

**Feststellungen über
das Verhalten von SIKKA-Dichtungen gegen-
über der Einwirkung kalkarmer oder gips-
haltiger Gebirgs-Wasser in den Tunneln der
Gotthardlinie der Schweiz. Bundesbahnen**

Von

Prof. Dr.-Ing. h. c. M. Roš

Berichtigter Neudruck



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH 1930

**Feststellungen über
das Verhalten von SIKA-Dichtungen gegen-
über der Einwirkung kalkarmer oder gips-
haltiger Gebirgs-Wasser in den Tunneln der
Gotthardlinie der Schweiz. Bundesbahnen**

Von

Prof. Dr.-Ing. h. c. M. Roš

Direktor der Eidg. Materialprüfungsanstalt
in Zürich

Mit einer Tafel

Berichtigter Neudruck



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH 1930

Additional material to this book can be downloaded from <http://extras.springer.com>

ISBN 978-3-662-32173-7

ISBN 978-3-662-33000-5 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-33000-5

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

I. Gegenstand und Zweck des Berichtes.

Wie die Erfahrung lehrt, wirken kalkarme, weiche Granitwasser sowie harte, gipshaltige Gebirgswasser zerstörend auf Mörtel und Beton aus Portlandzement oder aus hydraulischem Kalk.

Es ist daher von großem, technischem Werte, das Verhalten von Zementmörtel mit Beimengung von Sika gegenüber den vorgenannten zwei Arten von aggressiven Wassern in der Praxis feststellen zu können.

Das Gotthardmassiv weist hauptsächlich kalkarme Wasser mit etwas freier aggressiver Kohlensäure und vereinzelt auch ausgesprochene Gipswasser auf.

Anlässlich der Elektrifizierung der Gotthardlinie der Schweiz. Bundesbahnen wurden die Gewölbeausmauerungen von 111 Tunnels mit Zementmörtel mit Sikazusatz gegen Wasser und Nässe gedichtet.

Es bot sich somit am Gotthard die sehr wertvolle Gelegenheit, das Verhalten von Sikadichtungen in den Tunneln der Gotthardlinie der Schweiz. Bundesbahnen gegenüber einer zehnjährigen Einwirkung kalkarmer oder gipshaltiger Wasser einerseits durch die unmittelbaren Untersuchungen des Zustandes der Dichtungen und andererseits durch chemische Analysen der Tunnelwasser festzustellen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bilden den Gegenstand dieses Berichtes.

1. Gegenstand.

Einer eingehenden Untersuchung über den Zustand der mit Sika „3“ und „4“ gedichteten Gewölbeausmauerungen wurden nachfolgende Tunnels unterzogen:

Obere Entschigtalgalerie, Nordrampe	km 66,104
Naxbergtunnel, Nordrampe	„ 68,509

Gotthardtunnel	„	73,473
„	„	80,958
„	„	81,208
„	„	82,765
„	„	84,858
„	„	85,058
Stalvedrotunnel, Südrampe	„	87,630
„ „	„	87,768
Daziotunnel, Südrampe	„	98,686

An allen 11 angeführten Tunnelstellen wurden sorgfältig Wasserproben entnommen und eingehenden chemischen Analysen unterzogen. Die Begehung und Untersuchung des Tunnels sowie die Entnahme der Wasserproben am 23. und 24. Februar 1928 erfolgte durch die Herren

Schmid, Bahningenieur VI, Kreis II der S.B.B., Faido und
Prof. Dr. M. Roš, Direktor der E.M.P.A., Zürich.

Die chemischen Analysen der Tunnelwasser wurden an der Eidg. Materialprüfungsanstalt in Zürich nach Anordnung und unter der Aufsicht des Leiters der Abteilung für Technische Chemie und Brennstoffe, Herrn Prof. Dr. P. Schläpfer, durchgeführt.

2. Zweck.

Der Zweck der durchgeführten Untersuchungen ist erstens die Feststellung des Zustandes des mit Sika „3“ und „4“ gegen Gebirgswasser gedichteten Gewölbemauerwerkes der Tunnel nach Ablauf einer 8—10jährigen Frist und zweitens die Bestimmung der chemischen Beschaffenheit der aus dem Gebirge in die Tunnels an undichten Stellen eindringenden Wasser, um aus diesen Ergebnissen auf die Wirksamkeit der Sikaabdichtungen, unter besonderer Berücksichtigung der chemischen Aggressivität der Tunnelgebirgswasser und der jeweilig obwaltenden örtlichen Umstände, Schlüsse ziehen zu können.

3. Sika „3“ und „4“.

Die Dichtung von wasserdurchlässigen Mörtelfugen des Gewölbemauerwerkes und die Erneuerung der von aggressiven Wassern und Gasen zerfressenen und durch atmosphärische Einflüsse, namentlich die sprengende Wirkung von Eisbildung zer-

mürbten Verfugungen, wurde bei stark tropfenden, sickernden und selbst stark wasserdurchlässigen Gewölbemauerungen mit Sika „3“ vorgenommen.

An Stellen, wo durch fein zerklüftetes Mauerwerk oder zerklüfteten Felsen Gebirgswasser unter Druck durchsickerte, oft in Form von stärkeren Wasserstrahlen, wurde ein Zementmörtel-verputz mit Sika „4“ zur Anwendung gebracht.

