerwerkes dies zu erfordern scheint.

Von der größten Wichtigkeit bei solchen Injektionen von flüssigem Zementmörtel ist aber, wie dies namentlich die Anwendung derselben im größten Stil bei Schachtabteufungen in läufigem Untergrund in Deutschland so deutlich gezeigt hat, daß zunächst der Zeitpunkt des Beginnes des Abbindens und dessen Zeitdauer für jeden zur Verwendung gelangenden Zement genau festgestellt werde, so daß die Einpressung des Zementmörtels jeweils während der Abbindezeit eingestellt bleibt, denn erfahrungsgemäß erhärtet ein Zementmörtel nicht, wenn er während der Abbindezeit durch fortgesetzte Injektionen gestört oder verdrängt wird, der beabsichtigte Zweck kann alsdann auch nicht erreicht werden.

Dennoch ist auch von einer, wenn auch mit Sorgfalt und unter Beobachtung der Abbindezeit ausgeführten Hinterpressung des Gewölbes allein *in den wenigsten Fällen* eine absolute oder genügende Abdichtung erreicht worden.

Auf dem Wert und der Forderung solcher Zementmörtelhinterpressungen fußend, aber auch im Bewußtsein, durch diese allein keine absolute Gewähr für eine gänzliche Abdichtung des Gewölbes zu erzielen, wird auch von Prof. Dr.-Ing. Dolezalek und anderen empfohlen, schon für neu zu bauende oder zu rekonstruierende Tunnelgewölbe eine satte Hintermauerung nur in Abständen von 5—10 m vorzunehmen, in Form von 1—2 m dicken Quermauern und diese so gebildeten einzelnen Zwischenräume durch Steinhinterpackung auszufüllen, die dann nach Ausrüstung und stattgehabter Sackung des Gewölbes durch Injektion von flüssigem Zementmörtel in der angegebenen Weise in eine Art Beton konsolidiert werden. Das Einspritzen des Zementmörtels soll an den Kämpfern beginnen, gegen den Gewölbescheitel hin beendigt werden.

Bei Verwendung von gewöhnlichem Zementmörtel für solche Hinterpressungen kann im Falle reichlichen Vorhandenseins von Wasser hinter dem Gewölbe eine Entmischung des Mörtels in Zement und Sand erfolgen, so daß an den Stellen, wo nur Sand hingelangt, wohl eine Verstopfung der Hohlräume oder Gewölberisse, aber keine wirksame Abdichtung und Stabilisierung derselben bewirkt wird, oder es kann der Mörtel gerade an den Stellen sich absetzen, sich verdicken oder abbinden und erhärten, wo er den Durchfluß von nachfolgend injiziertem Mörtel und dadurch die Ausfüllung von dahinterliegenden Hohlräumen verhindert.

Namentlich ist eine allfällige und vollständige Abdichtung aller Risse und Poren hinter dem Gewölbe, selbst bei einer verhältnismäßig großen Anzahl von Bohrlöchern, kaum zu erwarten.

Auch im Falle einer vorhandenen Steinhinterpackung hat man keine Gewähr, daß der eingepreßte Mörtel auch alle jene Stellen erreicht hat, die einer Abdichtung bedürfen.

Jedenfalls bildet eine Hinterpressung von Zementmörtel einen wichtigen Schritt für die Verstärkung und Stabilisierung des Gewölbes und mindestens eine wirksame Unterstützung aller Abdichtungsarbeiten, obwohl die Kosten zum vornherein kaum bestimmbar und unter Umständen sehr groß sind.

Da nun aber erfahrungsgemäß jeder Zementmörtel unter allen, im vorigen genannten schädigenden Einflüssen um so weniger leidet, je dichter derselbe ist, so erscheint demnach immer wieder das Ausdichten der Gewölbefugen und der Risse im Deckengestein als hauptsächlichster, nächstliegender, sowie am einfachsten ausführbarer Schutz. — Es kommt weiter in Betracht das Aufbringen eines vollständigen, dichten, fest haftenden Verputzes, und zwar unter Verwendung eines Materials, das in bezug auf Abbindefähigkeit, Dichtigkeit, Haftfestigkeit sowie Widerstand gegen Auslaugung und gegen Zersetzung durch Aggressivwässer die früher erwähnten Unzulänglichkeiten nicht besitzt.

