

Kathodischer Korrosionsschutz

Musterfläche

**Tunnel Schweizerhalle, Querträger Nr. 39
N02 Hagnau – Augst, ÜMA/VOMA/SOMA**

Bundesamt für Strassen (ASTRA), Zofingen

Kunde
Bundesamt für Strassen (ASTRA)
Brühlstrasse 3
4800 Zofingen

Projektnummer
300 550 0

Datum
14. Mai 2020

Projektverantwortung
Daniel Oberhänsli

Projektleitung
Gregor Bucher

Inhalt

1	Einleitung / Veranlassung	3
2	Grundlagen.....	4
2.1	Normen / Richtlinien	4
2.2	Berichte / Tech. Angaben	4
2.3	Beteiligte	4
3	Funktionsbeschreibung des kathodischen Korrosionsschutzes	5
4	Schutzkriterien	6
4.1	Minimale Ausschalt- Stahl/Beton-Potentiale	6
4.2	Depolarisationskriterium	6
4.3	Messproben - Stromeintritt	6
5	Anlagenbeschreibung	7
5.1	Schutzzonen	7
5.2	Gewählter Aufbau des Schutzsystems.....	7
5.3	Einbauskizzen	8
5.4	Bauprogramm	9
6	Fotos der Ausführungsphase	10
7	Messresultate	12
7.1	Betriebsparameter	12
7.2	Depolarisation	13
7.3	Schutzstromeintritt auf die Messproben	14
8	Beurteilung.....	15
9	Empfehlung / Massnahmen	16

1 Einleitung / Veranlassung

Die Autobahn A2 stellt die wichtigste Transitverbindung von Deutschland durch die Schweiz nach Italien oder Österreich dar und zählt zu den meistbefahrenen Autobahnabschnitten der Schweiz. In Muttenz bei Basel führt diese Autobahn durch den «Schweizerhalle»-Tunnel, in welchem in beide Richtungen je 3 Fahrspuren zur Verfügung gestellt werden. Über dem Tunnel befindet sich der SBB-Rangierbahnhof Basel/Muttenz, einer der wichtigsten und grössten Rangierbahnhöfe der Schweiz.

Die Tunneldecke des rund 1 km langen Tunnels wird durch 154 vorgespannte Querträger gehalten. Die Breite der Querträger betragen 1.20 m resp. 1.40 m, die Trägerhöhen betragen bis zu 6.0 m.

Bei den Querträgern wurden Korrosionsschäden an der Stahlbewehrung festgestellt, die zu Betonabplatzungen über den Fahrspuren geführt haben. Es wurden bereits temporäre Betoninstandsetzungsmassnahmen im 2019 vorgenommen.

Die Instandsetzung der geschädigten Querträger wird als dringliche Massnahme in den Jahren 2021 bis 2025 vorgesehen. Da eine konventionelle Betoninstandsetzung des Tunnelinnenraumes unter Verkehr schwierig auszuführen ist, sollte die Machbarkeit eines Kathodischen Korrosionsschutzes (KKS) an den Querträgern im Rahmen eines Variantenstudiums geprüft werden.

Am 9. Oktober 2019 wurde die suicorr AG vom Bundesamt für Strassen (ASTRA) beauftragt, an einem Querträger eine KKS-Musterfläche anzulegen.

Die Ausführung einer Musterfläche an einem Querträger soll Antworten auf folgende Problemstellungen liefern:

- Wirksamkeit KKS: Kann die vorhandene Bewehrung (schlaff und vorgespannt) ausreichend mit Schutzstrom geschützt werden. Sind die vorgesehenen Anodenband-Typen /-Abstände wirksam?
- Beeinflussung KKS: Die Vorspannung darf nur mit einem begrenzten Schutzstrom beaufschlagt werden um einer Wasserstoffversprödung des Vorspannstahls zu verhindern. Abklärung, ob der Schutzstrom für den Korrosionsschutz der Bewehrung reicht, ohne eine negative Beeinflussung der Vorspannung zu bewirken. Abklärung der Tiefenwirkung des KKS.
- Generelle Machbarkeit: Aufgrund des knappen Zeitfensters für die Instandsetzung (=Totsperrung einer Tunnelröhre) besteht ein enger Terminrahmen (Sperrzeiten der Tunnelröhre: 22:45 – 04:15) → Arbeiten müssen detailliert geplant werden, Abläufe müssen miteinander funktionieren. Die Ausführung der Musterfläche soll Aufschluss geben über den pro Träger zeitlichen sowie den Personal- und Mittelbedarf für die Ausführung der Instandsetzung mittels KKS.

Es wurde beschlossen, in der KW 46 / 2019 eine Musterfläche von rund 17 m² mittels KKS in Nacharbeit auszuführen. Die Wahl des Trägers (Querträger 39) erfolgte aufgrund der vorhandenen Schädigung und wurde durch die Projektleitung INGE 8S definiert.