4. Aggressive Wasser.

Zerstörend auf den hydraulischen Kalkmörtel oder Portlandzementmörtel der Fugen von Gewölbeausmauerungen in Tunnels wirken Gebirgswasser dreierlei Art:

kalkarme, weiche Granitwasser,
kohlensäurereiche Gebirgswasser und
Sulfatwasser des Kalkes und Magnesiums.

Kalkarme, weiche Granitwasser mit geringem Gehalt an aggressiver Kohlensäure gehören zu den gefährlichsten. Der beim Abbindeprozeß des hydraulischen Kalkmörtels oder Portlandzementmörtels an der Luft frei werdende oder unter Wasser in Lösung übergehende Kalk in Form von Kalkhydrat $\text{Ca}(\text{OH})_2$ wird von kalkarmen und kohlensäurearmen Granitwassern begierig aufgenommen. Die Ausscheidung des Kalkhydrates wird durch das stets neu zufließende kalkarme Gebirgswasser sehr angeregt und auf diese Weise der Kalk dem Mörtel entzogen, wodurch er porös und löcherig wird und schließlich zerfällt.

Enthalten kalkarme Gebirgswasser noch dazu ausreichend freie aggressive Kohlensäure, so findet eine Lösung des Kalkes im Mörtel in Form von Kalziumbikarbonat $\text{CaH}_2(\text{CO}_3)_2$ [bzw. von Magnesiumbikarbonat $\text{MgH}_2(\text{CO}_3)_2$] im kalkarmen, kohlensäurehaltigen Wasser statt, die durch die Kalkarmut eine sehr aktive Förderung erfährt und so den Verbund des Fugenmörtels bedroht, schwächt und schließlich zerstört.

Ist der Gehalt an freier aggressiver Kohlensäure nicht zu groß und auf die Kalkausscheidung abgestimmt, so bewirkt die Gegenwart von Kohlensäure die Bildung von Kalziumkarbonat CaCO_3 und es vollzieht sich ein die Poren abdichtender Erhärtungsprozeß, wodurch der Mörtel von einem weiteren zerstörenden Angriffe geschützt wird. Ein solcher Erhärtungsprozeß vollzieht sich allerdings weitaus häufiger und in der Regel bei kalk-

haltigen Wassern mit geringer Menge an freier aggressiver Kohlensäure.

Kalkhaltige, harte Gebirgswasser mit nicht allzu großer Menge an freier aggressiver Kohlensäure, bei denen die gebundene Kohlensäure in Form halbgebundener Kohlensäure vorhanden ist und bei denen die Erdalkalien als Bikarbonate, nämlich $\text{CaH}_2(\text{CO}_3)_2$ und $\text{MgH}_2(\text{CO}_3)_2$ im Wasser gelöst sind, fördern den Erhärtungsprozeß des Mörtels, indem sich die Bikarbonate des Kalziums bzw. Magnesiums mit dem aus dem Mörtel ausscheidenden Kalkhydrat zu Karbonaten des Kalziums, also zu einem kalk- bzw. dolomitartigen Gestein unter Wasserausscheidung verbinden. Zu Zerstörungserscheinungen irgendwelcher Art liegt kein Grund vor.

Bei kalkhaltigen, harten Wasserarten, welche jedoch größere Mengen freier aggressiver Kohlensäure enthalten, kann sich das Bestreben nach einem Erhärtungsprozeß im soeben geschilderten Sinne auf die Dauer nicht behaupten, indem die überschüssige freie aggressive Kohlensäure zur Bildung von Bikarbonaten des Kalkes bzw. Magnesiums Veranlassung gibt, welche im Wasser löslich sind. Ein solcher Prozeß verursacht ein Auslaugen des Kalkes aus dem Mörtel, wodurch seine Festigkeit und Widerstandsfähigkeit gegen mechanische und chemische Angriffe geschwächt wird. Da aber zur Erhaltung der halbgebundenen Kohlensäure der löslichen Doppelkarbonate ein gewisser Anteil der freien Kohlensäure als sog. zugehörige Kohlensäure unbedingt erforderlich ist und zudem das mit Kalk schon zum Teil gesättigte Wasser nicht sehr kalkhungrig ist, so wirken kalkhaltige Wasser mit freier Kohlensäure weniger auf den Mörtel zerstörend als kalkarme Wasser mit gleichviel aggressiver Kohlensäure.

Anmerkung. In einem vom Bodensatz befreiten Wasser kann die durch die chemische Analyse nachweisbare Kohlensäure in folgenden Formen zugegen sein:

Gesamtkohlensäure:

freie Kohlensäure

aggressive Kohlensäure,

zugehörige Kohlensäure;

gebundene Kohlensäure

festgebundene Kohlensäure,

halbgebundene Kohlensäure.

Die festgebundene Kohlensäure, sieht man von den praktisch unlöslichen Karbonaten des Kalziums CaCO_3 und Magnesiums MgCO_3 , die nur vom Bodensatz herrühren können, ab, kann nur von den Alkalisalzen, nämlich Soda Na_2CO_3 und Pottasche K_2CO_3 , herrühren. Während die CaCO_3 und MgCO_3 im Wasser praktisch nicht löslich sind, sind Na_2CO_3 und K_2CO_3 wasserlöslich.

Der festgebundenen Kohlensäure in Wassern, wie sie meistens im Bauwesen angetroffen werden, kommt keine bedeutende Rolle zu.

