Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 117 (1999)
Heft: 1/2

Artikel: Korrosionstechnische Untersuchungen an Elementträgern
Autor: Hunkeler, Fritz / Ungricht, Heidi / Matt, Peter
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-79682

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 29.07.2025

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

Am Bau Beteiligte

- Bauherr und Oberbauleitung:

Baudirektion Kanton Zürich, Tiefbauamt, Abteilung Brücken

- Projekt und örtliche Bauleitung:

Edy Toscano AG, Ingenieure und Planer, Winterthur

- Bauunternehmung:

Arge Überdeckung Töss mit:
Lerch AG, Bauunternehmung, Winterthur
AG Heinrich Hatt-Haller, Zürich
Eberhard Bau AG, Kloten

Dem Risiko von Hochwasserschäden wurde mit aufwendigen Wasserhaltungsmassnahmen, bestehend aus provisorischen Gerinnen, Klappwehren, Pegelmessungen mit automatischer Alarmierung von Pikettmannschaften sowie der Bereitstellung von Geräten und Sicherungsmaterial, begegnet.

Erschliessung Töss-Sohle

Eine besondere Knacknuss stellten das Erschliessungskonzept und die Arbeitsabwicklung auf der Ebene Töss dar. Neben der von einigen wenigen bis zu 330 m^3/s variierenden Abflussmenge der Töss und der Forderung einer kurzfristigen Räumung der Sohle von Geräten und Materialien bei Hochwassergefahr, erschwerten verschiedene weitere Bauarbeiten das Vorgehen.

Rückbau der Überdeckung

Wegen extremer Druckspannungen in den Untergurten der Elementträger nach deren teilweiser Entlastung und Abstützung auf der provisorischen Mittelwand mussten vor dem Durchtrennen von Elementträgern und Deckenplatte gezielte Entlastungsbohrungen und Trennschweissungen durch Teile der Spannbewehrung geführt werden. Die 33 Deckenelemente, bestehend aus 5 Elementträgern, Ortbetonplatte und zugehörigen Querträgern wurden auf Vorschlag der Arge mit einem Betonbeisser abgebrochen. Vor dieser Arbeit wurden die Abbruchzustände im Detail bezüglich Gleichgewicht analysiert und Abbruchdrehbücher erstellt. In den Endphasen des Abbruchs der einzelnen Deckenfelder mussten zusätzliche Abstützungen vorgenommen werden.

Dank detaillierter Arbeitsplanung und dem grossen Engagement aller Beteiligten konnte das neue Überdeckungsbauwerk in guter Qualität termingerecht der Bauherrschaft übergeben werden.

Adresse der Verfasser:
Ueli Reber, dipl. Bauing. ETH/SIA, *Reto Zibung*, dipl. Bauing. HTL, Edy Toscano AG, Ingenieure und Planer, Ruhtalstrasse 12, 8400 Winterthur

Fritz Hunkeler und Heidi Ungricht, Wildegg, Peter Matt, Ittigen

Korrosionstechnische Untersuchungen an Elementträgern

Keine der heute bekannten zerstörungsfreien bzw. -armen Untersuchungsmethoden gibt umfassend Auskunft über den Schädigungsgrad an Spannstählen durch Korrosion. Als Hilfsmittel für eine zielgerichtete Arbeitsweise bei der Zustandserfassung und -beurteilung und ein frühzeitiges Erkennen von Problemfällen kann die Definition von Gefährdungsbildern für Korrosion an Spannstählen dienen.

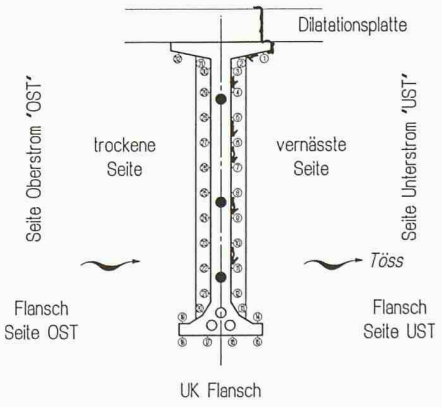
Die Überprüfung solcher Gefährdungsbilder ist nur an abzubrechenden Objekten möglich. Nach dem Entscheid, das Bauwerk A 1.1.4, Umfahrung Winterthur, abzubrechen (S. 2 ff.), ermöglichte das Tiefbauamt des Kantons Zürich detaillierte Untersuchungen an drei ausgebauten Elementträgern der Überdeckung Töss.

Mit den Untersuchungen an den Versuchsträgern und weiteren Analysen an Hüllrohren, Drähten und am Injektionsgut von elf Spanngliedabschnitten aus dem übrigen Brückenabbruch an der Empa konnten die Zustandserfassungen der Jahre 1993/94 verfeinert und ergänzt sowie die Grundlagen zur Beurteilung verschiedener Untersuchungsmethoden verbessert werden.

