

Vermeidung chloridinduzierter Korrosion in Tunnelinnenschalen aus Stahlbeton

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 173

bast

Vermeidung chloridinduzierter Korrosion in Tunnelinnenschalen aus Stahlbeton

von

Matthias Rudolph
Marko Orgass
Jana Schneider
Heiko Lorenz
Stephan Reichel
Jörg Schmidt

MFPA Leipzig GmbH
Leipzig

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 173

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 15.0603:
Vermeidung chloridinduzierter Korrosion
in Tunnelinnenschalen aus Stahlbeton

Fachbetreuung

Mike Rammelt
Tim Hochstein

Fachreferat

Tunnel- und Grundbau, Tunnelbetrieb, Zivile Sicherheit

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion

Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-95606-644-3

Bergisch Gladbach, November 2021

Kurzfassung – Abstract

Vermeidung chloridinduzierter Korrosion in Tunnelinnenschalen aus Stahlbeton

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollten auf der Basis bekannter Zusammenhänge sowie ergänzend durchzuführender Untersuchungen vor Ort und im Labor Grundlagen zur Abschätzung der Chlorideindringung in Tunnelinnenschalenbeton geschaffen werden. Hierfür standen Fragebögen zu Chloridbelastungen in Straßentunneln zur Verfügung.

Im Ergebnis der 2013 initiierten Länderabfrage gingen Rückmeldungen zu insgesamt 53 Bauwerken ein, was etwa 13 % des gesamten Straßentunnelbestandes entspricht. Als ein wesentliches Ergebnis der Länderabfrage ist festzustellen, dass in allen untersuchten Tunneln auch Chloride nachgewiesen wurden.

Zum Studium von Materialeigenschaften, die für das Eindringen und die Ausbreitung von Chloriden maßgebend sind, wurden eigene Laborprüfkörper hergestellt. Außerdem wurden Untersuchungen an drei bayrischen Tunnelbauwerken durchgeführt. Zur Untersuchung wurden grundsätzlich in jedem Tunnel mindestens 2 Blöcke ausgewählt.

Als Grundlage für die Modellierung der Chlorid-Eindringvorgänge wurde ein semi-probabilistischer Ansatz gewählt. Das Ziel der hier ausgeführten Berechnungen bestand nicht in der Dauerhaftigkeitsbemessung neu zu errichtender Bauteile, sondern in der Prognose der weiteren Entwicklung des Chloridgehaltes in einem bestehenden Bauwerk, für das Chloridprofile aus Bauwerksuntersuchungen vorliegen.

Im Ergebnis der semi-probabilistischen Modellierung der Chlorid-Eindringvorgänge konnte eine praktikable Prognose für einen wählbaren Zeitraum erstellt werden und mit den auf Basis der experimentell ermittelten Chloridprofile validiert werden.

Mit den Erkenntnissen des Forschungsvorhabens bzw. mit der darin beschriebenen Herangehensweise ist es möglich, Bestands-Tunnelbauwerk hinsichtlich der Gefahr einer chloridinduzierten Korrosion zu charakterisieren und eine Prognose für den tiefen- und zeitabhängigen Chloridgehalt im Beton für die geplante (Rest-) Nutzungsdauer abzuschätzen.

Preventing chloride-induced corrosion in final tunnel linings made of reinforced concrete

In the research project, the basics for an assessment of the chloride penetration in the concrete of the final lining of tunnels were to be defined based on known correlations and additional analyses on site and in the laboratory. For the project, questionnaires on the chloride contamination of road tunnels were available.

As a result of the survey in the German federal states which was initiated in 2013, responses were received for 53 structures in total which corresponds to approximately 13% of the entire number of road tunnels. As a main result of the survey in the German federal states, that chlorides were found in all examined tunnels.

To study the material properties which are decisive for the penetration and spreading of chlorides, individual laboratory test specimens were produced. In addition, three Bavarian tunnel structures were examined. For the analysis at least 2 blocks were selected in each tunnel.

A semi-probabilistic approach was used as a basis for the modelling of chloride penetration processes. The goal of the calculations which were performed in this case was not to measure the durability of parts which are to be newly constructed but to forecast the further development of the chloride content in an existing structure for which chloride profiles from structure analyses are available.

As a result of the semi-probabilistic modelling of chloride penetration processes, it was possible to create a practicable forecast for a selectable period which could be validated based on the chloride profiles determined in experiments.

Based on the insights gained in the research project and/or the approach which is described here, it is possible to characterise existing tunnel structures regarding the hazard of chloride-induced corrosion and to forecast for the depth- and time-dependent chloride content in the concrete for the planned (residual) operating life.

Summary

Preventing chloride-induced corrosion in final tunnel linings made of reinforced concrete

In the research project, the basics for an assessment of the chloride penetration in the concrete of the final lining of tunnels were to be defined based on known correlations and additional analyses on site and in the laboratory. As a result, a concept was to be created with the help of which targeted tests regarding the penetration of chloride ions in concrete can be performed.

For the project, questionnaires on the chloride contamination of road tunnels were available. These questionnaires were filled out by the competent bridge experts of the German federal states as part of a survey which was initiated by the Federal Ministry of Transport, Building and Urban Development (BMVBS) and the Federal Highway Research Institute BAST in 2013. According to the information of the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure (BMVI) in (BMVI, 2018), 260 road tunnels were in operation on German highways in 2016. In total, there were approximately 400 road tunnels if country roads, district roads and city streets are taken into account.

In the survey in the German federal states, the following information was requested for each structure:

- tunnel name,
- tunnel length,
- tunnel cross-section,
- height of the tunnel above sea level,
- orientation of the tunnel portal (cardinal direction),
- street type,
- year of commissioning,
- type of tunnel wall surface,
- concrete recipe of the final lining, if applicable separately for the portal section and the interior,
- inclination of the road in areas with high chloride contamination,
- height profile in areas with high chloride contamination,
- average chloride content in the concrete depending on the depth,
- affected total surface,
- condition of the final lining with regard to the existing corrosion of the reinforcement,
- information on the use of road grit: Is the road gritted inside the tunnel? Which gritting material is used? Approx. number of days on which grit is used / year.

The available data from the responses were initially summarised and systemised as far as possible. Subsequently, Bavaria was used as an example to try to find correlations between chloride

contamination and quantitative parameters taking into account the test results, which were available in addition to the questionnaires, as well as structure logbooks.

As a result of the survey in the German federal states which was initiated in 2013, responses were received for 53 structures in total which corresponds to approximately 13% of the entire number of road tunnels. 22 of these 53 tunnels were evidently contaminated with chlorides. This, however, does not mean by implication that the rest of the structures is not contaminated. It only means that no findings were available for these tunnels. In the survey in the German federal states, the main reason which was stated for this was that there was no damage.

As a main result of the survey in the German federal states, it is to be noted first and foremost that chlorides were found in all examined tunnels. The traffic density tends to have an influence on the level of chloride contamination. Grit use, however, also plays a role. Mainly sodium chloride (NaCl) as a salt and/or brine is used as grit material. Other de-icing products are calcium chloride (CaCl₂), magnesium chloride (MgCl₂) and potassium chloride (KCl). Which de-icing product is used depends on various conditions (e.g. temperature).

The road type (state road, highway) did not have a direct influence on chloride contamination. The construction method (underground or open method) does not seem to have an influence on chloride contamination either. The contour, however, which is linked to the construction method has an influence on the chloride distribution in the tunnel. With tunnels in open construction, it was observed, for example, that there was only a slight decrease in the chloride content with increasing height. In addition, in some cases there was hardly any difference between the chloride samples at the exterior wall (traffic lane) and interior wall (fast lane).

A qualitative influence of the age of the structure on chloride contamination (contaminated / not contaminated) was not found since no negative results (analyses in which no chlorides were found in the samples) are available. Initially, the age of the structure did not have an influence on the level of chloride content either. In the Bavarian tunnels which were analysed in more detail, however, it was found that the chloride content at greater depths (40-60 mm) tends to increase over the years. Considering the time-dependent nature of the transport processes this is to be expected.

In the analysed tunnels, chlorides were found over the entire length of the structure. At the centre of the tunnel, concentrations of a similar level as in the entry area were found. The highest concentrations were generally found in the first third of the tunnel. It must be taken into account that the sampling points were usually the closest together in this area.

To study the material properties which are decisive for the penetration and spreading of chlorides, individual laboratory test specimens were produced. To do this, four concrete blocks were manufactured using two different types of cement. Typical concrete recipes for final linings of tunnels were used for the open and closed construction method in accordance with ZTV-ING. By varying the w/z values, two specimens per type of cement were concreted with different porosity properties. Using sampled drill cores, the depth-dependent chloride content for three exposure periods, the chloride migration resistance and the chloride diffusion were determined.

In addition, three Bavarian tunnel structures were examined. The selected tunnel structures differ regarding characteristics which are relevant for chloride-induced corrosion. The main distinguishing features were the age of the structure, the construction method, the type of cement and, if applicable, additives used. For the analysis at least 2 blocks were selected in each tunnel. One block was supposed to be near the tunnel entry, if possible, the second block to be analysed was

to be located at least 250 m towards the tunnel centre in the direction of traffic. In addition, the location of the sampling points of previous examinations were to be taken into account so that comparisons would be possible, if required. Further limitations regarding the selection were due to noise protection claddings, installations and equipment, emergency call niches and similar at the tunnel wall. In addition, structures which were completely reconstructed or equipped with systems for cathodic corrosion protection were excluded from the selection of tunnels to be analysed. The highway tunnels Prüfening and Pfaffenstein as well as the tunnel Farchant in the course of state road B2 in Bavaria were analysed.

Since for a long time chloride-induced corrosion does not cause any externally noticeable damage – which was often stated as a reason for not having performed any tests yet in the survey of the German federal states – non-destructive testing was initially performed after the mandatory visual examination and the assessment of the surface of the final lining of the tunnel (examination for cracks, visible damage, coating, ...). In this connection, the corrosion potential was measured at the sampling points in various layers and the concrete cover was determined in a non-destructive manner in a line scan. The latter test is not directly connected to the penetration of chlorides; it is, however, relevant for the assessment of the results of the potential measurements.

Furthermore, the electric conductivity of the concrete and the capillary water absorption were determined in grid-shaped arrays. Both factors are directly connected to the penetration of chloride ions in the concrete and/or to steel corrosion.

A main factor for the penetration of chlorides is the concrete and/or its composition. To determine the quality of the cover concrete, the air permeability of the tunnel surface was therefore measured in several places.

The results of the analysed alternative test procedures to assess the chloride penetration do not correlate sufficiently with the results of the direct analysis of the chloride content. It must be taken into account, however, that no significant corrosion phenomena were detectable as a reference. Primarily, the creation of chloride profiles in combination with the measurement of the concrete cover is worth considering. Using potential mapping, areas with active corrosion can be identified.

The samples for the measurement of the chloride content in the concrete were taken as drill dust for practicability. Depth-dependent increments up to 60 mm were used. The depth range from 0 to 5 mm, however, was not taken into account for the further modelling of the chloride penetration. The lowest sampling point was 25 cm above the road / emergency walkway. Further sampling points were at a height of 1.50 m and 2.50 m. The samples were analysed in accordance with the specification of the DAfStb brochure 401.

In addition to the experimental testing, a literature review was performed for forecasts of the expected chloride penetration. The literature review proved that many different models exist which are mainly based on the assumption that diffusion processes are the main mechanism for the chloride transport into the part. For the forecast of the temporal sequence of chloride penetration and for the assessment of the durability of the structure which is based on this forecast, numerous models and calculation methods have been developed. The research report provides an overview of the most relevant models for tunnel structures. A semi-probabilistic approach was used as a basis for the modelling of chloride penetration processes. The goal of the calculations which were performed in this case was not to measure the durability of parts which are to be newly constructed but to forecast the further development of the chloride content in an existing structure for which chloride profiles from structure analyses are available. The calculations are based on the engineering model from the International Federation for Structural Concrete, 2006. The required

curve fitting for a realistic forecast is realised in a spreadsheet by repeatedly using the MS Excel solver. In formulas, the parameters $C_{s,\Delta x}$ and $D_{app}(t)$ are modified until the deviation from the determined chloride profile as a sum of the error squares reaches a minimum. To decrease the required calculation time, plausible limits are specified for both values. Curve fitting is only successful, i.e. provides useful results, if the chloride profile on which it is based basically corresponds to a diffusion curve. The sections of the chloride profile which are close to the surface (convection zone) have to be removed from the data which are used for the fitting if they do not correspond to Fick's 2nd law of diffusion. If the described correlations and the chloride profiles which are directly determined at the structure are used, the forecast of the future chloride distribution depends on the available analysis values from the examinations of the structure. Since these vary significantly depending on the sampling point, it is not advisable in the authors' opinion to derive a forecast for a measuring point from the chloride distribution at this exact measuring point. It is more reasonable to use depth profiles of the chloride content which were averaged according to structure-related criteria to derive a uniform forecast for the included area.

As a result of the semi-probabilistic modelling of chloride penetration processes, it was possible to create a practicable forecast for a selectable period which could be validated based on the chloride profiles determined in experiments. Based on the forecast, further testing and, if required, repair measures can be planned. For standardisation, a data pool should be created in which chloride profiles which are standardised regarding the sampling method and sampling points as well as the detection method of chloride ions are available for all tunnel structures with a final lining made of reinforced concrete. For the sampling and testing in the course of chloride analyses, a guideline should be included in ZTV-ING.

Furthermore, structure-specific data (type of cement, traffic load, days with grit use, geographic elevation, age of the structure) should be recorded and assessed.

If the chloride content comes close to the critical value of 0.5 M-% of chloride at the depth of the reinforcement in relation to the binder content of the concrete, an extensive measurement of the corrosion potentials in the affected blocks is recommended. At conspicuous locations, in particular in areas with high potential gradients, the reinforcement should be uncovered, and its corrosion condition should be assessed. One repetition of the determination of the chloride content at larger intervals is recommended to verify the chloride migration forecast. As a time interval, 6 to 12 years is recommended in connection with the main inspections.

Based on the insights gained in the research project and/or the approach which is described here, it is possible to characterise existing tunnel structures regarding the hazard of chloride-induced corrosion and to forecast for the depth- and time-dependent chloride content in the concrete for the planned (residual) operating life.

Inhalt

1	Einleitung	13
1.1	Ausgangssituation	13
1.2	Zielstellung	13
1.3	Methodik des Vorgehens	13
1.3.1	Stand des Wissens	13
1.3.2	Bauwerksuntersuchungen	13
1.3.3	Laboruntersuchungen	14
1.3.4	Auswertung	14
2	Stand des Wissens	14
2.1	Chlorideintrag durch Tausalz	14
2.2	Normative Anforderungen	15
2.3	Korrosion durch Chloride	16
2.4	Transportmechanismen	17
2.5	Modelle für den Chlorideintrag	18
2.5.1	Allgemeines	18
2.5.2	Ausgewählte Chlorideindringmodelle	19
2.5.3	Vergleich wesentlicher Modelle	37
2.5.4	Internationale Ansätze	39
3	Anforderungen an Innenschalenbeton	43
3.1	Allgemeines	43
4	Länderabfrage	44
4.1	Allgemeines	44
4.2	Erfassung der Daten	45
4.3	Tunnel mit Chloridbelastung	51
4.3.1	Qualitative Analyse	51
4.3.2	Quantitative Analyse	55
4.4	Tunnel Bayern	61
4.4.1	Allgemeines	61
4.4.2	BY1 – Tunnel Pfaffenstein	63
4.4.3	BY2 – Tunnel Prüfening	68

4.4.4	BY3 – Tunnel Farchant	70
4.4.5	BY4 – Tunnel Eching	75
4.4.6	BY5 – Tunnel Eттerschlag	81
4.4.7	BY6 – Tunnel Allach	86
4.4.8	Zusammenfassung (Bayern).....	88
4.5	Zusammenfassung zur Länderabfrage.....	94
4.6	Schlussfolgerungen für eigene Untersuchungen.....	96
5	Eigene experimentelle Untersuchungen.....	97
5.1	Visuelle Feststellungen	97
5.2	Chloridgehalt des Betons	97
5.3	Betondeckungsmessung.....	98
5.4	Potentialfeldmessungen.....	98
5.5	Leitfähigkeitsmessung	100
5.6	Permeabilitätsmessung.....	101
5.7	Wasseraufnahme.....	102
5.8	Korrosionszustand der Bewehrung	102
5.9	Chlorid-Migration	102
6	Laborprüfkörper	102
6.1	Allgemeines	102
6.2	Betone	102
6.3	Herstellung	103
6.4	Probenahme	103
6.5	Chlorid-Migrationskoeffizient.....	104
6.6	Wasseraufnahme.....	105
6.7	Luftpermeabilität	106
6.8	Leitfähigkeit	107
7	Untersuchungen an Tunnelbauwerken.....	107
7.1	Auswahl.....	107
7.2	Tunnel Farchant.....	108
7.2.1	Visuelle Feststellungen	108
7.2.2	Chloridgehalt des Betons.....	109
7.2.3	Betondeckungsmessung.....	109
7.2.4	Potentialfeldmessungen.....	110

7.2.5	Leitfähigkeitsmessung	110
7.2.6	Permeabilitätsmessung	110
7.2.7	Wasseraufnahme	111
7.2.8	Korrosionszustand der Bewehrung.....	111
7.2.9	Chlorid-Migrationskoeffizient	111
7.3	Tunnel Prüfening	111
7.3.1	Visuelle Feststellungen.....	111
7.3.2	Chloridgehalt des Betons	112
7.3.3	Betondeckungsmessung	112
7.3.4	Potentialfeldmessungen	112
7.3.5	Leitfähigkeitsmessung	112
7.3.6	Permeabilitätsmessung	113
7.3.7	Wasseraufnahme	113
7.3.8	Korrosionszustand der Bewehrung.....	113
7.3.9	Chlorid-Migrationskoeffizient	113
7.4	Tunnel Pfaffenstein	113
7.4.1	Visuelle Feststellungen.....	113
7.4.2	Chloridgehalt des Betons	114
7.4.3	Betondeckungsmessung	114
7.4.4	Potentialfeldmessungen	114
7.4.5	Leitfähigkeitsmessung	115
7.4.6	Permeabilitätsmessung	115
7.4.7	Wasseraufnahme	115
7.4.8	Korrosionszustand der Bewehrung.....	115
7.4.9	Chlorid-Migrationskoeffizient	115
7.5	Zeitliche Veränderung des Chloridgehaltes	115
8	Modellierung der Chloridmigration.....	116
8.1	Grundlagen	116
8.2	Semi-probabilistische Lösung.....	116
8.3	Verwendung bestehender Daten aus Bauwerksuntersuchungen.....	120
8.4	Ergebnisse der Prognose	120
8.4.1	Tunnel Prüfening	120
8.4.2	Tunnel Pfaffenstein	122

8.4.3	Tunnel Farchant.....	124
9	Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....	128
9.1	Empfehlungen zur Probenahme und Analyse	128
9.2	Zweckmäßiges Handeln der Verwaltung.....	129
9.2.1	Nutzung von Analyseverfahren	129
9.2.2	Empfehlung zur Beurteilung bestehender Tunnelbauwerke	136
9.3	Empfehlungen zur Fortschreibung der ZTV-ING	137
	Literatur	138
	Tabellen	144
	Bilder	145
	Anlagen	151

Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Um die Funktionsfähigkeit der Verkehrsinfrastruktur bei winterlichen Witterungsverhältnissen aufrecht zu erhalten, werden auch Tunnelbauwerke mit Hilfe von Taumitteln schnee- und eisfrei gehalten. Da als Taumittel überwiegend Natriumchlorid zum Einsatz kommt, gelangt im Tauwasser gelöstes Salz als Spritzwasser oder als Sprühnebel an die Bauteiloberfläche. Die Chloridionen aus der Tausalzlösung können dann über unterschiedliche Transportmechanismen in das Bauteil eindringen und – unter bestimmten Randbedingungen – bei Stahl- oder Spannbetonbauwerken Korrosion an der innenliegenden Bewehrung auslösen. Dies kann zu einer Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeit des Bauwerkes führen.

Tunnel stellen in diesem Kontext einen wesentlichen und kostenintensiven Teil der Verkehrsinfrastruktur dar. Ihre langfristige Nutzung kann dabei nur durch rechtzeitige und angemessene Instandhaltung und Instandsetzung gewährleistet werden.

1.2 Zielstellung

Das in Bearbeitung befindliche Vorhaben dient dem Ziel, chloridinduzierte Korrosion an Tunnelinnenschalen zu vermeiden oder zu minimieren.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollen auf der Basis bekannter Zusammenhänge sowie ergänzend durchzuführender Untersuchungen vor Ort und im Labor Grundlagen zur Abschätzung der Chlorideindringung in Tunnelinnenschalenbeton geschaffen werden.

Im Ergebnis soll ein Konzept erarbeitet werden, mit dessen Hilfe zielgerichtet Untersuchungen zum Eindringen von Chloridionen in Beton vorgenommen werden können. Für die Bewertung der Ergebnisse dieser Untersuchungen sollen Kriterien vorgeschlagen werden. Sofern erforderlich werden außerdem Hinweise zur Fortschreibung der Regelwerke gegeben.

1.3 Methodik des Vorgehens

Zur Bearbeitung des Forschungsvorhabens sollen die nachfolgend kurz dargestellten Untersuchungen durchgeführt werden. Die Arbeiten sind entsprechend der Aufgabenstellung des Forschungsvorhabens in aufeinander aufbauende Arbeitspakete gegliedert die sich in vier wesentlichen Teilen zusammenfassen lassen.

1.3.1 Stand des Wissens

Im ersten Teil wird der Stand des Wissens zusammengetragen. Dies beinhaltet neben einer Literaturrecherche zum nationalen und internationalen Kenntnisstand zur Chlorideindringung im Allgemeinen bzw. zur chloridinduzierten Korrosion auch die Erfassung und Auswertung der zur Verfügung stehenden Daten aus den Rückmeldungen zur Länderabfrage. In der Auswertung sollen insbesondere Merkmale herausgearbeitet werden, die aus der Literaturrecherche als Risikofaktoren im Hinblick auf das Eindringen von Chloriden zu sehen sind. Dadurch soll die Möglichkeit geschaffen werden, eine erste Risikobewertung für Schäden durch chloridinduzierte Korrosion auf der Grundlage vorhandener Bauwerksdaten vorzunehmen.

1.3.2 Bauwerksuntersuchungen

Im Rahmen des Forschungsprojektes werden an einzelnen Tunnelblöcken von insgesamt drei Bauwerken verschiedene Untersuchungen durchgeführt.

Im Sinne einer Voruntersuchung sollen dabei zunächst Verfahren angewendet werden, mit denen zerstörungsfrei bzw. -arm größere Flächen untersucht werden können. Neben der visuellen Beurteilung der Oberflächen zählen dazu unter anderem die Messung der Korrosionspotentiale sowie die Messung der Betondeckung und der Leitfähigkeit des Betons an der Oberfläche.

Nach Auswertung der Voruntersuchungen werden an exponierten Stellen weitere Untersuchungen durchgeführt bzw. Proben für die anschließenden Laboruntersuchungen genommen.

1.3.3 Laboruntersuchungen

Im dritten Teil des Vorhabens werden Laboruntersuchungen an aus den Bauwerken entnommenen Proben durchgeführt. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um folgende Prüfungen:

- Messung des Chloridmigrationskoeffizienten,
- Messung der Chloriddiffusion,
- Messung der kapillaren Eindringung,
- Bestimmung der Porosität,
- Bestimmung des Gesamtchloridgehaltes.

Parallel dazu erfolgen Laboruntersuchungen an gesondert hergestellten Proben. Dazu werden vier Betonblöcke unter Verwendung verschiedener, für Tunnelinnenschalen typischen, Rezepturen hergestellt. Aus den Blöcken werden anschließend Proben entnommen.

Im Ergebnis von Labor- und Bauwerksuntersuchungen werden Erkenntnisse zu den für Tunnelinnenschalen maßgebenden Transportmechanismen für Chloridionen im Beton sowie zu wesentlichen realen Einflüssen auf die Dauerhaftigkeit erwartet.

1.3.4 Auswertung

Basierend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Arbeitsschritte soll abschließend ein Konzept erarbeitet werden, das in Form eines Ablaufschemas Handlungsanweisungen zur Erfassung und Bewertung von Chlorideindringung (Ermittlung von Schädigungsgrad und -umfang) in Tunnelinnenschalen enthält. Das Konzept soll in die turnusmäßige Bauwerksprüfung nach SIB Bauwerke integrierbar sein.

Des Weiteren sollen für die Instandsetzung von chloridgeschädigten Tunnelinnenschalen passende Instandsetzungsmöglichkeiten in Abhängigkeit des Schädigungsgrades erarbeitet werden.

Letztlich sollen die Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben in Empfehlungen zur Fortschreibung des Regelwerkes umgesetzt werden.

2 Stand des Wissens

2.1 Chlorideintrag durch Tausalz

Zur Aufrechterhaltung des Verkehrs wird in der kalten Jahreszeit Taumittel auf die Straßen gestreut oder gesprüht. Die eingesetzten Streumittel sollen dabei Schnee- und Eis auf den Straßen entfernen und durch die Bildung einer dünnen Salzlösungsschicht das Wasser vom Gefrieren abhalten (LAY 2006).

Als Streumittel kommen überwiegend Natriumchlorid (NaCl) als Salz und/oder Sole zum Einsatz. Andere Auftaumittel sind Calciumchlorid (CaCl₂), Magnesiumchlorid (MgCl₂) und Kaliumchlorid

(KCI). Welches Auftaumittel verwendet wird, ist dabei von verschiedenen Randbedingungen (z. B. Temperatur) abhängig.

Der Eintrag der Chloride in das Bauwerk erfolgt durch Spritzwasser oder Sprühnebel. Allein aufgrund der aufgetragenen Menge an Taumitteln – die klimabedingt und bauwerksabhängig großen Schwankungen unterworfen ist – kann dabei jedoch nicht auf die Belastung des Bauwerkes geschlossen werden, da es zum einen zu einer Umverteilung in die Umgebung und zum anderen zu Verlusten durch z. B. Windverwehungen kommt (DAFSTB 2007). Hinzu kommen noch Einflüsse aus dem Verkehr (z. B. Aufkommen, gefahrene Geschwindigkeiten) und der Topographie.

Die tatsächliche Tausalzbelastung des Bauwerkes lässt sich zuverlässig nur über die direkte Messung von Chloridprofilen bestimmen.

2.2 Normative Anforderungen

Betonbauwerke müssen innerhalb ihrer vorgesehenen Nutzungsdauer ausreichend widerstandsfähig gegenüber den zu erwartenden Beanspruchungen sein. Neben der Standsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit müssen dabei auch die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit erfüllt werden. Die dazu notwendigen Eigenschaften und Zusammensetzungen des Betons sind normativ im EUROCODE 2 (DIN EN 1992-2 12.2010, DIN EN 1992-2/NA 04.2013) sowie in DIN EN 206-1 (07.2001) und DIN 1045-2 (08.2008) letztere zusammengefasst als DIN-Fachbericht 100 (03.2010), festgelegt.

Die Anforderungen an den Beton werden in Abhängigkeit von den zu erwartenden Umwelteinwirkungen durch Expositionsklassen festgelegt. Für vertikale Bauteile (Tunnelwände und Innenschalen ohne Druckwasserbeanspruchung) im Sprühnebelbereich von Verkehrsflächen sind maßgebend:

- XD1 (Bewehrungskorrosion durch Chloride, mäßige Feuchte)
- XF2 (Betonangriff durch Frost mit Taumittel, mäßige Wassersättigung)

Für direkt durch Grundwasser beanspruchte Bauteile (WuB Ko) ist die Expositionsklasse XD2 maßgebend.

Für Flächen mit häufiger Spritzwasserbeanspruchung, Notgehwege und Fahrbahndecken gelten die Expositionsklassen

- XD3 (Bewehrungskorrosion durch Chloride, wechselnd nass und trocken)
- XF2 (Betonangriff durch Frost mit Taumittel, Fläche gegen die Horizontale geneigt, mäßige Wassersättigung)
- XF4 (Betonangriff durch Frost mit Taumittel, überwiegend horizontale Flächen, mäßige Wassersättigung)

Weitere, die Gebrauchstauglichkeit und die Standsicherheit betreffende Anforderungen sind in den ZTV-ING (2019) formuliert. Die zusätzlichen technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien sind keine Norm. Ihre Anwendung muss vertragsrechtlich vereinbart werden.

2.3 Korrosion durch Chloride

Bei der Stahlkorrosion handelt es sich um einen elektrochemischen Vorgang, der neben der Anwesenheit der Reaktionspartner Eisen und Sauerstoffe von den Leitfähigkeits- und Potentialverhältnissen im Bauteil abhängig ist. Zur Korrosion des Bewehrungsstahls im Beton müssen mehrere Voraussetzungen erfüllt sein.

Der Beton muss über eine ausreichende elektrolytische Leitfähigkeit verfügen, was durch den Wassergehalt bei Betonbauteilen im Freien praktisch immer gegeben ist. Durch ihren Einfluss auf den Wassertransport hat die Dichtigkeit des Betons einen Einfluss auf die elektrolytische Leitfähigkeit. Darüber hinaus wird die Leitfähigkeit durch den Zement beeinflusst. Beide Faktoren beeinflussen die mögliche Korrosionsgeschwindigkeit.

Im Beton der Betondeckungsschicht und in der Umgebung der Bewehrung muss Sauerstoff vorhanden sein. Das ist bei Betonbauteilen an der Luft ohne besondere Vorkehrungen regelmäßig der Fall. Der Sauerstofftransport hängt ebenfalls von den Dichtigkeitseigenschaften des Betons ab, die ihrerseits dadurch die Korrosionsgeschwindigkeit beeinflussen.

Der Bewehrungsstahl ist immer elektrisch leitfähig. Zwischen Stahloberfläche und Beton muss eine Potentialdifferenz bestehen, die Korrosionsströme ermöglicht. Diese Voraussetzung ist in allen praktisch relevanten Fällen gegeben.

Die anodische Auflösung des Eisens mit Herauslösung von Eisenionen aus dem Stahl muss möglich sein. Diese Voraussetzung ist bei ungeschädigtem Stahlbeton nicht erfüllt. Das basische Milieu in der Umgebung des Stahls führt zur Ausbildung einer dichten Passivschicht auf der Oberfläche der Bewehrungsstäbe, die diesen Prozess als Voraussetzung der Stahlkorrosion verhindert.

Die letzte Voraussetzung zum Auftreten von Stahlkorrosion wird bei Überschreitung eines kritischen (korrosionsauslösenden) Wertes der Chloridionenkonzentration im Beton erfüllt. Hier wird die Schutzwirkung der passivierenden Oxidschicht des Stahls punktuell aufgehoben, so dass die elektrochemische Korrosion in Gang kommt. Für den kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt lässt sich kein fester Grenzwert angeben, da er durch eine Reihe variabler Faktoren aus Baustoff- und Umwelteigenschaften beeinflusst wird. Nach (HARNISCH und RAUPACH 2011) kann dafür ein Bereich von etwa 0,15 bis 3,0 M.-% bezogen auf den Zementgehalt angegeben werden. Um zu vermeiden, dass der Chloridgehalt im Beton eine kritische, korrosionsauslösende Größe erreicht, sind in Regelwerken zur Herstellung und Instandsetzung von Stahlbetonbauwerken Grenzen angegeben. Alle Angaben erfolgen in M.-% bezogen auf den Zementgehalt.

- DIN 1045-2 begrenzt den Chloridgehalt von Stahlbeton bei der Herstellung auf 0,4 % (DIN 1045-2 08.2008)
- die Instandsetzungsrichtlinie (DAFSTB 2001) sieht die Beurteilung durch einen sachkundigen Planer vor, wenn der Chloridgehalt in der Betondeckungsschicht 0,5 % erreicht
- in den Schadensbeispielen der RI-EBW-PRÜF 2017 wird ein Chloridgehalt von >0,4 % bei Stahlbeton und >0,2 % bei Spannbeton als Einschränkung der Dauerhaftigkeit gesehen. Die Bewertung richtet sich nach der Tiefenlage der Feststellung, bezogen auf die Betondeckung der Bewehrung (RI-EBW-PRÜF 02.2017)

Ein Charakteristikum der chloridinduzierten Korrosion liegt in dem punktuellen Korrosionsangriff, der durch Lochfraß zu einer wesentlichen Querschnittsschwächung des Stahls führt, ohne dass sich zwingend eine große Menge von Korrosionsprodukten bildet. Dadurch kündigt sich diese

Form der Korrosion in der Regel nicht durch ausgeprägte, an der Betonoberfläche sichtbare Schäden, wie parallel zur Bewehrung verlaufende Risse oder Abplatzungen, an.

Eine Depassivierung der Stahloberfläche ist neben der Einwirkung von Chloriden auch durch Einwirkungen, die die Alkalität des Betons in der Umgebung des Stahls aufheben, möglich, z. B. durch Karbonatisierung als Folge der Einwirkung von Kohlenstoffdioxid. Dieser Vorgang ist nicht Gegenstand weiterer Untersuchungen. Er soll nur zur Abgrenzung möglicher Korrosionsursachen an bestehenden Bauwerken betrachtet werden.

Direkte Schäden am Beton werden durch den Einfluss von Tausalzen nicht in einem Umfang verursacht, der aufwändige Instandsetzungen erfordert. Die Betrachtungen in dem angebotenen Forschungsprojekt richten sich deshalb ausschließlich auf die Bewehrungskorrosion.

2.4 Transportmechanismen

In den folgenden Ausführungen werden die Transportmechanismen von Chlorid in Beton kurz zusammengefasst. Der Transport der wasserlöslichen Chloride von der Bauteiloberfläche in das Bauteilinnere ist dabei in großem Maße von den Feuchteverhältnissen abhängig, da die Anwesenheit von Wasser die Grundlage für den Chloridtransport ist (KAPTEINA 2017).

Im Wesentlichen kann der Chloridtransport in porösen Feststoffen durch folgende drei Mechanismen erfolgen (DAHME 2006):

- Diffusion
- Kapillartransport/Konvektion
- Mikroeislinsepumpe bei Frost-Tau-Wechsel

In ungerissenem Beton werden Chloridionen überwiegend durch Diffusion transportiert, wenn das Porensystem wassergesättigt ist. Der Transport wird durch Konzentrationsunterschiede der gelösten Stoffe ausgelöst, ohne dass es einer Strömung des Wassers bedarf. Die Diffusionseigenschaften der verwendeten Betone und ihre Kapillarität sind daher als maßgeblich bei der Bewertung des Verhaltens von Tunnelinnenschalen in Bezug auf das Eindringen von Chloriden zu betrachten.

In den oberflächennahen Bauteilbereichen ist die Beanspruchungssituation stärker durch einen Wechsel von Nass- und Trockenzyklen gekennzeichnet. Bei der Beaufschlagung des trockenen Betons mit Tausalzlösung ist von einer kapillaren Wasseraufnahme in der Betondeckungsschicht auszugehen, bei der die gelösten Chloridionen mit in den Beton transportiert werden, ohne dass ein Konzentrationsgefälle erforderlich ist (der sog. Huckepacktransport). Durch Wiederholung von Austrocknung und erneutem Kapillartransport reichern sich im Lauf der Nutzungszeit die im Wasser gelösten Stoffe im Beton an. Der Transport von Chloridionen in den oberflächennahen Betonbereichen als Folge der Strömung des Lösungsmittels Wasser wird als Konvektion (bzw. konvektiver Chloridtransport) bezeichnet. Dieser für die Randzonen nachgewiesene Transportmechanismus führt zu Abweichungen bei den für einen Chloridionentransport bis an die Bewehrung maßgeblich verantwortlichen Diffusionsvorgängen und muss bei der Bewertung von Messergebnissen berücksichtigt werden.

Wenn der Beton Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt ist, kann ein zusätzlicher konvektiver Chlorideintrag über die Frostpumpe (Mikroeislinsepumpe) erfolgen. Infolgedessen ist gegenüber dem allgemeinen Kapillartransport mit größeren Chlorideindringtiefen zu rechnen (KAPTEINA 2017).

Ein weiterer, in porösen Materialien bei Vorhandensein eines hydrostatischen Druckgefälles vorhandener, Transportmechanismus, die Permeation unter Wirkung des Wasserdruckes, ist für Tunnelbauwerke unter Tausalzbeanspruchung nicht maßgebend. Auf den der Beurteilung zugänglichen Teil der Tunnelinnenschale wirkt kein Wasserdruck.

Die Transportgeschwindigkeit der Chloride in Beton wird unter anderem durch das Chloridbindevermögen des verwendeten Zementes beeinflusst (KAPTEINA 11.2011).

In gerissenem Beton ist davon auszugehen, dass bei intermittierender druckloser Beanspruchung durch chloridhaltige Lösungen im Bereich der Risse ein schnellerer Transport von der Oberfläche in das Bauteilinnere stattfindet, als in ungerissenem Beton.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die am Chloridtransport beteiligten Mechanismen vielfältig sind und hinsichtlich ihrer Tiefenwirkung variieren. Während die kapillare Eindringtiefe auf die Randzone des Betons beschränkt ist und mit dem Einsatz von Taumitteln jahreszeitlich bedingt nur begrenzt auftritt, findet die Diffusion ganzjährig und auch in größeren Tiefen statt.

2.5 Modelle für den Chlorideintrag

2.5.1 Allgemeines

Zur Prognostizierung des zeitlichen Verlaufs des Chlorideintrages und der darauf aufbauenden Beurteilung der Dauerhaftigkeit des Bauwerkes wurden zahlreiche Modelle und Berechnungsverfahren entwickelt. Zusammenfassungen und Übersichten zu verschiedenen Chlorideindringmodellen und Berechnungsverfahren finden sich unter anderem bei (UNGRICHT 09.2004), (KAPTEINA 11.2011) und (SCHEYDT 2013). Die meisten Modelle basieren danach auf den *Fick'schen Diffusionsgesetzen* und der ausschließlichen Betrachtung des Chloridionentransportes durch Diffusionsprozesse. Mit verschiedenen Modifizierungen wurde versucht, dieses Basismodell besser an die tatsächlichen Verhältnisse anzupassen (z. B. die Zeitabhängigkeit des Chloriddiffusionskoeffizienten).

SCHEYDT berichtet über neuere Modelle, die alle in der Porenlösung vorkommenden Ionen mit in die Betrachtung einbeziehen (Multi-Ionen-Modelle) und so eine realitätsnähere Modellierung erlauben. Ein Vergleich dieser hochkomplexen Modelle mit den Basismodellen ergab jedoch nur marginale Unterschiede hinsichtlich der Prognosegüte, woraufhin den Multi-Ionen-Modellen eher eine wissenschaftliche als praktische Relevanz attestiert wurde. (SCHEYDT 2013)

Ein Großteil der Chlorideindringmodelle wurde im Hinblick auf die Meerwasserexposition entwickelt vgl. (KAPTEINA 2013). Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) hat diesbezüglich ein Merkblatt zur Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken veröffentlicht (BAWMERKBLATT 2017).

Kapteina befasste sich in (KAPTEINA 11.2011) und (KAPTEINA 2013) u. a. explizit mit Chlorideindringmodellen für Straßenbauwerke:

- AiF-Modell,
- Modell nach Ungricht (UNGRICHT 09.2004),
- Modell nach Lay (DAFSTB 2007).

Das „AiF-Modell“, von (LAY und SCHIEßL 2003) im Forschungsbericht AiF 12525 N veröffentlicht, basiert auf dem von GEHLEN modifizierten Diffusionsmodell (GEHLEN 2000). Hierbei

wurde das Modell von Gehlen dahingehend weiterentwickelt, dass der Chloriddiffusionskoeffizient differenziert nach hydrations- und expositionsbedingten Anteilen beschrieben wird. Für die Beschreibung des hydrationsbedingten Anteils wird dabei der zeitabhängige Verlauf des Chloridmigrationskoeffizienten herangezogen. Im Rahmen eines Forschungsprojektes der Europäischen Union mit der Bezeichnung „DuraCrete“ erfolgte eine erste praktische Anwendung des entwickelten Bemessungskonzeptes im Tunnel Scheldt (BREITENBÜCHER 1999-01-01). Hier wurde mithilfe des Modells zur Vorhersage zum Ende der Einleitungsphase, bei chloridinduzierter Bewehrungskorrosion, berechnet, ob die planmäßige Betondeckung ausreichend ist, um die angestrebte Nutzungsdauer von 100 Jahren zu gewährleisten (GEHLEN 2000).

Beim Modell für den Aufbau von Chloridprofilen nach (UNGRICHT 09.2004) wird die Umverteilung der im Winter konvektiv eingetragenen Chloride über die Diffusion berücksichtigt. Dabei wird angenommen, dass sich die konvektiv eingetragene Chloridmenge über die mittlere Eindringtiefe gleichmäßig verteilt. Das Modell erfasst die wesentlichen Transportmechanismen auf den Chlorideintrag unterwechselnder Spritzwasserbeanspruchung und basiert auch auf Basis der Erkenntnisse beim Naxberg Tunnel (CH). Da mit diesem Modell der wiederholte, konvektive Chlorideintrag nicht berechnet werden kann, muss zur Prognose einer Chloridverteilung zum Zeitpunkt t_i die eingetragene Chloridmenge eines jeden Winters separat berechnet und anschließend überlagert werden.

Ein komplexeres Modell zur Berechnung tiefenabhängiger Chloridkonzentrationen bei Straßenbauwerken aus Beton wurde von LAY aufgestellt (DAFSTB 2007). Bei diesem wird neben der Diffusion auch die Konvektion und Dispersion berücksichtigt. Am Beispiel eines stark belasteten Brückenpfeilers wurde eine Abschätzung zur Depassivierungswahrscheinlichkeit durchgeführt. Im Ergebnis der Prognose wurde deutlich, dass sich durch die z. T. großen Streuungen der Modellvariablen erhebliche Abweichungen zur tatsächlich gemessenen Chloridverteilung ergeben können.

Nach (KAPTEINA 11.2011) sollten Modelle zur Beschreibung der Chlorideindringung in Infrastrukturbauwerke anwenderfreundlich sein, die direkte Quantifizierung der Eingangsvariablen erlauben und die Streuung von messbaren Ergebnissen berücksichtigen. Da dies für die vorgenannten Modelle zum Teil nur bedingt gilt, entwickelte Kapteina ein eigenes Modell zur Prognose des Eindringens von Chlorid in Straßenbauwerke. Der Grundansatz des voll-probabilistischen Modells basiert dabei auf dem 2. *Fick'schen* Diffusionsgesetz. Um die Abweichungen, die sich durch die Vernachlässigung der anderen am Chloridtransport beteiligten Mechanismen ergeben, zu kompensieren, wurde eine empirische Anpassung des Chloriddiffusionskoeffizienten vorgenommen. Mit dem Modell können Chloridprofile von Beton aus dem Spritzwasserbereich beschrieben werden.

2.5.2 Ausgewählte Chlorideindringmodelle

Modellrechnung nach GEHLEN

Für das Chloriddiffusionsmodell nach GEHLEN wurden die am Chlorideindringvorgang beteiligten Basisvariablen identifiziert. An erster Stelle steht hierbei der Chloridmigrationskoeffizient $D_{RCM,0}$ dieser kann experimentell ermittelt werden (vgl.: Bild 1). (GEHLEN 2000)

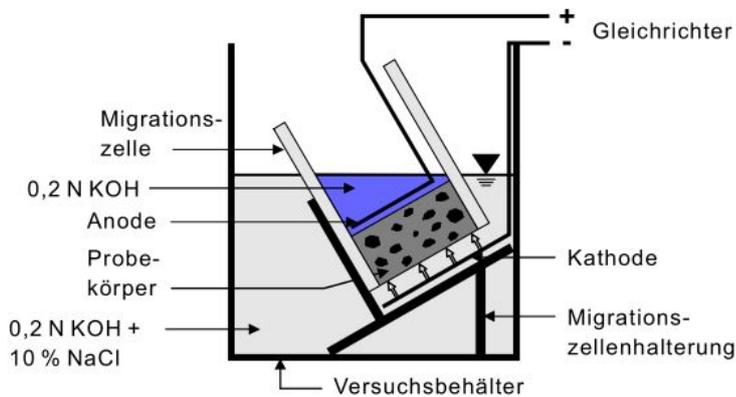


Bild 1: Prinzipskizze des Migrationsapparates zur Bestimmung des Chloridmigrationskoeffizienten, Ausschnitt aus (BAWMERKBLATT 11.2012)

Bei der Modellentwicklung nach GEHLEN wird der effektive Chloriddiffusionskoeffizient mit dem Parameter zur Berücksichtigung der Temperatur k_e , dem Altersterm A und dem Übertragungsparameter k_t zeitabhängig angesetzt. Der Ausgabeparameter lautet dann: $C(x,t)$ = Chloridgehalt des Betons in der Tiefe x (Bauteiloberfläche $x = 0$) zum Zeitpunkt t , [M.-%/z].