Die halbgebundene Kohlensäure rührt von den im Wasser in Form von Bikarbonaten gelösten Erdalkalien, somit von $\text{CaH}_2(\text{CO}_3)_2$ — Kalziumbikarbonat — und $\text{MgH}_2(\text{CO}_3)_2$ — Magnesiumbikarbonat — her.

Um diese Bikarbonate in Lösung zu halten, ist eine gewisse Menge der freien Kohlensäure, die sog. zugehörige Kohlensäure im Wasser, erforderlich. Die notwendige Menge dieser zugehörigen Kohlensäure ist desto größer, je mehr Erdalkali-Bikarbonate im Wasser enthalten sind oder je größer die vorübergehende Härte des Wassers ist.

Der noch verbleibende Teil der freien Kohlensäure entspricht dann der aggressiven Kohlensäure, welche für die Beurteilung eines Wassers auf seine Aggressivität allein in Betracht fällt.

Für die Ermittlung der Gesamthärte ist die Bestimmung des Gehaltes an Kalk CaO und Magnesia MgO erforderlich. Diese Bestandteile sind in den im Wasser löslichen Doppelcarbonaten und Sulfaten des Kalziums $\text{CaH}_2(\text{CO}_3)_2$ und CaSO_4 sowie des Magnesiums $\text{MgH}_2(\text{CO}_3)_2$ und MgSO_4 enthalten.

Für die Feststellung der vorübergehenden Härte ist noch die Bestimmung der Menge an Schwefelsäureanhydrid SO_3 unerlässlich, um durch Ausscheidung der an SO_3 gebundenen Mengen an CaO in Form von CaSO_4 und von MgO in Form von MgSO_4 die restlichen Mengen von Erdalkalibikarbonaten $\text{CaH}_2(\text{CO}_3)_2$ und $\text{MgH}_2(\text{MgO}_3)_2$, welche die halbgebundene Kohlensäure enthalten, feststellen zu können.

Kalksulfat (Gips) CaSO_4 in größeren Mengen als 0,30/00, d. h. 0,3 g per Liter Wasser, erweist sich als gefährlich für hydraulische Kalke und Portlandzemente. Magnesiumsulfat (Bittersalz), MgSO_4 ist in seiner Intensität und Aktivität träger. Für die gleiche zerstörende Wirkung auf Mörtelkörper aus hydraulischem Kalk oder Portlandzement bedarf es größerer Mengen an MgSO_4 und der Prozeß vollzieht sich im allgemeinen langsamer. MgSO_4 wirkt sich erst in Mengen größer als 20/00, d. h. 2 g im Liter Wasser, schädlich aus.

Bei beiden Sorten von Sulfatwassern erfolgt die Zerstörung vornehmlich durch das Treiben, die sprengende Wirkung infolge von chemischen Prozessen verbunden mit Volumenergrößerung, so bei Gips $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ durch Bildung von Kalzium-Sulfoaluminaten.

Aus diesen Darlegungen folgt, daß insbesondere kalkarme Gebirgswasser der Gletscher, welche Granitboden durchfließen, den Bestand von Mörteln aus hydraulischem Kalk oder Portlandzement stark gefährden und vollkommen zerstören können. Des ferneren, daß stark sulfathaltige Wasser des Kalziums und Magnesiums durch die sprengende Wirkung des Treibens gleichfalls Zerstörungen verursachen.

Um somit zu einer richtigen Einschätzung der Widerstandsfähigkeit von untersuchten Tunneldichtungen aus Zementmörtel mit Sikazusatz gegen die Einwirkung von Gebirgswassern zu gelangen, sind die genaueren chemischen Analysen der Tunnelwasser unerlässlich, weshalb sie auch sehr sorgfältig und eingehend durchgeführt worden sind.

II. Ergebnisse der Tunneluntersuchungen.

1. Chemische Beschaffenheit der Gebirgswasser.

Die Ergebnisse der chemischen Analysen der Wasser aus den 5 Tunnels, an 11 verschiedenen Stellen entnommen, sind jeweils in den nachfolgenden Attesten zusammengestellt. Die Analysen sind so weitgehend durchgeführt, daß die Wasser ausreichend charakterisiert werden konnten.

Mit Ausnahme des einen Wassers aus dem Gotthardtunnel km 73,478, welches ein hartes und ausgesprochenes Gipswasser ist sowie noch weiterer zwei schwach mittelharter Wasser bei km 84,858 und km 85,058, gleichfalls aus dem Gotthardtunnel, dürfen alle übrigen Wasser als weiche Granitwasser mit mäßigem oder keinem Gehalt an aggressiver Kohlensäure bezeichnet werden.

Der Längenschnitt des Bahntracés mit Angabe der Tunnelstellen gibt über geologische Verhältnisse Aufschluß.

Die Ergebnisse der Wasseranalysen werden nachfolgend abschnittsweise kurzen Besprechungen gewürdigt.

Eidgenössische Materialprüfungsanstalt

an der Eidg. Technischen Hochschule in Zürich.

Laboratoire fédéral d'essai des matériaux, annexé à l'Ecole polytechnique fédérale à Zurich.

Obere Entschigtalgalerie Höhe über Meer 1008,50, Granitgebiet. Überlagerung: Alpboden nicht bewirtschaftet, ca. 8 m stark. Wasser vom rechten Widerlager, km 66,104.