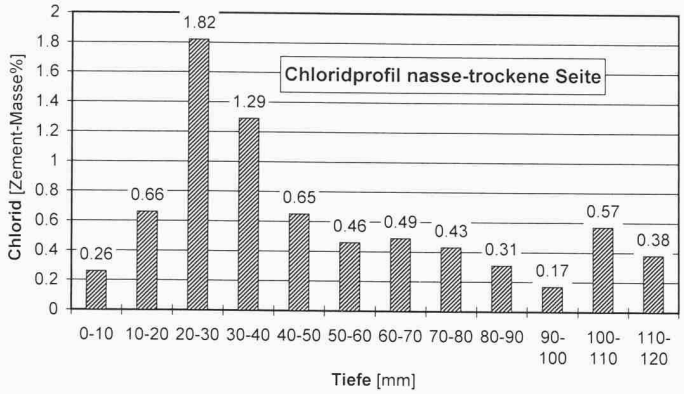
Art und Umfang der Untersuchungen

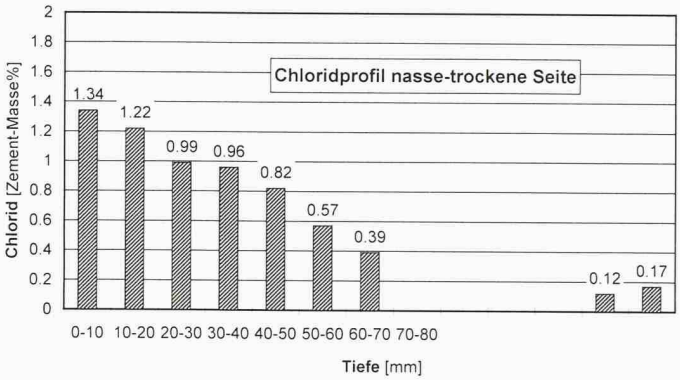
Die drei stark beschädigten, 12 m langen Elementträgerhälften wurden sorgfältig ausgebaut, auf dem Installationsplatz gelagert und folgenden Untersuchungen unterzogen:

- Potentialmessungen in einem Messraster von 0,15 × 0,15 m über die ganze Trägerfläche mit Ausnahme der Oberfläche des oberen Flansches (Bild 1)
- Entnahme und Analyse von Bohrkernen: Chloridprofile, Karbonatisierungstiefen und Porositäten
- Öffnung von verschiedenen Sondierungen zum Bestimmen der Überdeckung, des Korrosionsgrads der Bewehrung, der Hüllrohre aussen und innen, der Spanndrähte sowie des Zustands der Injektion
- Weitere Chloridanalysen am Injektionsgut
- Entnahme und Analyse je eines Bohrkerns pro Träger, Durchmesser 20 cm, Bohrung durch das Spannglied
- Schliesslich wurden bei der Zerlegung der Träger jeweils alle drei Spannglieder ausgebaut und über ihre gesamte Länge von aussen und zum Teil auch von innen inspiziert



1
Versuchsträger mit eingetragenem Messraster der Potentialmessung.
Ausgefüllte Hüllrohre: Lage im Auflagerbereich, leere Hüllrohre: Lage im Feldbereich





2 und 3
Typische Chloridprofile aus dem Steg

- An der Empa wurden elf Kabelabschnitte aus verschiedenen Trägern, die während der Abbrucharbeiten beiseite gelegt worden waren, korrosionschemisch und mechanisch untersucht
- Vor dem Abbruch führte die Empa an zwei Spanngliedern Dehnungsmessungen zur Feststellung der vorhandenen Restspannung durch. Die Resultate dieser Messungen sind nicht Gegenstand dieses Artikels.

Die Träger boten ferner Gelegenheit, verschiedene Geräte zur Bestimmung der Eisenüberdeckung und die Impact-Echo-Methode zur Bestimmung von Hohlstellen im Injektionsgut zu testen.

Untersuchungsresultate

Die Potentialmessung bestimmte die Entnahmestellen für die Bohrkerne und die Lage der Sondierungen. Zahlreiche Bohrkerne waren in rund 15 bis 30 mm Tiefe gebrochen. Obwohl es schwierig ist, Hohlstellen in dieser Tiefe durch Abklopfen festzustellen, konnten relativ grossflächige, oberflächenparallele Delaminationen lokalisiert werden.

Chloridgehalt im Beton

Es sind einige typische Chloridprofile aus den Stegen bzw. Flanschen zusammengestellt: Bilder 2 und 3 zeigen typische Chloridprofile für den Steg. Der Chloridgehalt war auf der «nassen» Trägerseite sehr hoch (bis zu 3,6% der Zementmasse in 10 bis 30 mm Tiefe), nahm zur trockenen Seite hin stark ab und stieg zur trockenen Oberfläche hin wieder leicht an. Vor allem bei den Profilen mit viel Chlorid wurde das Maximum erst in 10 bis 20 oder 20 bis 30 mm, teilweise sogar erst in 30 bis 40 mm Tiefe erreicht.