Folgende Gleichungen werden zur Berechnung der Chloridprofile mit dem modifiziertem Ansatz nach GEHLEN abgeleitet:

$$C(x,t) = C_{S,\Delta x} \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{\text{Eff},C}(t) \cdot t}} \right] \quad (1)$$

mit

$$D_{\text{Eff},C}(t) = k_t \cdot D_{\text{RCM},0} \cdot k_e \cdot A(t) \quad (2)$$

und

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^a \quad (3)$$

dabei sind:

$D_{\text{Eff},C}(t)$: Effektiver Chloriddiffusionskoeffizient von Beton zum Beobachtungszeitpunkt t , [$10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$]

$D_{\text{RCM},0}$: Chloridmigrationskoeffizient von wassergesättigtem Beton, bestimmt zum Referenzzeitpunkt, t_0 an definiert hergestellten und vorgelagerte Probekörpern zum Zeitpunkt t [$10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$]

k_e : Parameter zur Berücksichtigung der Temperatur-abhängigkeit von $D_{\text{Eff},C}(t)$

a : Exponent zur Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit von $D_{\text{Eff},C}(t)$, Altersexponent, [-]

k_t : Übertragungsparameter, um Abweichungen zwischen Chloridmigrationskoeffizienten, die unter beschleunigten Bedingungen (Rapid Chloride Migration

– $D_{RCM,0}$) ermittelt werden, und Diffusionskoeffizienten, die unter natürlichen Bedingungen z. B. im Labor bestimmt werden (Chloride Profiling Method – $D_{CPM,0}$), berücksichtigen zu können, [-]

- A: Alterungsterm, [-]
 t: Betonalter in [s]
 t_0 : Referenzzeitpunkt in [s]
 Δx : Tiefenbereich in [m], der durch ggf. intermittierende Chlorideinwirkung bedingt, vom Fick'schen Verhalten abweichende Chloridkonzentrationen zeigt.
 x: Tiefe in [m], mit einem korrespondierenden Chloridgehalt $C(x,t)$

GEHLEN hat im Rahmen seiner Modellentwicklung den Chloridmigrationskoeffizienten an verschiedenen Betonrezepturen ermittelt und gegenübergestellt. Aus den Schlussfolgerungen geht hervor, dass Betone unter Verwendung von Zusatzstoffen wie Flugasche oder Silikastaub den Widerstand gegen eindringende Chloride maßgeblich erhöhen können. Besonders wirksam war, im Hinblick auf einen geringen Chloridmigrationkoeffizienten, die Verwendung von Hochofenzement (CEM III/B). Die Aussage ergab sich durch Vergleich mit Betonen unter Verwendung von Portlandzement, wobei Bauwerksuntersuchungen und Auslagerungsversuche herangezogen wurden. Weiterhin wurde der Einfluss des Wasser/Zement-Wertes untersucht, durch Reduktion des w/z_{eq} -Wertes von 0,60 auf 0,40 konnte der Widerstand, mit wenigen Ausnahmen, mehr als verdoppelt werden. Insbesondere hat GEHLEN bei der Herleitung seines Chloriddiffusionsmodells die Abnahme des Chloriddiffusionskoeffizienten in Abhängigkeit von der Auslagerungsdauer mit Hilfe des Altersexponenten modelliert. Zur Berücksichtigung der zeitabhängigen Abnahme des Chloridmigrationskoeffizienten wird der Übertragungsparameter k_t in Kombination mit dem Altersexponenten a eingeführt. Wobei der Übertragungsparameter k_t zur modelltechnischen Vereinfachung zu $k_t = 1$ angenommen wurde, um die Regressionsrechnung zu vereinfachen. Die Zementart und die Art der Zusatzstoffe beeinflussen die altersbedingte Entwicklung des effektiven Chloridmigrationskoeffizienten erheblich. Die Mischungsberechnung hingegen kann im Hinblick auf den Altersexponenten vernachlässigt werden. Aus einer statistischen Quantifizierung wurden die Altersexponenten / Variable a in Abhängigkeit der Zementart und Betongüte erfasst. (GEHLEN 2000)

Weiterhin hat GEHLEN Alternativverfahren zur indirekten Prüfung der Chloriddiffusionseigenschaften, über die Bestimmung des spezifischen Elektrolytwiderstandes von Beton, untersucht. Der funktionale Zusammenhang zwischen Chloridmigrationskoeffizienten und spez. Elektrolytwiderstand kann dem Bild 2 entnommen werden. Die Bestimmung des Elektrolytwiderstandes erfolgte mit der Wenner-Sonde, prinzipiell kommen auch andere Verfahren zur Messung spezifischer Elektrolytwiderstände in Frage. Hier seien zu nennen die Zweielektrodenmethode (TEM), Multi-Ring-Elektrode (MRE) oder die Elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS). Aufgrund der einfachen Handhabung beim Umgang mit der Wenner-Sonde eignet sich dieses Verfahren besonders gut zur baubegleiteten Qualitätskontrolle an gesondert hergestellten Probekörpern. Im Zuge des Bauvorhabens Tunnel Westerschelde (NL) (BREITENBÜCHER 1999-01-01) konnten so indirekt Rückschlüsse auf den Chloridmigrationskoeffizienten erfolgen. Die in Bild 2 wiedergegebenen Daten repräsentieren Portlandzementbeton, Flugaschezementbeton ($f \leq 0,20 \cdot z$, $k = 0,50$), Portlandsilikabetone ($sf \leq 0,08 \cdot z$, $k = 2,0$) und Hochofenzementbetone mit Wasserzementäquivalentwerten im Bereich von $\omega_{\ddot{A}qv} = 0,35$ und $\omega_{\ddot{A}qv} = 0,60$.

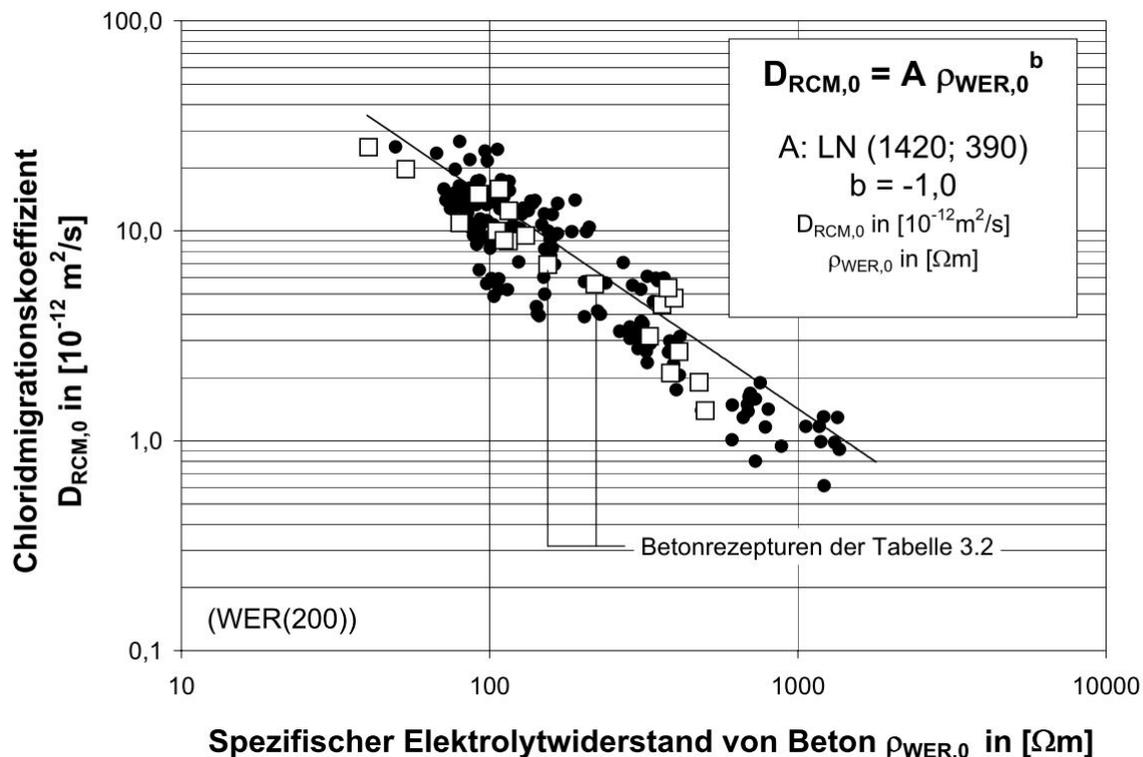


Bild 2: Funktionaler Zusammenhang den Materialkennwerten $D_{RCM,0}$ und $\rho_{WER,0}$ in doppellogarithmischer Darstellung (GEHLEN 2000)

Auch aus diesem Zusammenhang heraus hat GEHLEN den Einfluss der Außentemperatur auf den Diffusionskoeffizienten $D_{Eff,C}$ mithilfe eines Übertragungsparameters k_e berücksichtigt. Hierbei kann, analog zur Temperaturabhängigkeit des elektrolytischen Widerstandes von Beton, die Beschreibung des Temperatureinflusses auf den Chloriddiffusionskoeffizienten mit Hilfe der Arrhenius-Gleichung in Ansatz gebracht werden. Bei der mathematischen Bestimmung wird die Umgebungstemperatur mit der Bauteiltemperatur gleichgesetzt.

Werden Bauteile intermittierend mit Lösungen konstanter, beziehungsweise unterschiedlicher Chloridkonzentration beaufschlagt, müssen Übertragungsfunktionen berücksichtigt werden. So können intermittierend beaufschlagte Bauteile immer wieder durch die zwischengeschaltete Luftlagerung oberflächennah austrocknen. Eine anschließende Benetzung führt dazu, dass Chloride kapillar mit Wasser im „Huckepack-Transport“ relativ rasch im Vergleich zu reinen Diffusionstransporten ins Betoninnere transportiert werden. In diesem Zusammenhang wurde die Frage beantwortet, bis in welche Tiefe es bei intermittierender Chloridbeaufschlagung zu Abweichungen vom *Fick'schen* Diffusionsverhalten kommt (vgl. Bild 3). Die Abweichungen im oberflächennahen Bereich ergeben sich aus dem Rücktransport von Chloriden bei der Austrocknung, der Carbonatisierung und durch Auswasch- und Auslaugeeffekte. Es wurde untersucht, in welcher Tiefenlage die höchste Chloridkonzentration vorlag. Nach dieser Untersuchung konnte die Variable Δx (die Tiefe mit der maximalen Chloridkonzentration die somit als Ersatzoberflächenkonzentration $C_{s,\Delta x}$ angenommen werden kann) mit einer Beta-Verteilung gut beschrieben werden. In experimentellen Untersuchungen wurde festgestellt, dass sich witterungsbedingte Feuchteschwankungen ungefähr auf die äußeren 15 mm des Überdeckungsbetons beschränken, wobei kein unmittelbarer

Bezug zu Bauwerken und Bauteilen mitgeteilt wurde. In Zusammenfassung beider Beobachtungen ergibt sich ein mittlerer Tiefenbereich von $\Delta x = 6,0$ mm bis $\Delta x = 11,0$ mm in den Salze rasch aufgenommen werden und sich ansammeln können. Der aus der Stichprobenuntersuchung kalkulierte Mittelwert der Tiefe mit der maximalen Chloridkonzentration beträgt 8,9 mm.

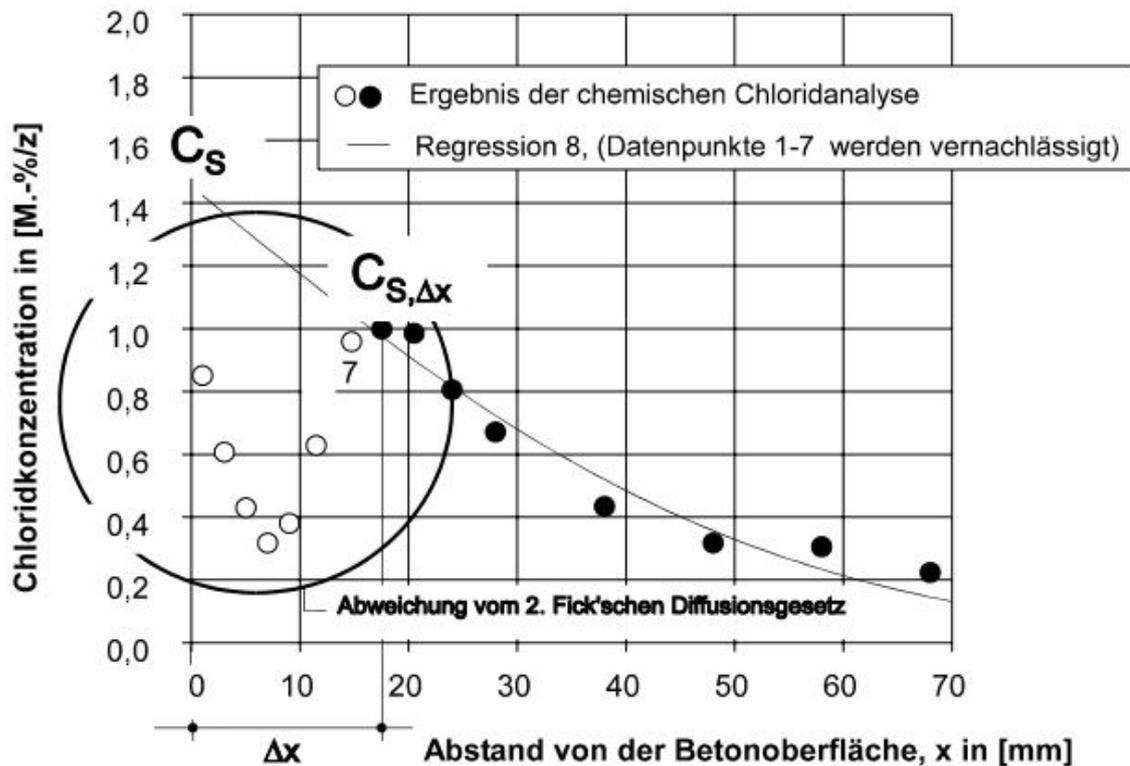


Bild 3: Typisches Chloridprofil im Spritzwasserbereich eines Brückenbauwerks, inkl. Abweichung vom 2. Fick'schen Diffusionsgesetz (GEHLEN 2000)

Weiterhin wurden, zur Beantwortung der Frage, wann und mit welcher umweltabhängigen Geschwindigkeit in der Tiefenlage Δx Chloridkonzentrationen in Höhe der Chloridsättigungskonzentration erreicht werden, verschiedene Bauwerksbeobachtungen ausgewertet. Hierbei gilt zu beachten, dass bei Bauteilen unter intermittierender Chloridbeaufschlagung ausgedehnte Zeiträume verstreichen, bevor sich konstante Konzentrationsverhältnisse an der Ersatzoberfläche einstellen. Daher müssten zeitabhängige Übertragungsfunktionen eingeführt werden. Wann die so eingeführte Variable ihren Maximalwert erreicht, ist in starkem Maße vom Nachschub und der weiteren Verfügbarkeit von Chloriden abhängig. Die Übertragungsfunktion wäre somit abhängig von der Höhe über der Tidezone sowie von der Ausrichtung des Bauteils gegenüber der Hauptwindrichtung. Diese wird über eine Verwirbelungsfaktor berücksichtigt.

Im Vergleich zu Meerwasserbauten und Küstenbauwerken, wo Wellenbewegung und Wind für den Chloridtransport von der Chloridquelle zum Bauteil verantwortlich sind, kommen bei Ingenieurbauwerken des Straßenbaus andere Ursachen für den Transport von Chloriden vom Verkehrsweg zum Bauteil in Frage. Vornehmlich in Abhängigkeit der Verkehrsdichte und der zulässigen Verkehrsgeschwindigkeit werden chloridhaltige Tauwässer mit einem Chloridgehalt $C_{0,R}$ unterschiedlich weit von der Straße auf davon entfernt liegende Bauteiloberflächen transportiert.

Je näher das Bauteil an der Chloridquelle (Straße) liegt, desto größer ist der Beaufschlagungsgrad. (GEHLEN 2000)

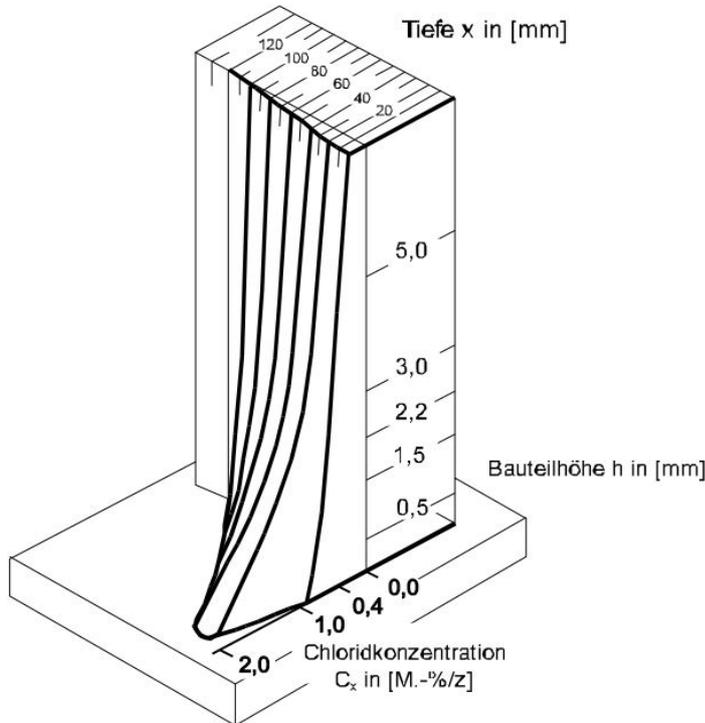


Bild 4: Chloridkonzentration in Abhängigkeit der Bauteilhöhe und Tiefe (GEHLEN 2000)

Aus der Ausführung von Gehlen konnte entnommen werden, dass die Übertragungsfunktionen aufgrund unzureichender Datenbasis bisher nicht allgemein gültig quantifiziert werden konnten. Lediglich quantitative Zusammenhänge, durch eigene Praxisbeobachtungen untermauert, konnten zusammengestellt werden.

Modellrechnung gemäß fib Modellcode (FIB 2013)

Aufbauend auf der Modellbasis von GEHLEN sowie durch die Weiterentwicklung und Validierung des Modells innerhalb der Forschungsprojekte *DuraCrete* (BREITENBÜCHER 1999-01-01) und D.A.R.T.S (MINISTRY OF TRANSPORT 03.2004) wurde im fib Modellcode (FIB 2013) die folgende Gleichung etabliert:

$$C(x, t) = \left(C_o + (C_{S, \Delta x} - C_o) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{app, C}(t) \cdot t}} \right] \right) \quad (4)$$

Hierfür wurde die Gleichung (1) um die im Beton befindliche Ausgangschloridkonzentration C_o [M.-%/z] erweitert.

Modellrechnung nach UNGRICHT (UNGRICHT 09.2004)

Als zentrales Element der Modellbildung für den Chloridaufbau diente ein Feldversuch im Naxbergtunnel. Hierfür wurden Versuchsplatten mit unterschiedlichen Betonqualitäten im Naxbergtunnel angebracht. Der Versuchsstand wurde im Portalbereich seitlich der Tunnelwand angeordnet. In die Versuchsplatten wurden Widerstandssensoren zur Messung der Potenziale und Widerstände, der Betontemperatur im Tiefenprofil und der Lufttemperatur und -feuchte positioniert. Neben der Widerstandsmessung wurde der Chlorideintrag durch Messung der freien und damit korrosionswirksamen Chloride im Porenwasser bestimmt. Jeweils im Frühjahr wurden Bohrmehlproben entnommen und der Gesamtchloridgehalt bestimmt. Weiterhin wurden meteorologische Daten wie Niederschläge erfasst und der Chlorideintrag durch Streusalzeinsatz und Verbrauch dokumentiert.

Aus den Widerstandsmessungen ging hervor, dass Betone bei Verwendung von Zusatzstoffen (Flugasche oder Silikastaub) i.d.R. höhere Widerstände aufweisen als Betone ohne Zusatzstoffe (vgl. Bild 5). Es gilt zu beachten, dass das Widerstandsniveau durch das Eindringen von Chloriden und Feuchtigkeit herabgesetzt wird.

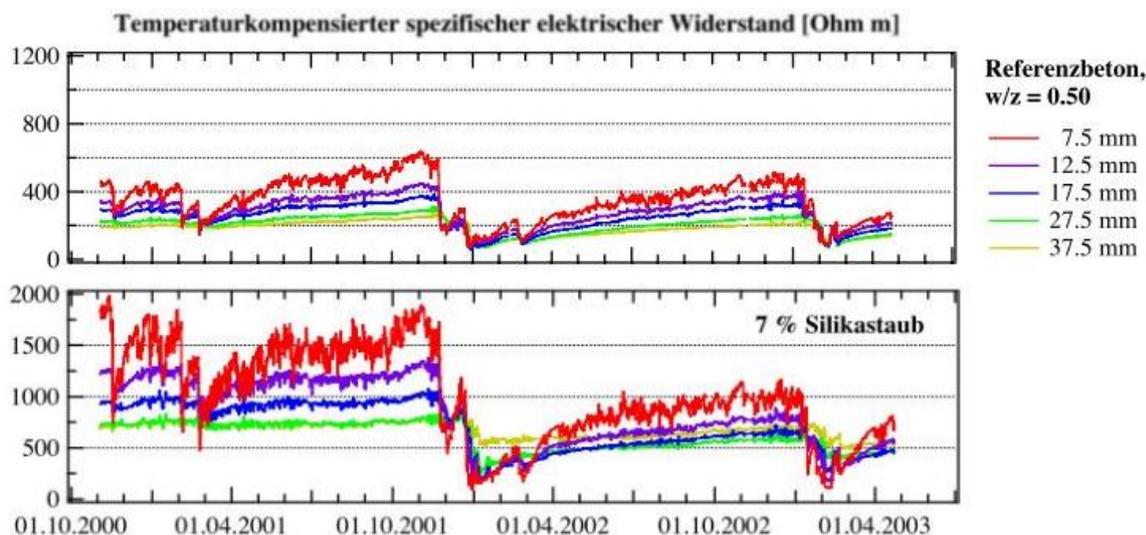


Bild 5: Vergleich der temperaturkompensierten spezifischen Widerstände (UNGRICHT 09.2004)

Im Gegensatz zu den Widerstandsmessungen war der freie Chloridgehalt im Beton mit Silikastaub mit Abstand am größten. Ein Vergleich des Chloridgehaltes der beiden Betone kann dem Bild 6 entnommen werden. Aus einer Gegenüberstellung mit den Chloridanalysen der Bohrmehlproben ist zu entnehmen, dass es, trotz der Annahme von vollständig gefüllten Kapillarporen, zu großen Differenzen zwischen dem Gehalt an freien Chloriden und dem Gesamtchloridgehalt kommt. Besonders bei dem Beton mit Silikastaub kam es zu widersprüchlichen Ergebnissen.

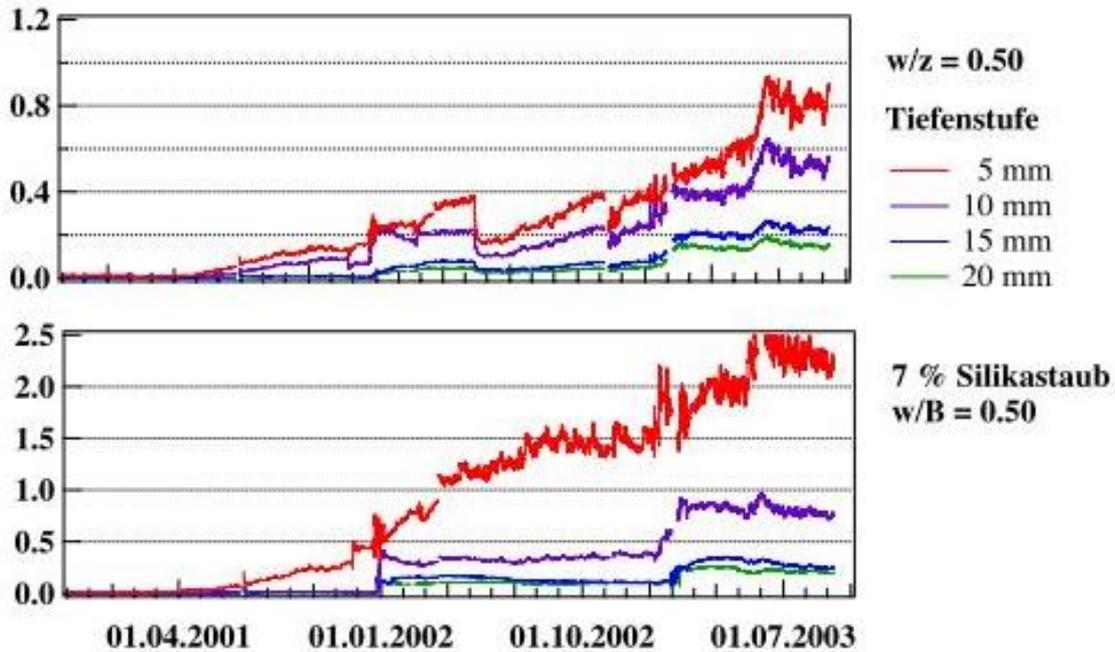


Bild 6: Vergleich des freien Chloridgehaltes im Porenwasser in Abhängigkeit von der Zeit (UNGRICHT 09.2004)

Weiterhin wird die Korrosion an verschiedenen elektrisch isolierten Stählen in den Versuchsplatten untersucht. Gemessen wurden entweder die Korrosionsströme oder die Potenzialdifferenz zu den einbetonierten Referenzelektroden. Auf Grund der Resultate der Chloridsensoren und -analysen war zu erwarten, dass die Korrosion bei vielen der nur 10 mm überdeckten Stäbe bereits im zweiten Winter einsetzte. Mit Abstand am besten schneidet der Beton mit $w/z = 0.35$ ab. Der erste Baustahl wurde in der untersten Platte erst im darauf folgenden Winter initiiert.

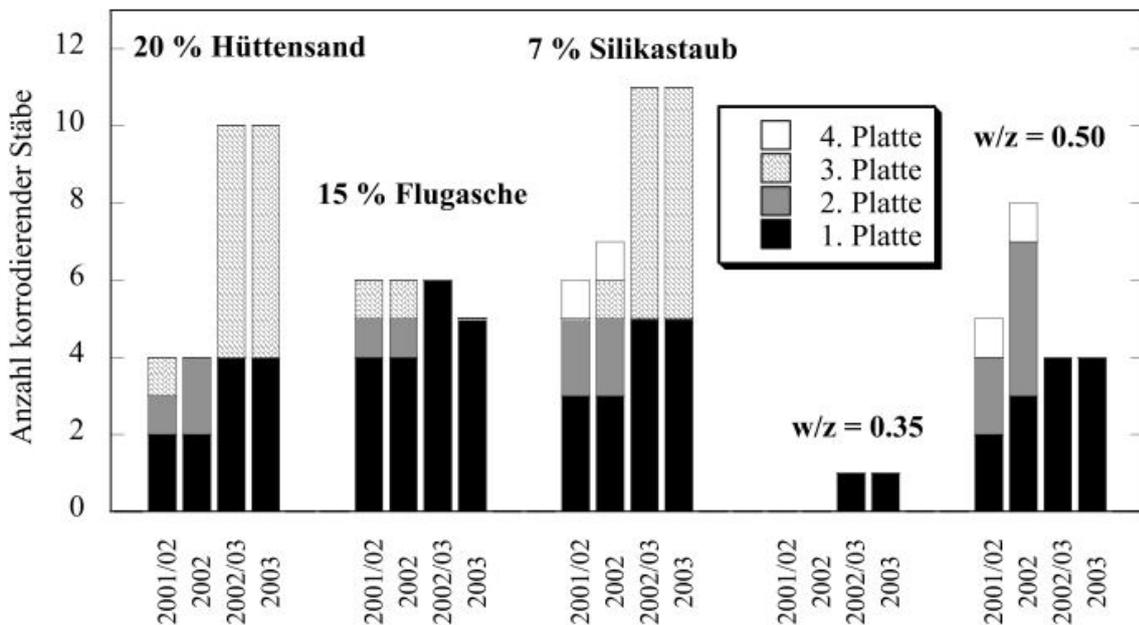


Bild 7: Anzahl korrodierender, elektrisch isolierter Stäbe in Abhängigkeit von der Betonqualität und der Zeit (UNGRICHT 09.2004)

Aus den Messdaten wurden Groß- und Kleinereignisse definiert, welche den Eintrag von Feuchte und Chloriden beschreiben. Mit diesen Angaben und einer Annahme über die Anzahl der zu erwartenden Groß- und Kleinereignisse innerhalb eines Winters lässt sich die Chloridmenge abschätzen. Diese Abschätzung wird als Anfangsbedingung für die Berechnung der Umverteilung der Chloride durch Diffusion benutzt.

Die Auswirkung auf den Chloridgehalt, infolge der Umverteilung durch drei Großereignisse mittels Diffusion, kann dem Bild 8 entnommen werden.

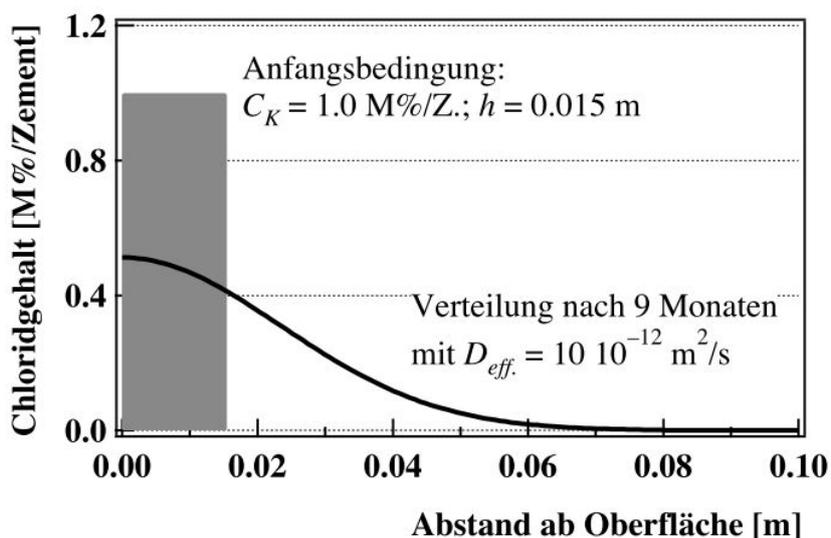


Bild 8: Umverteilung des Chloridgehaltes aus drei Großereignissen innerhalb von 9 Monaten (UNGRICHT 09.2004)

Das Modell erfasst im Wesentlichen den Chlorideintrag unter wechselnder Spritzwasserbeanspruchung. Die gezeigten Resultate stimmen gut mit den ermittelten Ergebnissen der Chloridanalysen überein. Die Umverteilung des Chloridgehaltes wurde unabhängig voneinander, für jedes Ereignis (Chlorideintrag im jeweiligen Winter) berechnet und aufsummiert.

Bei der Extrapolation der Chloridprofile wird die Wasseraufnahme und somit der Kapillartransport in Abhängigkeit der Betonqualität berücksichtigt. Hierfür wurde der jährliche Chlorideintrag abgemindert und die Eindringtiefe minimiert. Zusätzlich wurde der Diffusionskoeffizient mit 30 % vom im Labor bestimmten Migrationskoeffizienten angenommen, um die Reduktion der Diffusion des nicht gesättigten Betons zu berücksichtigen. In (NIELSEN und GEIKER 2003) wurden die Migrationskoeffizienten in Abhängigkeit der Lagerung („trocken“ bei 65 % rel. Feuchte und „nass“ bei 85 % rel. Feuchte) verglichen. Der Chloridmigrationskoeffizient lag bei der „trocken“-Lagerung ca. 29 % unter dem der „feucht“ gelagerten Proben und stimmt somit gut mit dem angenommenen Wert überein. In einem Beispiel in (UNGRICHT 09.2004) wurden die Chloridprofile anhand zweier Betone von unterschiedlicher Qualität für 5 und 20 Jahre extrapoliert (vgl. Bild 9).

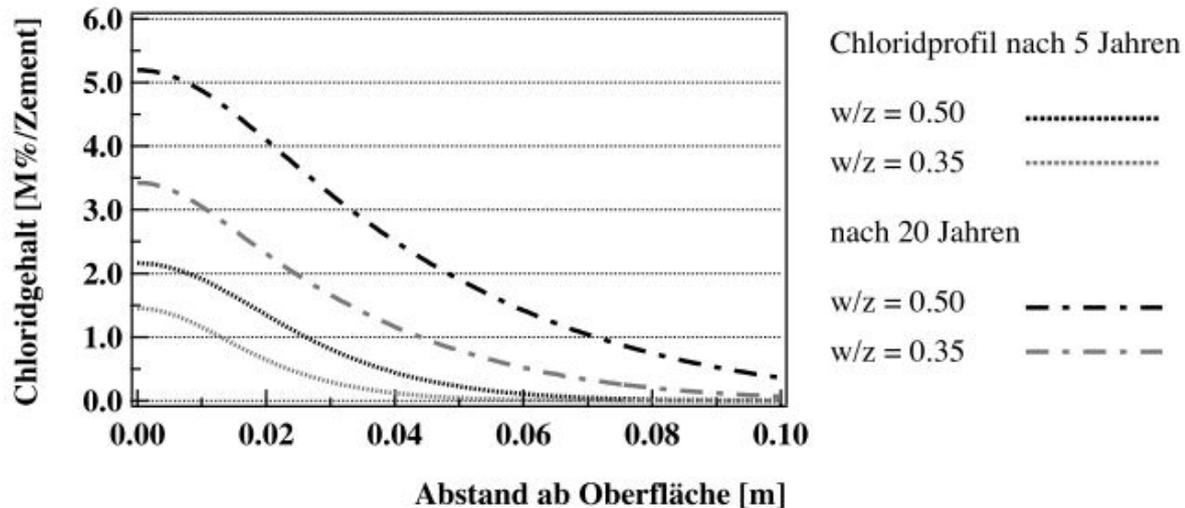


Bild 9: Extrapolation für einen guten und einen durchschnittlichen Beton für 5 und 20 Jahre, Ausschnitt aus (UNGRICHT 09.2004)

Gemäß (UNGRICHT 09.2004) bietet das Modell folgende Vorteile:

- Die wichtigsten Mechanismen werden erfasst.
- Rand- und Anfangsbedingung für die Berechnung der Umverteilung durch Diffusion wurden durch Messungen vor Ort bestimmt und können auf Grund von Laboruntersuchungen und der Analyse von Klimadaten für Betone mit unterschiedlichem Aufsaug- und Austrocknungsverhalten und für verschiedene Expositionen abgeschätzt werden.
- Die Berechnung der Umverteilung erfolgt mit im Labor bestimmten Kennwerten.
- Die Resultate der Extrapolation auf lange Zeiträume liegen auf der sicheren Seite, d.h. die Chloridkonzentration in größerer Tiefe wird eher überschätzt.
- Viele Einflüsse können auf einfache Weise zur Verbesserung der Resultate der Extrapolation in das Modell eingebaut werden.

Die Nachteile dieses Modells werden in (KAPTEINA 11.2011) bzw. (KAPTEINA 2013) beschrieben:

- Eine Chloridverteilung infolge eines wiederholten konvektiven Chlorideintrages kann mit diesem Modell nicht direkt berechnet werden.
- Die eingetragene Chloridmenge ist für jeden Winter separat zu berechnen und anschließend zu überlagern.
- Inwieweit der konvektive Chlorideintrag durch kapillaren Wassertransport auf die Straßenexposition übertragbar ist, in welcher der konvektive Chloridtransport auch über die Mikroeislinsepumpe erfolgt, wurde nicht untersucht.
- Ein probabilistischer Ansatz auf Basis der vorhandenen Daten ist nicht möglich.

Folgende Gleichung wird zur Berechnung der Chloridprofile mit dem Verfahren nach (UNGRICHT 09.2004) abgeleitet:

$$c(x, t) = \frac{1}{2} C_K \cdot \left[\operatorname{erf} \frac{h-x}{2 \cdot \sqrt{D_{\text{Eff}} \cdot t}} + \operatorname{erf} \frac{h+x}{2 \cdot \sqrt{D_{\text{Eff}} \cdot t}} \right] \quad (5)$$

dabei sind:

- $c(x, t)$: Chloridkonzentration in Tiefe x zur Zeit t [M.-%/z]
 C_K : Chloridkonzentration aus dem Kapillartransport [M.-%/z]
 D_{Eff} : Diffusionskoeffizient [m^2/s]
 h : Tiefe des Chlorideintrags aus der Winterphase [m]
 x : Abstand von der Oberfläche [m]
 t : Zeit [s]

Modellrechnung nach LAY

(LAY 2006) beschreibt ein Modell, welches den Chlorideintrag in Straßenbauwerken aus Beton beschreibt. In der Vorgehensweise zur Modellkonzipierung wurden die Vorgänge existierender Modelle näher betrachtet, Randbedingungen festgelegt und Vorüberlegungen zum Grundmodell diskutiert. Das Ziel von (LAY 2006) war es ein geschlossenes, voll-probabilistisches Modell zur Abschätzung der Wahrscheinlichkeit für Bewehrungsdepassivierung infolge Tausalzeinwirkung im Spritz- und Sprühnebelbereich von Verkehrsbauwerken bereit zu stellen. Hierbei sollte ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Vorhersagepräzision, Modellkomplexität und praktischer Umsetzbarkeit erreicht werden. Bei der Quantifizierung des Modells wird der Zusammenhang zwischen scheinbaren Diffusionskoeffizienten D_{app} und Migrationskoeffizienten D_{RCM} mit $D_{\text{app}} = D_{\text{RCM}}$ beschrieben (vgl. Kap 4.2.3 in (LAY 2006)). Diese Annahme wird ebenfalls durch Gehlen gestützt (vgl. Kap. 4.2.1 in (GEHLEN 2000)).

Aus den Untersuchungen in (LAY 2006) geht ebenfalls hervor, dass die Art des Bindemittels und nicht die Menge (Zementleimvolumen) einen Einfluss auf den Chloridmigrationskoeffizienten hat (vgl. Bild 10).

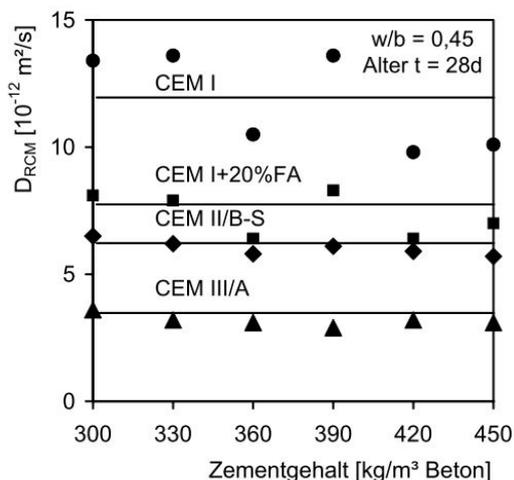


Bild 10: Einfluss des Zementgehaltes bzw. des Zementsteinvolumens auf den Chloridmigrationskoeffizienten D_{RCM} , Ausschnitt aus (LAY 2006)

Weiterhin konnte kein signifikanter Einfluss der Gesteinskörnung auf den Chloridmigrationskoeffizienten festgestellt werden. Die Ergebnisse lagen alle im Bereich der Vergleichspräzision von 20 %. Wobei in (LAY 2006) auf (FRIEDL 2003) verweist, mit dem Hinweis, dass bei Verwendung von rezykliertem Brechsand mit höheren Werten gerechnet werden muss. Das Einführen von künstlichen Luftporen bewirkte eine maximale Verringerung des Migrationskoeffizienten um 4 %, was verglichen mit der Wiederholpräzision der Prüfmethode als nicht signifikant einzustufen ist (vgl. Kap. 4.2.7 in (LAY 2006)). Der Einfluss der Fließmittelmenge und -art konnte mit 6 % erfasst werden somit konnte auch kein Einfluss auf den Migrationskoeffizienten festgestellt werden.

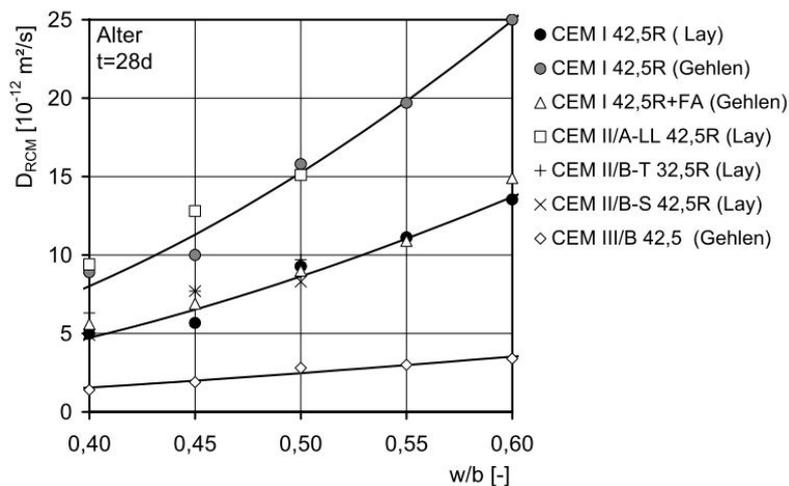


Bild 11: Abhängigkeit von D_{RCM} vom w/b-Verhältnis für unterschiedliche Bindemittelarten im Alter von 28 Tagen, Ausschnitt aus (LAY 2006)

Der Einfluss des w/b-Verhältnisses wurde ebenfalls untersucht. In Bild 11 wurden die Versuche aus (LAY 2006) und (GEHLEN 2000) gegenübergestellt. Aus den Ergebnissen lässt sich eine exponentielle Abhängigkeit ableiten. Die Ursachen hierfür werden im Rahmen einer Quantifizierung zum scheinbaren Diffusionskoeffizienten D_{app} beschrieben. Der Einfluss des w/b-Verhältnisses wird mithilfe der Funktion

$$k_{D(w/b)} = f(\text{Bindemittelart}, w/b)$$

unabhängig vom Betonalter berücksichtigt. Hierbei wird für den Startpunkt für die Regressionsanalyse zur zeitabhängigen Abnahme von D_{RCM} der Referenzzeitpunkt t_0 von 28 Tagen gewählt. Der Migrationskoeffizient zu diesem Zeitpunkt wird in folgender Form abgekürzt:

$$D_{RCM, t=28d}$$

Für den Einfluss des Bindemittels und des Betonalters auf den Migrationskoeffizienten untersuchte LAY im Labor hergestellte und unter Wasser gelagerte Proben sowie aus Bauwerken entnommene z. T. mit Chlorid belastete Proben. An den aus den Bauwerken entnommenen Proben wurde der Migrationskoeffizient D_{RIM} mit dem Jodidmigrationsversuch bestimmt. Dieses Verfahren wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens „Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonkonstruktionen“ DBV/AiF 225/12525 vorgestellt (LAY et al. 03.2004). Der Versuch basiert auf dem regulären Migrationszellenversuch, wobei hier die Prüflösung anstelle des Natriumchlorids NaCl mit Natriumjodid NaJ bei gleicher molarer Konzentration ersetzt wird. Am Ende der Prüfdauer

werden die Zylinderscheiben mittig gespalten und mit einer Indikatorlösung, bestehend aus Kaliumjodat, Stärkelösung und Essigsäure, besprüht und die Eindringtiefe bestimmt. Ähnlich wie bei der Ableitung des Altersexponenten nach (GEHLEN 2000), wurde für das Maß der Geschwindigkeit, mit welcher der Migrationskoeffizient asymptotisch auf einen konstanten Wert abfällt, der Altersexponent n_D eingeführt. Aus den Versuchen ging hervor, dass der Altersexponent, unabhängig von der Zementart, in dem Bereich von 0,8 – 1,1 schwankt. Bei der Verwendung von CEM II/A-LL ergab sich allerdings ein vollkommen aus dem Rahmen fallender Wert. Die Ursache hierfür blieb ungeklärt. Weitere Untersuchungen zur Klärung sind nicht bekannt geworden. Derzeit werden für die meisten Zemente Werte verwendet, die aus der Zusammensetzung der Zemente abgeleitet und nicht experimentell ermittelt wurden (RAHIMI 2017).

