



Methode zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts an bestehenden Stahlbetonbauwerken

Méthode pour la détermination de la teneur critical en chlorures on actuelle structures en béton armé

Methode to determine the critical chloride content of existing reinforced structures

ETH Zürich – Institut für Baustoffe
Dr. Ueli Angst
Matthias Wagner
Prof. Dr. Bernhard Elsener

EMPA Dübendorf
Dr. Andreas Leemann
Dr. Peter van Nygaard

Forschungsprojekt AGB 2012/010 auf Antrag der Arbeitsgruppe
Brückenforschung (AGB)

April 2016

677

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Methode zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts an bestehenden Stahlbetonbauwerken

Méthode pour la détermination de la teneur critical en chlorures on actuelle structures en béton armé

Methode to determine the critical chloride content of existing reinforced structures

ETH Zürich – Institut für Baustoffe
Dr. Ueli Angst
Matthias Wagner
Prof. Dr. Bernhard Elsener

EMPA Dübendorf
Dr. Andreas Leemann
Dr. Peter van Nygaard

Forschungsprojekt AGB 2012/010 auf Antrag der Arbeitsgruppe
Brückenforschung (AGB)

April 2016

677

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Prof. Dr. Bernhard Elsener, ETH Zürich, Institut für Baustoffe, ETH Hönggerberg, Zürich

Mitglieder

Dr. Ueli Angst, ETH Zürich, Institut für Baustoffe, ETH Hönggerberg, Zürich

Matthias Wagner, ETH Zürich, Institut für Baustoffe, ETH Hönggerberg, Zürich

Dr. Andreas Leemann, EMPA Dübendorf

Dr. Peter Nygaard, EMPA Dübendorf

Begleitkommission

Präsident

Dr. Martin Käser, Baudirektion / TBA, Walcheplatz 2, 800 Zürich

Mitglieder

Prof. Dr. W. Kaufmann, ETH Zürich, Institut für Konstruktion, ETH Hönggerberg, Zürich

Prof. Dr. A. Kenel, Hochschule für Technik HSR, 8640 Rapperswil

Dr. F. Hunkeler, TFB Wildeggen, 5103 Wildeggen

Antragsteller

Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	9
Summary	11
1 Einleitung	13
1.1 Ausgangslage	13
1.2 Ziel und Idee der Forschungsarbeit	14
2 Grundlagen & Literatur	15
2.1 Chloridinduzierte Korrosion.....	15
2.2 Kritischer Chloridgehalt.....	17
2.2.1 Definition	17
2.2.2 Stand der Forschung	18
2.2.3 Standardisierung der Bestimmung des kritischen Chloridgehalts im Labor.....	21
3 Pilotversuch – das Bauwerk	25
3.1 Auswahl eines geeigneten Bauwerks	25
3.1.1 Zustandserfassung	26
3.1.2 Probenahmen	28
3.2 Laborprüfungen.....	29
3.2.1 Bestimmung des aktuellen Chloridgehalts.....	29
3.2.2 Bestimmung des Chloridmigrationskoeffizienten	30
3.2.3 Wasserleitfähigkeit und Porositätswerte	30
3.2.4 Druckfestigkeit	31
3.2.5 Dünnschliffmikroskopie	32
3.2.6 ESEM-Analyse des Stahl-Beton-Interfaces	34
3.2.7 Zusammenfassung der Laboruntersuchungen	34
4 Bestimmung des kritischen Chloridgehalts	37
4.1 Geplante Methodik zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts.....	37
4.1.1 Versuchsaufbau	37
4.1.2 Resultate der ersten Serie	44
4.1.3 Analyse der Versuchsdurchführung.....	46
4.2 Erste Optimierung der Methodik zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts	48
4.2.1 Änderungen im Versuchsaufbau.....	48
4.2.2 Resultate	48
4.2.3 Analyse des Versuchsaufbaus.....	51
4.3 Zweite Optimierung der Methodik zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts	54
4.3.1 Änderungen im Versuchsaufbau.....	54
4.3.2 Resultate	54
4.3.3 Zusammenfassung der gemessenen kritischen Chloridgehalte	61
5 Diskussion	63
5.1 Vergleich der Resultate mit Literaturdaten.....	63
5.2 Ort der Initiierung	64
5.3 Einfluss des Gesteinskörnung auf den Chloridgehalt	65
5.4 Beurteilung der Methodik und Verbesserungsvorschläge	66
5.4.1 Allgemeine Beurteilung	66
5.4.2 Auswahl des Bauwerks.....	67
5.4.3 Probeentnahme	67
5.4.4 Probenvorbereitung	68
5.4.5 Versuchsdurchführung.....	68

5.4.6	Korrosionsmonitoring / Detektion der Korrosionsinitiierung	69
5.4.7	„Bohrmehlentnahme“ und Analyse	69
6	Schlussfolgerungen	71
7	Ausblick	73
	Anhang	75
	Literaturverzeichnis.....	85
	Projektabschluss	86
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	89

Zusammenfassung

Im Rahmen von Zustandsuntersuchungen an Bauwerken wird die Chloridkonzentration im Beton in der Tiefe der Bewehrung bestimmt. Dieser Wert wird dann mit dem sogenannten *kritischen Chloridgehalt* verglichen, d.h. dem Chloridgehalt, bei welchem das Einsetzen der Bewehrungskorrosion erwartet wird. Aus dem Vergleich dieser zwei Werte kann sodann objektspezifisch eine Abschätzung des aktuellen Korrosionsrisikos, sowie allenfalls eine Prognose vorgenommen werden. Es wird also abgeschätzt, ob Korrosionsinitiierung in den nächsten Jahren wahrscheinlich ist oder nicht. Dies bildet die Grundlage für die Unterhalts- und Instandsetzungsplanung. Trotz der eminenten, offensichtlichen Bedeutung des kritischen Chloridgehalts besteht in der Literatur keine Übereinstimmung über dessen Grösse.

In dieser Arbeit wurde eine Methode entwickelt, die es erlaubt, den kritischen (korrosionsauslösenden) Chloridgehalt an Prüfkörpern zu bestimmen, welche an realen Bauwerken entnommen werden. Dadurch wird dem Betonalter, dem Betongefüge und der Stahl / Beton Grenzfläche, also den Materialkennwerten, welche den kritischen Chloridgehalt massgeblich beeinflussen, gebührend Rechnung getragen. Es hat sich in dieser Arbeit abermals bestätigt, dass diese wesentlichen Materialeigenschaften bei der Prüfkörperherstellung im Labor kaum realitätsnah reproduzierbar sind. Die unter Berücksichtigung der in dieser Arbeit gemachten Erfahrungen resultierende, optimierte Methode zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts ist im Anhang I des Berichts zusammengefasst.

Die Methode wurde an einem Pilotobjekt, dem Stalvedro-Strassentunnel, erfolgreich getestet. Die Ergebnisse zeigten, dass der kritische Chloridgehalt am untersuchten Objekt über einen grossen Bereich streut, nämlich von 0.22 M-% bis über 1.6 M-% Chlorid bezogen auf den Zementgehalt. Selbst bei hohen Chloridgehalten von 1 M-%/Z korrodierten nur rund die Hälfte der untersuchten Proben; die restlichen Prüfkörper wiesen teils wesentlich höhere kritische Chloridgehalte auf. Ein bekannter, an alten Stahlbetonbauten bestimmter, bauteils-spezifischer kritischer Chloridgehalt der deutlich höher liegt als 0.4 M-%/Z würde die Beurteilung des zukünftigen Korrosionsrisikos erheblich beeinflussen: das Risiko für eine Korrosionsinitiierung würde deutlich kleiner bzw. der Zeitpunkt für das Einsetzen der Korrosion wäre sehr viel später anzusetzen. Dies hätte grosse Folgen für die Instandsetzungsplanung der Bauwerke.

Im Vergleich zu Erfahrungswerten aus der Praxis, die unter üblichen Bedingungen einen kritischen Chloridgehalt von 0.8 bis 1% M-%/Z für die Korrosionsinitiierung angeben, sind die in dieser Arbeit bestimmten Werte deutlich höher und weisen eine breite statistische Verteilung auf. Für die Umsetzung und Interpretation der Resultate ergibt sich weiterer Forschungsbedarf. Es sollen zusätzliche kritische Chloridgehalte an weiteren Bohrkernen aus andern alten Bauteilen mit der hier vorgestellten Methode bestimmt werden, um die Datenbasis zu verbessern. Weiter sind die verwendeten Prognosemodelle im Lichte der neuen, stark streuenden Werte (hier von 0.2 M-% bis 1.6 M-%/Z) des kritischen Chloridgehalts zu hinterfragen. Die grösste Herausforderung besteht in der Klärung der Ursache der grossen statistischen Streubreite. Ein Ansatz könnte der Einbezug weiterer systemrelevanter Informationen (Fläche des Bauteils, Vorhandensein von Makroelementen) sein.

Résumé

Dans le cadre des relevés de l'état des ouvrages d'art, la concentration de chlorure dans le béton est mesurée dans la profondeur des armatures. La valeur mesurée est alors comparée avec la teneur critique en chlorure, c'est à dire le contenu en chlorure prévu d'être nécessaire pour initialiser la corrosion de l'armature. La comparaison de ces valeurs permet d'estimer le risque de corrosion actuel en fonction de la structure et de faire des prévisions. Il est donc évalué si l'initialisation de la corrosion est probable dans les prochaines années. Ceci constitue la base de la planification d'entretien et de la rénovation. Malgré l'importance de la teneur critique en chlorure la littérature n'a pas trouvé d'accord sur la valeur quantitative.

Dans ce travail une méthode a été développée, qui permet de déterminer la teneur critique en chlorure (initiant la corrosion) dans des échantillons provenant d'ouvrages réels. Ceci permet de suffisamment tenir compte de l'âge du béton, de la structure du béton et de l'interface entre acier et béton et donc des caractéristiques du matériau déterminant la teneur critique en chlorure. Lors de ce travail, il s'est avéré à nouveau que les propriétés déterminantes du matériau ne peuvent pas être réalisées de façon réaliste lors de la fabrication d'échantillons au laboratoire. La méthode optimale pour la détermination de la teneur critique en chlorure, tenant compte des expériences de ce travail, est résumée dans l'appendice I de ce rapport.

La méthode a été testée avec succès dans un objet pilote, le tunnel routier Stalvedro. Les résultats ont montré que la teneur critique en chlorure varie considérablement sur les échantillons de l'objet, à savoir entre 0.22 % et 1.6 % de chlorure en masse du ciment. Même en présence de hautes teneurs en chlorure de 1 % en masse, la corrosion n'a été initialisée que dans la moitié des échantillons. Certains autres échantillons ont montré des teneurs critiques nettement supérieures. Une teneur critique en chlorure connu, spécifique à l'élément de construction et déterminé avec des échantillons de béton armé vieilli, qui serait nettement supérieur à la valeur de 0.4 % en masse de ciment, influencerait l'évaluation de la prévision du risque de corrosion. Le risque d'initialisation de corrosion serait sensiblement inférieur respectivement le moment de l'initialisation serait beaucoup plus tard. Ceci aurait des conséquences majeures sur la planification de rénovation des ouvrages.

Comparées à des valeurs acquises en pratique, qui trouvent une teneur critique en chlorure entre 0.4 et 1 % en masse de ciment pour l'initialisation de corrosion, les valeurs mesurées dans ce travail sont nettement supérieures et montrent une large distribution statistique.

Des mesures supplémentaires de la teneur critique en chlorure dans des carottes d'autres constructions vieilles doivent être conduites avec la méthode présentée ici, afin d'améliorer la base de données. En plus les modèles de prévision utilisés sont à réévaluer en vue des nouvelles valeurs de la teneur critique en chlorure, moins conservatives, mais présentant une grande variation (de 0.2 % à 1.6 % en masse de ciment). Le plus grand défi sera de déterminer la raison de la grande variation statistique. Une approche pourrait être de considérer des informations supplémentaires liées au système (surface et exposition du composant, type d'armature, la présence de macroéléments, etc.).

Summary

Condition assessment of reinforced concrete structures relies on the determination of the chloride concentration in concrete at the level of the reinforcement. This concentration is then compared with the so-called *critical chloride content*, that is the chloride content above corrosion of the reinforcement can be expected. Comparing these two values an estimate of the corrosion risk for the specific structure and eventually a forecast can be obtained. Thus it is examined if initiation of corrosion of the reinforcement in the next years might be probable or not. This very often is the basis for planning the maintenance and restoration of the structures. Main problem is that – despite the importance of the value – no agreement exist in literature on the critical chloride content.

In this research work a procedure to determine the critical chloride content has been developed that combines the accuracy of laboratory methods with concrete cores taken from real structures. Thus the materials properties such as age of the concrete, concrete microstructure and the steel / concrete interface that influence the critical chloride content are taken into account. This work also showed that these concrete materials properties cannot be reproduced with young laboratory concrete. The procedure how to determine the critical chloride content based on the results and experience of this work are given in the appendix I of this report.

The procedure has been successfully tested on reinforced concrete cores taken from a pilot object (Stalvedro road tunnel). The results obtained showed that the critical chloride content from cores taken in an area of less than 2 m^2 at this object varied between 0.22 mass% to 1.6 mass% of chloride by weight of cement. Even at chloride contents as high as 1 mass% per cement only about half of the tested reinforced cores showed corrosion initiation; the other half showed much higher critical chloride contents. If the object specific critical chloride content is clearly higher than 0.4% mass%/weight of cement, the evaluation of the corrosion probability clearly changes: the risk for future initiation of corrosion strongly decreases and the time when corrosion initiation has to be expected becomes much longer. This would greatly influence planning the maintenance and restoration of the structures

Compared to values for the critical chloride content reported from experience in practice the ranging from 0.8 to 1.0 mass% by weight of cement, the values determined in this work are higher and show a larger statistical distribution. The interpretation and application of the results of this work requires further research: on several old reinforced concrete structures cores have to be taken and the critical chloride content shall be determined with the procedure presented in this report in order to enlarge the data base. The usual approach to model and predict the corrosion initiation of reinforced concrete has to be re-considered in the light of the large statistical distribution of the critical chloride contents (0.2 – 1.6 mass%/weight of cement) obtained in this work. The major challenge is to clarify the reasons for the large statistical distribution. An approach could be to include additional parameters relevant for the system such as the size of the concrete element or the presence of macro-cells in the evaluation.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Stahlbetonbauweise hat sich für Infrastruktur- und andere Bauten über Jahrzehnte national und international bewährt; der Grossteil der Objekte ist dauerhaft und entsprechend über lange Zeiten funktionsfähig. Dennoch steigt mit zunehmendem Alter das Risiko für Korrosionsschäden, insbesondere infolge des seit den 60er Jahren vermehrten Einsatzes von Tausalzen während des Winters. Über Spritzwasser und Sprühnebel gelangt das Tausalz auf exponierte Brückenbauteile wie z.B. Randbereiche der Fahrbahnplatte, Brückenpfeiler oder Widerlager. Bei unzulänglichen Abdichtungen oder im Bereich von Fugen und Fahrbahnübergängen besteht ausserdem das Risiko des Chlorideintrages in die Fahrbahnplatte und die Brückentragkonstruktion. Es ist hinlänglich bekannt, dass die chloridinduzierte Bewehrungskorrosion die Hauptursache für Schäden an Stahlbetonbauwerken ist.

Im Rahmen von Zustandsuntersuchungen ist es daher üblich, die Chloridkonzentration im Beton in der Tiefe der Bewehrung zu bestimmen. Dieser Wert wird dann mit dem sogenannten *kritischen Chloridgehalt* verglichen, d.h. dem Chloridgehalt, bei welchem erfahrungsgemäss das Einsetzen der Bewehrungskorrosion erwartet wird. Aus dem Vergleich dieser zwei Werte kann sodann objektspezifisch eine Abschätzung des aktuellen Korrosionsrisikos, sowie allenfalls eine Prognose vorgenommen werden. Es wird also abgeschätzt, ob Korrosionsinitiiierung in den nächsten Jahren wahrscheinlich ist oder nicht. Dies bildet die Grundlage für die Unterhalts- und Instandsetzungsplanung.

Der Wert des angenommenen kritischen Chloridgehalts ist in diesem Zusammenhang entscheidend. Basierend auf Forschungsarbeiten in den späten 60er und frühen 80er Jahren [1, 2] wurde der kritische Chloridgehalt bei ca. 0.4% Chlorid bezogen auf das Zementgewicht angesetzt. Die Anwendung dieses Wertes ist heute in der Praxis weit verbreitet [3, 4]. Dabei muss folgendes zu Bedenken gegeben werden:

1. Seit den 80er Jahren wurden weltweit zahlreiche Studien durchgeführt, mit dem Ziel den kritischen Chloridgehalt sowohl für Portlandzement als auch modernere Zemente im Labor zu bestimmen. Der Stand der Forschung wird detaillierter im Kapitel 2 dargelegt; es kann jedoch vorweggenommen werden, dass trotz intensiver Forschungsbemühungen kein Konsens erreicht wurde und die heutige Datenlage keine Verbesserungen der seit den 80er Jahren üblichen Praxis (0.4%-Kriterium) erlaubt. Im Gegenteil, die Resultate streuen in einem grossen Bereich und sind insbesondere bezüglich Zusatzstoffen teils sogar widersprüchlich.
2. Das angewandte 0.4%-Kriterium basiert auf Versuchen und Erfahrungen mit reinem Portlandzement; die Verwendung des Portlandzementes ist jedoch in den letzten Jahrzehnten auch in der Schweiz zurückgegangen und beträgt heutzutage noch knapp 10-15%. Die Anwendung des üblichen kritischen Chloridgehalts auf Bauten mit modernen Zementen (welche beträchtliche Mengen an alternativen Zusatzstoffen wie Kalksteinmehl, Flugasche oder Hochofenschlacke enthalten können) ist fraglich.

In der Schweiz wird das Korrosionsrisiko gemäss SIA 269/2 aufgrund des Gesamtchloridgehalts auf Bewehrungsniveau beurteilt. Bei Chloridgehalten $< 0.4 \text{ M-}\% / \text{Z}$ ist kaum ein Korrosionsrisiko vorhanden, bei $0.4 - 1\%$ ist Korrosion möglich, bei Chloridgehalten $> 1.5 \text{ M-}\% / \text{Z}$ besteht ein hohes Korrosionsrisiko. Obwohl damit ein fixer kritischer Chloridgehalt implizit verneint wird, beruht die Aussage „kaum Korrosionsrisiko“ nach wie vor auf dem Wert von 0.4%. Eine verlässliche Abschätzung der verbleibenden Zeit bis zur Korrosionsinitiiierung ist damit nach dem heutigen Stand des Wissens nicht möglich. Dies gilt sowohl für den „traditionellen“ Ansatz des einfachen Vergleichs von aktuellem (gemessenen) und kritischem Chloridgehalt, als auch für komplexere Ansätze wie deterministische/probabilistische Modelle, welche den Chlorideintrag modellieren und mit dem kritischen Chloridgehalt vergleichen um damit eine Prognose für die Korrosionsinitiiierung machen zu können. Während entsprechende Modelle, z.B. *fib*

model code [5] oder *Duracrete* [6] in manchen europäischen Ländern bereits in Gebrauch sind, ist man in der Schweiz bislang zurückhaltender; ein kürzlich abgeschlossenes ASTRA/AGB Projekt untersuchte die Anwendbarkeit solcher Modelle auf Schweizer Verhältnisse [7]. Die Hauptschwierigkeit bei der Anwendung von allen Modellen dieser Art ist jedoch die Wahl der Input-Parameter. In dieser Hinsicht hat sich gezeigt, dass insbesondere der Altersfaktor (im Diffusionsmodell für den Chlorideintrag) sowie der kritische Chloridgehalt das Ergebnis der Modellrechnung massgeblich bestimmen [8]. Über die Grösse genau dieser zwei Variablen besteht jedoch zum heutigen Zeitpunkt in der Fachwelt kein Konsens [9]. Es steht ausser Frage, dass ein Modell nur Sinn macht, sofern verlässliche Input-Parameter bekannt sind.

1.2 Ziel und Idee der Forschungsarbeit

Die vorliegende Forschungsarbeit hat zum Ziel, eine völlig neue Methode zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts zu entwickeln und in einem ersten Versuch zu testen.

Die grundlegende Idee dabei ist es, die Vorteile von Labormethoden mit den realistischen Bedingungen von bestehenden Bauwerken zu kombinieren (Abb. 1). Konkret sollen Proben an bestehenden Bauwerken entnommen und im Labor getestet werden. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die Stahloberfläche, das Interface Stahl/Beton, sowie der Überdeckungsbeton der Realität entsprechen, d.h. nicht durch die Arbeitsschritte der Probenherstellung von Labormethoden beeinflusst sind. Gleichzeitig ermöglichen die im Labor zur Verfügung stehenden Messgeräte und kontrollierten Bedingungen eine viel genauere Bestimmung der Korrosionsinitiierung sowie des zugehörigen Chloridgehalts, d.h. des kritischen Chloridgehalts, als dies direkt am Bauwerk der Fall wäre.

Labor		Feld	
<p>- NACHTEILE</p> <p>Prüfkörper meist aus jungem Beton.</p> <p>Laborbeton ≠ Bauwerksbeton</p> <p>Stahl wird oft behandelt (gereinigt, entrostet) und nicht wie auf Baustelle eingebaut</p>	<p>+ VORTEILE</p> <p>Kontrollierte Bedingungen</p> <p>Genauere Messinstrumente</p> <p>Reproduzierbarkeit</p> <p>Genauere Probenahme zur Chloridgehaltsbestimmung möglich</p>	<p>+ VORTEILE</p> <p>Realer Beton (Verdichtung, Alter, Hydratisierungsgrad)</p> <p>Reales Stahl/Beton-Interface</p>	<p>- NACHTEILE</p> <p>Unkontrollierte Messbedingungen</p> <p>Genauigkeit der Detektion der Korrosion ist beschränkt</p> <p>Ungenauere Probenahme zur Chloridgehaltsbestimmung möglich</p>
<p>Neue Methode</p>			

Abb. 1 Vergleich der Vor- und Nachteile von Untersuchungen zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts im Labor resp. im Feld.

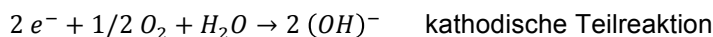
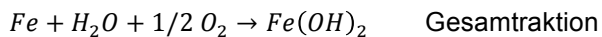
2 Grundlagen & Literatur

In diesem Kapitel sind die nötigen Grundlagen zur Beurteilung der durchgeführten Untersuchungen zum kritischen Chloridgehalt zusammengefasst. In den folgenden Kapiteln wird auf die chloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton eingegangen, das Modell des kritischen Chloridgehalts vorgestellt und ein Überblick über den Stand der Forschung zum kritischen Chloridgehalt gegeben.

2.1 Chloridinduzierte Korrosion

Die chloridinduzierte Korrosion, auch Lochfrass genannt, von Stahl in Beton ist eine häufige Form der Bewehrungskorrosion [10]. Trat die chloridinduzierte Korrosion früher meist infolge des Gebrauchs von chloridhaltigem Zuschlagswasser, Gesteinskörnungen oder Zusatzmitteln (z.B. CaCl_2 als Härtingsbeschleuniger) auf, so wird die chloridinduzierte Korrosion heute hauptsächlich durch das Eindringen von Chloriden aus der Umwelt (z.B. Tausalzen, Meerwasser, PVC-Bränden) verursacht.

Die Gesamtreaktion der Korrosion besteht aus zwei auf der Metalloberfläche ablaufenden elektrochemischen Teilprozessen, der anodischen Oxidationsreaktion und der kathodischen Reduktionsreaktion. Die anodische Oxidationsreaktion ist die eigentliche Metallauflösung. Dabei wird das Eisenatom aus dem metallischen Zustand in den ionischen Zustand überführt, was mit einer Elektronenabgabe verbunden ist. Bei der kathodischen Reduktionsreaktion werden die frei werdenden Elektronen durch Sauerstoff aus der am Metall angrenzenden Umgebung aufgenommen und selbst reduziert.



Obwohl thermodynamisch unedel verhält sich der Stahl in Beton in der Praxis korrosionsbeständig. Dieses Verhalten ist durch die spontane Bildung einer dünnen, schützenden Oxidschicht im alkalischen Milieu als Produkt der anodischen Metallauflösung bedingt. Die sogenannte Passivschicht wirkt als kinetische Barriere an der Grenzfläche Metall / Elektrolyt und verhindert die weitere Auflösung des Metalls. Diese rein kinetische Barriere ist gleichzeitig auch die Schwachstelle der passiven Metalle: ist die Passivschicht zerstört (z.B. durch Chlorideinwirkung) können örtlich sehr hohe Korrosionsgeschwindigkeiten auftreten.

Damit die Korrosion überhaupt ablaufen kann, müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

1. Anodische Metallauflösung: die anodische Metallauflösung ist nur möglich, falls der Stahl in einem depassivierten Zustand befindet. Depassivierung kann durch Chloride im Beton oder durch Karbonatisierung des Betons, also durch den Verlust der Alkalinität, erfolgen.
2. Kathodische Teilreaktion: die kathodische Teilreaktion ist nur möglich, wenn ausreichend Sauerstoff durch den Beton diffundieren kann. Dies ist ausser in wassergesättigten Beton immer möglich.
3. Elektronenfluss: Die anodisch und kathodisch wirkenden Stahlflächen sind durch die elektrische Leitfähigkeit des Metalls miteinander verbunden. Der Elektronenfluss ist somit praktisch immer möglich.
4. Ionenfluss im Beton: durch die elektrolytische Leitfähigkeit des Betons bzw. durch die Feuchtigkeit des Betons ist der Ionenfluss möglich. Ist der Beton trocken, wie häufig in Innenräumen, so können die Korrosionsraten vernachlässigbar klein werden.

Durch das Nebeneinandersein von passivem und korrodierendem Stahl bildet sich ein kurzgeschlossenes galvanisches Element, ein sogenanntes Makroelement (Abb. 2). Da

die korrodierende Stelle (Anode, negative Potentiale) von einer weit grösseren noch passiven Fläche (Kathode, positive Potentiale) umgeben wird, wird der Korrosionsangriff zusätzlich verstärkt und lokal sind sehr grosse Querschnittsverluste zu beobachten. Im Makroelement fliesst als Folge des Potentialunterschieds zwischen dem passiven und korrodierenden Stahl, die treibende Kraft des Makroelements, ein Korrosionsstrom I_{korrr} .

Eine weitere Beschleunigung des Korrosionsvorgangs bei der chloridinduzierten Korrosion wird hervorgerufen, indem nach Initiierung von Lochfrass in der aktiven Zone, dem entstehenden Loch, eine aggressive Umgebung gebildet wird. Aufgrund des Makroelementstroms kommt es zu einem erhöhten Chloridtransport in Richtung Anode. Weiter führt die Bildung von Rostprodukten zu einer Abnahme der Hydroxid-Ionen und somit zu einer deutlichen Reduktion des pH-Werts im Loch. In der kathodischen Zone hingegen werden durch die kathodische Reaktion zusätzliche Hydroxid-Ionen gebildet und die Alkalinität erhöht, was zu einer Stabilisierung des Passivfilms führt.

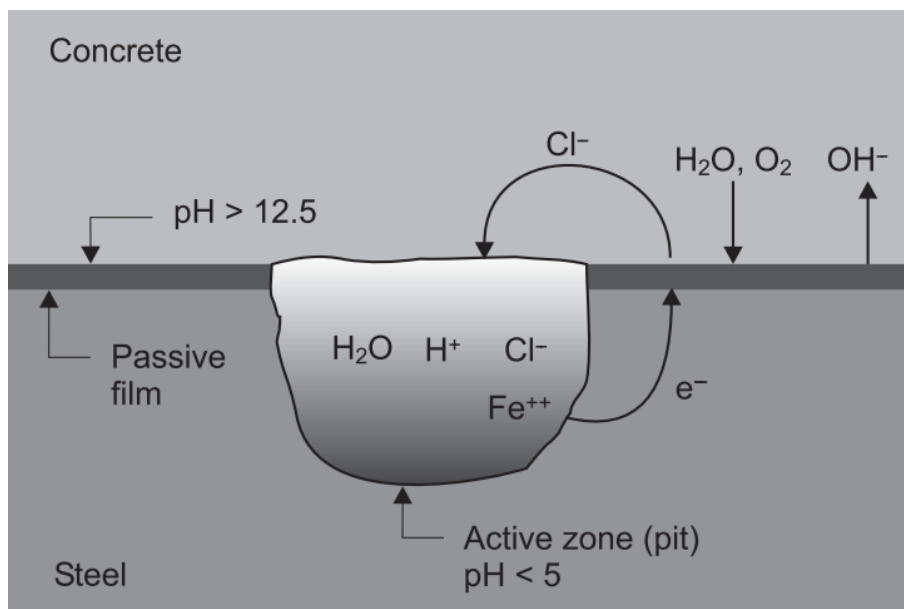


Abb. 2 Chloridinduzierte Makroelementkorrosion [10].

2.2 Kritischer Chloridgehalt

2.2.1 Definition

Bewehrungskorrosion im nicht karbonatisierten, alkalischen Beton kann erst ausgelöst werden, wenn eine gewisse Chloridkonzentration an der Stahloberfläche erreicht wird, welcher die vorhandene, schützende Passivschicht zerstört [10]. Diese korrosionsauslösende Chloridgrenzkonzentration wird als kritischer Chloridgehalt, oder abgekürzt C_{crit} , bezeichnet.

In der Literatur werden – oftmals nicht mit Absicht – zwei verschiedene Definitionen für den kritischen Chloridgehalt C_{crit} verwendet [11, 12]:

Definition 1 Chloridgehalt auf Höhe der Bewehrung, zum Zeitpunkt der Depassivierung der Bewehrung (festgestellt z.B. durch Potentialmessungen).

Definition 2 Chloridgehalt auf Höhe der Bewehrung, zum Zeitpunkt bei dem erkennbare Korrosionserscheinungen als eine Schädigung eingestuft werden (z.B. Rissbildung an der Betonoberfläche).

Diese beiden Arten der Definition haben zu unterschiedlichen Phänomenen einen Bezug. Während die Definition 1 nur die tatsächliche Zeit bis zur elektrochemisch messbaren Depassivierung berücksichtigt, beinhaltet die Definition 2 auch die Zeit des Lochwachstums bis es zu einer makroskopisch erkennbaren Schädigung kommt. Die Chloridkonzentrationen der beiden Definitionen unterscheiden sich wie in Abb. 3 dargestellt je nach akzeptierter Schädigung stark.

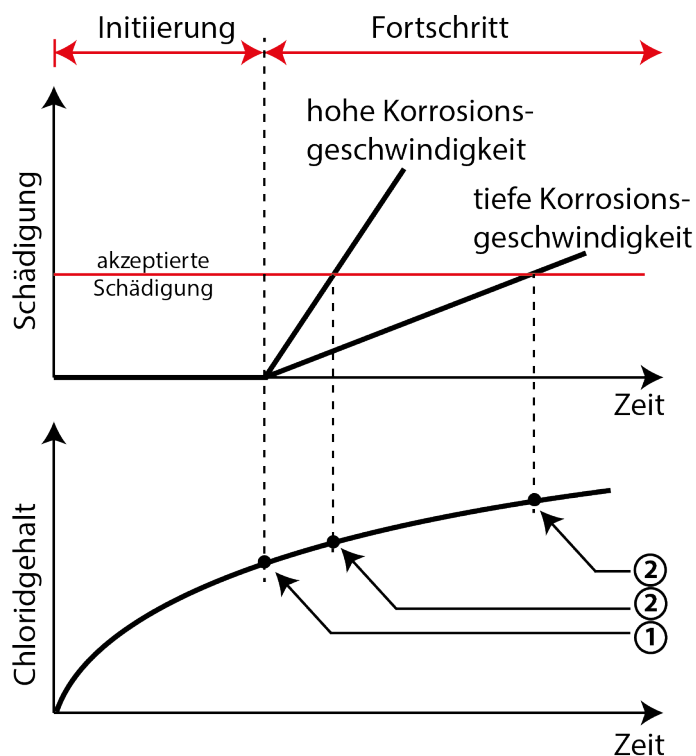


Abb. 3 Definitionen des kritischen Chloridgehalts in der Literatur [12]; Definition 1 bezieht sich auf die Korrosionsinitiierung; Definition 2 auf ein bestimmtes erreichtes Schädigungsmass.

Definition 1 ist präziser, da der Chloridgehalt einen direkten Bezug zur Depassivierung des Stahls im Beton hat. Die Definition 2, bei dem der Chloridgehalt mit der akzeptierten Schädigung in Bezug gebracht wird, hat keinen theoretischen Hintergrund und die

gemessenen kritischen Chloridgehalte variieren sehr stark mit der Definition der akzeptierten Schädigung. In Laborarbeiten ist Definition 1 üblich; Felddaten hingegen basieren oft eher auf Definition 2.

Neben der unterschiedlichen Definition wird der kritische Chloridgehalt in der Literatur auch auf unterschiedliche Arten ausgedrückt. In *Tab. 1* sind die unterschiedlichen Formen ersichtlich.

Die üblichste Art und Weise wie der kritische Chloridgehalt quantifiziert werden kann, ist der totale Chloridgehalt bezüglich des Zementgewichts. Der Hauptgrund für diese Quantifizierungsart ist, dass der totale Chloridgehalt relativ einfach und mit standardisierten Verfahren ermittelt werden kann. Bei der zunehmenden Verwendung von Betonen mit modernen Bindemitteln (reduzierter Klinkergehalt) dürfte diese Methode keine aussagekräftigen Resultate mehr liefern.

Die Quantifizierung des kritischen Chloridgehalts durch die freien Chloride oder durch das Verhältnis der Chloridkonzentration zu der Konzentration der Hydroxide ist eher selten. Diese beiden Quantifizierungsarten haben jedoch ihre Berechtigung, da zum einen nur die freien Chloride für die Lochfrasskorrosion von Bedeutung sind, und die gebundenen Chloride keine Korrosion auslösen können. Zum andern konnte in verschiedenen Untersuchungen von Stahl in alkalischen Lösung (z.B. in [13]) festgestellt werden, dass der kritische Chloridgehalt stark vom pH-Wert abhängt.

Tab. 1 Quantifizierungsarten des kritischen Chloridgehalts

Chloridart	bezogen auf	Einheit
Totaler Chloridgehalt (freie + gebundene Chloride)	Masse des Zements	M-%
	Masse des Betons	M-%
Freie Chloride	Masse des Zements	M-%
	Masse des Betons	M-%
Konzentration der Chloride	-	mol/l
	pro OH- Konzentration	Cl-/OH-

2.2.2 Stand der Forschung

Während mehrerer Jahrzehnte wurden auf internationaler Ebene intensiv Forschungsarbeiten zum kritischen Chloridgehalt durchgeführt. In einer im Jahre 2009 veröffentlichten Übersichtsarbeit [12] wurden mehr als 50 wissenschaftliche Publikationen analysiert und zusammengefasst. Es wurden sowohl Feldversuche berücksichtigt, als auch Arbeiten, welche den kritischen Chloridgehalt im Labor zu bestimmen versuchten. In Abb. 4 sind die kritischen Chloridgehalte von unterschiedlichen Versuchen dargestellt. Die Werte des kritischen Chloridgehalts von Betonproben der untersuchten Forschungsarbeiten streuen zwischen 0,1 M-% und 2,5 M-% des totalen Chloridgehalts bezüglich des Zements sehr stark. Für Mörtelproben ist die Variationsbreite mit 0,04 - 8,34 M-% des totalen Chloridgehalts bezüglich des Zements noch um einiges grösser.