2 Grundlagen

2.1 Normen / Richtlinien

- EN ISO 12696 „Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton“ (ISO 12696:2017)
- C7d der SGK „Richtlinie für Projektierung, Ausführung und Überwachung des kathodischen Korrosionsschutzes von Stahlbetonbauten“ (Ausgabe 1991)

2.2 Berichte / Tech. Angaben

- Untersuchungsbericht «Musterfläche KKS Tunnel Schweizerhalle» vom 08.11.2019 der Tecnotest AG
- Diverse Plangrundlagen

2.3 Beteiligte

- Bauherrschaft (Auftraggeber der suicorr AG)
Bundesamt für Strassen (ASTRA)
Brühlstrasse 3
4800 Zofingen
- Projektleitung
INGE 8S c/o Jauslin Stebler AG, dsp Ingenieure & Planer
Stationsstrasse 20
8606 Greifensee
- Baumeister
Hydrojet AG
Industriestrasse
4415 Lausen
- Qualitätssicherung
TFB AG
Lindenstrasse 10
5103 Wildegg
- Zustandserfassung
Tecnotest AG
Alemannenweg 4
8803 Rüschlikon

3 Funktionsbeschreibung des kathodischen Korrosionsschutzes

Beim Einsatz des kathodischen Korrosionsschutzes wird von einem Schutzstromgerät ein, dem Korrosionsstrom entgegen gerichteter, leicht grösserer Schutzstrom (Gleichstrom) abgegeben. Damit reduziert sich der aktive Korrosionsprozess auf eine technisch vernachlässigbare Grösse. Der noch vorhandene Querschnitt des Bewehrungsstahles bleibt langfristig erhalten.

Um den Schutzstromfluss zwischen der Anode (Stromabgabe) und der Kathode (Stahlbewehrung, Stromaufnahme) sicherstellen zu können, ist eine ausreichende Feuchtigkeit des umgebenden Betons erforderlich. Sollte die Konstruktion zu stark austrocknen, wäre ein vollständiger Korrosionsschutz nicht sichergestellt. Weiterhin würde aber die Korrosionsrate durch den KKS deutlich reduziert. Der Korrosionsprozess benötigt ebenfalls die entsprechende Feuchtigkeit, insofern reduziert sich auch der Schadensfortschritt.

Langfristig tragen ausserdem die sogenannten sekundären Schutzmechanismen zum dauerhaften Korrosionsschutz bei. Durch die Anwendung des KKS werden sich die Chloride in Richtung der Anoden, also vom Bewehrungsstahl wegbewegen. Des Weiteren wird sich bei Bewehrungsstählen, welche sich bereits im karbonatisierten Beton befinden, wieder ein erhöhter pH-Wert einstellen.

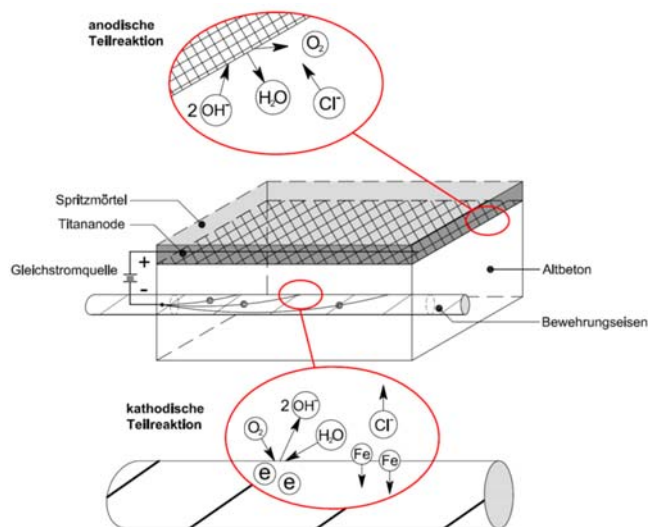


Abb. 1: Aufbau des kathodischen Korrosionsschutzes für Stahlbeton

4 Schutzkriterien

4.1 Minimale Ausschalt- Stahl/Beton-Potentiale

Zur Verhinderung einer Überpolarisation und der daraus folgenden möglichen Wasserstoffversprödung der Bewehrung gelten folgende Kriterien:

Als minimales Ausschaltpotential bezüglich Silber-/Silberchlorid-Bezugselektroden (Ag/AgCl/0.5 M KCl) definiert die SN EN ISO 12696 -1'100 mV für glatten Bewehrungsstahl sowie -900 mV bezüglich Spannstahl. Dies entspricht für die am Objekt eingebauten Mangandioxid-Bezugselektroden (MnO₂):

glatter Bewehrungsstahl:	-1'290 mV bez. MnO ₂
Spannstahl:	-1'090 mV bez. MnO ₂

4.2 Depolarisationskriterium

Die Norm SN EN ISO 12696 definiert im Kapitel 8.6 „Schutzkriterien“ das Depolarisationskriterium als die zentrale Grösse zur Kontrolle von kathodischen Schutzanlagen. Dabei gilt, dass die, an repräsentativen Stellen eingebauten, Bezugselektroden mindestens eines der drei folgenden Kriterien erfüllen müssen:

- Negativeres Ausschaltpotential als -720 mV bez. Ag/AgCl/0.5 M KCl (entspricht -910 mV bez. MnO₂)
- Mindestens 100 mV Potentialabfall über 24 h ausgehend vom Ausschaltpotential
- Mindestens 150 mV Potentialabfall bei einem Zeitraum > 24 h ausgehend vom Ausschaltpotential

Des Weiteren kann, gemäss Anmerkung 5 der ISO 12696 Kapitel 8.6, als weiteres Prüfkriterium das Stahl-/Beton-Potential in einem vollständig depolarisierten Bauwerk nach einer Langzeitausschaltdauer des kathodischen Schutzsystems betrachtet werden. Ist dieses bezüglich MnO₂ positiver als -340 mV gilt die Konstruktion ebenfalls als geschützt.