Des Weiteren wurde der Einfluss der Chloridbelastung auf den scheinbaren Diffusionskoeffizienten untersucht. Hierfür wurden Migrationsversuche an Proben mit Chlorid im Anmachwasser und an nachträglich mit Chlorid belasteten Proben durchgeführt. Aus den Ergebnissen ging hervor, dass sich, trotz unterschiedlich hoch eingestellter Chloridgehalte von 0,0 bis 1,5 M.-% im Anmachwasser, ähnliche Chloridprofile einstellen. Dies kann mit der chemischen Bindung der Chloride infolge der Hydratation erklärt werden.

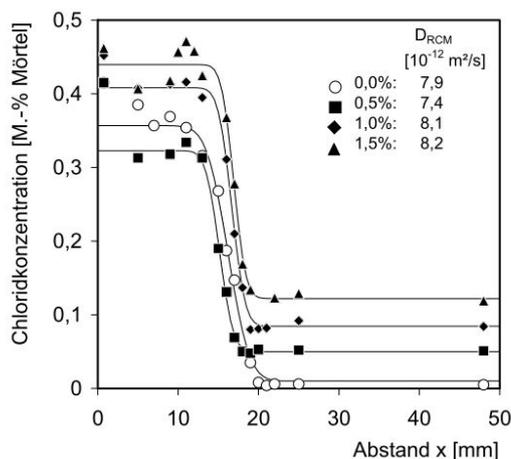


Bild 12: Chloridprofile von Mörtelproben, die mit unterschiedlichen Chloridgehalten (0,5, 1,0 und 1,5 %) im Anmachwasser vorbelastet wurden und an welchen anschließend ein RCM-Versuch mit einer Konzentration der Prüflösung von 3,0 M.-% NaCl durchgeführt wurde. Der Migrationskoeffizient D_{RCM} wurde durch Anpassung von Gleichung (4-13) an die Chloridprofile berechnet, Ausschnitt aus (DAFSTB 2007)

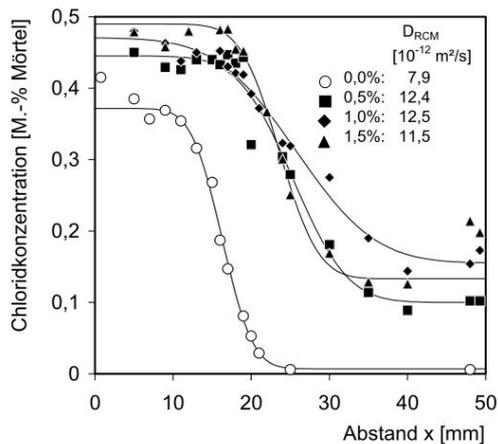


Bild 13: Chloridprofile von im RCM-Test mit unterschiedlichen Chloridgehalten (0,5; 1,0 und 1,5 %) vorbelasteten Proben nach Durchführung eines weiteren RCM-Versuchs bei einer Standardkonzentration von 3,0 M.-% NaCl, sowie die Anpassung von Gleichung (4-13) und der sich danach ergebende Migrationskoeffizient D_{RCM} (DAFSTB 2007)

Bei den nachträglich mit Chlorid beaufschlagten Proben wurden höhere Eindringtiefen und somit höhere Werte für den Migrationskoeffizienten festgestellt (vgl. Bild 12 und Bild 13).

In den Ausgangsstoffen von normgemäß hergestelltem Beton sind geringfügige Mengen an Chlorid enthalten und bis zu gewissen Grenzen zugelassen. Im Gesamtkontext für die Abschätzung der Wahrscheinlichkeit der Depassivierung der Bewehrung sind diese Mengen von untergeordneter Rolle. Diese Variable, als Grundchloridgehalt c_i sollte aber bei der Auswertung von Chloridprofilen berücksichtigt werden.

Weiterhin wurden in (DAFSTB 2007) Parameter quantifiziert, die z.B. die Oberflächenkonzentration in Abhängigkeit vom Abstand zur Fahrbahn und der Höhe über der Fahrbahnkante beschreiben. Diese Parameter werden als Eingangswerte für die Abschätzung der Depassivierung kurz erläutert:

Der Grundchloridgehalt c_i :

Der in Summe aus den Betonausgangsstoffen enthaltene Grundchloridgehalt wird mit der logarithmischen Normalverteilung abgeschätzt. Log-N ($\mu = 0,055$; $\sigma = 0,028 \text{ M.-%/z}$)

Die Oberflächenkonzentration c_s :

Der Mittelwert für die Oberflächenkonzentration ergibt sich durch Einsetzen des Abstandsvektors der betrachteten Bauwerksstelle (a und h in [m]). Insgesamt lautet die Schätzung: Log-N ($\mu = 0,86 \text{ M.-%/z}$; $\sigma = 0,62$ $\mu = 0,53 \text{ M.-%/z}$).

Die Konvektionsgeschwindigkeit $v(t)$:

Die zeit- und ortsabhängige Konvektionsgeschwindigkeit $v(t,r)$ wird durch Einsetzen des Abstandsvektors der betrachteten Bauwerksstelle (a , h in [m]) gemäß Gleichung (6-3) (LAY 2006) berechnet. Die weiter enthaltenden Variablen werden unabhängig von der Betonzusammensetzung entsprechend Bild 14 deterministisch eingesetzt. Die Streuung wird mit einer Gammaverteilung beschrieben. Nach Bild 14 gilt die Modellunsicherheit $\varepsilon_{v(t,r)}$: Gamma ($\mu = 0,96$; $\sigma = 0,56$).

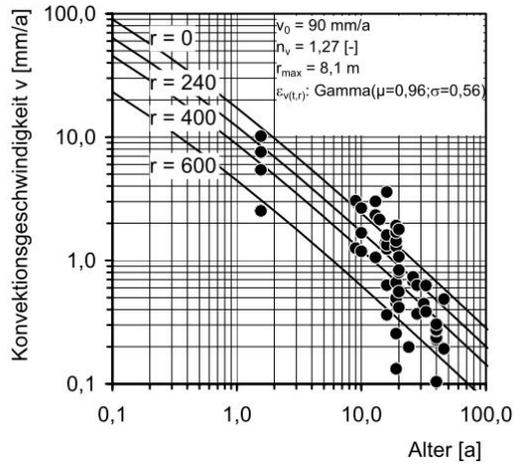


Bild 14: Quantifizierung der streuenden Konvektions-geschwindigkeit $v(t,r)$ [mm/a], als Funktion des Alters [a] und der Entfernung r [cm] zur Straße

Hierfür gilt:

$$v(t) = k_{V(w/b)} \cdot v_{(t,r)} \quad (6)$$

dabei sind:

- $k_{v(w/b)}$: Faktor zur Abhängigkeit der Konvektionsgeschwindigkeit v vom w/b -Wert (n. Gleichung (6-1) in (DAFSTB 2007), [-]
- $v_{(t,r)}$: Konvektionsgeschwindigkeit für Referenzbeton ($w/b= 0,50$) als Funktion des Alters t und des Abstands r zum Straßenrand, entsprechend Gleichung (6-3) in (DAFSTB 2007), [-]

Die Dispersivität Δl :

Der Dispersionskoeffizient D_L teilt sich in den scheinbaren Diffusionskoeffizienten D_{app} und den Anteil mechanischer Dispersion. Letzterer ist das Produkt aus der Dispersivität Δl und der Konvektionsgeschwindigkeit v [m/s]. Die Dispersivität wird als Submodell unabhängig von der Bindemittelart als Funktion des w/b-Wertes eingegeben (DAFSTB 2007).

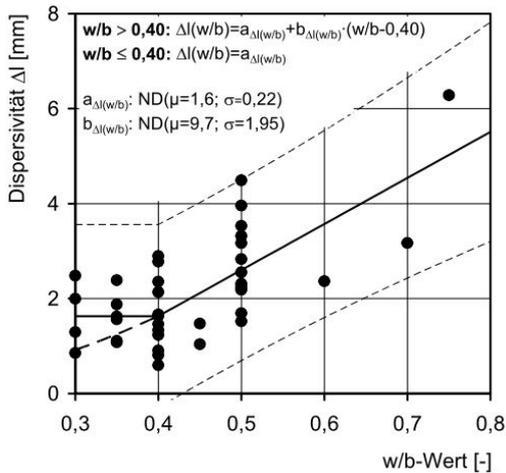


Bild 15: Dispersivität $\Delta l(w/b)$ von Beton berechnet aus Chloridprofilen nach 1,5-jähriger Auslagerung durch (NILSSON und OLLIVIER 1997); Unabhängig von der Bindemittelart für Betone mit Größtkorn 16 mm (DAFSTB 2007),

Der scheinbare Diffusionskoeffizient $D_{app(t)}$:

Der scheinbare Diffusionskoeffizient D_{app} ist der Anteil des Dispersionskoeffizienten $D_L(t)$, der sich unabhängig von der Konvektionsgeschwindigkeit $v(t)$ des Chlorids verhält (DAFSTB 2007).

Folgendes Gesamtmodell wird dargestellt:

$$c(x, t) = \frac{(c_s - c_i)}{2} \cdot \left[\left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - \mu_x}{\sqrt{2 \cdot \sigma_x}} \right) \right) + \exp \left(\frac{v(t) \cdot x}{D_L(t)} \right) \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - \mu_x}{\sqrt{2 \cdot \sigma_x}} \right) \right) \right] + c_i \quad (7)$$

mit

$$\mu_x = v(t) \cdot t \quad (8)$$

$$\sigma_x = \sqrt{2 \cdot D_L(t) \cdot t} \quad (9)$$

$$D_L(t) = D_{app(t)} + \Delta l \cdot v(t) \quad (10)$$

$$D_{app}(t) = \frac{(D_{app,0} - D_{app,\infty})}{(t - t_0) \cdot (1 - n_d)} \cdot \left[\left(\frac{t_0}{t} \right)^{n_d} \cdot t - t_0 \right] + D_{app(\infty)} \quad (11)$$

Modellrechnung nach KAPTEINA

Die Modellrechnung nach (KAPTEINA 2013) basiert auf dem Grundmodell von (GEHLEN 2000) sowie dem modifizierten AiF-Modell (LAY und SCHIEßL 2003) / fib Modelcode (FIB 2013).

Die Modellbildung basiert dabei auf folgenden Ansätzen:

- Der rechnerisch ermittelte Chloriddiffusionskoeffizient wird in jedem Tiefenbereich als konstant angenommen.
- Die Expositionsdauer ist der Zeitraum zwischen der ersten Chloridbeaufschlagung und dem Betrachtungszeitraum.
- Die Chloridoberflächenkonzentration C_{sa} wird im Mittel als zeitunabhängige Variable betrachtet, welche in Abhängigkeit der Jahreszeiten schwanken kann.
- Die Chloridoberflächenkonzentration C_{sa} wird mithilfe eines Übertragungsfaktors (1,27) in die Spritzwassereexposition überführt.
- Der Grundchloridgehalt C_i wird gemäß (DAFSTB 2007) mit einem Mittelwert $\mu = 0,055$ M.-%/z und einer Standardabweichung von $\sigma = 0,028$ M.-%/z beschrieben.
- Der effektive Chloriddiffusionskoeffizient D^*_{Eff} wird aus Chloridprofilen empirisch abgeleitet.

$$C(x, t_{exp}) = (C_{sa} - C_i) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D^*_{eff,R}(t_{exp}) \cdot t_{exp}}} \right] + C_i \quad (12)$$

mit

$$D^*_{eff,R}(t_{exp}) = k_R \cdot D_{RCM,0} \cdot k_t \cdot A_R(t_{exp}) \quad (13)$$

$$A_R(t_{exp}) = \left(\frac{t_{0,R}}{t_{exp}} \right)^{a_R} \quad (14)$$

dabei sind:

- $C(x, t_{exp})$: Chloridkonzentration in der Tiefenlage $x > x_K$ nach einer Expositionsdauer t_{exp} bezogen auf den Zementgehalt [M.-%/z]
- x_K : Tiefenbereich, der, durch ggf. intermittierende Chlorideinwirkung bedingt, eine vom 2. Fick'schen Diffusionsgesetz abweichenden Verlauf der Chloridkonzentrationen zeigt [mm]
- C_{sa} : Chloridkonzentration an der Betonoberfläche bezogen auf den Zementgehalt. Ist ein Tiefenbereich x_K vorhanden, so ist dies eine theoretische, durch Extrapolation bestimmte Konzentration [M.-%/z]
- C_i : Grundchloridgehalt des Betons bezogen auf den Zementgehalt [M.-%/z]
- x : Tiefenlage, ausgehend von der Betonoberfläche [mm]

- t_{exp} : Expositionsdauer [a], Zeitspanne von der ersten Beaufschlagung bis zum Beobachtungszeitpunkt
- $D_{\text{Eff,R}}^*(t_{\text{exp}})$: effektiver Chloriddiffusionskoeffizient von Beton von Straßenbauwerken nach einer Expositionsdauer t_{exp} [mm^2/a]
- $D_{\text{RCM},0}$: Chloridmigrationskoeffizient nach der RCM (Rapid Chloride Migration)-Methode von wassergesättigtem Beton an definiert hergestellten und vorgelagerten Probekörpern im Alter von 28 d [mm^2/a]
- k_t : Testmethodenfaktor, um Abweichungen zwischen Chloridmigrationskoeffizienten, die unter beschleunigten Bedingungen (Rapid Chloride Migration – $D_{\text{RCM},0}$) ermittelt werden, und Diffusionskoeffizienten, die unter natürlichen Bedingungen z.B. im Labor bestimmt werden (Chloride Profiling Method – $D_{\text{CPM},0}$), berücksichtigen zu können [-]
- k_R : Regressionsvariable zur Berücksichtigung von Abweichungen vom effektiven Chlorid-diffusionskoeffizienten im Vergleich zu Einlagerungsversuchen infolge geänderter Randbedingungen, welche Abweichungen vom reinen Diffusionsverhalten oder geänderte Diffusionsgeschwindigkeiten hervorrufen [-]
- $A_{R(t_{\text{exp}})}$: Altersterm des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten für verkehrsbedingt mit Spritzwasser beaufschlagten Beton [-]
- a_R : Exponent zur Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit von $D_{\text{Eff,R}}^*(t_{\text{exp}})$, Altersexponent [-]
- t_0 : Referenzzeitpunkt in [a]

Aus der Zusammenfassung in (KAPTEINA 11.2011) bzw. (KAPTEINA 2013) geht hervor, dass die ermittelten Chloridkonzentrationen stets größer waren als die am Bauwerk ermittelten Konzentrationen. Die Anzahl der zur Validierung verwendeten Proben ist nicht angegeben. Hieraus ergibt sich für den Schadensverlauf, infolge der chloridinduzierten Bewehrungskorrosion, ein auf der sicheren Seite liegendes Ende der Einleitungsphase (vgl. Bild 16).

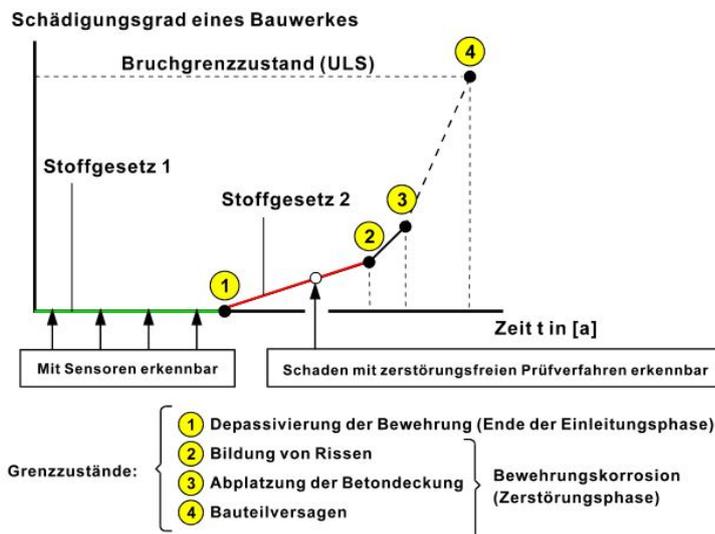


Bild 16: Schadensverlauf infolge Bewehrungskorrosion (GEHLEN 2000)

2.5.3 Vergleich wesentlicher Modelle

Die Beziehungen zur zeit- und tiefenabhängigen Darstellung des Chloridgehaltes sind nachfolgend für wesentliche Modelle zusammengestellt. Eine Zusammenstellung von Merkmalen enthält Tabelle 1

GEHLEN (GEHLEN 2000)

$$C(x, t) = C_{S, \Delta x} \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{\text{Eff}, C}(t) \cdot t}} \right] \quad \text{siehe (1)}$$

AiF / GEHLEN, LAY

$$C(x, t) = \left(C_o + (C_{S, \Delta x} - C_o) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{\text{app}, C}(t) \cdot t}} \right] \right) \quad \text{siehe (4)}$$

UNGRICHT

$$c(x, t) = \frac{1}{2} C_K \cdot \left[\operatorname{erf} \frac{h-x}{2 \cdot \sqrt{D_{\text{Eff}, t}}} + \operatorname{erf} \frac{h+x}{2 \cdot \sqrt{D_{\text{Eff}, t}}} \right] \quad \text{siehe (5)}$$

LAY

$$c(x, t) = \frac{(c_s - c_i)}{2} \cdot \left[\left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - \mu_x}{\sqrt{2} \cdot \sigma_x} \right) \right) + \exp \left(\frac{v(t) \cdot x}{D_L(t)} \right) \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - \mu_x}{\sqrt{2} \cdot \sigma_x} \right) \right) \right] + c_i \quad \text{siehe (7)}$$

KAPTEINA

$$C(x, t_{\text{exp}}) = (C_{Sa} - C_i) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{\text{eff}, R}(t_{\text{exp}}) \cdot t_{\text{exp}}}} \right] + C_i \quad \text{siehe (12)}$$

Tabelle 1 Chloridmigration Vergleich wesentlicher Modelle

	Gehlen (2000)	Aif (Gehlen/Lay)	Ungricht (2004)	Lay (2006)	Kapteina
Transportmechanismus	Diffusion	Diffusion	konvektiver Eintrag, Verteilung durch Diffusion	Konvektion Diffusion hydrodynamische Dispersion	Diffusion
Diff. Koeff.	konstant	zeitabhängig	zeitabhängig	Dispersionskoeffizient	
Exposition	Meerwasser	Straße	Straße	Straße	Straße
Randbedingung		$C(x,t)=C_s$; für $x=0$; $t>0$			
Abhängigkeiten		Alter (Hydratation) Alter(Nass-Trocken-Wechsel) Luftfeuchte, Temperatur	Alter Kapillartransport	Chlorid-Oberflächenkonzentration Konvektionsgeschwindigkeit, Dispersionskoeffizient	Alter Ersatz-Oberflächenkonzentration Ausdehnung der Konvektionszone
Vorteil	gut handhabbare Gleichungen mit begrenzter Anzahl Variablen	probabilistische Berechnung möglich	Berücksichtigung des diskontinuierlichen Chlorideintrages	Berücksichtigung weiterer Eindringmechanismen, probabilistische Berechnung möglich	Bestimmung von D_{eff} durch Kurvenfitting als allg. Transportvariable, die andere Vorgänge mit abbildet, probabilistische Berechnung möglich
Nachteil	kein Ausgangs-chloridgehalt berücksichtigt	getrennte Erfassung des expositions- und des materialbedingten Anteils der Chloriddiffusion (Aufwand, Unsicherheit)	aufwändige jährliche Berechnung Messung der Eingangswerte schwierig	hohe Komplexität, Gewinn an Zuverlässigkeit ungewiss	Definition einer Ersatz-Oberflächenkonzentration in der Tiefe der Konvektionszone, diese wird nicht betrachtet

2.5.4 Internationale Ansätze

Bereits vor fünf Jahrzehnten wurde damit begonnen, Modelle und Berechnungsverfahren zur Beschreibung des zeitlichen Verlaufes des Chlorideintrages in Beton zu entwickeln. Ein erstes Modell wurde 1970 von COLLEPARDI Et Al. in (COLLEPARDI, M., MARCIALIS, A. & TURRZIANI, R. 1970) beschrieben. Der Ansatz bestand darin, das 2. Fick'sche Gesetz mithilfe der Gaußschen Fehlerfunktion zu lösen, das Modell wird daher auch ERFC-Modell (von engl. error function) genannt. Die Prognose der zeit- und tiefenabhängigen Chloridkonzentration $C(x,t)$ erfolgt hierbei auf Grundlage eines konstanten Chloriddiffusionskoeffizienten D_a sowie einer konstanten Chloridkonzentration C_s an der Oberfläche, Gleichung (15).

$$C(x, t) = C_i + (C_s - C_i) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}}\right) \quad (15)$$

Die Schlüsselparameter dieses Modells, C_s und D_a , werden anhand von experimentell ermittelten Chlorideindringprofilen aus Feld- oder Laborversuchen zurückgerechnet. In diesem Zusammenhang wird auch von scheinbaren (engl.: apparent) Parametern gesprochen.

Auch später wurde diese Herangehensweise noch von vielen Autoren, z. B. TUUTTI (TUUTTI 1982), verwendet. Mit Zunahme der zur Verfügung stehenden Bauwerksdaten wurde in den späten 1980er Jahren festgestellt, dass der Chloriddiffusionskoeffizient, welcher den inversen Widerstand des Betons gegenüber Chlorideindringen charakterisiert, eine zeitabhängige Größe ist.

In den skandinavischen Ländern wurde mit Anfang der 1990er Jahre begonnen, in den Ansätzen zur Bestimmung der Chlorideindringung die Zeitabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten $D(t)$ und später auch der Oberflächenkonzentration $C(t)$ zu berücksichtigen (MINISTRY OF TRANSPORTATION, ROAD DIRECTORATE 1996). Die in der Folge entwickelten Modelle und Verfahren basierten mehrheitlich auf der analytischen Lösung des 2. Fick'schen Gesetzes und unterscheiden sich prinzipiell durch die berücksichtigten Anfangs- und Randbedingungen. Neben den mathematischen Ansätzen fanden auch zunehmend experimentell bestimmte Materialparameter und Bauwerksdaten Eingang in die Berechnungen. Dazu wurden Mitte der 1990er Jahre umfangreiche Feldversuche, unter anderem an der schwedischen Küste und entlang von Autobahnen, gestartet.

Im LIGHTCON-Modell, entwickelt von MAAGE Et Al. (MAAGE, M., HELLAND, H., POULSEN, E., VENNESLAND, O. & CARLSEN, J. E. 1996), werden ein zeitabhängiger Diffusionskoeffizient und eine konstante Oberflächenkonzentration berücksichtigt. Die Zeitabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten wird dabei über eine Potenzfunktion beschrieben (CARLSEN, J. E. & RILEM 2000). Der Exponent α ist dabei analytisch aus Versuchswerten zu bestimmen, Formel (16). Die Chloridkonzentration an der Oberfläche wird als konstant angenommen, ist jedoch abhängig von der Betonzusammensetzung und den lokalen Bedingungen (POULSEN und MEJLBRO 2006).

$$\frac{D(t)}{D_0} = \left(\frac{t_0}{t}\right)^\alpha \quad (16)$$

Dabei sind:

- D(t) zeitabhängiger Chloriddiffusionskoeffizient
- D₀ gemessener Referenzdiffusionskoeffizient im Alter t₀
- t Alter des Betons

Während das LIGHTCON-Modell hauptsächlich für Beton im Spritzwasserbereich von Meerwasser bzw. für unter Wasser liegende Konstruktionen (z. B. Brückenpfeiler) anwendbar ist, kann das HETEK-Modell auch für Beton im Sprühnebelbereich (Meerwasserexposition) und bei Belastungen mit Tausalzen angewendet werden (POULSEN 1998). Das HETEK-Modell ermöglicht dabei sowohl die Berücksichtigung eines zeitabhängigen Diffusionskoeffizienten als auch einer zeitabhängigen Oberflächenkonzentration. Der komplexe Ansatz erfordert für die Lösung jedoch die Verwendung von Software (Tabellenkalkulation) bzw. danach die Nutzung von Tabellen und Diagrammen.

In (FREDERIKSEN, J. M., MEJLBRO, L. & POULSEN, E. 2000) wird eine Vereinfachung des HETEK-Modells vorgestellt, die jedoch nur für Beton in mariner Umgebung, Bild 17 anwendbar ist.

Das HETEK-Modell ist eine Weiterentwicklung bzw. ein Spezialfall des Mejlbro-Poulsen-Modells (FREDERIKSEN, J. M. & GEIKER, M. 2008), (FREDERIKSEN, J. M. & POULSEN, E. 1997), siehe Gleichung (17) wie FREDERIKSEN, ET.AL. in (FREDERIKSEN, J. M., MEJLBRO, L. & NILSSON, L.-O. 2009) berichten. Die hinter den beiden oben genannten Modellen stehenden mathematischen Ansätze werden ausführlich in (DAFSTB 2007) behandelt.

$$C(x, t) = C_i + (C_{sa} - C_i) \times \Psi_p(z) \quad (17)$$

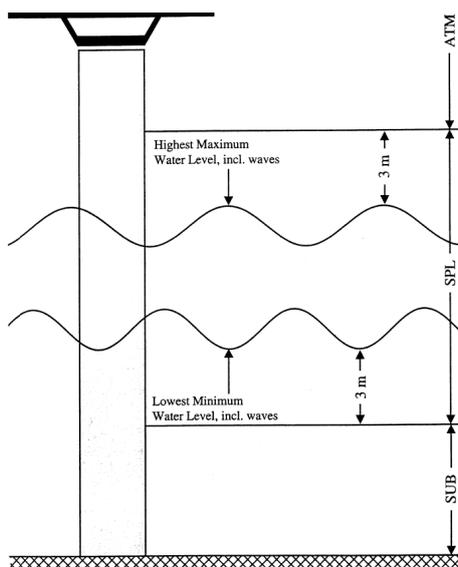


Bild 17: Schematische Darstellung eines Brückenpfeilers zur Darstellung der Definition der verschiedenen Expositionen in mariner Umgebung (submerged, splash, atmospheric) (FREDERIKSEN, J. M., MEJLBRO, L. & NILSSON, L.-O. 2009)

TANG und NILSSON entwickelten das ClinConc-Modell (Cl in Concrete) (NILSSON, L.-O., POULSEN, E., SANDBERG, P. SØRENSEN, H. E. & KLINGHOFFER, O. 1996). Im Gegensatz zu den Vorgenannten basiert dieses auf einem numerischen Ansatz und ermöglicht die Berücksichtigung der meisten der am Chlorideintrag beteiligten Einflüsse. Für die Berechnung muss der Diffusionskoeffizient des jeweiligen Betons experimentell bestimmt werden. Da das Modell auf einem reinen Diffusionsprozess basiert, ist der ursprüngliche Ansatz im Grunde nur für Betonbauteile welche vollständig im Meerwasser liegen geeignet (UNGRICHT 09.2004). In (TANG, L. & NILSSON, L.-O. 2000) und (TANG, L. & NILSSON, L.-O. 2002) berichten TANG und NILSSON über eine erste Erweiterung des ClinConc-Modells Anfang der 2000er Jahre, die auf dem Zuwachs an Erfahrungen und Wissen sowie der im Laufe der Jahre größer gewordenen Datenbasis aus den Feldversuchen beruht. Diese Erweiterungen ermöglichen die Anwendung des Modells für alle Bereiche mit Meerwassereexposition (submerged, splash and atmospheric zones) sowie für Beton in Straßenbauwerken mit Tausalzbeanspruchung. In (TANG und LINDVALL 2013) wird über weitere Anpassungen des ClinConc-Modells berichtet und über die Entwicklung vom numerischen Modell hin zu einem mehr ingenieurmäßigen Ansatz.

BENTZ und THOMAS entwickelten das sogenannte Toronto-Modell (THOMAS und BENTZ 1999) bzw. Life-365 (STIPANOVIC OSLAKOVIC et al. 2010). Die Anwendung war für bewehrte Tunneln gedacht. Ähnlich wie das ClinConc-Modell basiert auch das Toronto-Modell auf einem physisch/numerischen Ansatz. Neben der Chloriddiffusion werden weitere, am Chlorideintrag beteiligte, Mechanismen (z. B. Feuchtetransport oder die Chloridbindung) berücksichtigt. Die gewählte Herangehensweise mit acht, teilweise zeitabhängigen, Eingangsparametern erfordert wieder den Einsatz von Berechnungssoftware. Ergebnis der Berechnung ist das Chloridprofil zu einem gewünschten Zeitpunkt.

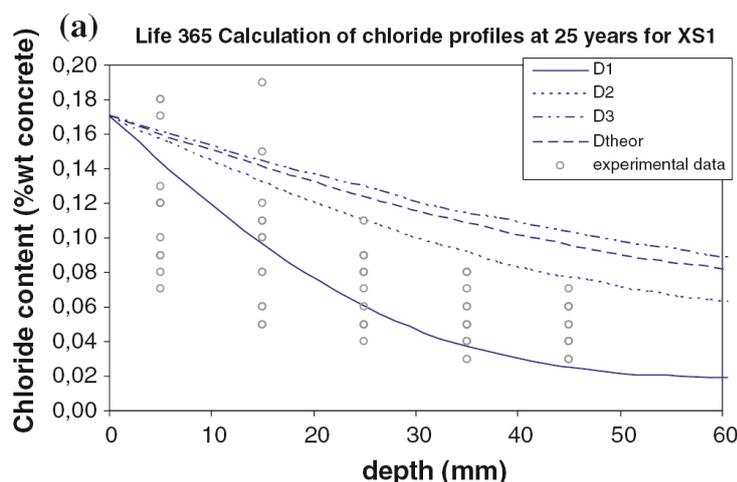


Bild 18: Vergleich zwischen mit Life-365 berechneten Chloridprofilen und Versuchsdaten (STIPANOVIC OSLAKOVIC et al. 2010)

WEYERS nutzt in (WEYERS 1998) ebenfalls den Ansatz, den Chlorideintrag durch Lösung der Differentialgleichung mit Hilfe der Fehlerfunktion zu ermitteln. Ausgehend von einer Analyse von Chloridprofilen aus einem Bauwerk schätzt Weyers den weiteren Chlorideintrag ab. Aufgrund der gesammelten Versuchsdaten geht er davon aus, dass die oberflächennahe Chloridkonzentration nur über einen Zeitraum von ca. 5 Jahren zeitabhängig ist.

Die gleiche Herangehensweise ist Ausgangspunkt für die Untersuchungen in (SAGÜÉS et al. 1998). Zusätzlich wird von SAGUES ET AL. die statistische Verteilung der Messergebnisse berücksichtigt. Im Ergebnis wird die Fläche bestimmt, wo an der Bewehrung der kritische Chloridgehalt überschritten wird.

Einen ähnlichen Ansatz beschreiben auch KIRKPATRICK ET AL. in (KIRKPATRICK et al. 2002). Die notwendigen Versuchsdaten (Oberflächenkonzentration, Chloriddiffusionskoeffizient und Betondeckung) wurden aus zehn Brückenbauwerken gewonnen.

MARTIN-PÉREZ modelliert den Chlorideintrag auf Basis einer modifizierten Version des 2. Fick'schen Gesetzes (MARTIN-PEREZ 1999). Dabei wird der Chloridtransport sowohl über Diffusion als auch durch Konvektion im Zuge des Feuchtetransportes berücksichtigt. Die Differentialgleichung wird auf numerischem Wege gelöst.

Neben den Modellen mit empirischem Ansatz (analytische oder numerische Lösung der Fick'schen Diffusionsgesetze) gibt es auch hier Modelle mit rein physikalischem Ansatz. Da die physikalische Modellierung darauf ausgerichtet ist, die Eindringprozesse so wirklichkeitsnah wie möglich abzubilden, sind die Modelle in der Regel sehr komplex. Im Stadium-Modell (SAMSON 2014) wird der Ionen-Transport mit einer erweiterten Nernst-Planck-Gleichung modelliert. Die Gleichungssysteme werden anschließend mit Hilfe der Finite Elemente Methode (FEM) gelöst. Das Modell berücksichtigt eine Vielzahl an Materialparametern. Neben dem Diffusionskoeffizienten finden auch die Porosität und die Permeabilität Eingang in die Berechnungen. Ergebnis ist am Ende unter anderem der tiefenabhängige Chloridgehalt.

In England führte BAMFORTH Langzeitstudien mit Betonprüfkörpern unterschiedlicher Zusammensetzungen durch, die er an der Küste Englands dem Spritzwasser aussetzte (BAMFORTH 1995). Zu verschiedenen Zeitpunkten wurden daran Chloridprofile bestimmt und rechnerisch mit Hilfe der, auf der Arbeit von CRANK (CRANK 1979) basierenden, in Gleichung (18) dargestellten Lösung der Fick'schen Diffusionsgesetze analysiert.

$$C(x, t) = C_0 \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{\text{eff}} \cdot t}}\right) \quad (18)$$

Dabei sind:

$C(x,t)$ Chloridkonzentration in Tiefe x zur Zeit t

C_0 Oberflächenkonzentration

D_{eff} effektiver Diffusionskoeffizient

Die Auswertung der Daten ergab, dass der Diffusionskoeffizient mit zunehmender Zeit – in Abhängigkeit der Betonzusammensetzung – zum Teil stark abnahm. Dies wird in (BAMFORTH 1995) darauf zurück geführt, dass der Chlorideintrag während der ersten Monate vorwiegend durch den kapillaren Transport erfolgte. Als Folge schlägt Bamforth ein zweistufiges Modell vor bei dem zusätzlich zur Diffusion auch der Kapillartransport berücksichtigt wird.

NGUYEN ET AL. berichten in (NGUYEN et al. 2017) über ein komplexes numerisches Modell zur Bestimmung der Chlorideindringung. Der Chloridtransport wird mittels einer Massenbilanzgleichung modelliert, die neben der Diffusion und der Konvektion auch chemische Aktivitäten und Thermodiffusion beinhaltet.

3 Anforderungen an Innenschalenbeton

3.1 Allgemeines

Für die Herstellung der Tunnelinnenschalen aus Stahlbeton existieren technische Regelwerke, die zu einem Teil Stahlbeton allgemein zum Inhalt haben und zum anderen Teil speziell auf Ingenieurbauwerke oder Tunnel ausgerichtet sind.

Für das Forschungsthema werden schwerpunktmäßig die Regelwerke des Zeitraumes betrachtet, in dem die meisten Bauwerke aus der Länderumfrage in Betrieb genommen wurden. Dabei handelt es sich um den Zeitraum von 1972 (1 Bauwerk von 1963) bis 2014. Geht man von einer mehrjährigen Bauzeit aus, bilden die in der Länderumfrage genannten Bauwerke überwiegend den Stand der Regelwerke seit 1970 ab.

In diesem Zeitraum haben sich die Anforderungen an Stahlbetonbauteile für Tunnelinnenschalen verändert. Darüber hat sich die Regelungsdichte durch spezielle Regelwerke für Ingenieurbauwerke allgemein und speziell für Tunnel im Lauf der Zeit erhöht.

Technische Regeln

Für Tunnel im Zuge von Bundesfernstraßen sind für den Zeitraum ab 1970 die folgenden Normen zu nennen:

- DIN 1045, Beton- und Stahlbetonbau, Bemessung und Ausführung, (DIN 1045 01.1972), (DIN 1045 12.1978) und (DIN 1045 07.1988)
- DIN 1045-1, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 1: Bemessung und Konstruktion, (DIN 1045-1 07.2001) und (DIN 1045-1 08.2008)
- DIN EN 1992-2, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln (DIN EN 1992-2 12.2010) in Verbindung mit den jeweils gültigen national festgelegten Parametern (DIN EN 1992-2/NA 04.2103)
- DIN EN 206-01, Beton, Teil 1 - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität (DIN EN 206-1 07.2001)
- DIN 1045-2, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1 (DIN 1045-2 07-2001), (DIN 1045-2 08.2008)

Für die Normen waren im Zeitraum ihrer Gültigkeit jeweils davon auszugehen, dass sie die anerkannten Regeln der Technik abbilden. Sie wurden darüber hinaus im Allgemeinen für den Bereich des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur und seiner Vorgängereinrichtungen verbindlich eingeführt. Sie waren demnach für den Bau von Tunnelinnenschalen anzuwenden.

Darüber hinaus wurden für den Bereich der Bundesfernstraßen spezielle technische Regelwerke eingeführt:

- ZTV-K: Zusätzliche Technische Vorschriften / Vertragsbedingungen für Kunstbauten, (ZTV-K 76 1979), (ZTV-K 80 1980), (ZTV-K 88 1989) und (ZTV-K 1996)
- ZTV-TUNNEL, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Straßentunneln (ZTV-TUNNEL 1995) und (ZTV-TUNNEL 1999)
- ZTV-ING, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, (ZTV-ING 2003), seit der Einführung 2003, als Loseblattsammlung mehrfach aktualisiert

Für die Herstellung von Stahlbetonbauteilen für Tunnelinnenschalen ergaben sich die in Anlage 1 zusammengestellten wesentlichen Anforderungen hinsichtlich Zusammensetzung des Betons und Betondeckung der Bewehrung. Soweit die Regelwerke die Anforderungen in Abhängigkeit von bestimmten Randbedingungen vorgeben, wurden solche ausgewählt, die für Tunnelinnenschalen gebräuchlich und plausibel sind.

Die Übersicht in Anlage 1 zeigt, dass bei allen Regelwerken über den Betrachtungszeitraum eine Tendenz zu einem größeren Widerstand der Bauteile besteht. Dieser größere Widerstand soll vor allem durch eine höhere Betondeckung der Bewehrung, einen tendenziell steigenden Zementgehalt sowie durch die Begrenzung der Kapillarporosität auf dem Weg sinkender Wasser-Zement-Werte erreicht werden.

Vermutlich auf Feststellungen an realen Bauwerken basierend, waren die Vorgaben im Bereich des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur und seiner Vorgängereinrichtungen allgemein stärker auf die Dauerhaftigkeit der Bauteile ausgerichtet, als die Normen im Bereich des allgemeinen Hochbaus.

Mit dem Erscheinen der ZTV-ING ist festzustellen, dass hinsichtlich der Einstufung in Expositionsklassen eine gewisse Diskrepanz zur Normung besteht. So ist die nach ZTV-ING für Tunnelbauteile mit Wasserdruckbeanspruchung vorgegebene Expositionsklasse hinsichtlich der Chloridbelastung aus Taumitteln mit XD2 (nass, selten trocken) vorgegeben. Das kann formal wegen der äußeren Wasserbelastung gelten, für die durch Taumittel belastete Luftseite der Tunnelbauteile stellt sich vermutlich ein solcher Feuchtezustand bei intakter Abdichtung kaum ein.

4 Länderabfrage

4.1 Allgemeines

Im Rahmen einer 2013 durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und die BAST initiierten Abfrage wurden Fragebögen zu Chloridbelastungen in Straßentunneln an die zuständigen Brückenreferenten der Länder übermittelt.

Die zur Verfügung stehenden Daten aus den Rückmeldungen wurden zunächst zusammengefasst und, sofern möglich, systematisiert. Anschließend wurde am Beispiel Bayern versucht unter Berücksichtigung der zusätzlich zu den Fragebögen vorliegenden Untersuchungsergebnisse und der Bauwerksbücher Zusammenhänge zwischen der Chloridbelastung und quantitativen Parametern herzustellen.

Im Zuge der Länderabfrage wurden für jedes betroffene Bauwerk die folgenden Informationen abgefragt:

- Tunnelname,
- Tunnellänge,
- Tunnelquerschnitt,
- Höhe des Tunnels ü. NN,
- Ausrichtung des Tunnelportals (Himmelsrichtung),
- Straßentyp,
- Jahr der Inbetriebnahme,
- Art der Tunnelwandoberfläche,
- Betonrezeptur der Innenschale, ggf. getrennt für Portalblock und Innenbereich,
- Neigung der Fahrbahn an Stellen mit hoher Chloridbelastung,
- Höhenprofil an Stellen mit hoher Chloridbelastung,
- durchschnittlicher Chloridgehalt im Beton in Abhängigkeit von der Tiefe,
- betroffene Gesamtfläche,
- Zustand der Innenschale mit Blick auf vorhandene Bewehrungskorrosion,
- Angaben zum Streumittleinsatz: Wird auch im Tunnel gestreut? Welches Streumittel wird verwendet? Ca. Anzahl der Tage mit Streumittleinsatz / Jahr.

Sofern vorhanden, wurde um die Übermittlung von Prüfberichten gebeten.

4.2 Erfassung der Daten

Die Ergebnisse der Länderabfrage werden nachfolgend zusammengefasst und ausgewertet. Insgesamt gingen Rückmeldungen zu 53 Bauwerken ein. Zusätzlich wurden zwei weitere Tunnel einbezogen, für die Prüfberichte vorlagen (Tunnel Allach, Tunnel Alte Burg). Von den 55 Bauwerken waren 24¹ nachweislich mit Chloriden belastet.

Bei der Bewertung der Angaben in den Fragebögen ist jedoch zu beachten, dass einerseits die Bauwerke, an denen keine Chloridbelastung festgestellt wurde, bisher nicht untersucht wurden

¹ Im Schürzeberg tunnel (Hessen) wurden vor der Sanierung auch Chloride in den Kappen nachgewiesen. Da für die Wände keine Ergebnisse vorlagen und die Kappen erneuert wurden, wurde der Tunnel bei der Auswertung ausgeklammert.

und andererseits die Untersuchungen zum Chloridgehalt von den Betreibern der Bauwerke vermutlich dort beauftragt wurden, wo sich bereits visuell feststellbare Anzeichen für Bewehrungskorrosion zeigten.

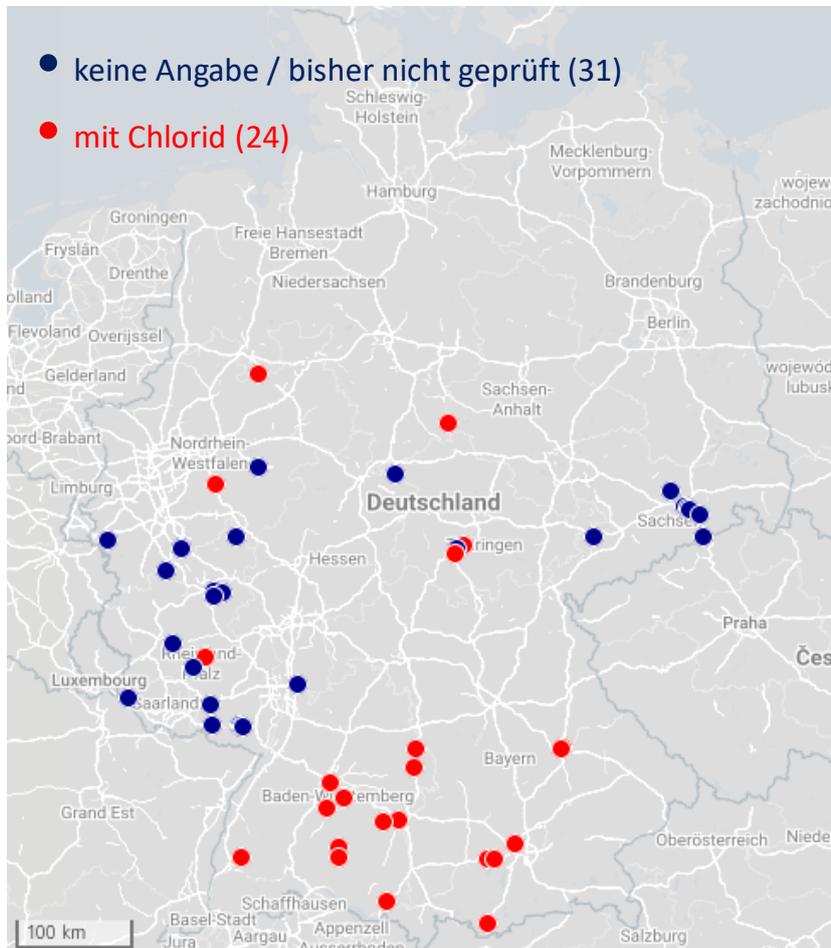


Bild 19: Rückmeldungen zur Länderabfrage – Lage der Tunnel (Quelle: uMap / OSM)

Ein Anteil von geschädigten oder auffällig belasteten Bauwerken am Gesamtbestand kann aus den angegebenen Zahlen nicht abgeleitet werden. Es ist zu vermuten, dass hinsichtlich hoher Chloridgehalte im Beton und bereits laufender Bewehrungskorrosion eine hohe Dunkelziffer besteht, weil die chloridinduzierte Bewehrungskorrosion über längere Zeiträume keine oberflächlich sichtbaren Schäden verursacht.