Eine Hauptursache für die grosse Variationsbreite des kritischen Chloridgehalts von Laborversuchen liegt in der erheblichen Variabilität der verwendeten Versuchsaufbauten. Die Evaluation der Literaturdaten in [12] hat gezeigt, dass unglücklicherweise gewisse Aspekte von experimenteller Versuchsmethoden einen stärkeren Einfluss auf das Ergebnis, d.h. den resultierenden kritischen Chloridgehalt, haben als die untersuchten Parameter. So beeinflusst beispielsweise die potentiostatische Kontrolle des Bewehrungsstahls – eine geläufige Methode zur Vereinfachung der Detektion der Korrosionsinitiation – wesentlich das Ergebnis, in gewissen Fällen zu einem grösseren Grad als die Eigenschaften der untersuchten Zementarten.

Auf der Basis des heutigen Sachstandes lassen sich kaum systematische Korrelationen zwischen Bindemittelart und dem kritischen Chloridgehalt erkennen. Dasselbe gilt auch für eine ganze Vielzahl anderer Parameter. Aus den Forschungsanstrengungen der vergangenen Jahrzehnte haben sich übereinstimmend nur die folgenden drei Haupteinflussgrößen herauskristallisiert:

- Das Potenzial der Bewehrung. Je negativer das Bewehrungspotenzial ist, desto höher liegt der kritische Chloridgehalt. Dies konnte experimentell gezeigt werden, und ist im Einklang mit theoretischen Überlegungen.
- Der pH Wert der Porenlösung. Alle bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass der kritische Chloridgehalt umso höher wird, je höher der pH Wert der Betonporenlösung ist (ein hoher pH Wert führt zu einem negativen Potential).
- Die Bedingungen am Stahl/Beton-Interface. Diverse Arbeiten haben gezeigt, dass unterschiedliche Einflüsse des Stahl/Beton-Interfaces eine wesentliche Rolle in der Korrosionsinitiierung spielen. Dies betrifft Poren, Risse, Blutwasserzonen, metallurgische Effekte, etc. Während diese Effekte einen signifikanten Einfluss auf den kritischen Chloridgehalt haben, sind noch viele Fragen offen. Diese werden aktuell im Rahmen des RILEM technical committee TC 262-SCI „Characteristics of the steel/concrete interface and their effect on initiation of chloride-induced reinforcement corrosion“ angegangen [14].

Der aktuelle Sachstand erlaubt im Wesentlichen die folgenden Schlussfolgerungen:

- Zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts ist eine Vielzahl an experimentellen Versuchsaufbauten möglich. Die in der Literatur verwendeten experimentellen Aufbauten sind denn auch sehr unterschiedlich, was wiederum ein Vergleichen der Resultate verschiedener Studien verunmöglicht. Die publizierten Werte für den kritischen Chloridgehalt streuen erheblich, nämlich im Bereich 0.04...8.34% Chlorid bezogen auf das Zementgewicht (d.h. über mehr als zwei Zehnerpotenzen). Die Streuung ist allerdings nicht nur auf die unterschiedlichen Testmethoden verschiedener Autoren zurückzuführen, sondern auch in der stochastischen Phänomenologie der chloridinduzierten Korrosion begründet.
- Viele der verwendeten Versuchsaufbauten sind nicht praxisorientiert und führen daher zu unrealistischen Werten. Beispielsweise wurden Chloride dem Beton häufig mit dem Anmachwasser beim Mischen zugegeben anstelle eines späteren Chlorideintrags in den ausgehärteten Beton. Der verwendete Stahl wurde oft vor dem Einbetten sandgestrahlt, poliert oder gereinigt, was ebenfalls nicht realistischen Bedingungen entspricht. Die Auswertung der Publikationen in [12] hat ausserdem gezeigt, dass gewisse experimentelle Parameter (z.B. potentiostatische Kontrolle der Bewehrung) einen grösseren Einfluss auf das Messergebnis haben als die untersuchten Größen (z.B. w/c-Wert, Bindemitteltyp, etc). Was die Übertragbarkeit von Laborresultaten in die Praxis anbelangt, wird ausserdem generell angenommen, dass im Labor hergestellter und verdichteter Beton ein besseres und homogeneres Mikrogefüge aufweist als dies bei realen Bauwerken der Fall ist. Theoretische Überlegungen legen ausserdem nahe, dass auch die Probengrösse bei Laborversuchen den gemessenen kritischen Chloridgehalt beeinflusst und dieser auch deswegen nicht direkt in die Praxis übertragen werden kann [15].
- Der momentane Stand des Wissens bezüglich des kritischen Chloridgehalts erlaubt daher keine bessere Zustandsbeurteilungen in der Praxis.

2.2.3 Standardisierung der Bestimmung des kritischen Chloridgehalts im Labor

Aufgrund des Mangels eines akzeptierten, standardisierten Verfahrens zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts im Labor wurde im Jahr 2009 das RILEM technical committee 235-CTC „Corrosion initiating chloride threshold concentrations in concrete“ ins Leben gerufen, mit dem Ziel, eine Empfehlung für eine Referenztestmethode zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts zu erarbeiten [16]. Basierend auf dem aktuellen Wissensstand wurde eine entsprechende Methode ausgearbeitet, welche die Minimierung der verfahrensseitigen Einflussgrößen anstrebte, sodass die materialeitigen Einflussgrößen zum Tragen kommen. Diese Methode wurde schliesslich im Rahmen eines Ringversuchs getestet. Während die Methode grundsätzlich funktionierte, erwiesen sich gewisse Einflussgrößen nach wie vor als äusserst dominant. Dies betrifft insbesondere die Bedingungen am Stahl/Beton-Interface, welche man im Rahmen des Ringversuches von RILEM TC 235-CTC mit einem definierten Verfahren zur Erzeugung einer atmosphärisch gebildeten Rostschicht auf der Bewehrungsoberfläche, sowie einem definierten Verfahren zur Betonierung und Verdichtung der Prüfkörper zu kontrollieren versuchte. Die Ergebnisse zeigten jedoch, dass dies nicht gelang, namentlich, dass es nicht einfach ist, realistische Bedingungen des Stahl/Beton-Interfaces im Labor mit einem definierten Verfahren nachzubilden. Es ist nun Ziel des seit 2014 laufenden RILEM TC 262-SCI [14], diese Aspekte weiter zu beleuchten.

Während die Herstellung der Prüfkörper, insbesondere die Abbildung der Realität durch Laborprüfkörper, nach wie vor eine Herausforderung darstellt, wurde im RILEM TC 235-CTC jedoch ein genereller Konsens bezüglich der Auslagerung (Chloridexponierung) der Prüfkörper und der Detektion der Korrosion erreicht. Im Kern besteht die Auslagerung aus einem Verfahren, das einen raschen Chlorideintrag durch den Überdeckungsbeton erlaubt (durch allfälliges, sanftes Vortrocknen und anschliessendes kapillares Saugen), jedoch nur soweit, dass der Chloridtransport im Bereich der Bewehrung durch reine Diffusion erfolgt. Steht mehr Zeit für die Versuchsdurchführung zur Verfügung, kann auf das partielle Vortrocknen auch verzichtet werden und die Chloride durch reine Diffusion durch die gesamte Überdeckung zur Bewehrung geführt werden. In beiden Fällen wird jedoch die Überdeckung vorgängig durch Schneiden reduziert, um den Transportweg für die Chloride zu verkürzen.

Die Detektion der Korrosionsinitiierung erfolgt mittels Potentialmessung. Fällt das Potential ausgehend von einem ursprünglich definierten Passivlevel innerhalb von 24 h um 150 mV ab und verbleibt das Potential über 7 Tage konstant auf diesem tieferen Level, so wird dies als der stabile Anfang der Korrosionsinitiierung definiert. Dieses Kriterium basiert auf experimentellen Arbeiten (z.B. [17]), und soll verhindern, dass der Chloridgehalt zu früh bestimmt wird, namentlich bevor sich ein stabiles Lochwachstum eingestellt hat. Dies würde einem konservativen, nicht praxisrelevanten kritischen Chloridgehalt entsprechen. Nach dem Auftreten der Korrosion wird der Prüfkörper aus der Chloridlösung entfernt und der Chloridgehalt auf Höhe der Bewehrung gemessen. Dieser Chloridgehalt entspricht somit nach Definition dem kritischen Chloridgehalt C_{crit} .

Das von RILEM TC 235-CTC vorgeschlagene experimentelle Vorgehen ist in Abb. 5 dargestellt. Abb. 6 illustriert die Detektion der Korrosionsinitiierung mittels Messung des Stahlpotenzials.

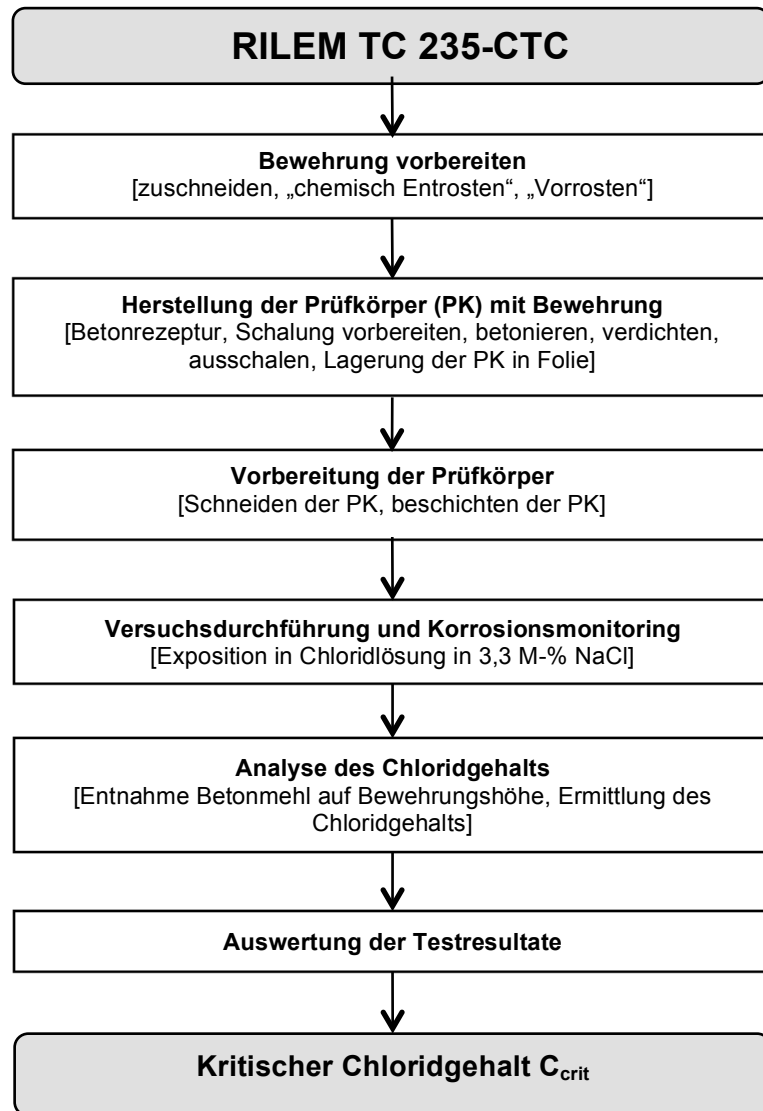


Abb. 5 Schematischer Ablauf der Labormethode zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts gemäss RILEM TC 235-CTC

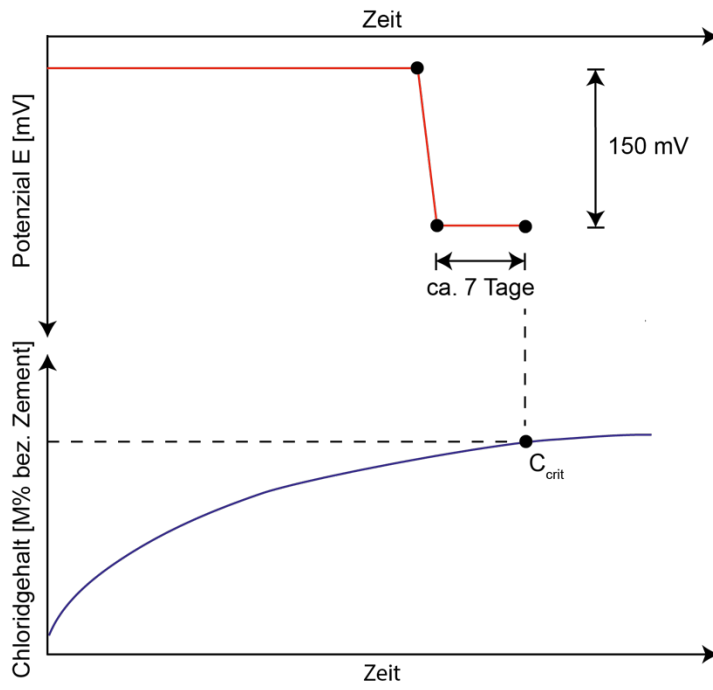


Abb. 6 Kriterium der Korrosionsinitiierung zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts gemäss RILEM TC 235-CTC

3 Pilotversuch – das Bauwerk

In einem Pilotversuch wurde als erster Schritt die Eignung der neuen Methodik zur Bestimmung eines „realistischen“ kritischen Chloridgehalts an einem ausgewählten Bauwerk überprüft. Aus dem Stalvedro-Strassentunnel nahe Airolo wurden dazu Bohrkernentnommen und daran im Labor hauptsächlich die folgenden Parameter gemessen:

- Eigenschaften/Charakteristik vom Beton des ausgewählten Bauwerks (Chloridkontamination, Druckfestigkeit, Wasserleitfähigkeit, Dünnschliffanalyse)
- Kritischer Chloridgehalt des im Beton eingebetteten Bewehrungsstahls

Das detaillierte Vorgehen und die Methodik werden in den folgenden Kapiteln schrittweise beschrieben.

3.1 Auswahl eines geeigneten Bauwerks

Im Vorfeld der Forschungsarbeit musste ein für die Untersuchungen geeignetes Bauwerk gesucht werden. Das Bauwerk resp. das Bauteil sollte optimalerweise die folgenden Kriterien erfüllen:

- Die Stahlbetonoberflächen sollten für Tausalzbeanspruchungen ausgelegt sein, doch keine Oberflächenbeschichtung aufweisen.
- Das Bauwerk/Bauteil sollte wenn möglich keine Korrosionsschäden aufweisen oder wenn, dann erst in einem frühen Stadium und nur in gewissen Bereichen der Konstruktion.
- Das Bauwerk sollte ein Alter von mindestens 10 Jahren, idealerweise >25 Jahren, aufweisen.

Um die Forschungsarbeiten effizient und möglichst ohne zusätzliche bauliche Arbeiten zu gestalten, eigneten sich hauptsächlich Bauwerke, an welchen Zustandserfassungen (z.B. im Rahmen von periodischen Überprüfungen) durchgeführt wurden. Dies garantiert Synergien, z.B. hinsichtlich der Zustandsaufnahme (visuell, Potentialmessungen, Sondieröffnungen) und der Arbeiten seitens eines Bauunternehmers (Probenahme und Reprofilierung der Entnahmestellen). Infrage kamen auch Bauwerke, welche abgerissen werden sollten und daher das Entnehmen von aussergewöhnlich vielen Proben erlauben, sofern sie zumindest bereichsweise frei von Schäden waren.

In der Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Strassen konnte mit dem Stalvedro-Strassentunnel ein geeignetes Objekt gefunden werden. Der Stalvedrotunnel ist ein Strassentunnel der Autobahn A2 Basel-Luzern-Chiasso; er befindet sich direkt südlich des Gotthard-Strassentunnels. Der Stalvedro-Tunnel besteht aus zwei Röhren, eine für den Verkehr südwärts (Länge von 358.55 m) und eine für den Verkehr nordwärts (Länge von 322.80 m). Beide Röhren wurden in den frühen 70er Jahren in Stahlbetonbauweise erstellt und weisen damit ein Bauwerksalter von rund 40 Jahren auf.

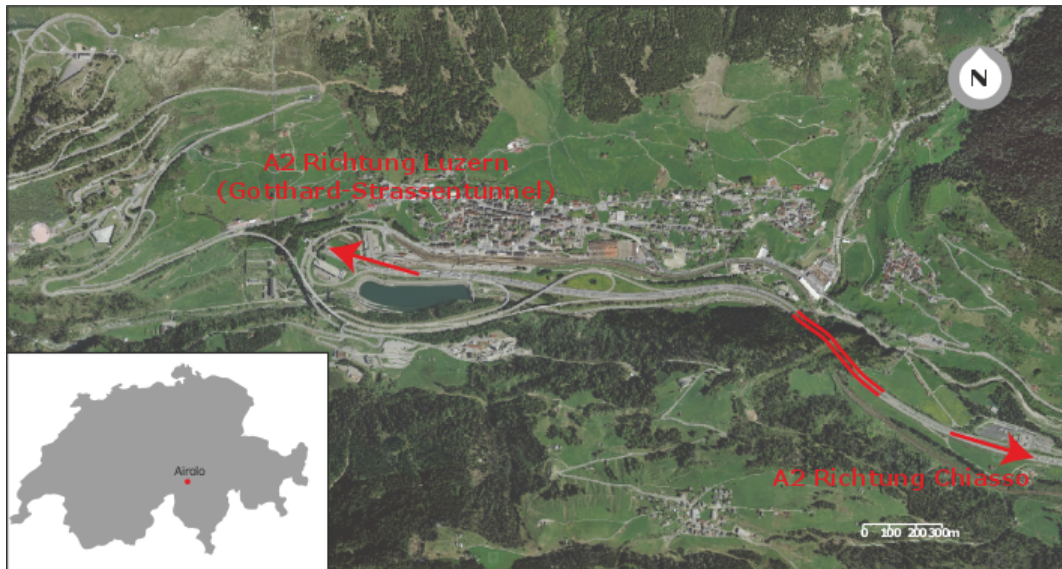


Abb. 7 Standort des Stalvedro-Strassentunnels.

3.1.1 Zustandserfassung

Während der Sperrung des Gotthardtunnels für Unterhaltsarbeiten konnte die Sperrung auf den Stalvedrotunnel ausgeweitet werden. Damit konnte im März 2013 während 2 Nächten in einem ersten Schritt eine umfassende Zustandsaufnahme der beiden Portalbereiche der Nord-Süd-Röhre durchgeführt werden (Abb. 8). Neben visuellen Untersuchungen wurden mit Potentialfeldmessungen und Überdeckungsmessungen zerstörungsfreie Messmethoden der Zustandserfassung eingesetzt. Die Zustandsaufnahme hatte primär das Ziel, die Entnahmestellen für die verschiedenen Bohrkern mit der Bewehrung, welche noch keine Korrosion aufweisen durften, zu bestimmen, und das Bauwerk hinsichtlich Materialeigenschaften und Zustand zu charakterisieren.

In der ersten Nacht wurde die Potentialmessung bei beiden Portalen durchgeführt. Dabei wurde jeweils das gesamte über der Strasse stehende Tunnelgewölbe auf einer Länge von 10 m gemessen. Die Potentialmessung erfolgte in einem Raster von 0,5 m (horizontal) und 0,25 m (vertikal). Im Bereich der Ulme, wo sich eine marode Beschichtung befand, wurden die Potentiale mit einer Einzelelektrode von Hand gemessen. Durch lokales Aufschlagen der Beschichtung mit einem Beil, konnte garantiert werden, dass der elektrolytische Kontakt an den Messstellen bestand. Im Firstbereich des Tunnels konnte mit Hilfe einer mobilen Hebebühne eine Radelektrode eingesetzt werden. Der elektrische Anschluss an die Bewehrung wurde durch lokales Aufspitzen bewerkstelligt.



Abb. 8 Foto der Zustandserfassungsarbeiten beim Portal Süd des Stalvedro-Strassentunnels.

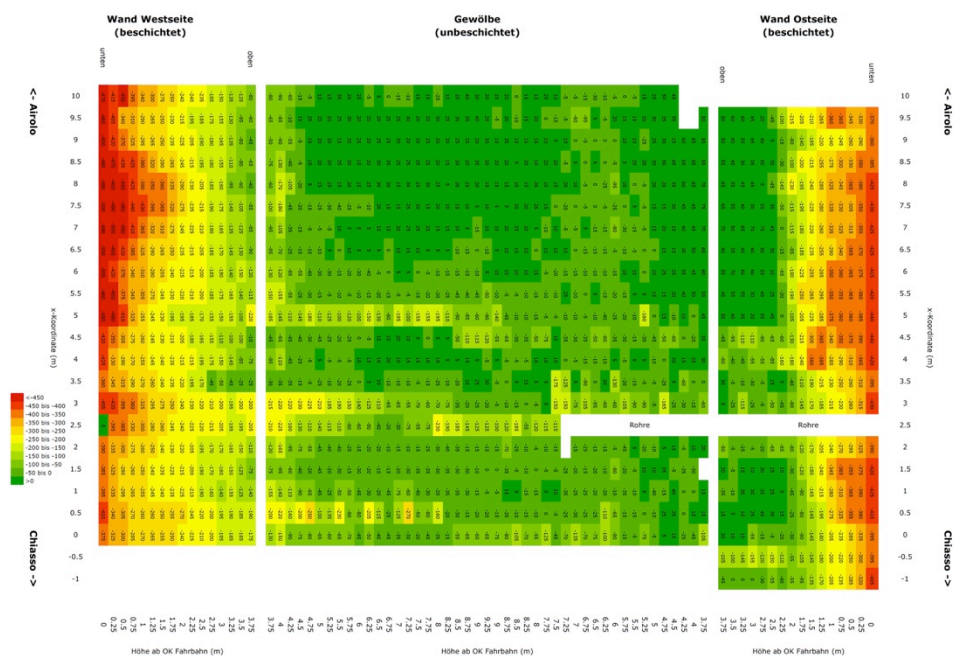


Abb. 9 Farbplot der Potenzialmessungen beim Portal Süd der Nord-Süd-Röhre des Stalvedro-Strassentunnels.

Die Auswertung der Potentialmessungen zeigte, dass sich das südliche Tunnelportal (Tunnelausfahrt) in einem deutlich besseren Zustand befand, als das nördliche Portal (Tunneleinfahrt). Die Ulmenbereiche beider Tunnelportale wiesen jedoch bereits erhebliche Schädigungen auf, was eine Bohrkernentnahme mitsamt Bewehrung in diesen Bereichen ausschliesst. Dies war sowohl visuell erkennbar (Risse oder Abplatzungen) als auch anhand der ausgewerteten Potentialmessungen (Abb. 9). Der Firstbereich, hingegen, wurde aufgrund der Zustandserfassung als frei von Korrosionsschädigungen

eingestuft, womit er sich für die Probenahme eignete. Die hier gemessenen Potenzialwerte streuten grösstenteils im Bereich von -100 mV CSE bis $+100$ mV CSE. Abb. 10 zeigt die Bereiche, in welchen schliesslich Bohrkerne entnommen wurden.

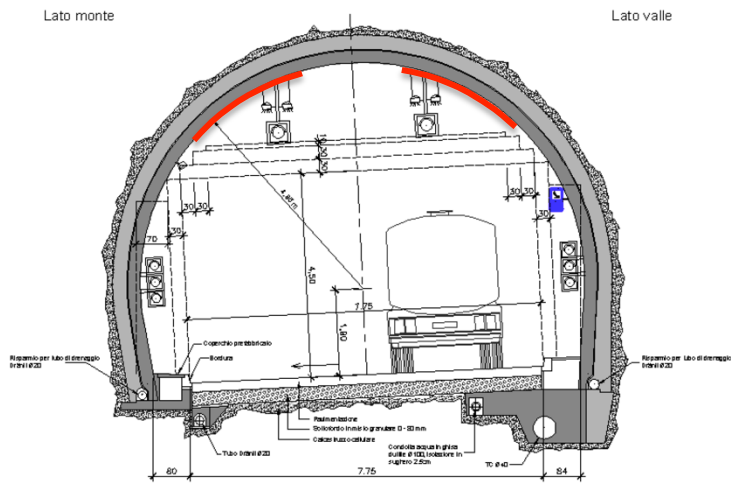


Abb. 10 Querschnitt des Stalvedro-Strassentunnels mit eingezeichneten Probenahmestellen (rot)

3.1.2 Probenahmen

In zwei weiteren Nächten erfolgte die Probenahme der Bohrkerne. Es wurden zwei Typen von Bohrkerne entnommen (Abb. 11):

Für die Bestimmung des kritischen Chloridgehalts wurden aus dem seitlichen Bereich des Firstes nahe des Südportals 21 Bohrkerne mit Durchmesser 150 mm (Bohrkerne A) mitsamt Bewehrung entnommen. Betonschädigungen an den Entnahmestellen waren keine sichtbar. Die Kernbohrungen wurden konzentriert in 3 Bereichen entnommen, so dass grössere Unterschiede in der Betonqualität ausgeschlossen werden konnten. Sie wurden so ausgeführt, dass zentrisch ein Bewehrungsstab, möglichst rechtwinklig zur Bohrrichtung, enthalten war.

Für die weiteren Laborprüfung wurden zusätzlich 20 Bohrkerne entnommen (Bohrkerne B), die repräsentativ für die Entnahmestellen der Bohrkerne A (zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts) sind, d.h. gleiche Exponierung und gleicher Beton aufweisen.

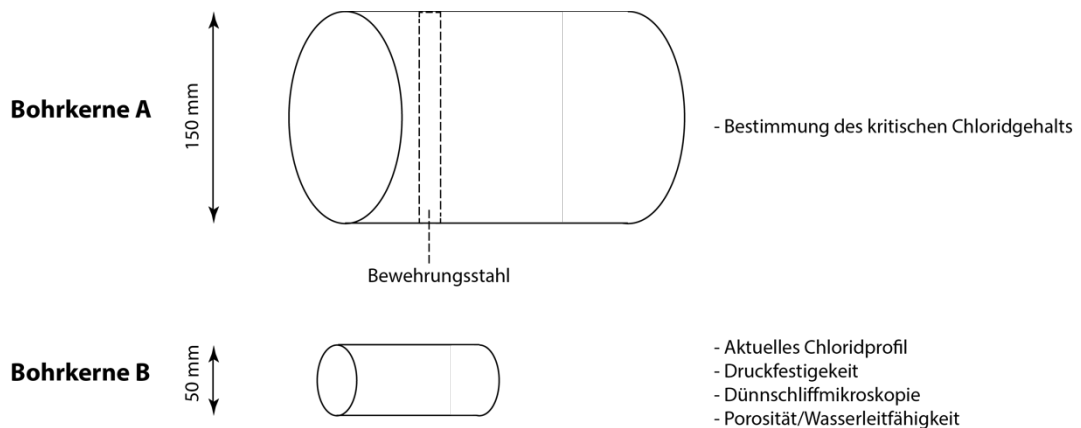


Abb. 11 Schematische Darstellung der zwei Bohrkertypen A (150 mm, mit Bewehrung) und B (50 mm, ohne Bewehrung), welche aus dem Firstbereich des Stalvedro-Strassentunnels entnommen wurden. Rechts aufgelistet sind die Prüfungen, die daran durchgeführt wurden.

Die insgesamt 41 Bohrkern wurden aus einem äusserst begrenzten Bereich des Bauwerks entnommen, um die Wahrscheinlichkeit für homogene Bedingungen (gleiche Betonieretappe, etc) möglichst zu erhöhen. Es wurden drei Entnahmebereiche von ca. 1 m² Fläche definiert, aus welchen jeweils zwischen 5 und 8 Bohrkern vom Durchmesser 150 mm (Typ A, mit Bewehrungsstab), sowie 6-7 Bohrkern vom Durchmesser 50 mm (Typ B, ohne Bewehrungsstab) entnommen wurden (Abb. 12). Der Abstand zwischen diesen drei Flächen war jeweils nicht grösser als 1 m.

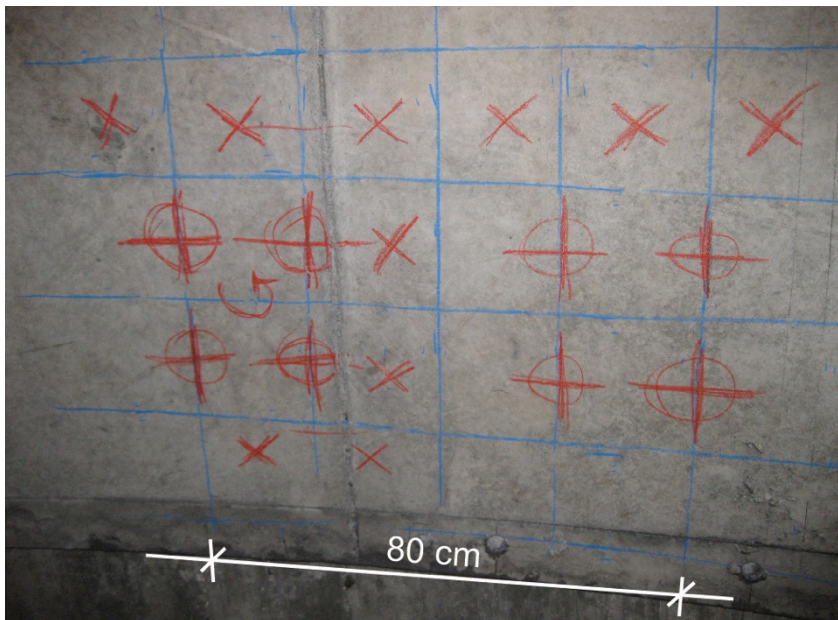


Abb. 12 Einer der drei Bereiche im Firstbereich des Tunnels für die Entnahme der Bohrkern. Die blauen Striche deuten die Lage des Bewehrungsnetzes an (20er Teilung); die roten Kreuze sind potenzielle Entnahmestellen für die Bohrkern B; die roten Kreuze mit einem Kreis sind die Entnahmestellen für die Bohrkern A.

3.2 Laborprüfungen

3.2.1 Bestimmung des aktuellen Chloridgehalts

An drei Bohrkernen aus dem Firstbereich wurden Chloridanalysen durchgeführt. Aus den abgeschnittenen Betonüberdeckungen der Prüfkörper wurden dazu in verschiedenen Tiefenstufen Bohrmehlproben zur Chloridanalyse entnommen. Die Analysen ergaben in der ersten Stufe von 0 bis rund 10 mm Tiefe Chloridgehalte zwischen 0,24 und 0,34 M-% bez. auf das Zementgewicht. In einer Tiefe von rund 20 mm konnten hingegen mit einem Chloridgehalt von < 0,08 M-% bez. auf das Zementgewicht beinahe keine Chloride gefunden werden (Abb. 13). Die Betonüberdeckung der Bewehrung betrug im Allgemeinen mehr als 50 mm. Es ist somit auf Bewehrungshöhe mit vernachlässigbaren Chloridkonzentrationen zu rechnen.

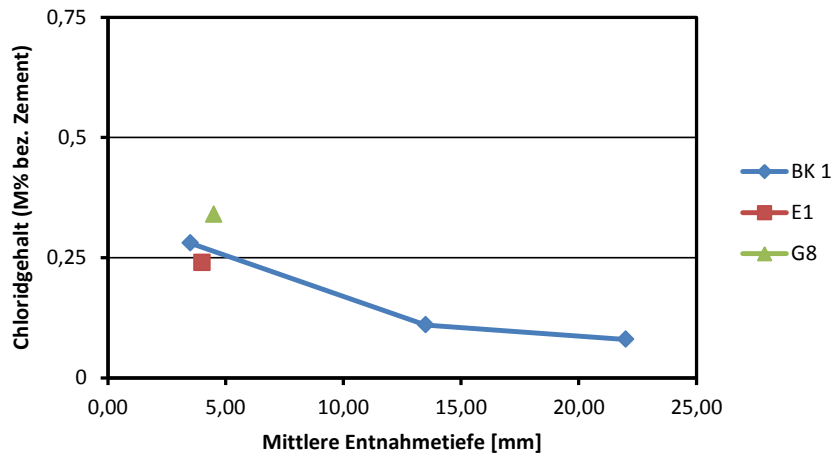


Abb. 13 Chloridgehalt im Firstbereich des Stalvedro-Strassentunnels (Portal Süd).

3.2.2 Bestimmung des Chloridmigrationskoeffizienten

Die Bestimmung des Chloridwiderstands bzw. des Chlorid-Migrationskoeffizienten des Betons wurde gemäss SIA 262/1 Anhang B (SIA 262/1, 2003), welches dem Verfahren gemäss der Norm SN EN 206-1 entspricht, durchgeführt.

Der Chloridwiderstand wurde in drei Serien à 5 resp. 4 Prüfkörpern aus den Bohrkernen B ermittelt. Dazu wurden diese auf eine Länge von 50 mm geschnitten. In der folgenden Tabelle sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Serien dargestellt.

Tab. 2 Prüfergebnisse Chloridwiderstand (nach SIA 262/1 Anhang B)

Messwert	Einheit	Serie 1 μ / σ	Serie 2 μ / σ	Serie 3 μ / σ
Nassrohddichte	kg/m ³	2'464 / 29.8	2'454 / 16.8	2'455 / 13.0
Angelegte Spannung	V	20.1 / 0.1	20.1 / 0.0	20.1 / 0.0
Mittlere Chlorideindringtiefe	mm	2.7 / 1.9	0.3 / 0.3	5.5 / 4.0
Max. Chlorideindringtiefe	mm	3.2 / 2.2	1.8 / 2.4	8.0 / 5.0
Chloridmigrationskoeffizient	10 ⁻¹² m ² /s	1.6 / 1.2	0.1 / 0.1	3.4 / 2.7

Der ermittelte Chloridwiderstand des Bauwerksbetons mit einem Mittelwert von $1,7 \times 10^{-12}$ m²/s ist als generell hoch zu bezeichnen. Es ist jedoch zu bemerken, dass die Chlorideindringtiefen der drei Serien stark variieren, obwohl die Probekörper aus demselben Bereich des Tunnels entnommen wurden und somit keine grösseren Abweichungen aufweisen sollten.

3.2.3 Wasserleitfähigkeit und Porositätswerte

Durch das Bestimmen der Porositätswerte nach SIA 262/1 Anhang A kann neben der Wasserleitfähigkeit auch die Gesamtporosität und der Anteil an Kapillar- und Gelporen abgeschätzt werden. Diese Werte ergänzen die Daten zum Chloridwiderstand.

Die Wasserleitfähigkeit wurde an drei Serien an 3 resp. 4 Bohrkernen des Typs B mit den Abmessungen L = 50 mm und Durchmesser = 50 mm ermittelt. In der folgenden Tabelle sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Serien dargestellt.

Tab. 3 Prüfergebnisse Wasserleitfähigkeit (nach SIA 262/1 Anhang A)

Messwert	Einheit	Serie 1 μ / σ	Serie 2 μ / σ	Serie 3 μ / σ
Wasseraufnahme M_{24}	g/m ²	1'849 / 682	1'980 / 410	2'209 / 797
Steighöhe h_{24}	Mm	34.7 / 7.2	37.5 / 5.9	37.1 / 7.9
Wassergehalt zu Beginn des Aufsaugversuches	Vol-%	5.6 / 0.6	5.2 / 0.2	5.9 / 0.5
Gehalt an Hydratationsporen	Vol-%	10.8 / 0.6	10.4 / 0.3	11.7 / 0.5
Gesamtporengehalt	Vol-%	12.4 / 0.6	11.8 / 0.4	13.6 / 1.1
Luftporengehalt	Vol-%	1.6 / 0.3	1.4 / 0.1	1.9 / 0.9
Wasserleitfähigkeit für eine Bauteildicke von 200 mm	g/m ² h	7.0 / 3.2	7.8 / 2.6	8.7 / 3.9

Der Serienmittelwert der Wasserleitfähigkeit aller Serien erfüllt den für die Prüfungsart TT-1 geforderte Grenzwert von 10,0 g/m²h gemäss der SIA 262/1:2013. Die aufgenommene Wassermenge ist somit kleiner als die minimal verdampfbare Wassermenge auf der wasserabgewandten Prüfkörperseite. Der Beton gilt somit als „wasserdichter“ Beton.