4.3 Messproben - Stromeintritt

Zur Beurteilung des lokal vorhandenen Korrosionsschutzes eignet sich die Überprüfung des anliegenden Stromes an lokal eingebauten oder erstellten Messproben sehr gut. Die Messproben müssen in chloridreichen Mörtel eingebettet werden. Mit den Messproben wird festgehalten, ob ein Strom von einer definierten und separierten Stahloberfläche zur restlichen Bewehrung fliesst. Ein positiver Strom bedeutet, dass ein kathodischer Schutz vorhanden ist (Stromeintritt auf die Messprobe). Ein negativer Strom (Stromaustritt aus der Messprobe) deutet auf Korrosion bzw. einen ungenügenden kathodischen Schutz hin. Infolge des Schutzstromes soll folglich eine Stromumkehr stattfinden.

5 Anlagenbeschreibung

Die KKS-Bemessung erfolgte durch die suicorr AG.

Trägervorderseite: Trägeransicht in Fahrtrichtung Luzern

Trägerrückseite: Trägeransicht in Fahrtrichtung Basel

5.1 Schutzzonen

Schutzzone	1
Beschreibung	Musterfläche Tunnel Schweizerhalle, Querträger 39
Betonoberfläche [$\text{m}^2_{\text{Beton}}$]	16.8 m^2 (10.3 m^2 Trägervorderseite, 1.8 m^2 Trägerrückseite, 4.7 m^2 Trägerunterseite)
Bewehrungsdichte [$\text{m}^2_{\text{Stahl}} / \text{m}^2_{\text{Beton}}$]	1.05 (3.10 m Trägerabwicklung)
Bewehrungsoberfläche [$\text{m}^2_{\text{Stahl}}$]	3.29 (schlaff und vorgespannt)
Designstromdichte [$\text{mA}/\text{m}^2_{\text{Stahl}}$]	20.0
Max. Strombedarf [mA]	65.8
Schutzziel	alle Bewehrungslagen bis in 15cm Tiefe (schlaff und vorgespannte Stahlbewehrung)

5.2 Gewählter Aufbau des Schutzsystems

Schutzzone	1
Beschreibung	Vorgespannter Beton-Querträger 39
Sekundäranodentyp	13 mm Band
Max. Schutzstromabgabe	3.5 mA/m
Gewählter Sekundäranodenabstand	0.10 m (Trägerbereich unten bis 0.30 m ab UK, Trägervorderseite: 4 Lagen, Trägerrückseite: 3 Lagen) 0.20 m (Trägervorderseite: 8 Lagen) 0.10 m – 0.14 m (Trägerunterseite: 9 resp. 10 Lagen)
Primäranode	3 mm Draht
Einbettungsmörtel	PCI Nanocrete R4 SA (KKS Eignung der HSR Rapperswil geprüft, Wahl durch UN)
Anzahl Bezugselektroden	9 (3 von unten ab Träger UK, 3 ab Trägervorderseite, 3 ab Trägerrückseite) davon 8 an das Überwachungssystem angeschlossen
Anzahl Messproben	4 (1 von unten ab Träger UK, 1 ab Trägervorderseite, 2 ab Trägerrückseite)

5.3 Einbauskizzen

Die detaillierten Pläne sind als Beilage dieses Berichtes enthalten.

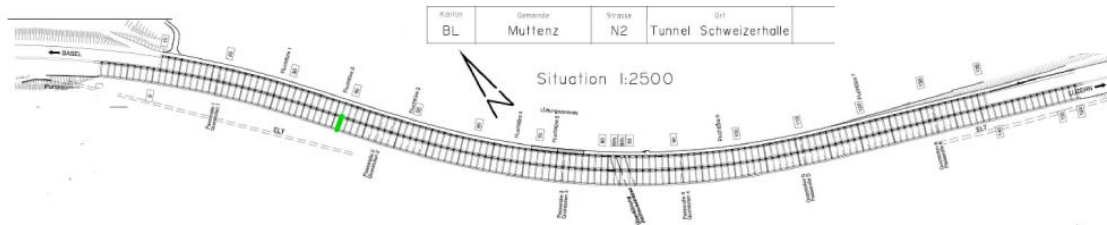


Abb. 2: Situation Musterfläche (Träger 39 grün markiert)