Die Lage der gemeldeten Tunnel steht einerseits im Zusammenhang mit der Topographie der Bundesländer. Sofern Tunnel zur Vermeidung großer Höhenunterschiede im Verlauf von Straßen dienen, konzentrieren sie sich auf bergige Regionen. Andererseits werden Tunnel gebaut, um in Ballungsgebieten und Regionen mit dichtem Verkehrsnetz eine Entflechtung des Verkehrs zu ermöglichen. Die regionale Verteilung der gemeldeten Tunnel gibt diese Aspekte wieder. Die zunehmende Zahl an Lärmschutztunneln, die unabhängig von der Topographie gebaut werden, hat sich noch nicht wesentlich in der Länderumfrage niedergeschlagen.

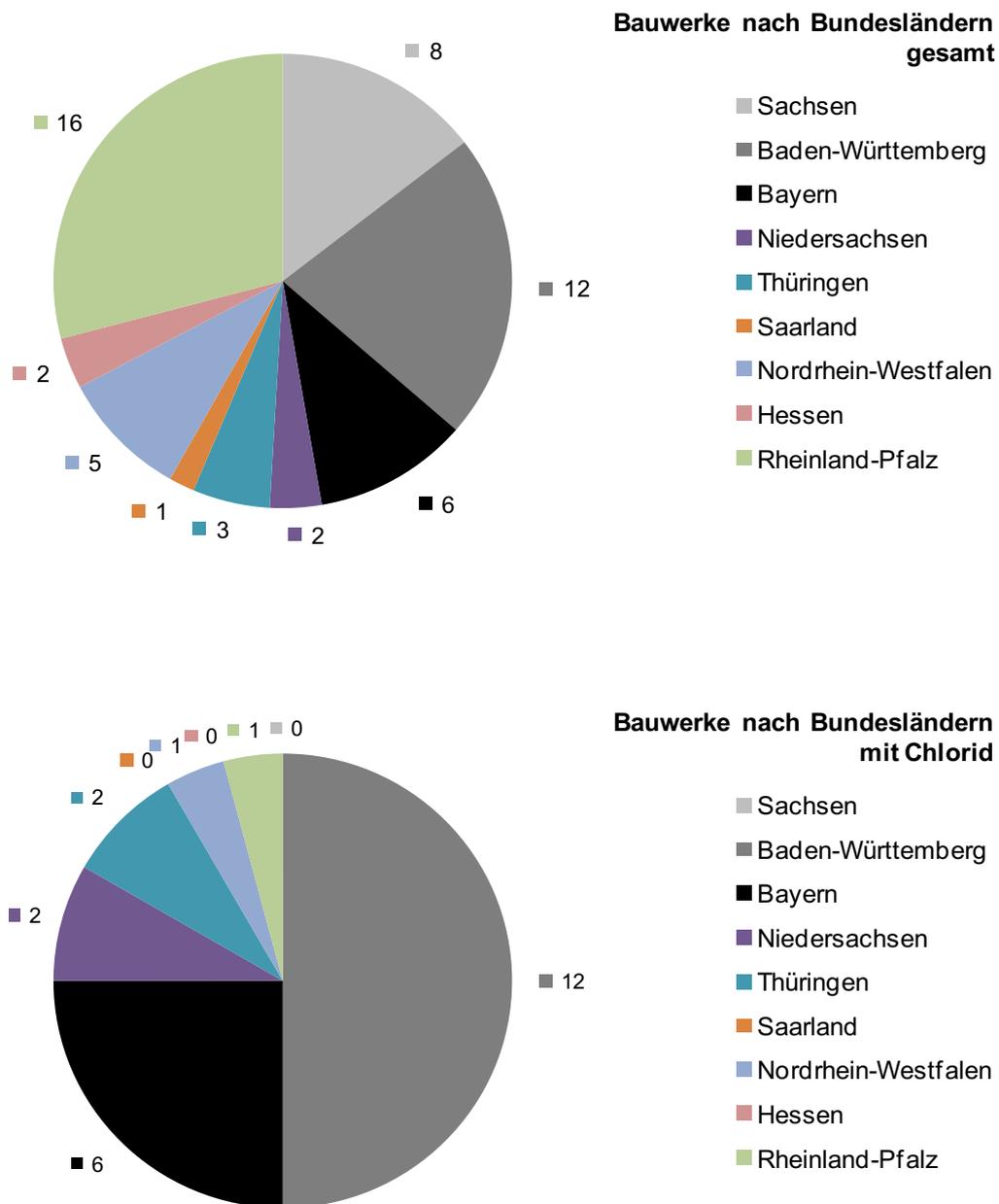


Bild 20: Rückmeldungen Bauwerke nach Bundesländern

Die Anzahl der Bauwerke mit Chlorid, bezogen auf die Anzahl der gemeldeten Bauwerke, ergibt keinen Hinweis auf den Umfang der Chloridbelastung. Sie ist lediglich ein Maß für die Anzahl der beprobten Tunnel, da bei jeder Beprobung Chlorid nachgewiesen wurde. Die Angabe prozentualer Anteile erscheint deshalb nicht zielführend.

In den nachfolgenden Tabellen sind die einzelnen Tunnelbauwerke getrennt nach Bundesländern aufgeführt. Ein negativer Eintrag (-) in der Spalte „Chloride“ bedeutet dabei lediglich, dass der Tunnel noch nicht auf Chloride geprüft wurde.

lfd. Nr.	Bez.	Tunnelname	Straße	Chloride	Inbetriebnahme
1	SN1	Königshainer Berge	A4	-	1999
2	SN2	Altfranken	A17	-	2004
3	SN3	Dölzschen	A17	-	2004
4	SN4	Coschütz	A17	-	2004
5	SN5	Meuschaer Höhe	A17	-	2005
6	SN6	Harthe	A17	-	2007
7	SN7	Mosel	B93	-	1993
8	SN8	Schottenberg	B101	-	2007

Tabelle 2: Rückmeldungen zur Länderabfrage (Sachsen)

lfd. Nr.	Bez.	Tunnelname	Straße	Chloride	Inbetriebnahme
9	BW1	Schönbuch-Tunnel	A81	ja	1979
10	BW2	Agnesburg	A7	ja	1987
11	BW3	Virngund	A7	ja	1987
12	BW4	Herfatz	A96	ja	1990
13	BW5	Johannesgraben	B14	ja	1975
14	BW6	Schlossbergtunnel Tübingen	B28	ja	1979
15	BW7	Sigmaringen	B32	ja	1976
16	BW8	Schlossbergtunnel Veringenstadt	B32	ja	1976
17	BW9	Neckartailfingen	B297	ja	1997
18	BW10	Lehrer-Tal	B10	ja	1972
19	BW11	Blaubeuren	B28	ja	1981
20	BW12	Hugenwald	B294	ja	1985

Tabelle 3: Rückmeldungen zur Länderabfrage (Baden-Württemberg)

lfd. Nr.	Bez.	Tunnelname	Straße	Chloride	Inbetriebnahme
21	BY1	Pfaffenstein	A93	ja	1985
22	BY2	Prüfening	A93	ja	1977
23	BY3	Farchant	B2	ja	2001
24	BY4	Eching	A96	ja	2000
25	BY5	Etterschlag	A96	ja	1995
26 ¹⁾	BY6	Allach	A99	ja	1998

¹⁾ nicht Bestandteil der Länderabfrage

Tabelle 4: Rückmeldungen zur Länderabfrage (Bayern)

lfd. Nr.	Bez.	Tunnelname	Straße	Chloride	Inbetriebnahme
27	NS1	Haselkopftunnel	B242	ja	1995
28	NS2	Lärmschutztunnel Dissen	A33	ja	2014

Tabelle 5: Rückmeldungen zur Länderabfrage (Niedersachsen)

lfd. Nr.	Bez.	Tunnelname	Straße	Chloride	Inbetriebnahme
29	TH1	Hochwald	A71	ja	2001
30	TH2	Rennsteigtunnel	A71	-	2003
31 ¹⁾	TH3	Alte Burg	A71	ja	2002

¹⁾ nicht Bestandteil der Länderabfrage

Tabelle 6: Rückmeldungen zur Länderabfrage (Thüringen)

lfd. Nr.	Bez.	Tunnelname	Straße	Chloride	Inbetriebnahme
32	SL1	Pellinger Berg	A8	-	1998

Tabelle 7: Rückmeldungen zur Länderabfrage (Saarland)

lfd. Nr.	Bez.	Tunnelname	Straße	Chloride	Inbetriebnahme
33	NRW1	Europatunnel	L 238	-	1996
34	NRW2	Oberkassel Tunnel	B42	ja	1982
35	NRW3	Rathautunnel Lüdenscheid	L 530	ja	1972
36	NRW4	Dollendorf	B42	-	1984
37	NRW5	Olpe	A46	-	1999

Tabelle 8: Rückmeldungen zur Länderabfrage (NRW)

lfd. Nr.	Bez.	Tunnelname	Straße	Chloride	Inbetriebnahme
38	HE1	Schürzeberg tunnel (sanieret)	B27	vor San.	1992
39	HE2	Saukopftunnel	B38	-	1999

Tabelle 9: Rückmeldungen zur Länderabfrage (Hessen)

lfd. Nr.	Bez.	Tunnelname	Straße	Chloride	Inbetriebnahme
40	RP1	St. Barbaratunnel	B62	-	2005
41	RP2	Lingenbergtunnel	B257	-	2008
42	RP3	Ditschhardtunnel	B257	-	1996
43	RP4	Glockenbergertunnel	B42	-	2003
44	RP5	Lahneckertunnel	B42	-	1978
45	RP6	Lindenbachtunnel	B260	-	2000
46	RP7	Malbergtunnel	B260	-	2006
47	RP8	Burgbergtunnel	K 101/ 231	-	1997
48	RP9	Hellbergtunnel (teilsaniert)	B41	ja	1963
49	RP10	Altenbergtunnel	B41	-	1991
50	RP11	Hörnchenbergtunnel	A62	-	1989
51	RP12	Fehrbachtunnel	B10	-	2000
52	RP13	Kostenfelstunnel (san.)	B10	-	1998
53	RP14	Staufertunnel (san.)	B10	-	1998
54	RP15	Löwenherztunnel (san.)	B10	-	1997
55	RP16	Barbarossatunnel (san.)	B10	-	1997

Tabelle 10: Rückmeldungen zur Länderabfrage (Rheinland-Pfalz)

In Bild 21 ist die Altersverteilung der gemeldeten Bauwerke in Dekaden grafisch dargestellt. Wie o. a. lassen sich jedoch hieraus keinerlei Rückschlüsse ziehen, da es keine „negativen“ Untersuchungsergebnisse gibt – von 25 Tunneln die u. a. hinsichtlich ihrer Chloridbelastung untersucht wurden, konnten bei allen Bauwerken Chloride nachgewiesen werden. Die tendenzielle Zunahme des Anteils chloridbelasteter Bauwerke mit steigendem Bauwerksalter hat ihre Ursache vermutlich auch darin, dass ältere Bauwerke von den Baulastträgern bevorzugt auf Chloride geprüft wurden. Da die Beprobung eines Bauwerkes nach den vorliegenden Berichten regelmäßig zum Nachweis einer Chloridbelastung führte, steigt der Anteil der belasteten Bauwerke mit der Untersuchungsdichte, die wiederum mit dem Bauwerksalter größer wird.

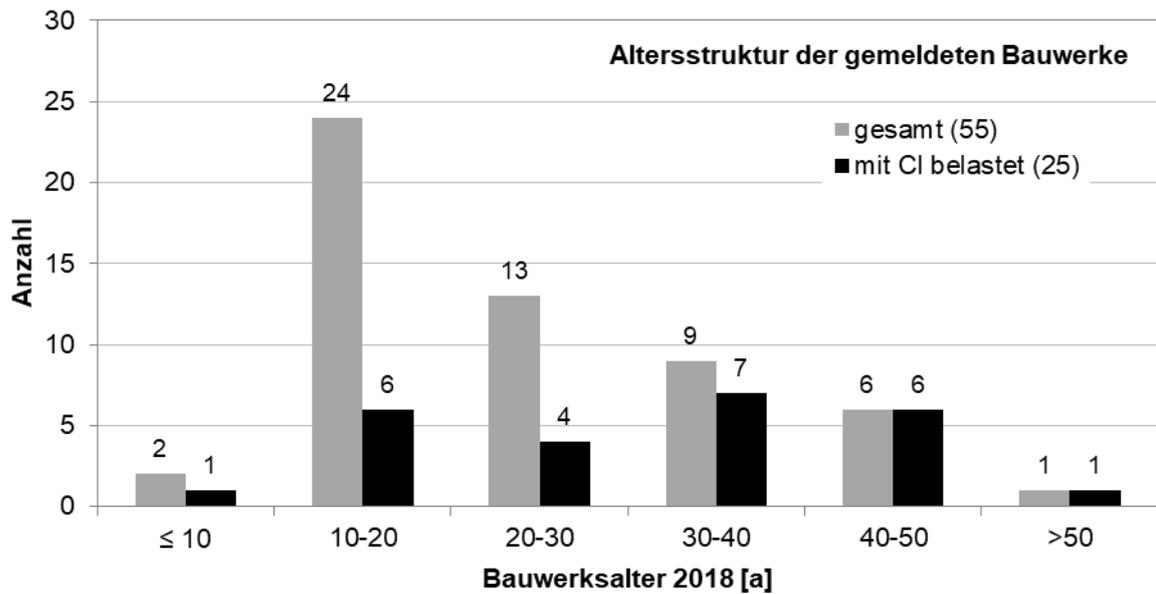


Bild 21: Altersstruktur der gemeldeten Bauwerke (Alter im Jahr 2018)

4.3 Tunnel mit Chloridbelastung

4.3.1 Qualitative Analyse

In Tabelle 11 sind als Ergebnis der Länderabfrage die Tunnel mit Chloridbelastung zusammengefasst.

Ein erstes quantifizierbares Kriterium ist der Straßentyp. Die chloridbelasteten Tunnel aus der Länderabfrage liegen dabei nahezu gleichmäßig verteilt an Bundesstraßen und Autobahnen (Bild 22), so dass sich hieraus keine neuen Erkenntnisse ergeben.

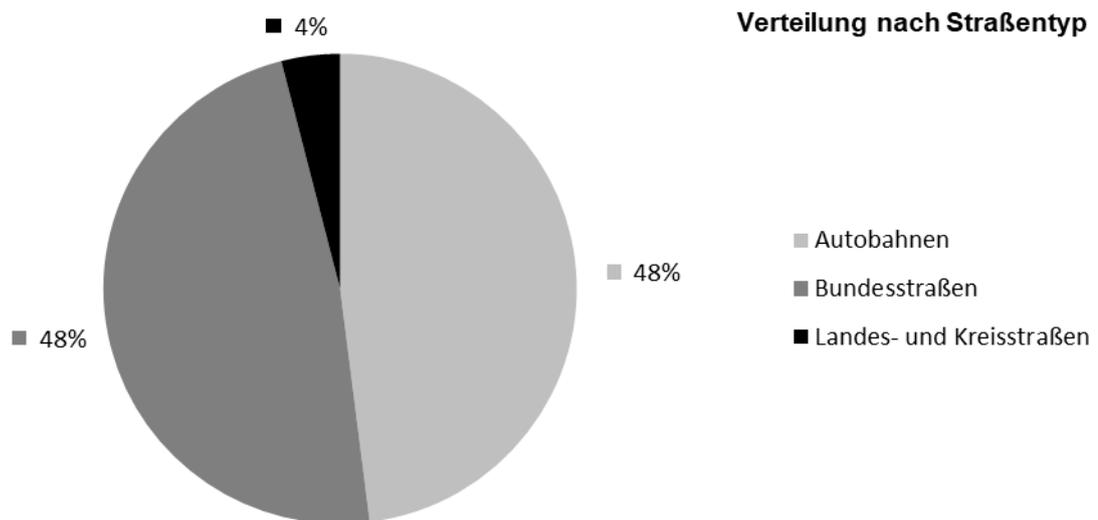


Bild 22: Chloridbelastete Straßentunnel nach Straßentyp

lfd. Nr.	Bez.	Tunnelname	Straße	Lage
9	BW1	Schönbuch-Tunnel	A81	71083 Herrenberg
10	BW2	Agnesburg	A7	73463 Westhausen
11	BW3	Virngund	A7	73488 Ellenberg
12	BW4	Herfatz	A96	88239 Wangen i.A.
13	BW5	Johannesgraben	B14	70569 Stuttgart
14	BW6	Schlossbergtunnel Tübingen	B28	72070 Tübingen
15	BW7	Sigmaringen	B32	72488 Sigmaringen
16	BW8	Schlossbergtunnel Veringenstadt	B32	72519 Veringenstadt
17	BW9	Neckartailfingen	B297	72666 Neckartailfingen
18	BW10	Lehrer-Tal	B10	89081 Ulm
19	BW11	Blaubeuren	B28	89143 Blaubeuren
20	BW12	Hugenwald	B294	79183 Waldkirch
21	BY1	Pfaffenstein	A93	93059 Regensburg
22	BY2	Prüfening	A93	93049 Regensburg
23	BY3	Farchant	B2	82490 Farchant
24	BY4	Eching	A96	82279 Eching am Ammersee
25	BY5	Etterschlag	A96	82237 Wörthsee
26	BY6	Allach	A99	80999 München
27	NS1	Haselkopftunnel	B242	38700 Braunlage
28	NS2	Lärmschutztunnel Dissen	A33	49201 Dissen
29	TH1	Hochwald	A71	98544 Zella-Mehlis
31	TH3	Alte Burg	A71	99330 Gräfenroda
34	NRW2	Oberkassel Tunnel	B42	53227 Bonn
35	NRW3	Rathaustunnel Lüdenscheid	L 530	58507 Lüdenscheid
48	RP9	Hellbergtunnel (teilsaniert)	B41	55606 Kim

Tabelle 11: Tunnel mit Chloridbelastung

Da die alleinige Kenntnis des Bauwerkstyps keine direkte Auskunft über die Verkehrsbelastung gibt, wurde die Verkehrsmenge in unmittelbarer Nähe der Tunnel (z. B. Autobahnstreckenabschnitt oder fest installierte Anlagen) ermittelt und in Bild 23 grafisch dargestellt. Im Ergebnis lässt sich kein qualitativer Zusammenhang zwischen Chloridbelastung und Verkehrsstärke (2.800 – 120.000 Fahrzeuge in 24h) feststellen.

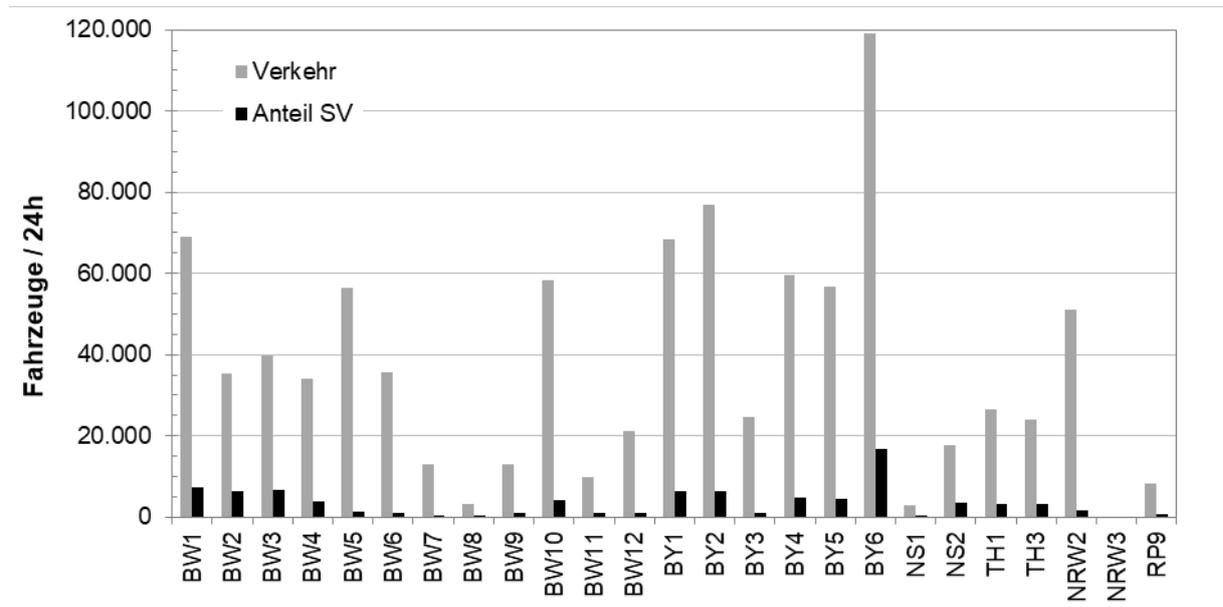


Bild 23: Verkehrsmenge (2015) in unmittelbarer Nähe zum Bauwerk (BAST 26.01.2017), (SVZ-BW 14.06.2018)

Ein weiteres qualitatives Merkmal ist die Bauweise/Bauart der Tunnel (Bild 24). Auch hier gibt es keine wirklichen Tendenzen. Die Bauweise ist dabei eng verknüpft mit dem Profil des Tunnels. Während bei bergmännischer Bauweise elliptische Querschnitte dominieren sind bei der offenen oder abgedeckten Bauweise in der Hauptsache Rechteck-Profile anzutreffen.

Chloridbelastete Tunnel nach Bauart

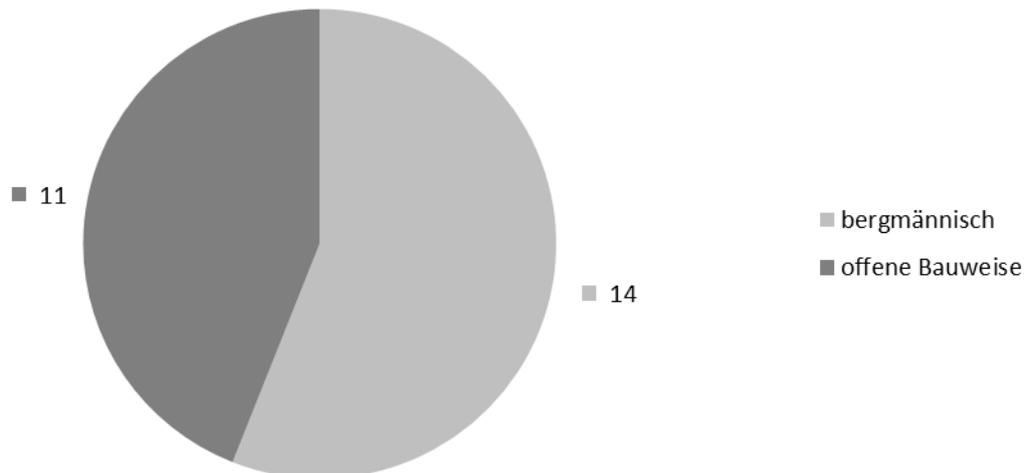


Bild 24: Chloridbelastete Straßentunnel nach Bauart

In Bild 25 sind die mittlere Tunnellänge und die mittlere Höhe der Tunnel über NN dargestellt. Hier fällt auf, dass die mittlere Länge der gemeldeten Bauwerke bei ca. 615 m liegt. Die Höhe der Tunnel ü. NN liegt im Mittel bei etwa 460 m.

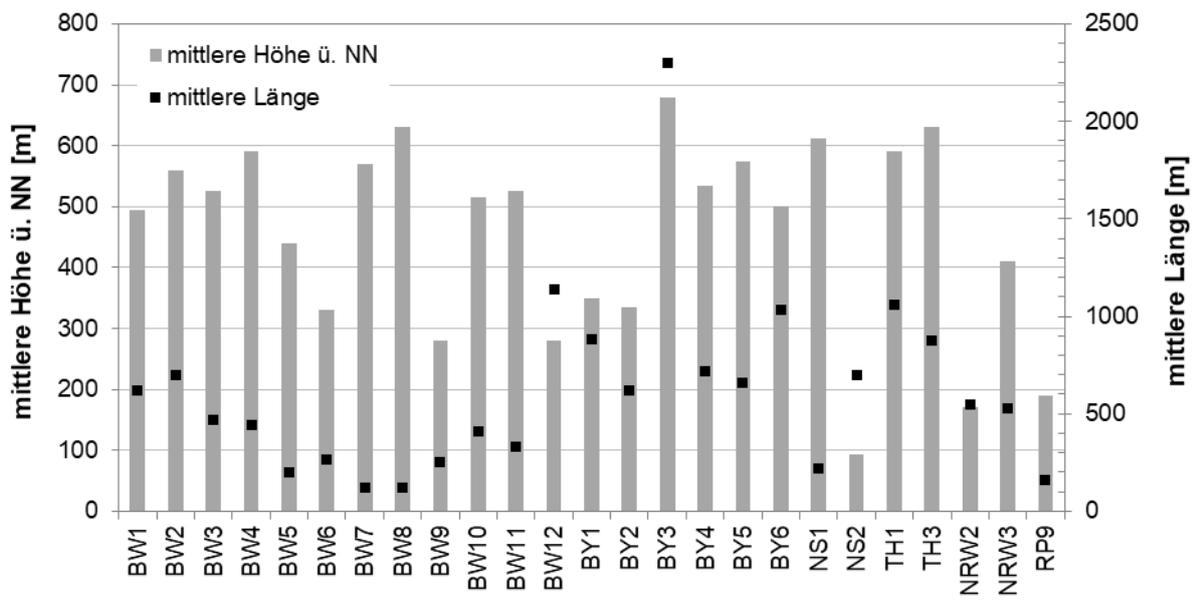


Bild 25: Übersicht Tunnellänge und mittlere Höhe über NN

In Bild 26 sind die Tage mit Streumittleinsatz dargestellt. Hier sind zwischen den einzelnen Tunneln teils deutliche Unterschiede festzustellen. Die Rückmeldungen zur Länderabfrage waren diesbezüglich nicht vollständig.

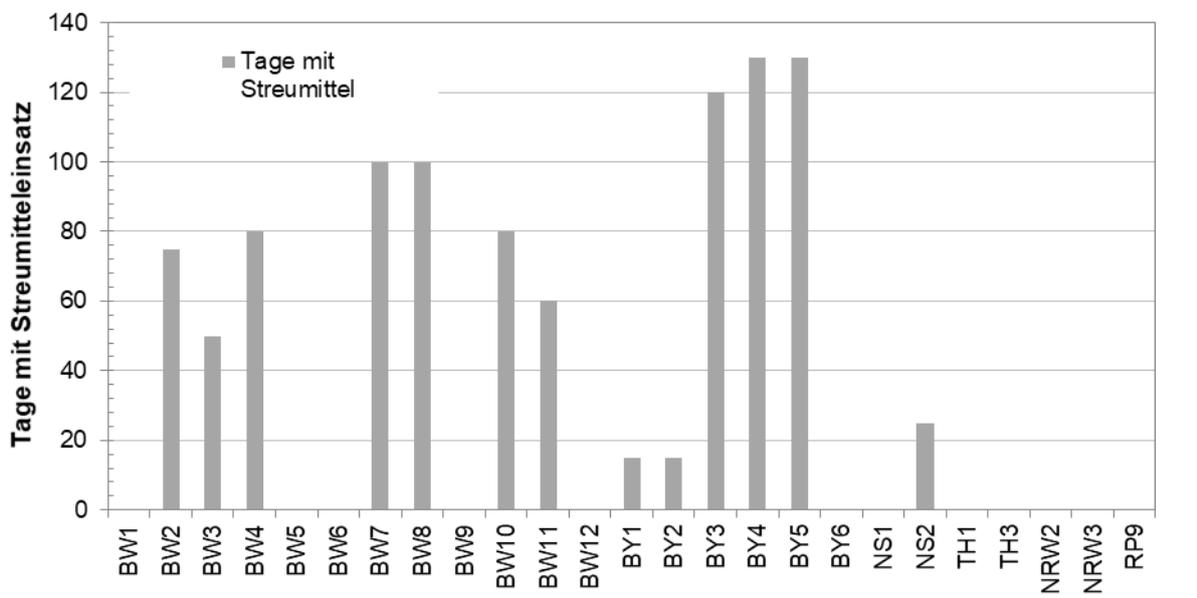


Bild 26: Übersicht Tage mit Streumittleinsatz

In Bezug auf die verwendeten Streumittel konnte den Angaben in den Rückmeldungen zur Länderabfrage entnommen werden, dass überwiegend Natriumchlorid, teils in Kombination mit einer Calciumchloridlösung, als sogenannte Feuchtsalzstreuung FS30 zum Einsatz kommt.

In den übermittelten Tunneln kam überwiegend Portlandzement zum Einsatz, Bild 27. Die Angaben zu den verwendeten Zementen liegen in unterschiedlicher Präzision vor, so dass eine weitere Auflösung nach Hauptbestandteilen und Festigkeitsklassen der Zemente nicht sinnvoll erscheint.

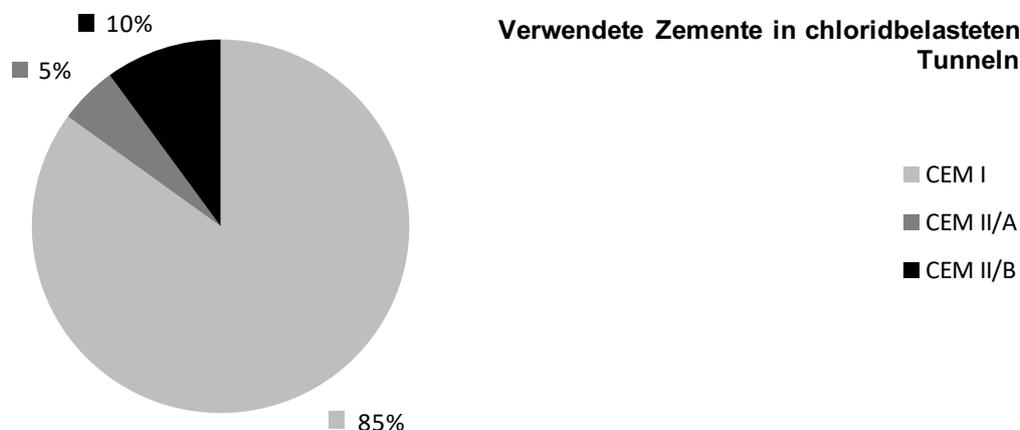


Bild 27: Verwendete Zementsorten in mit Chlorid belasteten Tunneln

4.3.2 Quantitative Analyse

In einem nächsten Schritt werden die Ergebnisse der Länderabfrage quantitativ analysiert, um festzustellen, ob es Zusammenhänge zwischen den Tunnelparametern und der Höhe der Chloridbelastung gibt.

Zunächst wurde aus den zur Verfügung stehenden Unterlagen für jeden Tunnel je Fahrspur und Fahrtrichtung ein durchschnittlicher Chloridwert für drei Tiefenbereiche (0-20 mm, 20-40 mm, 40-60 mm), gemittelt über die Höhe und die Lage im Bauwerk, bestimmt. Für die nachfolgende Auswertung wurde anschließend der größte Wert aus allen Fahrspuren herangezogen (Max,I). Außerdem wurde der größte nachgewiesene Einzelwert (Max,II) ermittelt. Bild 28 enthält ein Schema zur Kennwertermittlung (siehe dazu auch Abs. 4.4.8).

Die nach dem beschriebenen Vorgehen bestimmten Ergebnisse aus den übermittelten Unterlagen sind in Bild 29 und Bild 30 zusammengefasst. Die Sortierung der Tunnel erfolgte dabei aufsteigend in Bezug auf die Ergebnisse für den Tiefenbereich 0-20 mm.

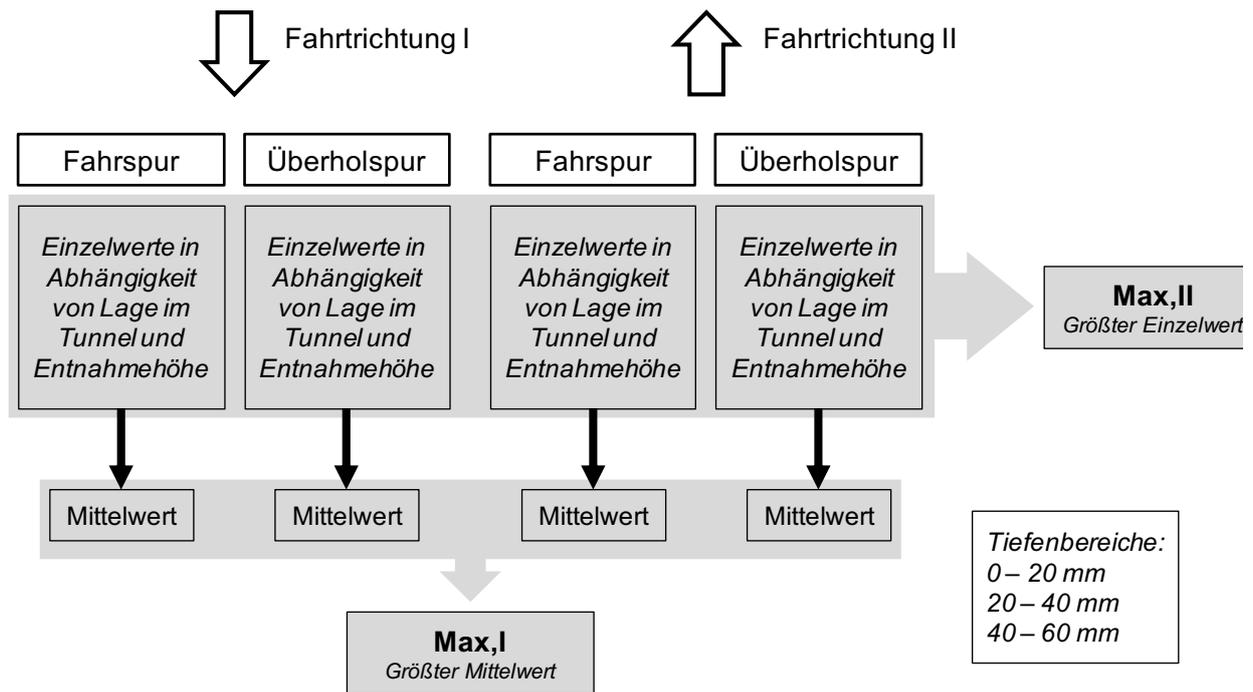


Bild 28: Schema zur Kennwertermittlung

Sofern gesondert in den Messergebnissen ausgewiesen, zeigten die Werte für die Tunnelwände von Fahr- und Überholspur ein differenziertes Bild. Häufig lagen die Chloridgehalte an der Wand neben dem Hauptfahrstreifen über denen der Wand neben dem Überholfahrstreifen. In mehreren Fällen war die Situation umgekehrt, vereinzelt änderte sich das Verhältnis der Chloridgehalte bei der Tunnelwände auch tiefenabhängig.

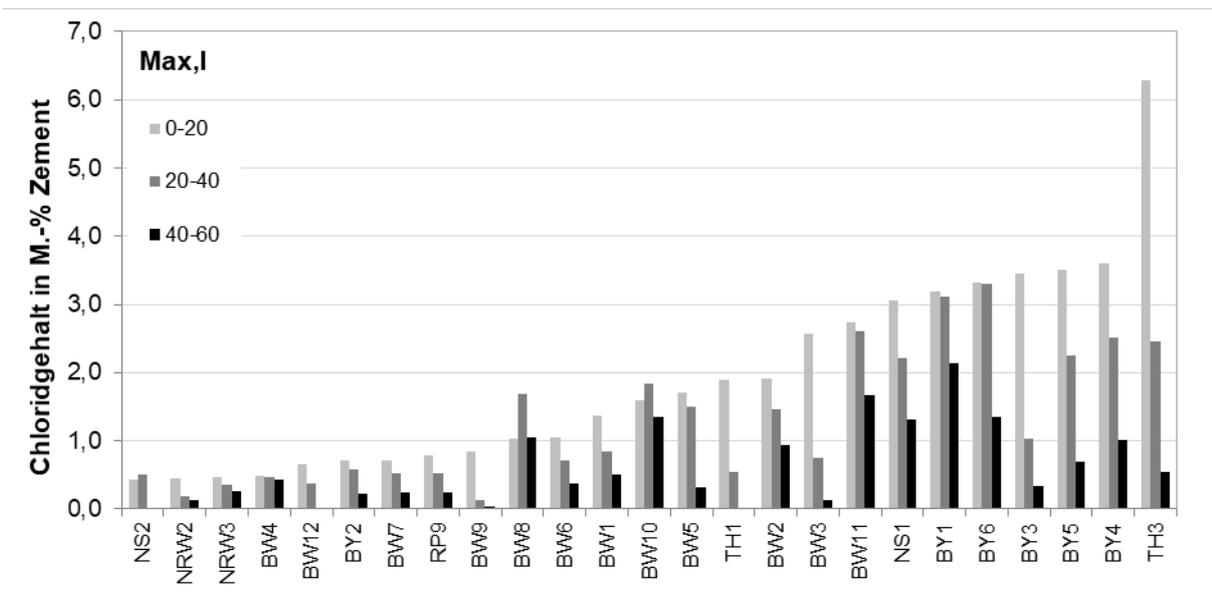


Bild 29: Chloridbelastung (Max,I) in Straßentunneln, aufsteigend nach den Werten der Tiefenstufe (0-20 mm) geordnet

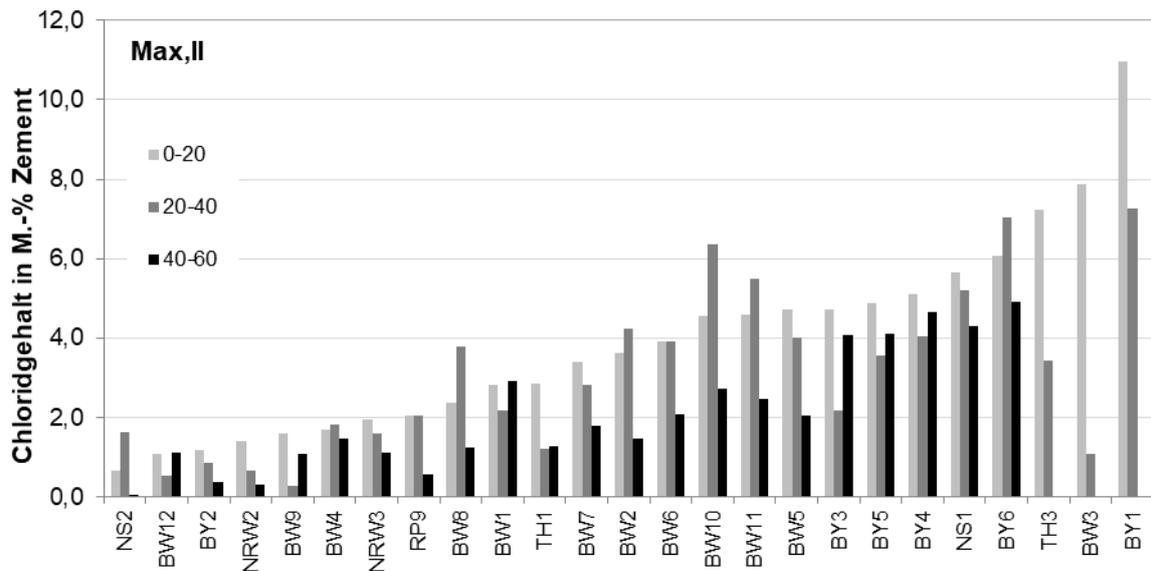


Bild 30: Chloridbelastung (Max,II) in Straßentunneln, aufsteigend nach den Werten der Tiefenstufe (0-20 mm) geordnet

In Bild 31 ist die Chloridbelastung (Max,I) dem Verkehrsaufkommen gegenübergestellt. Auch wenn die Korrelation hier nicht eindeutig ist, lässt sich anhand der Trendlinie des Verkehrsaufkommens (gestrichelt) erwartungsgemäß feststellen, dass ein höheres Verkehrsaufkommen tendenziell auch eine höhere Chloridbelastung zur Folge hat.

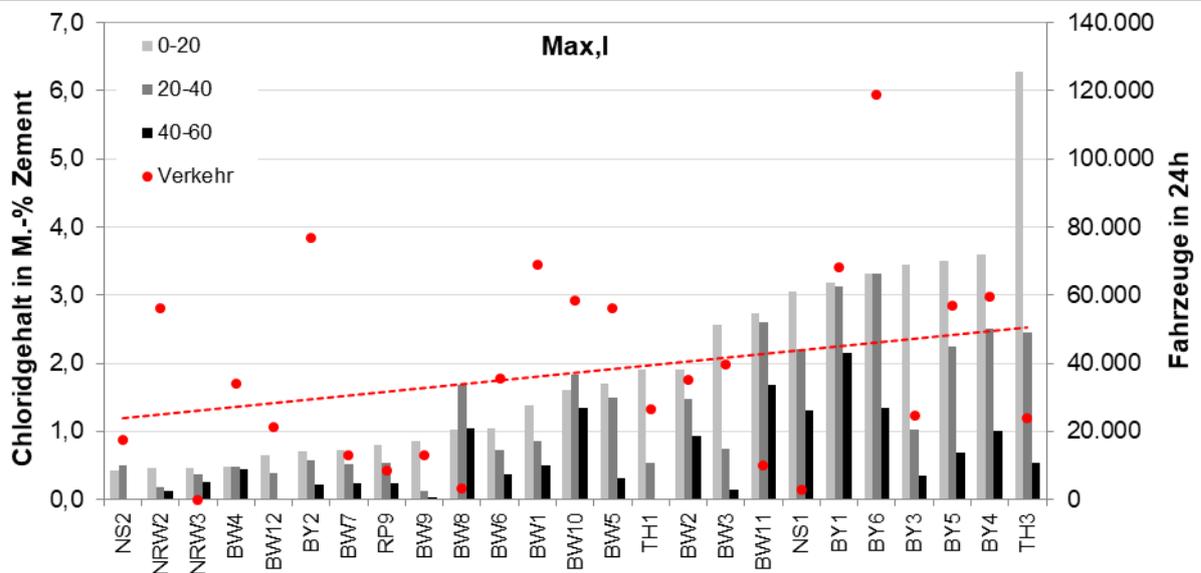


Bild 31: Chloridbelastung (Max,I) in Straßentunneln vs. Verkehrsaufkommen

Eine ähnliche Tendenz zeigt sich bei der Gegenüberstellung mit der mittleren Tunnellänge (Bild 32) und der mittleren Höhe (ü. NN) des Bauwerks (Bild 33).