In den Flanschen fanden sich generell hohe Chloridgehalte (Bilder 4 bis 6). Die «nasse» Trägerseite enthielt mehr Chloride als die direkt gegenüber liegende «trockene» Seite (Bilder 4 bis 7). Auf der «nassen» Seite wurden beim Flansch Chloridgefälle in beiden Richtungen festgestellt (abnehmende Gehalte von unten nach oben und von oben nach unten, Bilder 4 und 6).

Chloridgehalt im Injektionsgut

Die Entnahme des Injektionsguts erfolgte anlässlich der Ausführung der Sondierungen. Dabei wurde möglichst viel Injektionsgut aus 0,15 bis 0,30 m langen Kabelabschnitten entnommen. Anschliessend wurden daraus kleinstmögliche Proben aussortiert und analysiert (Proben mit und ohne sichtbare Korrosionsprodukte auf der «Drahtseite»). Die bestimmten Chloridgehalte variierten zwischen 0,02 und 0,46% bezüglich der Gesamtmasse.

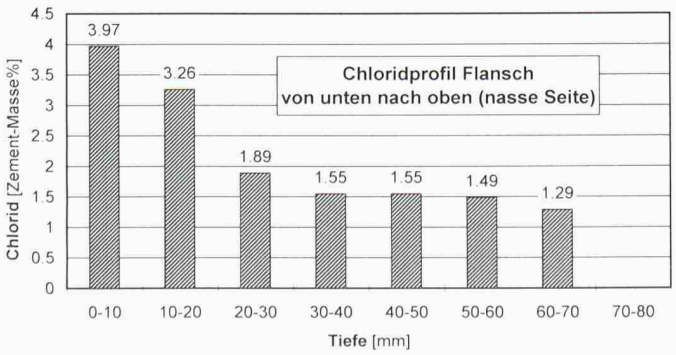
Karbonatisierungstiefe

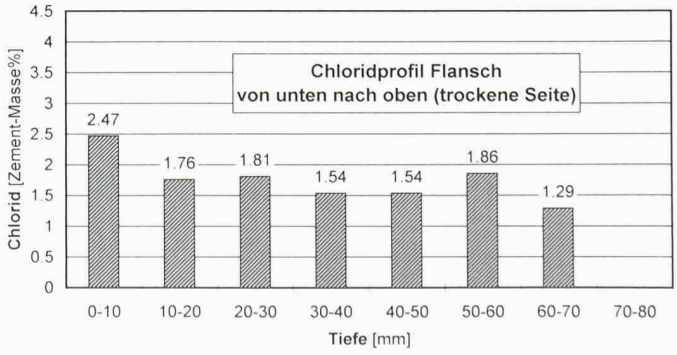
Die Karbonatisierungstiefen waren auf der «nassen» Seite der Stege mit 4 bis 8 mm deutlich geringer als auf der «trockenen» Seite (bis zu 15 mm).

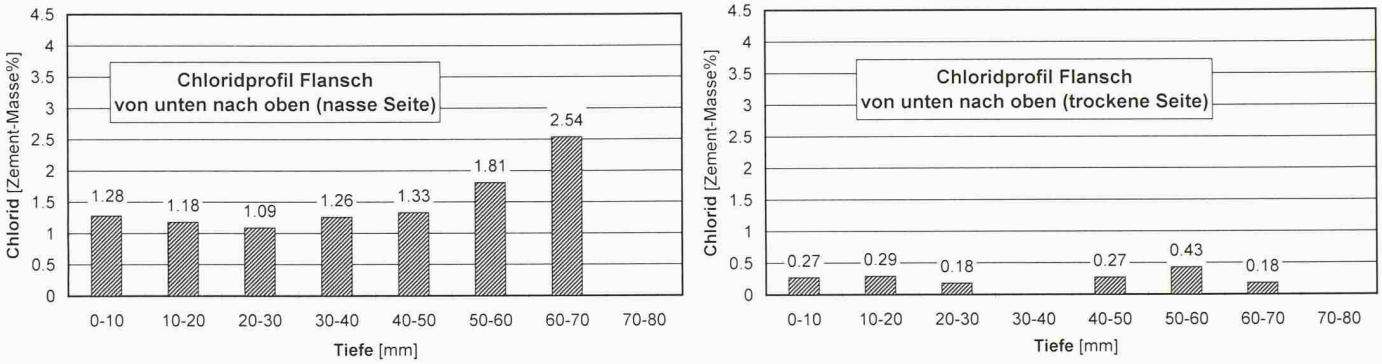
Porosität

Die Mittelwerte der Gesamtporosität der je fünf Bohrkerne betrugen für die drei Träger 11,9 bzw. 13,0 und 16,3 Volumenprozent. Die Streuung der Porosität war bei allen drei Trägern gross. Es wurden keine Korrelationen zwischen Porosität, Karbonatisierungstiefe und Chloridgehalt