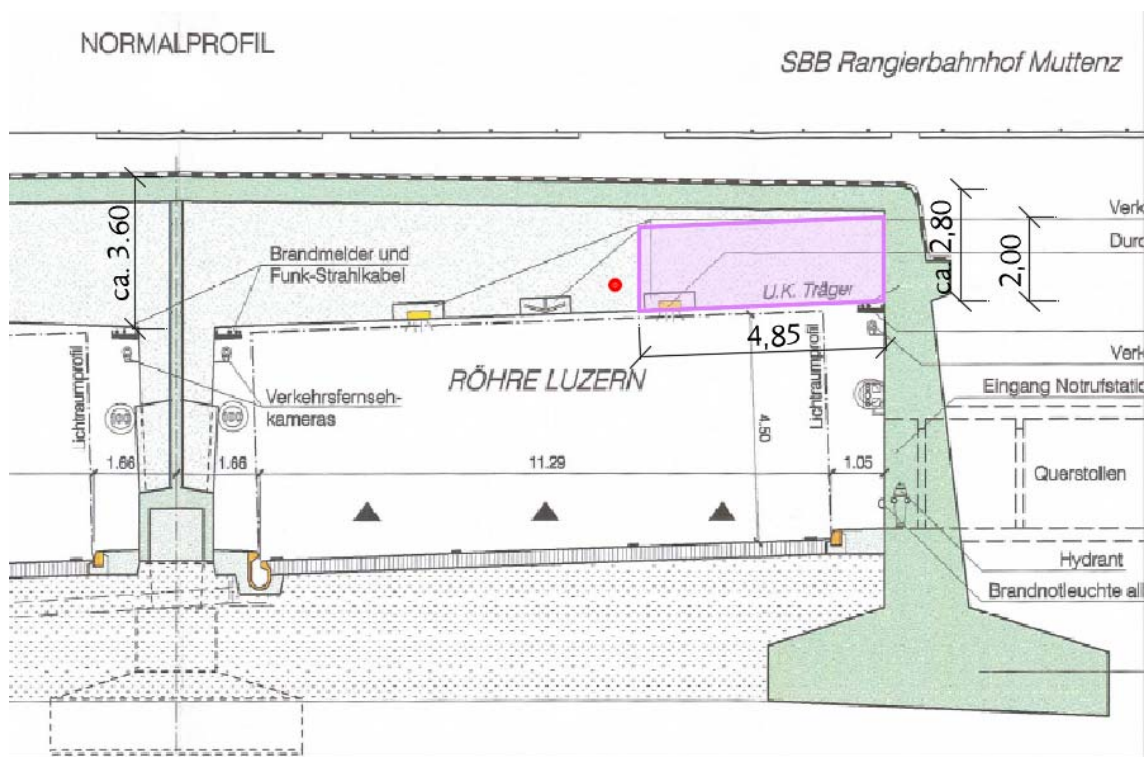


Abb. 3: Ansicht Musterfläche Trägervorderseite, Querträger 39

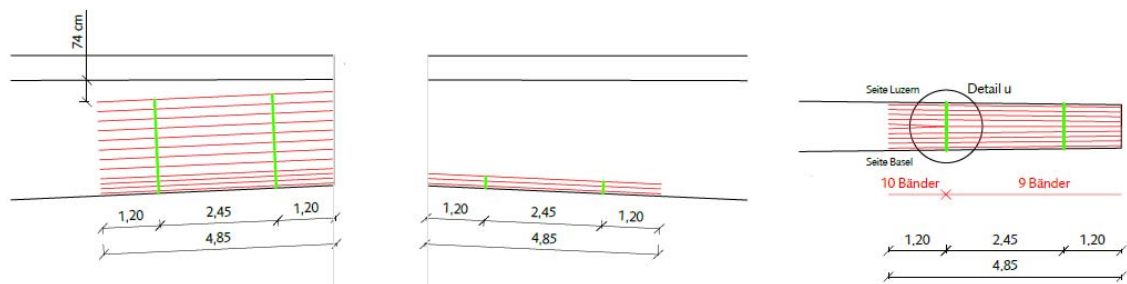
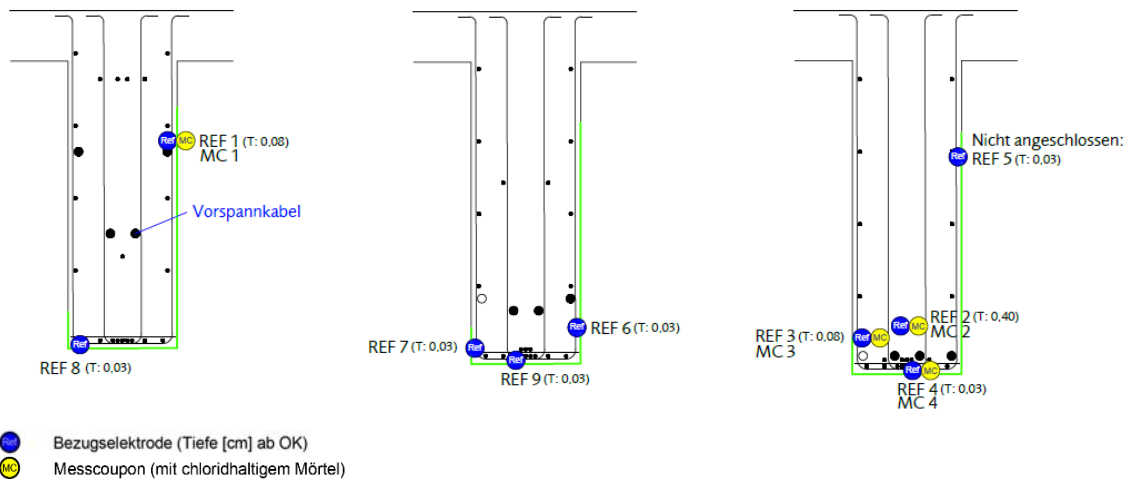


Abb. 4: Bandlagen Titananoden Trägervorderseite – Trägerrückseite – Trägerunterseite



5.4 Bauprogramm

06.11.2019	Mittwoch	22:45 – 04:15	Baustellenbegehung mit allen Beteiligten, Potentialfeldmessung durch Tecnotest, Optimierung Anordnung Prüfsensoren KKS
11.11.2019	Montag	22:45 – 04:15	Wasserhöchstdruckstrahlen Träger 39
12.11.2019	Dienstag	22:45 – 04:15	Lokale Betoninstandsetzung
13.11.2019	Mittwoch	22:45 – 04:15	Installation KKS
14.11.2019	Donnerstag	22:45 – 04:15	Applikation Spritzmörtel
15.11.2019	Freitag	23:30 – 04:15	Installation Anschlussdose und Gleichrichter
18.11.2019	Montag	22:45 – 04:15	Applikation Spritzmörtel abschliessen, Verdrahtung Anschlussdose
09.12.2019	Montag	10:00 – 11:30	Inbetriebnahme der KKS-Anlage
27.01.2020	Montag	08:00	Inbetriebnahme der KKS-Anlage mittels Fernwartung (infolge Fehleinstellung der Datenaufzeichnung/Monitoring ab 09.12.2019 erneut erforderlich)