3.2.4 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit von drei Serien à 8 resp. 9 Bohrkernen mit Durchmessern von 50 mm wurde gemäss EN 12504-1 ermittelt. In der folgenden Tabelle sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Serien dargestellt. Die Einzelwerte sind im Anhang einsehbar.

Tab. 4 Prüfergebnisse Druckfestigkeit

Messwert	Einheit	Serie 1	Serie 2	Serie 3
Rohdichte	g/m ²	2375 / 15	2378 / 20	2384 / 33
Festigkeit	N/mm ²	71.5 / 3.7	69.2 / 7.1	75.9 / 5.5

Der Mittelwert aller Prüfkörper liegt bei 72 N/mm². Die Resultate der Einzelwerte der drei Serien streuen zwischen 56 und 89 N/mm². Die Mittelwerte der drei Serien können gemäss Norm als Einzelwerte für einen Bohrkern mit Durchmesser 100 mm angesehen werden, so dass die Weiterrechnung nach dem Ansatz B (3 bis 14 Druckfestigkeitsergebnisse, \varnothing 100 mm) erfolgen kann. Die charakteristische Festigkeit von genormten Prüfkörpern liegt somit bei 85 N/mm², was einer heutigen Druckfestigkeitsklasse von C80/95 entspricht.

Die Druckfestigkeit des Betons (mit reinem Portlandzement und ohne Zusatzmittel), wie in diesem Falle bekannt, kann mit der Formel

$$f_c(t) = f_{c,28} \times [0,41 \times (\log(t) + 1)]$$

ungefähr auf das Alter von 28 Tagen umgerechnet werden. Unter der Annahme eines Betonalters von ca. 45 Jahren ergibt sich damit eine 28-Tage-Druckfestigkeit $f_{c,28}$ von rund 40 N/mm².

3.2.5 Dünnschliffmikroskopie

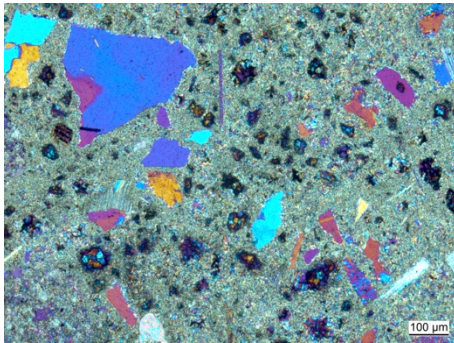
Der Beton für die Dünnschliffe wurde während drei Tagen bei 50 °C im Ofen getrocknet. Danach wurde er mit Epoxidharz, das einen fluoreszierenden Farbstoff enthält, imprägniert. Durch Schneiden, Schleifen und Polieren wurde ein Dünnschliff mit einer Dicke von ca. 25 µm hergestellt (ca. 50 x 80 mm²) und mit einem Polarisationslichtmikroskop untersucht.

An der EMPA und der ETH wurden an unterschiedlichen Proben Dünnschliffmikroskopien durchgeführt. Die jeweiligen Resultate sind in den *Tab. 5* resp. *Tab. 6* aufgelistet.

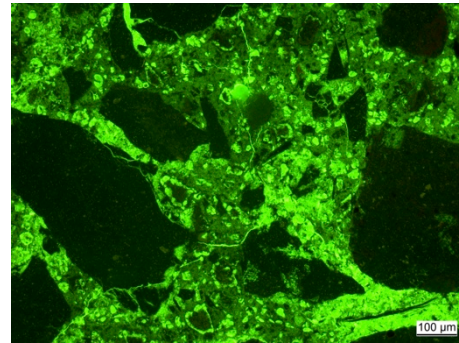
Im Allgemeinen sind die Untersuchungen im Einklang; einzig die Karbonatisierungstiefe variiert zwischen den untersuchten Proben (knapp 5 mm bei der an der ETH untersuchten Probe, 13 bis 37 mm bei den an der EMPA untersuchten Proben). Die im Rahmen der Zustandserfassung durchgeführten Karbonatisierungstiefenmessungen (mechanisches Spalten von Bohrkernen; Besprühen der frischen Bruchflächen mit Thymolphthalein, das einen Umschlagspunkt bei ca. pH 9.5–10.5 aufweist) zeigte an den Tunnelwänden Karbonatisierungstiefen zwischen 3 und 30 mm.

Tab. 5 Resultate der Dünnschliffmikroskopie EMPA

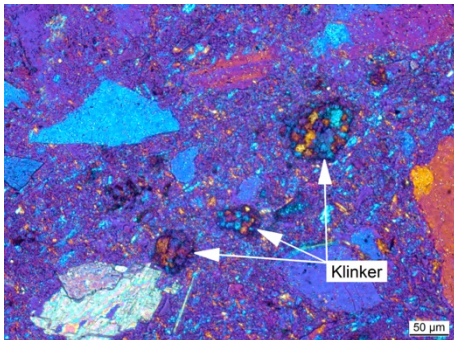
Hydratationsgrad des Zementsteines	Der Hydratationsgrad des Zementsteines beträgt ca. 85% (Abb. 14-a). Die Grösse der Portlanditaggregate liegt leicht unter dem üblichen Bereich (20-35 µm).
Kapillarität des Zementsteines	Im Bereich von Millimeter bis Zentimeter ist die Kapillarität des Zementsteins (exklusiv Interface) relativ homogen. Im Mikrometer-Bereich ist er ungewöhnlich inhomogen (Abb. 14-b). Im Bereich von unhydratisierten Klinkerkörnern ist die Dichte erhöht (Abb. 14-c). Des Weiteren sind Bereiche (1-4 mm) erhöhter Porosität vorhanden, in denen praktisch keine Klinkerkörner vorkommen. Die durchschnittliche Kapillarität ist relativ tief.
Makroporosität (> 1 µm)	Der Anteil an Luftporen beträgt 1.0-1.5 Volumen-% (Abb. 14-d). Verdichtungsporen > 1 mm sind keine vorhanden.
Haftung Zementstein/ Gesteinskörnung	Die Porosität des Zementsteines ist im Interface zwischen Zementstein und Gesteinskörnung deutlich erhöht (Abb. 14-e). Ablösungen im Interface sind keine vorhanden.
Gesteinskörnung	Die Gesteinskörnung besteht aus ca. 5% Karbonaten (Abb. 14-f). Beim Rest handelt es sich um Silikate, hauptsächlich Gneise und einige Quarzite. Die Gesteinskörnung ist teilweise gerundet. Im Feinanteil sind wenige Prozent Glimmer vorhanden. Zahlreiche Gesteinskörner weisen Mikrorisse auf, wie das bei metamorphen Silikaten oft zu beobachten ist. Die Korngrössenverteilung ist regelmässig ohne Ausfallkörnung. Das Grösst Korn liegt im Bereich von 20 mm.
Risse	Es sind nur wenige senkrecht zur Betonoberfläche stehende Schwindrisse zu beobachten und ihre Breite ist klein (< 30 µm / Abb. 14-g). Auch der restliche Zementstein weist nur wenige Mikrorisse auf. Risse > 20 µm sind keine vorhanden.
Kristallbildung	Es sind keine sekundären Mineralbildungen erkennbar (ausgenommen Calcit im karbonatisierten Bereich).
Karbonatisierungstiefe	Die Karbonatisierungsfrent verläuft sehr unregelmässig und schwankt deshalb in ihrer Tiefe um einige Millimeter (Abb. 14-h). Die Karbonatisierungstiefe liegt bei der Probe G91 zwischen 13-20 mm, bei der Probe F5 zwischen 25-37 mm.



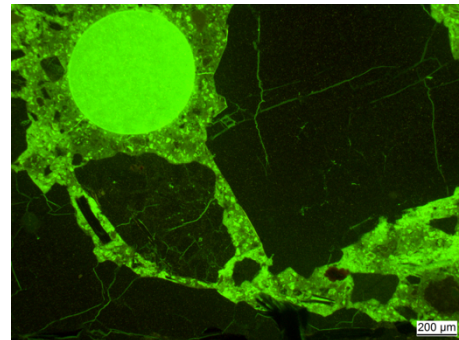
(a) Unhydratisierter Zementklinker im karbonatisierten Bereich des Betons. Hydratationsgrad im nicht-karbonatisierten Bereich vergleichbar. Doppelt polarisiertes Licht mit eingeschobener Gipsplatte.



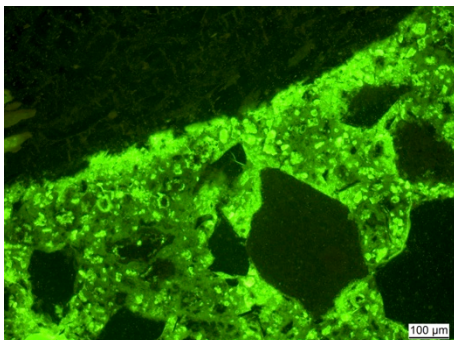
(b) Zementstein mit einigen Mikrorissen und relativ inhomogenem Zementstein im Mikrometerbereich. Fluoreszierendes Auflicht.



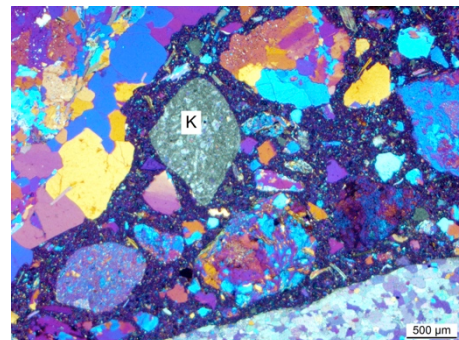
(c) Dichterer Zementstein im Bereich von unhydratisierten Klinkerkörnern. Doppelt polarisiertes Licht mit eingeschobener Gipsplatte.



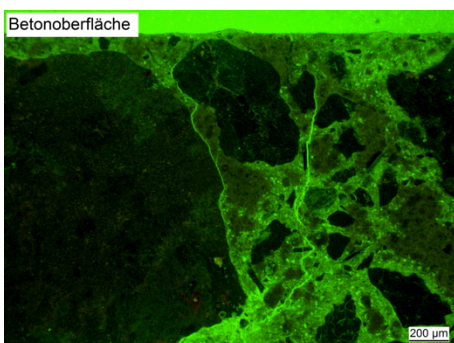
(d) Luftpore und Gesteinskörnung mit Mikrorissen. Fluoreszierendes Auflicht.



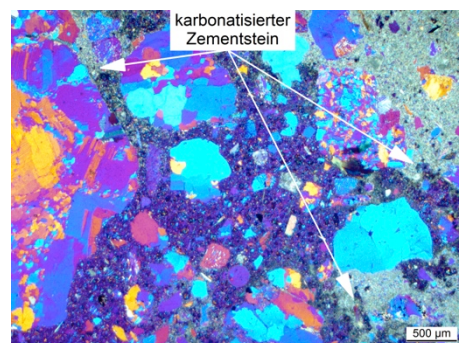
(e) Erhöhte Porosität des Zementsteines im Interface. Fluoreszierendes Auflicht.



(f) Karbonatisches Korn (K) zwischen silikatischen Körnern. Doppelt polarisiertes Licht mit eingeschobener Gipsplatte.



(g) Senkrecht zur Oberfläche (Untersicht) stehende Risse. Risse direkt an der Oberfläche durch Schmutz verfüllt. Fluoreszierendes Auflicht.



(h) Karbonatisierungsfront. Doppelt polarisiertes Licht mit eingeschobener Gipsplatte.

Abb. 14 Dünnschliffmikroskopie

Tab. 6 Resultate der Dünnschliffmikroskopie ETH

Aggregate	Es können zwei Fraktionen von Zuschlägen beschrieben werden. Die Zuschläge grösser 2 mm beinhalten hauptsächlich Silikate wie z.B. Granite, Gneise, Quarze und Hornstein. Die Zuschläge kleiner 2 mm beinhalten kristallinen Kalkstein, Quarzkörner und Plagioklase.
Zementtyp:	Die Zementmatrix besteht aus Portlandzement.
Hydratationsgrad:	Hoher Hydratationsgrad, da starke Alite-Hydratationsränder.
Homogenität der Zementmatrix:	Heterogene Zementmatrix. Starkes Auslaugen und beginnende Karbonatisierung in stark ausgelaugten Bereichen.
Ca(OH) ₂ :	Kleine Kristalle um die groben Zuschläge.
Karbonatisierung	Die Karbonatisierungstiefe variiert sehr stark und liegt zwischen 2-5 mm.
Risse:	Keine Oberflächenrisse, jedoch kleine Risse in den Zuschlägen.

3.2.6 ESEM-Analyse des Stahl-Beton-Interfaces

Aufgrund der Relevanz des Stahl-Beton-Interface in Bezug auf den kritischen Chloridgehalt, wurde das Stahl-Beton-Interface eines Prüfkörpers mit dem Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM) untersucht. Dazu wurde an einem bewehrten Bohrkern der Bereich um eine Stirnfläche eines Bewehrungsstabes mit einer wassergekühlten Diamantkreissäge abgeschnitten. In Abb. 15 sind zwei makroskopische Aufnahmen und vier ESEM Aufnahmen (400-fache Vergrösserung) dargestellt. Nachfolgend sind die Feststellungen aufgeführt:

- Der Beton weist auf der Unterseite und der linken Seite des Bewehrungsstahls (weisser Bereich in den ESEM-Aufnahmen) eine deutlich höhere Porosität auf, als auf der Oberseite und der rechten Seite des Stahls.
- Am Rand des Bewehrungsstahls sind Rostprodukte (helles grau) zu erkennen.
- Die direkt am Stahl-Beton-Interface sichtbaren Risse sind vermutlich durch die Probenvorbereitung (Schneiden, Polieren) entstanden.

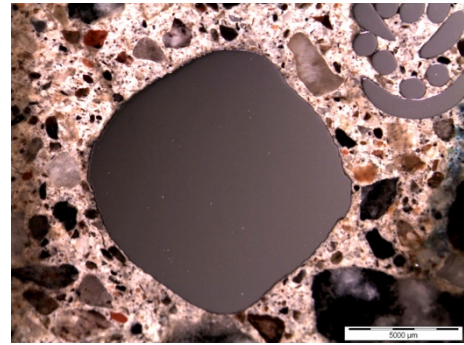
3.2.7 Zusammenfassung der Laboruntersuchungen

Aus den Laboruntersuchungen zur Betonqualität konnten zusammenfassend folgende wichtigen Erkenntnisse gewonnen werden:

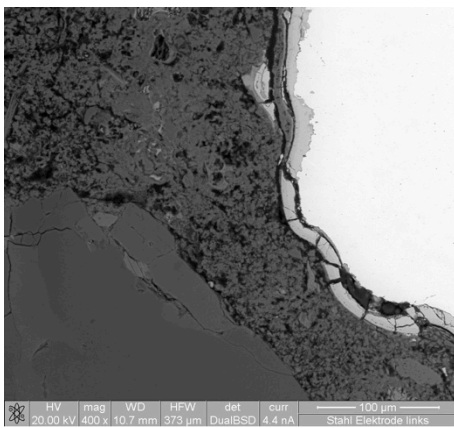
- Auf Bewehrungshöhe sind keine Chloride vorhanden
- Die Karbonatisierung ist nicht bis zum Bewehrungsstahl vorgedrungen
- Bei der Betonherstellung wurde reiner Portlandzement verwendet
- Die Gesteinskörnungen sind beinahe vollkommen säureunlöslich
- Die Porosität ist eher hoch und inhomogen verteilt. Lokal kann eine sehr hohe Porosität auftreten.
- Der Chloridwiderstand des Betons ist möglicherweise aufgrund der grossen Chloridbindekapazität (Portlandzement) dennoch als hoch einzustufen.



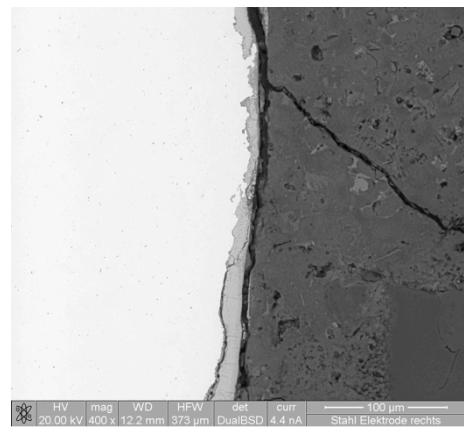
(a) Makro-Aufnahme des untersuchten Bohrkerns bzw. Bewehrungsstahls. Die untere Seite des Bohrkerns entspricht der Betonoberfläche an der Deckenuntersicht des Tunnels.



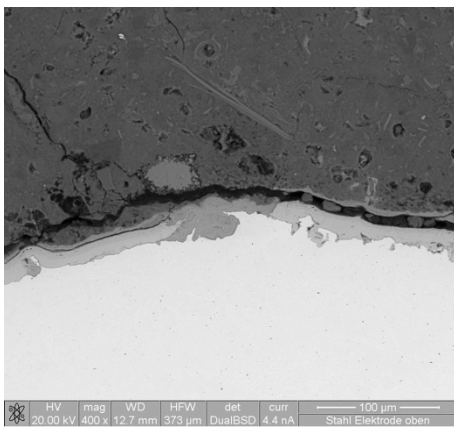
(b) Makro-Aufnahme des Querschnitts des untersuchten Bewehrungsstahls im Beton.



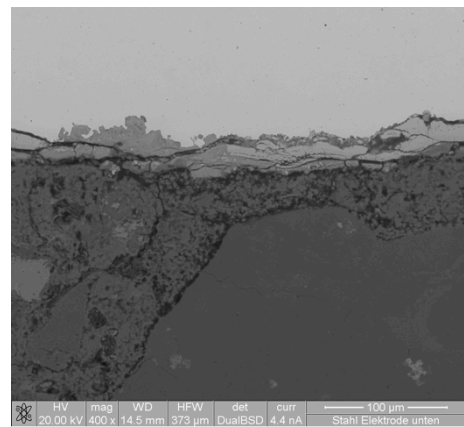
(c) ESEM-Aufnahme des Stahl-Beton-Interfaces, Unterseite links, mit 400-facher Vergrößerung.



(d) ESEM-Aufnahme des Stahl-Beton-Interfaces rechts mit 400-facher Vergrößerung.



(e) ESEM Aufnahme des Stahl-Beton-Interfaces oben mit 400-facher Vergrößerung.



(f) ESEM Aufnahme des Stahl-Beton-Interfaces unten mit 400-facher Vergrößerung.

Abb. 15 Makro- und ESEM-Aufnahmen des Stahl-Beton-Interfaces.

4 Bestimmung des kritischen Chloridgehalts

4.1 Geplante Methodik zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts

4.1.1 Versuchsaufbau

Das Versuchsaufbau der vorgeschlagenen Methodik wurde in Anlehnung an das Laborverfahren gemäss RILEM TC 235-CTC durchgeführt (vgl.). Nachfolgend wird auf die einzelnen Verfahrensschritte eingegangen.

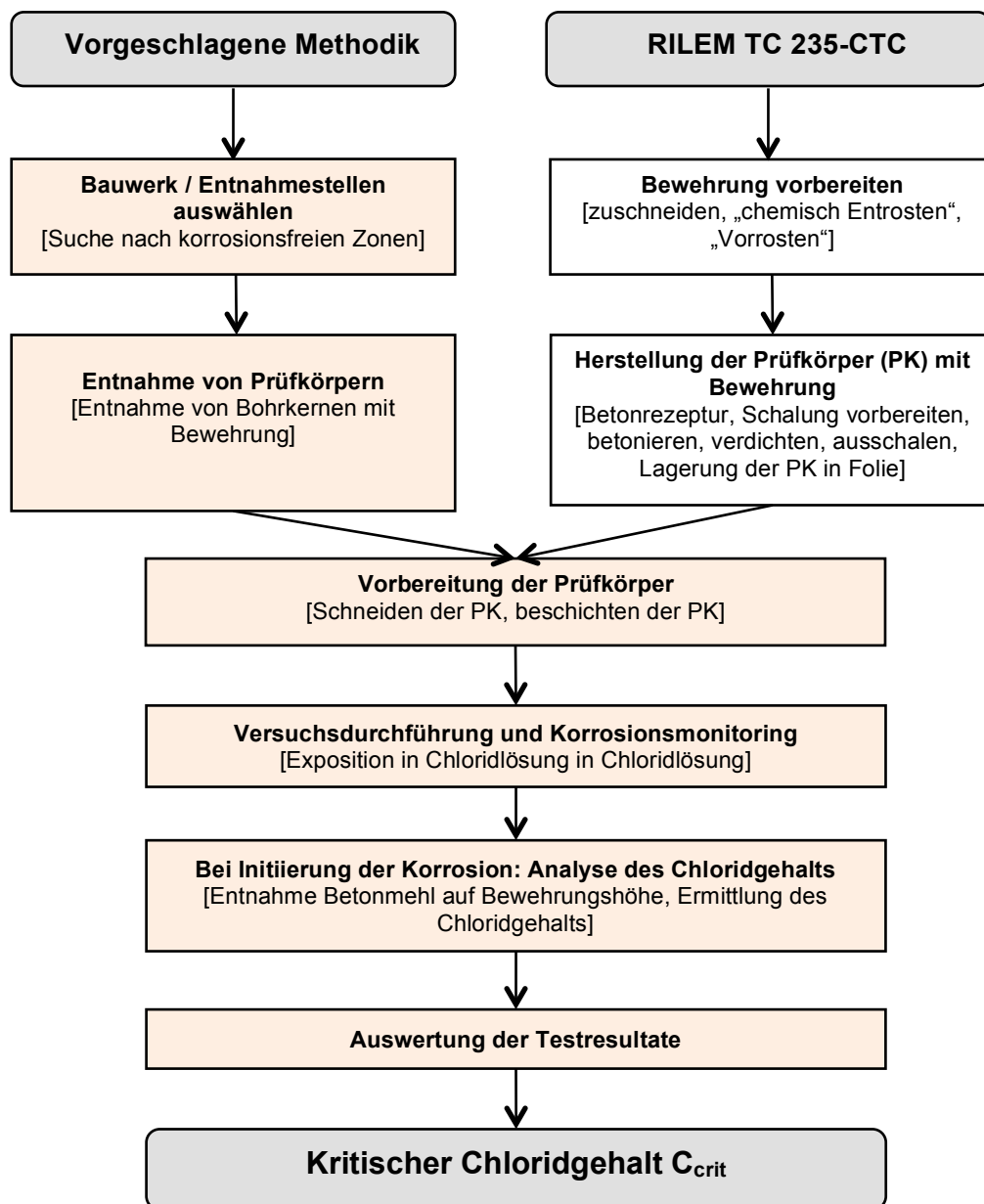


Abb. 16 Vergleich des Ablaufs der hier vorgeschlagenen Methodik und der Labormethode gemäss RILEM TC 235-CTC.

Prüfkörpervorbereitung

Die Prüfkörper für die Bestimmung des kritischen Chloridgehalts wurden aus den Bohrkernen A, mit Durchmesser 150 mm, vorbereitet. Die Prüfkörper wiesen allesamt eine Betondeckung der Bewehrung von mehr als 50 mm auf. Damit die Initiierungsphase der Korrosion beschleunigt werden konnte, wurde entschieden, die Überdeckung durch wassergekühltes Schneiden auf 16 mm zu reduzieren. Mit dieser Massnahme sollte sichergestellt werden, dass es im Zeitrahmen des Forschungsprojekts zu Korrosion kommt. Beim Schneiden wurde darauf geachtet, dass der Schnitt möglichst parallel zur Bewehrung verlief, damit eine konstante und für alle Prüfkörper identische Bewehrungsüberdeckung gewährleistet werden konnte. Die rund 170 mm langen Bohrkern wurden nach dem Abschneiden des Überdeckungsbetons auch auf der Rückseite auf konstant 100 mm gekürzt, so dass alle Prüfkörper dieselben Abmessungen aufwiesen (Abb. 17).

Für das Korrosionsmonitoring wurden elektrische Anschlüsse bewerkstelligt. Dazu wurden mit einem Metallbohrer Löcher in die Stirnflächen des Bewehrungsstahls gebohrt und Kabelschuhe mittels Blechschrauben fixiert, die schliesslich das Anbringen eines Kupferkabels ermöglichten. Auf der Rückseite der Prüfkörper wurde anschliessend eine ca. 20 mm dicke Mörtelschicht mit einem integrierten Titannetz aufgemörtelt, welches für das spätere Korrosionsmonitoring als Referenzelektrode eingesetzt werden konnte – dies primär hinsichtlich der Möglichkeit, elektrochemische Messungen auch in der Trockenphase (PK nicht eingetaucht) automatisiert durchführen zu können.

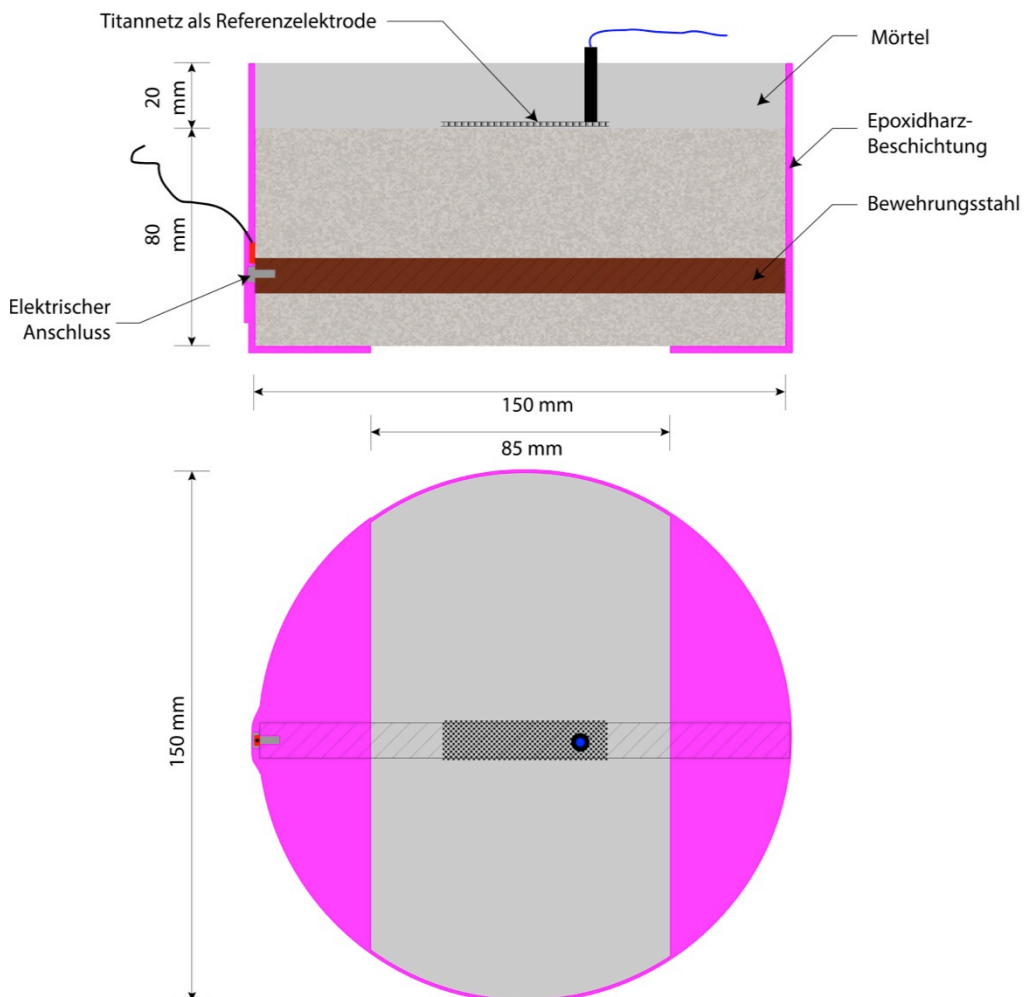


Abb. 17 Schematische Darstellung des geplanten Prüfkörperaufbaus.

Zur Gewährleistung eines eindimensionalen Chloridtransportes wurden die Mantelfläche sowie die Randbereiche der Expositionsfläche (geschnittene Fläche) aller Prüfkörper mehrlagig mit Epoxidharz beschichtet (Abb. 17). Die Epoxidharzbeschichtung hatte zum Ziel, die sofortige Korrosion an den Stirnflächen der Bewehrung zu verhindern.

Exposition

Die Prüfkörper wurden nach der Probenvorbereitung im Laborklima bei rund 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von ca. 40-60% während mehrerer Tage gelagert. Vor der Exposition in der Chloridlösung wurden alle Prüfkörper rund 10 Tagen einer Wasserlösung ausgesetzt, um ein späteres schnelles Eindringen der Chloride durch kapillaren Transport zu verhindern. Der Zweck dieses Vorgehens war es, einen reinen Chloridtransport durch Diffusion zu erreichen und damit eine allzu frühe Korrosion der Bewehrung, ausgelöst durch rasches „Überfahren“ des kritischen Chloridgehaltes, zu verhindern.

Direkt anschliessend an die Wasserlagerung wurden die Prüfkörper einer 3,5%igen Natriumchlorid-Lösung ausgesetzt. Die Expositionsfläche tauchte dabei nur wenige Millimeter in die Chloridlösung ein. Der in Abb. 18 dargestellte Versuchsaufbau befand sich in einem geschlossenen Behälter, um ein Verdunsten der Lösung zu begrenzen / verhindern.

Während der Versuchsdurchführung wurde entschieden, dass die Konzentration der Lösung in einem ersten Schritt auf 7% NaCl erhöht wird, falls während den ersten 80 Tagen nach Start der Exposition in der Chloridlösung keine Korrosion eintritt. Konnte nach rund 200 Tagen immer noch keine Korrosion festgestellt werden, so wurden die Prüfkörper für rund 10 Tage an der Luft getrocknet und erneut der 7%igen NaCl-Lösung ausgesetzt. Durch den kapillaren Chloridtransport wurde erhofft, dass sich der Chloridgehalt schneller erhöht, als nur durch reine Diffusion.

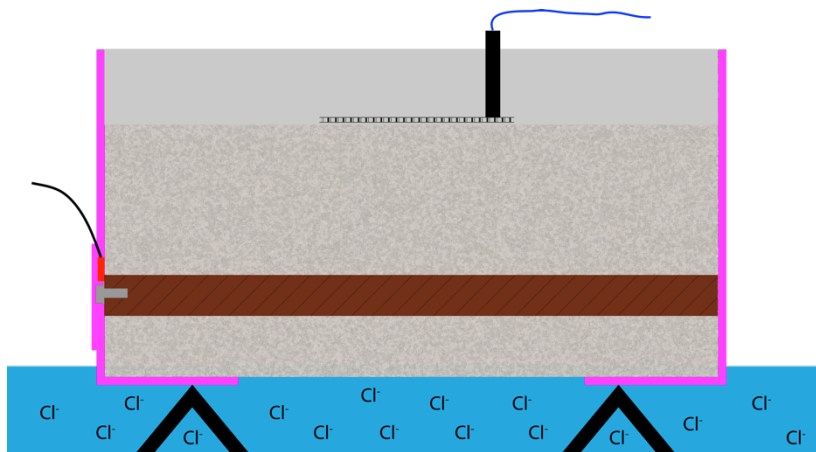


Abb. 18 Schematische Darstellung der Exposition der Prüfkörper in Chloridlösung

Korrosionsmonitoring

Das Korrosionsmonitoring der Bohrkernprüfkörper erfolgte mittels Potenzial- und linearer Polarisationswiderstandsmessungen (LPR). Das elektrochemische Potenzial des Bewehrungsstahls wurde dabei in Bezug zu einer Referenzelektrode (RE) gemessen. Die Messung erfolgte in einem stündlichen Intervall mit einem digitalen Multimeter, welches von einem Computer gesteuert wurde, der auch die Speicherung der Daten gewährleistete (Abb. 19). Als Referenzelektroden wurden während der Untersuchungsdauer zwei verschiedenen Arten verwendet. Zu Beginn der Auslagerung der Prüfkörper erfolgte die Messung mittels der vorgängig eingemörtelten und regelmässig kalibrierten Titan-Pseudo-Referenzelektroden, welche es ermöglichen, die Potenziale während der

Exposition und allfälliger Trockenphase zu messen. Da die Titan-Referenzelektroden z.T. nicht genügend stabil waren, wurde entschieden, während der Exposition in der Lösung eine Silber-Silberchlorid-Referenzelektrode (SSE-Referenzelektrode) zu verwenden und die Titan-Referenzelektroden nur während den Trockenphasen zu werden.

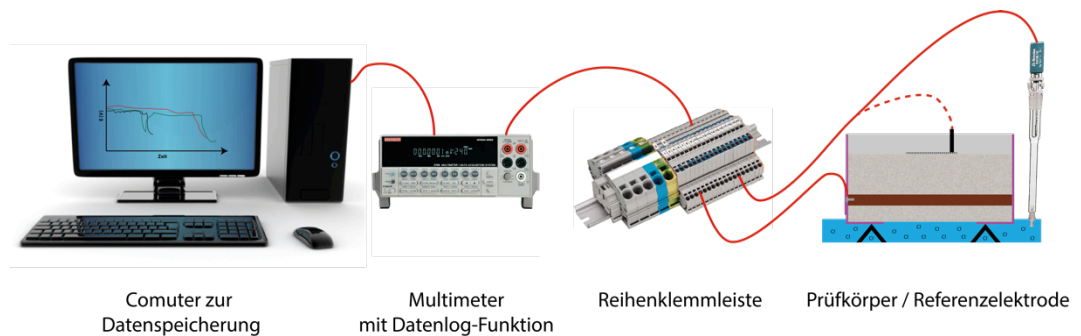


Abb. 19 Kontinuierliches Korrosionsmonitoring durch Messen des Potentials während der Versuchsdurchführung

Neben dem Korrosionsmonitoring mittels Potentialmessung wurden manuell und von Zeit zu Zeit zusätzlich lineare Polarisationswiderstandsmessungen durchgeführt. Dazu wurden die Prüfkörper kurzzeitig aus der Lösung gehoben und in einem in Abb. 20 dargestellten Testaufbau gemessen. Das Korrosionspotential wurde potentiodynamisch um 20 mV in anodischer und kathodischer Richtung verändert und der zur Polarisierung benötigte Strom I gemessen. Die Resultate aus den Polarisationsmessungen wurden als Hilfe zur Beurteilung des Zustandes der Bewehrung verwendet.

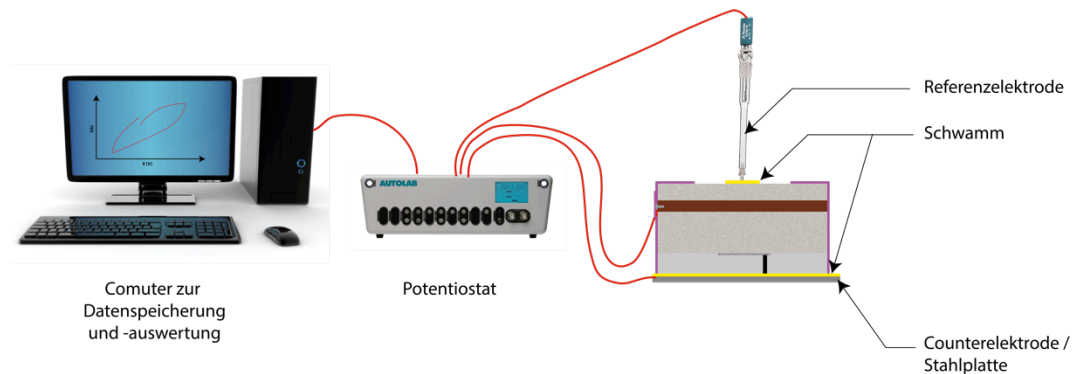


Abb. 20 Testaufbau zur Messung des linearen Polarisationswiderstands

Definition der stabilen Korrosionsinitiierung

Die Definition des Zeitpunkts der Initiierung der Korrosion erfolgte in Anlehnung an die Referenztestmethode RILEM TC 235-CTC. Folgende Bedingungen müssen dafür erfüllt sein:

- Potenzialabfall von mehr als 150 mV vom ursprünglichen Potenzialniveau innerhalb weniger Tage (1-5 Tage)
- Keine Erholung des Potentials von mehr als 50 mV innerhalb 5 bis 10 Tagen nach dem Start des Potenzialabfalls.