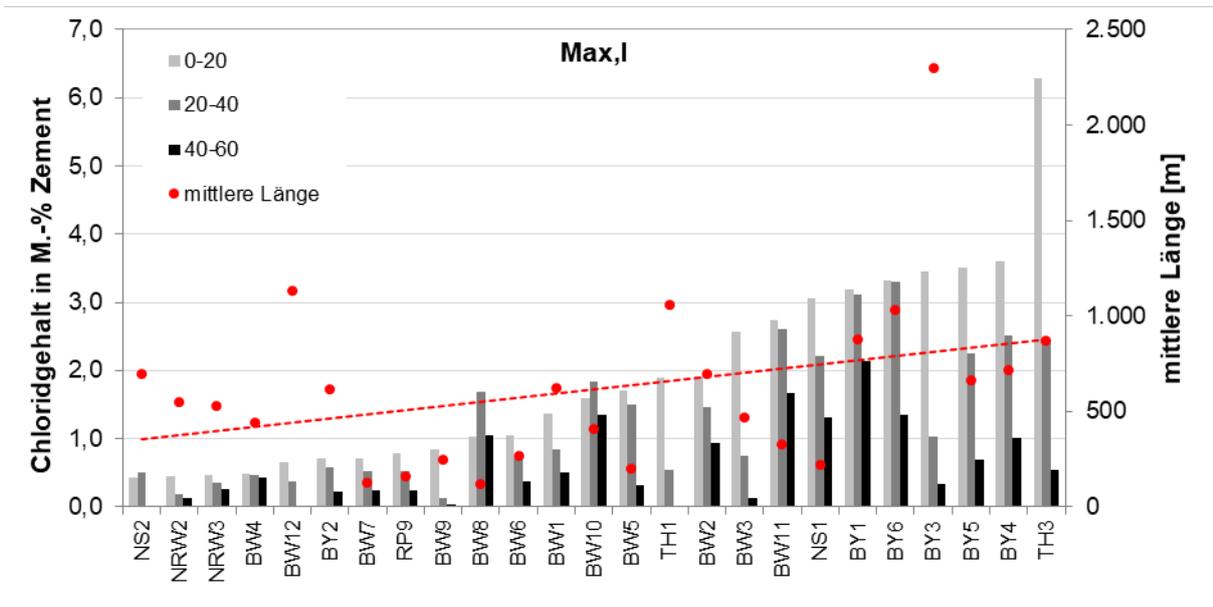


Bild 32: Chloridbelastung (Max, I) in Straßentunneln vs. mittlere Bauwerkslänge

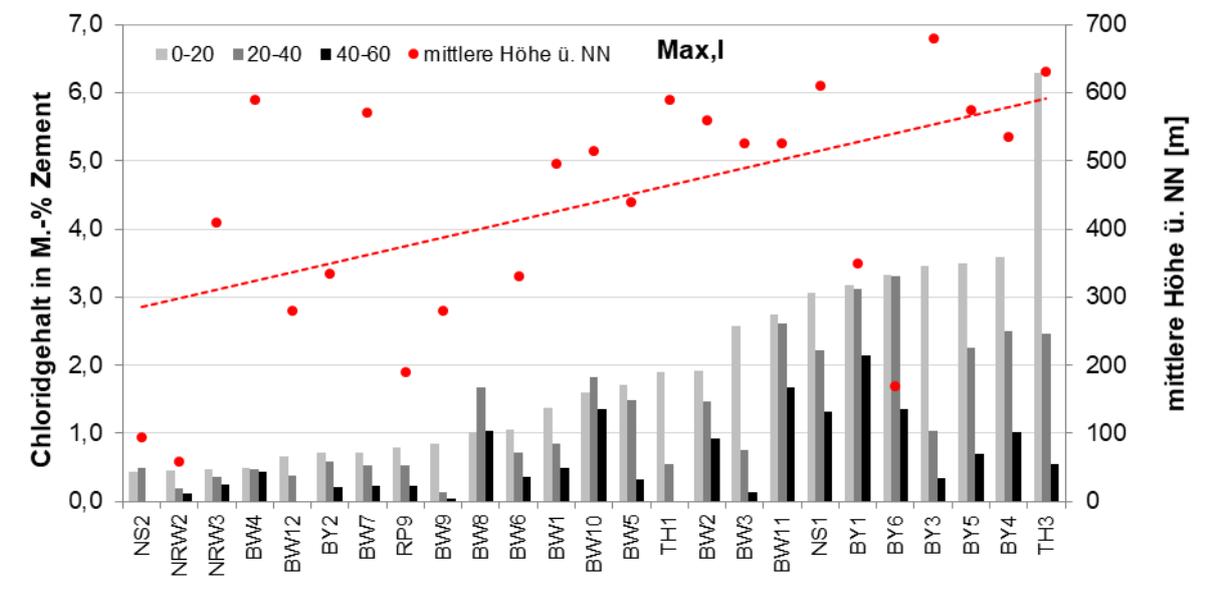


Bild 33: Chloridbelastung (Max, I) in Straßentunneln vs. mittlere Höhe

Das Bauwerksalter hat entgegen der Erwartungen augenscheinlich keinen Einfluss auf die Höhe der Chloridbelastung (Bild 34), Trendlinie trotz fehlender positiver Korrelation eingefügt. Dies trifft auch auf die Bauweise zu (Bild 35).

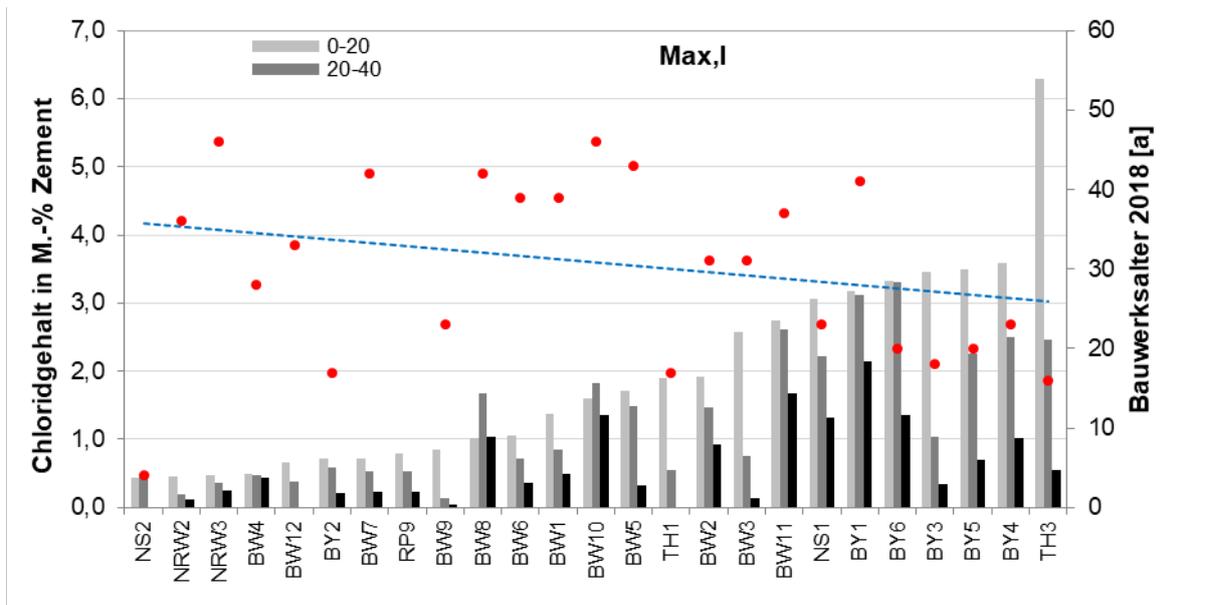


Bild 34: Chloridbelastung (Max,I) in Straßentunneln vs. Bauwerksalter

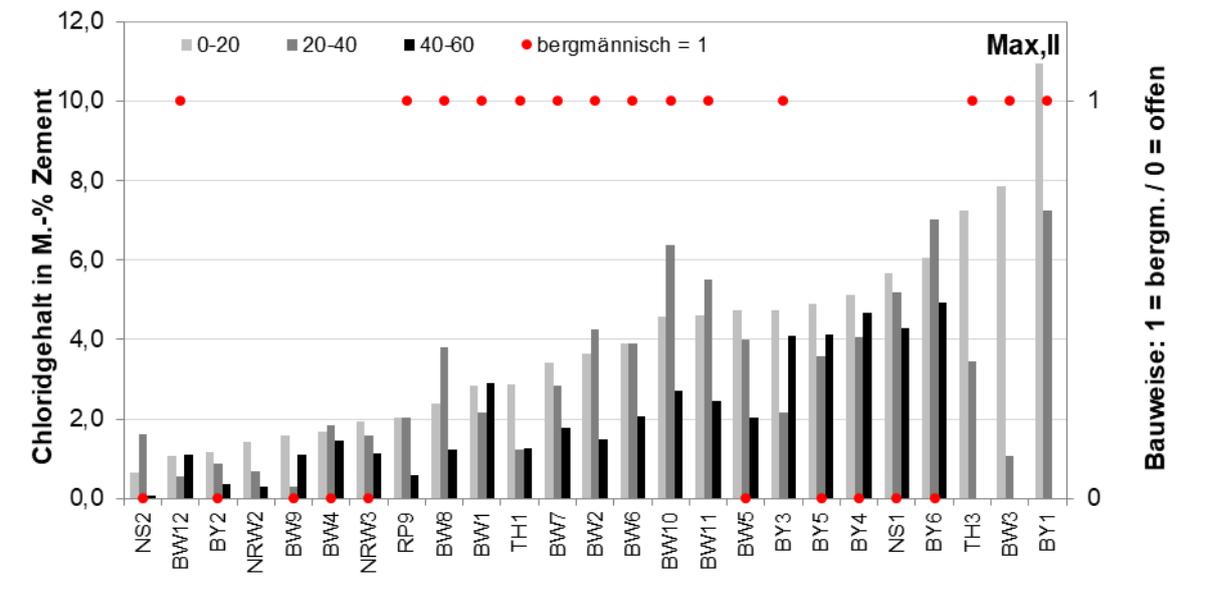


Bild 35: Chloridbelastung (Max,II) in Straßentunneln vs. Bauweise

Die Tage mit Streumittel Einsatz haben, wenn man der Trendlinie folgt, augenscheinlich einen Einfluss auf den Chloridgehalt (Bild 36). Hier ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Angaben in den Länderabfragen z. T. unvollständig waren und dass in einigen Tunneln gestreut wird und in anderen Tunnel nicht. Hinzu kommt außerdem der Faktor „Mensch“ in Form des Fahrzeugführers der sowohl die aufgebrauchte Streumenge als auch Beginn und Ende der Streumaßnahme steuert.

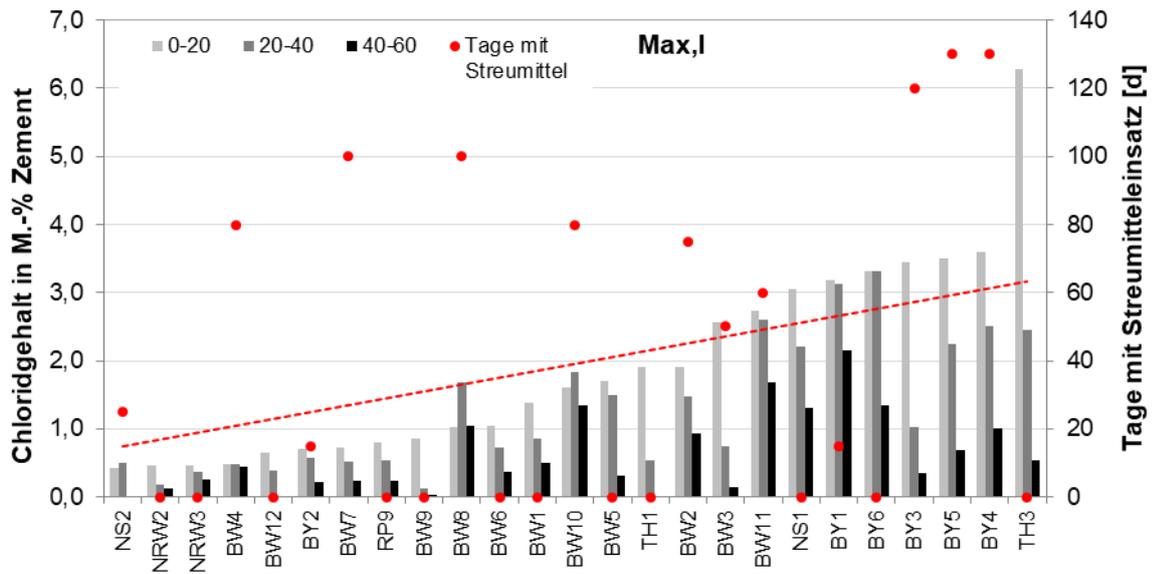


Bild 36: Chloridbelastung (Max,I) in Straßentunneln vs. Tage mit Streumittleinsatz

Wie aus der Gegenüberstellung in Bild 37 ersichtlich wird, hat der verwendete Zement augenscheinlich keinen Einfluss auf die Höhe des Chloridgehaltes, wobei die geringe Anzahl von Bauwerken aus Beton mit Portlandkompositzementen einer zuverlässigen Aussage entgegensteht. Eine relativ sichere Aussage würde voraussetzen, dass sich an den „Enden“ der ansteigenden Reihe der Chloridgehalte die Einträge für bestimmte Zemente häufen. Das ist nicht der Fall.

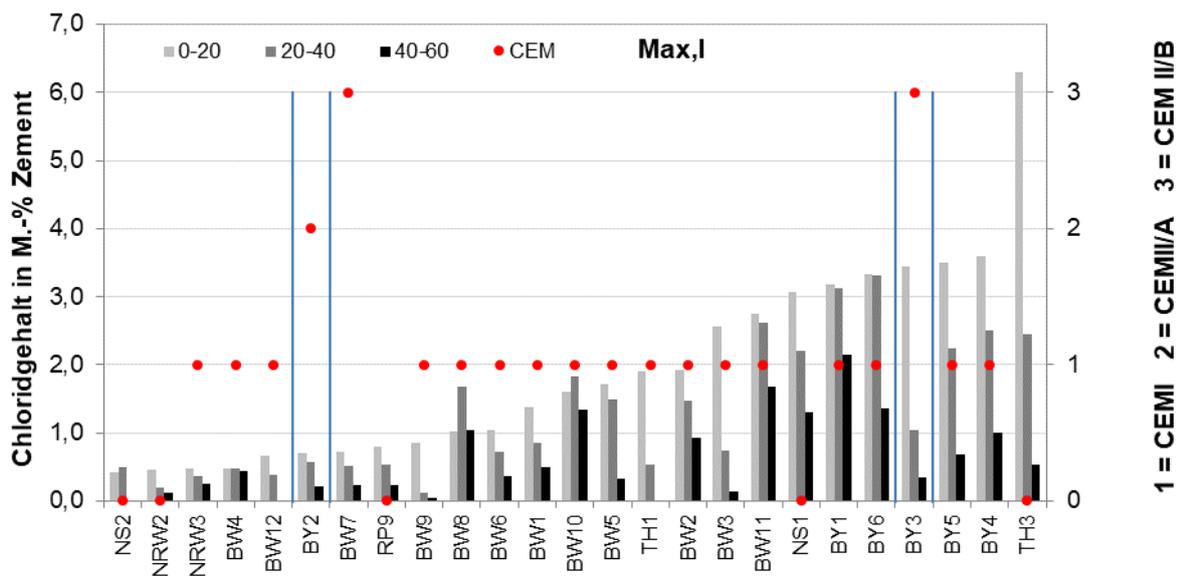


Bild 37: Chloridbelastung (Max,I) in Straßentunneln vs. Zement

Die Einflüsse aus Straßentyp und Tunnelprofil sind nicht eindeutig zuzuordnen, siehe Tabelle 12. Die Messwerte einzelner Tunnel streuen sehr stark. Das äußert sich z.B. in der gegenläufigen Tendenz bei Betrachtung der Werte Max,I und Max,II. Im Zusammenhang mit der begrenzten Anzahl von Einzelwerten ergibt sich keine sichere Aussage.

Einfluss	Chloridgehalt Max,I	Chloridgehalt Max,II	Bemerkung
Straßentyp: Bundesautobahn	0,80	2,20	
Straßentyp: Bundesstraße	0,64	2,09	
Straßentyp: Landesstraßen	0,25	1,13	nur ein Bauwerk
Querschnitt: Rahmen	0,50	1,55	
Querschnitt: Gewölbe	0,77	2,29	

Tabelle 12: Chloridgehalt im Zusammenhang mit Straßentyp und Tunnelquerschnitt

4.4 Tunnel Bayern

4.4.1 Allgemeines

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Länderabfrage und die zusätzlich übermittelten Untersuchungsergebnisse zu den bayrischen Tunnelbauwerken zusammengestellt und ausgewertet.

Bezeichnung	Tunnel	Lage	Straße	Inbetriebnahme
BY1	Pfaffenstein	93059 Regensburg	A93	1977
BY2	Prüfening	93049 Regensburg	A93	2001
BY3	Farchant	82490 Farchant	B2	2000
BY4	Eching	82279 Eching am Ammersee	A96	1995
BY5	Etterschlag	82237 Wörthsee	A96	1998
BY6 ¹⁾	Allach	80999 München	A99	1998

¹⁾ nicht Bestandteil der Länderabfrage

Tabelle 13: Übersicht Tunnel Bayern

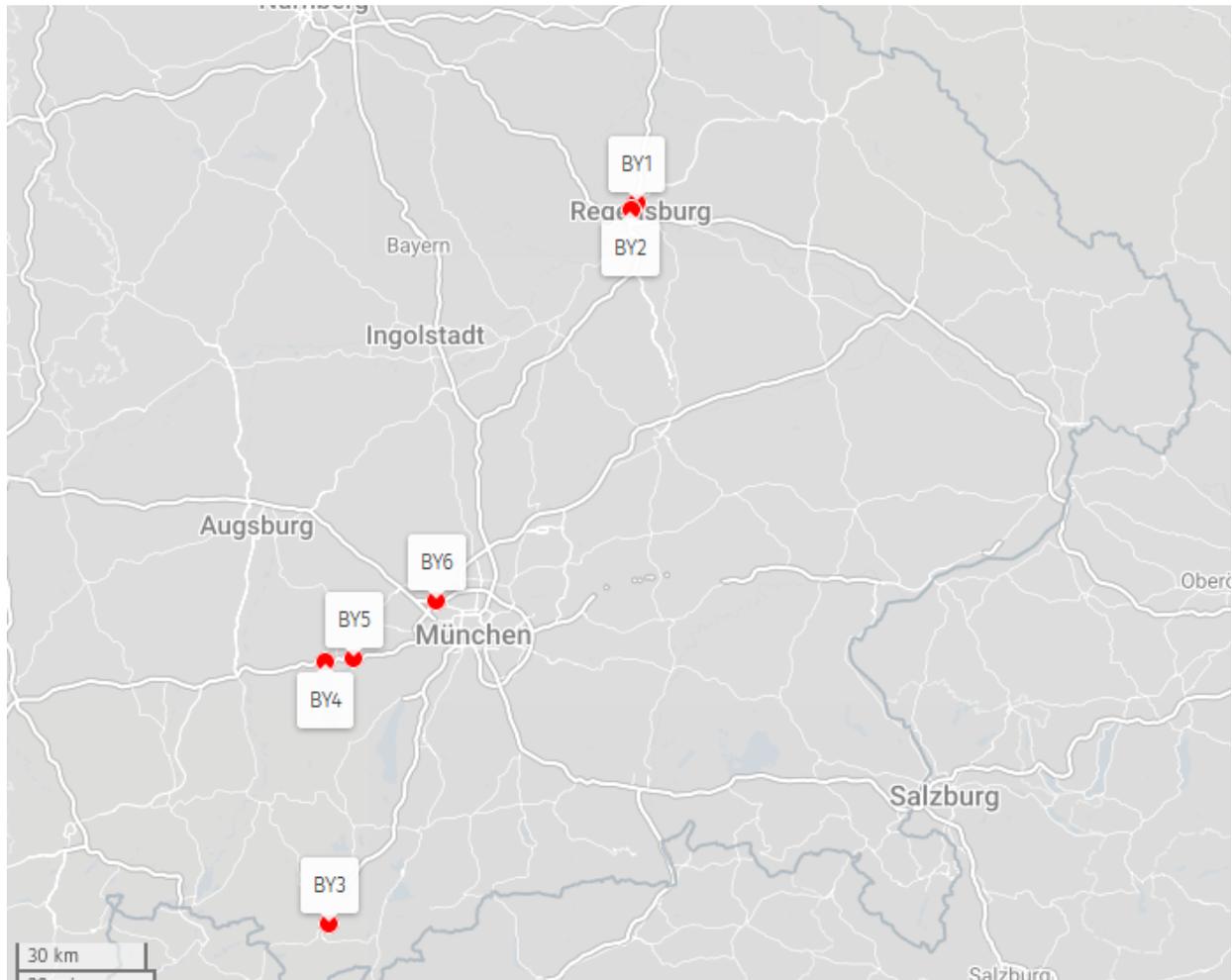


Bild 38: Lage der Tunnel in Bayern (Quelle: uMap / OSM)

Eingang fanden im Wesentlichen die

- Rückmeldungen zur Länderabfrage,
- Untersuchungsberichte und Anlagen die mit den Länderabfragen übermittelt wurden,
- Bauwerksbücher.

Die dargestellten Gradienten wurden zum Teil aus den Angaben aus den Fragebögen zur Länderabfrage abgeschätzt bzw. den Planunterlagen in den Anlagen der o. g. Untersuchungsberichte entnommen. Sie dienen lediglich der groben Orientierung.

Abkürzungen

FR Fahrtrichtung

FS Fahrspur (rechte Spur in Fahrtrichtung)

ÜS Überholspur (linke Spur in Fahrtrichtung)

NPN Nordportal

SPSüdportal

HEntnahmhöhe der Proben

4.4.2 BY1 – Tunnel Pfaffenstein

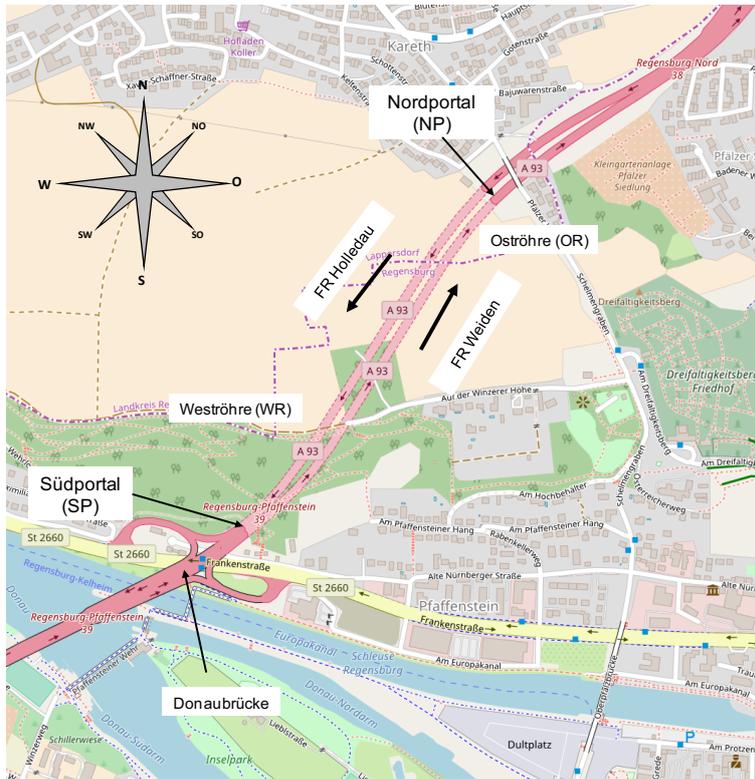


Bild 39: Lageplan Tunnel Pfaffenstein (Quelle: © OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA)

In Bild 40 ist die Gradiente des Tunnel Pfaffenstein vereinfacht dargestellt. Im Tunnel gibt es kurz vor dem Nordportal einen Hochpunkt. Am SP schließt sich unmittelbar eine Brücke an.

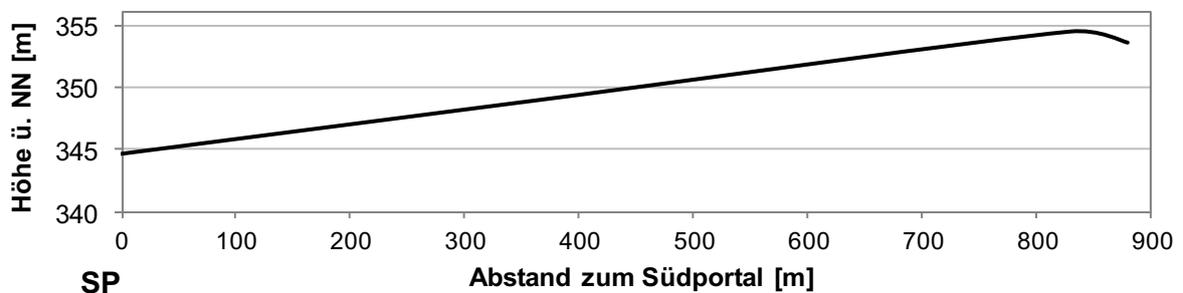


Bild 40: Tunnel Pfaffenstein – Gradiente (vereinfachte Darstellung)

In den nachfolgenden Diagrammen sind die Ergebnisse der Untersuchungen aus (BERICHT-NR. 1800-2012-01 31. Januar 2013) und (PROJEKT G1222 19. März 2013) in Auszügen grafisch dargestellt ((PROJEKT G1222 19. März 2013) nur informativ, vgl. Bild 49). Aus den Ergebnissen lassen sich folgende Tendenzen ableiten:

- Einfluss der Gradiente: in Richtung des Hochpunktes unmittelbar nach dem Nordportal kann ein Anstieg der Chloridkonzentration verzeichnet werden. Dieser Effekt ist sichtbar an den Messungen in 0,3 m Höhe (Bild 41 und Bild 45), Voraussetzung ist, dass Messwerte vom Beginn und vom Ende des Tunnels vorliegen.
Bild 41: bei 100 m: i.M. ca. 7,5 M.-Cl⁻, (Nähe Hochpunkt)
bei 800 m: i.M. ca. 3,3 M.-Cl⁻, (Nähe Tiefpunkt)
Bild 45: bei 80 m: i.M. ca. 3 M.-Cl⁻, (Nähe Tiefpunkt)
bei 800 m: i.M. ca. 5 M.-Cl⁻, (Nähe Hochpunkt)
- höhere Werte an der rechten Tunnelwand in Fahrtrichtung (Fahrspur)
sichtbar im Vergleich Bild 41 / Bild 42 und Bild 43 / Bild 44 (auf niedrigerem Niveau)
- Abnahme des Chloridgehaltes über die Höhe,
Vergleich Bild 41 / Bild 43 → 0,30 m: ca. 7,5 M.-Cl⁻ / 1,30 m: ca. 3 M.-Cl⁻
- auch in Tunnelmitte wurden Chloride nachgewiesen (Bild 49), wobei hier eine tendenzielle Abnahme mit zunehmender Entfernung vom Portal zu verzeichnen ist

Bild 42

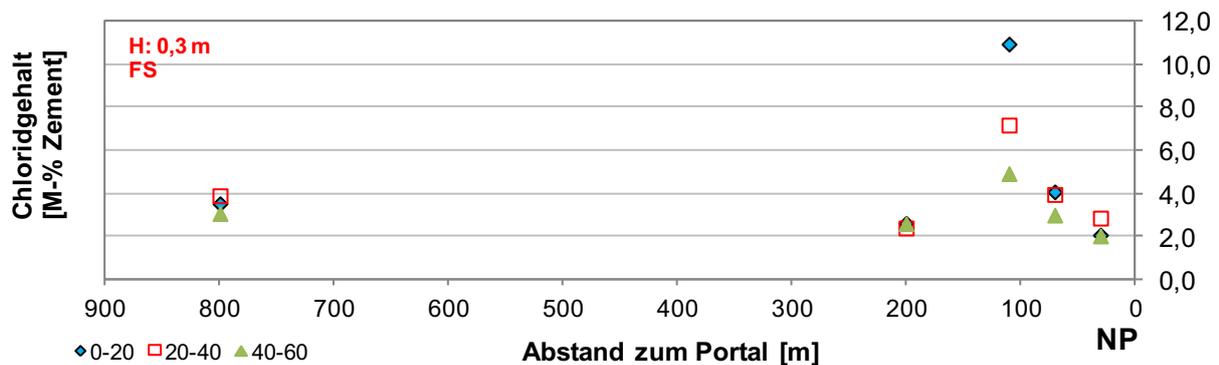


Bild 41: Tunnel Pfaffenstein – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Holledau, FS, Entnahmehöhe 0,3 m

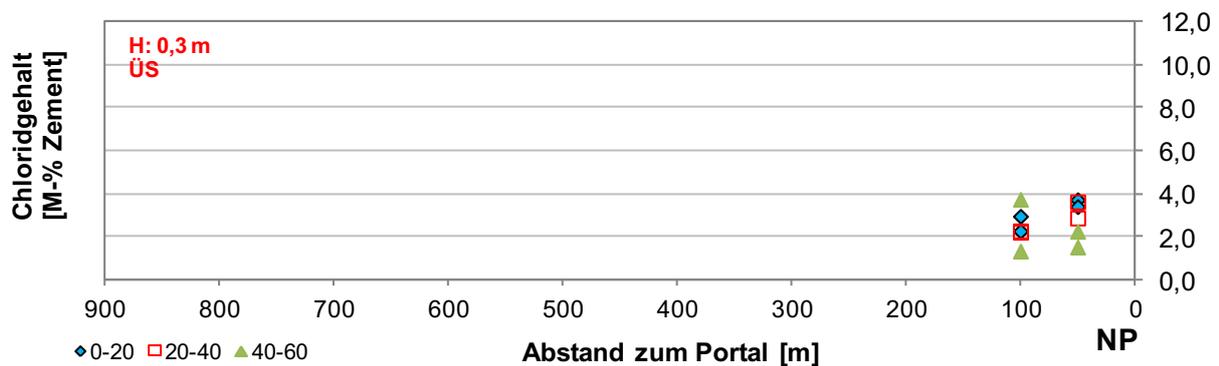


Bild 42: Tunnel Pfaffenstein – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Holledau, ÜS, Entnahmehöhe 0,3 m

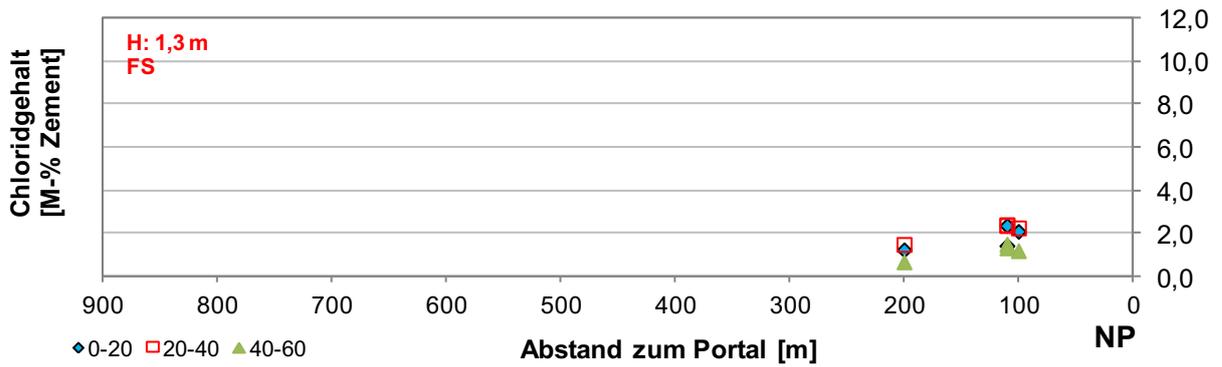


Bild 43: Tunnel Pfaffenstein – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Holledau, FS, Entnahmehöhe 1,3 m

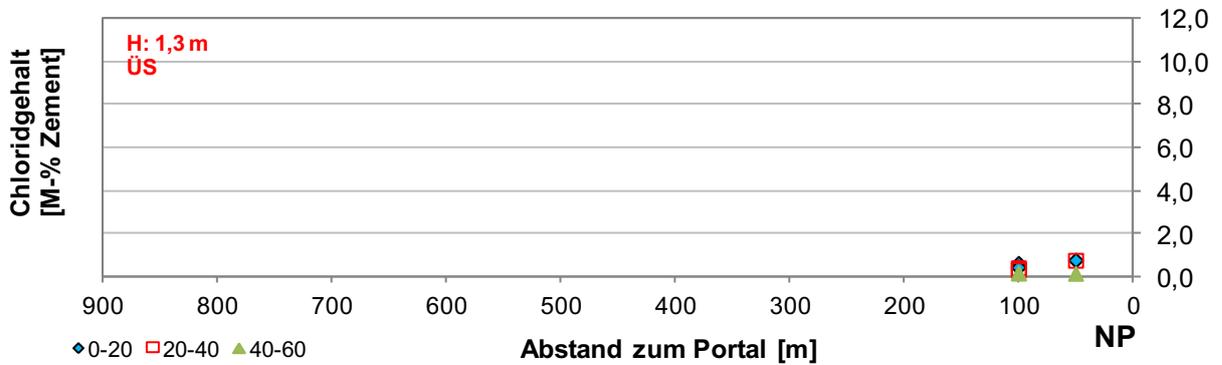


Bild 44: Tunnel Pfaffenstein – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Holledau, ÜS, Entnahmehöhe 1,3 m

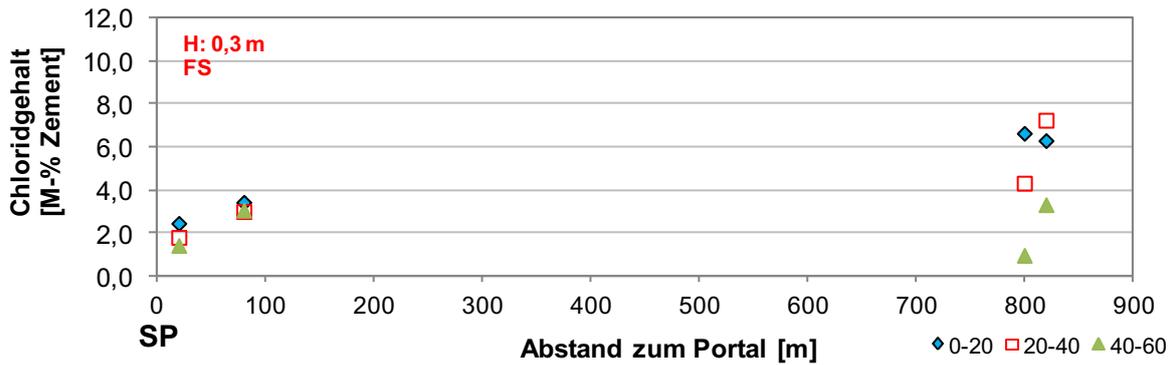


Bild 45: Tunnel Pfaffenstein – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Weiden, FS, Entnahmehöhe 0,3 m

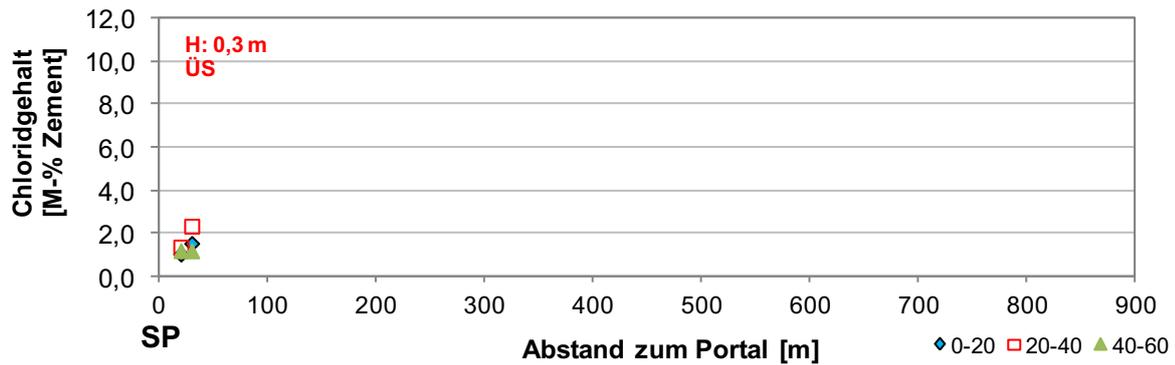


Bild 46: Tunnel Pfaffenstein – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Weiden, ÜS, Entnahmehöhe 0,3 m

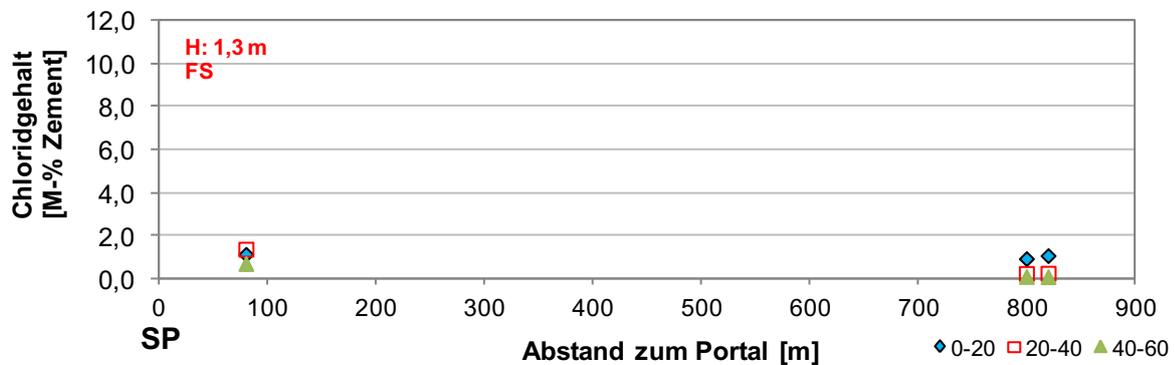


Bild 47: Tunnel Pfaffenstein – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Weiden, FS, Entnahmehöhe 1,3 m

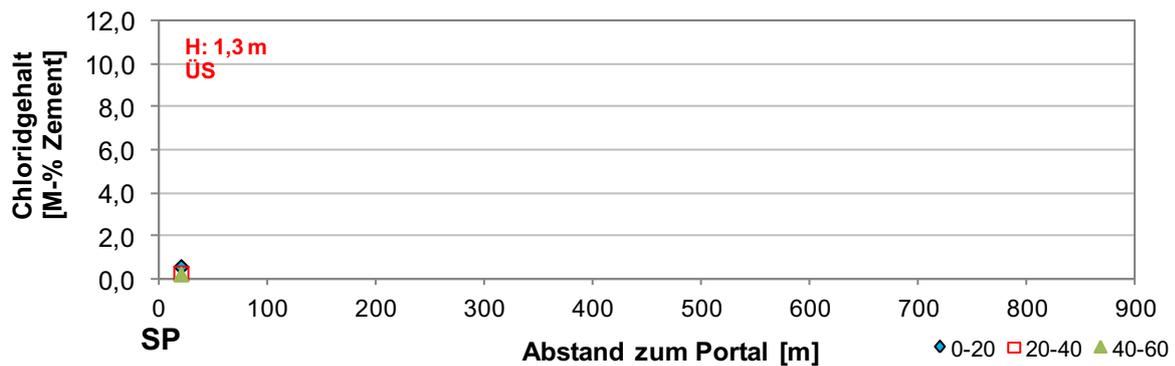


Bild 48: Tunnel Pfaffenstein – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Weiden, ÜS, Entnahmehöhe 1,3 m

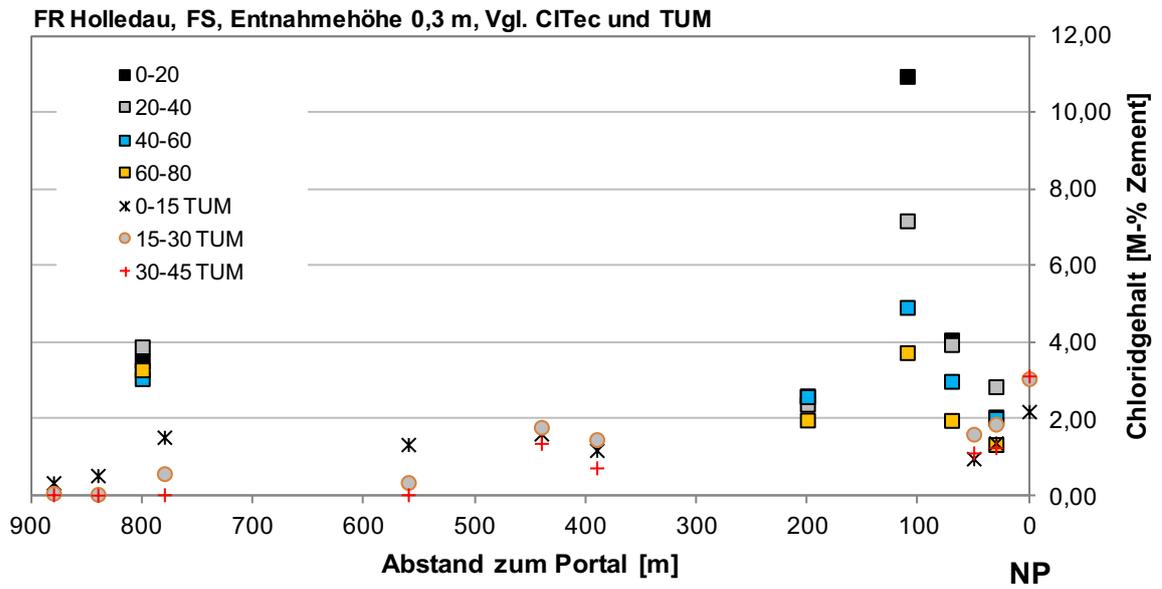


Bild 49: Tunnel Pfaffenstein – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Holledau, FS, Entnahmehöhe 1,3 m, Vgl. Messergebnisse (BERICHT-NR. 1800-2012-01 31. Januar 2013) und (PROJEKT G1222 19. März 2013)

4.4.3 BY2 – Tunnel Prüfening

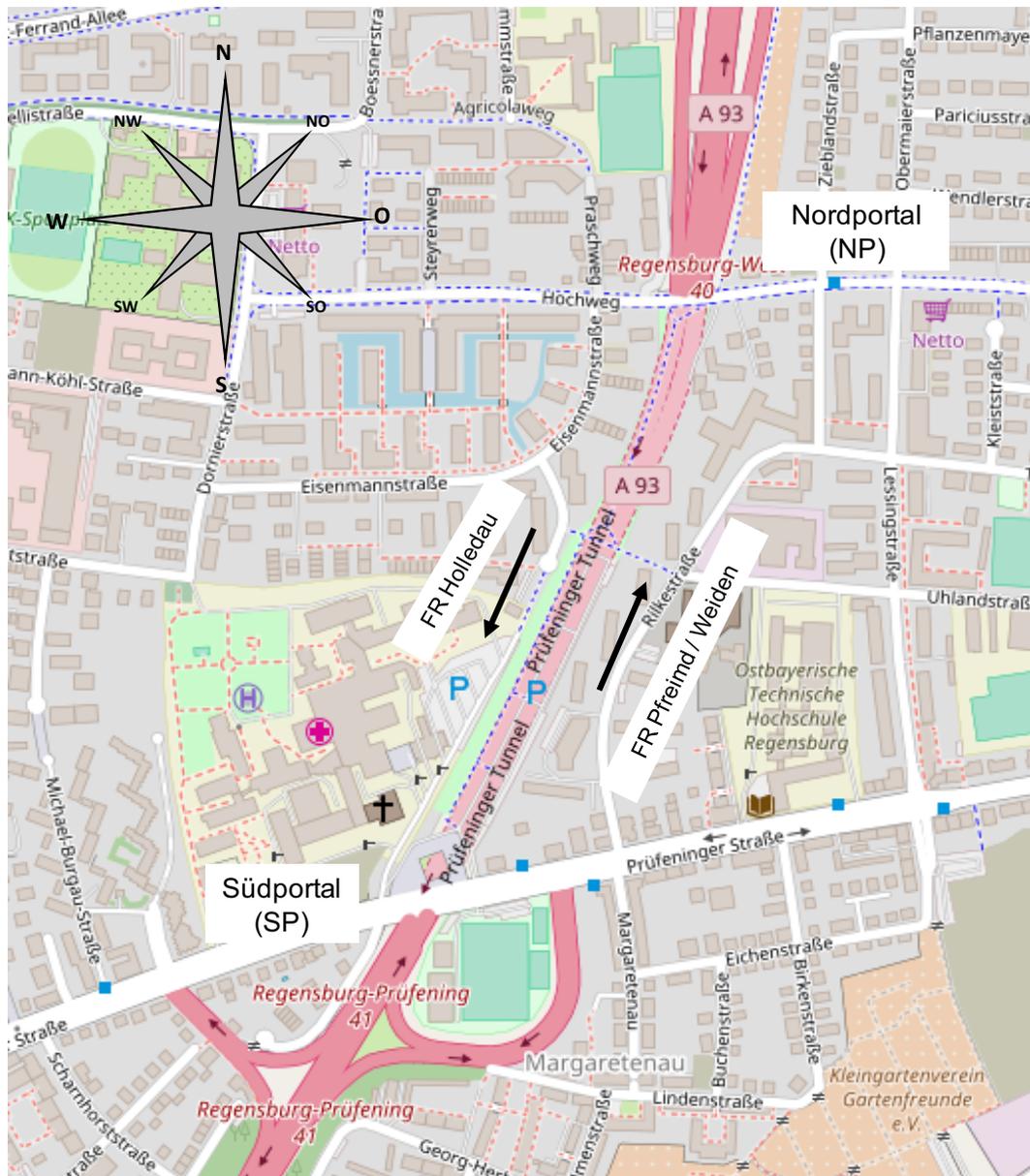


Bild 50: Lageplan Tunnel Prüfening (Quelle: © OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA)

In Bild 51 ist die Gradiente des Tunnels Prüfening vereinfacht dargestellt. Im Tunnel gibt es kurz nach dem Nordportal einen Tiefpunkt (Wanne).