6 Fotos der Ausführungsphase



Abb. 6: Korrosionszustand Trägerunterseite, Querträger 39



Abb. 7: Potentialfeldmessung am Träger



Abb. 8: Höchstdruckstrahlen Betonoberflächen



Abb. 9: Gestrahlter und lokal instandgesetzter Querträger



Abb. 10: Trägersvorderseite, Bandanodenmontage



Abb. 11: Trägersrück- und -unterseite, Bandanodenmontage



Abb. 12: Installierter KKS mit Anschlusskabel für Sensoren



Abb. 13: Installierter KKS mit Anschlusskabel für Sensoren



Abb. 14: Einbetten der KKS-Installation mit Spritzmörtel

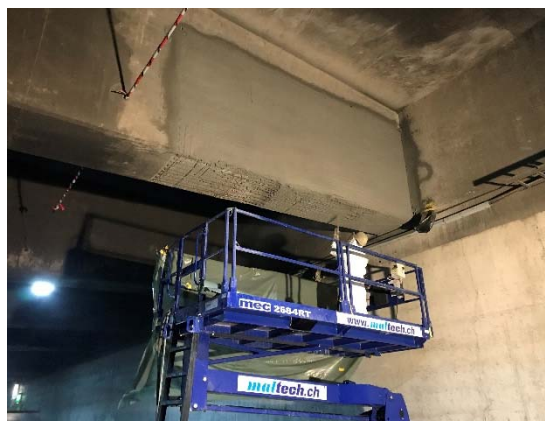


Abb. 15: Einbetten der KKS-Installation mit Spritzmörtel



Abb. 16: Anschlussdose



Abb. 17: KKS-Gleichrichter im Querstollen

7 Messresultate

Die grafischen Darstellungen sind in der Beilage dieses Berichtes grossformatiger und besser lesbar dargestellt.

7.1 Betriebsparameter

Die Inbetriebnahme der Musterfläche fand am 9. Dezember 2019 unter Anwesenheit der Projektleitung INGE 8S statt. Bei der Inbetriebnahme wurde der Querträger mit Schutzstrom beschickt. Nach der Inbetriebnahme lief die Anlage einwandfrei, führte jedes Wochenende die zur Korrosionsschutzbewertung benötigten Ausschaltvorgänge aus und registrierte die dazugehörigen Messdaten. Leider wurden aber die dazwischenliegenden Monitoringdaten aufgrund einer Fehlmanipulation nicht aufgezeichnet. Dies ist zwar nicht betriebskritisch, führt aber dazu, dass keine durchgehende Interpretation der Messwerte möglich ist.

Aus diesem Grund wurde die Anlage nochmals heruntergefahren und es erfolgte eine erneute Inbetriebnahme am 27. Januar 2020. Ab diesem Zeitpunkt werden alle Betriebsparameter während dem Kontrollvorgang wie auch im Normalbetrieb aufgezeichnet. Diese Daten dienen als Grundlage für den vorliegenden Abschlussbericht.

Während den ersten Betriebswochen wurde die Speisespannung des Schutzstromgerätes den Bedingungen vor Ort angepasst (z.B. Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Austrocknung Mörtel; «Einregelung der Anlage»). Dabei dienten der fliessende Schutzstrom sowie die Resultate der Referenzelektroden und Messproben als Grundlage für die Einstellungen am Schutzstromgerät.