Das untersuchte Wasser ist sehr weich; es ist gipsfrei und praktisch chlorfrei. Die Menge der aggressiven Kohlensäure beträgt 2,2 mg im Liter Wasser.

Chemische Analyse des Wassers von der Entschigtalgalerie km 66,104, rechtes Widerlager.

Aussehen des Wassers farblos klar

Reaktionen

auf Lackmus	neutral
auf Phenolphthalein	sauer
auf Methylorange	alkalisch
Trockenrückstand, mg/l	27,6
Glührückstand, mg/l	18,4
Glühverlust, mg/l	9,2

Französische Härtegrade:

Magnesiahärte	0,5
Kalkhärte	<u>0,5</u>
Gesamthärte	1,0
vorübergehende Härte	1,0
bleibende Härte	0,0
Natriumbikarbonat, ausgedrückt in mg Natriumkarbonat pro l	—
Chloride, ausgedrückt in mg Chlor pro l	keine
Nitrate, ausgedrückt in mg N_2O_5 pro l	1,1
Sulfate, ausgedrückt in mg SO_3 pro l	4,9
Kieselsäureanhydrid, mg SiO_2 pro l	2,4
freie Kohlensäure, mg CO_2 pro l	2,2
aggressive Kohlensäure, mg CO_2 pro l	2,2
Kalziumkarbonat, mg/l	5
Magnesiumkarbonat, mg/l	4,2
Kalziumsulfat, mg/l	0
Magnesiumsulfat, mg/l	0
Natriumkarbonat, mg/l	0
Natriumsulfat, mg/l	8,7
Natriumchlorid, mg/l	0
Natriumnitrat, mg/l	1,7
Kieselsäureanhydrid, mg/l	2,4
<u>Total</u>	<u>22,0 mg/l</u>

Naxbergtunnel, Höhe über Meer 1065,61, Granitgebiet, Frostzone. Wasser vom Südportal, rechtes Widerlager, km 68,509.

Das untersuchte Wasser ist sehr weich; es ist gipsfrei und praktisch chlorfrei. Die Menge der aggressiven Kohlensäure beträgt 5,4 mg im Liter Wasser.

Chemische Analyse vom Wasser des Naxbergtunnels km 68,509, Südportal, rechtes Widerlager.

Aussehen des Wassers	farblos klar
Reaktionen	
auf Lackmus	neutral
auf Phenolphthalein	sauer
auf Methylorange	alkalisch
Trockenrückstand, mg/l	23,6
Glührückstand, mg/l	20,0
Glühverlust, mg/l	3,6
Französische Härtegrade:	
Magnesiahärte	0,4
Kalkhärte	<u>0,8</u>
Gesamthärte	1,2
vorübergehende Härte	1,2
bleibende Härte	0,0
Natriumbikarbonat, ausgedrückt in mg Natriumkarbonat pro l	—
Chloride, ausgedrückt in mg Chlor pro l	keine
Nitrate, ausgedrückt in mg N_2O_5 pro l	0,7
Sulfate, ausgedrückt in mg SO_3 pro l	5,5

Kieselsäureanhydrid, mg SiO ₂ pro l	4,4
freie Kohlensäure, mg CO ₂ pro l	5,5
aggressive Kohlensäure, mg CO ₂ pro l	5,4
Kalziumkarbonat, mg/l	8
Magnesiumkarbonat, mg/l	3,3
Kalziumsulfat, mg/l	0
Magnesiumsulfat, mg/l	0
Natriumkarbonat, mg/l	0
Natriumsulfat, mg/l	9,8
Natriumchlorid, mg/l	0
Natriumnitrat, mg/l	1,1
Kieselsäureanhydrid, mg/l	4,4
Total	26,6 mg/l

Gotthardtunnel, Höhe über Meer 1154,5, km 73,478, rechtes
Widerlager, Kalkzone.

Das untersuchte Wasser ist ein ausgesprochenes Gipswasser mit 0,553 mg Kalziumsulfat CaSO₂ im Liter Wasser.

Es ist ein sehr hartes Wasser, welches auch Natriumchlorid enthält. Die vorhandene freie Kohlensäure ist zur Inlösunghaltung der Erdalkali-Bikarbonate erforderlich, weshalb aggressive Kohlensäure nicht vorhanden ist.

Chemische Analyse des Wassers vom Gotthardtunnel km 73,478, rechtes
Widerlager.

Aussehen des Wassers	farblos klar
Reaktionen	
auf Lackmus	neutral
auf Phenolphthalein	sauer
auf Methylorange	alkalisch
Trockenrückstand, mg/l	1266,8
Glührückstand, mg/l	1084,4
Glühverlust, mg/l	182,4
Französische Härtegrade:	
Magnesiahärte	18,1
Kalkhärte	40,7
Gesamthärte	58,8
vorübergehende Härte	16,9
bleibende Härte	41,9
Natriumbikarbonat, ausgedrückt in mg Natriumkarbonat pro l	—
Chloride, ausgedrückt in mg Chlor pro l	9,8
Nitrate, ausgedrückt in mg N ₂ O ₅ pro l	0,8
Sulfate, ausgedrückt in mg SO ₃ pro l	513,8
Kieselsäureanhydrid, mg SiO ₂ pro l	16,8
freie Kohlensäure, mg CO ₂ pro l	3,3
aggressive Kohlensäure, mg CO ₂ pro l	keine
Kalziumkarbonat, mg/l	0
Magnesiumkarbonat, mg/l	142,4
Kalziumsulfat, mg/l	553,5