4 und 5
Chloridprofile aus dem Flansch von der «vernässten» und der gegenüberliegenden «trockenen» Seite. Die Aufkonzentration der Chloride hat an der Flanschunterseite stattgefunden







6 und 7
Chloridprofile aus dem Flansch von der «vernässten» und der gegenüberliegenden «trockenen» Seite. Die Aufkonzentration der Chloride hat an der Flanschoberseite stattgefunden

gefunden, obwohl Bohrkerne aus der unmittelbaren Nähe analysiert worden waren. Auch dies weist auf eine grosse Streuung der Betonqualität hin.

Sondierungen und Beobachtungen während des Abbruchs der Träger

In praktisch allen Sondierungen waren verbreitet flächige und lokale Korrosion (Lochfrass) feststellbar. Dabei war jeweils die «nasse» Seite in einem schlechteren Zustand als die «trockene». Am stärksten angegriffen waren das im Auflagerbereich zuoberst im Steg liegende Spannglied und im Feldbereich die beiden unten im Flansch liegenden Spannglieder. Obwohl beim Bewehrungsnetz zahlreiche Stäbe bereits durchkorrodiert waren, wiesen die Spanndrähte zwar Lochfrass, aber keine vollständigen Querschnittsverluste auf (Bild 8).

An den als Kabelhalter verwendeten Flachstählen war auf der äusseren Fläche der «nassen» Trägerseite starke Korrosion feststellbar. Im Bereich der Kabelhalter waren auch die Hüllrohre und die schlaffe Bewehrung stärker korrodiert. Die entstandenen umfangreichen und voluminösen Korrosionsprodukte waren, insbesondere beim Kabelhalter, wohl mit ein Grund für die grossflächigen, oberflächenparallelen Hohlstellen bzw. Abplatzungen.

Die Spannglieder waren im grossen und ganzen vollständig ausinjiziert. Dennoch waren für eindringendes Wasser immer Wege vorhanden: Entlang kleinster Hohlräume zwischen eng nebeneinanderliegenden oder direkt am Hüllrohr anliegenden Drähten oder auch in Bereichen mit poröserem Injektionsgut (Bild 9). Gut sichtbar war dies an den Hüllrohrinnenseiten, die an gut injizierten Stellen häufig blank waren. Im Bereich von am Hüllrohr anliegenden Drähten war die Injektion weniger kompakt, was zu Ausblühungen und Korrosionsspuren entlang von geraden Linien führte. Bild 10 zeigt deutlich die Bereiche, wo gut bzw. wo kaum injiziert werden konnte.

Die gefalzten, meist sehr dünnen Hüllrohre waren nicht «wasserdicht». Der Falz an sich oder auch kleinste Perforationen ermöglichten, dass Wasser ins Innere des Hüllrohrs eindringen und sich dort weiterverteilen konnte, wobei die Längsneigung des Spanngliedes von Bedeutung war. So konnten auf der Hüllrohrinnenseite Korrosionsspuren entstehen, die von aussen nicht oder kaum erkennbar waren (Bild 11).

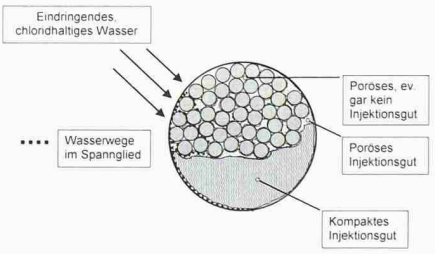
Eine weitere konstruktive Schwachstelle bildeten die Stossbereiche der Hüllrohre. Die Hüllrohre wurden mit einem Nagel durch das ganze Spannglied hindurch fixiert und mit Isolierband umwickelt, das als Korrosionsschutz nicht tauglich war. Feuchtigkeit wurde zurückgehalten und konnte durch das hier unterbrochene Hüllrohr relativ leicht bis zum Injektionsgut und zu den Spanndrähten vordringen.

Korrosionsangriffe am Spannstahl waren praktisch nur an den aussen liegenden Drähten feststellbar und zwar nur da, wo die Drähte direkt am Hüllrohr anlagen oder die Injektion infolge der sehr kleinen Abstände zwischen Drähten und Hüllrohr oder zwischen den Drähten selber mangelhaft (porös, kaum Injektionsgut vorhanden usw.) war (Bild 12).