7. Sika-Abdichtungen.

Ein solcher Verfugungs- und Verputzmörtel, dessen Eignung auf Grund sehr vieler Versuche und ausgedehnter praktischer Verwendung sich vorzüglich erwiesen hat, ist ein mit flüssiger Sika zubereiteter Portlandzement oder Zement-Sand-Wassermörtel.

Da Sika eine Flüssigkeit ist, so ist die Gewähr für eine innige Mischung mit dem Zement und Sand viel größer, als dies bei jeder pulverförmigen Beimischung der Fall sein wird.

Sika besteht nach Angaben des Lieferanten aus einer Mischung verschiedener kolloidaler Lösungen von Leichtmetallen und verleiht dem damit hergestellten Mörtel die Fähigkeit, in beliebig kurzer Zeit abzubinden und zu erhärten und auf einer gerauhten, nassen Oberfläche, selbst wenn das Wasser in Strahlen herausdringt, zu haften. Über der Haftfestigkeit wird auch die Dichtigkeit und die Frostbeständigkeit erhöht, unter gleichzeitiger Verminderung der Tendenz zum Schwinden.

Durch diese genannten, zum Teil steigerungsfähigen Eigenschaften ist der Sikazementmörtel solchem aus Kalk, hydraulischem Kalk, Traß, Grenoble-, Schmelz- oder gewöhnlichem Portlandzement in hohem Grade überlegen.

Außerdem werden, um den verschiedenen Anforderungen der Praxis zu genügen, fünf verschiedene Sorten Sika hergestellt, um wesentlich die Zeitdauer des Abbindens je nach Bedürfnis sogar bis auf wenige Sekunden verkürzen zu können.

Ausgedehnte Sikadichtungsarbeiten wurden in den Tunnels der Schweiz. Bundesbahnen, namentlich im Hinblick auf die Elektrifikation, ausgeführt, wobei je nach der Intensität und Verteilung der Sickerwässer dreierlei Dichtungsarbeiten zur Ausführung gelangten. Eine äußerst wichtige Vorbedingung des Erfolges ist zunächst eine mit peinlicher Gewissenhaftigkeit vorgenommene Reinigung und Berauhung der Gewölbeleibung, sowie der Mauerfugen, von jeder Spur von Ruß und Staub; der alte Mörtel in den Fugen muß bis in eine Tiefe von 10—15 cm sorgfältig ausgekratzt und ausgeräumt werden. Dies erfolgt am besten mit pneumatischen Stock- und Spitzhämmern, oder auch von Hand.

Die Oberfläche des Tunnelgewölbes oder der unausgewölbten Strecken ist von dem öligen Ruß der Dampflokomotiven durch Abspitzen zu reinigen, wobei soviel Gestein wegzuspitzen ist, bis man auf die gesunden, sauberen Felspartien kommt. Ein gründliches Abspritzen mit Wasser ist weiter unerlässlich.

a) Fugendichtung.

Alsdann erfolgt entweder bloßes Ausfüllen der Gewölbefugen bzw. der Ritzen im Gestein mit Sikamörtel, oder außerdem das

Aufbringen eines Verputzes aus Sikazementmörtel von $\frac{1}{2}$ —5 cl. Stärke, je nach den vorliegenden Verhältnissen.

b) Sikaverputz.

Letzterer ist dann notwendig, wenn das Gewölbesteinmaterial oder das Deckengestein durchlässig wird und wenn trotz Abdichtung der Fugen oder Risse Wasser zwischen diesen aus feinen, kaum deutlich sichtbaren Ritzen oder Poren dringt. Das Aufbringen des Sika-Mörtelverputzes erfolgt meistens unter Verwendung eines an eingelassenen Haken oder Ösen befestigten, von der Leibung etwas abstehenden Drahtgeflechtes von 3—7 cm Maschenweite und ca. 2 mm Drahtstärke.