Magnesiumsulfat, mg/l	14,4
Natriumkarbonat, mg/l	0
Natriumsulfat, mg/l	317,5
Natriumchlorid, mg/l	16,1
Natriumnitrat, mg/l	1,3
Kieselsäureanhydrid, mg/l	16,8
<u>Total</u>	<u>1062,0 mg/l</u>

Gotthardtunnel, Höhe über Meer 1154,5, km 80,958, Mischung von Sellagneis und quarzitischem Gneis in schmalen Streifen. Grenzzone. Wasser dem Scheitel entnommen (Quelle).

Das untersuchte Wasser ist sehr weich, gipsfrei und ohne freie Kohlensäure. Die Menge des Natriumbikarbonates beträgt 31,8 mg per Liter und rührt aller Wahrscheinlichkeit nach von verwitterten Gneispartien her.

Chemische Analyse des Wassers vom Gotthardtunnel km 80,958, Scheitel.

Aussehen des Wassers farblos klar

Reaktionen

auf Lackmus	neutral
auf Phenolphthalein	alkalisch
auf Methylorange	alkalisch

Trockenrückstand, mg/l	112,0
Glührückstand, mg/l	89,6
Glühverlust, mg/l	22,4

Französische Härtegrade:

Magnesiaihärte	0,8
Kalkhärte	0,2
Gesamthärte	1,0
vorübergehende Härte	1,0
bleibende Härte	0,0

Natriumbikarbonat, ausgedrückt in mg Natriumkarbonat pro l	31,8
Chloride, ausgedrückt in mg Chlor pro l	0,5
Nitrate, ausgedrückt in mg N ₂ O ₅ pro l	0,7
Sulfate, ausgedrückt in mg SO ₃ pro l	25,6
Kieselsäureanhydrid, mg SiO ₂ pro l	15,6
freie Kohlensäure, in mg CO ₂ pro l	keine
aggressive Kohlensäure, in mg CO ₂ pro l	keine
Kalziumkarbonat, mg/l	2
Magnesiumkarbonat, mg/l	6,7
Kalziumsulfat, mg/l	0
Magnesiumsulfat, mg/l	0
Natriumkarbonat, mg/l	31,8
Natriumsulfat, mg/l	45,5
Natriumchlorid, mg/l	0,8
Natriumnitrat, mg/l	1,1
Kieselsäureanhydrid, mg/l	15,6
<u>Total</u>	<u>103,5 mg/l</u>

Gotthardtunnel, Höhe über Meer 1154,5, km 81,208, quarzitischer Sellagneis. Wasser dem Scheitel entnommen.

Das untersuchte Wasser ist sehr weich, gipsfrei und ohne freie Kohlensäure. Die Menge des Natriumbikarbonates beträgt 15,9 mg und rührt aller Wahrscheinlichkeit nach von verwitterten Gneispartien her.

Chemische Analyse des Wassers vom Gotthardtunnel km 81,208, Scheitel.
Aussehen des Wassers farblos klar
Spuren flockiger brauner Bodensatz

Reaktionen	
auf Lackmus	neutral
auf Phenolphthalein	alkalisch
auf Methylorange	alkalisch
Trockenrückstand, mg/l	116,4
Glührückstand, mg/l	104,0
Glühverlust, mg/l	12,4
Französische Härtegrade:	
Magnesiaihärte	1,1
Kalkhärte	0,9
Gesamthärte	2,0
vorübergehende Härte	2,0
bleibende Härte	0,0
Natriumbikarbonat, ausgedrückt in mg Natriumkarbonat pro l	15,9
Chloride, ausgedrückt in mg Chlor pro l	0,5
Nitrate, ausgedrückt in mg N_2O_5 pro l	0,6
Sulfate, ausgedrückt in mg SO_3 pro l	25,9
Kieselsäureanhydrid, mg SiO_2 pro l	14,4
freie Kohlensäure, mg CO_2 pro l	keine
aggressive Kohlensäure, mg CO_2 pro l	keine
Kalziumkarbonat, mg/l	9
Magnesiumkarbonat, mg/l	9,3
Kalziumsulfat, mg/l	0
Magnesiumsulfat, mg/l	0
Natriumkarbonat, mg/l	15,9
Natriumsulfat, mg/l	46,0
Natriumchlorid, mg/l	0,8
Natriumnitrat, mg/l	0,9
Kieselsäureanhydrid, mg/l	14,4
Total	96,3 mg/l

Gotthardtunnel, Höhe über Meer 1154,5, km 82,765, linkes Widerlager. Stark gemischte Zone mit verschiedenen Spezies Glimmerschiefer.

Das untersuchte Wasser ist sehr weich und gipsfrei. Die Menge der freien Kohlensäure ist gering. Natriumbikarbonat ist in einer Menge von 26,5 mg per Liter Wasser enthalten. Er rührt höchstwahrscheinlich von verwitterten Partien des Glimmerschiefers her.

Chemische Analyse des Wassers vom Gotthardtunnel km 82,765, linkes
Widerlager.