Zweck dieser Definition ist es, Repassivierungen zu verhindern und den kritischen Chloridgehalt erst dann zu bestimmen, wenn stabile Lochfrasskorrosion eingesetzt hat.

In Abb. 21 ist ein schematisches Beispiel zur Definition der stabilen Korrosionsinitiation und demzufolge des kritischen Chloridgehalts im vorliegenden Projekt dargestellt. Bei Punkt 1 kommt es zu einem Potenzialabfall von weniger als 150 mV. Eine stabile Korrosionsinitiation liegt somit nicht vor, was sich auch in der anschließenden Erholung des Potenzials widerspiegelt. Bei Punkt 2 beträgt der Potenzialabfall zwar mehr als 150 mV vom ursprünglichen Niveau, dennoch ist bereits nach wenigen Tagen eine Erholung des Potenzials zu erkennen. Erst im Punkt 3 sind beide Kriterien zur Beurteilung einer stabilen Korrosionsinitiation gegeben. Das Potenzial zeigt selbst nach 5-10 Tagen keine Erholungstendenzen. Der Prüfkörper wird somit aus der Chloridlösung entfernt und der Chloridgehalt auf Höhe der Bewehrung analysiert.

Abb. 22 zeigt, wie dieses Kriterium im Korrosionsmonitoring umgesetzt wurde.

Während des Beobachtungszeitraums nach einem Potenzialabfall von mehr als 150 mV wird es zu einer geringen Erhöhung des Chloridgehalts auf Bewehrungshöhe kommen. Dies kann theoretisch den gemessenen kritischen Chloridgehalt „verfälschen“. Aufgrund der Tatsache, dass der Chlorideintrag sich mit der Zeit stark verlangsamt, ist jedoch davon auszugehen, dass dieser Fehler – nämlich die Differenz im Chloridgehalt von der stabilen Initiierung bis zur Chloridanalyse – umso geringer wird, je länger der Prüfkörper der Chloridlösung ausgesetzt ist. Es sei an dieser Stelle vorweggenommen, dass die hier aufgetretenen langen Versuchsdauern damit einen vernachlässigbar geringen Fehler im Chloridgehalt implizieren.

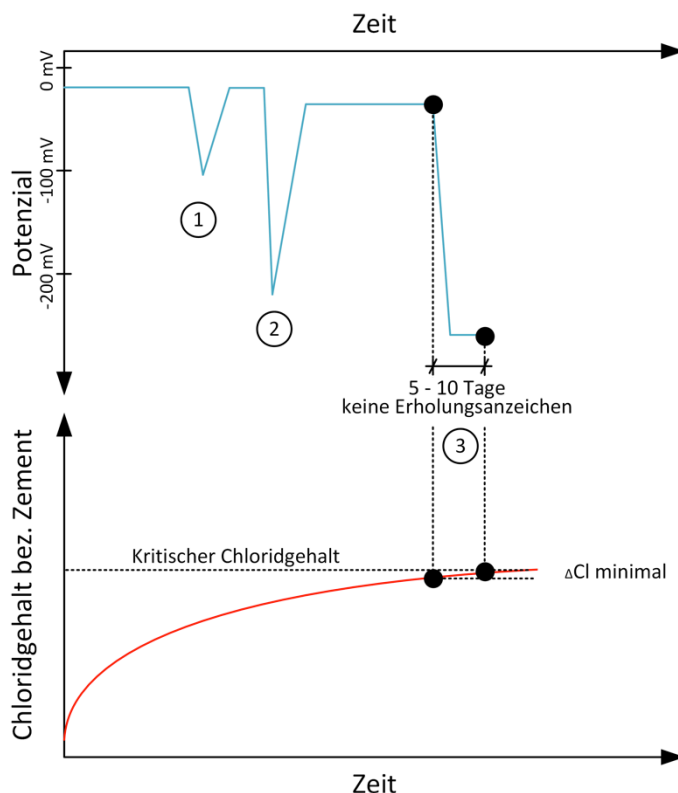


Abb. 21 In dieser Arbeit verwendetes Kriterium der Korrosionsinitiation zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts (in Anlehnung an RILEM TC 235-CTC)

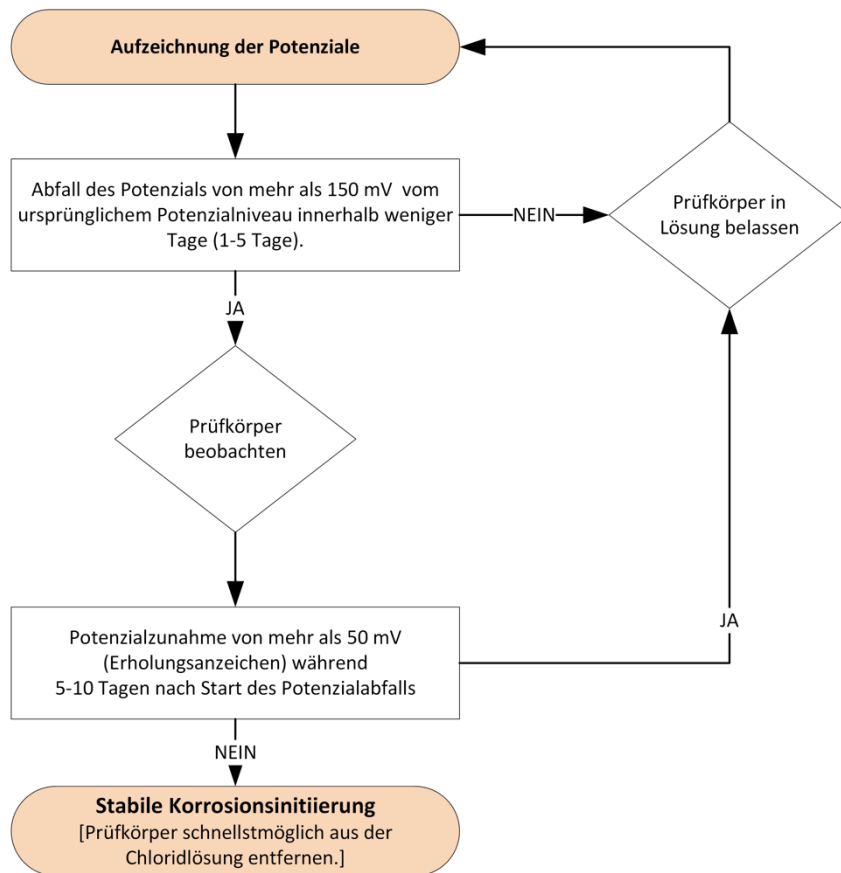


Abb. 22 Anwendung des Kriteriums der Korrosionsinitiierung im Korrosionsmonitoring.

Analyse des kritischen Chloridgehalts

Die korrodieren Prüfkörper wurden nach der Detektion der Korrosion aus der Chloridlösung entfernt. Mit einer wassergekühlten Diamantschneidemaschine wurde von der Rückseite her parallel zum Bewehrungsstab ein Spalt in den Prüfkörper geschnitten (bis ca. 10 mm von der Bewehrung entfernt), damit der Prüfkörper durch Meissel und Hammer entlang der Bewehrung gespalten werden konnte.

Anschliessend wurde aus einer Prüfkörperhälfte, ± 2 mm auf Bewehrungshöhe und über die ganze Expositionsfläche eine Bohrmehlprobe für die Chloridgehaltsanalyse entnommen. Die Chloridgehaltsanalyse erfolgte durch ein akkreditiertes Prüflabor. Das Betonmehl wurde dazu zuerst bei 105°C getrocknet und anschliessend mit kalter Salpetersäure aufgeschlossen. Die Analyse des Chloridgehalts erfolgte potentiometrisch mittels einer ionensensitiven Elektrode.

Aufgrund der Tatsache, dass die in dieser Arbeit untersuchten Prüfkörper beinahe komplett säureunlösliche Gesteinkörnungen enthielten, konnte durch die Messung des getrockneten Filtrerrückstandes bei der Chloridgehaltsanalyse der tatsächliche Zementgehalt der untersuchten Bohrmehlprobe bestimmt werden. Der prozentuale Zementgehalt der Bohrmehlprobe kann folgendermassen bestimmt werden:

$$\text{Zementgehalt} = \frac{1 - \frac{M_{FR}}{M_B}}{1.24} * 100$$

M_B Masse des eingewägten, getrockneten Betonmehls

M_{FR} Masse des getrockneten Filtrerrückstand

Der Umrechnungsfaktor zwischen Zementsteingehalt und Zementgehalt von 1.24, fusst auf der Annahme eines Hydratationsgrades von nahezu 100% und einem Anteil von 24% an gebundenem Wasser im Zementstein.

Dieser zusätzliche Arbeitsschritt bei der Chloridanalyse wurde angewandt, weil die entnommenen Proben für die Chloridanalyse ein sehr kleines Volumen aufwiesen. Üblicherweise handelte es sich um Scheiben von knapp 3 mm Dicke und einigen Zentimetern lateraler Ausbreitung. Das Volumen der Betonprobe beträgt damit rund knapp 3 cm³. Allein ein idealisiertes, kugelförmiges Gesteinskorn von Durchmesser 20 mm hätte somit ein grösseres Volumen (4.2 cm³). Die Variabilität im Volumenanteil an Zementstein und Gesteinskörnung einer untersuchten Betonprobe (Betonmehl) kann daher den gemessenen Chloridgehalt, wenn in % auf den Zementgehalt ausgedrückt, erheblich verfälschen.

4.1.2 Resultate der ersten Serie

Eine erste Serie, bestehend aus vier Prüfkörpern (mit der Bezeichnung G1, G2, Y1, und Y2), wurde schliesslich gemäss dem vorabgehend beschriebenen Verfahren getestet. Abb. 23 zeigt den zeitlichen Verlauf der registrierten Bewehrungspotenziale.

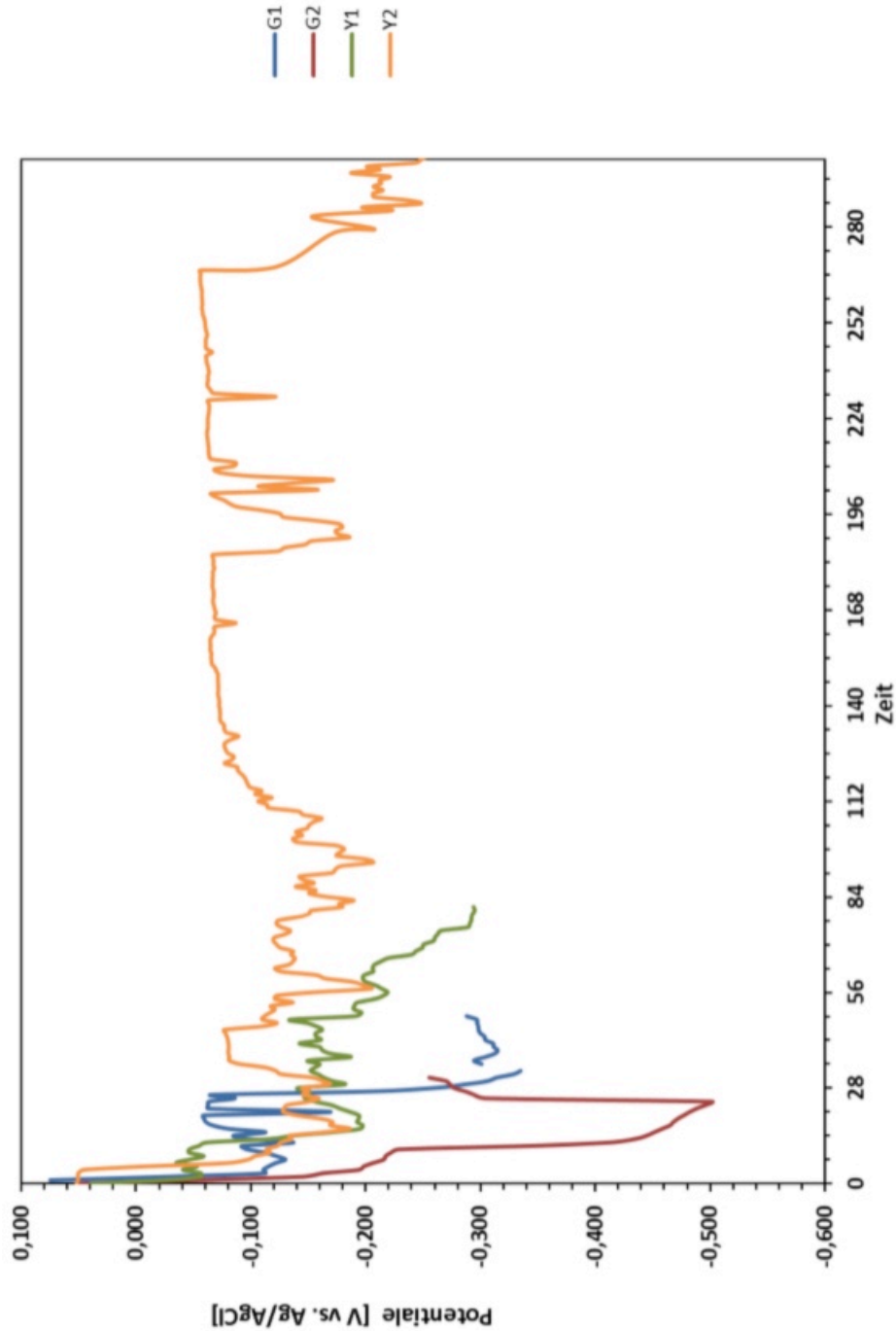


Abb. 23 Potenzial-Zeit-Diagramm der ersten Prüfkörperserie. Anfänglich rund 10 Tage in chloridfreier Lösung, dann in 3.5% NaCl Lösung; ab 140 Tagen in 7% NaCl Lösung.

Es wurden folgende Feststellungen gemacht:

- G1** **Potenzialverlauf:** Während der 10-tägigen Lagerung des Prüfkörpers im Wasser kam es zu einem Potenzialabfall von rund 200 mV. Dies wurde primär mit der Feuchteaufnahme erklärt; die Messungen deuteten noch nicht auf aktive Korrosion. Das Potenzial erholte sich während den ersten Tagen der Exposition in der Chloridlösung. Nach ca. 2 Wochen der Exposition in der Chloridlösung trat ein Potenzialabfall von mehr als 250 mV auf. Da der Prüfkörper während 7 Tagen keine Anzeichen der Erholung zeigte, wurde der Prüfkörper aus der Chloridlösung entfernt und gespalten.
Korrosionsinitiierung: Die visuelle Inspektion zeigte, dass Korrosion hinter einem grossen Gesteinskorn initiierte, welches in der Überdeckung lag und entlang dessen Interfacial Transition Zone (ITZ) sich ein lokaler Eindringpfad für die Chloride bot (Abb. 24). Visuelle Inhomogenitäten direkt an der Stahl/Beton-Grenzfläche waren keine ersichtlich.
Kritischer Chloridgehalt: 0.38 M% bez. Zement (Annahme 300 kg/m³) / 0.36 M% bez. tatsächlichem Zementgehalt
- G2** **Potenzialverlauf:** Während der 10-tägigen Lagerung des Prüfkörpers im Wasser, kam es zu einem Potenzialabfall von rund 180 mV. Das Potenzial vor der Chloridauslagerung war mit -230 mV vs. Ag/AgCl_{sat} bereits sehr tief. Nach der Exposition in Chloridlösung trat ein weiterer sofortiger Potenzialabfall von mehr als 160 mV ein. In den darauffolgenden Tagen sank das Potenzial um weitere 50 mV ab und zeigte keine Erholungsanzeichen. Der Prüfkörper wurde aus Lösung entfernt und analysiert.
Korrosionsinitiierung: Korrosion hat an der Stirnfläche des Stahls (Mantelfläche des BK) unter der Epoxidharzbeschichtung initiiert.
Kritischer Chloridgehalt: nicht anwendbar
Spezielles: grössere Luftporen waren auf Bewehrungshöhe sichtbar
- Y1** **Potenzialverlauf:** Kurz nach der Exposition in der Chloridlösung kam es zu einem Potenzialabfall von rund 150 mV. Während den folgenden Tagen zeigte sich eine leichte Erholung mit einer Stabilisierung auf einem Niveau von ca. -160 mV vs. Ag/AgCl_{sat}. Nach rund 50 Tagen in der Chloridlösung folgte ein langsames Abfallen des Potenzials bis ca. -300 mV vs. Ag/AgCl_{sat}. Da das langsame Abfallen des Potenzials als Anzeichen für eine nicht annehmbare Korrosion gedeutet wurde, wurde der Prüfkörper aus der Lösung entfernt.
Korrosionsinitiierung: Korrosion hat an der Stirnfläche des Stahls (Mantelfläche des BK) unter der Epoxidharzbeschichtung initiiert.
Kritischer Chloridgehalt: nicht anwendbar
- Y2** **Potenzialverlauf:** Der Prüfkörper zeigte nach der Exposition in der Chloridlösung starke Schwankungen von rund 120 mV. Nach 100 Tagen der Exposition stabilisierte sich das Potenzial auf einem Niveau von ca. -70 mV vs. Ag/AgCl_{sat}. Um die Korrosionsinitiierung zu beschleunigen, wurde die Konzentration nach rund 140 Tagen der Exposition auf eine 7,0% NaCl-Lösung verdoppelt. Wenige Tage nach der Erhöhung der Chloridkonzentration kam es zu drei plötzlichen Potentialabfällen von rund 100 mV mit einer schnellen Erholung auf das ursprüngliche Potenzialniveau (Repassivierung; noch kein stabiles Lochwachstum). Nach 260 Tagen in der Chloridlösung begann ein relativ langsamer Potenzialabfall von rund 150 mV. Da der Prüfkörper die Kriterien für eine stabile Korrosionsinitiierung nicht erfüllte, wurde er weiterhin in der Chloridlösung belassen und beobachtet. Da der Prüfkörper in den weiteren Wochen auf dem tiefen Potenzialniveau zu stabilisieren begann, wurde er schliesslich aus der Lösung entfernt und analysiert. Die längere Beobachtungsdauer sollte nach rund 300 Tagen in der Chloridlösung keine grossen Auswirkungen auf den Chloridgehalt auf Bewehrungshöhe gehabt haben.
Korrosionsinitiierung: Es waren dunkelbraune Korrosionsprodukte in der Mitte des Bewehrungsstabes erkennbar. Im Bereich der Initiierungsstelle war der Beton direkt an der Stahl/Beton-Grenzfläche leicht poröser. (Abb. 26). Die Rippen nahe den Stirnflächen waren ebenfalls leicht angerostet.

Kritischer Chloridgehalt: 1.27 M% bez. Zement (Annahme 300 kg/m^3) / 0.96 M% bez. tatsächlichem Zementgehalt

4.1.3 Analyse der Versuchsdurchführung

Bei 2 der 4 Prüfkörper musste festgestellt werden, dass die Initiierung der Korrosion an den Stahnden erfolgte und somit als Fehlinitiierungen einzustufen ist. Aufgrund dessen wurde der Versuchsaufbau überdacht. Der Chloridtransport zu den Stahnden, welche als Schwachpunkte zu den Fehlinitiierungen führten, musste besser verhindert werden.



Abb. 24 Fotografische Dokumentation der Korrosionsstelle bei Prüfkörper G1 (dunkelbraune/schwarze Korrosionsprodukte auf dem Beton nach Herauslösen des Bewehrungsstahls) (Chlorideintrag von unten). Initiierung hinter einem grösseren Gesteinskorn in der Überdeckung. Visuelle Inhomogenitäten direkt an der Stahl/Beton-Grenzfläche waren jedoch keine ersichtlich.

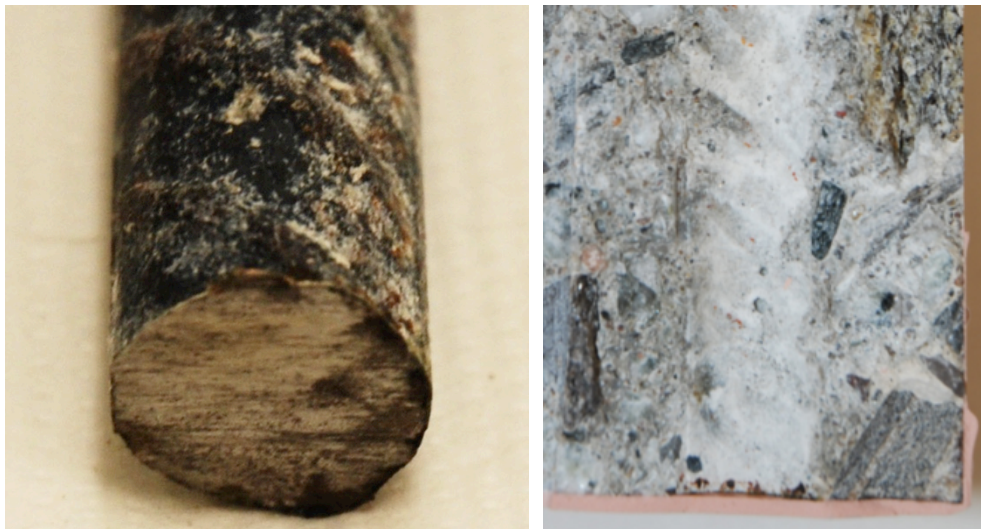


Abb. 25 Fotografische Dokumentation der fehlerhaften Korrosion bei Prüfkörper G2. Korrosion an der Stirnfläche des Stahls (Mantelfläche des BK) unter der Epoxidharzbeschichtung. Links: Herausgelöster Bewehrungsstahl. Rechts: Abdruck im Beton mit Epoxidharzbeschichtung auf Prüfkörperoberfläche.



Abb. 26 Fotografische Dokumentation der Korrosionsstelle bei Prüfkörper Y2 (Chlorideintrag von unten). Nach Herauslösen des Bewehrungsstabes waren dunkelbraune Korrosionsprodukte am Beton haftend sichtbar. Im Bereich der Initiierungsstelle war der Beton direkt an der Stahl/Beton-Grenzfläche leicht poröser.

4.2 Erste Optimierung der Methodik zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts

4.2.1 Änderungen im Versuchsaufbau

Bei 7 Prüfkörpern wurde zusätzlich zur Epoxidharzbeschichtung der Übergang Epoxidharz/Beton auf der Unterseite mit Paraffin versiegelt. Ziel dieser Massnahme war es, dem allfälligen Transport von Chloriden entlang der Grenzfläche Epoxidharz/Beton entgegenzuwirken, der möglicherweise zur Initiierung der Korrosion an den Stahlschnittflächen der Prüfkörper geführt hat. In Abb. 27 ist der Prüfaufbau der ersten Optimierung dargestellt.

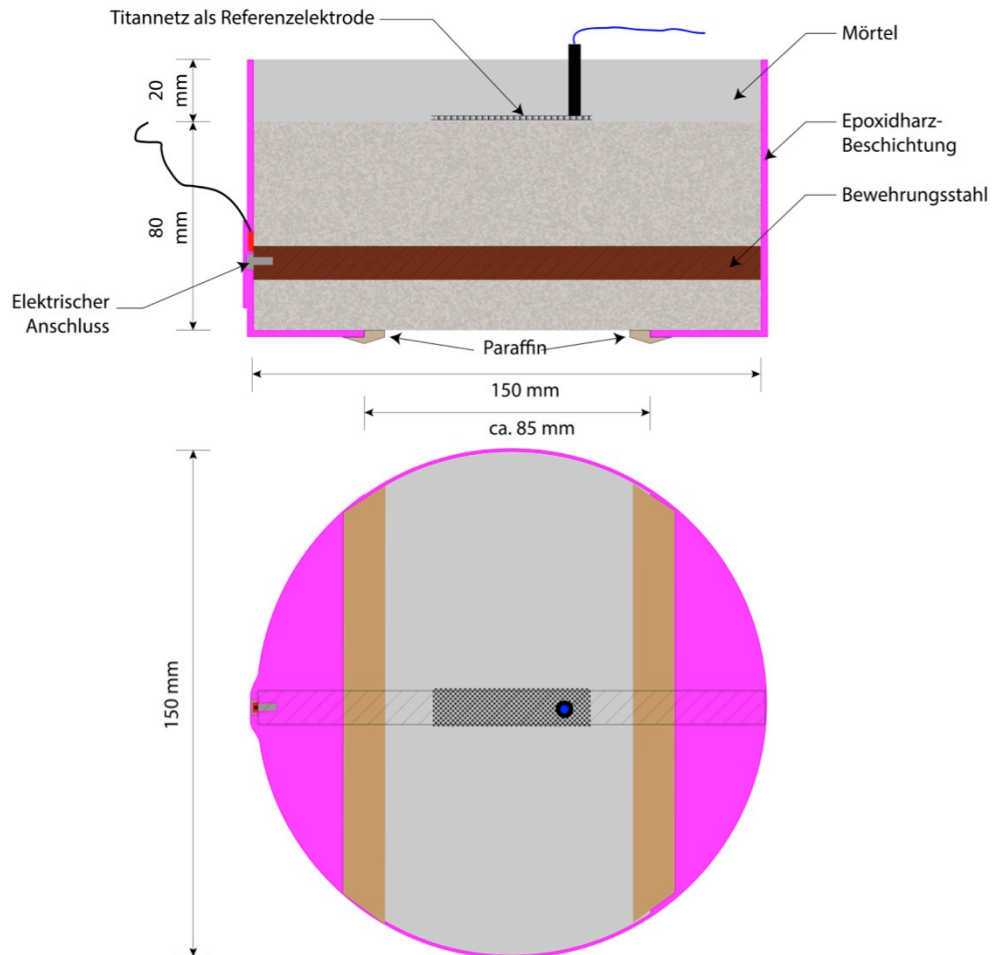


Abb. 27 Schematische Darstellung der ersten Optimierung des Versuchsaufbaus (verbesserte Abdichtung im exponierten Bereich mit Paraffin).

4.2.2 Resultate

Die Testserie mit dem wie beschrieben optimierten Aufbau umfasste die Prüfkörper mit den Bezeichnungen G5, G6, G8, G9, G10, Y6 und Y11. Die Auslagerung entsprach dem eingangs beschriebenen Vorgehen, d.h. eine rund 10-tägige Wasserlagerung, gefolgt von Exposition in 3.5%-NaCl-Lösung. Nach 100 Tagen Chloridexposition wurde die Konzentration der NaCl-Lösung verdoppelt und nach 280 Tagen sogar auf 14% NaCl erhöht. Abb. 28 zeigt den zeitlichen Verlauf der registrierten Bewehrungspotenziale.

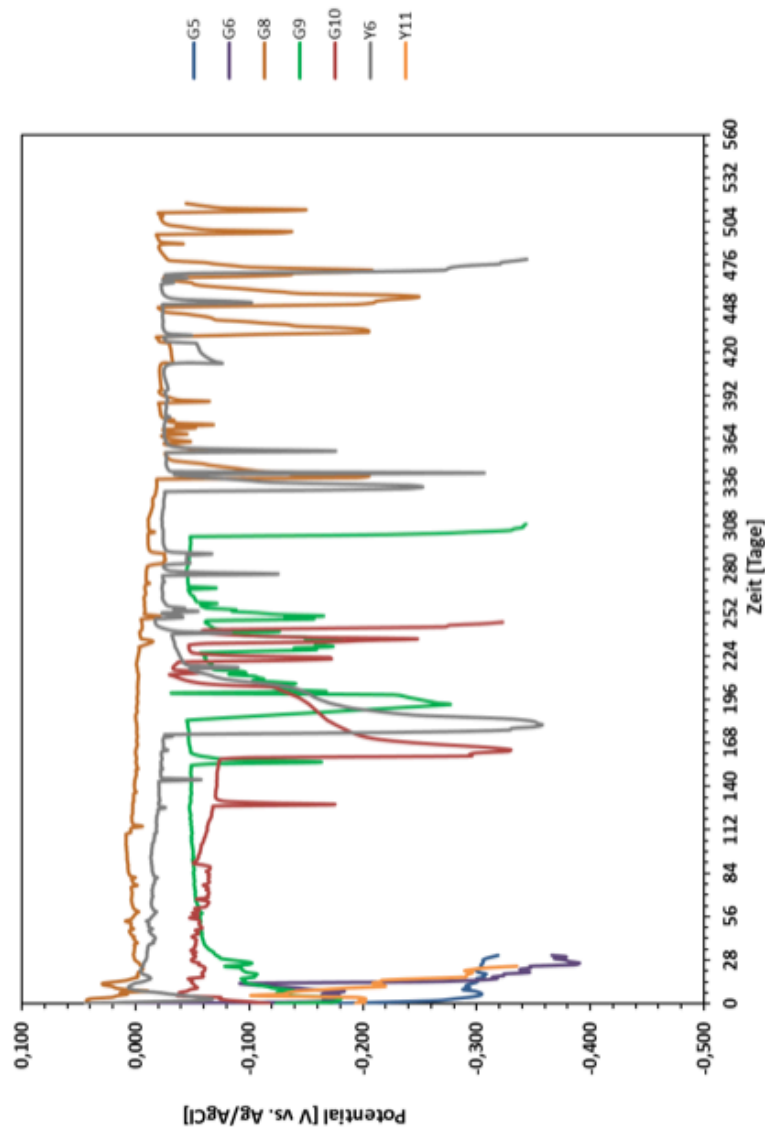


Abb. 28 Potenzial-Zeit-Diagramm der Prüfkörperserie nach der ersten Optimierung (zusätzliche Paraffin-Versiegelung). Anfänglich rund 10 Tage in chloridfreier Lösung, dann in 3,5% NaCl Lösung; ab 100 Tagen in 7% NaCl Lösung; ab 280 Tagen in 14% NaCl Lösung.

Es wurden folgende Feststellungen gemacht:

- G5** **Potenzialverlauf:** Kurz nach dem Eintauchen in Wasser (chloridfrei!) kam es zu einem Potenzialabfall um ca. 300 mV.
Korrosionsinitiation: Korrosion hat an zwei Stellen unterhalb der Beschichtung initiiert (Fehlinitiationen).
Kritischer Chloridgehalt: nicht annehmbar
- G6** **Potenzialverlauf:** Kurz nach der Exposition des Prüfkörpers in der Chloridlösung trat ein sofortiger Potenzialabfall von mehr als 200 mV auf. In den folgenden Tagen war ein weiteres Absinken des Potenzials zu beobachten und der Prüfkörper zeigte keine Anzeichen der Erholung.

Korrosionsinitiierung: Die visuelle Inspektion zeigte, dass Korrosion hinter einem Gesteinskorn initiierte, welches in der Überdeckung lag und entlang dessen Interfacial Transition Zone (ITZ) sich ein lokaler Eindringpfad für Chloride bot (Abb. 29). Visuelle Inhomogenitäten direkt an der Stahl/Beton-Grenzfläche waren jedoch keine ersichtlich.

Kritischer Chloridgehalt: 0.16 M% bez. Zement (Annahme 300 kg/m^3) / 0.22 M% bez. tatsächlichem Zementgehalt

Spezielles: Auf Bewehrungshöhe waren grössere Lunker sichtbar, die jedoch nicht in direktem Zusammenhang mit der Korrosionsstelle standen.

G8 Potenzialverlauf: Zu Beginn der Exposition zeigte der Prüfkörper über 300 Tage ein sehr stabiles Potenzial bei rund 0 mV vs. $\text{Ag/AgCl}_{\text{sat}}$. Mehre Erhöhungen des Chloridgehalts bis auf ein Chloridgehalt von 14% NaCl konnten keine Korrosionsinitiierung auslösen. In der Folge waren mehrere Potenzialabfälle von teils über 150 mV zu beobachten. Jedoch kam es jeweils immer wieder zu einer Stabilisierung des Potenzials auf das ursprüngliche Niveau (Repassivierung).

Korrosionsinitiierung: Der Prüfkörper zeigte nach 500 Tagen der Exposition keine Anzeichen stabiler Korrosionsinitiierung. Er wurde daher nicht gespalten und visuell beurteilt.

Kritischer Chloridgehalt: unbekannt (jedoch sehr hoch)

Spezielles:

Y6 Potenzialverlauf: Prüfkörper wies in der Anfangsphase ein konstantes Potenzial von ca. -20 mV vs. $\text{Ag/AgCl}_{\text{sat}}$ auf. Nach 100 Tagen ohne Korrosionsinitiierung wurde die Konzentration der Lösung auf 7% verdoppelt. Nach der Erhöhung der Konzentration wurden zwei geringe Potenzialeinbrüche von rund 50 mV mit anschliessender kurzer Regenerationsdauer detektiert. Nach 160 Tagen war ein relativ starker Potenzialabfall von rund 360 mV zu beobachten, gefolgt von einer Erholung bis auf das ursprüngliche Potenzialniveau. In den folgenden Wochen folgten mehrere grössere Potenzialabstürze mit jeweiliger schneller Erholung auf das Niveau vor dem Abfall. Nach rund 470 Tagen der Auslagerung in einer bis zu 14%igen Chloridlösung kam es schliesslich zu einem Potenzialabfall von 320 mV ohne Anzeichen der Erholung des Potenzials.

Korrosionsinitiierung: Der Prüfkörper wies mehrere kleine Korrosionsherde und einen grösseren Korrosionherd auf. Letzterer befand sich direkt bei einer Luftpore.

Kritischer Chloridgehalt: 3.05 M% bez. Zement (Annahme 300 kg/m^3) / 1.61 M% bez. tatsächlichem Zementgehalt

Spezielles: Allgemein sind viele Lunker auf Höhe der Bewehrung erkennbar.

G9 Potenzialverlauf: Das Potenzial pendelte sich auf einem Niveau von -50 mV vs. $\text{Ag/AgCl}_{\text{sat}}$ ein. Nach rund 150 Tagen und der Erhöhung der Konzentration der Chloridlösung auf 7% kam es innert kurzer Zeit zu mehreren Potenzialabfällen mit anschliessender rascher Erholung auf das ursprüngliche Niveau. Nach rund 300 Tagen schliesslich kam es zu einer Abnahme des Potenzials um rund 300 mV. In den folgenden 8 Tagen waren keine Anzeichen der Erholung zu beobachten.

Korrosionsinitiierung: Zwei deutliche Korrosionsstellen; eine lag direkt hinter einem grossen Gesteinskorn in der Überdeckung (Abb. 30). Visuelle Inhomogenitäten direkt an der Stahl/Beton-Grenzfläche waren jedoch an beiden Stellen keine ersichtlich.