Es ist selbstverständlich, daß der Erfolg der beabsichtigten Dichtung aber noch lange nicht allein von der Verwendung des hierzu so wohl geeigneten Sika-Zementmörtels abhängt. Von Wichtigkeit ist auch die genügende Berauhung der zu bedeckenden Mauerwerks- oder Gesteinfläche; ebenso sehr auch die sorgfältige Entfernung nicht nur von Ruß und Staub, sondern auch irgendwelcher durch diese Berauhung entstehenden, selbst der kleinsten losen Partikelchen eventuell mit Stahldrahtbürsten. Es hat sich beispielsweise gezeigt, daß auf Mauerwerk aus gewissem Steinmaterial (z. B. Sandstein) eine Reinigung mittels Sandstrahlgebläse allein nicht ratsam ist, weil durch dasselbe kleine Partikelchen des Gesteins nur gelockert, aber nicht entfernt werden, so daß ein Mörtelverputz nicht haften kann. Es bedarf sodann sorgfältiger Arbeit und Handhabung des Sikamörtels durch Arbeiter, welche mit dessen Eigenschaften, Zubereitung und Verwendung vertraut sind.

Welche von den verschiedenen Sikasorten in jedem einzelnen Falle am zweckmäßigsten und vorteilhaftesten zur Verwendung gelangen soll, hängt ganz von den bestehenden Verhältnissen ab und ist leicht auf Grund der Erfahrungsergebnisse an anderen Stellen zu ermitteln. Es muß auch hier mit Nachdruck betont werden, daß unter jenen „bestehenden Verhältnissen“ auch die besonderen chemischen Eigenschaften für die Herstellung des Sikamörtels zur Verwendung gelangenden Portlandzementes zu zählen sind, da erfahrungsgemäß dieser sich je nach Provenienz etwas verschieden gegenüber dem gleichen Stärkegrad von Sika verhalten kann. Die große Dichtigkeit und insbesondere Haftfestigkeit von Sikamörtel auf rauhem, zuvor vollständig benetztem Gestein oder Beton hat

sich in der Praxis vielfach erwiesen und kommt neuerdings deutlich zum Ausdruck bei den in der Versuchsanstalt der Abdichtungskommission des Schweiz. Wasserwirtschaftsverbandes in Letten (Zürich) in bezug auf diese Eigenschaften vorgenommenen Versuchen. Ein vollständig poröser, scheibenförmiger, kreisrunder, 20 cm dicker armierter Betonblock von 80 cm Durchmesser wurde auf der Vorderseite nach einem vorgängigen Anstrich mit einer dünnflüssigen Mischung aus Sikazement 3 cm stark verputzt mit Sikamörtel 1 : 3 und im Druckapparat von der Rückseite her unter Wasserdruck gesetzt. Während beim gleichen unverputzten Block das Wasser bei nur 1 m Überdruck schon hindurch zu rieseln begann, während ein gewöhnlicher Portlandzementmörtel-Verputz schon bei 2—3 at Überdruck zum Teil undicht und zum Teil abgesprengt wurde, erwies sich der Sikamörtelverputz unter einem bis zu 12½ at gesteigerten Überdruck als dicht und blieb intakt haften.

Auf Grund der beschriebenen und erwiesenen Eigenschaften dürfte sich Sikamörtel in manchen Fällen auch für Hinterpressungen von Tunnelgewölben, wo ein Wasserzudrang vorhanden ist, eignen. Selbstverständlich ist, daß bei nachträglichen Deformationen des Tunnelgewölbes der Sikamörtelverputz sowie die Dichtungen auch Beschädigungen ausgesetzt sind, da die Verputze starr sind. Dabei ist aber hervorzuheben, daß allfällig notwendig werdende Reparaturen immer wieder leichter und wirtschaftlicher vorgenommen werden können, als bei jeder der anderen beschriebenen Abdichtungsmethoden.

Schon 1910 ist Prof. Dr.-Ing. Dolezalek auf Grund seiner reichen und vielseitigen Erfahrung als Tunnelbauer nach seinen steten späteren Beobachtungen sowie fortwährendem Studium der hier behandelten Probleme zu folgendem Schluß gekommen¹.