Aussehen des Wassers	farblos klar
Reaktionen	
auf Lackmus	neutral
auf Phenolphthalein	sauer
auf Methylorange	alkalisch
Trockenrückstand, mg/l	114,8
Glührückstand, mg/l	111,6
Glühverlust, mg/l	3,2
Französische Härtegrade:	
Magnesiahärte	1,2
Kalkhärte	1,8
Gesamthärte	3,0
vorübergehende Härte	3,0
bleibende Härte	0,0
Natriumbikarbonat, ausgedrückt in mg Natriumkarbonat pro l .	26,5
Chloride, ausgedrückt in mg Chlor pro l	0,3
Nitrate, ausgedrückt in mg N_2O_5 pro l	0,7
Sulfate, ausgedrückt in mg SO_3 pro l	26,8
Kieselsäureanhydrid, mg SiO_2 pro l	9,6
freie Kohlensäure, mg CO_2 pro l	1,1
aggressive Kohlensäure, mg CO_2 pro l	0,3
Kalziumkarbonat, mg/l	18
Magnesiumkarbonat, mg/l	10,1
Kalziumsulfat, mg/l	0
Magnesiumsulfat, mg/l	0
Natriumkarbonat, mg/l	26,5
Natriumsulfat, mg/l	47,6
Natriumchlorid, mg/l	0,5
Natriumnitrat, mg/l	1,1
Kieselsäureanhydrid, mg/l	9,6
<u>Total</u>	<u>113,4 mg/l</u>

Gotthardtunnel, Höhe über Meer 1154,5, km 84,858, rechtes
Widerlager, Frostzone. Stark gemischte Zone mit verschiedenen
Spezies Glimmerschiefer.

Das untersuchte, einer starken Quelle entspringende Wasser
weist einen schwach mittleren Härtegrad auf. Es enthält geringe
Mengen Gips und Chlor sowie nennenswerte Mengen Erdalkali-
Bikarbonate in Form vorübergehender Härte. Der Gehalt an
aggressiver Kohlensäure ist sehr gering.

Chemische Analyse des Wassers vom Gotthardtunnel km 84,858, rechtes
Widerlager.

Aussehen des Wassers	farblos klar
Reaktionen	
auf Lackmus	neutral
auf Phenolphthalein	sauer
auf Methylorange	alkalisch

Trockenrückstand, mg/l	194,4
Glührückstand, mg/l	160,0
Glühverlust, mg/l	34,4
Französische Härtegrade:	
Magnesiahärte	3,4
Kalkhärte	8,5
Gesamthärte	11,9
vorübergehende Härte	9,2
bleibende Härte	2,7
Natriumbikarbonat, ausgedrückt in mg Natriumkarbonat pro l	—
Chloride, ausgedrückt in mg Chlor pro l	0,3
Nitrate, ausgedrückt in mg N ₂ O ₅ pro l	0,7
Sulfate, ausgedrückt in mg SO ₃ pro l	46,2
Kieselsäureanhydrid, mg SiO ₂ pro l	12,0
freie Kohlensäure, mg CO ₂ pro l	2,2
aggressive Kohlensäure, mg CO ₂ pro l	0,4
Kalziumkarbonat, mg/l	58
Magnesiumkarbonat, mg/l	28,8
Kalziumsulfat, mg/l	36,7
Magnesiumsulfat, mg/l	0
Natriumkarbonat, mg/l	0
Natriumsulfat, mg/l	43,7
Natriumchlorid, mg/l	0,5
Natriumnitrat, mg/l	1,1
Kieselsäureanhydrid, mg/l	12,0
<u>Total</u>	<u>180,8 mg/l</u>

Gotthardtunnel, Höhe über Meer 1154,5, km 85,058, rechtes Widerlager, Frostzone. Stark gemischte Zone mit verschiedenen Spezies Glimmerschiefer.

Das untersuchte Wasser weist einen schwach mittleren Härtegrad auf. Es enthält geringe Mengen Gips und Chlor sowie nennenswerte Mengen Erdalkali-Bikarbonate (vorübergehende Härte). Der Gehalt an aggressiver Kohlensäure ist sehr gering.

Chemische Analyse des Wassers vom Gotthardtunnel km 85,058, rechtes Widerlager.

Aussehen des Wassers	farblos klar
Reaktionen	
auf Lackmus	neutral
auf Phenolphthalein	sauer
auf Methylorange	alkalisch
Trockenrückstand, mg/l	172,8
Glührückstand, mg/l	147,6
Glühverlust, mg/l	25,2
Französische Härtegrade:	
Magnesiahärte	3,4
Kalkhärte	8,5
Gesamthärte	11,9
vorübergehende Härte	8,9
bleibende Härte	3,0

Natriumbikarbonat, ausgedrückt in mg Natriumkarbonat pro l	—
Chloride, ausgedrückt in mg Chlor pro l	0,5
Nitrate, ausgedrückt in mg N ₂ O ₅ pro l	0,7
Sulfate, ausgedrückt in mg SO ₃ pro l	41,7
Kieselsäureanhydrid, mg SiO ₂ pro l	7,2
freie Kohlensäure, mg CO ₂ pro l	2,2
aggressive Kohlensäure, mg CO ₂ pro l	0,5
Kalziumkarbonat, mg/l	55
Magnesiumkarbonat, mg/l	28,8
Kalziumsulfat, mg/l	40,8
Magnesiumsulfat, mg/l	0
Natriumkarbonat, mg/l	0
Natriumsulfat, mg/l	29,7
Natriumchlorid, mg/l	0,8
Natriumnitrat, mg/l	1,1
Kieselsäureanhydrid, mg/l	7,2
Total	163,4 mg/l

Stalvedrotunnel, Höhe über Meer 1116,25. Glimmerschiefer, Frostzone. Wasser vom Nordportal, rechtes Widerlager, km 87,630, und rechtes Widerlager, km 87,768.