Korrosionschemische Untersuchungen

Aufgrund der Untersuchungen der Empa an elf, während des Abbruchs separierten Spanngliedabschnitten wurde vermutet, dass neben dem äusseren Angriff durch eindringendes, chloridhaltiges Wasser, ein zweiter, innerer Angriff während der Zeit, zu der die Spannglieder noch nicht injiziert und genügend Sauerstoff

8
Starker Lochfrass an zwei Spanndrähten



9
Inhomogenitäten im Injektionsgut

10
Die Innenseite des Hüllrohrs ist bei vorhandenem, kompaktem Injektionsgut blank und weist bei poröserem oder fehlendem Injektionsgut Korrosionsspuren und Ausblühungen auf

und Feuchtigkeit für Korrosion vorhanden waren, stattgefunden hatte. Das verwendete temporäre Korrosionsschutzmittel hätte unter diesen Verhältnissen somit seine Aufgabe nicht optimal erfüllt (zwei Spannglieder je Elementträger waren bis zu mehr als einem Jahr lang nicht injiziert). Eine Quantifizierung dieses Korrosionsangriffs war nicht möglich.

Der Nachweis von Nitriten und Ammoniumverbindungen in den Korrosionsprodukten der Drähte und Hüllrohre und das Fehlen dieser Verbindungen im Injektionsgut lässt die Empa vermuten, dass diese Verbindungen Abbauprodukte des verwendeten, temporären Korrosionsschutzmittels sind. Wahrscheinlich handelte es sich dabei um ein sogenanntes VPI-Pulver (Vapour Phase Inhibitor), das eine Ammonium-Nitrit-Verbindung ist. Es ist bekannt, dass dieser temporäre Korrosionsschutz seit den sechziger Jahren verschiedentlich auch bei Spannstählen eingesetzt wird.

Auswertung und Interpretation

Potentialmessungen

Die Potentialmessungen wurden für jeden Träger einzeln und für alle Träger zusammen je für die «nasse» und die «trockene» Seite sowie für den unteren Flansch statistisch ausgewertet. Die nachfolgende Bestimmung der Grenzpotentiale war teilweise unsicher, da die einzelnen Kurven sehr flach verliefen und die «trockenen» Seiten stark durch die «feuchten» Seiten beeinflusst wurden. Für die «trockenen» Seiten von zwei Trägern konnten deshalb die Grenzpotentiale U(K) und U(Ü) aufgrund der Summenhäufigkeitskurven nicht bestimmt werden.

Die mit allen Werten je Träger bestimmten Grenzpotentiale U(K) variierten stark: $-140\,mV_{CSE}$, $-240\,mV_{CSE}$ und $-330\,mV_{CSE}$, während die Werte für U(P) näher beieinander lagen: $-40\,mV_{CSE}$, $-50\,mV_{CSE}$ und $-110\,mV_{CSE}$. Trotz der unterschiedlichen Grenzpotentiale für die drei Versuchsträger wäre für eine integrale Beurteilung die Auswertung einer Gesamtkurve mit allen Messwerten genügend genau bzw. der resultierende Fehler beim Festlegen von z.B. Abtragsflächen klein.

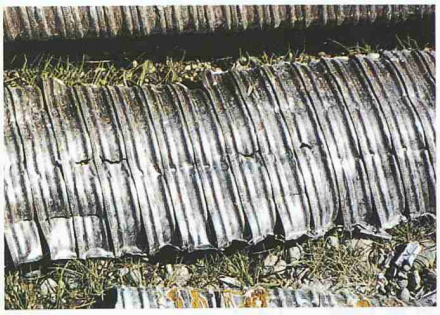
Die wichtigsten Einflüsse auf die Potentiale hatten die Betonfeuchtigkeit, der Chloridgehalt und der Korrosionszustand der schlaffen Bewehrung, der Spannbewehrung und der Kabelhalter. In den Stegflächen kamen die Einflüsse der Karbonatisierung auf der «trockenen» Seite und von alter, abgeklungener Korrosion auf der «nassen» Seite dazu.

Chloridprofile im Beton

Der Verlauf der Profile im Steg wurde neben der Chloridzufuhr während der Nutzungszeit in erster Linie vom Wasserdampfgradienten durch den Steg hindurch bestimmt.

Bei den Flanschen war der Wasserlauf an deren Oberflächen für die resultierenden Chloridprofile bestimmend. Dieser war abhängig von den Quergefällsverhältnissen, der Voutung des unteren Flansches und von Verdrehungen des Trägers bzw. des Flansches.

Infolge von lokalen Luftströmungen trockneten die verschiedenen Flächen unterschiedlich ab, und die Chloride konnten sich an der Flanschober- oder -unterseite aufkonzentrieren. Unterseitige Aufkonzentrationen hatten auch hohe Chloridgehalte auf der «trockenen» Flanschseite zur Folge (Bilder 4 und 5). Die geographische Ausrichtung war bei diesen Bauteilen von untergeordneter Bedeutung, wichtiger war das Mikroklima.