Kritischer Chloridgehalt: 2.22 M% bez. Zement (Annahme 300 kg/m^3) / 1.39 M% bez. tatsächlichem Zementgehalt

G10 Potenzialverlauf: Der Prüfkörper G10 zeigte nach rund 120 Tagen einen Potenzialabfall mit anschliessender rascher Erholung auf das ursprüngliche Niveau. Nach weiteren 30 Tagen war innerhalb von wenigen Stunden ein Potenzialabfall um rund 300 mV zu beobachten. Während der ersten Tagen waren keine Anzeichen einer möglichen Erholung erkennbar. Nach rund 5 Tagen kam es jedoch zu einer anfänglich raschen, dann langsamen Erholung des Potenzials. Nach rund einem Monat der konstanter Erholung lag das Potenzial sogar über dem ursprünglichen Potenzial. Infolge kam es zu drei weiteren starken Potenzialabfällen um jeweils mehr als 150 mV. Bei den ersten beiden erholte sich das Potenzial

innert kurzer Zeit. Beim letzten waren selbst nach 9 Tagen keine Erholungstendenzen zu beobachten. Der Prüfkörper wurde daher aus der Chloridlösung entfernt und untersucht.

Korrosionsinitiiierung: Zwei kleinere Korrosionsstellen, sowie ein erhebliches Korrosionsloch (deutlicher Lochfrassangriff, Durchmesser von mehreren Millimetern und rund 5 mm tief). Während die kleineren Korrosionsstellen mit keinerlei visuellen Inhomogenitäten an der Stahl/Beton-Grenzfläche zusammenfielen, befand sich die deutliche und tiefe Korrosionsstelle direkt bei einer Luftpore (Abb. 31).

Kritischer Chloridgehalt: 2.01 M% bez. Zement (Annahme 300 kg/m^3) / 1.41 M% bez. tatsächlichem Zementgehalt

Y11 Potenzialverlauf: Nach der Exposition des Prüfkörpers Y11 kam es zu einem kontinuierlichen Potenzialabfall über mehrere Tage von rund 220 mV. Da keine Erholung zu erkennen war, wurde der Prüfkörper schliesslich gespalten.

Korrosionsinitiiierung: Korrosion war an den Stirnflächen der Bewehrung erkennbar (Fehlinitiiierung).

Kritischer Chloridgehalt: nicht anwendbar

4.2.3 Analyse des Versuchsaufbaus

Beim optimierten Versuchsaufbau kam es bei zwei von sieben Prüfkörpern erneut zu Fehlinitiiierungen an den Stahlenden. Da diese „Fehlerrate“ noch immer als zu hoch beurteilt wurde, wurden weitere Optimierungen des Versuchsaufbaus vorgenommen.



Abb. 29 Fotografische Dokumentation der Korrosionsstelle bei Prüfkörper G6 (dunkelbraune Korrosionsprodukte auf dem Beton nach Herauslösen des Bewehrungsstahls) (Chlorideintrag von unten). Initiiierung hinter einem grösseren Gesteinskorn in der Überdeckung. Visuelle Inhomogenitäten direkt an der Stahl/Beton-Grenzfläche waren jedoch keine ersichtlich.



Abb. 30 Fotografische Dokumentation der Korrosionsstellen bei Prüfkörper G9 (dunkelbraune Korrosionsprodukte an zwei Stellen auf dem herausgelösten Bewehrungsstahl) (Chlorideintrag von unten). Rechts: Initiierung hinter einem grösseren Gesteinskorn in der Überdeckung. Visuelle Inhomogenitäten direkt an der Stahl/Beton-Grenzfläche waren jedoch in beiden Fällen keine ersichtlich.

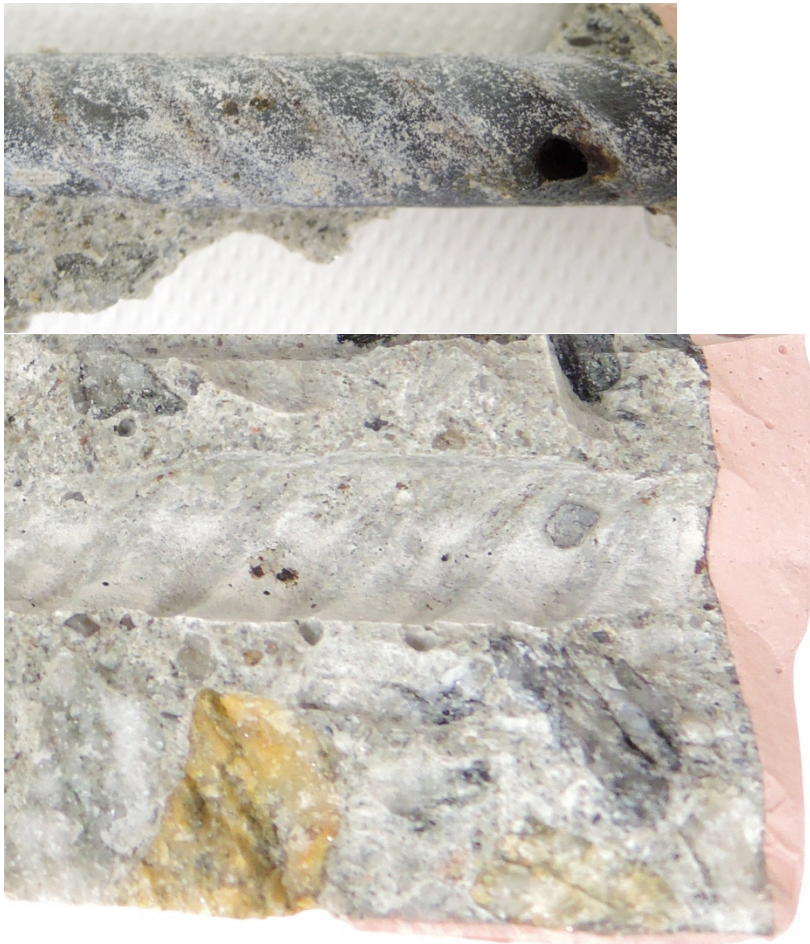


Abb. 31 Fotografische Dokumentation der Korrosionsstellen bei Prüfkörper G10. Oben: Herausgelöste Bewehrung. Unten: korrespondierender Abdruck im Betonprüfkörper. Dunkelbraune Korrosionsprodukte an zwei Stellen nahe Bildmitte, sowie ein erhebliches Korrosionsloch im Stahl rechts im Bild. Während die kleineren Korrosionsstellen mit keinerlei visuellen Inhomogenitäten an der Stahl/Beton-Grenzfläche zusammenfallen, befindet sich die deutliche und tiefe Korrosionsstelle direkt bei einer Luftpore.

4.3 Zweite Optimierung der Methodik zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts

4.3.1 Änderungen im Versuchsaufbau

Bei den verbleibenden Prüfkörpern wurden die anfänglich aufgetragenen Epoxidharzbeschichtungen an den Stählen entfernt und auf beiden Seiten ca. 10 mm des Bewehrungsstabs durch Anbohren des umliegenden Betons freigelegt (vgl. Abb. 32). Die Stirnflächen der Bewehrung wurden anschliessend mit einem dichten kunststoffvergüteten Schutzmörtel (SikaTopSeal 107) speziell geschützt, um eine vollständige Passivierung der Stirnflächen zu erreichen. Die Paraffinversiegelung wurde hingegen weggelassen.

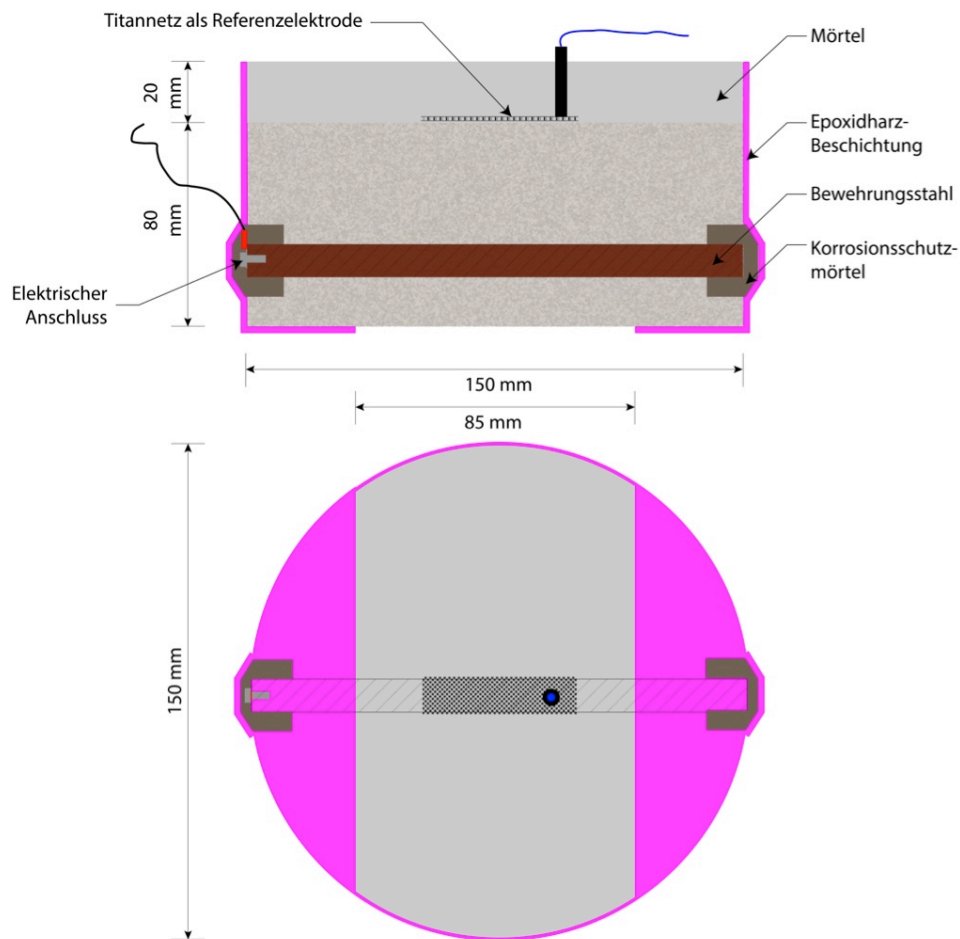


Abb. 32 Schematische Darstellung der zweiten Optimierung des Versuchsaufbaus (verbesserter Korrosionsschutz der Stahlstabenden).

4.3.2 Resultate

Die Testserie mit dem weiter optimierten Aufbau umfasste die Prüfkörper mit den Bezeichnungen Y3, Y4, Y5, Y7, Y8, Y10, G3, G4 und G7. Die Auslagerung entsprach erneut dem eingangs beschriebenen Vorgehen, d.h. eine rund 10-tägige Wasserlagerung, gefolgt von Exposition in 3.5%-NaCl-Lösung. Nach 120 Tagen Chloridexposition wurde die Konzentration der NaCl-Lösung verdoppelt, und nach 190 Tagen sogar auf 14% NaCl erhöht. Abb. 28 zeigt den zeitlichen Verlauf der registrierten Bewehrungspotenziale.

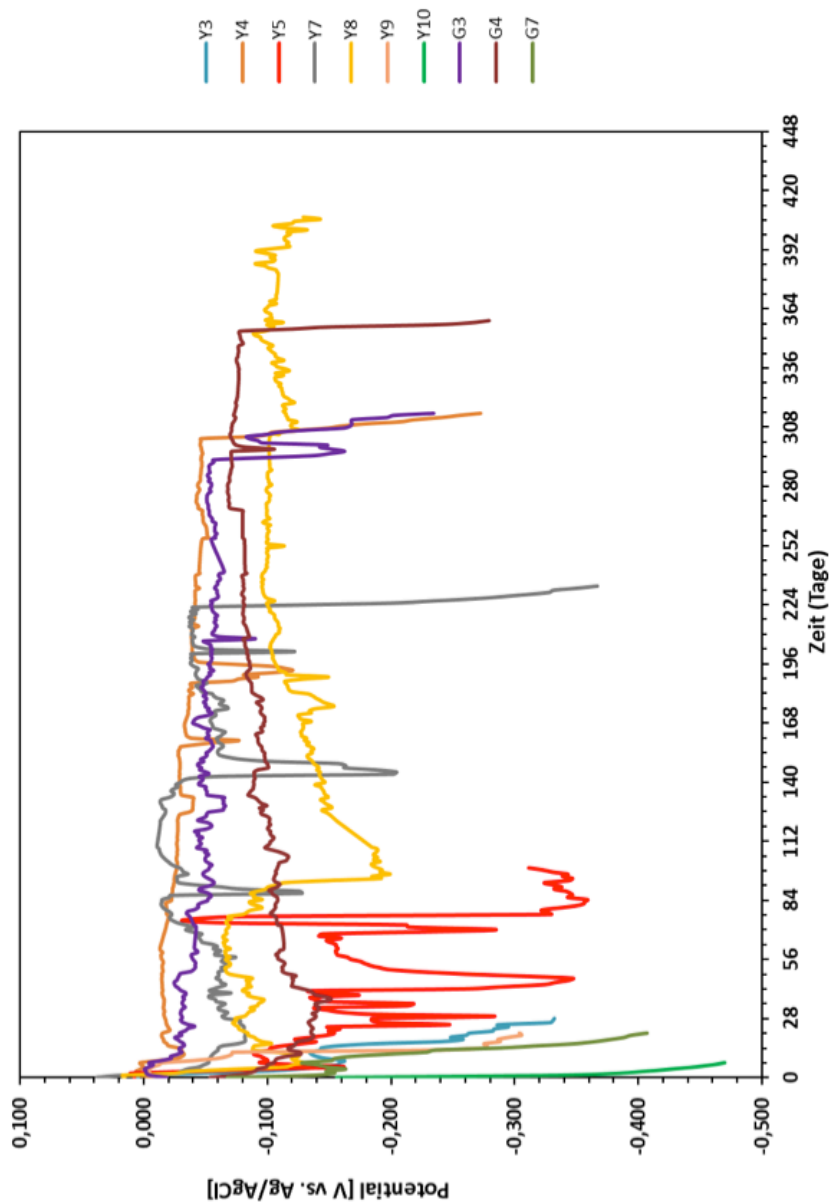


Abb. 33 Potenzial-Zeit-Diagramm der Prüfkörperserie nach der zweiten Optimierung (zusätzlicher Korrosionsschutz der Stahlstabenden). Anfänglich rund 10 Tage in chloridfreier Lösung, dann in 3.5% NaCl Lösung; ab 120 Tagen in 7% NaCl Lösung; ab 190 Tagen in 14% NaCl Lösung.

Es wurden die folgenden Feststellungen gemacht:

- Y3** **Potenzialverlauf:** Kurz nach der Exposition in der 3.5 %- NaCl-Lösung kam es zu einem schnellen Potenzialabfall um rund 120 mV. In der Folge war ein kontinuierliches Absinken des Potenzials zu beobachten. Nach rund 14 Tagen auf dem tiefen Potenzialniveau wurde der Prüfkörper schliesslich aus der Chloridlösung entfernt und analysiert.
- Korrosionsinitiation:** Mehrere kleine Korrosionsangriffspunkte, verteilt auf der Oberfläche, waren sichtbar. An der Stirnfläche der Bewehrung, direkt beim Elektroanschluss, war ebenfalls Korrosionsinitiation erkennbar.

Kritischer Chloridgehalt: nicht anwendbar

- Y4** **Potenzialverlauf:** Der Prüfkörper hatte zu Beginn der Auslagerung ein stabiles Potenzial um -20 mV vs. Ag/AgCl_{sat}. Nach rund 150 und 180 Tagen waren zwei kleinere Potenzialabfälle mit rascher Erholung zu verzeichnen. Nach ca. 300 Tagen kam es schliesslich zu einem kontinuierlichen Potenzialabfall während rund 12 Tagen. Der Prüfkörper wurde schliesslich aus der Lösung entfernt und analysiert.
Korrosionsinitiierung: Es war eine grössere Korrosionsstelle sichtbar (Abb. 34); keine visuellen Auffälligkeiten des Betons in diesem Bereich. In einem Bereich mit grösseren Lunkern waren zudem leicht korrodierte Rippen zu erkennen.
Kritischer Chloridgehalt: 1.16 M% bez. Zement (Annahme 300 kg/m³) / 0.68 M% bez. tatsächlichem Zementgehalt
- Y5** **Potenzialverlauf:** Der Prüfkörper zeigte während der gesamten Lagerung in der Chloridlösung stark schwankende Potenziale. Nach einem jeweiligen Potenzialabsturz folgte jeweils eine schnelle Erholung. Nach rund 70 Tagen der Chloridexponierung folgte schliesslich ein drastischer Potenzialabfall um ca. 300 mV. Nach knapp 20 Tagen ohne Erholungsanzeichen wurde der Prüfkörper aus der Chloridlösung entfernt und untersucht.
Korrosionsinitiierung: In der Mitte des Prüfkörpers war eine kleine Korrosionsstelle sichtbar (Abb. 35). Initiierung hinter einem grösseren Gesteinskorn in der Überdeckung. Visuelle Inhomogenitäten direkt an der Stahl/Beton-Grenzfläche waren jedoch in beiden Fällen nicht ersichtlich.
Kritischer Chloridgehalt: 0.77 M% bez. Zement (Annahme 300 kg/m³) / 0.43 M% bez. tatsächlichem Zementgehalt
Spezielles: Der Beton hatte auf Bewehrungshöhe sehr viel Lunker, diese korrespondierten jedoch nicht mit der Korrosionsinitiierungsstelle.
- Y7** **Potenzialverlauf:** Das Potenzial des Prüfkörpers stieg während der ersten 75 Tagen der Auslagerung stetig an. Es folgte ein Potenzialabfall um rund 100 mV mit anschliessender rascher Repassivierung auf das ursprüngliche Potenzialniveau. Nach rund 120 Tagen der Exposition in der 3,5%-igen Chloridlösung wurde die Chloridkonzentration auf 7% verdoppelt. Nach weiteren 10 Tagen in der Lösung kam es zu einem starken Potenzialsturz um 200 mV. Das Potenzial konnte sich jedoch nicht auf dem negativen Niveau stabilisieren und es kam erneut zu einer raschen Erholung des Potenzials. Nach rund 220 Tagen in der Chloridlösung war erneut ein innert kurzer Zeit starker Potenzialabfall von über 150 mV zu beobachten. In den folgenden Tagen nahm das Potenzial weiter kontinuierlich ab. 10 Tage nach dem Start des Potenzialabfalls wurde der Prüfkörper aus der Lösung entfernt und analysiert.
Korrosionsinitiierung: In der Mitte des Prüfkörpers war eine grössere Korrosionsstelle sichtbar (Abb. 36). Keine Korrelation der Initiierungsstelle mit visuellen Auffälligkeiten an der Stahl/Beton-Grenzfläche.
Kritischer Chloridgehalt: 1.27 M% bez. Zement (Annahme 300 kg/m³) / 0.51 M% bez. tatsächlichem Zementgehalt
- Y8** **Potenzialverlauf:** Nach erfolgter Auslagerung des Prüfkörpers in der Chloridlösung war eine Zunahme des Potenzials zu beobachten, bis es sich auf dem Niveau von ca. -70 mV vs. Ag/AgCl_{sat} stabilisierte. Rund 85 Tage nach dem Start der Versuchsreihe erfolgte ein Potenzialabfall um rund 110 mV. Während den nächsten 120 Tagen war eine kontinuierliche Erholung des Potenzials auf ein Niveau von -110 mV vs. Ag/AgCl_{sat} zu erkennen. Auf diesem Niveau blieb der Prüfkörper schliesslich über weitere 200 Tage ohne grössere Potenzialschwankungen stabil.
Korrosionsinitiierung: Aufgrund des Potenzialverlaufs wurde der Prüfkörper nicht gespalten
Kritischer Chloridgehalt: unbekannt (jedoch sehr hoch)

- Y9** ***Potenzialverlauf:*** Kurz nach der Wasserlagerung (noch keine Chloride) kam es zu einem Potenzialabfall von über 200 mV. Der Prüfkörper zeigte keine Anzeichen der Erholung und wurde demzufolge aus der Chloridlösung entfernt und untersucht.
Korrosionsinitiierung: Korrosionsinitiierung an der Stirnfläche.
Kritischer Chloridgehalt: nicht anwendbar
- Y10** ***Potenzialverlauf:*** Während der Wasserlagerung (noch keine Chloride) kam es zu einem schnellen und starken Potenzialabfall um mehrere 100 mV. In den folgenden Tagen war eine Verlangsamung des Potenzialabfalls zu beobachten. Der Prüfkörper zeigte keine Anzeichen der Erholung und wurde demzufolge aus der Chloridlösung entfernt und untersucht.
Korrosionsinitiierung: Korrosionsinitiierung an der Stirnfläche.
Kritischer Chloridgehalt: nicht anwendbar
- G3** ***Potenzialverlauf:*** Der Prüfkörper G3 wies während rund 300 Tagen der Chloridexposition ein stabiles Potenzial von -50 mV vs. Ag/AgCl_{sat} auf. Die Chloridkonzentration wurde während dieser Zeit von 3,5% auf 7,0% und 14% erhöht. Erst nach knapp einem Jahr kam es schliesslich zu einem Potenzialabfall von rund 100 mV, wobei anschliessend eine rasche Erholung des Potenzials beobachtet wurde. Noch bevor das ursprüngliche Potenzialniveau erreicht werden konnte, erfolgte ein erneuter rascher Potenzialabfall. 10 Tage nach Beginn dieses Potenzialabfalls wurde der Prüfkörper aus der Chloridlösung entfernt und analysiert.
Korrosionsinitiierung: Es waren zwei Korrosionsstellen sichtbar (schwarze Korrosionsprodukte); zudem zeigten sich einige der Rippen leicht korrodiert (rotbrauner Rost). Keine Korrelation der Initiierungsstellen mit visuellen Auffälligkeiten an der Stahl/Beton-Grenzfläche.
Kritischer Chloridgehalt: 1.66 M% bez. Zement (Annahme 300 kg/m³) / 1.12 M% bez. tatsächlichem Zementgehalt
Spezielles: Der Beton hatte auf Bewehrungshöhe vereinzelt Lunker, diese korrespondierten jedoch nicht mit den Korrosionsinitiierungsstellen.
- G4** ***Potenzialverlauf:*** Zu Beginn der Chloridexposition war ein leichter Potenzialabfall zu beobachten. Nach rund 30 Tagen der erfolgte jedoch über mehr als 300 Tage ein stetiger Potenzialanstieg auf ein Niveau von -100 mV vs. Ag/AgCl_{sat}. Rund 350 Tage nach dem Start der Wasserlagerung kam es zu einem rasanten Potenzialabfall um 150 mV. Nach einer Woche ohne Anzeichen der Erholung wurde der Prüfkörper aus der Chloridlösung entfernt und untersucht.
Korrosionsinitiierung: Eine Korrosionsstelle sichtbar (schwarze Korrosionsprodukte), vgl. Abb. 38. Keine Korrelation der Initiierungsstelle mit visuellen Auffälligkeiten an der Stahl/Beton-Grenzfläche.
Kritischer Chloridgehalt: 2.28 M% bez. Zement (Annahme 300 kg/m³) / 0.64 M% bez. tatsächlichem Zementgehalt
- G7** ***Potenzialverlauf:*** Unmittelbar nach Beginn der Wasserlagerung kam es zu einem Potenzialabfall um 100 mV. Nach Anzeichen der Erholung des Potenzials, stürzt das Potenzial nach der Exposition in der Chloridlösung um rund 300 mV ab.
Korrosionsinitiierung: Korrosion war an den Stirnflächen der Bewehrung erkennbar.
Kritischer Chloridgehalt: nicht anwendbar



Abb. 34 Fotografische Dokumentation der Korrosionsstelle bei Prüfkörper Y4 (Chlorideintrag von unten). Dunkelbraune/schwarze Korrosionsprodukte.

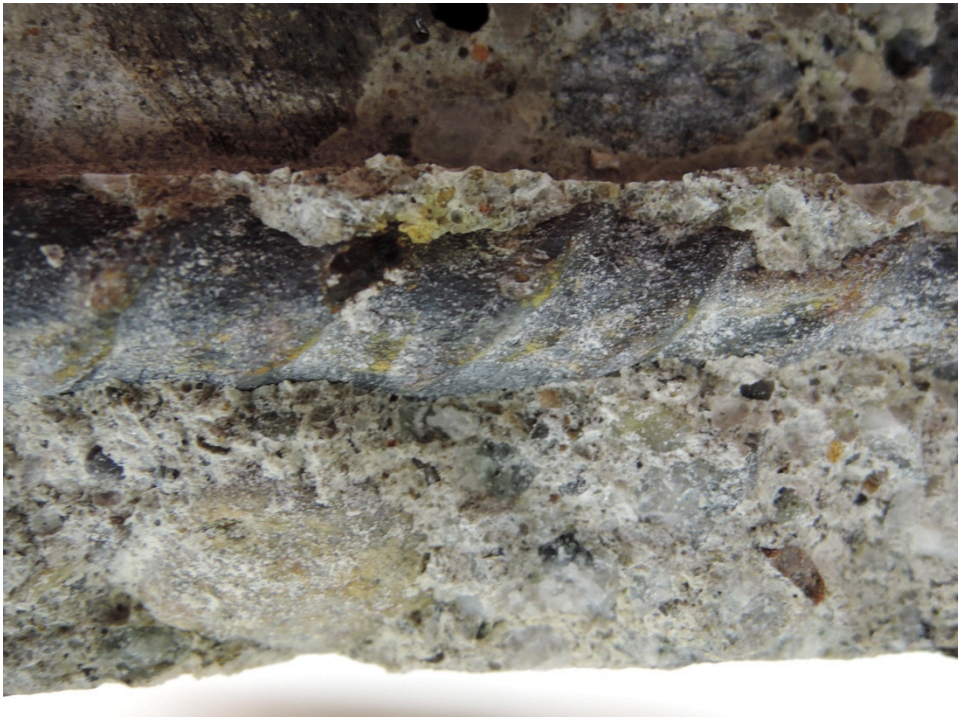


Abb. 35 Fotografische Dokumentation der Korrosionsstelle bei Prüfkörper Y5, (Chlorideintrag von unten). Dunkelbraune/schwarze Korrosionsprodukte.



Abb. 36 Fotografische Dokumentation der Korrosionsstelle bei Prüfkörper Y7 (Chlorideintrag von unten). Schwarze Korrosionsprodukte auf dem Stahl sichtbar.



Abb. 37 Fotografische Dokumentation der Korrosionsstellen auf dem herausgelösten Bewehrungsstahl bei Prüfkörper G3. Dunkelbraune/schwarze Korrosionsprodukte.



Abb. 38 Fotografische Dokumentation der Korrosionsstelle bei Prüfkörper G4 (Chlorideintrag von unten).

4.3.3 Zusammenfassung der gemessenen kritischen Chloridgehalte

Wie aus der Tab. 7 zu entnehmen ist, konnten bei 11 der total 21 ausgelagerten Prüfkörpern stabile Korrosionsinitiiierungen festgestellt werden. Die gemessenen kritischen Chloridgehalte +/- 2 mm auf Bewehrungshöhe bezüglich einem angenommenen Zementgehalt von 300 kg/m³ Zement lagen zwischen 0.16 M-%/Z und 3.05 M-%/Z. Werden die kritischen Chloridgehalte auf den tatsächlichen Zementgehalt jeder Probe umgerechnet, so resultierten Werte zwischen 0.22 M-%/Z_{eff} bis 1.61 M-%/Z_{eff}; die Streuung wird also geringer.

Bei den Prüfkörpern G8 und Y8 konnte während einer Auslagerungsdauer von 500 resp. 400 Tagen trotz der sehr hohen Chloridkonzentration von 14% NaCl in der Lösung keine stabile Korrosionsinitiiierungen festgestellt werden. Das bedeutet, dass der kritische Chloridgehalt dieser Prüfkörper sehr hoch, mutmasslich deutlich über 1.5 M-%/Z_{eff} liegt.

Tab. 7 Kritischer Chloridgehalt +/- 2 mm auf Bewehrungshöhe (Serie 1: ursprünglicher Prüfkörperaufbau; Serie 2: erste Verbesserung (Paraffin); Serie 3: zweite Verbesserung (besserer Schutz der Stabenden)).

Prüfkörper	Serie	Betondeckung der Bewehrung (mm)	Exposition* (Tage)	Krit. Chloridgehalt bez. tatsächlichem Zement (M-%/Z _{eff})	Krit. Chloridgehalt unter Annahme 300 kg Zement/m ³ (M-%/Z)	Bemerkung zur Initiierungsstelle**
G1	1	15	23	0.36	0.38	N,G
Y2	1	17	296	0.96	1.27	P
G2	1	17	22	Fehlinitiierung		
Y1	1	16	72	Fehlinitiierung		
G6	2	15	19	0.22	0.16	N,G
G9	2	15	305	1.39	2.22	N,G
Y6	2	15	467	1.61	3.05	L
G10	2	19	242	1.41	2.01	L
G8	2		>500	Keine Initiierung		
Y11	2	15	19	Fehlinitiierung		
Y9	2	16	5	Fehlinitiierung		
G5	2	16	19	Fehlinitiierung		
Y4	3	17	308	0.68	1.16	N
Y5	3	15	85	0.43	0.77	N,G
Y7	3	16	219	0.51	1.27	N
G3	3	16	308	1.12	1.66	N
G4	3	18	353	0.64	2.28	N
Y8	3		>400	Keine Initiierung		
G7	3	17	5	Fehlinitiierung		
Y3	3	15	14	Fehlinitiierung		
Y10	3	17	1	Fehlinitiierung		

* Unterschiedliche Chloridkonzentrationssteigerungen in der Expositionslösung

** N = keine visuellen Inhomogenitäten an der Stahl/Beton-Grenzfläche bei der Initiierungsstelle; G = Initiierungsstelle hinter einem grösseren Gesteinskorn in der Überdeckung; P = Im Bereich der Initiierungsstelle Beton direkt an der Stahl/Beton-Grenzfläche leicht poröser; L = Initiierung direkt bei einer Luftpore.

Bei 8 der 21 ausgelagerten Prüfkörper resultierten Fehlinitiierungen an den Stirnflächen der Bewehrungseisen, welche hauptsächlich auf die ungenügende Abdichtung der Stirnflächen in den beiden ersten Versuchsaufbauten zurückzuführen ist.

5 Diskussion

5.1 Vergleich der Resultate mit Literaturdaten

Abb. 39 zeigt kumulierte Wahrscheinlichkeit für Korrosionsinitiierung als Funktion des Chloridgehalts im Beton. Die im vorliegenden Projekt erhaltenen Ergebnisse wurden dabei bezogen auf den tatsächlichen Zementgehalt geplottet (Tab. 7).

Als Vergleich zu den aktuellen Daten des vorliegenden Projekts sind in Abb. 39 auch die folgenden Literaturdaten dargestellt:

Die Daten von Vassie [2] stammen aus Untersuchungen von Brückenbauwerken im Vereinigten Königreich von Grossbritannien und Nordirland. Es handelt sich also ebenfalls um Daten von realen Bauwerken. Die untersuchten Fälle wurden dabei entsprechend der gemessenen Chloridgehalte gruppiert und dem Vorhandensein oder dem Ausbleiben von Korrosion gegenübergestellt. Die Bestimmung des kritischen Chloridgehalts mit diesem Vorgehen dürfte allerdings etwas weniger genau sein als mit dem in der vorliegenden Arbeit angewandten Verfahren, weil der gemessene Chloridgehalt bei beobachteter Korrosion nicht direkt mit der Initiierung zusammenhängt, sondern in Einzelfällen auch deutlich später gemessen worden sein kann. Damit kann allenfalls die etwas ausgeprägtere Streuung erklärt werden.

- Die Daten von Breit [18] und von Zimmermann [19] stammen aus dem Labor und wurden an Prüfkörpern vergleichbarer Grösse und Geometrie ermittelt. Die experimentellen Parameter in diesen Arbeiten sind im Wesentlichen auch vergleichbar mit jenen der vorliegenden Arbeit. Der Hauptunterschied liegt zweifelsohne in der Herstellung der Prüfkörper, d.h. bei [18, 19] im Labor und in der aktuellen Arbeit durch Probenahme an einem realen Bauwerk. Dies dürfte dann auch die geringere Streuung der Labordaten aufgrund von homogeneren Materialeigenschaften (Stahlqualität, Betonqualität, Betonverdichtung, etc.) gegenüber der Ergebnisse des realen Bauwerksbetons erklären.
- Die Linie bezeichnet mit „fib model code“ entspricht der statistischen Beschreibung des kritischen Chloridgehalts im „fib model code for service life design“ [5], was auf den experimentellen Daten von Breit [18] basiert. Dies schlägt sich insbesondere in der äusserst geringen Streuung nieder. Angesichts der aktuellen Datenlage muss diese statistische Beschreibung des fib model code's insgesamt als konservativ, am unteren Ende der statistischen Beschreibung jedoch als etwas zu optimistisch beurteilt werden.

Insgesamt ist an den in Abb. 39 dargestellten Daten auffällig, dass teilweise sehr hohe Chloridgehalte tolerierbar sind, ohne dass Korrosion einsetzt. Dies ist insbesondere bei den an reellem Bauwerksbeton erhobenen Daten der Fall. Sowohl die aktuellen Daten des Pilotobjekts „Stalvedro-Tunnel“ als auch die Ergebnisse von Vassie zeigen, dass selbst bei 1% Chlorid bezogen auf den Zementgehalt weniger als die Hälfte der Fälle korrodieren. Der gebräuchliche kritische Chloridgehalt von 0.4 M-%/Z kann also als sehr konservativ beurteilt werden.

Interessant an den in Abb. 39 dargestellten Daten ist, dass die Ergebnisse von Bauwerksbeton (vorliegende Arbeit und Vassie) als auch die Labordaten (Breit, Zimmermann) im Bereich < 0.5 M-%/Z äusserst gut zusammenfallen. Erst bei höheren Chloridgehalten laufen die Verteilungen auseinander. Ausgerechnet die für das Modellieren der Korrosionsinitiierung im fib model code verwendete Beschreibung des kritischen Chloridgehalts hingegen, passt im Bereich Chloridgehalt < 0.5 M-%/Z nicht ins Gesamtbild.

Der kritische Chloridgehalt kann in einem Bauwerk selbst in einem relativ kleinen Bereich (identische Exposition, identische Betonieretappe, etc.) deutlich variieren. Somit wird auch bei einem erhöhten Chloridgehalt nur ein kleiner Teil der Bewehrung korrodieren. Das Phänomen der lokal auftretenden Korrosion kann also primär dadurch begründet werden, dass der für die Korrosionsinitiierung erforderliche Chloridgehalt von einem zum anderen Ort stark variiert. Verstärkend wirkt zusätzlich der Effekt, dass korrodierende Bereiche die angrenzenden passiven Bereiche zu negativen Potenzialen polarisieren und sie damit vor weiterer Korrosionsinitiierung weiter schützen.

Die Auswirkungen der hier erlangten Erkenntnisse auf die Praxis werden im Kapitel 1 „Ausblick“ diskutiert.

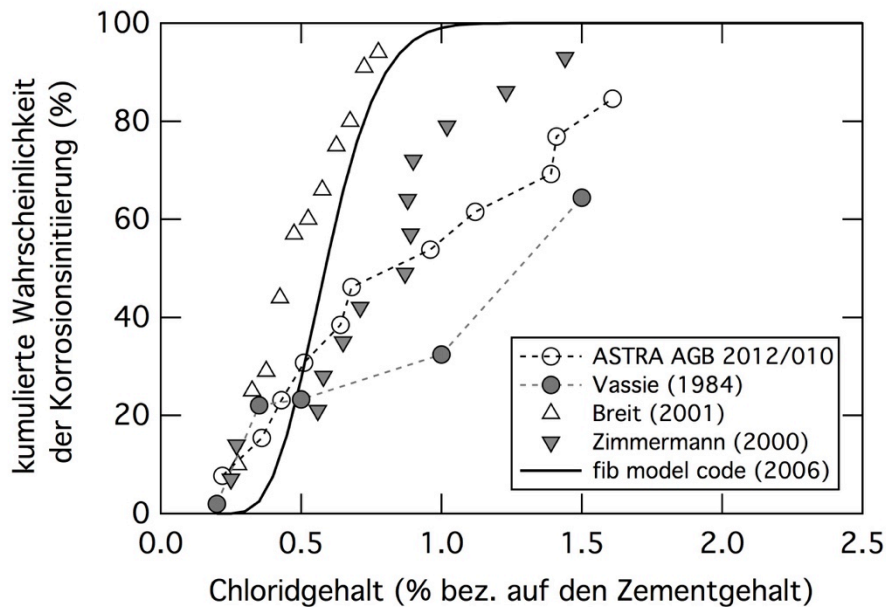


Abb. 39 Summenhäufigkeit des kritischen Chloridgehalts des vorliegenden Projekts (gemessen am Pilotobjekt „Stalvedro-Tunnel“) im Vergleich zu Literaturdaten. Dreiecke = Laborprüfkörper, Kreise = reeller Beton bzw. reelle Bauwerke.