Die zwei untersuchten Wasser unterscheiden sich nicht sehr stark voneinander. Sie sind sehr weich, gips- und chlorfrei. Gehalt an aggressiver Kohlensäure 0,8—2,1 mg per Liter Wasser.

Chemische Analyse des Wassers vom Stalvedrotunnel ca. 50 m vom Nordportal, rechtes Widerlager, km 87,630.

Aussehen des Wassers farblos klar,
Spuren flockiger grauer Bodensatz

Reaktionen

auf Lackmus	neutral
auf Phenolphthalein	sauer
auf Methylorange	alkalisch
Trockenrückstand, mg/l	73,6
Glührückstand, mg/l	61,2
Glühverlust, mg/l	12,4

Französische Härtegrade:

Magnesiähärte	1,1
Kalkhärte	<u>3,3</u>
Gesamthärte	4,4
vorübergehende Härte	4,4
bleibende Härte	0,0
Natriumbikarbonat, ausgedrückt in mg Natriumkarbonat pro l	—
Chloride, ausgedrückt in mg Chlor pro l	keine
Nitrate, ausgedrückt in mg N ₂ O ₅ pro l	0,7
Sulfate, ausgedrückt in mg SO ₃ pro l	12,6
Kieselsäureanhydrid, mg SiO ₂ pro l	11,2
freie Kohlensäure, mg CO ₂ pro l	2,6
aggressive Kohlensäure, mg CO ₂ pro l	2,1

Kalziumkarbonat, mg/l	33
Magnesiumkarbonat, mg/l	9,3
Kalziumsulfat, mg/l	0
Magnesiumsulfat, mg/l	0
Natriumkarbonat, mg/l	0
Natriumsulfat, mg/l	22,4
Natriumchlorid, mg/l	0
Natriumnitrat, mg/l	1,1
Kieselsäureanhydrid, mg/l	11,2
<u>Total</u>	<u>77,0 mg/l</u>

Chemische Analyse des Wassers vom Stalvedrotunnel km 87,768, rechtes
Widerlager.

Aussehen des Wassers farblos klar

Reaktionen

auf Lackmus	neutral
auf Phenolphthalein	sauer
auf Methylorange	alkalisch
Trockenrückstand, mg/l	54,0
Glührückstand, mg/l	47,2
Glühverlust, mg/l	6,8

Französische Härtegrade:

Magnesiahärte	0,8
Kalkhärte	<u>2,7</u>
Gesamthärte	3,5
vorübergehende Härte	3,5
bleibende Härte	0,0

Natriumbikarbonat, ausgedrückt in mg Natriumkarbonat pro l	—
Chloride, ausgedrückt in mg Chlor pro l	keine
Nitrate, ausgedrückt in mg N ₂ O ₅ pro l	0,8
Sulfate, ausgedrückt in mg SO ₃ pro l	7,7
Kieselsäureanhydrid, mg SiO ₂ pro l	2,0
freie Kohlensäure, mg CO ₂ pro l	1,1
aggressive Kohlensäure, mg CO ₂ pro l	0,8
Kalziumkarbonat, mg/l	27
Magnesiumkarbonat, mg/l	6,7
Kalziumsulfat, mg/l	0
Magnesiumsulfat, mg/l	0
Natriumkarbonat, mg/l	0
Natriumsulfat, mg/l	13,7
Natriumchlorid, mg/l	0
Natriumnitrat, mg/l	1,3
Kieselsäureanhydrid, mg/l	2,0
<u>Total</u>	<u>50,7 mg/l</u>

Daziotunnel, Höhe über Meer 932,50. Gneisgebiet, Frostzone.
Felsüberlagerung mit nackter Oberfläche. Wasser vom linken
Widerlager, km 98,686.

Das untersuchte Wasser ist sehr weich; es ist gips- und chlorfrei.
Der Gehalt an aggressiver Kohlensäure beträgt 1,6 mg im Liter Wasser.

Chemische Analyse des Wassers vom Daziotunnel km 98,686, linkes Widerlager.