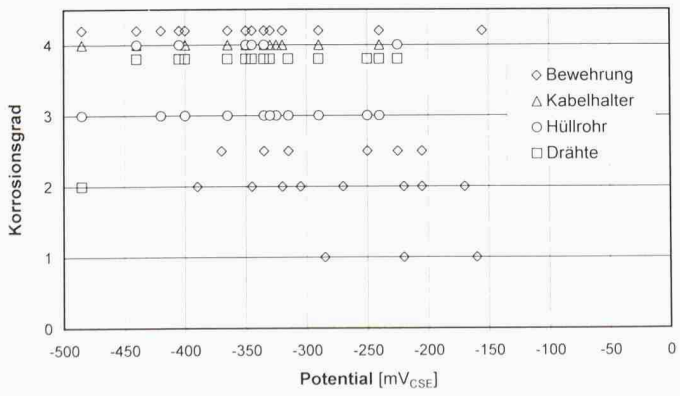
11
Hüllrohr aussen: keine Korrosionsspuren, Hüllrohr innen: Rostflecken

12
Korrosion an den aussen und unten liegenden Drähten

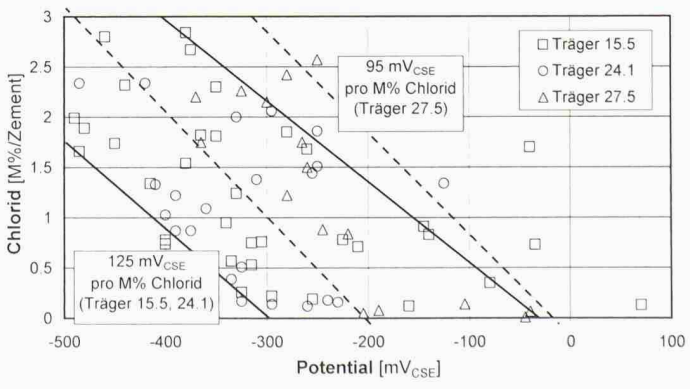
Chloridgehalt im Injektionsgut

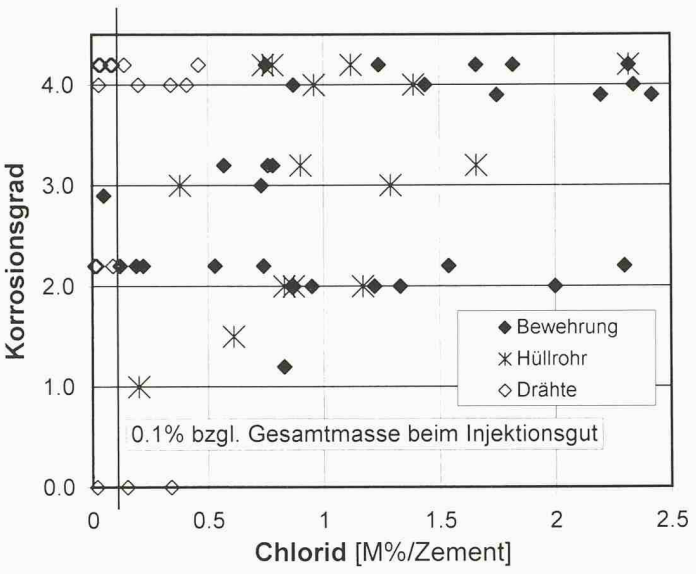
Die Chloride waren wegen der unterschiedlichen Exposition und infolge der Qualitätsunterschiede im Injektionsgut (Porosität, Rohdichte, W/Z-Faktor usw.), der unterschiedlichen Verfüllung des Hüll-

13
Zusammenhang Potential – Korrosionsgrad («vernässte» Seite eines Versuchsträgers)



14
Zusammenhang Potential – Chloridgehalt auf Bewehrungsniveau





15
Zusammenhang Chloridgehalt – Korrosionsgrad. Chloridgehalt im Injektionsgut: Angabe in Prozent bezogen auf die Gesamtmasse. Definition des Korrosionsgrads gemäss SIA-Merkblatt 2006 (1993):
0: blank
1: wenige Rostpunkte
2: Rostflecken, lokal geringer Materialabtrag
3: vollständig rostig, geringer Materialabtrag
4: Lochfrass, Angabe der Querschnittsverminderung

rohrs, der Zwischenräume zwischen den Drähten und der geometrischen Verhältnisse im Hüllrohr sowie infolge der Neigung des Spannglieds in Längsrichtung sehr inhomogen verteilt (Bild 9).

An derselben Stelle in Längsrichtung wurden z.B. drei Proben, zwei eher von der «nassen», eine eher von der «trockenen» Seite des Trägers, entnommen. Die bestimmten Chloridgehalte variierten stark: 0,41/0,20/0,03% bezüglich der Gesamtmasse. Ein Chloridgehalt im Injektionsgut von mehr als 0,02 bzw. 0,03 Masseprozent deutete auf eine Infiltration von aussen hin.