5.2 Ort der Initiierung

In drei Viertel aller Fälle waren an der Stahl/Beton-Grenzfläche keine visuellen Inhomogenitäten oder andere Auffälligkeiten sichtbar. In den restlichen ca. 25% der Fälle korrelierte die Korrosionsstelle mit einer leicht erhöhten Porosität des Betons an der Stahl/Beton-Grenzfläche (Prüfkörper Y2) oder mit dem Vorhandensein einer Makropore / Lufteinschluss (Y6, G10).

Interessanterweise betrug der kritische Chloridgehalt jener Prüfkörper, an denen die Korrosion bei sichtbar erhöhter Porosität an der Stahl/Beton-Grenzfläche (P in Tab. 7) oder bei einer Makropore / bei einem Lufteinschluss (L in Tab. 7) initiierte im Mittel 1.33 M-%/Z_{eff}, wobei der mittlere kritische Chloridgehalt jener Proben, an denen die Initiierungsstelle nicht mit visuellen Auffälligkeiten korrelierte lag deutlich tiefer, nämlich 0.67 M-%/Z_{eff}. Dieses Ergebnis ist genau umgekehrt als die landläufige Annahme, grössere Poren an der Stahl/Beton-Grenzfläche seien ausgesprochene Schwachstellen.

In 36% der Fälle lag die Korrosionsstelle hinter einem grösseren Gesteinskorn in der Überdeckung. Dies beeinflusste nicht direkt die Eigenschaften der Stahl/Beton-

Grenzfläche, doch es ist bekannt, dass Chloride präferentiell entlang von grossen Gesteinskörnern in den Beton eindringen können. Es darf also angenommen werden, dass sich hinter grösseren Gesteinskörnern lokal ein erhöhter Chloridgehalt einstellte, was dann wiederum die Initiierung der Korrosion an dieser Stelle begünstigte. Es sei allerdings angemerkt, dass in 64% der Fälle die Korrosion nicht hinter grösseren Gesteinskörnern einsetzte, obwohl entsprechende Stellen auch in diesen Prüfkörpern vorhanden waren.

In knapp 40% der Fälle konnte die Lage der Korrosionsstelle weder mit der Präsenz eines grossen Gesteinskorns in der Überdeckung (lokal erhöhter Chlorideintrag) noch mit dem Vorhandensein von visuellen Auffälligkeiten wie Poren erklärt werden (Tab. 7). Dies bedeutet, dass die Initiierung der Korrosion durch Effekte begünstigt / verursacht wurde, die makroskopisch nicht sichtbar sind. Die Erforschung solcher Effekte ist Gegenstand laufender Untersuchungen, z.B. im Rahmen des RILEM Komitees SCI.

5.3 Einfluss des Gesteinskörnung auf den Chloridgehalt

Die für die Chloridanalysen entnommenen Betonmehlproben waren eher klein, nämlich rund 3 cm^3 (etwa 7 g Betonmehl). Um der hohen Variabilität in Volumenanteil an Zementstein und Gesteinskörnung dieser Betonproben Rechnung zu tragen, wurde in der vorliegenden Arbeit für jede untersuchte Betonmehlprobe der Anteil an Zementstein mitbestimmt. Dies war mittels eines chemischen Verfahrens möglich, weil die Gesteinskörnung im vorliegenden Fall säureunlöslich war (95% Silikate), vgl. Kapitel 4.1.

In Tab. 7 wurden die kritischen Chloridgehalte jeweils bezogen auf den tatsächlichen Zementgehalt (Z_{eff}) und bezogen auf einen angenommenen Zementgehalt von 300 kg/m^3 Beton (Z) dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Annahme eines fixen Zementgehaltes von 300 kg/m^3 in den allermeisten Fällen zu einer Überschätzung des Chloridgehaltes führte. In Einzelfällen unterschieden sich die beiden Werte um einen Faktor 2–3.

Abb. 40 zeigt dass die Streuung in den Ergebnissen deutlich reduziert werden kann, wenn statt eines pauschal angenommenen (fixen) Zementgehaltes der tatsächliche Zementgehalt der untersuchten Betonmehlprobe berücksichtigt wird.

Gerade bei kleineren Volumen an untersuchtem Beton ist es daher zentral, dass der korrekte Zementgehalt ermittelt wird. Dies ist in den meisten Fällen jedoch nicht mit dem hier verwendeten chemischen Verfahren möglich, weil die Gesteinskörnungen in der Schweiz im Allgemeinen einen beträchtlichen, zudem von Probe zu Probe variablen Anteil an löslichen Gesteinen aufweisen [20]. Es herrscht daher Bedarf nach einer von diesem Einfluss unabhängigen Methode, die es erlaubt den Zementgehalt in Betonproben einfach und rasch zu bestimmen.

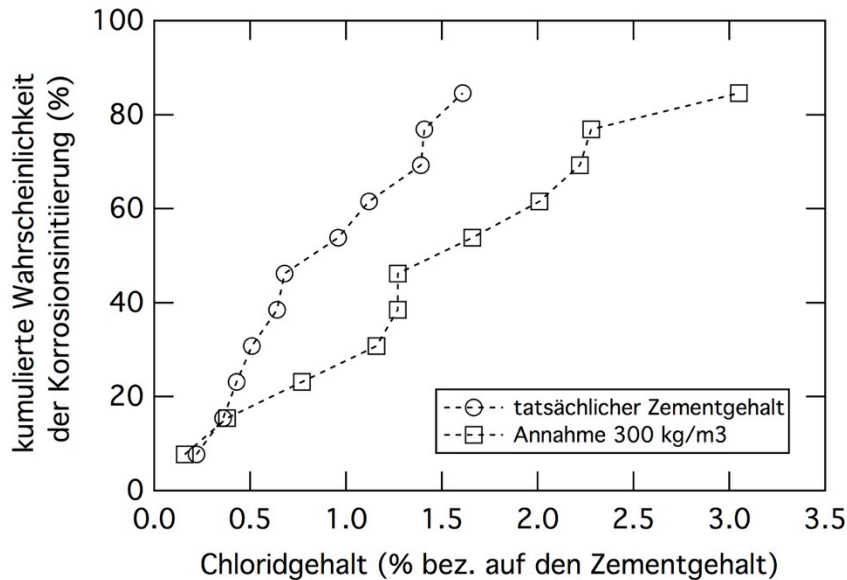


Abb. 40 Summenhäufigkeit des kritischen Chloridgehalts des vorliegenden Projekts (gemessen am Pilotobjekt „Stalvedro-Tunnel“), bezogen auf den tatsächlichen Zementgehalt in den untersuchten Betonmehlproben und auf einen angenommenen Zementgehalt von 300 kg/m^3 Beton.

5.4 Beurteilung der Methodik und Verbesserungsvorschläge

In diesem Kapitel wird die hier angewandte Methodik unter Berücksichtigung der aktuellen Erfahrungen und des internationalen Sachstands beurteilt und allfällige weitere Verbesserungsvorschläge abgeleitet.

Im Anhang I wird schliesslich die empfohlene Methode zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts an Bohrkernproben bestehender Bauwerke zusammengefasst. Dieser Anhang ist als eigenständiges Kapitel ausgebildet und kann daher als Auszug und ohne den Kontext dieses Berichtes verwendet werden.

5.4.1 Allgemeine Beurteilung

Die vorgeschlagene Methode wird als geeignet zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts an bestehenden Bauwerken beurteilt. Sie ist nahezu frei von negativen Einflüssen beschleunigter Testverfahren, wie beispielsweise die externe Polarisation der Bewehrung, und den Artefakten von Labortestverfahren (nicht praxisrelevante Prüfkörper, etc.). Die Resultate, gemessen an Prüfkörpern des Pilotobjektes „Stalvedro Tunnel“, dürfen angesichts anderer Literaturdaten an Bauwerken als realistisch beurteilt werden.

Die Methode ist „einfach“, praktisch und ohne grosse Infrastruktur anwendbar. Für die Prüfkörperentnahme am Bauwerk und -vorbereitung im Labor sind herkömmliche Verfahren (Bohren, Schneiden, Schleifen, etc. von Beton) ausreichend. Auch die Auslagerung in der Chloridlösung und das Monitoring der Stahlpotenziale erfordern keine besondere oder kostspielige Ausrüstung. Somit eignet sich die Methode grundsätzlich für die Anwendung durch Baustoffprüfinstitute. Für die Interpretation der Ergebnisse sind – wie bei vielen anderen standardisierten Prüfverfahren auch – vertiefte Kenntnisse der Materialtechnologie und des Bauingenieurwesens erforderlich.

Die anfänglichen „Fehlinitierungen“ (Korrosion am Ende des Bewehrungsstabs) konnten durch die in dieser Arbeit vorgenommenen Optimierungen der Methode deutlich reduziert, jedoch nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Wir sind der Ansicht, dass sich dies

weiter verbessern lässt, wenn alle Prüfkörper direkt von Anfang an mit dem optimierten Verfahren bearbeitet werden, und nicht, wie in dieser Arbeit, die Verbesserungen erst nachträglich vorgenommen werden. Dies hat sich inzwischen in weiteren Untersuchungen bestätigt.

In den folgenden Abschnitten wird auf einzelne Punkte des gewählten Vorgehens detaillierter eingegangen und mögliche Verbesserungsvorschläge präsentiert.

5.4.2 Auswahl des Bauwerks

Mit der Auswahl des Stalvedrostrassentunnels, wurde ein ideales Bauwerk für die Bestimmung des kritischen Chloridgehalts ausgewählt. Der Tunnel hatte mit rund 45 Jahren ein optimales Bauwerksalter (repräsentativ für eine Vielzahl Schweizer Strasseninfrastrukturbauwerke), die Stahlbetonoberflächen waren für Tausalzbeanspruchungen ausgelegt und der Firstbereich wies keine Oberflächenbeschichtung auf. Zudem konnte mit den vorgängigen Zustandsuntersuchungen nachgewiesen werden, dass das Bauwerk im Entnahmebereich keine Korrosionsschäden aufwies.

Die Bohrkern aus dem Firstbereich des Stalvedrotunnels hatten sehr hohe Betondeckung der Bewehrung. Um die Versuche zu beschleunigen musste die Betondeckung reduziert werden, was möglicherweise zu einer Verfälschung der Resultate führen kann. Durch das Schneiden wurde der bereits karbonatisierte Beton weggeschnitten. Der Chlorideindringvorgang wird somit beeinflusst. Entlang grösserer Gesteinskörner ist somit eine schnellere Chlorideindringung möglich, als wenn die äussere Zementhaut des Betons noch vorhanden wäre. Es ist somit empfehlenswert, Probenahmestellen auszuwählen, welche keine allzu grosse Betondeckung der Bewehrung aufweisen und somit eine Reduktion der Betondeckung zur Beschleunigung der Versuchsdurchführung nicht nötig ist.

Die Probenahme aus dem Firstbereich des Tunnels waren im vorliegenden Fall nötig, da der Ulmenbereich Korrosionserscheinungen aufwies. Die Probenahme im Firstbereich eines Tunnels ist jedoch deutlich aufwändiger und kostenintensiver, als eine Probenahme aus dem Ulmenbereich.

Ausserdem ist die Situation im Firstbereich des Tunnels nicht repräsentativ für andere geometrische Konfigurationen. So sind „Unterseiten“ aufgrund des plastischen Setzens des Betons und der damit verbundenen Ausbildung von „Blutwasserzonen“ an der Stahlunterseite tendenziell immer besonders korrosionsanfällig. Ein anderer Aspekt ist die besondere Geometrie des Tunnelfirstbereichs und damit des Betoniervorgangs. Vermutlich musste der Beton im Firstbereich des Tunnelgewölbes durch Pumpen in die Schalung eingebracht werden, unter Bedingungen, die eine optimale Verdichtung des Frischbetons erschwerten (Zugänglichkeit). Dies ist im Einklang mit den Laboruntersuchungen zur Charakterisierung des Betons (Kapitel 3.2), welche eine deutliche Inhomogenität des Bauwerksbetons gezeigt haben.

Für eine weitere Anwendung der Methode in einem Folgeprojekt sollte daher beachtet werden, dass die Probenahme aus vertikalen Bauteilen erfolgen kann.

5.4.3 Probeentnahme

Der Durchmesser von 150 mm der Bohrkern hat sich zur Prüfkörperherstellung bewährt. Damit kann einerseits der durch die Probenahme entstehende „Schaden“ am Bauwerk gering gehalten werden, während dennoch ein ausreichend grosser Prüfkörper für die weitere Bearbeitung im Labor gewährleistet wird. Bei kleineren Bohrkerndurchmessern wird es schwierig, die Randeefekte der Bewehrung zu verhindern und gleichzeitig einen ausreichend langen Bereich des entnommenen Bewehrungsstahls exponieren und prüfen zu können.

5.4.4 Probenvorbereitung

Die Probenvorbereitung sollte von Beginn an nach der optimierten Variante erfolgen. Durch eine von vornherein saubere Bearbeitung der Stirnflächen der Bewehrung könnten Fehlinitiierungen deutlich weiter reduziert werden.

Im vorliegenden Projekt wurde zur Befestigung des Kabels zur Potenzialmessung eine Schraubverbindung verwendet. Diese Schraubverbindung hat sich bewährt. Nicht zuletzt kann durch das rein mechanische Bearbeiten des Stahls eine unnötige Erhitzung des Stahls und des Betons (wie dies beispielsweise bei Lötten der Fall wäre) verhindert werden.

Das Einbetonieren einer Referenzelektrode, wie im vorliegenden Fall mit einem Titannetz bewerkstelligt, wird nicht mehr empfohlen. Dieser Arbeitsschritt bedeutet einen Mehraufwand ohne entsprechenden Nutzen. Eine eingemörtelte Referenzelektrode ist einzig dann von Vorteil, wenn bei einer Exposition der Prüfkörper mit Wechselzyklen (nass-trocken) auch eine Aufzeichnung der Potenziale während den Trockenphasen erwünscht ist. Es sei jedoch angemerkt, dass das Vergleichen von Potenzialen während Nass- und Trockenphasen ohnehin erschwert ist, nämlich durch den (oft starken) Einfluss der Feuchtigkeitsschwankungen auf das gemessene, scheinbare Potenzial.

5.4.5 Versuchsdurchführung

Die vor der Exposition in der Chloridlösung durchgeführte Wasserlagerung hat sich bewährt. Die anfängliche Wasserlagerung der Prüfkörper wird als sinnvoll beurteilt um schon zu Beginn der Auslagerung einen primären Chloridtransport durch Diffusion (und nicht durch kapillares Saugen) zu garantieren.

Bei der Versuchsdurchführung in den Testversuchen wurde die Chloridkonzentration je nach Start der Prüfkörperauslagerung nicht einheitlich gewählt. Alle Prüfkörper wurden zuerst in einer Chloridlösung von 3.5% NaCl ausgelagert. Nach jeweils rund 100 Tagen wurde die Chloridkonzentration zuerst auf 7% NaCl und dann auf 14% NaCl erhöht. Da keine Korrosionsinitiierungen direkt im Zusammenhang mit der Konzentrationserhöhung erfolgten, ist zur Beschleunigung des Chlorideintrags eine schnellere Erhöhung der Chloridkonzentration der Expositionslösung empfehlenswert. Ausgehend von einer Konzentration von 4% NaCl könnte jeweils nach rund 1-2 Monaten eine Erhöhung um 2% NaCl erfolgen.

Ebenfalls zu einer Beschleunigung des Chlorideintrags könnte eine Wechsellagerung mit Nass-Trocken-Zyklen erfolgen. So erfolgt der Chlorideintrag nicht nur durch Diffusion sondern auch durch kapillares Saugen. Dies gilt zumindest für Betone, welche einen relevanten Anteil an Kapillarporen aufweisen, wie dies in Bauwerksbeton bestehender, mehrere Jahrzehnte alter Bauwerke der Fall ist. In der Schweiz treten aufgrund der Witterung und der Tausalzbelastungen im Winter häufig Wechsellagerungen auf.

Wir sind jedoch der Ansicht, dass eine kontinuierliche Lagerung in Lösung diverse Vorteile aufweist: i) geringerer Arbeitsaufwand, ii) kontinuierliches Potenzialmonitoring einfach möglich (echte Referenzelektrode in der Lösung), und iii) weniger feuchtebedingte Schwankungen in den gemessenen Potenzialen und damit weniger Schwierigkeiten bei der Interpretation der Messungen. Es sei ausserdem angemerkt, dass sich die Befürchtung nicht bewahrheitet hat, eine kontinuierliche Lagerung in Lösung würde die Sauerstoffkonzentration an der Bewehrung über die Zeit soweit senken dass das Potenzial negativer wird, was einerseits den kritischen Chloridgehalt beeinflusst und andererseits Schwierigkeiten bei der Interpretation der Messungen (Detektion der Korrosionsinitiierung) mit sich bringt. Sowohl in den aktuellen Versuchen wie auch im Rahmen eines Ringversuchs des RILEM Komitees 235-CTC (vergleiche Stand der Forschung) hat sich gezeigt, dass selbst eine monate- bis jahrelange kontinuierliche Wasserlagerung das Bewehrungspotenzial nicht in negativer Richtung verschiebt. Dies wird damit begründet, dass im passiven Zustand der Bewehrung der Sauerstoff im Beton in nur unmerklichem Masse konsumiert wird.

5.4.6 Korrosionsmonitoring / Detektion der Korrosionsinitiierung

Das Korrosionsmonitoring erfolgte hauptsächlich mittel Potenzialmessung. Zur Kontrolle des Korrosionszustandes der Bewehrung der Prüfkörper wurden zu ausgewählten Zeitpunkten Messungen des Polarisationswiderstands (linear polarization resistance measurements) durchgeführt. Sowohl die Potenzialmessung als auch die Messung des Polarisationswiderstandes haben in unabhängiger Weise konsistent die Detektion der Korrosionsinitiierung ermöglicht. Dies ist im Einklang mit dem internationalen Sachstand.

Für die Methode wird daher empfohlen, die Detektion der Korrosionsinitiierung durch Monitoring des Bewehrungspotenzials und Anwendung des in dieser Arbeit definierten Kriteriums einer negativen Potenzialverschiebung vorzunehmen.

5.4.7 „Bohrmehlentnahme“ und Analyse

Die Bohrmehlentnahme nach der Korrosionsinitiierung hat sich als einer der zeitintensivsten Arbeitsschritte herauskristallisiert. Eine Entnahme des Bohrmehls auf +/- 2 mm der Bewehrungshöhe an einer Prüfkörperhälfte ist nur durch Schleifen im trockenen Zustand möglich. Das Abschleifen der Prüfkörper ist relativ aufwändig und verursacht viel Staub. Weiter ist die Menge des erhaltenen Pulvers im Vergleich zu den Anforderungen in SN EN 14629, wo 10 Gramm verlangt werden, zu gering. Dies könnte die Abweichung zwischen gemessenem und effektivem Zementgehalt (Kap.) erklären.

Ein alternatives Verfahren wäre das Abschneiden und Mahlen einer Betonprobe. Dies ist jedoch je nach Diamantsäge nur mit dickeren Scheiben möglich (ca. >8 mm); entsprechend entstehen grössere Schneidverluste.

Um den Arbeitsaufwand durch das Schleifen reduzieren zu können, könnten wie in der Praxis angewendet, 10 mm Tiefenstufen entnommen werden und der kritische Chloridgehalt auf Bewehrungshöhe mittels Interpolation ermittelt werden. Eine grössere Bohrmehlmenge pro Analysestufe hätte zudem den Vorteil, dass Inhomogenitäten im Beton besser ausgeglichen werden könnten.

6 Schlussfolgerungen

In dieser Arbeit konnte eine Methode entwickelt werden, die es erlaubt, den kritischen (korrosionsauslösenden) Chloridgehalt an Prüfkörpern zu bestimmen, welche an reellen Bauwerken entnommen werden. Dadurch kann den Materialkennwerten, welche den kritischen Chloridgehalt massgeblich beeinflussen, gebührend Rechnung getragen werden. Dies sind insbesondere die Einflüsse der Stahl/Beton-Grenzfläche, des Betongefüges, und des Betonalters. Es ist hinlänglich bekannt [12], und hat sich in dieser Arbeit abermals bestätigt, dass diese wesentlichen Materialeigenschaften bei der Prüfkörperherstellung im Labor kaum realitätsnah reproduzierbar sind.

Die unter Berücksichtigung der in dieser Arbeit gemachten Erfahrungen resultierende, optimierte Methode zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts ist im Anhang I zusammengefasst.

Die Methode wurde an einem Pilotobjekt, dem Stalvedro-Strassentunnel erfolgreich getestet. Die Ergebnisse zeigten, dass der kritische Chloridgehalt am untersuchten Objekt über einen grossen Bereich streut, nämlich von 0.22 M-% bis über 1.6 M-% Chlorid bezogen auf den Zementgehalt. Selbst bei hohen Chloridgehalten von 1 M-%/Z korrodierten nur rund die Hälfte der untersuchten Proben; die restlichen Prüfkörper wiesen teils wesentlich höhere kritische Chloridgehalte auf. Der gebräuchliche kritische Chloridgehalt von 0.4 M-%/Z kann für das untersuchte Objekt also als sehr konservativ beurteilt werden.

In drei Viertel aller untersuchten Fälle waren bei der Korrosionsinitiierungsstelle an der Stahl/Beton-Grenzfläche keine visuellen Inhomogenitäten oder andere Auffälligkeiten sichtbar. In den restlichen ca. 25% der Fälle korrelierte die Korrosionsstelle mit einer leicht erhöhten Porosität des Betons an der Stahl/Beton-Grenzfläche oder mit dem Vorhandensein einer Makropore / Lufteinschluss. Interessanterweise lag der mittlere kritische Chloridgehalt bei letzteren mit 1.33 M-%/Z auf einem deutlich höheren Niveau, als der mittlere kritische Chloridgehalt jener Proben, an denen die Initiierungsstelle nicht mit visuellen Auffälligkeiten korrelierte (0.67 M-%/Z).

Um lokal einen Chloridgehalt im Beton messen zu können, werden üblicherweise relativ kleine Betonmehlproben entnommen. In dieser Arbeit war es möglich, der Variabilität in Volumenanteil an Zementstein und Gesteinskörnung in den Betonmehlproben Rechnung zu tragen. Dazu konnte ein chemisches Verfahren angewendet werden, welches darauf basierte, dass die Gesteinskörnungen im aktuellen Fall praktisch säureunlöslich waren. Es zeigte sich, dass der Zementanteil in den Betonmehlproben sich fallweise bis zu einem Faktor 3 von der üblichen Annahme eines konstanten Zementgehalts von 300 kg/m³ unterschied. Da dieses chemische Verfahren bei den meisten anderen in der Schweiz vorhandenen Gesteinskörnungen nicht anwendbar ist, herrscht Bedarf nach einer alternativen, genereller anwendbaren Methode, die es erlaubt den Zementgehalt in Betonproben einfach und rasch zu bestimmen.

7 Ausblick

Die in Anhang I empfohlene Methode wurde an einem Pilotobjekt, dem Stalvedro-Strassentunnel erfolgreich getestet. Dazu wurden Prüfkörper aus dem Firstbereich des Stahlbeton-Tunnelgewölbes entnommen und im Labor geprüft. Aufgrund der besonderen Lage der Entnahmestelle (Firstbereich, Untersicht, Zugänglichkeit bei den Betonierarbeiten, Verdichtung, etc.) ist bei der Verallgemeinerung der Prüfergebnisse Vorsicht geboten. Die gemessenen kritischen Chloridgehalte können nicht ohne Weiteres auf andere Objekte übertragen werden. Vermutlich weist die Entnahmestelle am Pilotobjekt eine der ungünstigsten Konfigurationen auf, was zu sehr ausgeprägten Inhomogenitäten innerhalb eines Bauteils führte.

Es wäre sinnvoll, die nun erhaltene Methode auf weitere Objekte anzuwenden und damit die statistische Verteilung der kritischen Chloridgehalte an verschiedenen Objekten / Bauteilen zu messen. Es ist davon auszugehen, dass sich diese von Objekt zu Objekt unterscheiden. In welchem Ausmass dies der Fall sein wird, ist noch unbekannt; entsprechende Untersuchungen sind bisher weltweit noch nicht durchgeführt worden, nicht zuletzt auch aufgrund des Mangels an einer entsprechenden Methode. Die objektspezifische Kenntnis der statistischen Verteilung des kritischen Chloridgehalts ist jedoch zwingende Voraussetzung für eine Beurteilung der Genauigkeit und Aussagekraft von Lebensdauermodellen (vgl. Forschungsprojekt ASTRA / AGB 2011/002 „Modellierung der Initiierung von Korrosion bei chlorid-belasteten Stahlbetonbauten“).

Durch eine Quantifizierung der kritischen Chloridgehalte an verschiedenen Objekten / Bauteilen könnte die aktuell sehr grosse Unsicherheit des kritischen Chloridgehalts bauwerks-/bauteilspezifisch reduziert werden. Dadurch kann die Zustandsbeurteilung und Instandsetzungsplanung auf eine bessere Datengrundlage abgestützt werden.

Eine genauere Kenntnis der Grösse und der Verteilung des kritischen Chloridgehalts auf einem bestimmten Bauteil hat folgenden *konkreten Nutzen für die Praxis*:

- Bei chloridexponierten Bauwerken, die noch nicht korrodieren, wird zusammen mit den etablierten Modellen der Chlorideindringung eine bessere Prognose des Zeitpunkts der erwarteten Korrosionsinitiierung möglich. Dadurch liesse sich der Instandsetzungsbedarf vorausschauend abschätzen, und allenfalls durch gezielte, vergleichsweise kostengünstige Interventionen deutlich reduzieren.
- Die in der Realität auftretenden kritischen Chloridgehalte sind vermutlich deutlich höher als der generell angenommene Grenzwert von 0.4% (z.B. Norm SIA 269/2). Daraufhin deuten einzelne Literaturstudien, sowie die im aktuellen Projekt erlangten Resultate. Liesse sich dieser Befund generell erhärten und für ein breiteres Spektrum von Bauwerken bestätigen, würde dies eine deutlich weniger konservative Schätzung der Korrosionsinitiierung erlauben. Dies bedeutet eine genauere Planung erforderlicher Instandsetzungsmassnahmen und somit Kosteneinsparungen.

Anhang

I	Vorgeschlagene Methode zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts an Bohrkernproben bestehender Bauwerke	77
I.1	Zweck und Überblick.....	77
I.2	Auswahl der Entnahmebereiche am Bauwerk.....	78
I.3	Entnahme von Prüfkörpern	78
I.4	Vorbereitung der Prüfkörper	79
I.4.1	Schneiden und Schleifen	79
I.4.2	Bearbeitung der Stabenden und elektrischer Anschluss	79
I.4.3	Beschichten des Prüfkörpers	80
I.5	Versuchsdurchführung	82
I.6	Detektion der Korrosionsinitiiierung	82
I.7	Analyse des Chloridgehalts und Dokumentation der Initiierungsstelle	83

I Vorgeschlagene Methode zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts an Bohrkernproben bestehender Bauwerke

I.1 Zweck und Überblick

Das hier beschriebene Verfahren hat den Zweck, den kritischen, d.h. korrosionsauslösenden Chloridgehalt im Beton mithilfe von an bestehenden Stahlbetonbauwerken entnommenen Prüfkörpern experimentell zu ermitteln.

Dabei können bauwerks- bzw. bauteilspezifische Grenzwerte für das Einsetzen der chloridinduzierten Bewehrungskorrosion ermittelt werden. Dies erlaubt es, die Beurteilung bestehender Bauwerke hinsichtlich Korrosionsgefährdung bzw. die entsprechende Instandsetzungsplanung, auf eine genauere Basis abzustützen, als anhand mit universellen, tendenziell konservativen Grenzwerten in der Literatur oder in den Normen.

Abb. I1 gibt einen Überblick über die vorgeschlagene Methode. Die einzelnen Teilschritte werden in den folgenden Kapiteln einzeln und detailliert behandelt.

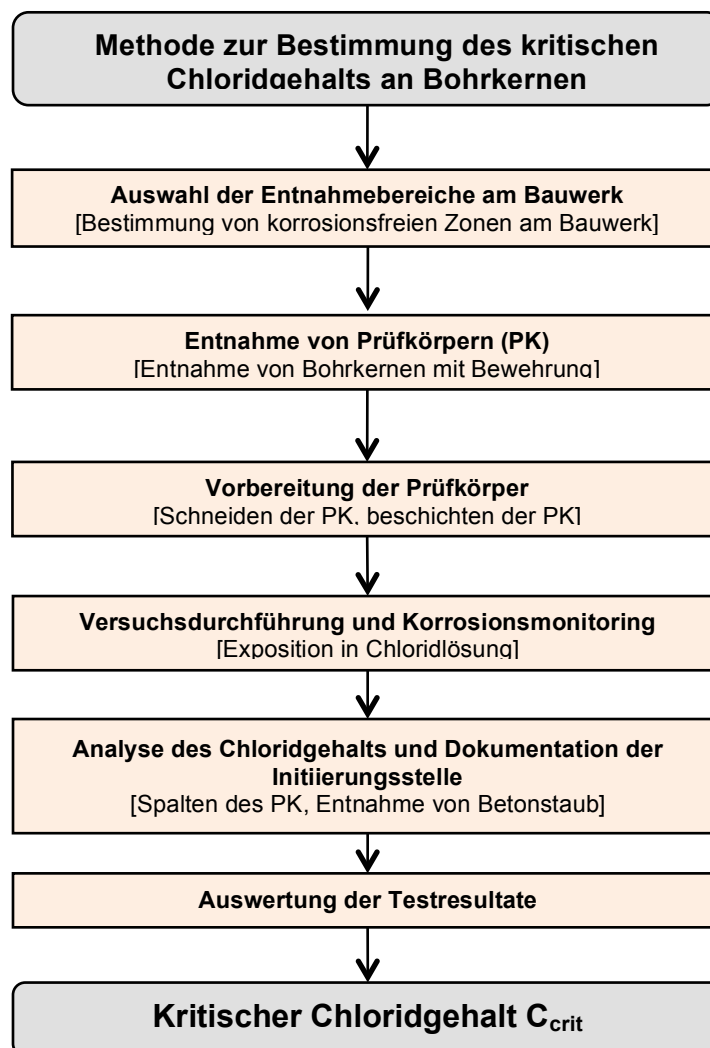


Abb. I1 Überblick der Methode zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts an bestehenden Bauwerken.

I.2 Auswahl der Entnahmebereiche am Bauwerk

Damit der kritische Chloridgehalt an einem Bauwerksbeton bestimmt werden kann, sollte das Bauwerk bzw. das Bauteil noch keine Korrosionsschäden aufweisen oder wenn, dann nur in einem stark begrenzten Bereich. Zweck der Methode ist es, eine Datengrundlage für die Vorhersage künftiger Korrosionsinitiierung zu legen, was nur für Bereiche sinnvoll ist, die noch ungeschädigt sind (und sich noch in der Initiierungsphase befinden).

Für die Auswahl dieser Bereiche ist es hilfreich, bzw. stark empfohlen, Zustandserfassungen durchzuführen, insbesondere visuelle Überprüfungen der Bauwerksoberflächen, sowie Potenzialmessungen ergänzt mit örtlichen Sondieröffnungen. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die Prüfkörper aus Bereichen entnommen werden, an denen die Bewehrung noch nicht korrodiert.

I.3 Entnahme von Prüfkörpern

Für die Bestimmung des kritischen Chloridgehalts werden Bohrkern mit Durchmesser 150 mm benötigt, welche ein rechtwinklig zur Bohrrichtung und im Bohrkernschnitt zentrisch orientiertes Bewehrungsseisen enthalten (Bohrkerne A in Abb. I2). Dazu ist die genaue Lage des Bewehrungsstahls mittels üblicher zerstörungsfreier Prüfverfahren am Bauwerk zu lokalisieren und auf der Betonoberfläche anzuzeichnen. Die entnommenen Bohrkern sollten nach Möglichkeit keine Kreuzungspunkte zweier Bewehrungsstäbe enthalten; ausserdem sollen die Prüfkörper einheitlich von gleich laufenden Bewehrungsstäben entnommen werden, d.h. dort wo sich die relevante Bewehrungslage befindet (üblicherweise die äussere Lage). Die Bohrtiefe soll so gewählt werden, dass der Bohrkern vom dahinterliegenden Beton abgebrochen werden kann ohne dass sich im Bereich des enthaltenen Bewehrungsstabs Risse bilden (normalerweise ist eine Bohrtiefe von ca. 20–25 cm ausreichend).

Nach der Prüfkörperentnahme sollen die Bohrkern sofort mit einem Tuch abgerieben werden, um den Wasserfilm des Bohrvorgangs zu entfernen. Danach sollen die Prüfkörper an der Luft getrocknet und mit der Entnahmestelle bezeichnet werden.

Probeumfang: Es ist empfohlen, aus einem Bereich identischer Exposition und nach Möglichkeit identischer Betonieretappe nach Möglichkeit 10 Bohrkern zu entnehmen.

Zusätzlich sollen einzelne Bohrkern mit Durchmesser 50 mm und ohne Bewehrungsseisen entnommen werden (Bohrkerne B in Abb. I2). Diese sollen für ergänzenden Untersuchungen genutzt werden, namentlich die Bestimmung des aktuellen Chloridprofils, der Karbonatisierungstiefe und allenfalls weiteren Untersuchungen wie Dünnschliffmikroskopie, Porosität, etc. Die Bohrkern vom Typ B müssen aus gleichen Bereichen wie die Bohrkern Typ A entnommen werden.

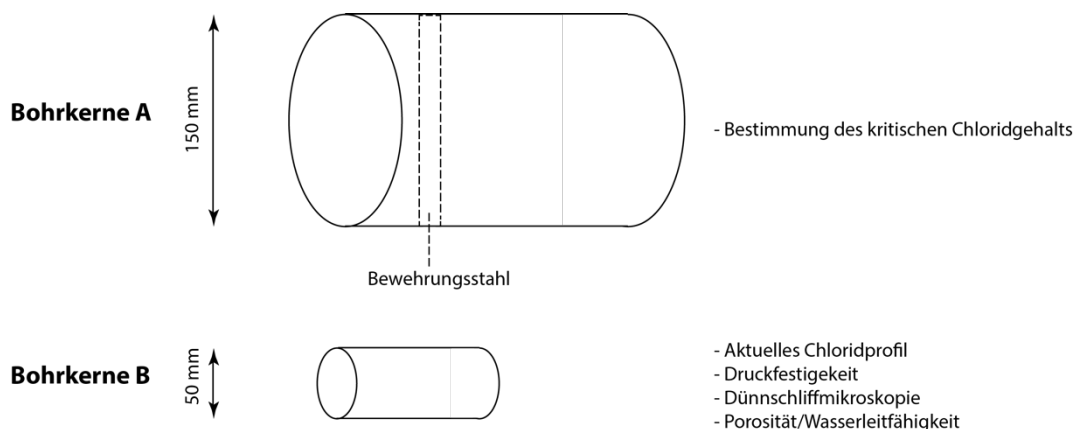


Abb. I2 Darstellung der verschiedenen Bohrkernarten.