Sowohl für Gewölbeabdeckungen oder Mörtelhinterpressungen als auch für Verfüguug der inneren Gewölbeleitung, wenn sie überhaupt (wie jedenfalls bei sonst nässenden Tunnels, Anm. d. Unterz.) erforderlich ist, wird man einen verhältnismäßig rasch abbindenden und dichten Zementmörtel selbst mit der Mischung 1 Teil Zement auf 1 Teil Sand verwenden, denn auch der langsam bindende Mörtel leidet nicht nur infolge der Auswaschungen, sondern mehr als der rasch erhärtende durch salzhaltige (oder kalk-

¹ Der Eisenbahntunnel. Bd. 1, S. 110. 1919.

hungrige, Anm. d. Unterz.) Gebirgswässer und im Tunnelinnern durch die chemische Wirkung der Rauchgase der Lokomotive, die das Abbinden des Mörtels namentlich an nassen Stellen unter Umständen gänzlich verhindern, wie das in Tunnels in Deutschland und Frankreich wiederholt beobachtet worden ist und wogegen es bis jetzt keinen besseren Schutz gibt als rasch bindenden Zementmörtel.

Wären ihm damals schon Sika und dessen Eigenschaften bekannt gewesen, so ist die Frage naheliegend, ob er die Worte „rasch bindenden“ Zementmörtel nicht wohl durch „auch auf rauher, nasser Gesteinsoberfläche und in der Nässe rasch abbindenden und festhaftenden, auch rasch erhärtenden, sich wasserdicht und frostbeständig erweisenden und gegen säure- und gipshaltige oder kalkarme Gebirgswässer unempfindlichen Sikazementmörtel“ ersetzt hätte.

Aus dem Gesagten geht hervor, daß es bei der Vornahme von Tunnelgewölbeabdichtungen von Wichtigkeit, jeden falls aber von Vorteil ist, die Breite der Abdichtungsflächen so zu bemessen, daß bei elektrischem Betrieb nicht nur der Fahrdraht samt Isolatoren und der Befestigungsmittel, sondern auch das Geleise, wenn möglich der ganze Oberbau vor dem schädlichen Einfluß von Tropfwässern geschützt ist.

In den Tunnels der Schweiz. Bundesbahnen, die je nach Erfordernis nach den verschiedenen Schutzmethoden mit Sikamörtel gedichtet wurden (durch Ausfugen, Verputze oder durch Verputze mit Drahtgeflechteinlagen), ist nicht die ganze Gewölbeleibung bis zu den Seitenwänden so behandelt worden, sondern beschränkungsweise über jedem Geleise nur ein Streifen von 2,20—2,50 m Breite.

Es mußte dies zur Verminderung der Kosten bei der großen Anzahl wegen der Erfordernisse durch die Elektrifikation abgedichteter und noch abzudichtender Tunnels geschehen.

Im Hinblick auf die Stabilität wäre es erwünscht und zweckmäßig, die ganze Gewölbeleibung zu dichten und nur, falls es sich als notwendig erweisen sollte, seitwärts an wenigen Stellen das Wasser bei allzu großem Andrang zusammen austreten zu lassen.

Außer in den Tunnels der Schweiz. Bundesbahnen ist Sikazementmörtel zur Verwendung gelangt bei der Abdichtung des großen Lötschbergtunnels, bei mehreren Tunnels der Bodensee-Toggenburgbahn, bei den elektrifizierten Strecken der Österreichischen Staatseisenbahn, sowie bei den Untergrundbahnen in Madrid

und London; neuerdings bei Tunnels der Deutschen Staatseisenbahn und bei dem langen Straßenbahntunnel in Genua.

Die Tatsache aber, daß seit den ersten Vorbereitungsarbeiten für die Elektrifikation der Schweiz. Bundesbahnen, namentlich nach den früheren, mannigfachen Versuchen mit allerlei verschiedenen Materialien innerhalb der letzten 11 Jahre in über 110 ihrer Tunnels Abdichtungen mit Sikazement ausgeführt wurden¹ und daß die damit gewonnenen Erfahrungsergebnisse auf zufriedenstellenden Erfolg schließen lassen, dürften doch sehr gewichtig für den praktischen Wert, die Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit des Sika-Zementmörtelverfahrens sprechen, bei dessen richtiger Anwendung für die Zwecke der Abdichtung von nassen Eisenbahntunnels.

¹ Nach einem mir gütigst vom Präs. d. Generaldirektion der S.B.B. überlassenen Detailverzeichnis.