Aussehen des Wassers farblos klar

Reaktionen

auf Lackmus	neutral
auf Phenolphthalein	sauer
auf Methylorange	alkalisch
Trockenrückstand, mg/l	36,0
Glührückstand, mg/l	24,0
Glühverlust, mg/l	12,0

Französische Härtegrade:

Magnesiahärte	0,9
Kalkhärte	1,6
Gesamthärte	2,5
vorübergehende Härte	2,5
bleibende Härte	0,0

Natriumbikarbonat, ausgedrückt in mg Natriumkarbonat pro l —

Chloride, ausgedrückt in mg Chlor pro l keine

Nitrate, ausgedrückt in mg N_2O_5 pro l 0,7Sulfate, ausgedrückt in mg SO_3 pro l 5,4Kieselsäureanhydrid, mg SiO_2 pro l 4,4freie Kohlensäure, mg CO_2 pro l 2,2aggressive Kohlensäure, mg CO_2 pro l 1,6

Kalziumkarbonat, mg/l 16

Magnesiumkarbonat, mg/l 7,6

Kalziumsulfat, mg/l 0

Magnesiumsulfat, mg/l 0

Natriumkarbonat, mg/l 0

Natriumsulfat, mg/l 9,6

Natriumchlorid, mg/l 0

Natriumnitrat, mg/l 1,1

Kieselsäureanhydrid, mg/l 4,4

Total	38,7 mg/l
-------	-----------

2. Zustand des mit Sika „3“ und „4“ gedichteten Gewölbemauerwerkes.

Die Untersuchung des Naxbergtunnels, der oberen Entschigtal-galerie, des Stalvedrotunnels und des Daziotunnels erfolgte am 23. Februar 1928, bei sonnigem, kaltem Wetter. Die Temperatur in den Tunnels schwankte zwischen -2 und $+2^\circ C$.

Der Gotthardtunnel wurde am 24. Februar 1928 bei gleichfalls sonnigem, kaltem Wetter besichtigt. Die mittlere Temperatur im Tunnel bewegte sich um $+10^\circ C$.

Die Dichtungen mit Sika-Portlandzementmörtel erfolgten über den elektrischen Fahrleitungen in Streifen, von im Mittel 2,40 m Breite. Sämtliche mit Sika abgedichteten Stellen haben sich seit ihrer Fertigstellung in den Jahren 1917—1919 bis Februar 1928, also während einer Dauer von im Mittel 10 Jahren, als dicht und

wasserabweisend erwiesen. Die mit Sika gedichteten Stellen sind, insbesondere gegen das Tageslicht gesehen, von freiem Auge sofort zu erkennen. Das früher an den gedichteten Stellen herausickernde Wasser suchte sich nach erfolgter Dichtung den Durchgang durch die Fugen des angrenzenden, nicht abgedichteten Gewölbemauerwerkes zu verschaffen und sickert auch hier durch. Diese typische Erscheinung konnte in allen untersuchten Tunnels konstatiert werden. Sie tritt aber in ganz ausgesprochener Weise hervor bei den Tunneln von Stalvedro und Naxberg sowie bei der Entschigtalgalerie, die alle über den elektrischen Fahrdrathleitungen sich als dicht erwiesen, während die seitlichen Partien sehr naß sind.

An sehr vielen Stellen ist der von der Erbauung des Tunnelmauerwerkes herrührende hydraulische Kalkmörtel der Gewölbefugen, teilweise infolge der Einwirkung der Lokomotivrauchgase vor der Elektrifizierung (1919) und teilweise infolge der Einwirkung der kalkarmen Tunnelwasser, stark angegriffen und teilweise ganz zersetzt, während sich der Mörtel der Sikaverfugungen in den verflossenen rund 10 Jahren sehr gut gehalten hat. Solche Stellen konnten im Naxbergtunnel und im stark zerklüfteten Daziotunnel, welch letzterer in bezug auf Nässe zu den schlimmsten gehört, beobachtet werden. An diesen Stellen aus den Fugen des Gewölbemauerwerkes herausgemeißelte Stücke von Sikazementmörtel haben sich auf die ganze Fugentiefe als vollständig gesund erwiesen.

Sehr große Partien im Gotthardtunnel sind mit Sikazementmörtel mit Erfolg gedichtet worden. Es ist aber auch hier das durchsickernde Gebirgswasser von diesen gedichteten Stellen an die angrenzenden Seitenflächen verdrängt worden.

III. Schlußfolgerungen.

Die in den untersuchten vorerwähnten 5 Tunneln der Gotthardlinie der Schweizer Bundesbahnen in den Jahren 1917—1919 unter oft sehr schwierigen und ungünstigen Verhältnissen (starker Luftzug, Nässe, Kälte, Lokomotivrauchgase) ausgeführten Dichtungen in Portlandzementmörtel mit Zusatz von Sika „3“ und Sika „4“ haben sich bis heute, nach Ablauf einer rund 10jährigen Frist, selbst unter den abwechselnd sehr ungünstigen örtlichen Verhältnissen (Nässe, Wärme, Frost), die sehr hohe Anforderungen an Dichtungsmittel stellen, sowohl in bezug auf die Wetter-

beständigkeit und Dichtigkeit des Gewölbemauerwerkes, als auch was den Widerstand gegen die Aggressivität der kalkhungrigen Gebirgswasser der Granit- bzw. Gneisböden sowie den Widerstand gegen den Angriff ausgesprochener Gipswasser betrifft, mit Erfolg behauptet und sehr gut bewährt.

Hervorzuheben ist, daß die Ausführung der Sika-Dichtungsarbeiten unter sachkundiger Aufsicht der Schweizer Bundesbahnen von mit Sikaprodukten vertrauten Arbeitern sehr sorgfältig und sachgemäß erfolgte.

Additional material from *Feststellungen über das Verhalten von SIKA-Dichtungen gegenüber der Einwirkung kalkarmer oder gipshaltiger Gebirgs-Wasser in den Tunneln der Gotthardlinie der Schweiz. Bundesbahnen*, ISBN 978-3-662-32173-7, is available at <http://extras.springer.com>