I.4 Vorbereitung der Prüfkörper

I.4.1 Schneiden und Schleifen

Die entnommenen Bohrkerne des Typs A mit einem Durchmesser von 150 mm werden mittels wassergekühltem Schneiden bzw. Planschleifen wie folgt vorbereitet:

- Die Überdeckung ist an den Bohrkernmantelflächen beidseitig zu messen und zu dokumentieren. Falls Sie grösser als 30 mm ist, soll Sie auf 20 mm reduziert werden. Sofern die auf beiden Seiten gemessenen Überdeckungen voneinander um mehr als 2 mm abweichen (schräg liegendes Bewehrungsseisen) soll diese Differenz mittels Planschleifen reduziert werden.
- Der auf der Rückseite des Bewehrungsstabes liegende Beton soll auf eine Dicke von ca. 6 cm reduziert werden. Damit stellen sich üblicherweise Prüfkörperlängen von rund 10 cm ein.

I.4.2 Bearbeitung der Stabenden und elektrischer Anschluss

Zur Vorbereitung des elektrischen Anschlusses an die Bewehrung wird einer Stirnseite des Bewehrungsstabes mit einem Metallbohrer ein Loch vorgebohrt. Dies dient der späteren Befestigung eines elektrischen Kabels mittels Kabelschuh und selbstschneidender Metallschraube.

Auf jeder Seite des Bewehrungsstahls wird entlang dem Bewehrungsstahl ein Bohrloch von ca. 15 mm Tiefe gebohrt und damit der Bewehrungsstahl bis auf diese Tiefe vom ursprünglichen Beton befreit (Abb. I3). Die verwendete Bohrkronen soll einen Innendurchmesser aufweisen, welcher um einige wenige Millimeter grösser ist als der Durchmesser der Bewehrung. Daraufhin kann das Kabel an den Bewehrungsstab angeschraubt werden.

Die erstellten Bohrlöcher an den Bewehrungsstahlenden werden anschliessend durch einen dichten, optimalerweise kunststoffvergüteten Schutzmörtel geschlossen, so dass die Stirnflächen passiviert und gut vor einem möglichen Chlorideintrag geschützt werden (Abb. I3). Es ist wichtig, dass dieser Schutzmörtel keinen elektrochemisch aktiven Korrosionsinhibitor enthält. Dieses Vorgehen dient dazu, unerwünschte Endeffekte wie Spaltkorrosion zu minimieren.



Abb. I3 Links: Freigelegtes Ende des Bewehrungsstabes sowie vorbereitetes Bohrloch für den elektrischen Anschluss mittels einer selbstschneidenden Blechschraube. Rechts: Nach dem Anschrauben des elektrischen Kabels und dem Schützen des Endbereiches der Bewehrung mit einem dichten Schutzmörtel.

I.4.3 Beschichten des Prüfkörpers

Nach Aushärten des Schutzmörtels werden als letzter Schritt die Mantelfläche sowie die Randbereiche der Expositionsfläche des Prüfkörpers mehrlagig mit einem Epoxidharz beschichtet. Es ist auf eine gute Haftung des Epoxidharzes und die Vermeidung von Luftblasen zu achten. Die Epoxidharzbeschichtung hat zum Ziel einen eindimensionalen Chloridtransport zum Bewehrungsstahl zu gewährleisten und Korrosion an den Stirnflächen der Bewehrung zu verhindern. Dazu soll der Bewehrungsstab nur über eine Länge von 85 mm exponiert sein (Abb. 14 und 15).

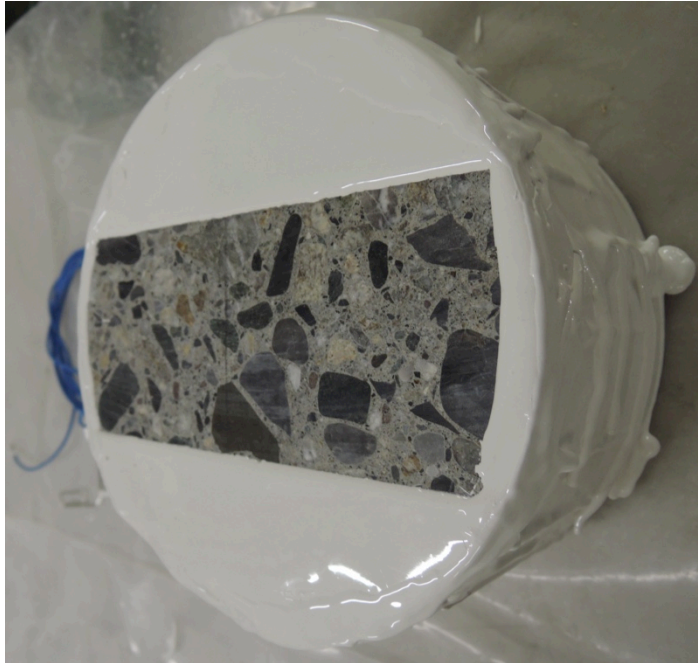


Abb. 14 *Mit Epoxidharz beschichteter Prüfkörper, Blick auf zu exponierende Seite, an welcher der Bewehrungsstab nur über eine Länge von 85 mm exponiert wird (Minimierung der Chlorideinwirkung an den Bewehrungsenden).*

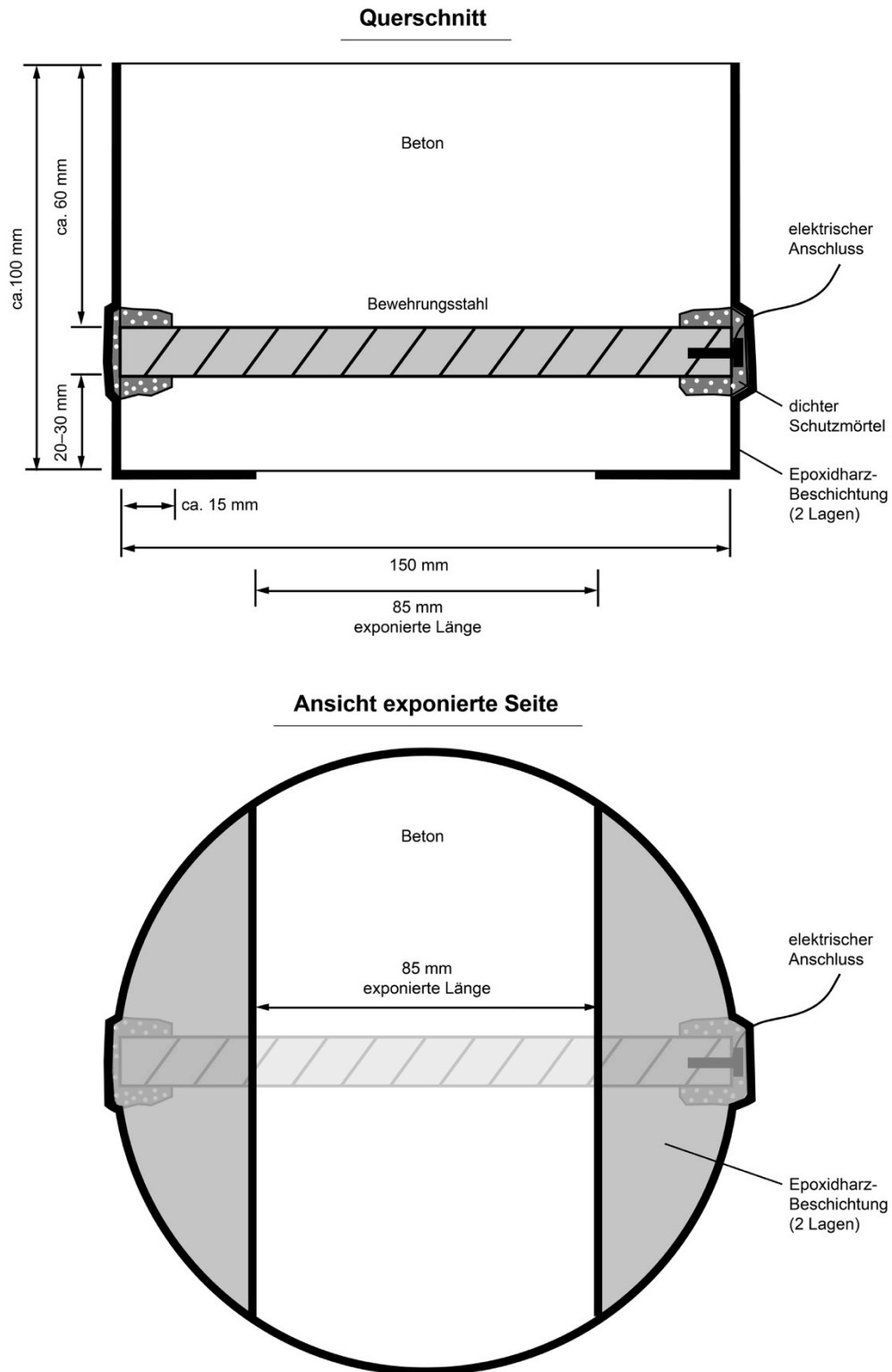


Abb. 15 Schematische Darstellung der Prüfkörper nach dem Schneiden, dem Erstellen des elektrischen Anschlusses, dem Aufbohren und Aufbringen des Schutzmörtels in den Endbereichen des Bewehrungsstahls, sowie der Beschichtung der Mantelfläche und eines Teils der exponierten Fläche mit Epoxidharz im Labor.

I.5 Versuchsdurchführung

Vor der Exposition in der Chloridlösung werden die Prüfkörper 7 Tage einer Wasserlösung ausgesetzt, um ein schnelles Eindringen der Chloride durch den kapillaren Transport zu verhindern.

Direkt anschliessend an die Wasserlagerung werden die Prüfkörper einer 4%igen Natriumchlorid-Lösung ausgesetzt. Die Expositionsfläche soll dabei nur wenige Millimeter tief in die Chloridlösung eintauchen. Ausgehend von der Ausgangskonzentration ist in einem fixen Intervall von 2 Monaten jeweils eine Konzentrationserhöhung um 2% NaCl vorzunehmen, bis zu einem Maximum von 14% NaCl.

Das Korrosionsmonitoring erfolgt mittels Aufzeichnen der Bewehrungspotenziale gegen eine kalibrierte Referenzelektrode. Dies soll mit einem automatischen Datenlogger und einem Messintervall von maximal 6 Stunden erfolgen, d.h. mindestens 4 Messungen pro Tag.

Der Prüfkörper wird so lange der Chloridlösung ausgesetzt bis eine stabile Korrosionsinitiation erfolgt.

I.6 Detektion der Korrosionsinitiation

Während der Auslagerung der Prüfkörper in Chloridlösung schwankt das Bewehrungspotenzial erfahrungsgemäss anfangs noch leicht und nähert sich dann asymptotisch einem Wert im Bereich -150 bis $+50$ mV vs. $\text{Ag}/\text{AgCl}_{\text{sat}}$ an. Dies kann üblicherweise als Passivität interpretiert werden.

Zur Bestimmung einer stabilen Korrosionsinitiation soll nach dem in Abb. I3 dargestellten Ablaufschema vorgegangen werden. Folgende Bedingungen müssen dafür erfüllt sein:

- Potenzialabfall von mehr als 150 mV vom ursprünglichen Potenzialniveau innerhalb weniger als 5 Tage
- Keine Erholung des Potenzials von mehr als 50 mV innerhalb von 5-10 Tagen nach dem Start des Potenzialabfalls.

Tritt eine stabile Korrosionsinitiation auf, so ist der Prüfkörper möglichst rasch, d.h. maximal 10 Tage nach dem Potenzialabfall um 150 mV, aus der Chloridlösung zu entfernen und wie nachfolgend beschrieben zu analysieren.

Fehlinitiation: Sollte sich das Bewehrungspotenzial direkt in den ersten Tagen nach Auslagerung deutlich in negativer Richtung verschieben und sich nicht innert Tagen erholen, ist dies als Hinweis auf eine „Fehlinitiation“ zu deuten. Es ist in diesem Fall zu untersuchen, ob die Expositionslösung einen direkten Pfad zum Stahl zur Verfügung hatte und somit Korrosion auslöste, die mit dem Versuchszweck nicht in Verbindung steht. Entsprechende Versuchskörper und die Ergebnisse müssen verworfen werden.

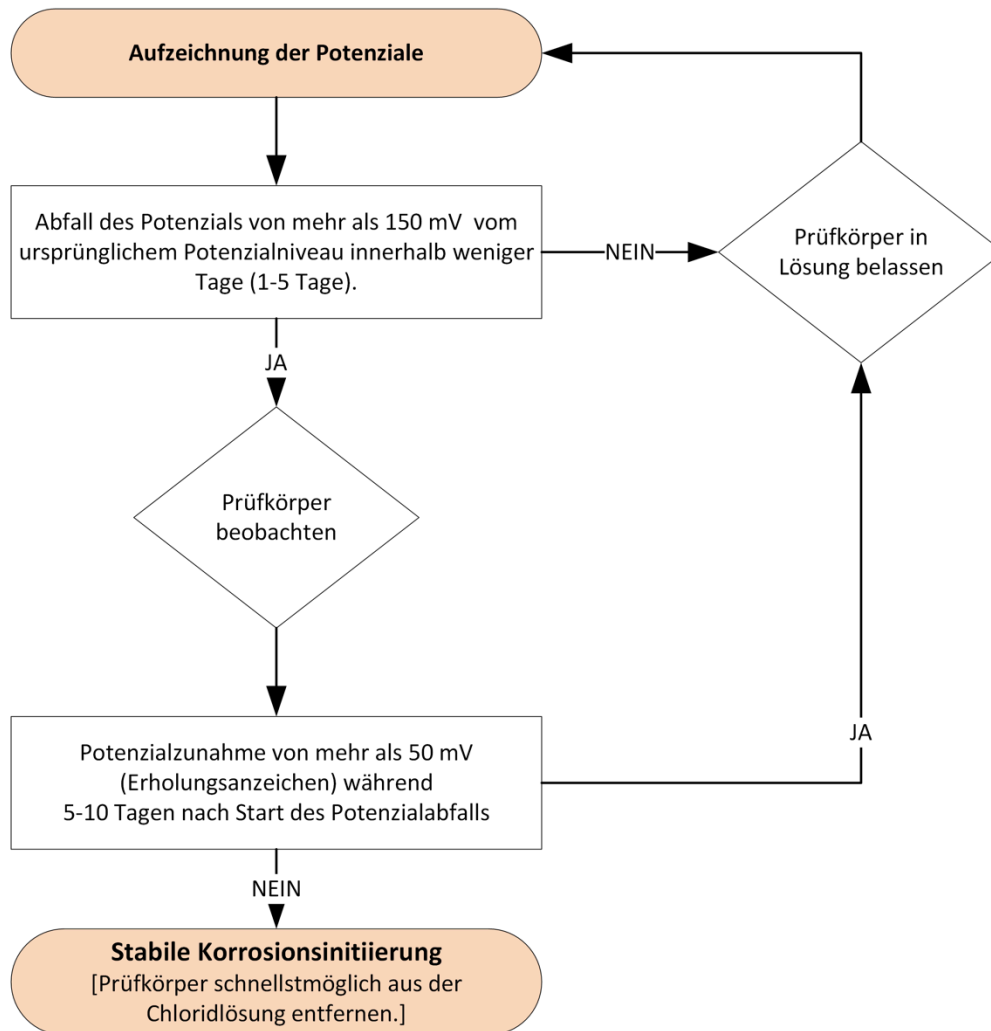


Abb. I3 Monitoring der Potenziale während der Auslagerung und Kriterium zur Detektion der stabilen Korrosionsinitiierung.

I.7 Analyse des Chloridgehalts und Dokumentation der Initiierungsstelle

Die Prüfkörper sollen nach der Entfernung aus der Chloridlösung aufgespalten und der Bewehrungsstahl und die Stahl/Beton-Grenzfläche freigelegt werden. Visuelle Auffälligkeiten am Beton und am Stahl sind zu dokumentieren.

Für die Analyse des Chloridgehalts im Beton soll Betonstaub auf der Tiefenstufe „Überdeckung +/- 2 mm“ entnommen werden. Um den störenden Einfluss grosser Gesteinskörner bei lokal entnommenen, relativ kleinen Betonmehlproben auf die Bestimmung des Chloridgehalts zu minimieren, soll eine möglichst grosse Fläche für die Probenahme verwendet werden. Optimalerweise wird dabei möglichst der gesamte exponierte Bereich (85 mm zwischen dem Epoxidharz, vgl. Abb. I2) berücksichtigt.

Die Bestimmung des Chloridgehalts im entnommenen Betonstaub erfolgt mittels normierter oder kalibrierter Verfahren.

Literaturverzeichnis

- [1] W. Richartz, Die Bindung von Chlorid bei der Zementerhärtung (in German), Zement-Kalk-Gips, 10 (1969) 447-456.
- [2] P. Vassie, Reinforcement corrosion and the durability of concrete bridges, Proc. Inst. Civ. Eng. Part 1, 76 (1984) 713-723.
- [3] RILEM, Draft recommendation for repair strategies for concrete structures damaged by reinforcement corrosion., Mater Struct, 27 (1994) 415-436.
- [4] SIA 269/2:2011 Erhaltung von Tragwerken - Betonbau, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich, 2011.
- [5] International Federation for Structural Concrete (fib), fib bulletin No. 34: Model code for service life design, Lausanne, Switzerland, 2006.
- [6] DuraCrete, Final Technical Report, "Brite EuRam III, DuraCrete - Probabilistic performance based durability design of concrete structures", 2000.
- [7] ASTRA Projekt AGB2011/002: "Modellierung der Initiierung von Korrosion bei chloridbelasteten Stahlbetonbauten", gestartet 2011, noch nicht abgeschlossen.,
- [8] J. Gulikers, Probabilistic service life modelling of concrete structures: improvement or unrealistic?, in: CONSEC'07, Proceedings of the 5th international conference on concrete under severe conditions, environment and loading, Tours, France, 2007, p. 891-902.
- [9] (ed.), Durability of concrete and cement composites, Woodhead Publishing Ltd, Cambridge, 2007.
- [10] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, E. Redaelli, R.B. Polder, Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair, 2nd ed., WILEY-VCH, 2013.
- [11] P. Schiessl, S. Lay, Influence of concrete composition, in: H. Böhni (Ed.) Corrosion in Reinforced Concrete Structures, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2005, pp. 91-134.
- [12] U. Angst, B. Elsener, C.K. Larsen, Ø. Vennesland, Critical chloride content in reinforced concrete - A review, Cem Concr Res, 39 (2009) 1122-1138.
- [13] V.K. Gouda, Corrosion and corrosion inhibition of reinforcing steel. I. Immersed in alkaline solutions., Br. Corros. J., 5 (1970) 198-203.
- [14] RILEM, Technical committee SCI "Characteristics of the steel/concrete interface and their effect on initiation of chloride-induced reinforcement corrosion", chair: Dr. Ueli Angst, started in 2014.
- [15] U. Angst, A. Rønquist, B. Elsener, C.K. Larsen, Ø. Vennesland, Probabilistic considerations on the effect of specimen size on the critical chloride content in reinforced concrete, Corros Sci, 53 (2011) 177-187.
- [16] RILEM, Technical committee 235-CTC "Corrosion initiating chloride threshold concentrations in concrete", chair: Dr. Luping Tang, started in 2009.
- [17] U.M. Angst, B. Elsener, C.K. Larsen, Ø. Vennesland, Chloride induced reinforcement corrosion: Electrochemical monitoring of initiation stage and chloride threshold values, Corros Sci, 53 (2011) 1451-1464.
- [18] W. Breit, Critical corrosion inducing chloride content – State of the art and new investigation results, in: Betontechnische Berichte 1998-2000, Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ), Düsseldorf, Germany, 2001.
- [19] L. Zimmermann, Korrosionsinitiierender Chloridgehalt von Stahl in Beton (in German), ETH Zurich, Switzerland, 2000.
- [20] C. Boschmann, Genauere Bestimmung des Chloridgehalts in Beton – Berücksichtigung des Anteils an Gesteinskörnern, Institut für Baustoffe, ETH Zurich, 2014.

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 4.03.2016

Grunddaten

Projekt-Nr.: AGB 2012/010
 Projekttitel: Methode zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts an bestehenden Stahlbetonbauwerken
 Enddatum: 30.10.2015

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

In dieser Arbeit wurde eine Methode entwickelt, die es erlaubt, den kritischen (korrosionsauslösenden) Chloridgehalt an Prüfkörpern zu bestimmen, welche an realen Bauwerken entnommen werden. Dadurch wird dem Betonalter, dem Betongefüge und der Stahl / Beton Grenzfläche, also den Materialkennwerten, welche den kritischen Chloridgehalt massgeblich beeinflussen, gebührend Rechnung getragen. Es hat sich in dieser Arbeit abermals bestätigt, dass diese wesentlichen Materialeigenschaften bei der Prüfkörperherstellung im Labor kaum realitätsnah reproduzierbar sind.

Die unter Berücksichtigung der in dieser Arbeit gemachten Erfahrungen resultierende, optimierte Methode zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts ist im Anhang I des Berichts zusammengefasst.

Die Methode wurde an einem Pilotobjekt, dem Stalvedro-Strassentunnel, erfolgreich getestet. Die Ergebnisse zeigten, dass der kritische Chloridgehalt am untersuchten Objekt über einen grossen Bereich streut, nämlich von 0.22 M-% bis über 1.6 M-% Chlorid bezogen auf den Zementgehalt. Selbst bei hohen Chloridgehalten von 1 M-%/Z korrodierten nur rund die Hälfte der untersuchten Proben; die restlichen Prüfkörper wiesen teils wesentlich höhere kritische Chloridgehalte auf. Der in der Praxis gebräuchliche "kritische Chloridgehalt" von 0.4 M-%/Z erweist sich für das untersuchte Pilotobjekt kann somit als eher tief beurteilt werden. Sollte sich dies auch für andere Bauwerke bestätigen, könnte die Instandsetzung fallweise entsprechend weniger konservativ geplant, und somit Kosten gespart werden.

Um lokal einen Chloridgehalt im Beton messen zu können, werden üblicherweise relativ kleine Betonmehlproben entnommen. In dieser Arbeit war es möglich, der Variabilität in Volumenanteil an Zementstein und Gesteinskörnung in den Betonmehlproben Rechnung zu tragen. Dazu konnte ein chemisches Verfahren angewendet werden, welches darauf basierte, dass die Gesteinskörnungen im aktuellen Fall praktisch säureunlöslich waren. Es zeigte sich, dass der Zementanteil in den Betonmehlproben sich fallweise bis zu einem Faktor 3 von der üblichen Annahme eines konstanten Zementgehalts von 300 kg/m³ unterschied.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Das vorliegende Projekt hat die gestellten Ziele erreicht

- Es wurde eine neue Methode zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts (Ccrit) für die Korrosionsinitiierung an altem, bewehrtem Bauwerksbeton entwickelt, geprüft und umgesetzt
- Die Resultate ergeben zuverlässige, statistisch relevante und gleichzeitig realistische Werten für Ccrit an einer grossen Zahl von Bohrkernen aus einem Bauwerk
- Als Anhang zum Bericht ist die Methode ausführlich beschrieben, um eventuell als Prüfung im Normenwerk Eingang zu finden

Folgerungen und Empfehlungen:

Erstmals konnte bauwerksspezifisch der kritische Chloridgehalt für die Korrosionsinitiierung der Bewehrung in Beton bestimmt werden. Die Resultate des Projekts deuten darauf hin, dass der kritische Chloridgehalt höher ist als der übliche "Grenzwert" von 0.4% pro Zement (z.B. Norm SIA 269-2).

Dieses Resultat sollte in einem Folgeprojekt an Bohrkernen von weiteren Bauwerken erhärtet werden, erst dann ist eine allgemeinere Aussage über den kritischen Chloridgehalt an alten Bauwerken möglich.

Werden die hohen kritischen Chloridgehalte an andern alten Bauwerken bestätigt, sollte dies in die Abschätzung der restlichen Nutzungsdauer von bestehenden Bauwerken und damit in die Instandsetzungsplanung einfließen.

Publikationen:

Angst U, Elsener B, Chloride threshold values in concrete - a look back and ahead, ACI Fall 2015 Convention (November 8-12, 2015), Denver, CO (accepted)

Angst U, Elsener B, Forecasting chloride-induced reinforcement corrosion in concrete – effect of realistic reinforcement steel surface conditions, Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting IV - Dehn et al. (Eds), p. 177 - 184 2016 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02843-2

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Elsener

Vorname: Bernhard

Amt, Firma, Institut: ETH Zürich, Institut für Baustoffe

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die Begleitkommission beurteilt das Projekt insgesamt positiv. Die Methode ist nun so weit entwickelt, dass sie routinemässig (auch von andern Forschungsstellen) zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts von Stahl im Beton eingesetzt werden kann. Die dazu erforderlichen Instrumente sind in vielen Prüflabors vorhanden. Die gemessenen Werte des kritischen Chloridgehalts streuen stark und stimmen mit andern Untersuchungen überein. Die grosse Bandbreite des kritischen Chloridgehalts (von 0.2 bis 1.6 M%/Z) zeigt, dass die Korrosionsinitiation am Interface Stahl / Beton von einer Vielzahl von stochastisch variierenden Parametern beeinflusst wird, die systemimmanent sind.

Umsetzung:

Die Methode kann auch von andern Prüflabors angewandt werden. Im Vergleich zum vielfach angewandten Grenzwert von 0.4 M%/Z Chlorid sind die erhaltenen Werte teilweise deutlich höher. Dies würde mit den etablierten Modellen für die Chlorideindringung eine viel längere (Rest) Nutzungsdauer eines Bauteils ergeben bzw. eine Instandsetzung müsste erst später erfolgen. Hauptproblem in der Umsetzung ist jedoch die grosse Streuung der Werte für den kritischen Chloridgehalt - wie damit umgegangen werden soll und was dies für die Umsetzung bedeutet ist noch nicht klar. Diese Fragen können nur im Einzelfall beurteilt werden.

weitergehender Forschungsbedarf:

Die Methode zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts wurde an einem Bauwerk erfolgreich getestet. Im Rahmen eines Folgeprojekts könnte z.B. die Frage nach dem Umgang mit stark streuenden und teilweise hohen kritischen Chloridgehalten bearbeitet und Empfehlungen für die Modellierung und die Instandsetzung erarbeitet werden.

Einfluss auf Normenwerk:

Aktuell noch keiner. Die erarbeitete Methode zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts könnte jedoch als zusätzliche Prüfung zum Chloridmigrationstest eingeführt werden.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Martin

Vorname: Käser

Amt, Firma, Institut: Baudirektion Kt. Zürich, Tiefbauamt

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1557	SVI 2010/001	Reklame im Strassenverkehr	2016
1555	SVI 2004/049	Sichere Schulwege – Gefahrenanalyse und Massnahmenplanung	2016
1554	VSS 2011/501	Evaluation des Frosttaumittelwiderstands von Beton – Vergleich von vier Prüfverfahren	2016
1551	VSS 2012/207	Akustische Installationen im Strassentunnel	2016
1550	VSS 2012/311	SERFOR: Voranalyse "Self Explaining and Forgiving Roads"	2016
1549	SVI 2011/015	Anforderungen an zukünftige Mobilitätshebungen	2016
1548	VSS 2010/404	Grundlagen für die Anforderungen an Schutzgeokunststoffe auf der Basis von neuen EN-Prüfmethoden	2016
1547	ASTRA 2011/012_OBF	Development of a self-healing asphalt road via induction heating	2015
1545	ASTRA 2011/013_OBF	Vergleich verschieden starker Asphalt-Belagsaufbauten: Ermittlung der Versagensgrenze eines T3-Normbelages mit der mobilen Grossversuchsanlage MLS10	2015
1544	VSS 2007/302	Rampenbewirtschaftung: Anforderungen an Regelungsverfahren	2015
1543	VSS 2012/402	Machbarkeitsstudie zur Reduktion von Feinstaub oder seiner Vorläufergase mittels spezieller Strassenbeläge	2015
1542	VSS 2011/713	Forschungspaket Nutzensteigerung für die Anwender des SIS: EP3: Transformationskonzepte zwischen Bezugssystemen	2015
1541	VSS 2010/301	Verkehrssicherheit zweistreifiger Kreisel	2015
1540	AGE 2013/001_ENG	TOSA - Transport par bus avec Optimisation du Système d'Alimentation	2015
1539	FGU 2010/007	Modelling of anhydritic swelling claystones	2015
1538	SVI 2011/021	Forschungspaket Verkehr der Zukunft (2060): Initialprojekt	2015
1537	FGU 2010/007	Geotechnischer Indexwert für die Beurteilung des Potentials zur Quarzstaubbelastung	2015
1536	VSS 2012/201	Wirkungskontrolle von Strassenprojekten	2015
1535	VSS 2012/403	Einfluss der Gesteinskörnung auf den Chloridwiderstand von Beton	2015
1534	VSS 2009/102	Forschungsbündel Erhebung verkehrsplanerischer Grundlagedaten: Teilprojekt 2: Methoden der Verkehrsbeobachtung	2015
1533	VSS 2009/101	Forschungsbündel Erhebung verkehrsplanerischer Grundlagedaten: Synthesebericht	2015
1532	VSS 2009/101	Forschungsbündel Erhebung verkehrsplanerischer Grundlagedaten: Teilprojekt 1: Systematik und Glossar	2015
1531	VSS 2011/906	Datenaustausch zwischen Strasseninformationssystemen und Verkehrsmodellen	2015
1530	VSS 2010/402	Einfluss biogener Öle auf die Ökobilanz von Strassenbaubindemittel	2015
1529	VSS 2005/404	Beschleunigte Alterungsmethode von heiss verarbeitbaren Fugenmassen zur Simulation des Einbaus	2015
1528	VSS 2011/308	Verkehrsablauf an ungesteuerten Knoten innerorts unter Berücksichtigung der verschiedenen Verkehrsarten; Ermittlung repräsentativer Richtwerte und Zusammenhänge	2015
1527	VSS 2006/510	Forschungspaket Brückenabdichtungen: Synthesebericht	2015
1526	VSS 2005/456	Paquet de recherche de recyclage des matériaux bitumineux de démolition des routes dans des enrobés à chaud : EP5: Formulation des enrobés avec matériaux recyclés	2015
1525	SVI 2004/058	Verträglichkeitskriterien für den Strassenraum innerorts	2015
1524	ASTRA 2012/003	Erarbeitung von Grundlagen zur Bemessung von Steinschlagschutzdämmen	2015
1523	VSS 2011/104	Monetarisierung des statistischen Lebens im Strassenverkehr	2015

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1522	VSS 2011/106	Normierte gesamtverkehrliche Erschliessungsqualitäten - Grundlagenbericht	2015
1521	VSS 2006/514_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP4 - Zerstörungsfreie Prüfungen von Verbund und Oberflächen	2015
1520	ASTRA 2008/013_OBF	Nächtliche Immissionsprognosen von Strassenlärm (Hochleistungsstrassen)	2015
1519	VSS 2009/201	Lärmimmissionen bei Knoten und Kreiseln	2015
1518	SVI 2011/024	Langsamverkehrsfreundliche Lichtsignalanlagen	2015
1517	VSS 2011/103	Bemessungsverkehrsstärken: Ein neuer Ansatz	2015
1516	VSS 2011/711	Forschungspaket Nutzensteigerung für die Anwender des SIS: EP1: Zeitaspekte und Historisierung	2015
1515	SVI 2011/034	Längere Umsteigezeiten und Haltestellenaufenthaltszeiten - Auswirkungen und Massnahmen	2015
1514	VSS 2006/513_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP3 - Langzeitverhalten des Verbundes	2015
1513	VSS 2005/403	Fliesskoeffizienten von feinen Gesteinskörnungen aus der Schweiz	2015
1512	SVI 2004/069	Veloverkehr in den Agglomerationen - Einflussfaktoren, Massnahmen und Potenziale	2015
1511	VSS 2012/601	Die Physik zwischen Salz, Schnee und Reifen	2015
1510	VSS 2005/453	Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut: EP2: Mehrfachrecycling von Strassenbelägen	2015
1509	ASTRA 2010/022	Markt- und Nutzermonitoring Elektromobilität (MANUEL)	2015
1508	VSS 2011/716	Forschungspaket Nutzensteigerung für die Anwender des SIS: EP6: Schnittstellen aus den Auswertungssystemen SIS (SIS-DWH)	2015
1507	FGU 2007/004	TBM Tunneling in Faulted and Folded Rocks	2015
1506	VSS 2006/512_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP2 - Flüssigkunststoff-Abdichtungen, Erfassen der Verbundproblematik	2015
1505	VSS 2006/509	Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Betonbrücken - Initialprojekt	2014
1504	VSS 2005/504	Druckschwellversuch zur Beurteilung des Verformungsverhaltens von Belägen	2014
1503	VSS 2006/515_OBF	Research Package on Bridge Deck Waterproofing Systems: EP5-Mechanisms of Blister Formation	2014
1502	VSS 2010/502	Road – landside interaction : Applications	2014
1501	VSS 2011/705	Grundlagen zur Anwendung von Lebenszykluskosten im Erhaltungsmanagement von Strassenverkehrsanlagen	2014
1500	ASTRA 2010/007	SURPRICE (Sustainable mobility through road user charging) - Swiss contribution: Equity effects of congestion charges and intra-individual variation in preferences	2015
1499	ASTRA 2011/010	Stauprognoseverfahren und -systeme	2014
1498	VSS 2011/914	Coordinated Ramp Metering Control with Variable Speed Limits for Swiss Freeways	2014
1497	VSS 2009/705	Verfahren zur Bildung von homogenen Abschnitten der Strassenverkehrsanlage für das Erhaltungsmanagement Fahrbahnen	2014
1496	VSS 2010/601	Einfluss von Lärmschutzwänden auf das Raumnutzungsverhalten von Reptilien	2014
1495	VSS 2009/703	Zusammenhang Textur und Griffigkeit von Fahrbahnen und Einflüsse auf die Lärmemission	2014
1494	VSS 2010/704	Erhaltungsmanagement der Strassen - Erarbeiten der Grundlagen und Schadenkataloge zur systematischen Zustandserhebung und -bewertung von zusätzlichen Objekten der Strassen	2014
1493	VSS 2006/001	Neue Methoden zur Beurteilung der Tieftemperatureigenschaften von bitumenhaltigen Bindemitteln	2014
1492	SVI 2004/029	Kombiniertes Verkehrsmittel- und Routenwahlmodell	2014
1491	VSS 2007/704	Gesamtbewertung von Kunstbauten	2014
1490	FGU 2004/002	Langzeit-Beständigkeit von Tunnel-Abdichtungssystemen aus Kunststoffen (Best TASK)	2014
1489	VSS 2006/516_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP6 - Anschlüsse von Brückenabdichtungen	2014