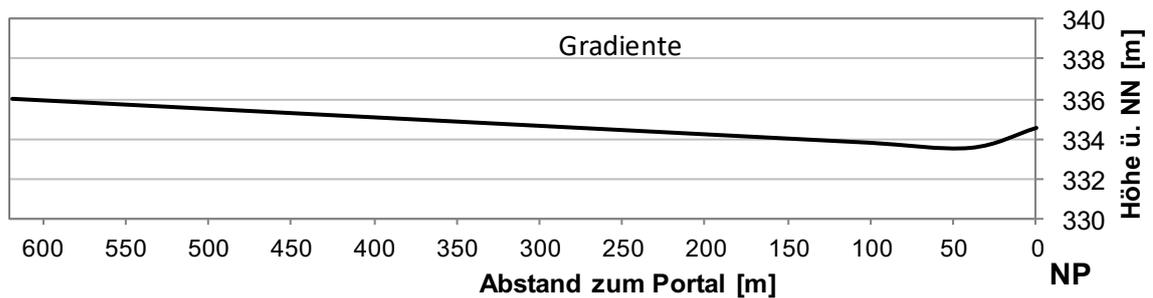


Bild 51: Tunnel Prüfung – Gradiente (vereinfachte Darstellung)

In den nachfolgenden Diagrammen sind die Ergebnisse der Untersuchungen aus (PRÜFBERICHT NR. 5624669 05.11.2012) in Auszügen grafisch dargestellt. Die Untersuchungen beschränken sich dabei auf die rechte Außenwand (FS) in Fahrtrichtung Weiden. Aus den Ergebnissen lassen sich folgende Tendenzen ableiten:

- über die gesamte Tunnellänge wurden Chloride nachgewiesen
- die Entnahmehöhe hat augenscheinlich keinen Einfluss

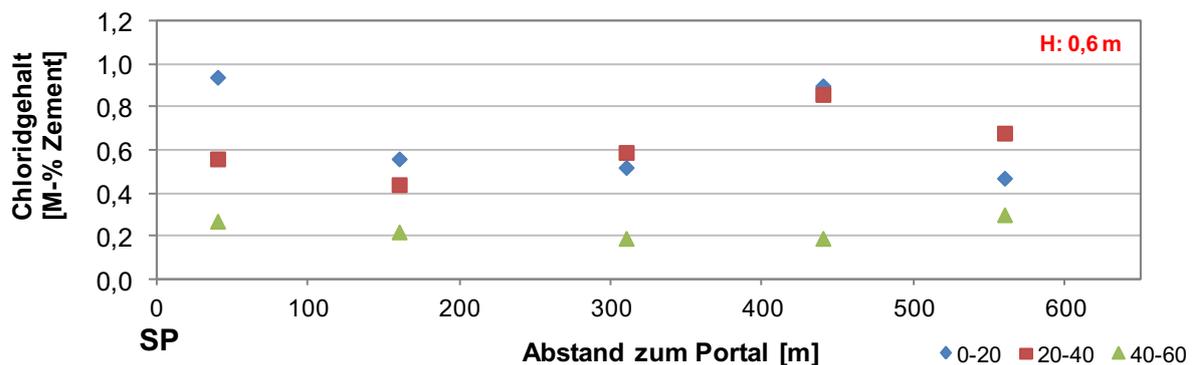


Bild 52: Tunnel Prüfung – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Weiden, FS, Höhe 0,6 m

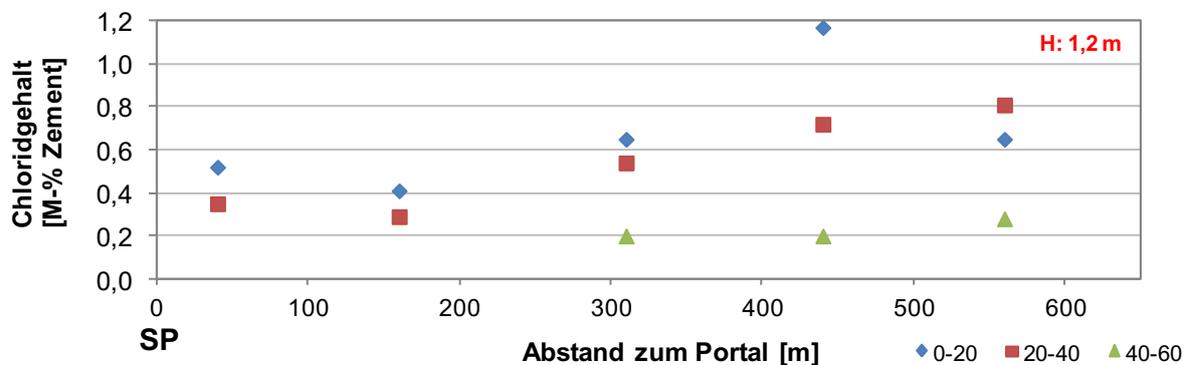


Bild 53: Tunnel Prüfung – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Weiden, FS, Höhe 1,2 m

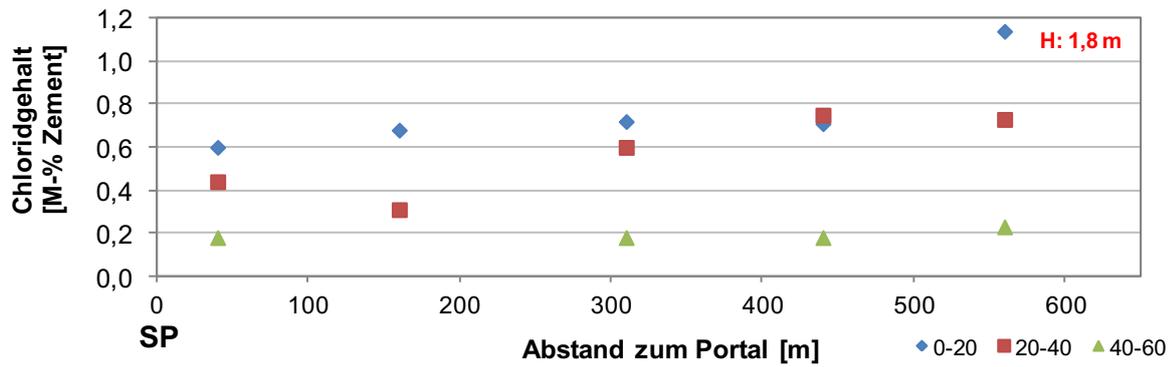


Bild 54: Tunnel Prüfung – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Weiden, FS, Höhe 1,8 m

4.4.4 BY3 – Tunnel Farchant

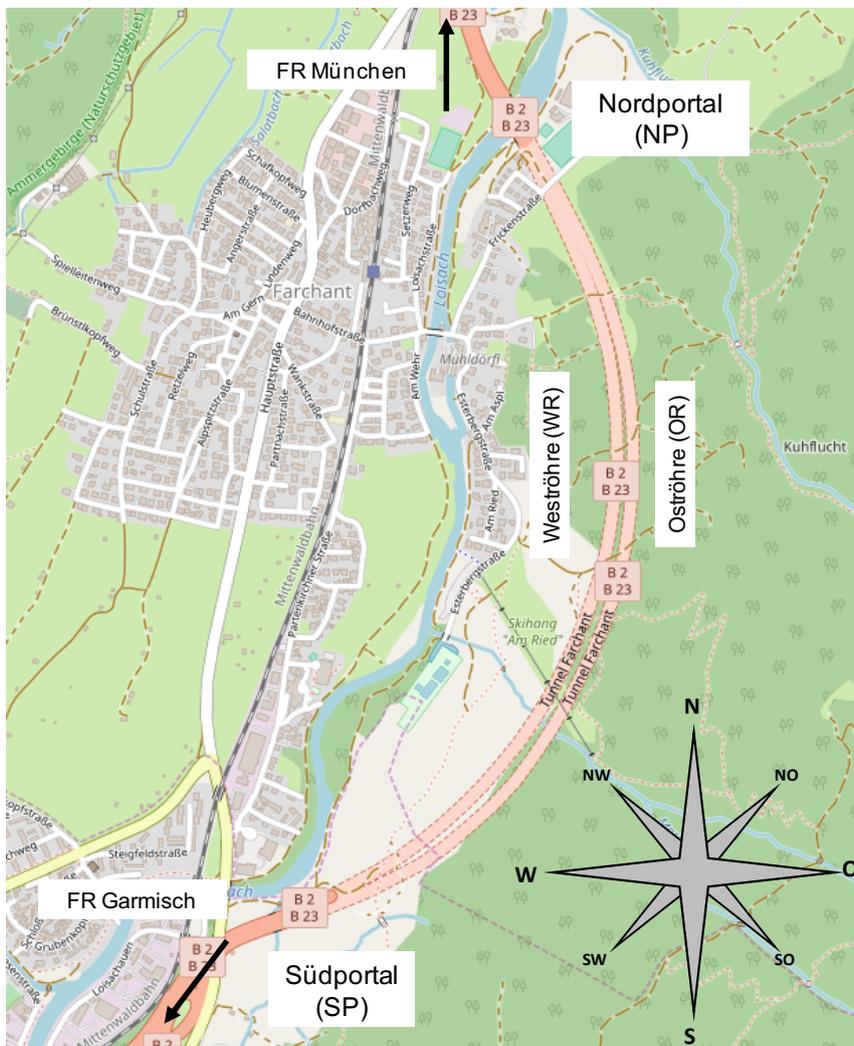


Bild 55: Lageplan Tunnel Farchant (Quelle: © OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA)

In Bild 56 ist die Gradiente des Tunnels Farchant vereinfacht dargestellt. Im Tunnel gibt es sowohl einen Hoch- als auch einen Tiefpunkt (Wanne).

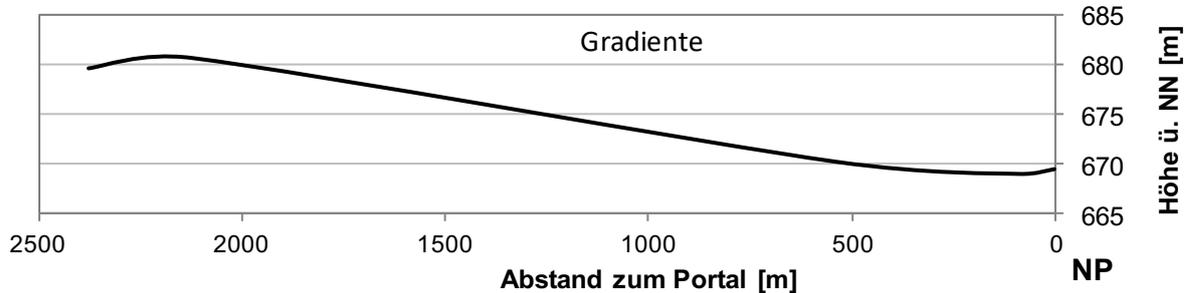


Bild 56: Tunnel Farchant – Gradiente (vereinfachte Darstellung)

In den nachfolgenden Diagrammen sind die Ergebnisse der Untersuchungen aus (PROJEKT-NR. P10009 14.04.2010) in Auszügen grafisch dargestellt. Aus den Ergebnissen lassen sich folgende Tendenzen ableiten:

- über die gesamte Tunnellänge wurden Chloride nachgewiesen
- höhere Werte an der rechten Tunnelwand in Fahrtrichtung (Fahrspur), z.B. Fahrstreifen München : i.M. ca. 0,9 M.-Cl⁻, (Tiefenbereich 15 - 30 mm), Bild 57 Überholstreifen München i.M. ca. 0,7 M.-Cl⁻, (Tiefenbereich 15 - 30 mm)
- Abnahme des Chloridgehaltes über die Höhe
- geringer Einfluss aus der Gradiente

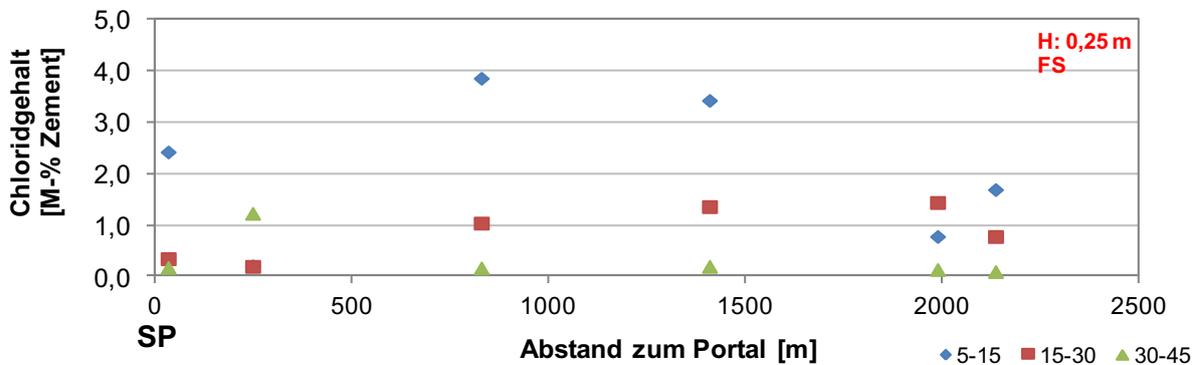


Bild 57: Tunnel Farchant – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, FS, Höhe 0,25 m

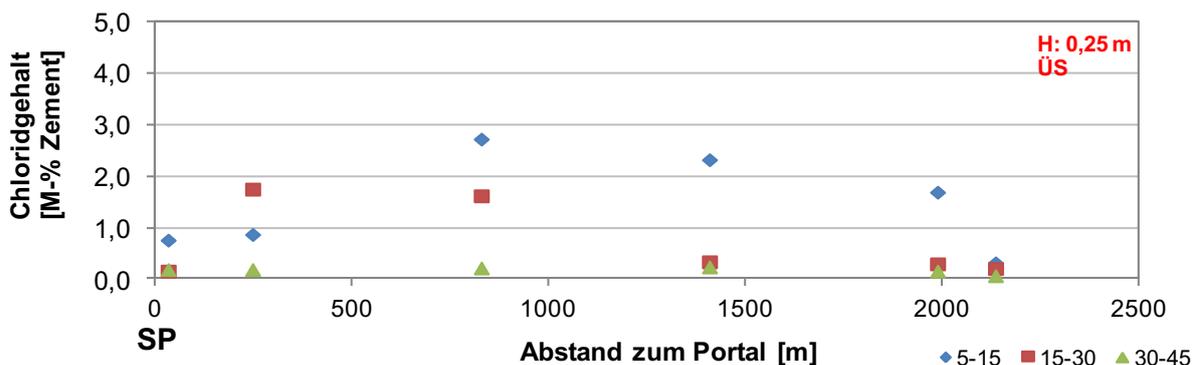


Bild 58: Tunnel Farchant – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, ÜS, Höhe 0,25 m

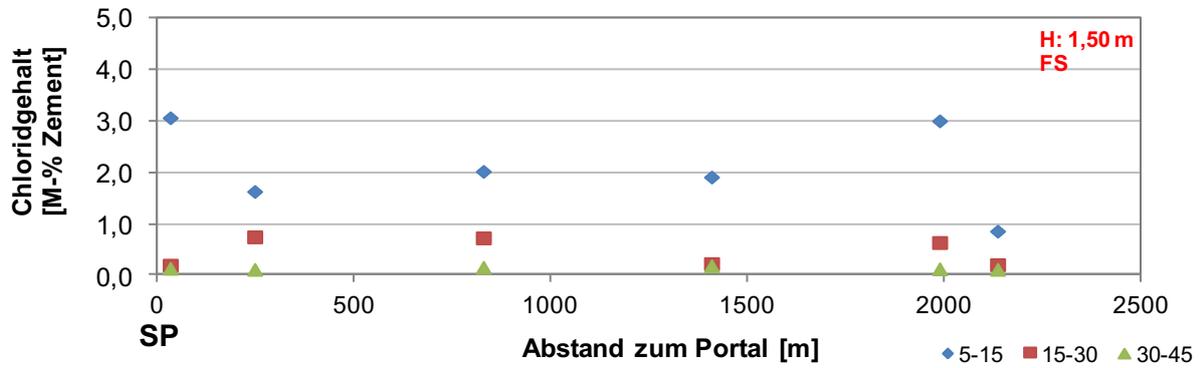


Bild 59: Tunnel Farchant – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, FS, Höhe 1,50 m

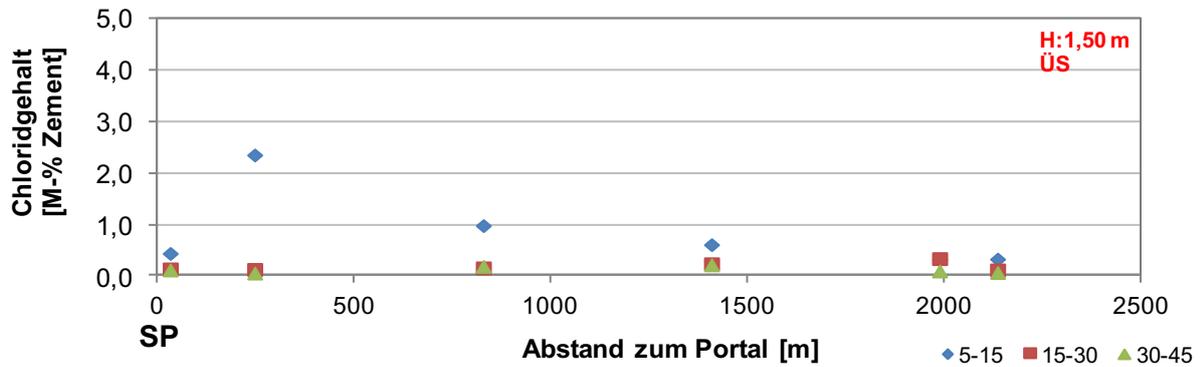


Bild 60: Tunnel Farchant – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, ÜS, Höhe 1,50 m

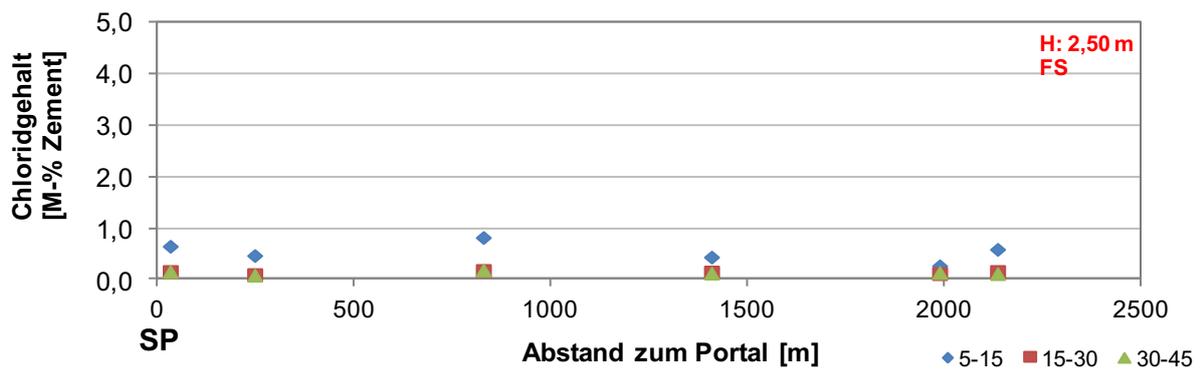


Bild 61: Tunnel Farchant – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, FS, Höhe 2,50 m

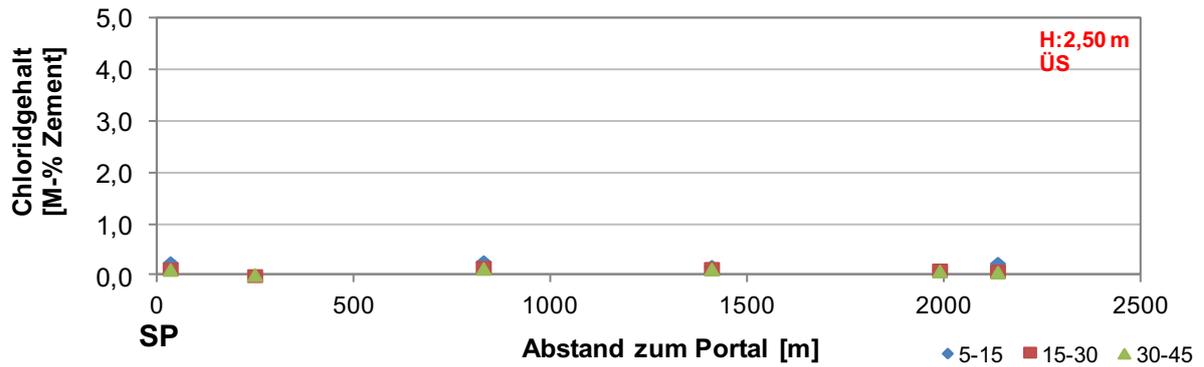


Bild 62: Tunnel Farchant – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, ÜS, Höhe 2,50 m

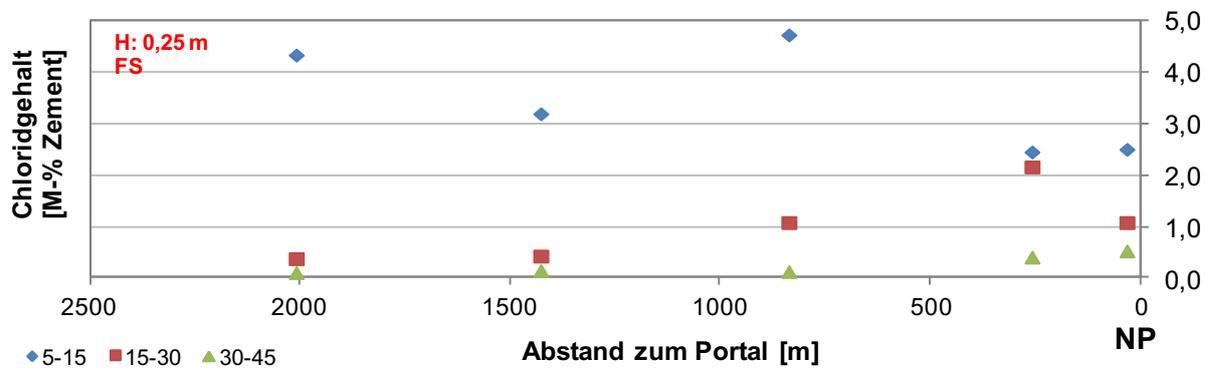


Bild 63: Tunnel Farchant – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Garmisch, FS, Höhe 0,25 m

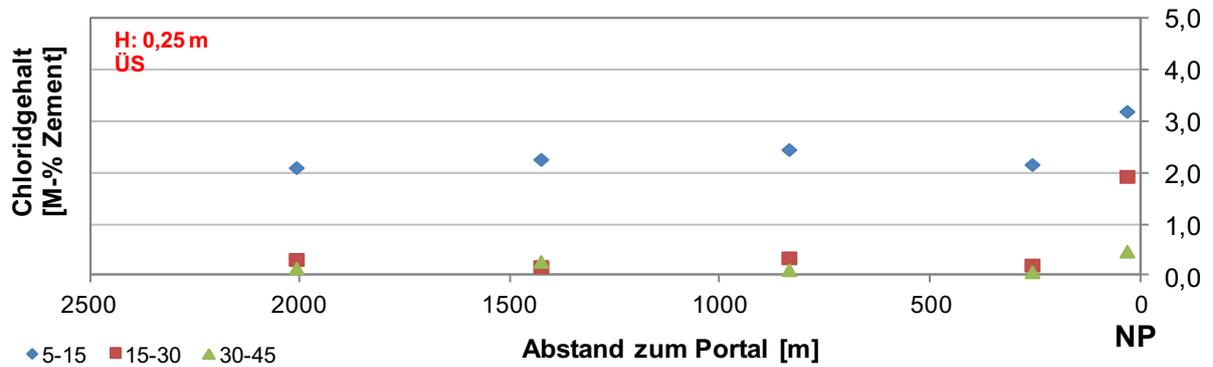


Bild 64: Tunnel Farchant – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Garmisch, ÜS, Höhe 0,25 m

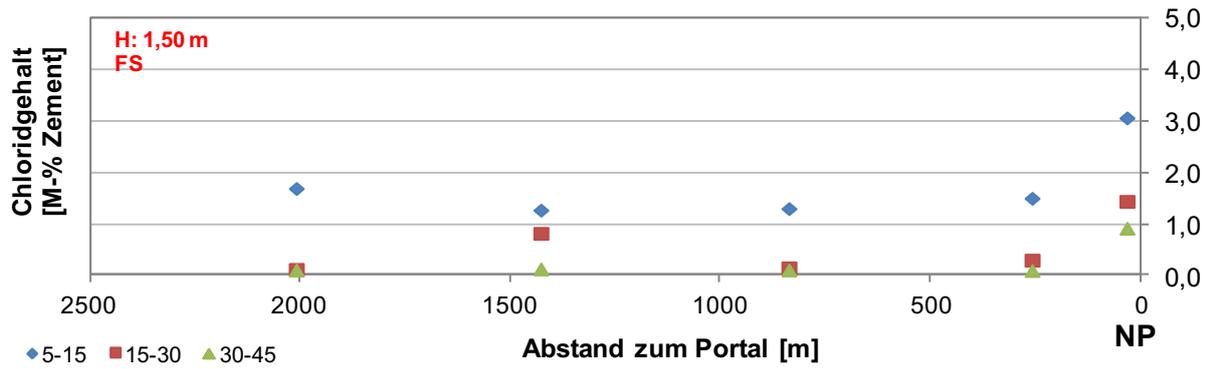


Bild 65: Tunnel Farchant – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Garmisch, FS, Höhe 1,50 m

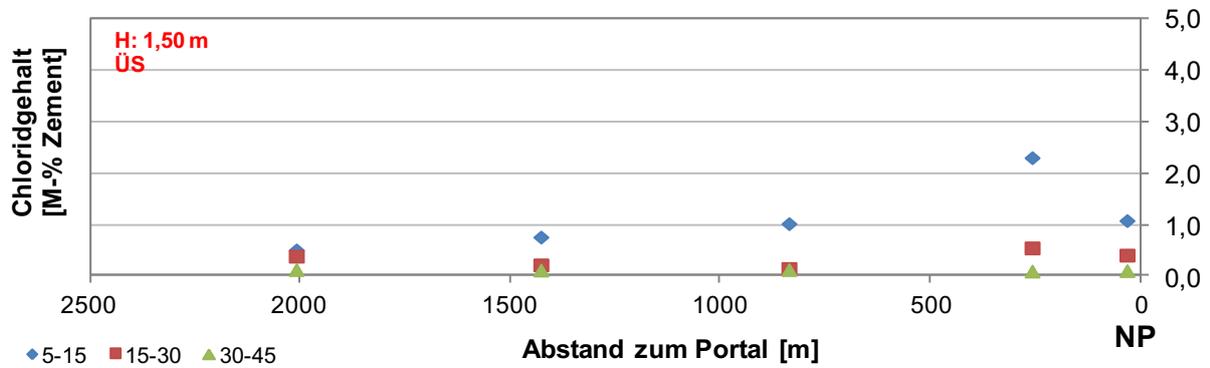


Bild 66: Tunnel Farchant – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Garmisch, ÜS, Höhe 1,50 m

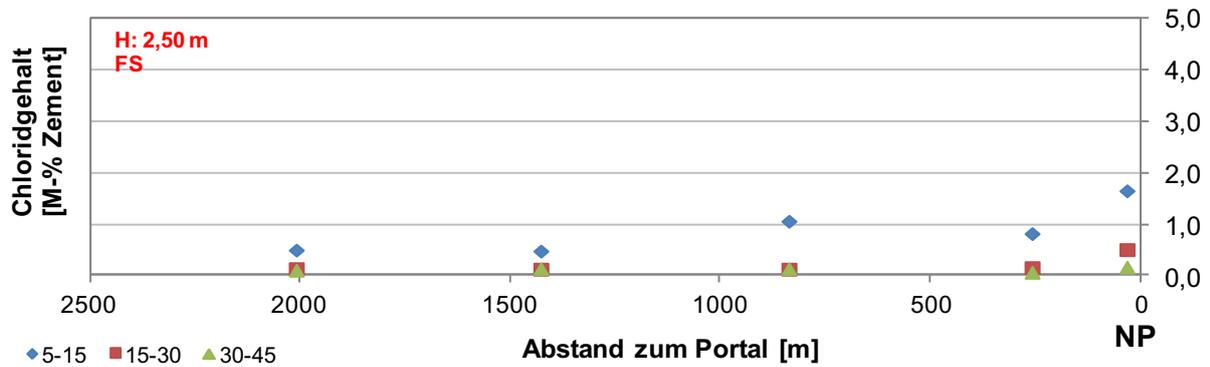


Bild 67: Tunnel Farchant – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Garmisch, FS, Höhe 2,50 m

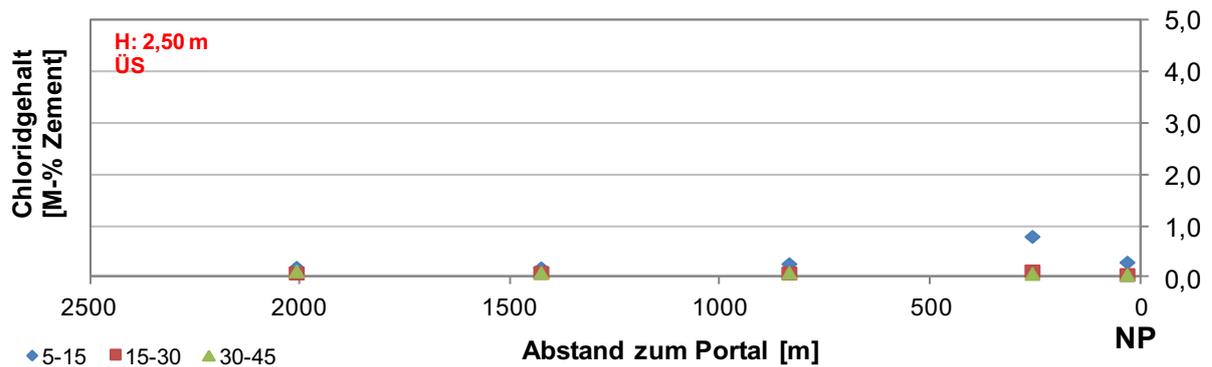


Bild 68: Tunnel Farchant – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Garmisch, ÜS, Höhe 2,50 m

Im Tiefenbereich 30 bis 45 mm, der außen an die vermutliche Bewehrungslage angrenzt und deshalb als kritisch zu betrachten ist, wurden keine nennenswerten Chloridgehalte festgestellt. Innerhalb der äußeren 30 mm nahm der Chloridgehalt vergleichsweise stark ab. Es ist zu vermuten, dass dieses günstige Verhalten durch den verwendeten Zement (CEM II/B-S) beeinflusst wird. Betone mit diesem Zement zeigten in den Laborversuchen deutlich geringere Migrationskoeffizienten als Betone mit Portlandzement.

4.4.5 BY4 – Tunnel Eching

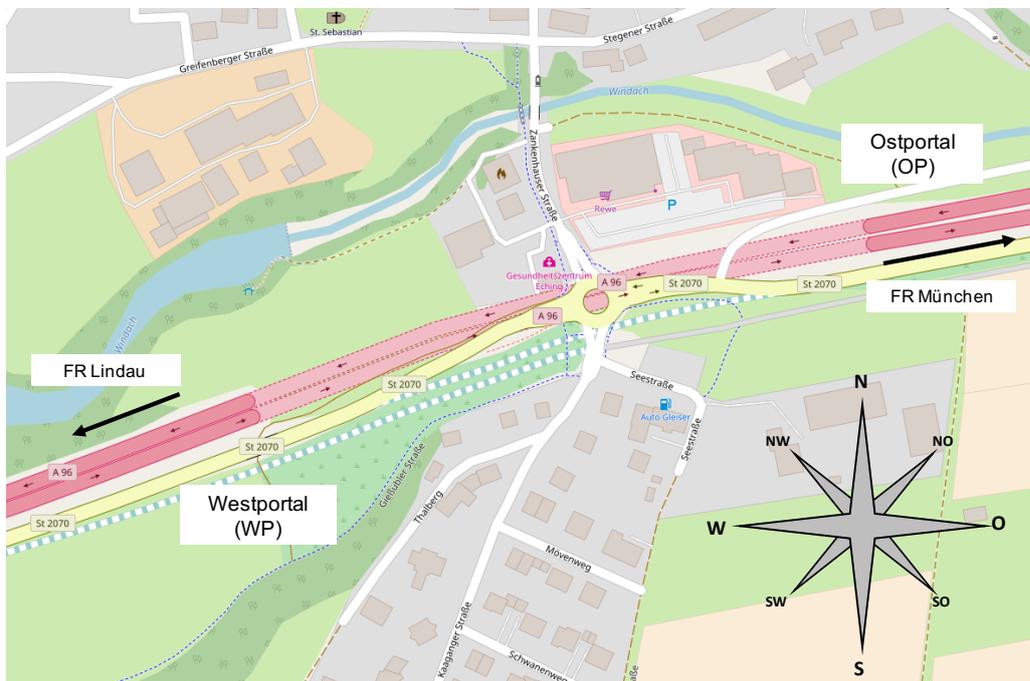


Bild 69: Lageplan Tunnel Eching (Quelle: © OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA)

In Bild 70 ist die Gradiente des Tunnels Eching vereinfacht dargestellt. Im Tunnel gibt es einen Tiefpunkt (Wanne).

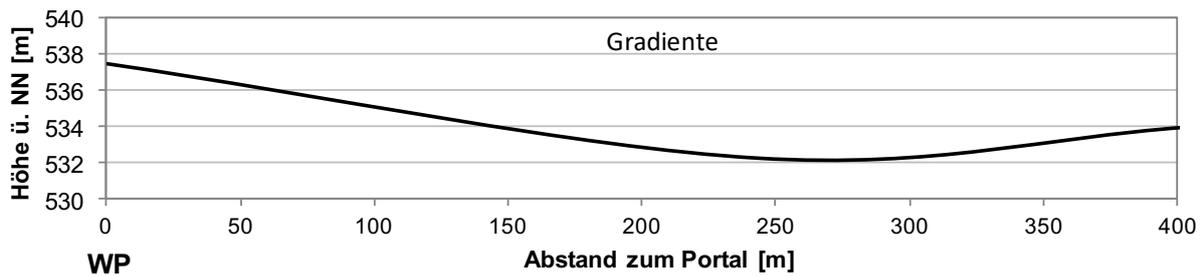


Bild 70: Tunnel Eching – Gradiente (vereinfachte Darstellung)

In den nachfolgenden Diagrammen sind die Ergebnisse der Untersuchungen aus (BERICHT-NR.: 10H0023-2 07.06.2010) in Auszügen grafisch dargestellt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die Ergebnisse auf die Betonmasse beziehen. Es ist weiterhin zu beachten, dass die Untersuchungen auch auf die Bereiche der Trogbauwerke vor Tunnelanfang bzw. nach Tunnelende erstrecken. Aus den Ergebnissen lassen sich folgende Tendenzen ableiten:

- über die gesamte Tunnellänge wurden Chloride nachgewiesen
- nur geringe Unterschiede zwischen FS und ÜS
- nur geringe bzw. kaum Abnahme des Chloridgehaltes über die Höhe
- geringer Einfluss aus der Gradiente erkennbar (Anstiege)

In dem o.g. Bericht des Prüfinstitutes finden sich keine Angaben zum Zementgehalt und zur Rohdichte des Betons. Aus der Länderabfrage geht ein Zementgehalt (CEM I) zwischen 310 und 350 kg/m³ Beton hervor. In einer Bewertung der Laborergebnisse durch ein auf diesem Gebiet erfahrendes Büro, mit den Ergebnissen der Länderabfrage übergeben, wird von 335 kg Zement je Kubikmeter Beton und von einer Rohdichte von 2400 kg/m³ ausgegangen. Vereinfachend wird in dieser Bewertung der Umrechnungsfaktor 7 verwendet, um den Chloridgehalt auf den Zementanteil zu beziehen. Angesichts der relativ unsicheren Annahmen zum Beton wird dieser Faktor 7 auch zur Interpretation der nachfolgenden Diagramme (Bild 71 bis Bild 82) empfohlen. Er ermöglicht bei ausreichender Genauigkeit eine einfache Orientierung in den Diagrammen, die sich auf die Originalwerte beziehen.

In den Diagrammen, die auch Messwerte aus dem Tunnel vor- bzw. nachgelagerten Bauteilen enthalten, ist die Lage des eigentlichen Tunnels durch senkrechte Linien gekennzeichnet.

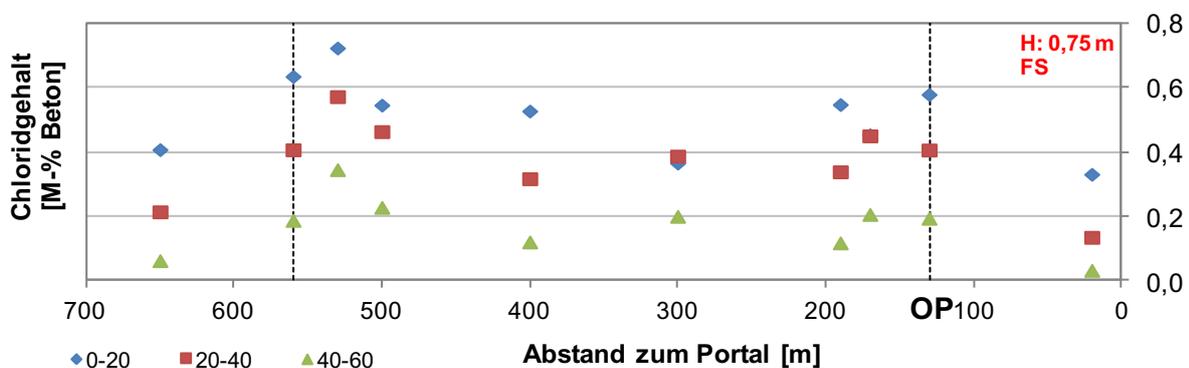


Bild 71: Tunnel Eching – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Lindau, FS, Höhe 0,75 m (gestrichelt: Tunnelbauwerk)

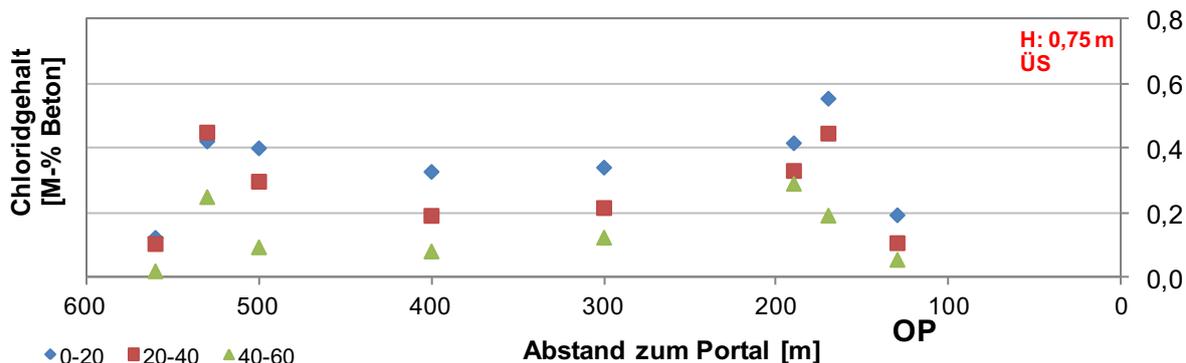


Bild 72: Tunnel Eching – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Lindau, ÜS, Höhe 0,75 m

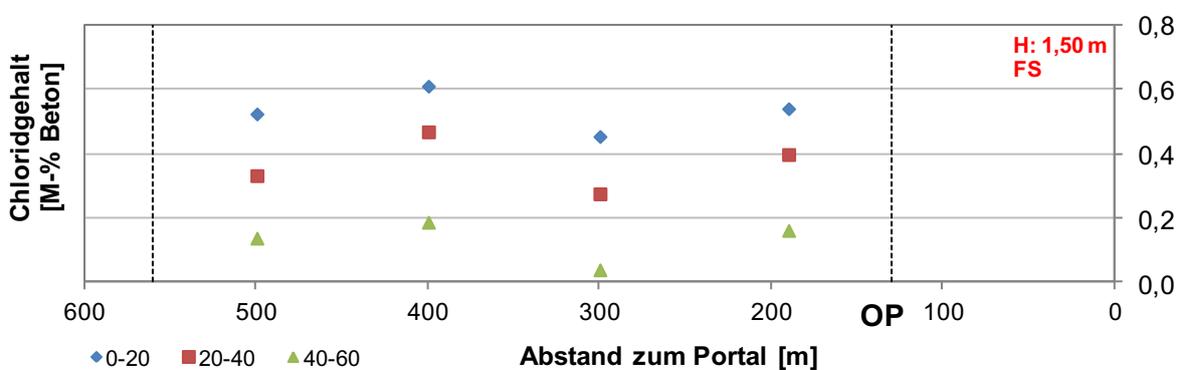


Bild 73: Tunnel Eching – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Lindau, FS, Höhe 1,50 m (gestrichelt: Tunnelbauwerk)

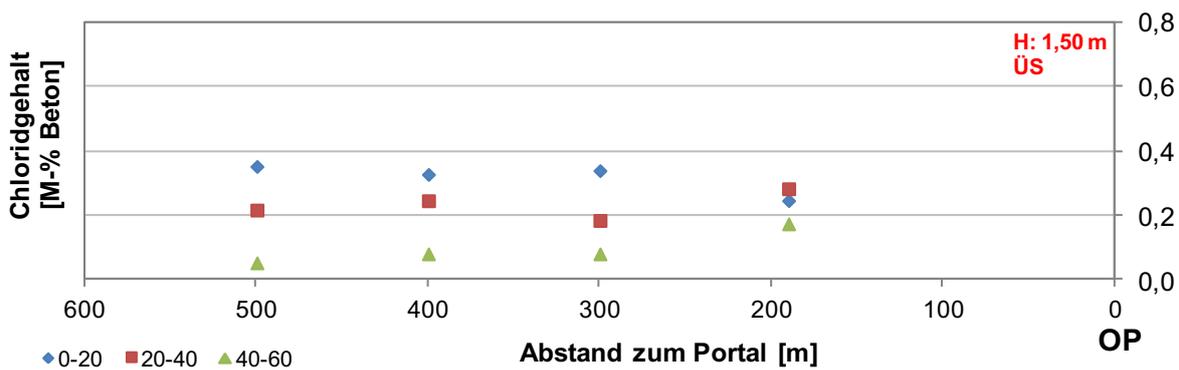


Bild 74: Tunnel Eching – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Lindau, ÜS, Höhe 1,50 m

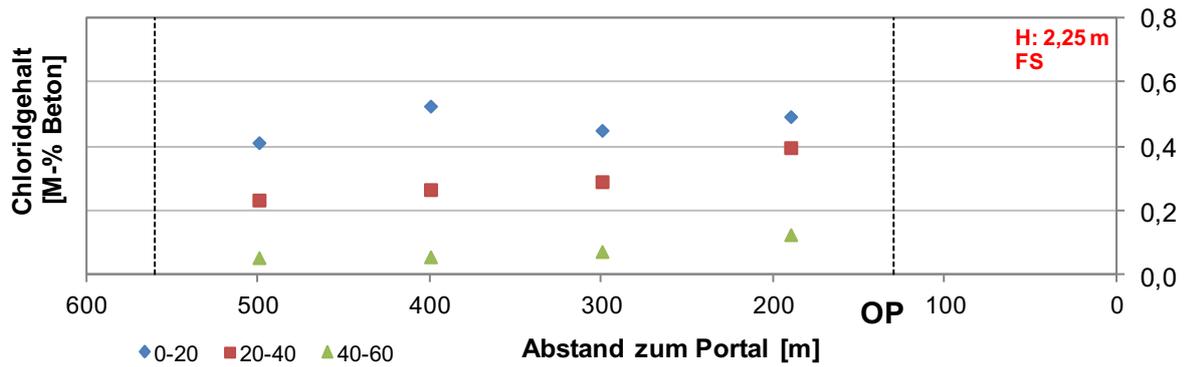


Bild 75: Tunnel Eching – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Lindau, FS, Höhe 2,25 m (gestrichelt: Tunnelbauwerk)