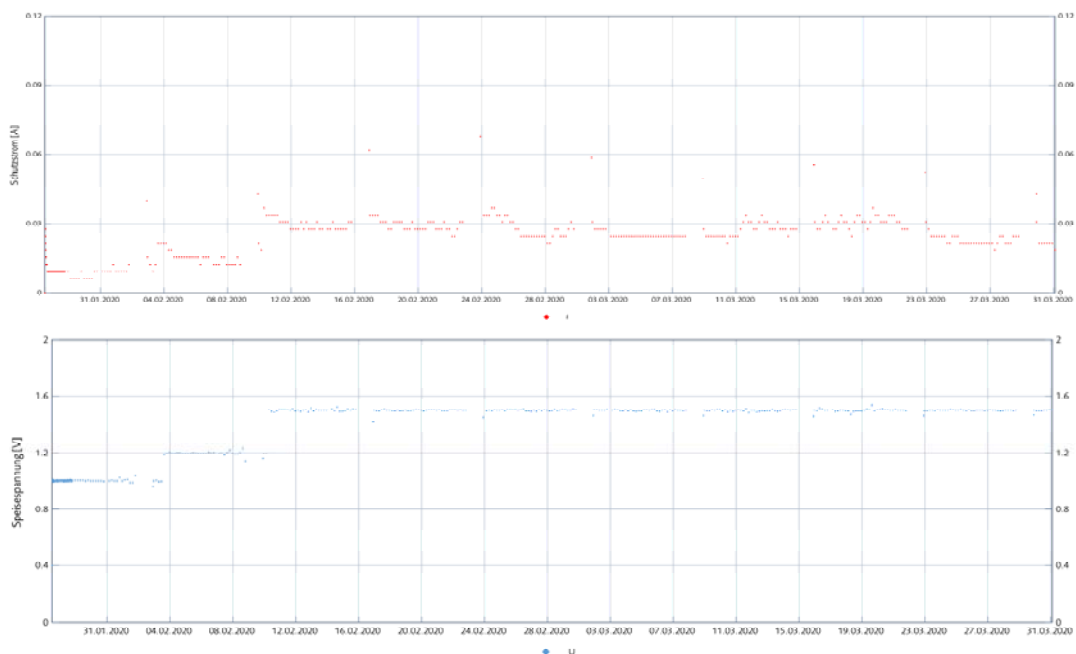


Abb. 18: Betriebsparameter ab Inbetriebnahme

Aus dem am 29. März 2020 gemessenen Schutzstrom ergibt sich folgende Schutzstromdichte:

Zone 1: $1.54 \text{ mA / m}^2_{\text{Stahl}}$

7.2 Depolarisation

Am 29. März 2020 erfolgte die letzte Depolarisationsmessung der Anlage:

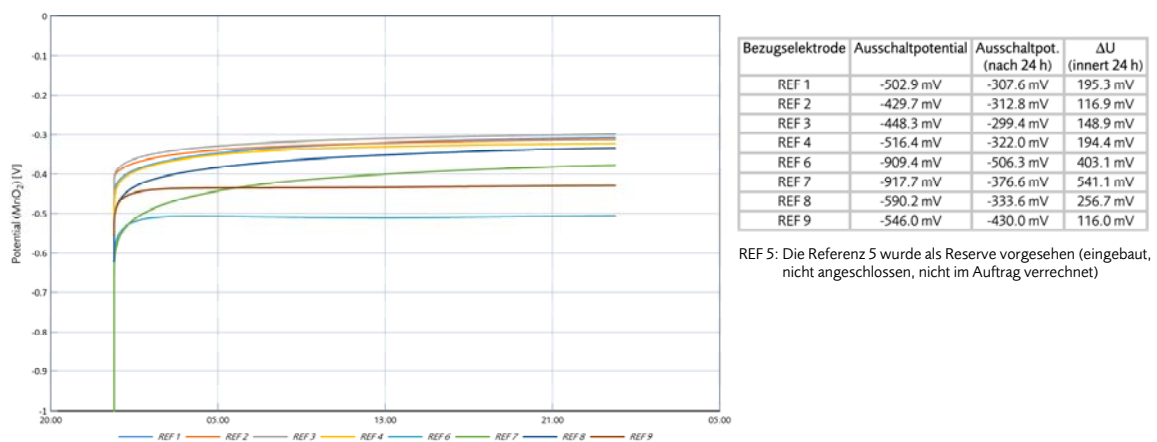


Abb. 19: Depolarisationskurven vom 29.3.2020

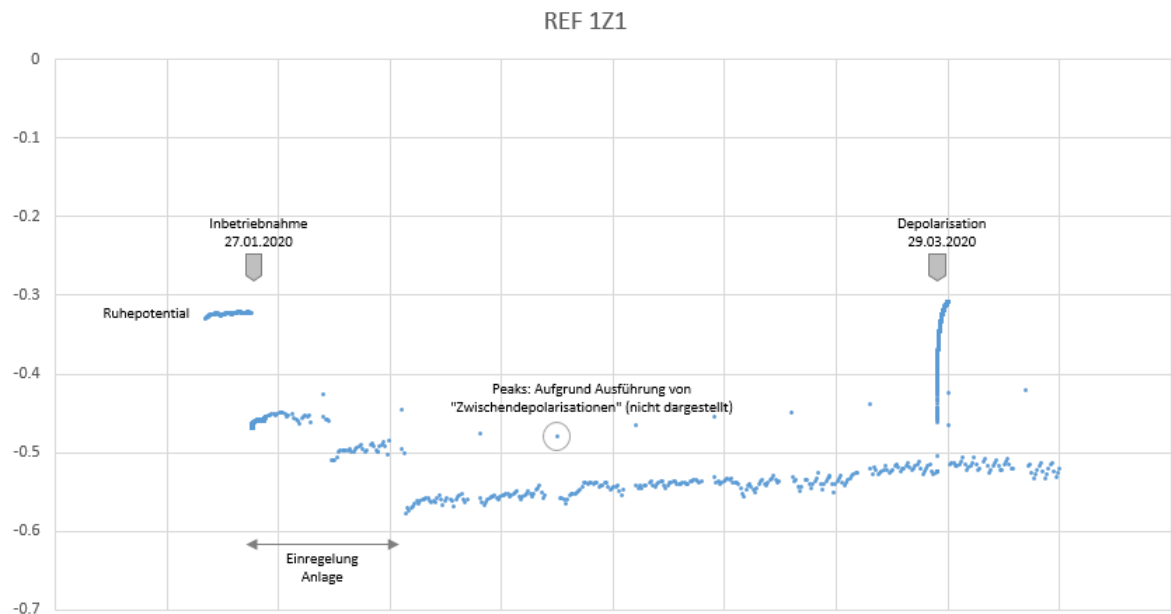


Abb. 20: Exemplarischer Gesamtverlauf Ruhepotential – Inbetriebnahme – Einregelung – Depolarisation am Beispiel von REF 1

Die Auswertung der einzelnen Messresultate ergibt nachfolgende Übersicht der Depolarisationswerte.