Die inhomogene Chloridverteilung bedeutete, dass die Probenahme aus dem Injektionsgut sehr heikel ist und eine einzelne Chloridanalyse in jedem Fall ungenügend gewesen wäre. Im weiteren konnte aufgrund der Chloridanalysen des Injektionsguts nicht ohne Vorbehalte auf die Gefährdung und den Korrosionszustand des Spannstahls geschlossen werden. Ein tiefer Chloridgehalt liess nicht unbedingt auf korrosionsfreie Spanndrähte schliessen.

Ab Korrosionsgrad 3 an der Aussenseite der dünnen, gefalzten Blechhüllrohre waren kleinste Perforationen der Hüllrohre und somit Chloridinfiltrationen in das Spannglied grundsätzlich möglich. Der Weitertransport an Stellen, wo von aussen her noch keine Infiltration stattgefunden hatte, erfolgte über die an der Eintrittstelle eventuell vorhandene Längsläufigkeit im Inneren des Spannglieds.

Potential – Korrosionsgrad

Bild 13 stellt den Zusammenhang Potential - Korrosionsgrad für die «nasse» Seite eines Versuchsträgers dar. Es fiel auf, dass der Korrosionsgrad der schlaffen Bewehrung oft kleiner bewertet worden war als derjenige der weiter innen liegenden Kabelhalter, Hüllrohre und Drähte. Dies ist auf verschiedene Gründe zurückzuführen:

- Die umfangreichen Korrosionsprodukte, die am Kabelhalter entstanden, führten zu Rissen oder weiteten bereits vorhandene innere Risse auf. Diese Risse bildeten direkte Wasserwege zum Hüllrohr. Der Weitertransport der Chloride - in eher noch tiefere Lagen als nach aussen zur schlaffen Bewehrung hin - wurde durch den Wassertransport infolge des Feuchtigkeitsgefälles von aussen nach innen verstärkt.
- Durch die zum Teil starke Korrosion von Kabelhaltern und Hüllrohren wurde die schlaffe Bewehrung kathodisch geschützt.
- Eine vergleichbare Beurteilung von Elementen mit stark unterschiedlichen Dimensionen und Geometrien ist schwierig. Zudem kann die Beurteilung je nach der Wichtigkeit des betrachteten Elements unterschiedlich ausfallen.

Potential – Chloridgehalt

In Bild 14 wurde der Chloridgehalt auf Bewehrungsniveau gegen das Potential aufgetragen. Die drei Träger wurden unterschiedlich dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass bei zwei Trägern das Potential um rund 125 mV_{CSE} und beim dritten Träger um etwa 95 mV_{CSE} pro Masseprozent Chlorid auf Bewehrungsniveau abnimmt. Die Differenz ist vermutlich auf die geringere Feuchtigkeit des dritten Trägers zurückzuführen.

Wird zusätzlich der Korrosionsgrad mit einbezogen (Bild 13), geht hervor, dass ab einem Potential von rund -250 mV_{CSE} Lochfrass an der Bewehrung und ab rund -220 mV_{CSE} Lochfrass am Spannsystem (Hüllrohr und Drähte) festgestellt werden kann. Dies entspricht Chloridgehalten von 0,5 bis 0,8 Massprozent Chlorid auf Bewehrungs- bzw. Hüllrohrniveau, was in Bild 15 bestätigt wird.

Chloridgehalt – Korrosionsgrad

Bild 15 zeigt den Zusammenhang Chloridgehalt - Korrosionsgrad. Es wurde unterschieden zwischen schlaffer Bewehrung, Hüllrohr und Drähten. Für die Drähte wurde der Chloridgehalt im Injektionsgut in Prozent, bezogen auf die Gesamtmasse, berücksichtigt. Hätte man den Chloridgehalt im Injektionsgut auf den Zementgehalt bezogen, lägen die Gehalte um etwa 50% höher (Annahme: 1200 kg Zement pro m^3 Injektionsgut).

Bereits bei sehr kleinen Chloridgehalten im Injektionsgut von 0,02 bis 0,04% bezüglich Gesamtmasse wurde an einzelnen Spanndrähten Lochfrass festgestellt (Inhomogenitäten im Injektionsgut). Überstieg der Chloridgehalt 0,1 Masseprozent, war Lochfrass am Spannstahl schon sehr wahrscheinlich.

Die Definition eines «kritischen Chloridgehalts im Spannbeton» ist infolge der starken Inhomogenitäten im Injektionsgut und im Verfüllungsgrad der Injektion schwierig. Dazu kommt, dass für einen Korrosionsangriff an nicht im Injektionsgut liegenden Spanndrähten bereits Wasser ausreicht. Chloride erhöhen die Leitfähigkeit des Wassers und verstärken damit die Angriffsbedingungen. Entscheidend ist zudem der Chloridgehalt direkt an der Oberfläche des Drahts oder der Litze.