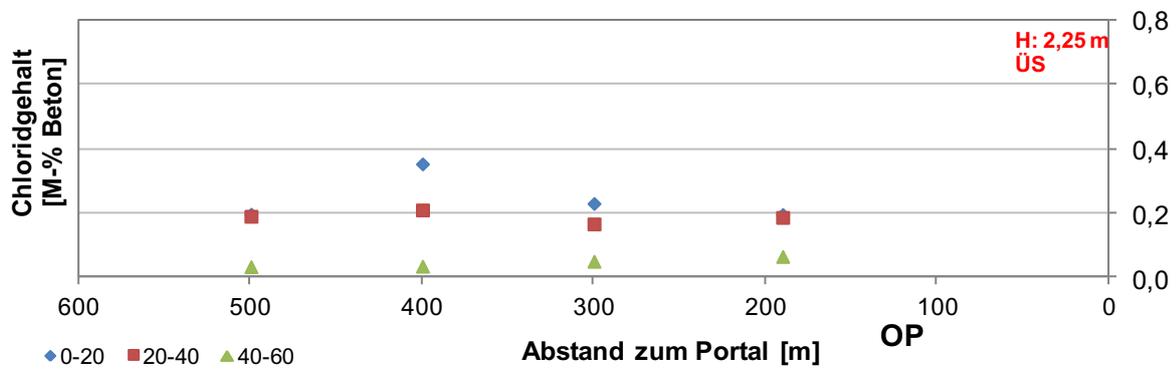


Bild 76: Tunnel Eching – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Lindau, ÜS, Höhe 2,25 m

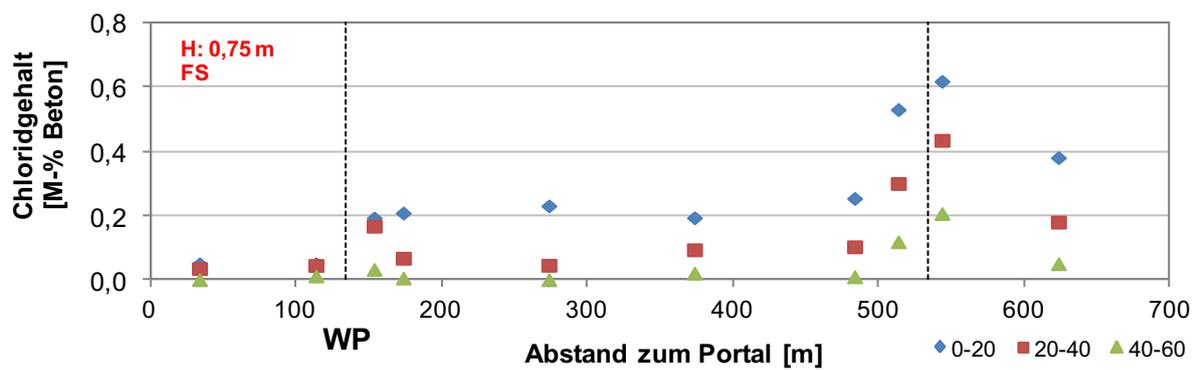


Bild 77: Tunnel Eching – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, FS, Höhe 0,75 m

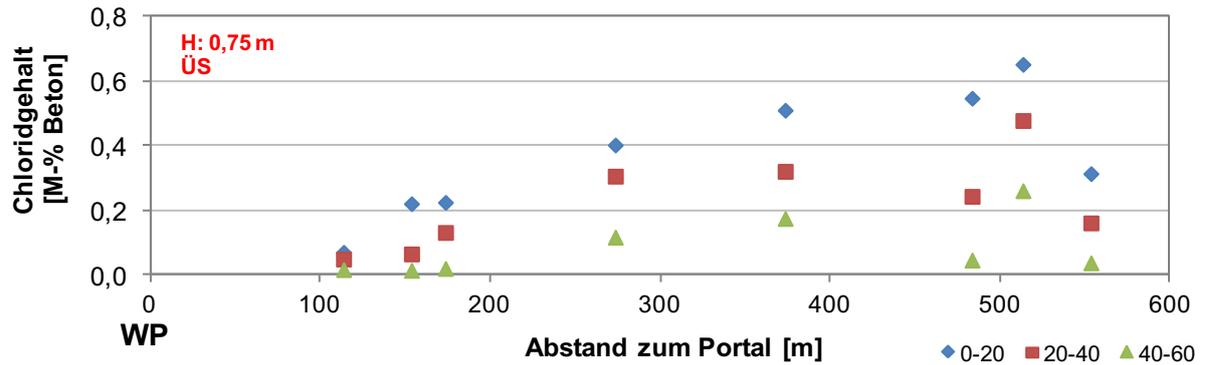


Bild 78: Tunnel Eching – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, ÜS, Höhe 0,75 m

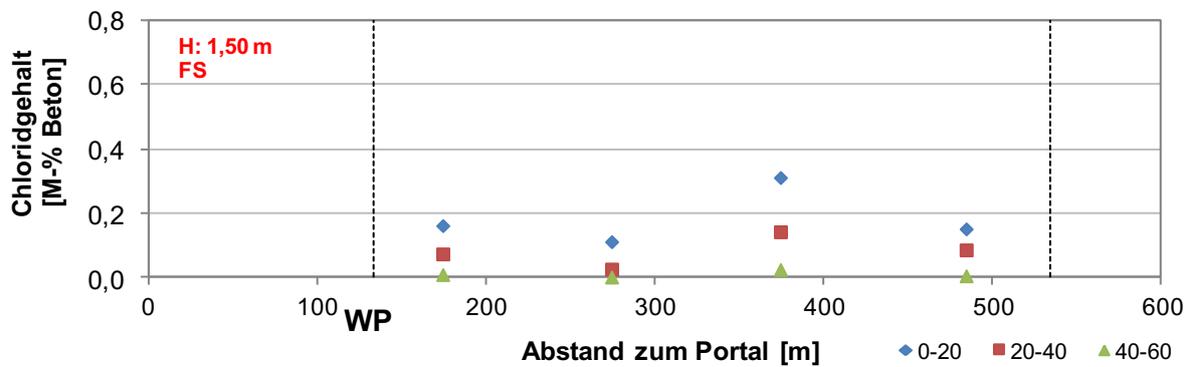


Bild 79: Tunnel Eching – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, FS, Höhe 1,50 m

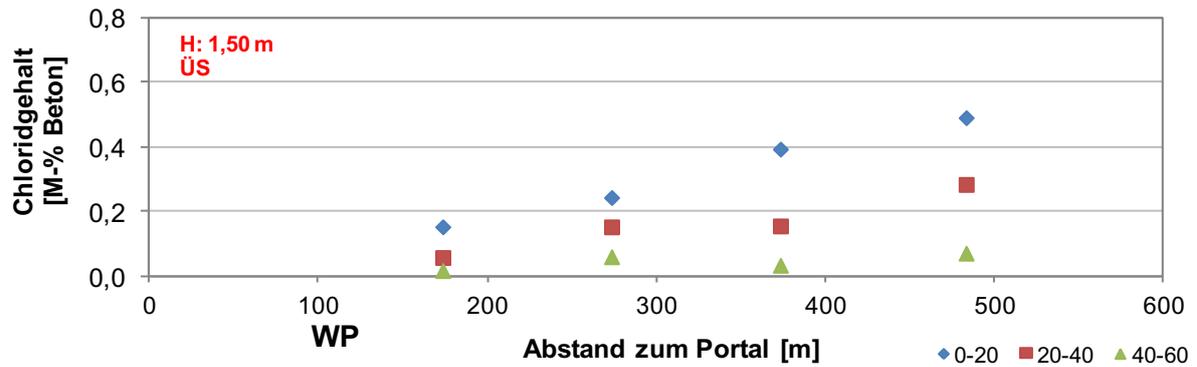


Bild 80: Tunnel Eching – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, ÜS, Höhe 1,50 m

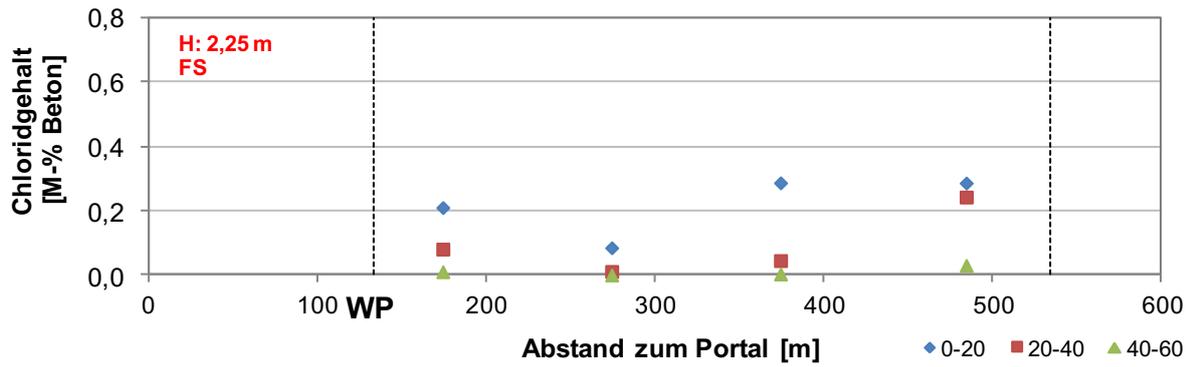


Bild 81: Tunnel Eching – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, FS, Höhe 2,25 m

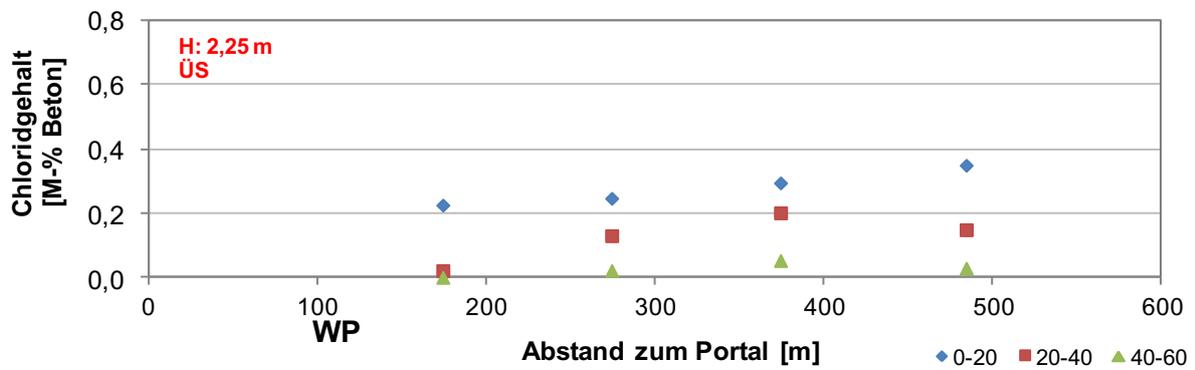


Bild 82: Tunnel Eching – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, ÜS, Höhe 2,25 m

4.4.6 BY5 – Tunnel Etterschlag

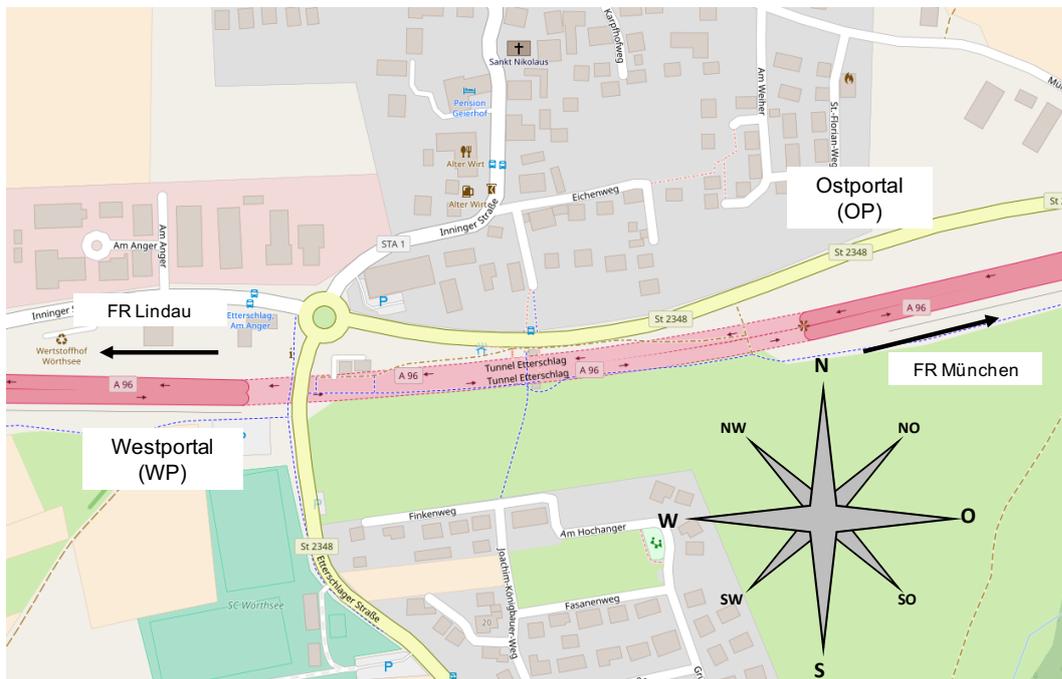


Bild 83: Lageplan Tunnel Etterschlag (Quelle: © OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA)

In Bild 84 ist die Gradiente des Tunnels Etterschlag vereinfacht dargestellt. Im Tunnel gibt es einen Tiefpunkt (Wanne).

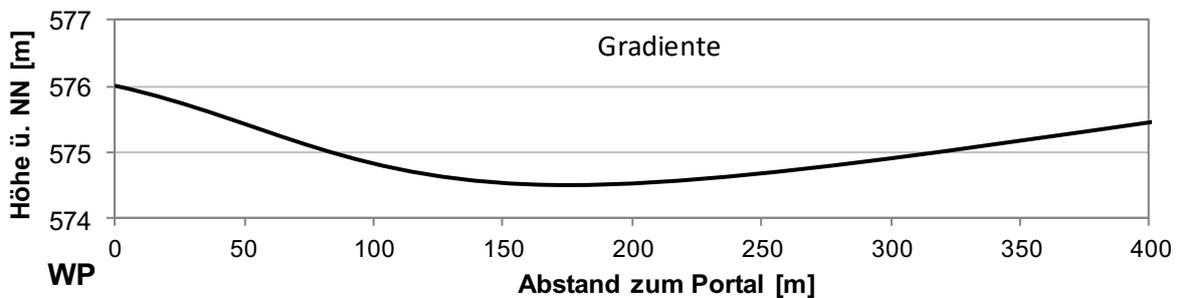


Bild 84: Tunnel Etterschlag – Gradiente (vereinfachte Darstellung)

In den nachfolgenden Diagrammen sind die Ergebnisse der Untersuchungen aus

- (BERICHT-NR.: 10H0023-1 07.06.2010),
- (BERICHT-NR.: 10H0033 30.07.2010),
- (BERICHT NR. 1690-2011-01 17.11.2011),
- (GUTACHTEN 13/009/1.1.1 28.02.2013),
- (GUTACHTEN 13/067/1.1.1 05.08.2014),
- (GUTACHTEN 13/066-067/2.1.2 05.08.2014),
- (GUTACHTEN 14/318/1.1.1 09.03.2016),

- (ABSCHLUSSBERICHT 14/318-067/1.3.1 23.06.2017),
- (IBWNR A 96BW146-1 04.06.2018) und
- (LÄNDERABFRAGE 31.01.2014a)

in Auszügen grafisch dargestellt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die Ergebnisse auf die Betonmasse beziehen. Aus den Ergebnissen lassen sich folgende Tendenzen ableiten:

- über die gesamte Tunnellänge wurden Chloride nachgewiesen
- nur geringe Unterschiede zwischen FS und ÜS
- nur geringe bzw. kaum Abnahme des Chloridgehaltes über die Höhe
- kein Einfluss aus der Gradienten erkennbar

Die Bewertung der damaligen Laborergebnisse, die dem Ergebnis der Länderabfrage beiliegt und die durch ein diesbezüglich versiertes Büro angefertigt wurde, geht, auf Annahmen gestützt, auch hier vom Faktor 7 zur Ermittlung des auf Zement bezogenen Chloridgehaltes aus. Wie im Abschnitt erläutert, wird die Verwendung dieses Umrechnungsfaktors auch hier zur einfachen Bewertung der auf den Originalwerten basierenden Diagramme empfohlen.

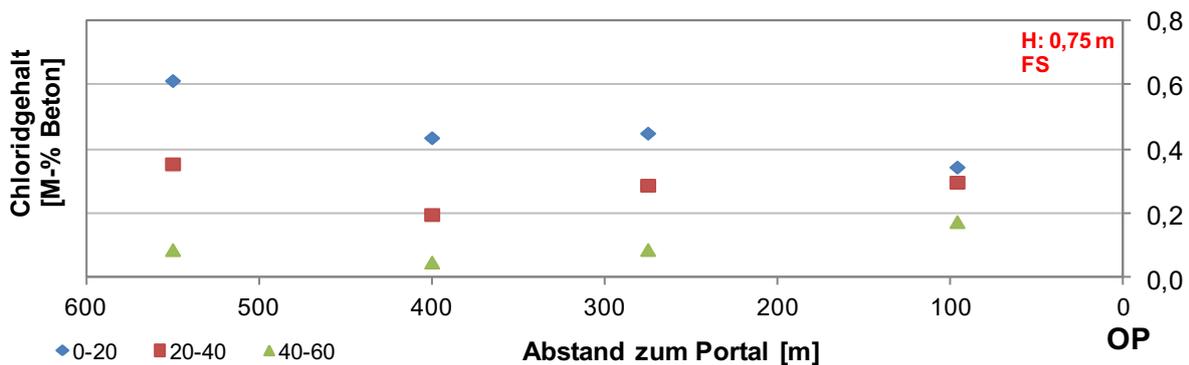


Bild 85: Tunnel Etterschlag – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Lindau, FS, Höhe 0,75 m

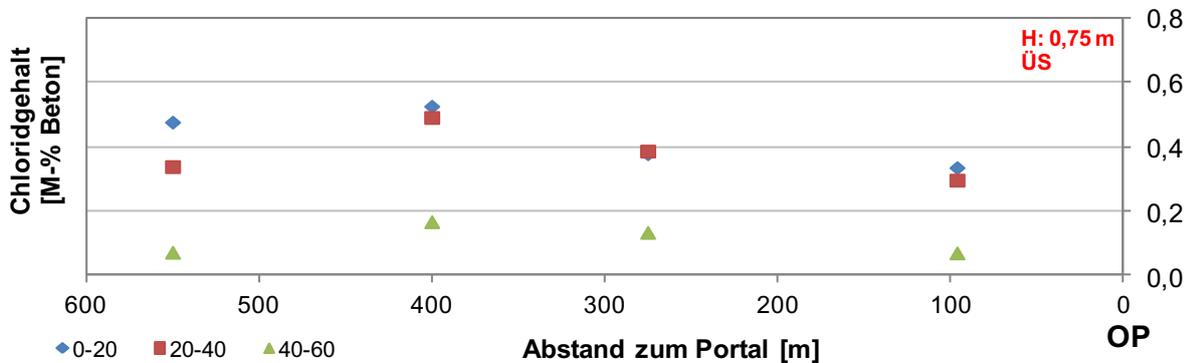


Bild 86: Tunnel Etterschlag – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Lindau, ÜS, Höhe 0,75 m

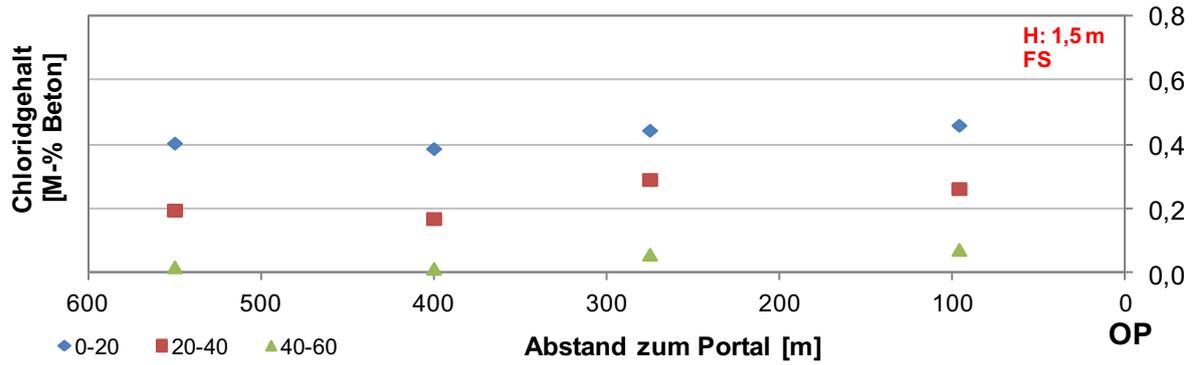


Bild 87: Tunnel Etterschlag – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Lindau, FS, Höhe 1,50 m

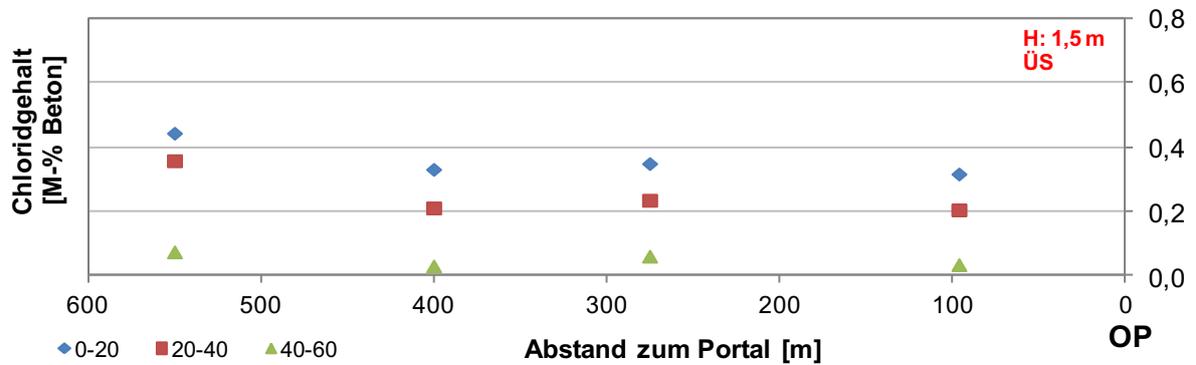


Bild 88: Tunnel Etterschlag – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Lindau, ÜS, Höhe 1,50 m

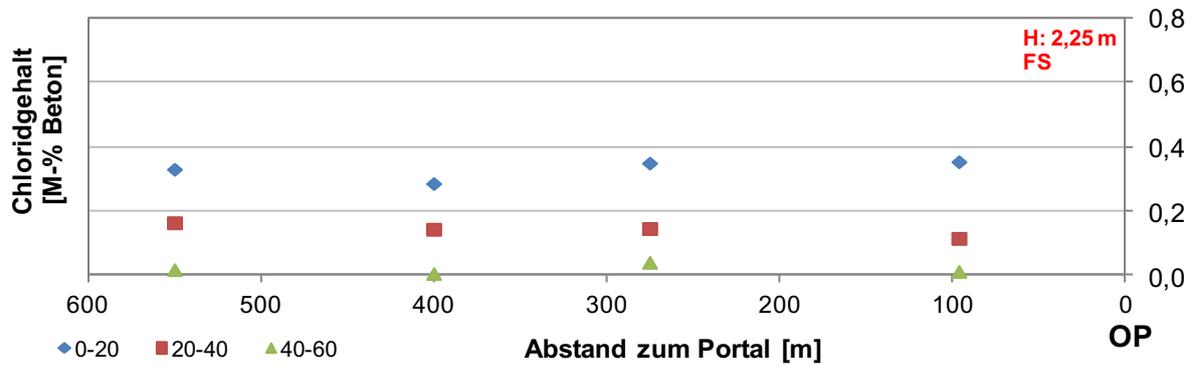


Bild 89: Tunnel Etterschlag – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Lindau, FS, Höhe 2,25 m

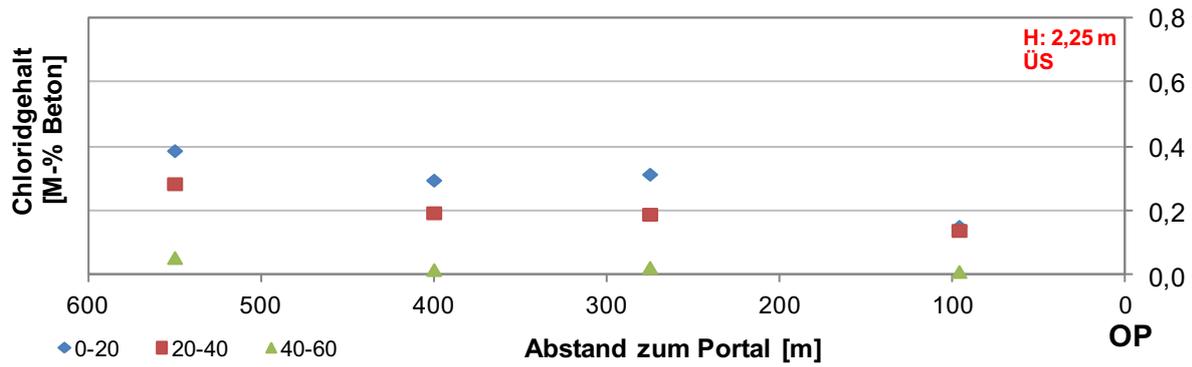


Bild 90: Tunnel Eterschlag – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Lindau, ÜS, Höhe 2,25 m

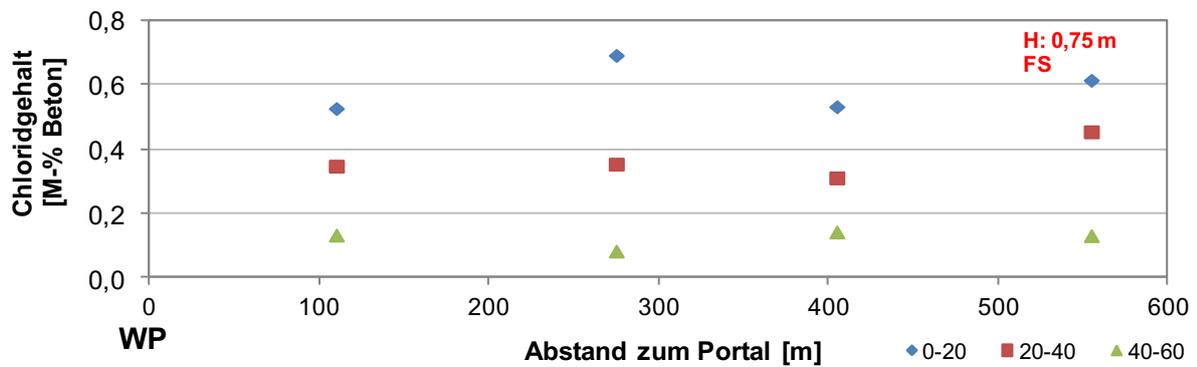


Bild 91: Tunnel Eterschlag – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, FS, Höhe 0,75 m

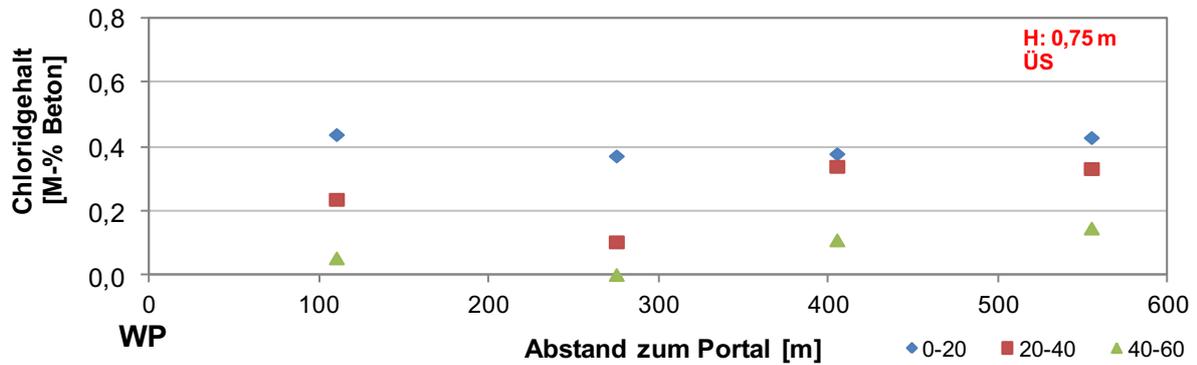


Bild 92: Tunnel Eterschlag – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, ÜS, Höhe 0,75 m

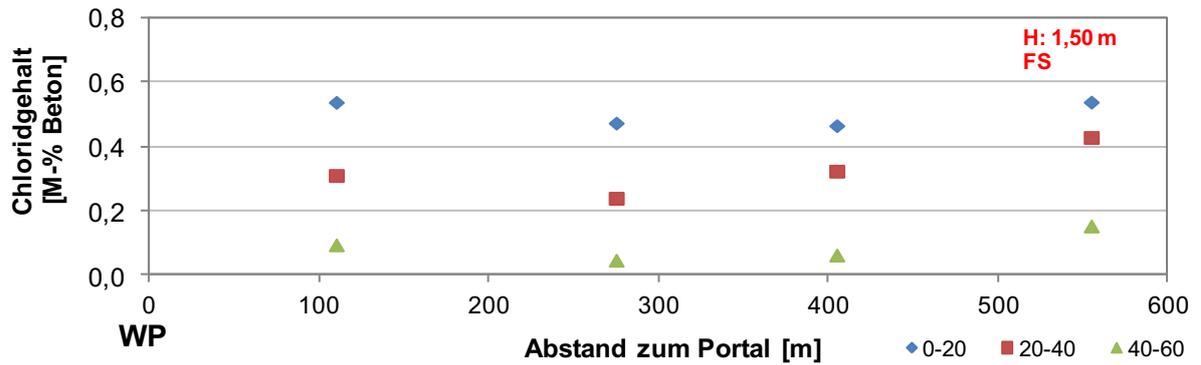


Bild 93: Tunnel Etterschlag – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, FS, Höhe 1,50 m

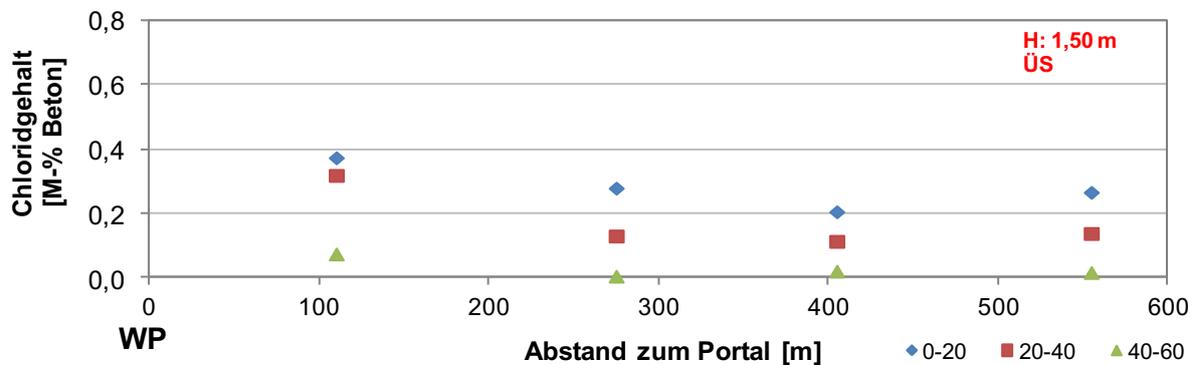


Bild 94: Tunnel Etterschlag – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, ÜS, Höhe 1,50 m

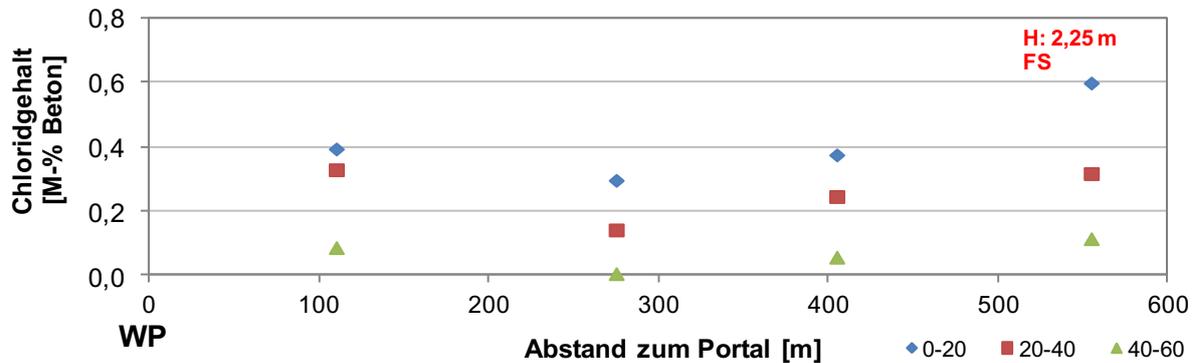


Bild 95: Tunnel Etterschlag – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, FS, Höhe 2,25 m

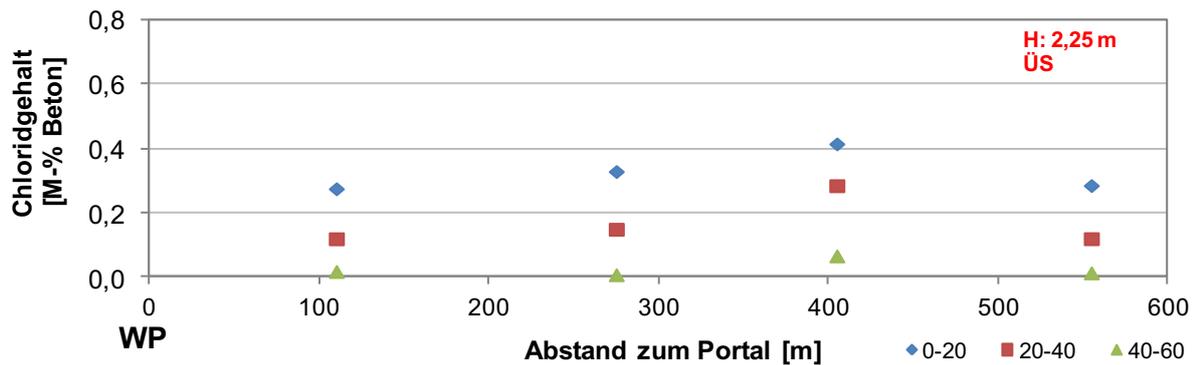


Bild 96: Tunnel Etterschlag – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, ÜS, Höhe 2,25 m

4.4.7 BY6 – Tunnel Allach

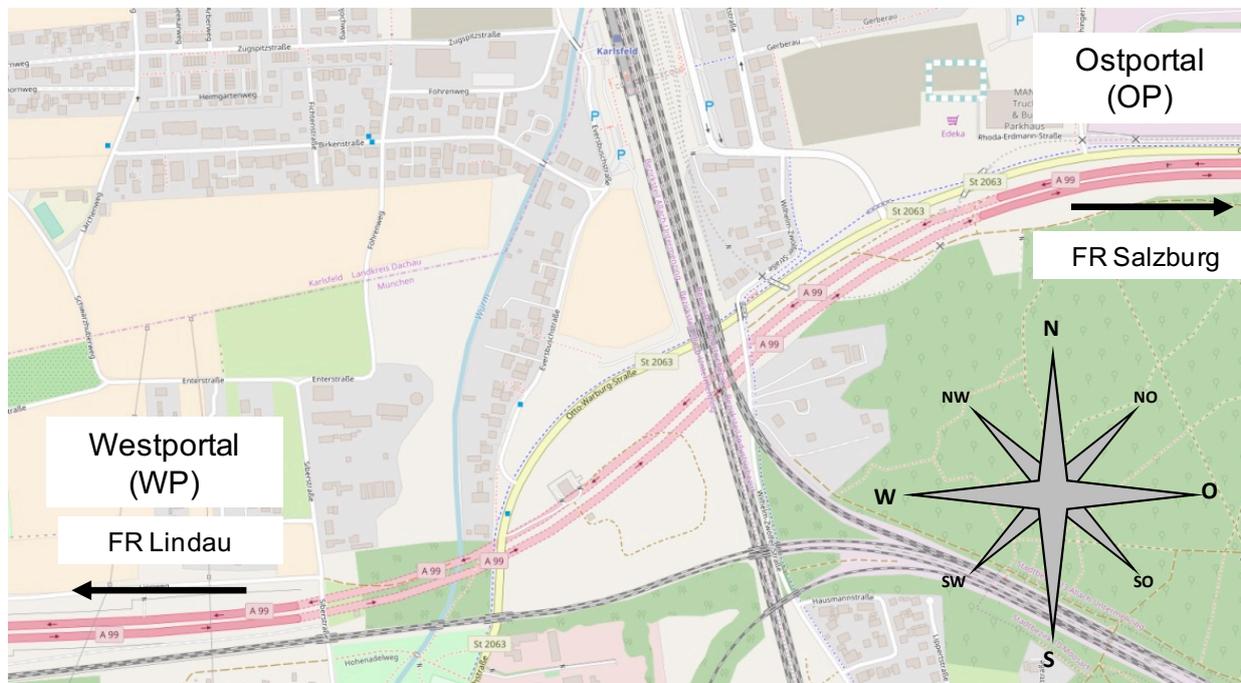


Bild 97: Lageplan Tunnel Allach (Quelle: © OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA)

Der Tunnel Allach war nicht in den Rückmeldungen der Länderabfrage enthalten, wurde aber im Jahr 2017 umfangreich untersucht. In den nachfolgenden Diagrammen sind die Ergebnisse der Untersuchungen aus (BERICHT-NR.: 17-344/1.1.1 18.12.2017) in Auszügen grafisch dargestellt. Die vorhandenen Unterlagen enthielten keine Angaben zur Gradiente.

Aus den Ergebnissen lassen sich folgende Tendenzen ableiten:

- über die gesamte Tunnellänge wurden Chloride nachgewiesen
- zum Teil höhere Werte an der ÜS
- nur geringe bzw. kaum Abnahme des Chloridgehaltes über die Höhe

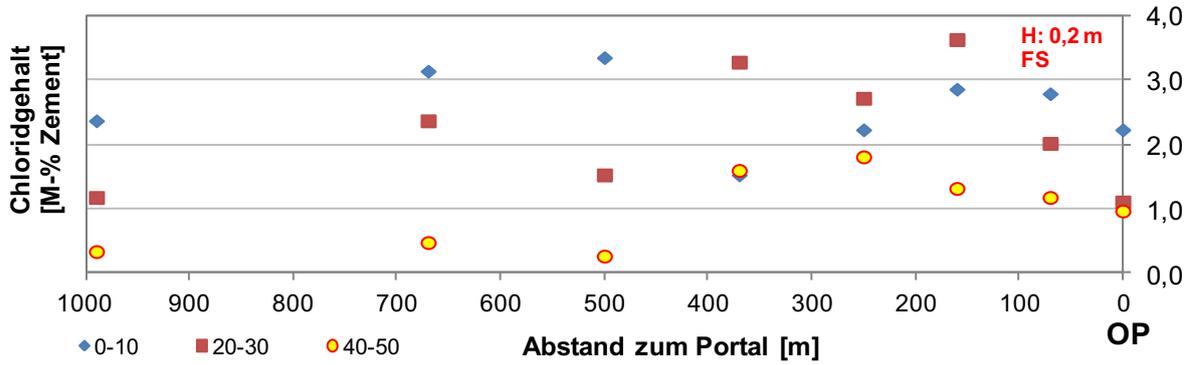


Bild 98: Tunnel Allach – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Stuttgart, FS, Höhe 0,20 m

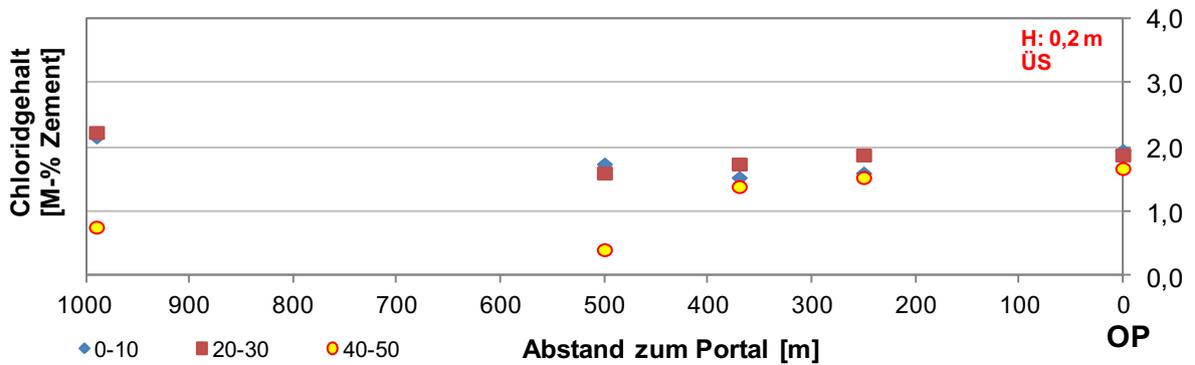


Bild 99: Tunnel Allach – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Stuttgart, ÜS, Höhe 0,20 m

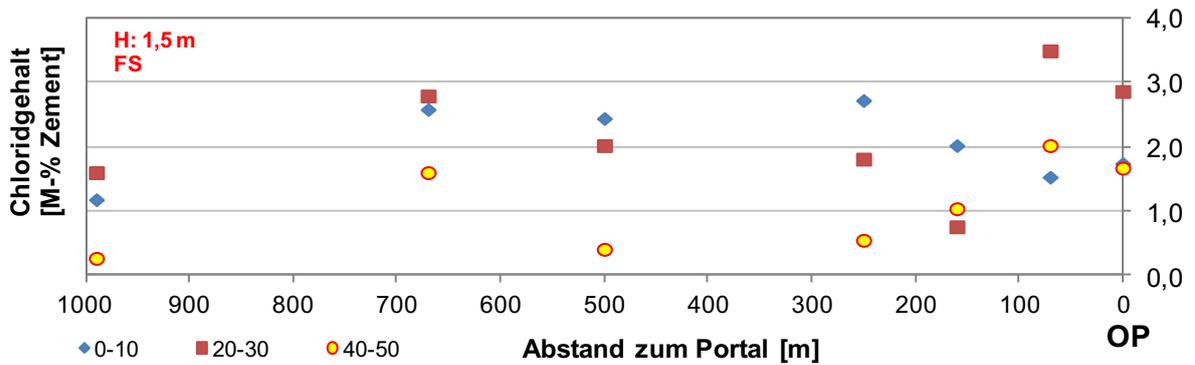


Bild 100: Tunnel Allach – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Stuttgart, FS, Höhe 1,50 m

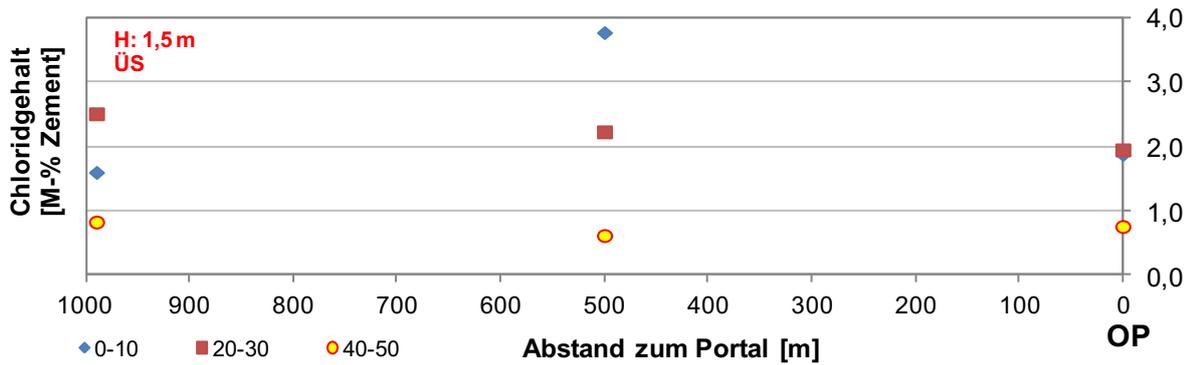


Bild 101: Tunnel Allach – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Stuttgart, ÜS, Höhe 1,50 m

4.4.8 Zusammenfassung (Bayern)

In Tabelle 14 sind die Tunnel zur besseren Übersicht noch einmal aufgeführt.