Zone	Depol. > 100mV (innert 24h)	Depol. 90 – 100 mV (innert 24h)	Depol. 80 – 90 mV (innert 24h)	Depol. < 80 mV (innert 24h)	Bemerkungen
Musterfläche	8				Alle Referenzen erfüllen die Depolarisationskriterien der SN EN ISO 12696

7.3 Schutzstromeintritt auf die Messproben

Unmittelbar vor dem Ausschalten für die obenstehenden Depolarisationsmessungen fanden an den eingebauten Messproben Strommessungen statt. Im nachstehenden Vergleich der Schutzströme sind zu den Werten vom 29.3.2020 auch die Messwerte vor der Inbetriebnahme (0-Messung) aufgeführt. Ein negativer Wert steht dabei für einen Stromaustritt aus der Messprobe (Korrosion).

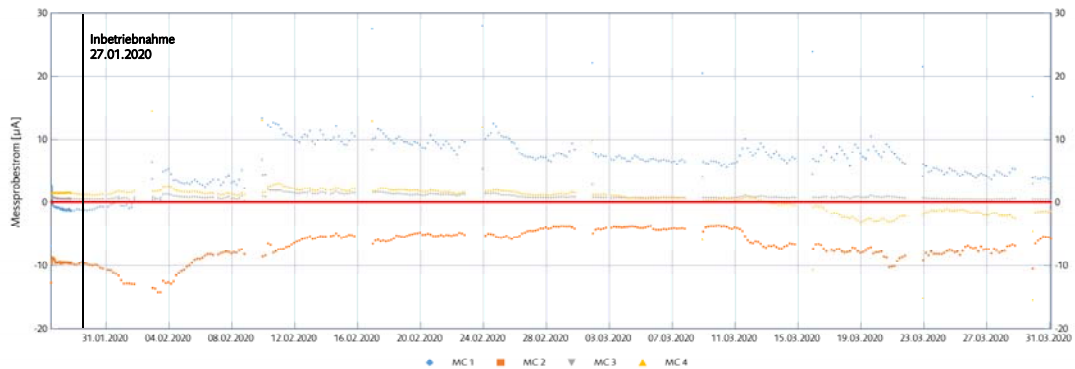


Abb. 21: Schutzstrom auf die Messproben ab Inbetriebnahme

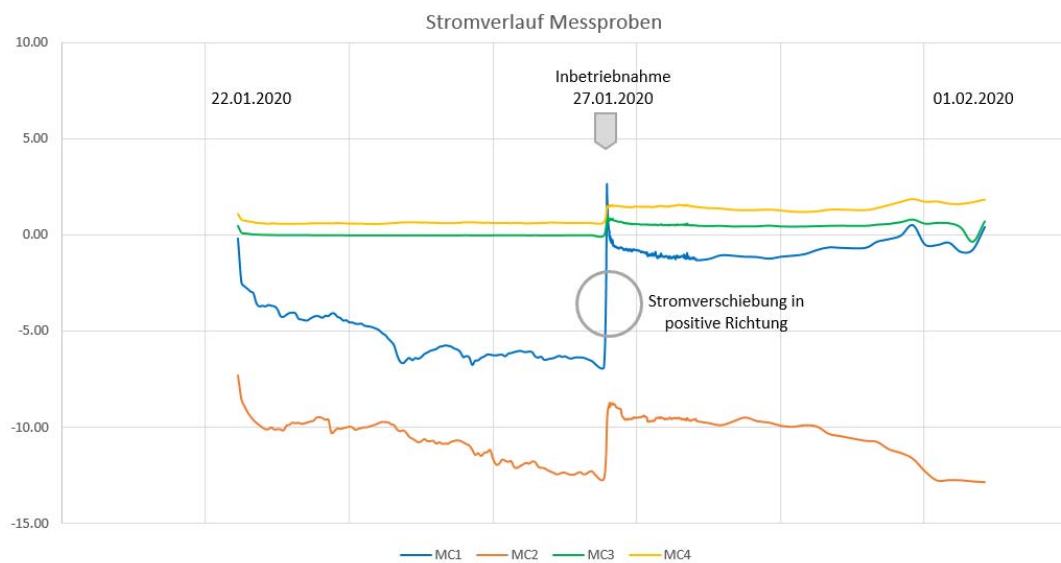


Abb. 22: Stromverlauf in den Messproben zum Zeitpunkt des Einschaltens der Schutzstromes

Zone	Messprobe	0-Messung. vor dem Einschalten der Anlage	29.3.2020 während dem KKS- Betrieb	Bemerkungen
1	MC 1	-17.0 µA	+5.0 µA	
	MC 2	-20.0 µA	-7.1 µA	
	MC 3	-12.0 µA	+0.5 µA	
	MC 4	+7.0 µA	-2.5 µA	nicht in salzhaltigem Mörtel eingebettet, = passiver Stahl