Folgerungen

Die Abmessungen der vorfabrizierten Elementträger der Überdeckung Töss waren auf ein Minimum reduziert, was kleine Überdeckungen und die Wahl zu kleiner Hüllrohre der Spannglieder zur Folge hatte. Eine gute Verdichtung des Betons, eine gute Qualität der Injektion und eine vollständige Verfüllung der Spannglieder ist bei derartigen Trägern praktisch nicht mehr möglich. Dies zeigte sich auch, trotz Vorfabrikation, bei der sehr unterschiedlichen Betonqualität der drei Träger. Die festgestellten Betonüberdeckungen streuten ebenfalls sehr stark.

Die oberflächenparallelen Risse entstanden vermutlich schon während der Herstellung, dem Transport oder Einbau und öffneten dem durch die ungenügende

Überdeckung eindringenden, chloridhaltigen Wasser schnelle und direkte Wege zu den Hüllrohren. Die einsetzende Korrosion an den Kabelhaltern und Hüllrohren hatte umfangreiche Korrosionsprodukte zur Folge, die das Wachstum der Risse bis zu den vorhandenen, grossflächigen Delaminationen verstärkten und den Nachschub des chloridhaltigen Wassers weiter beschleunigten.

Die Schwachstellen der Träger hätten sich kaum ungünstig ausgewirkt, wenn nicht infolge der undichten Ausbildung der Dilatationsfugen chloridhaltiges Wasser von der Oberfläche her hätte eindringen können.

Für die Beurteilung anderer Bauwerke bezüglich Korrosion am Spannsystem sind folgende Aspekte wichtig:

- Es wurde Lochfrass, aber keine Spannungsrisskorrosion am Spannstahl festgestellt.
- Es wurden keine Veränderungen der mechanischen Eigenschaften an nicht korrosionsgeschädigten Spanndrähten festgestellt. Bei Querschnittsverminderungen wurden entsprechende Abminderungen der Festigkeit beobachtet.
- Die Leiteinwirkung für die Korrosion bei derartigen Bauwerken stellt das eindringende, chloridhaltige Wasser dar. Unter der Voraussetzung, dass die Lage der Spannglieder (Planstudium) bekannt ist, lässt sich vom visuellen Bild (Wasserläufe, Ausblühungen usw.) auf eine Gefährdung des Spannsystems schliessen.
- Über Potentialmessungen, in Kombination mit der visuellen Beurteilung und gezielten Analysen von Bauwerksproben und aus Sondierungen ist bei ähnlichen Verhältnissen und einem Angriff von aussen eine Aussage zum Zustand des Spannsystems möglich.
- Sind Chloride an die Oberfläche eines gefalzten Metallhüllrohrs vorgedrungen, muss davon ausgegangen werden, dass sie auch ins Hüllrohrinnere gelangen. Bereits sehr kleine Chloridgehalte im Injektionsgut von über 0,02 bis 0,04% der Gesamtmasse weisen auf eine Infiltration von aussen hin.
- Im Hüllrohrinneren ist je nach Verfüllungsgrad des Hüllrohrs und Qualität des Injektionsguts eine mehr oder weniger grosse Längsläufigkeit von chloridhaltigem Wasser vorhanden (dies gilt insbesondere für die hier vorliegenden Paralleldrahtbündel mit teilweise zu kleinen Hüllrohren).
- Die Bestimmung des Chloridgehalts bzw. die Probenahme für die Analyse im Injektionsgut ist heikel, da die Chloride sehr inhomogen verteilt sein können. Es müssen «Kleinstproben» gezielt aussortiert und analysiert werden. Eine einzige Analyse oder die Analyse von Mischproben ist ungenügend.
- Die Definition eines «kritischen Chloridgehalts im Spannbeton» ist schwierig. Er ist abhängig von der Porosität des Injektionsguts und vom Verfüllungsgrad des Hüllrohrs. Bei ungenügend verfüllten Spanngliedern kann bereits Wasser zu Korrosion führen.
- Tritt Wasser durch oberflächenparallele Risse im Beton in das Bauteil ein, ist es möglich, dass der Weg zum Spannsystem kürzer ist als derjenige zur aussen liegenden Bewehrung.
- Der Spannstahl kann bereits in der Bauphase durch fehlenden, mangelhaften oder ungeeigneten Korrosionsschutz geschädigt werden. Die Frage nach den optimalen temporären Schutzmassnahmen ist nach wie vor ungeklärt. Zurzeit sind im Auftrag des Bundesamts für Strassen Abklärungen im Gange.

Adressen der Verfasser:
Fritz Hunkeler, Dr. sc. techn., dipl. Werkstoffing. ETH/SIA, *Heidi Ungricht*, dipl. Bauing. ETH, TFB, Lindenstrasse 10, 5103 Wildegg, *Peter Matt*, dipl. Bauing. ETH/SIA, Ingenieur-Beratung, Talweg 21, 3063 Ittigen