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1488	SVI 2007/020	Methodik zur Nutzenermittlung von Verkehrsdosierungen	2014
1487	SVI 2008/001	Erfahrungsbericht Forschungsbündel	2014
1486	SVI 2004/005	Partizipation in Verkehrsprojekten	2014
1485	VSS 2007/401	Anforderungen an Anschlussfugensysteme in Asphaltdecken - Teil 1: Praxiserfahrung	2014
1484	FGU 2010/003	Misestimating time of collision in the tunnel entrance due to a disturbed adaptation	2014
1483	VSS 2005/452	Forschungspaket Recycling von Ausbausphalt in Heissmischgut: EP1: Optimaler Anteil an Ausbausphalt	2014
1482	ASTRA 2010/018	SURPRICE: Sustainable mobility through road user charges Swiss contribution: Comprehensive road user charging (RUC)	2015
1481	VSS 2001/702	Application des méthodes de représentation aux données routières	2014
1480	ASTRA 2008/004	Prozess- und wirkungsorientiertes Management im betrieblichen Strassenunterhalt Modell eines siedlungsübergreifenden Unterhalts	2014
1479	ASTRA 2005/004	Entscheidungsgrundlagen & Empfehlungen für ein nachhaltiges Baustoffmanagement	2014
1478	VSS 2005/455	Research Package on Recycling of Reclaimed Asphalt in Hot Mixes - EP4: Evaluation of Durability	2014
1477	VSS 2008/503	Feldversuch mit verschiedenen Pflästerungen und Plattendecken	2014
1476	VSS 2011/202	Projet initial pour la conception multi-usagers des carrefours	2014
1475	VSS 1999/125	Ringversuch "Eindringtiefe eines ebenen Stempels, statische Prüfung an Gussasphalt"	2014
1474	VSS 2009/704	Wechselwirkung zwischen Aufgrabungen, Zustand und Alterungsverhalten im kommunalen Strassennetz-Entwicklung eines nachhaltigen Aufgrabungsmanagement	2014
1473	VSS 2011/401	Forschungspaket "POLIGRIP - Einfluss der Polierbarkeit von Gesteinskörnungen auf die Griffigkeit von Deckschichten - Initialprojekt"	2014
1472	SVI 2010/003	Einfluss der Verlässlichkeit der Verkehrssysteme auf das Verkehrsverhalten	2014
1471	ASTRA 2008/011	Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr Forschungspaket UVEK/ASTRA - Synthese	2014
1470	VSS 2011/907	Initialprojekt für ein Forschungspaket "Kooperative Systeme für Fahrzeug und Strasse"	2014
1469	VSS 2008/902	Untersuchungen zum Einsatz von Bewegungssensoren für fahrzeitbezogene Verkehrstelematik-Anwendungen	2014
1468	VSS 2010/503	Utilisation des géostructures énergétiques pour la régulation thermique et l'optimisation énergétique des infrastructures routières et ouvrages d'art	2014
1467	ASTRA 2010/021	Sekundärer Feinstaub vom Verkehr	2014
1466	VSS 2010/701	Grundlagen zur Revision der Normen über die visuelle Erhebung des Oberflächenzustands	2014
1465	ASTRA 2000/417	Erfahrungen mit der Sanierung und Erhaltung von Betonoberflächen	2014
1464	VSS 2002/403	Récupération de liants modifiés aux polymères issus d'échantillons d'enrobés	2014
1463	VSS 2006/511_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP1 – Standfester Gesamtaufbau, Prüfung und Bewertung	2014
1462	ASTRA 2011/004	Ermittlung der Versagensgrenze eines T2 Norm-Belages mit der mobiles Grossversuchsanlage MLS10	2014
1461	VSS 2001/506	Einfluss der Verdichtungstemperatur auf die Ergebnisse der Marshall-Prüfung und der Einbaukontrolle	2014
1460	SVI 2007/017	Nutzen der Verkehrsinformation für die Verkehrssicherheit	2014
1459	VSS 2002/501	Leichtes Fallgewichtsgesetz für die Verdichtungskontrolle von Foundationsschichten	2014
1458	VSS 2010/703	Umsetzung Erhaltungsmanagement für Strassen in Gemeinden - Arbeitshilfen als Anhang zur Norm 640 980	2014
1457	SVI 2012/006	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 5: Medizinische Folgen des Strassenunfallgeschehens	2014
1456	SVI 2012/005	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 4: Einflüsse des Wetters auf das Strassenunfallgeschehen	2014

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1455	SVI 2012/004	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 3: Einflüsse von Fahrzeugeigenschaften auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1454	SVI 2012/003	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 2: Einflüsse von Situation und Infrastruktur auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1453	SVI 2012/002	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 1: Einflüsse von Mensch und Gesellschaft auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1452	SVI 2012/001	Forschungspaket VeSPA: Synthesebericht Phase 1	2014
1451	FGU 2010/006	Gasanalytik zur frühzeitigen Branddetektion in Tunneln	2013
1450	VSS 2002/401	Kaltrecycling von Ausbausphal mit bituminösen Bindemitteln	2014
1449	ASTRA 2010/024	E-Scooter - Sozial- und naturwissenschaftliche Beiträge zur Förderung leichter Elektrofahrzeuge in der Schweiz	2013
1448	SVI 2009/008	Anforderungen der Güterlogistik an die Netzinfrastruktur und die langfristige Netzentwicklung in der Schweiz. Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt C	2014
1447	SVI 2009/005	Informationstechnologien in der zukünftigen Gütertransportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt E	2013
1446	VSS 2005/454	Forschungspaket Recycling von Ausbausphal in Heissmischgut: EP3: Stofffluss- und Nachhaltigkeitsbeurteilung	2013
1445	VSS 2009/301	Öffnung der Busstreifen für weitere Verkehrsteilnehmende	2013
1444	VSS 2007/306	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von Anlagen des leichten Zweirad- und des Fussgängerverkehrs	2013
1443	VSS 2007/305	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit des strassengebundenen ÖV	2013
1442	SVI 2010/004	Messen des Nutzens von Massnahmen mit Auswirkungen auf den Langsamverkehr - Vorstudie	2013
1441_2	SVI 2009/010	Zielsystem im Güterverkehr. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz - Teilprojekt G	2013
1441_1	SVI 2009/010	Effizienzsteigerungspotenziale in der Transportwirtschaft durch integrierte Bewirtschaftungsinstrumente aus Sicht der Infrastrukturbetreiber Synthese der Teilprojekte B3, C, D, E und F des Forschungspakets Güterverkehr anhand eines Zielsystems für den Güterverkehr	2013
1440	SVI 2009/006	Benchmarking-Ansätze im Verkehrswesen	2013
1439	SVI 2009/002	Konzept zur effizienten Erfassung und Analyse der Güterverkehrsdaten Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz von Verkehrsmitteln im Güterverkehr der Schweiz TP A	2013
1438_2	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 2. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1438_1	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 1. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1437	VSS 2008/203	Trottoirüberfahrten und punktuelle Querungen ohne Vortritt für den Langsamverkehr	2013
1436	VSS 2010/401	Auswirkungen verschiedener Recyclinganteile in ungebundenen Gemischen	2013
1435	FGU 2008/007_OBF	Schadstoff- und Rauchkurzschlüsse bei Strassentunneln	2013
1434	VSS 2006/503	Performance Oriented Requirements for Bituminous Mixtures	2013
1433	ASTRA 2010/001	Güterverkehr mit Lieferwagen: Entwicklungen und Massnahmen Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B3	2013
1432	ASTRA 2007/011	Praxis-Kalibrierung der neuen mobilen Grossversuchsanlage MLS10 für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen in der Schweiz	2013
1431	ASTRA 2011/015	TeVeNOx - Testing of SCR-Systems on HD-Vehicles	2013

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1430	ASTRA 2009/004	Impact des conditions météorologiques extrêmes sur la chaussée	2013
1429	SVI 2009/009	Einschätzungen der Infrastrukturnutzer zur Weiterentwicklung des Regulativs Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP F	2013
1428	SVI 2010/005	Branchenspezifische Logistikkonzepte und Güterverkehrsaufkommen sowie deren Trends Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B2	2013
1427	SVI 2006/002	Begegnungszonen - eine Werkschau mit Empfehlungen für die Realisierung	2013
1426	ASTRA 2010/025_OBF	Luftströmungsmessung in Strassentunneln	2013
1425	VSS 2005/401	Résistance à l'altération des granulats et des roches	2013
1424	ASTRA 2006/007	Optimierung der Baustellenplanung an Autobahnen	2013
1423	ASTRA 2010/012	Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts EP3: Betrieb und Unterhalt lärmarter Beläge	2013
1422	ASTRA 2011/006_OBF	Fracture processes and in-situ fracture observations in Gipskeuper	2013
1421	VSS 2009/901	Experimenteller Nachweis des vorgeschlagenen Raum- und Topologiemodells für die VM-Anwendungen in der Schweiz (MDATrafo)	2013
1420	SVI 2008/003	Projektierungsfreiräume bei Strassen und Plätzen	2013
1419	VSS 2001/452	Stabilität der Polymere beim Heisseinbau von PmB-haltigen Strassenbelägen	2013
1418	VSS 2008/402	Anforderungen an hydraulische Eigenschaften von Geokunststoffen	2012
1417	FGU 2009/002	Heat Exchanger Anchors for Thermo-active Tunnels	2013
1416	FGU 2010/001	Sulfatwiderstand von Beton: verbessertes Verfahren basierend auf der Prüfung nach SIA 262/1, Anhang D	2013
1415	VSS 2010/A01	Wissenslücken im Infrastrukturmanagementprozess "Strasse" im Siedlungsgebiet	2013
1414	VSS 2010/201	Passive Sicherheit von Tragkonstruktionen der Strassenausstattung	2013
1413	SVI 2009/003	Güterverkehrsintensive Branchen und Güterverkehrsströme in der Schweiz Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz Teilprojekt B1	2013
1412	ASTRA 2010/020	Werkzeug zur aktuellen Ganglinienorm	2013
1411	VSS 2009/902	Verkehrstelematik für die Unterstützung des Verkehrsmanagements in ausserordentlichen Lagen	2013
1410	VSS 2010/202_OBF	Reduktion von Unfallfolgen bei Bränden in Strassentunneln durch Abschnittsbildung	2013
1409	ASTRA 2010/017_OBF	Regelung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2013
1408	VSS 2000/434	Vieillissement thermique des enrobés bitumineux en laboratoire	2012
1407	ASTRA 2006/014	Fusion des indicateurs de sécurité routière : FUSAIN	2012
1406	ASTRA 2004/015	Amélioration du modèle de comportement individuel du Conducteur pour évaluer la sécurité d'un flux de trafic par simulation	2012
1405	ASTRA 2010/009	Potential von Photovoltaik an Schallschutzmassnahmen entlang der Nationalstrassen	2012
1404	VSS 2009/707	Validierung der Kosten-Nutzen-Bewertung von Fahrbahn-Erhaltungsmassnahmen	2012
1403	SVI 2007/018	Vernetzung von HLS- und HVS-Steuerungen	2012
1402	VSS 2008/403	Witterungsbeständigkeit und Durchdrückverhalten von Geokunststoffen	2012
1401	SVI 2006/003	Akzeptanz von Verkehrsmanagementmassnahmen-Vorstudie	2012
1400	VSS 2009/601	Begrünte Stützgitterböschungssysteme	2012
1399	VSS 2011/901	Erhöhung der Verkehrssicherheit durch Incentivierung	2012
1398	ASTRA 2010/019	Environmental Footprint of Heavy Vehicles Phase III: Comparison of Footprint and Heavy Vehicle Fee (LSVA) Criteria	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1397	FGU 2008/003_OBF	Brandschutz im Tunnel: Schutzziele und Brandbemessung Phase 1: Stand der Technik	2012
1396	VSS 1999/128	Einfluss des Umhüllungsgrades der Mineralstoffe auf die mechanischen Eigenschaften von Mischgut	2012
1395	FGU 2009/003	KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau	2012
1394	VSS 2010/102	Grundlagen Betriebskonzepte	2012
1393	VSS 2010/702	Aktualisierung SN 640 907, Kostengrundlage im Erhaltungsmanagement	2012
1392	ASTRA 2008/008_009	FEHRL Institutes WIM Initiative (Fiwi)	2012
1391	ASTRA 2011/003	Leitbild ITS-CH Landverkehr 2025/30	2012
1390	FGU 2008/004_OBF	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Belchentunnel	2012
1389	FGU 2003/002	Long Term Behaviour of the Swiss National Road Tunnels	2012
1388	SVI 2007/022	Möglichkeiten und Grenzen von elektronischen Busspuren	2012
1387	VSS 2010/205_OBF	Ablage der Prozessdaten bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1386	VSS 2006/204	Schallreflexionen an Kunstbauten im Strassenbereich	2012
1385	VSS 2004/703	Bases pour la révision des normes sur la mesure et l'évaluation de la planéité des chaussées	2012
1384	VSS 1999/249	Konzeptuelle Schnittstellen zwischen der Basisdatenbank und EMF-, EMK- und EMT-DB	2012
1383	FGU 2008/005	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel	2012
1382	VSS 2001/504	Optimierung der statischen Eindringtiefe zur Beurteilung von harten Gussasphaltsorten	2012
1381	SVI 2004/055	Nutzen von Reisezeiteinsparungen im Personenverkehr	2012
1380	ASTRA 2007/009	Wirkungsweise und Potential von kombinierter Mobilität	2012
1379	VSS 2010/206_OBF	Harmonisierung der Abläufe und Benutzeroberflächen bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1378	SVI 2004/053	Mehr Sicherheit dank Kernfahrbahnen?	2012
1377	VSS 2009/302	Verkehrssicherheitsbeurteilung bestehender Verkehrsanlagen (Road Safety Inspection)	2012
1376	ASTRA 2011/008_004	Erfahrungen im Schweizer Betonbrückenbau	2012
1375	VSS 2008/304	Dynamische Signalisierungen auf Hauptverkehrsstrassen	2012
1374	FGU 2004/003	Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens für Schweissnähte von KDB	2012
1373	VSS 2008/204	Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung	2012
1372	SVI 2011/001	Verkehrssicherheitsgewinne aus Erkenntnissen aus Datapooling und strukturierten Datenanalysen	2012
1371	ASTRA 2008/017	Potenzial von Fahrgemeinschaften	2011
1370	VSS 2008/404	Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahnen aus Betongranulat	2011
1369	VSS 2003/204	Rétention et traitement des eaux de chaussée	2012
1368	FGU 2008/002	Soll sich der Mensch dem Tunnel anpassen oder der Tunnel dem Menschen?	2011
1367	VSS 2005/801	Grundlagen betreffend Projektierung, Bau und Nachhaltigkeit von Anschlussgleisen	2011
1366	VSS 2005/702	Überprüfung des Bewertungshintergrundes zur Beurteilung der Strassengriffigkeit	2010
1365	SVI 2004/014	Neue Erkenntnisse zum Mobilitätsverhalten dank Data Mining?	2011
1364	SVI 2009/004	Regulierung des Güterverkehrs Auswirkungen auf die Transportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP D	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1363	VSS 2007/905	Verkehrsprognosen mit Online -Daten	2011
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung	2012
1360	VSS 2010/203	Akustische Führung im Strassentunnel	2012
1359	SVI 2004/003	Wissens- und Technologietransfer im Verkehrsbereich	2012
1358	SVI 2004/079	Verkehrsanbindung von Freizeitanlagen	2012
1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer?	2012
1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen	2011
1355	FGU 2007/002	Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhang D: Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis	2011
1354	VSS 2003/203	Anordnung, Gestaltung und Ausführung von Treppen, Rampen und Treppenwegen	2011
1353	VSS 2000/368	Grundlagen für den Fussverkehr	2011
1352	VSS 2008/302	Fussgängerstreifen (Grundlagen)	2011
1351	ASTRA 2009/001	Development of a best practice methodology for risk assessment in road tunnels	2011
1350	VSS 2007/904	IT-Security im Bereich Verkehrstelematik	2011
1349	VSS 2003/205	In-Situ-Abflussversuche zur Untersuchung der Entwässerung von Autobahnen	2011
1348	VSS 2008/801	Sicherheit bei Parallelführung und Zusammentreffen von Strassen mit der Schiene	2011
1347	VSS 2000/455	Leistungsfähigkeit von Parkieranlagen	2010
1346	ASTRA 2007/004	Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen bei Strassentunneln mit konzentrierter Rauchabsaugung	2010
1345	SVI 2004/039	Einsatzbereiche verschiedener Verkehrsmittel in Agglomerationen	2011
1344	VSS 2009/709	Initialprojekt für das Forschungspaket "Nutzensteigerung für die Anwender des SIS"	2011
1343	VSS 2009/903	Basistechnologien für die intermodale Nutzungserfassung im Personenverkehr	2011
1342	FGU 2005/003	Untersuchungen zur Frostkörperbildung und Frosthebung beim Gefrierverfahren	2010
1341	FGU 2007/005	Design aids for the planning of TBM drives in squeezing ground	2011
1340	SVI 2004/051	Aggressionen im Verkehr	2011
1339	SVI 2005/001	Widerstandsfunktionen für Innerorts-Strassenabschnitte ausserhalb des Einflussbereiches von Knoten	2010
1338	VSS 2006/902	Wirkungsmodelle für fahrzeugseitige Einrichtungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit	2009
1337	ASTRA 2006/015	Development of urban network travel time estimation methodology	2011
1336	ASTRA 2007/006	SPIN-ALP: Scanning the Potential of Intermodal Transport on Alpine Corridors	2010
1335	VSS 2007/502	Stripping bei lärmindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im Labormassstab	2011
1334	ASTRA 2009/009	Was treibt uns an? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen	2011
1333	SVI 2007/001	Standards für die Mobilitätsversorgung im peripheren Raum	2011
1332	VSS 2006/905	Standardisierte Verkehrsdaten für das verkehrsträgerübergreifende Verkehrsmanagement	2011
1331	VSS 2005/501	Rückrechnung im Strassenbau	2011
1330	FGU 2008/006	Energiegewinnung aus städtischen Tunneln: Systemevaluation	2010
1329	SVI 2004/073	Alternativen zu Fussgängerstreifen in Tempo-30-Zonen	2010
1328	VSS 2005/302	Grundlagen zur Quantifizierung der Auswirkungen von Sicherheitsdefiziten	2011
1327	VSS 2006/601	Vorhersage von Frost und Nebel für Strassen	2010
1326	VSS 2006/207	Erfolgskontrolle Fahrzeugrückhaltesysteme	2011

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1325	SVI 2000/557	Indices caractéristiques d'une cité-vélo. Méthode d'évaluation des politiques cyclables en 8 indices pour les petites et moyennes communes.	2010
1324	VSS 2004/702	Eigenheiten und Konsequenzen für die Erhaltung der Strassenverkehrsanlagen im überbauten Gebiet	2009
1323	VSS 2008/205	Ereignisdetektion im Strassentunnel	2011
1322	SVI 2005/007	Zeitwerte im Personenverkehr: Wahrnehmungs- und Distanzabhängigkeit	2008
1321	VSS 2008/501	Validation de l'oedomètre CRS sur des échantillons intacts	2010
1320	VSS 2007/303	Funktionale Anforderungen an Verkehrserfassungssysteme im Zusammenhang mit Lichtsignalanlagen	2010
1319	VSS 2000/467	Auswirkungen von Verkehrsberuhigungsmassnahmen auf die Lärmimmissionen	2010
1318	FGU 2006/001	Langzeitversuche an anhydritführenden Gesteinen	2010
1317	VSS 2000/469	Geometrisches Normalprofil für alle Fahrzeugtypen	2010
1316	VSS 2001/701	Objektorientierte Modellierung von Strasseninformationen	2010
1315	VSS 2006/904	Abstimmung zwischen individueller Verkehrsinformation und Verkehrsmanagement	2010
1314	VSS 2005/203	Datenbank für Verkehrsaufkommensraten	2008
1313	VSS 2001/201	Kosten-/Nutzenbetrachtung von Strassenentwässerungssystemen, Ökobilanzierung	2010
1312	SVI 2004/006	Der Verkehr aus Sicht der Kinder: Schulwege von Primarschulkindern in der Schweiz	2010
1311	VSS 2000/543	VIABILITE DES PROJETS ET DES INSTALLATIONS ANNEXES	2010
1310	ASTRA 2007/002	Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2010
1309	VSS 2008/303	Verkehrsregelungssysteme - Modernisierung von Lichtsignalanlagen	2010
1308	VSS 2008/201	Hindernisfreier Verkehrsraum - Anforderungen aus Sicht von Menschen mit Behinderung	2010
1307	ASTRA 2006/002	Entwicklung optimaler Mischgüter und Auswahl geeigneter Bindemittel; D-A-CH - Initialprojekt	2008
1306	ASTRA 2008/002	Strassenglätte-Prognosesystem (SGPS)	2010
1305	VSS 2000/457	Verkehrserzeugung durch Parkieranlagen	2009
1304	VSS 2004/716	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen	2008
1303	ASTRA 2009/010	Geschwindigkeiten in Steigungen und Gefällen; Überprüfung	2010
1302	VSS 1999/131	Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern des Belages?	2010
1301	SVI 2007/006	Optimierung der Strassenverkehrsunfallstatistik durch Berücksichtigung von Daten aus dem Gesundheitswesen	2009
1300	VSS 2003/903	SATELROU Perspectives et applications des méthodes de navigation pour la télématique des transports routiers et pour le système d'information de la route	2010
1299	VSS 2008/502	Projet initial - Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques	2009
1298	ASTRA 2007/012	Griffigkeit auf winterlichen Fahrbahnen	2010
1297	VSS 2007/702	Einsatz von Asphaltbewehrungen (Asphalteinlagen) im Erhaltungsmanagement	2009
1296	ASTRA 2007/008	Swiss contribution to the Heavy-Duty Particle Measurement Programme (HD-PMP)	2010
1295	VSS 2005/305	Entwurfsgrundlagen für Lichtsignalanlagen und Leitfaden	2010
1294	VSS 2007/405	Wiederhol- und Vergleichspräzision der Druckfestigkeit von Gesteinskörnungen am Haufwerk	2010
1293	VSS 2005/402	Détermination de la présence et de l'efficacité de dope dans les bétons bitumineux	2010
1292	ASTRA 2006/004	Entwicklung eines Pflanzenöl-Blockheizkraftwerkes mit eigener Ölmühle	2010

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1291	ASTRA 2009/005	Fahrmuster auf überlasteten Autobahnen Simultanes Berechnungsmodell für das Fahrverhalten auf Autobahnen als Grundlage für die Berechnung von Schadstoffemissionen und Fahrzeitgewinnen	2010
1290	VSS 1999/209	Conception et aménagement de passages inférieurs et supérieurs pour piétons et deux-roues légers	2008
1289	VSS 2005/505	Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen, nationale Umsetzung der EN	2010
1288	ASTRA 2006/020	Footprint II - Long Term Pavement Performance and Environmental Monitoring on A1	2010
1287	VSS 2008/301	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von komplexen ungesteuerten Knoten: Analytisches Schätzverfahren	2009
1286	VSS 2000/338	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit auf Strassen ohne Richtungstrennung	2010
1285	VSS 2002/202	In-situ Messung der akustischen Leistungsfähigkeit von Schallschirmen	2009
1284	VSS 2004/203	Evacuation des eaux de chaussée par les bas-cotés	2010
1283	VSS 2000/339	Grundlagen für eine differenzierte Bemessung von Verkehrsanlagen	2008
1282	VSS 2004/715	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Zusatzkosten infolge Vor- und Aufschub von Erhaltungsmaßnahmen	2010
1281	SVI 2004/002	Systematische Wirkungsanalysen von kleinen und mittleren Verkehrsvorhaben	2009
1280	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit Verkehrspsychologischer Teilbericht	2010
1279	VSS 2005/301	Leistungsfähigkeit zweistreifiger Kreisel	2009
1278	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit - Verkehrstechnischer Teilbericht	2009
1277	SVI 2007/005	Multimodale Verkehrsqualitätsstufen für den Strassenverkehr - Vorstudie	2010
1276	VSS 2006/201	Überprüfung der schweizerischen Ganglinien	2008
1275	ASTRA 2006/016	Dynamic Urban Origin - Destination Matrix - Estimation Methodology	2009
1274	SVI 2004/088	Einsatz von Simulationswerkzeugen in der Güterverkehrs- und Transportplanung	2009
1273	ASTRA 2008/006	UNTERHALT 2000 - Massnahme M17, FORSCHUNG: Dauerhafte Materialien und Verfahren SYNTHESE - BERICHT zum Gesamtprojekt "Dauerhafte Beläge" mit den Einzelnen Forschungsprojekten: - ASTRA 200/419: Verhaltensbilanz der Beläge auf Nationalstrassen - ASTRA 2000/420: Dauerhafte Komponenten auf der Basis erfolgreicher Strecken - ASTRA 2000/421: Durabilité des enrobés - ASTRA 2000/422: Dauerhafte Beläge, Rundlaufversuch - ASTRA 2000/423: Griffigkeit der Beläge auf Autobahnen, Vergleich zwischen den Messergebnissen von SRM und SCRIM - ASTRA 2008/005: Vergleichsstrecken mit unterschiedlichen oberen Tragschichten auf einer Nationalstrasse	2008
1272	VSS 2007/304	Verkehrsregelungssysteme - behinderte und ältere Menschen an Lichtsignalanlagen	2010
1271	VSS 2004/201	Unterhalt von Lärmschirmen	2009
1270	VSS 2005/502	Interaktion Strasse Hangstabilität: Monitoring und Rückwärtsrechnung	2009
1269	VSS 2005/201	Evaluation von Fahrzeugrückhaltesystemen im Mittelstreifen von Autobahnen	2009
1268	ASTRA 2005/007	PM10-Emissionsfaktoren von Abriebspartikeln des Strassenverkehrs (APART)	2009
1267	VSS 2007/902	MDA in SVT Einsatz modellbasierter Datentransfernormen (INTERLIS) in der Strassenverkehrstelematik	2009
1266	VSS 2000/343	Unfall- und Unfallkostenraten im Strassenverkehr	2009
1265	VSS 2005/701	Zusammenhang zwischen dielektrischen Eigenschaften und Zustandsmerkmalen von bitumenhaltigen Fahrbahnbelägen (Pilotuntersuchung)	2009
1264	SVI 2004/004	Verkehrspolitische Entscheidungsfindung in der Verkehrsplanung	2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1263	VSS 2001/503	Phénomène du dégel des sols gélifs dans les infrastructures des voies de communication et les pergélisols alpins	2006
1262	VSS 2003/503	Lärmverhalten von Deckschichten im Vergleich zu Gussasphalt mit strukturierter Oberfläche	2009
1261	ASTRA 2004/018	Pilotstudie zur Evaluation einer mobilen Grossversuchsanlage für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen	2009
1260	FGU 2005/001	Testeinsatz der Methodik "Indirekte Vorauserkundung von wasserführenden Zonen mittels Temperaturdaten anhand der Messdaten des Lötschberg-Basistunnels	2009
1259	VSS 2004/710	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Synthesebericht	2008
1258	VSS 2005/802	Kaphaltestellen Anforderungen und Auswirkungen	2009
1257	SVI 2004/057	Wie Strassenraumbilder den Verkehr beeinflussen Der Durchfahrtswiderstand als Arbeitsinstrument bei der städtebaulichen Gestaltung von Strassenräumen	2009
1256	VSS 2006/903	Qualitätsanforderungen an die digitale Videobild-Bearbeitung zur Verkehrsüberwachung	2009
1255	VSS 2006/901	Neue Methoden zur Erkennung und Durchsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit	2009
1254	VSS 2006/502	Drains verticaux préfabriqués thermiques pour la consolidation in-situ des sols	2009
1253	VSS 2001/203	Rétention des polluants des eaux de chaussées selon le système "infiltrations sur les talus". Vérification in situ et optimisation	2009
1252	SVI 2003/001	Nettoverkehr von verkehrsintensiven Einrichtungen (VE)	2009
1251	ASTRA 2002/405	Incidence des granulats arrondis ou partiellement arrondis sur les propriétés d'adhérence des bétons bitumineux	2008
1250	VSS 2005/202	Strassenabwasser Filterschacht	2007
1249	FGU 2003/004	Einflussfaktoren auf den Brandwiderstand von Betonkonstruktionen	2009
1248	VSS 2000/433	Dynamische Eindringtiefe zur Beurteilung von Gussasphalt	2008
1247	VSS 2000/348	Anforderungen an die strassenseitige Ausrüstung bei der Umwidmung von Standstreifen	2009
1246	VSS 2004/713	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Bedeutung Oberflächenzustand und Tragfähigkeit sowie gegenseitige Beziehung für Gebrauchs- und Substanzwert	2009
1245	VSS 2004/701	Verfahren zur Bestimmung des Erhaltungsbedarfs in kommunalen Strassennetzen	2009
1244	VSS 2004/714	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Gesamtnutzen und Nutzen-Kosten-Verhältnis von standardisierten Erhaltungsmassnahmen	2008
1243	VSS 2000/463	Kosten des betrieblichen Unterhalts von Strassenanlagen	2008
1242	VSS 2005/451	Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut	2007
1241	ASTRA 2001/052	Erhöhung der Aussagekraft des LCPC Spurbildungstests	2009
1240	ASTRA 2002/010	L'acceptabilité du péage de congestion : Résultats et analyse de l'enquête en Suisse	2009
1239	VSS 2000/450	Bemessungsgrundlagen für das Bewehren mit Geokunststoffen	2009
1238	VSS 2005/303	Verkehrssicherheit an Tagesbaustellen und bei Anschlüssen im Baustellenbereich von Hochleistungsstrassen	2008
1237	VSS 2007/903	Grundlagen für eCall in der Schweiz	2009
1236	ASTRA 2008/008_07	Analytische Gegenüberstellung der Strategie- und Tätigkeitsschwerpunkte ASTRA-AIPCR	2008
1235	VSS 2004/711	Forschungspaket Massnahmenplanung im EM von Fahrbahnen - Standardisierte Erhaltungsmassnahmen	2008
1234	VSS 2006/504	Expérimentation in situ du nouveau drainomètre européen	2008

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1233	ASTRA 2000/420	Unterhalt 2000 Forschungsprojekt FP2 Dauerhafte Komponenten bitumenhaltiger Belagsschichten	2009
676	AGB 2011/002	Modelling the corrosion initiation of reinforced concrete exposed to deicing salts	2016
674	AGB 2010/006	Einfluss des Asphaltbelages auf die Dynamik von Fussgängerbrücken aus Beton und Stahl	2015
673	AGB 2006/017	Dynamic structural capacity of reinforced concrete slabs due to rockfall	2015
671	AGB 2009/008	Résistance à l'effort tranchant de dalles de roulement sous actions statiques et de fatigue	2015
670	AGB 2012/013	Optimierung und Validierung von Verfahren zur Bestimmung der Korrosionsgeschwindigkeit in Stahlbeton	2015
669	AGB 2008/007	Zentrale Dokumentation der mechanischen Eigenschaften alter Bewehrungen	2015
668	AGB 2009/004_OBF	Multifunktionaler Hochleistungsoberflächenschutz für Kunstbauten	2015
667	AGB 2008/004	Résistance au déversement des poutres métalliques de pont	2015
666	AGB 2012/015	Structural Identification for Condition Assessment of Swiss Bridges	2015
665	AGB 2011/001	Wirksamkeit und Prüfung der Nachbehandlungsmethoden von Beton	2014
664	AGB 2009/005	Charges de trafic actualisées pour les dalles de roulement en béton des ponts existants	2014
663	AGB 2003/014	Seismic Safety of Existing Bridges	2014
662	AGB 2008/001	Seismic Safety of Existing Bridges - Cyclic Inelastic Behaviour of Bridge Piers	2014
661	AGB 2010/002	Fatigue limit state of shear studs in steel-concrete composite road bridges	2014
660	AGB 2008/002	Indirekt gelagerte Betonbrücken - Sachstandsbericht	2014
659	AGB 2009/014	Suizidprävention bei Brücken: Follow-Up	2014
658	AGB 2006/015_OBF	Querkraftwiderstand vorgespannter Brücken mit ungenügender Querkraftbewehrung	2014
657	AGB 2003/012	Brücken in Holz: Möglichkeiten und Grenzen	2013
656	AGB 2009/015	Experimental verification of integral bridge abutments	2013
655	AGB 2007/004	Fatigue Life Assessment of Roadway Bridges Based on Actual Traffic Loads	2013
654	AGB 2005-008	Thermophysical and Thermomechanical Behavior of Cold-Curing Structural Adhesives in Bridge Construction	2013
653	AGB 2007/002	Poinçonnement des pontsdalles précontraints	2013
652	AGB 2009/006	Detektion von Betonstahlbrüchen mit der magnetischen Streufeldmethode	2013
651	AGB 2006/006_OBF	Instandsetzung und Monitoring von AAR-geschädigten Stützmauern und Brücken	2013
650	AGB 2005/010	Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Betonstählen	2012
649	AGB 2008/012	Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen	2012
648	AGB 2005/023 + AGB 2006/003	Validierung der AAR-Prüfungen für Neubau und Instandsetzung	2011
647	AGB 2004/010	Quality Control and Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons in bridges	2011
646	AGB 2005/018	Interactin sol-structure : ponts à culées intégrales	2010
645	AGB 2005/021	Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton aus Betongranulat	2010
644	AGB 2005/004	Hochleistungsfähiger Faserfeinkornbeton zur Effizienzsteigerung bei der Erhaltung von Kunstbauten aus Stahlbeton	2010
643	AGB 2005/014	Akustische Überwachung einer stark geschädigten Spannbetonbrücke und Zustandserfassung beim Abbruch	2010
642	AGB 2002/006	Verbund von Spanngliedern	2009
641	AGB 2007/007	Empfehlungen zur Qualitätskontrolle von Beton mit Luftpermeabilitätsmessungen	2009
640	AGB 2003/011	Nouvelle méthode de vérification des ponts mixtes à âme pleine	2010

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
639	AGB 2008/003	RiskNow-Falling Rocks Excel-basiertes Werkzeug zur Risikoermittlung bei Steinschlagschutzgalerien	2010
638	AGB2003/003	Ursachen der Rissbildung in Stahlbetonbauwerken aus Hochleistungsbeton und neue Wege zu deren Vermeidung	2008
637	AGB 2005/009	Détermination de la présence de chlorures à l'aide du Géoradar	2009
636	AGB 2002/028	Dimensionnement et vérification des dalles de roulement de ponts routiers	2009
635	AGB 2004/002	Applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales	2008
634	AGB 2002/007	Untersuchungen zur Potenzialfeldmessung an Stahlbetonbauten	2008
633	AGB 2002/014	Oberflächenschutzsysteme für Betontragwerke	2008
632	AGB 2008/201	Sicherheit des Verkehrssystem Strasse und dessen Kunstbauten Testregion - Methoden zur Risikobeurteilung Schlussbericht	2010
631	AGB 2000/555	Applications structurales du Béton Fibré à Ultra-hautes Performances aux ponts	2008
630	AGB 2002/016	Korrosionsinhibitoren für die Instandsetzung chloridverseuchter Stahlbetonbauten	2010
629	AGB 2003/001 + AGB 2005/019	Integrale Brücken - Sachstandsbericht	2008
628	AGB 2005/026	Massnahmen gegen chlorid-induzierte Korrosion und zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit	2008
627	AGB 2002/002	Eigenschaften von normalbreiten und überbreiten Fahrbahnübergängen aus Polymerbitumen nach starker Verkehrsbelastung	2008
626	AGB 2005/110	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Baustellensicherheit bei Kunstbauten	2009
625	AGB 2005/109	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen bei Kunstbauten	2009
624	AGB 2005/108	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Risikobeurteilung für Kunstbauten	2010
623	AGB 2005/107	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Tragsicherheit der bestehenden Kunstbauten	2009
622	AGB 2005/106	Rechtliche Aspekte eines risiko- und effizienzbasierten Sicherheitskonzepts	2009
621	AGB 2005/105	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Szenarien der Gefahrenentwicklung	2009
620	AGB 2005/104	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen	2009
619	AGB 2005/103	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Ermittlung des Netzrisikos	2010
618	AGB 2005/102	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung	2009
617	AGB 2005/100	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Synthesebericht	2010
616	AGB 2002/020	Beurteilung von Risiken und Kriterien zur Festlegung akzeptierter Risiken in Folge aussergewöhnlicher Einwirkungen bei Kunstbauten	2009