8 Beurteilung

- Wirksamkeit KKS: Mit den vorgesehenen Bandanodentypen- und -abständen kann der Korrosionsfortschritt der Stahlbewehrung im Träger gestoppt oder auf vernachlässigbar kleine Korrosionsgeschwindigkeiten reduziert werden.
- Die Bandabstände in den Träger-Randbereichen könnten gegenüber der Anordnung bei der Musterfläche noch optimiert werden, da in diesen Bereichen keine tiefliegende Vorspannung verläuft und somit weniger zu schützender Bewehrungsquerschnitt vorhanden ist. Das Verhältnis Kosteneinsparung gegenüber Mehraufwand bei der Installation des KKS ist jedoch gering, so dass die bei der Musterfläche ausgeführte Bandanordnung empfohlen wird.
- Vorspannung: Die im Träger vorhandene Vorspannung wurde im Rahmen der Ausführung der Musterfläche nicht freigelegt. Liegen die Vorspannkabel sauber verpresst im intakten Hüllrohr vor, können diese Litzen nicht mittels KKS geschützt werden, hingegen kann das Metallhüllrohr mittels KKS geschützt werden. Sind Perforationen am Hüllrohr vorhanden, besteht die Möglichkeit von Korrosionserscheinungen. In diesem Fall ist der KKS lokal wirksam, der Schutzstrom muss aber begrenzt werden um eine Wasserstoffversprödung des Spannstahles auszuschliessen: Die minimalen Ausschaltpotentiale der Bezugs Elektroden im Bereich des Spannstahles müssen zwingend über dem Grenzwert von $-1'090$ mV liegen. Die bezüglich des Grenzwertes kritischste Stelle (REF 7) liegt mit -918 mV nicht im Bereich des kritischen Grenzwertes, die kritischste Referenz liegt ausserdem nicht im Bereich der Vorspannkabel.
- Generelle Machbarkeit: Die generelle Machbarkeit des Gesamtprojektes ist durch die Bauleitung abzuschätzen.
Die Machbarkeit des KKS ist gegeben, wenn auch in zeitlicher Hinsicht sehr herausfordernd.
- Der Verlauf der resultierenden Schutzströme, unter den angelegten Speisespannungen, entspricht den zu erwartenden Grössenordnungen (1.0 – 3.0 V). Die durchschnittlichen Schutzstromdichten sind kleiner als die während der Projektierung angesetzten Maximalwerte und entsprechen den üblichen Werten (5 – 15 mA/m²).
- Am 29. März 2020 erreichten alle 8 Messstellen den von der Norm geforderten Mindestdepolarisationswert von 100 mV in 24 h, die Schutzkriterien des kathodischen Schutzes gegen fortschreitende Korrosion an der Stahlbewehrung sind erfüllt.
- Die ausserhalb des Schutzzieles und in Stegmitte des Trägers platzierte Referenzelektrode 2 spricht erwartungsgemäss schwächer auf den Schutzstrom an, der Depolarisationswert beträgt 116.9 mV. Daraus lässt sich ableiten, dass auch an der tieferliegenden Schubbewehrung (ausserhalb des definierten Schutzzieles) die möglicherweise ablaufenden Korrosionsprozesse zumindest massiv reduziert werden könnten.
- Erstaunlich ist der geringe Depolarisationswert von Referenz 9: Diese Referenzelektrode liegt oberflächennah in der Mitte der Trägerunterseite. Es wäre zu erwarten gewesen, dass auch diese Elektrode stärker depolarisiert. Mit 116.0 mV wird aber auch bei dieser Referenzelektrode der geforderte Mindestdepolarisationswert von 100 mV erreicht. Ein Defekt der Referenz kann

aufgrund der Eingangskontrolle durch die suicorr AG im Rahmen der Qualitätssicherung ausgeschlossen werden.

- Bei allen Messproben verschieben sich die im Moment des Einschaltens des Systems am 27.1.2020 die Ströme in positive Richtung, was auf einen wirksamen KKS in diesen Bereichen schliessen lässt.
- Die Messwerte der Messprobe 2 lassen jedoch immer noch auf Korrosionsvorgänge schliessen (negative Werte). Das System benötigt eine gewisse Zeit, bis es eingeregelt ist. Der Verlauf ist aber in der Folge zu überprüfen. Mit wirksamem Schutzstrom sollte sich auch diese Messprobe längerfristig (mehrere Monate bis Jahre) in den positiven Bereich verschieben.
- Etwa ab Mitte März kann festgestellt werden, dass auch die Messprobe 4 wieder Stromaustritte verzeichnet. Auch diese Messstelle ist in der Folge genauer zu überwachen.
- Im Regelfall lassen sich aus den Messwerten der Strommessproben aufgrund des hohen erforderlichen Salzgehaltes des umgebenden Mörtels eher konservative Ergebnisse interpretieren.
- Im Rahmen des Unterhaltes werden wir in den nächsten Wochen bis Monaten die Geräteeinstellungen noch weiter optimieren um einen idealen Betriebszustand einzustellen.

9 Empfehlung / Massnahmen

Aufgrund den grösstenteils erfolgreichen Resultaten der Musterfläche, können wir den Einsatz des kathodischen Korrosionsschutzes für den Schutz der Querträger im Tunnel Schweizerhalle empfehlen.

Ein allfälliger Aufbau ist in Analogie zur Musterfläche vorzunehmen.

Ob und wie hoch die Trägerrückseite vor Korrosion zu schützen ist, kann trägerspezifisch mittels Potentialfeldmessungen abgeklärt werden. Denkbar wären 1-2 verschiedene Schemas für die Anordnung der schützenden Bandanoden, die je nach Schädigungsgrad der Träger angewandt werden können.

Der Verlauf der Ströme der Messproben 2 und 4 sowie das Potential der Referenz 9 sind in der Folge genauer zu beobachten.


Daniel Oberhänsli
Geschäftsführer


Gregor Bucher
Projektleiter