Bezeichnung	Tunnel	Straße	Inbetriebnahme	Bauart	Länge [m]
BY1	Pfaffenstein	A93	1977	bergmännisch	880
BY2	Prüfening	A93	2001	offen	618
BY3	Farchant	B2	2000	bergmännisch	2300
BY4	Eching	A96	1995	offen	720
BY5	Etterschlag	A96	1998	offen	660
BY6 ¹⁾	Allach	A99	1998	offen	1030

¹⁾ nicht Bestandteil der Länderabfrage

Tabelle 14: Übersicht Tunnel Bayern

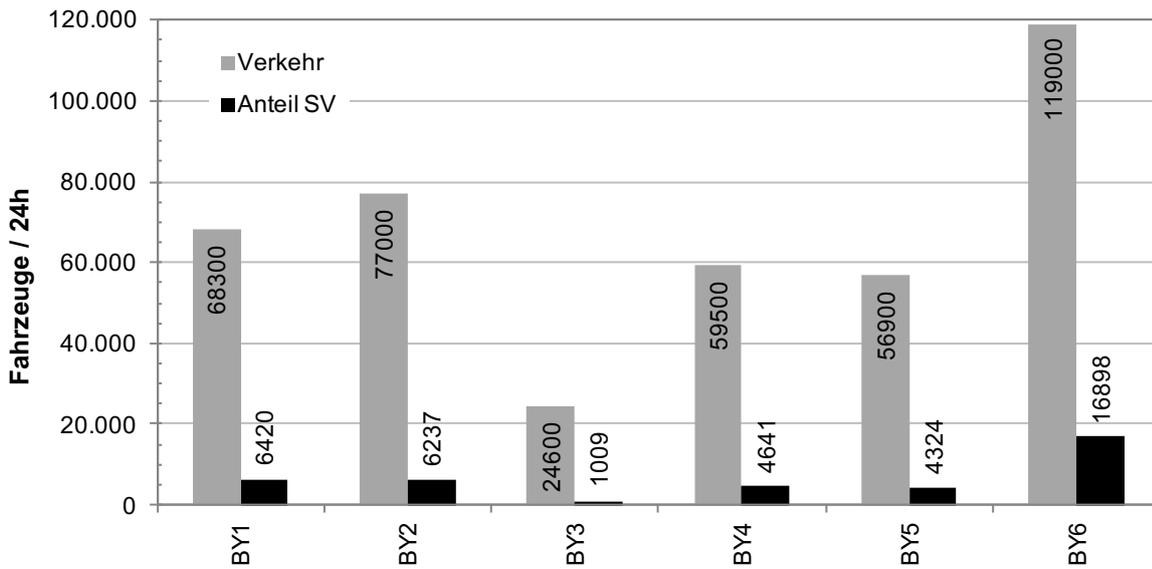


Bild 102: Verkehrsmenge (2015) in unmittelbarer Nähe zum Bauwerk (BAST 26.01.2017), (BAST 31.08.2017), (SVZ-BW 14.06.2018)

Aus den zur Verfügung stehenden Untersuchungsberichten wurde für jeden Tunnel je Fahrspur und Fahrtrichtung ein durchschnittlicher Chloridwert für drei Tiefenbereiche, gemittelt über die Höhe und die Lage im Bauwerk, bestimmt. Für die folgende Auswertung wurde dann der größte Wert aus allen Fahrspuren herangezogen (Max,I). Außerdem wurde der größte nachgewiesene Einzelwert (Max,II) ermittelt. Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Tabellen zusammengefasst. Die grafische Darstellung ist in Bild 103 und Bild 104 enthalten.

Tiefe [mm]	Chloridgehalt in M.-% bezogen auf Zement					
	FR Holledau		FR Weiden		Max,I	Max,II
	FS	ÜS	FS	ÜS		
0-20	<u>3,18</u>	2,02	3,14	1,28	<u>3,18</u>	10,95
20-40	<u>3,12</u>	1,78	2,60	1,85	<u>3,12</u>	7,25
40-60	<u>2,15</u>	1,33	1,38	1,19	<u>2,15</u>	4,92

Tabelle 15: BY1 – Pfaffenstein, Chloridgehalt

Tiefe [mm]	Chloridgehalt in M.-% bezogen auf Zement		
	FR Weiden	Max,I	Max,II
	FS		
0-20	<u>0,71</u>	<u>0,71</u>	1,17
20-40	<u>0,58</u>	<u>0,58</u>	0,86
40-60	<u>0,22</u>	<u>0,22</u>	0,30

Tabelle 16: BY2 – Prüfening, Chloridgehalt

Tiefe [mm]	Chloridgehalt in M.-% bezogen auf Zement							Max,I	Max,II
	FR München Entnahme 0,25 m		FR München Entnahme 1,50 m		FR Garmisch Entnahme 0,25 m				
	FS	ÜS	FS	ÜS	FS	ÜS			
5-15	2,07	1,46	2,09	0,85	<u>3,45</u>	2,44	<u>3,45</u>	4,73	
15-30	0,87	0,74	0,47	0,20	<u>1,04</u>	0,61	<u>1,04</u>	2,17	
30-45	<u>0,35</u>	0,19	0,15	0,14	0,28	0,23	<u>0,35</u>	1,24	

Tabelle 17: BY3 – Farchant, Chloridgehalt

Tiefe [mm]	Chloridgehalt in M.-% bezogen auf Zement						Max,I	Max,II
	FR Lindau		FR München					
	FS	ÜS	FS	ÜS				
0-20	<u>3,59</u>	2,22	1,71	2,36	<u>3,59</u>	5,12		
20-40	<u>2,51</u>	1,69	0,88	1,28	<u>2,51</u>	4,05		
40-60	<u>1,01</u>	0,75	0,24	0,43	<u>1,01</u>	2,46		

Tabelle 18: BY4 – Eching, Chloridgehalt

Tiefe [mm]	Chloridgehalt in M.-% bezogen auf Zement					Max,I	Max,II
	FR Lindau		FR München				
	FS	ÜS	FS	ÜS			
0-20	2,81	2,59	<u>3,50</u>	2,47	<u>3,50</u>	4,89	
20-40	1,73	2,05	<u>2,25</u>	1,54	<u>2,25</u>	3,57	
40-60	0,61	0,48	<u>0,69</u>	0,40	<u>0,69</u>	2,07	

Tabelle 19: BY5 – Etterschlag, Chloridgehalt

Tiefe [mm]	Chloridgehalt in M.-% bezogen auf Zement					Max,I	Max,II
	FR Stuttgart		FR Salzburg				
	FS	ÜS	FS	ÜS			
0-20	3,28	2,97	2,64	3,33	3,33	6,06	
20-40	3,31	2,00	1,29	2,28	3,31	7,04	
40-60	1,35	1,00	0,43	1,01	1,35	4,67	

Tabelle 20: BY6 – Allach, Chloridgehalt

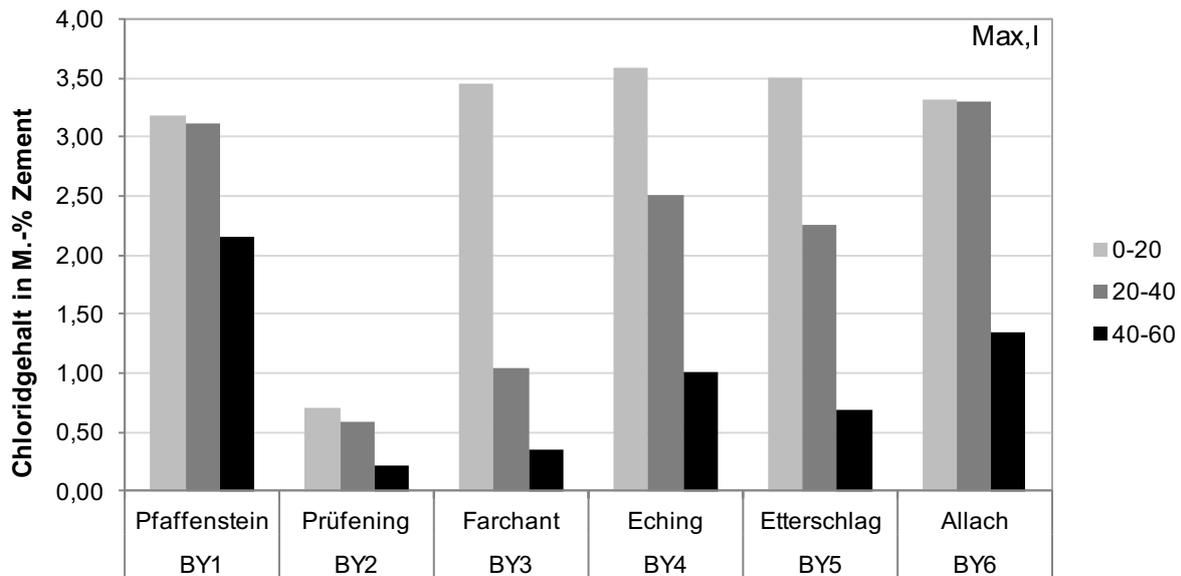


Bild 103: Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen (Maximalwert aus Mittelwerten je Fahrspur und -richtung; unabhängig von Höhe und Abstand zum Portal)

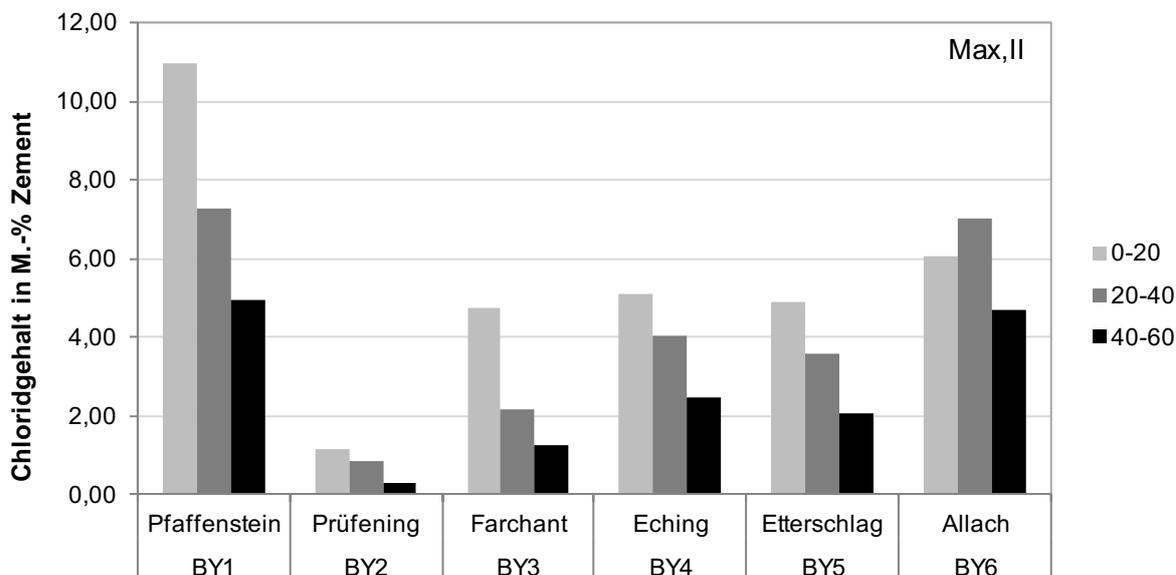


Bild 104: Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen (größter nachgewiesener Einzelwert)

Wie aus dem Diagramm in Bild 103 hervorgeht, ist in den bayerischen Tunneln die durchschnittliche Chloridbelastung im oberflächennahen Bereich (0-20 mm), mit Ausnahme des Tunnels Prüfening (BY2), auf einem ähnlich hohen Niveau. Größere Unterschiede treten erwartungsgemäß in den tieferen Schichten auf, was auf den zeitabhängigen Chloridtransport ins Bauteilinnere zurückzuführen ist (Bild 105). Es fällt auf, dass in der Schicht 40 bis 60 mm Tiefe der Chloridgehalt in den Tunneln Prüfening (BY2) und Farchant (BY3) geringer ist, als an den Vergleichsbauwerken. Im Gegensatz zu den anderen Bauwerken wurden diese Bauwerke unter Verwendung von Portlandkompositzement errichtet, während bei den übrigen Bauwerken in Bayern Portlandzement verwendet wurde. Daneben handelt es sich bei den Tunneln BY2 und BY3 um die neuesten Bauwerke der betrachteten bayrischen Tunnel. Beide Einflüsse lassen in größerer Tiefe einen vergleichsweise niedrigen Chloridgehalt erwarten.

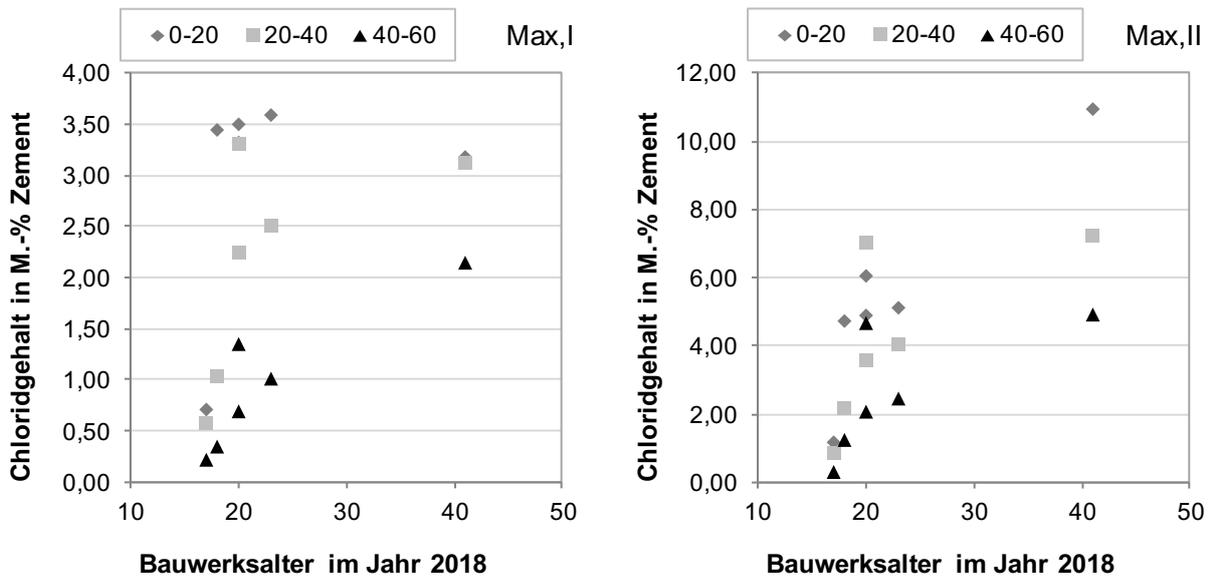


Bild 105: Chloridgehalt in bayrischen Tunneln (BY1-BY6) in verschiedenen Tiefen in Abhängigkeit des Bauwerksalters; links: Max,I; rechts: Max,II

Unklar ist bisher, warum im Tunnel Prüfening (BY2) im Vergleich zu den anderen Bauwerken so geringe Chloridgehalte festgestellt wurden. Das Bauwerksalter ist mit den Tunneln BY3-BY6 vergleichbar. Die Verkehrsbelastung ist die zweithöchste der bayrischen Tunnel. Zu berücksichtigen ist, dass für den Tunnel Prüfening vergleichsweise wenige Ergebnisse vorliegen, und sich die Untersuchungen außerdem nur auf eine Fahrtrichtung und die Fahrspur beschränken.

In der (LÄNDERABFRAGE 31.01.2014b) wurde angegeben, dass im Tunnel nur an 15 Tagen im Jahr gestreut wird (analog zum Tunnel Pfaffenstein). Die Werte scheinen im Vergleich zu den anderen Tunneln jedoch deutlich zu niedrig zu sein (vgl. Bild 26 und Tabelle 21). Es ist davon auszugehen, dass in den Tunneln BY1 und BY2 auch das Feuchtsalz bzw. Sole zum Einsatz kommt, auch wenn das in der Rückmeldung zur Länderabfrage nicht direkt ausgewiesen wurde. Insofern gibt es in chemisch/stofflicher Hinsicht keine Unterschiede bei den verwendeten Streumitteln.

Bezeichnung	Tunnel	Streumittleinsatz an	Streuen im Tunnel	Streumittel
BY1	Pfaffenstein	ca. 15 Tagen/Jahr	ja ²⁾	NaCl
BY2	Prüfening	ca. 15 Tagen/Jahr	ja ²⁾	NaCl
BY3	Farchant	ca. 120 Tagen/Jahr	nein	NaCl (FS30)
BY4	Eching	ca. 120 Tagen/Jahr	ja	NaCl (FS30, FS100)
BY5	Etterschlag	ca. 130 Tagen/Jahr	ja	NaCl (FS30, FS100)
BY6 ¹⁾	Allach	keine Angabe ¹⁾	keine Angabe ¹⁾	keine Angabe ¹⁾

¹⁾ nicht Bestandteil der Länderabfrage

²⁾ mit reduzierter Streumenge, bis Fahrbahn trocken ist

Tabelle 21: Übersicht Tunnel Bayern – Streumittel und Streumittleinsatz

Die reine Profilform bzw. Bauweise (bergmännisch/offen) kann nicht ausschlaggebend für die Unterschiede sein (Tabelle 14). Allerdings hat das Profil des Tunnels einen Einfluss auf die Chlo-

Bezeichnung	Tunnel	Zement	Beton ²⁾	Oberfläche
BY1	Pfaffenstein	Portlandzement PZ450F CEM I	B35	Sichtbeton
BY2	Prüfening	Portlandkalksteinzement CEM II	B25	Sichtbeton
BY3	Farchant	Portlandflugaschezement CEM II/B-S 32,5 R	B25	Sichtbeton
BY4	Eching	Portlandzement PZ35F CEM I	B25	Sichtbeton + OS-C
BY5	Etterschlag	Portlandzement CEM I	B35	Sichtbeton
BY6 ¹⁾	Allach	Portlandzement CEM I	B25	Sichtbeton

¹⁾ nicht Bestandteil der Länderabfrage

²⁾ projektierte Betongüte

Tabelle 22: Übersicht Tunnel Bayern – Zement und Oberflächenbehandlung

4.5 Zusammenfassung zur Länderabfrage

Gemäß den Angaben des BMVI in (BMVI 21.06.2018) waren zu Beginn des Jahres 2016 über 260 Straßentunnel im Zuge von Bundesfernstraßen in Betrieb. Der gesamte Straßentunnelbestand, einschließlich Land-, Kreis- und Stadtstraßen, lag bei etwa 400.

Im Ergebnis der 2013 initiierten Länderabfrage gingen Rückmeldungen zu insgesamt 55 Bauwerken ein, was etwa 15 % des gesamten Straßentunnelbestandes entspricht. Von diesen 55 Tunneln waren 22²⁾ Tunnel nachweislich mit Chloriden belastet. Daraus kann im Umkehrschluss jedoch nicht geschlussfolgert werden, dass die restlichen Bauwerke unbelastet sind. Für diese Tunnel lagen lediglich keine Untersuchungsergebnisse vor. In den Länderabfragen wurde dies zu meist mit fehlenden Schäden begründet.

Als ein wesentliches Ergebnis der Länderabfrage ist zuallererst festzustellen, dass in allen untersuchten Tunneln auch Chloride nachgewiesen wurden. Die Darstellung von Korrelationen und Zusammenhängen gestaltet sich schwierig, da keine Vergleiche mit Bauwerken möglich sind, an denen Untersuchungen durchgeführt, aber keine Chloride nachgewiesen wurden.

Im Zuge der Auswertung wurden diverse Parameter hinsichtlich ihres qualitativen und quantitativen Einflusses auf den Chloridgehalt analysiert. Die Ergebnisse werden nachfolgend zusammengefasst. Parameter mit möglicher Korrelation mit dem Chloridgehalt, die sich zweckmäßig in Diagrammen darstellen lassen, sind in Bild 29 bis Bild 37 den nach aufsteigendem Chloridgehalt geordneten Bauwerken gegenübergestellt, wobei der größte Mittelwert aller Fahrstreifen (=Tunnelwände) herangezogen wurde. Für die nicht zur Darstellung in einem Diagramm geeigneten möglichen Einflüsse Straßentyp und Tunnelprofil sind mögliche Zusammenhänge mit dem Chloridgehalt in Tabelle 12 dargestellt.

Straßentyp

Der Straßentyp (Bundesstraße, Autobahn) hatte keinen direkten Einfluss auf die Chloridbelastung. Die Verteilung der chloridbelasteten Bauwerke auf Autobahnen, Bundesstraßen und untergeordnete Straßen ähnelt der Verteilung aller Bauwerke, bezogen auf den Straßentyp. Die Kennwerte Max,I und Max,II unterscheiden sich, gemittelt für die Straßentypen nicht signifikant zwischen Autobahnen und Bundesstraßen. Für die Landes- und Kreisstraßen reicht die Fallanzahl nicht für eine Bewertung aus.

²⁾ die 3 zusätzlich einbezogenen Tunnel (Allach, Oberkassel und Alte Burg) sind hier nicht enthalten

Verkehrsaufkommen

Das Verkehrsaufkommen hat tendenziell einen Einfluss auf die Höhe der Chloridbelastung. Es bestehen jedoch Abhängigkeiten zum Streumittleinsatz.

Bauweise / Profil

Die Bauweise (bergmännisch oder offene Bauweise) hat keinen Einfluss auf die Chloridbelastung. Allerdings hat die mit der Bauweise verknüpfte Profilform einen Einfluss auf die Chloridverteilung im Tunnel. So konnte bei den Tunneln in offener Bauweise beobachtet werden, dass über die Höhe nur eine geringe Abnahme des Chloridgehaltes auftrat. Zudem waren zwischen den Proben an Außenwand (Fahrspur) und Innenwand (Überholspur) z. T. kaum Unterschiede zu verzeichnen.

Straßenquerschnitt

Der Straßenquerschnitt, das heißt die Breite und Anordnung von Fahr-, Rand- und Standstreifen, hat möglicherweise einen Einfluss auf die Verteilung und die Höhe der Chloridbelastung der Wände. Gesicherte Aussagen dazu sind jedoch nicht möglich. So war die erwartete Reduzierung der Chloridbelastung bei Vorhandensein eines Beschleunigungsstreifens nicht in allen Fällen nachweisbar, auf der anderen Seite konnte der geringe Chloridgehalt der Tunnelwand neben einem Beschleunigungsstreifen nicht eindeutig nur auf dessen Existenz zurückgeführt werden.

Bauwerksalter

Ein qualitativer Einfluss des Bauwerksalters auf die Chloridbelastung (belastet / unbelastet) ließ sich nicht feststellen, da keine Negativergebnisse (Untersuchungen bei denen in den Proben keine Chloride nachgewiesen wurden) vorliegen. Auf die Höhe des Chloridgehaltes hatte das Bauwerksalter zunächst ebenfalls keinen Einfluss. Allerdings konnte bei den ausführlicher betrachteten Tunneln in Bayern beobachtet werden, dass der Chloridgehalt in den größeren Tiefen (40-60 mm) über die Jahre tendenziell zunimmt. Das entspricht wegen der zeitabhängigen Transportprozesse auch der Erwartung.

Mittlere Länge / mittlere Höhe ü. NN

Die mittlere Länge und Höhe (ü. NN) der Tunnel hat augenscheinlich einen Einfluss auf die Höhe des Chloridgehaltes.

Verwendete Streumittel

In Bezug auf die zum Einsatz kommenden Streumittel konnten keine Auswirkungen festgestellt werden. Auch und insbesondere weil die Ausführungen dazu in den Länderabfragen unterschiedlich detailliert waren.

Tage mit Streumittleinsatz

Die Angaben zum Streumittleinsatz sind zum Teil nur unvollständig gewesen bzw. wiesen sie große Unterschiede bei regional nicht weit entfernten Bauwerken auf (120 d/a zu 15 d/a). Grundsätzlich lässt sich jedoch feststellen, dass die Anzahl der Tage mit Streumittleinsatz einen tendenziellen Einfluss auf die Höhe der Chloridbelastung hat.

Zusammensetzung des Betons / Zement

Der Einfluss des zur Betonherstellung genutzten Zementes überwiegend kam in den Bauwerken Portlandzement (\approx CEM I) zum Einsatz – war mit den Ergebnissen der Länderabfrage nicht sicher zu erkennen. Insbesondere war der erwartete günstige Einfluss von Portlandkompositzementen als Hauptzementart (CEM II), insbesondere Portlandhüttenzement, auf die Chloridbelastung nicht zuverlässig nachweisbar. Zur Relativierung und Einordnung dieses überraschenden Ergebnisses wird darauf verwiesen, dass der größte Teil der Bauwerke unter Verwendung von Portlandzement

errichtet wurde. Zur Überprüfung des aus der Literatur bekannten günstigen Verhaltens von Beton mit Hochofenzement standen nur zwei Bauwerke zur Verfügung. Davon eignete sich zur Betrachtung des Migrationsverhaltens nur ein Bauwerk (BY3), bei dem das erwartete große Gefälle der gemessenen Chloridkonzentration über die Entnahmetiefe feststellbar war. Die Aussagekraft der an diesem Bauwerk gewonnenen Ergebnisse erfährt wiederum Einschränkungen durch ein nach mehrjähriger Nutzung aufgebrachtes Oberflächenschutzsystem.

Straßenführung im Höhenplan (Gradiente)

Bei der Auswertung der Untersuchungsergebnisse der bayerischen Tunnel konnte zum Teil eine Abhängigkeit des Chloridgehaltes von der Gradiente festgestellt werden. Bei Tiefpunkten (Wannen) im Tunnel konnte mit dem Anstieg der Gradiente eine Zunahme des Chloridgehaltes beobachtet werden.

Entfernung zum Portal

In den untersuchten Tunneln wurden über die gesamte Bauwerkslänge Chloride nachgewiesen. Auch in Tunnelmitte wurden dabei teilweise Konzentrationen in ähnlicher Höhe wie im Einfahrtbereich festgestellt. Die höchsten Konzentrationen traten zumeist im ersten Tunnel Drittel auf. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in diesem Bereich die Dichte der Untersuchungsstellen meist am größten war. Daneben spricht diese Feststellung dafür, dass der Eintrag von Salzen aus dem Streckenbereich vor dem Tunnel erkennbar zur Chloridbelastung der Tunnelinnenschale beiträgt.

4.6 Schlussfolgerungen für eigene Untersuchungen

Abschließend wurden aus den gewonnenen Erkenntnissen Schlussfolgerungen für die Untersuchungen vor Ort herausgearbeitet.

Entsprechend der Auswertung der Länderabfrage und den verkehrsbedingten Transportvorgängen von Schneematsch und Feuchtigkeit/Sprühnebel sollte der Untersuchungsbereich im ersten Tunnel Drittel liegen (beispielsweise 100 m und 150 m vom Portal entfernt). Die Untersuchungen sollten dabei jeweils für Außenwand und Mittelwand an der gleichen Station durchgeführt werden, da dies in den vorliegenden Untersuchungen vergleichsweise selten so ausgeführt wurde und bei der Auswertung zum Teil die höheren Werte an der Wand neben der Überholspur (Mittelwand) gemessen wurden. Die Probenahme soll in verschiedenen Tiefenbereichen und in verschiedenen Höhen erfolgen um die Verteilung der Chloride zu erfassen und mit den vorliegenden Ergebnissen zu vergleichen.

Da die chloridinduzierte Korrosion lange Zeit ohne äußerlich bemerkbare Schäden abläuft – was in der Länderabfrage ein oft genannter Grund für bisher nicht stattgefundenen Untersuchungen war – sollten nach der obligatorischen visuellen Prüfung und Beurteilung der Oberfläche (Untersuchung auf Risse, sichtbare Schäden, Beschichtung, etc.) zunächst zerstörungsfreie Untersuchungen stattfinden. In diesem Zusammenhang sind an den Untersuchungsstellen die Korrosionspotentiale in verschiedenen Lagen zu messen und die Betondeckung als Linienscan zu bestimmen. Letztere Untersuchung steht dabei zwar nicht im direkten Zusammenhang mit dem Eindringen von Chloriden, ist jedoch für die Bewertung der Ergebnisse der Potentialmessungen von Bedeutung.

Des Weiteren sind die Leitfähigkeit des Betons und die kapillare Wasseraufnahme rasterförmig zu ermitteln. Beide Faktoren stehen in direktem Zusammenhang mit dem Eindringen von Chloridionen in den Beton bzw. mit der Stahlkorrosion.

Einen wesentlichen Faktor beim Eindringen von Chloriden stellt der Beton bzw. dessen Zusammensetzung dar. Zur Bestimmung der Qualität des Überdeckungsbetons soll aus diesem Grunde die Luftpermeabilität der Tunnel-Oberfläche an mehreren Stellen gemessen werden.

Im Rahmen von zerstörenden Untersuchungen werden anschließend Bohrkern für die Analyse im Labor entnommen. Von Interesse sind in diesem Zusammenhang

- die Druckfestigkeit des Betons als Vergleich zur projektierten Festigkeit,
- der Chloridwiderstand,
- die kapillare Wasseraufnahme und
- der Porengehalt.

Die genannten Parameter geben alle indirekt Auskunft über die Dichtigkeit des Betons.

Neben den Untersuchungen an Bauwerken und an dort entnommenen Proben wurden Probekörper im Labor der MFPA Leipzig hergestellt, an denen der Einfluss des verwendeten Zementes studiert wurde. An Proben, hergestellt unter Verwendung von CEM I und von CEM II/B-S mit variierten w/z-Werten, wurden ähnliche Untersuchungen, wie an den Bauwerksproben durchgeführt.

5 Eigene experimentelle Untersuchungen

Gegenstand dieses Abschnitts sind Ergebnisse von Laboruntersuchungen an gesondert hergestellten und vor Ort entnommenen Probekörpern sowie die vor Ort an drei bayrischen Tunnelbauwerken ausgeführten Messungen.

Zur Beschreibung des Betons der Laborprüfkörper und der Tunnelinnenschalen wurden die nachfolgend dargestellten Verfahren eingesetzt.

5.1 Visuelle Feststellungen

Die für die Untersuchungen vorgesehenen Tunnelblöcke, siehe Abschnitt 7.1, wurden auf Schäden untersucht, deren Ursache in einer Chloridbelastung der Innenschale zu sehen ist. Darüber hinaus wurde der allgemeine Zustand festgestellt und es wurden Besonderheiten aufgenommen, die Einfluss auf das Eindringen taumittelhaltigen Wassers haben können.

Bedarfsweise und in Abhängigkeit von den örtlichen Verhältnissen wurde Zugangstechnik (Arbeitsbühne, Rollgerüst, Leitern) eingesetzt.

5.2 Chloridgehalt des Betons

Zur tiefenabhängigen Bestimmung des Chloridgehaltes wurden Bohrmehlproben entnommen. Die Entnahmestellen wurden zum Teil an vorangegangene Untersuchungen angepasst und zum Teil in Abhängigkeit von den Ergebnissen der Potentialfeldmessungen festgelegt. Je Untersuchungsstelle wurden drei Bohrungen mit einem Bohrmehlentnahmegerät eingebracht. Das Gerät mit entsprechendem Bohrer gewinnt die Probe am Grund des Bohrloches, so dass Einflüsse der Bohrlochwandung ausgeschlossen sind.

Die Proben wurden im dafür akkreditierten Labor der MFPA Leipzig nach den Vorgaben des DAFSTB-HEFT 401 (DAFSTB 1989) mit Salpetersäure aufgeschlossen und photometrisch untersucht.

5.3 Betondeckungsmessung

Für die Bestimmung der vorhandenen Betondeckung wurde das Ferroskan-System PS 200S/250 der Firma Hilti verwendet. Dieses Messgerät arbeitet auf der Grundlage des elektromagnetischen Induktionsverfahrens und dient vorrangig zur Ermittlung der Lage sowie der Betondeckung von Betonstahlbewehrung.

Ausschlaggebend für die Qualität der Messung sind vor allem die Größe der Betonüberdeckung sowie der vorhandene Stababstand. Hinsichtlich der Betondeckung können gemäß Produktspezifikation Genauigkeiten nach Tabelle 23 erreicht werden.

		Tiefe [mm] 0-Stahl detektierbar, keine Tiefenangabe; X-Stahl nicht detektierbar								
		20	40	60	80	100	120	140	160	180
Stabdurchmesser (DIN 488)	6	±2	±3	±3	±4	±5	0	x	X	X
	8	±2	±2	±3	±4	±5	0	0	X	X
	10	±2	±2	±3	±4	±5	0	0	X	X
	12	±2	±2	±3	±4	±5	±10	0	X	X
	14	±2	±2	±3	±4	±5	±10	0	0	X
	16	±2	±2	±3	±4	±5	±10	±12	0	X
	20	±2	±2	±3	±4	±5	±10	±12	0	X
	25	±2	±2	±3	±4	±5	±10	±12	0	X
	28	±2	±2	±3	±4	±5	±10	±12	0	X
	30	±2	±2	±3	±4	±5	±10	±12	0	X
36	±2	±2	±3	±4	±5	±10	±12	±13	X	

Tabelle 23 Messgenauigkeit bei bekanntem Stabdurchmesser (Angabe Fa. Hilti)

Zur Durchführung der Messungen vor Ort wurde folgender genereller Ablauf gewählt:

- Erkundung der räumlichen Orientierung der obersten Bewehrungslage durch Aufnahme von Flächenscans (600 x 600 mm²).
- Ermittlung des Bewehrungsdurchmessers der oberen Bewehrungslage durch Sondierungsöffnungen.
- Markierung von rechtwinklig zur oberen Bewehrungslage verlaufenden Messlinien auf der Bauteiloberfläche, unter Berücksichtigung in Messlinienachse verlaufender Betonstähle.
- Aufnahme von Linienscans entlang der gekennzeichneten Messlinien.
- Verifizierung der Ergebnisse an Bauteilöffnungen der übrigen Untersuchungen.

5.4 Potentialfeldmessungen

Die elektrochemische Potentialmessung dient der Beurteilung von Korrosionsprozessen an der Bewehrung von Stahl- und Spannbetonbauteilen. Dabei wird die Spannung zwischen einer auf der Betonoberfläche angeordneten Bezugs elektrode mit bekanntem Potential und der Bewehrung gemessen.

Wenn die Stahloberfläche im Beton durch Chlorideintrag depassiviert wird, kann es zur Korrosion des Stahls kommen. Dabei bilden sich auf der Stahloberfläche anodische (aktive) und kathodische (passive) Bereiche. Der in jedem Korrosionselement fließende Korrosionsstrom führt zu einer Polarisierung der Anoden und Kathoden, wobei das entstehende und an der Betonoberfläche messbare Mischpotential ortsabhängig verändert wird. Die Korrosionswahrscheinlichkeit nimmt mit negativeren Potentialwerten zu, ebenso zeigen hohe Potentialgradienten eine höhere Korrosionswahrscheinlichkeit an.

Das Prinzip der Messung ist in Bild 107 dargestellt. Die Potentialfeldmessung liefert eine qualitative Aussage über das Vorhandensein von Bereichen mit aktiver Korrosion. Die Absolutwerte der Potentialmessungen werden durch Eigenschaften des Betons, seine Leitfähigkeit und die Betondeckung der Bewehrung und weitere Umgebungsbedingungen beeinflusst. Sie müssen deshalb im Zusammenhang mit anderen Kriterien, insbesondere dem Potentialgradienten, beurteilt werden.

Gemessen wird die Summe aus dem am Bauteil vorliegenden Korrosionspotential und dem konstanten Bezugspotential der verwendeten Bezugselektrode. Bei den in diesem Bericht beschriebenen Messungen kamen als Bezugselektrode ausschließlich Elektrodensysteme auf der Basis von Kupfer / Kupfersulfat, deren Bezugspotential +320 mV beträgt, zum Einsatz. Beispiele für üblicherweise an Stahlbetonbauteilen zu findende Potentiale sind in Bild 108 dargestellt.

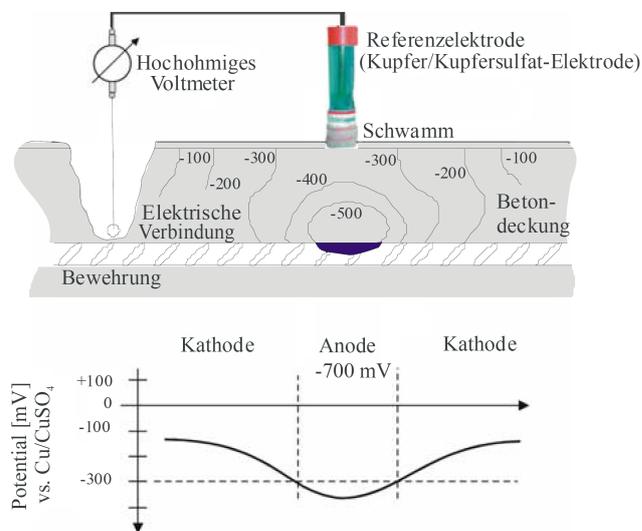


Bild 107: Prinzip der Potentialfeldmessung, aus (MERKBLATT B 03 2014)

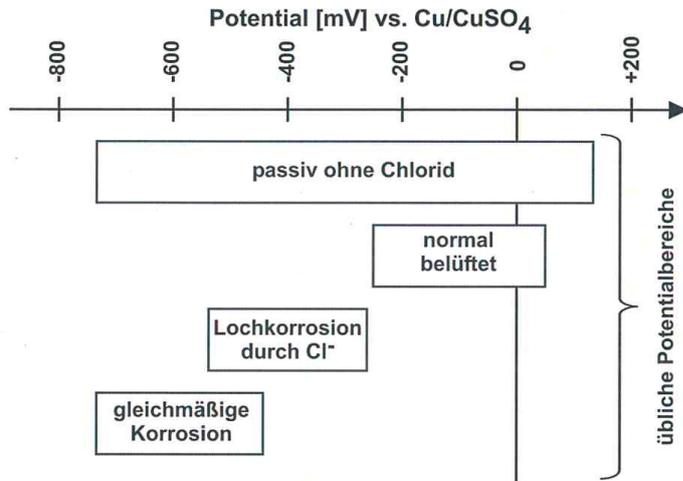


Bild 108: Beispiele für Potentiale bei unterschiedlichen Korrosionsarten, aus (MERKBLATT B 03 2014)

Bei den Potentialfeldmessungen kam ein Messgerät Canin+ (Firma: Proceq) zur Anwendung. Es wurde je nach Bedarf mit einer Rad- oder Stabelektrode gemessen.

Mit der Potentialfeldmessung sollten Informationen zur Korrosionswahrscheinlichkeit der Bewehrung der Tunnelinnenschale gewonnen werden.

5.5 Leitfähigkeitsmessung

Voraussetzung für den Ablauf von Korrosionsprozessen, aber auch für die Messung der Korrosionspotentiale ist die elektrische Leitfähigkeit des Betons. Sie wird deshalb als zerstörungsfrei und relativ schnell zu bestimmender Kennwert bei der Bauwerksdiagnose genutzt. Das verwendete Messgerät gibt als Ergebnis den spezifischen elektrischen Widerstand des Betons aus. Das ist der Kehrwert der Leitfähigkeit.

Die zerstörungsfreie Messung des spezifischen elektrischen Widerstandes des Betons dient, ergänzend zu den Potentialmessungen, der Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeit und der möglichen Korrosionsgeschwindigkeit für den Bewehrungsstahl.

Die Korrosion des Stahls im Beton besteht aus anodischem und kathodischem Teilprozess sowie den dazwischen ablaufenden elektrolytischen Transportvorgängen. Der spezifische elektrische Widerstand beeinflusst den sich bei einem bestimmten Potential einstellenden Korrosionsstrom und damit die Korrosionsgeschwindigkeit. Für die Messungen wurde ein Widerstandsmessgerät Resipod (Hersteller: Proceq SA) verwendet. Seine Arbeitsweise beruht auf dem Funktionsprinzip der Wenner-Sonde. Das Gerät erzeugt über die äußeren Elektroden der Sonde einen definierten Stromfluss im Beton, während zwischen den inneren Elektroden der Potentialunterschied gemessen wird. Aus beiden Größen lässt sich unter Berücksichtigung der Sondengeometrie der spezifische elektrische Widerstand berechnen.

Die folgenden Tabellen zeigen anhand typischer Werte den Zusammenhang zwischen gemessenem spezifischen Widerstand und Korrosionswahrscheinlichkeit bzw. Korrosionsgeschwindigkeit.

Die Werte wurden dem Handbuch zum verwendeten Messgerät entnommen (BEDIENUNGSANLEITUNG 2012b). Die angegebenen Werte dienen der Verdeutlichung des grundsätzlichen Zusammenhanges. Es handelt sich nicht um Grenzwerte.

spezifischer Widerstand [$k\Omega\text{ cm}$]	Korrosionsgefahr
≥ 100	vernachlässigbar
50 bis 100	gering
10 bis 50	mittel
≤ 10	hoch

Tabelle 24: Korrosionswahrscheinlichkeiten und spezifischer Widerstand

Die Beziehung zwischen spezifischem Widerstand und Korrosionsgeschwindigkeit wird in Tabelle 25 verdeutlicht. Auch bei dieser Darstellung handelt es sich um Anhaltswerte zur Verdeutlichung des Zusammenhanges, da der Korrosionsabtrag vom Korrosionsstrom abhängt.

spezifischer Widerstand [$k\Omega\text{ cm}$]	Korrosionsgeschwindigkeit
> 20	gering
10 bis 20	gering bis mittel
5 bis 10	hoch
< 5	sehr hoch

Tabelle 25: Korrosionsgeschwindigkeit und spezifischer Widerstand

Die Ergebnisse der Leitfähigkeits- bzw. spezifischen Widerstandsmessung sind, insbesondere bei starker Durchfeuchtung des Betons, abhängig vom Feuchtegehalt. Dieser Zusammenhang kann zur besseren Einordnung von Ergebnissen der Permeabilitätsmessung genutzt werden.

5.6 Permeabilitätsmessung

Die Messung der Luftpermeabilität gestattet die zerstörungsfreie Erfassung eines Kennwertes, der im Zusammenhang mit der Porosität des oberflächennahen Betons steht. Die Porosität hat insgesamt Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeitseigenschaften von Stahlbeton, da die vorhandenen Poren den Stofftransport aus der Umwelt in den Beton durch die Wirkung unterschiedlicher Transportmechanismen ermöglichen.

Das Verfahren ist völlig zerstörungsfrei und erlaubt die Messung an einer Vielzahl von Einzelstellen mit vertretbarem Zeitaufwand. Der mit dem Messverfahren ermittelte Kennwert K_T zeigt die Gaspermeabilität des Betons. Zur Bewertung der Betoneigenschaften wird die handhabbare Einheit (10^{-16} m^2) verwendet. Der bekannte Einfluss der Feuchtigkeit des Betons auf die Messergebnisse kann bei hoher Feuchtigkeit zum Teil durch Berücksichtigung der Messwerte der elektrischen Leitfähigkeit des Betons, die ebenfalls von der Feuchtigkeit abhängig ist, reduziert werden.

Die Messungen wurden mit dem handelsüblichen Gerät Torrent (Hersteller: Proceq SA) durchgeführt.

5.7 Wasseraufnahme

Chloride werden in gelöster Form in den Beton transportiert. Ihr Eindringen steht im Zusammenhang mit dem Wassertransport in das Bauteil und im Bauteil. Der ursprünglich für Fassaden entwickelte Wassereindringprüfer nach Karsten ermöglicht die Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten an der Betonoberfläche und dadurch eine Beurteilung der Anfälligkeit von Betonoberflächen gegenüber dem Eindringen gelöster Chloride.

5.8 Korrosionszustand der Bewehrung

Die Untersuchungsstellen zur Feststellung des Korrosionszustandes der Bewehrung wurden auf der Grundlage einer vor Ort durchgeführten vorläufigen Auswertung der Potentialfeldmessungen festgelegt. Je Block wurden nach Möglichkeit eine Stelle mit niedrigem Potential (höhere Korrosionswahrscheinlichkeit) und eine Stelle mit höherem Potential (niedrigere Korrosionswahrscheinlichkeit) ausgewählt, an der die Bewehrung der Tunnelinnenschale zur visuellen Beurteilung freigelegt wurde.

5.9 Chlorid-Migration

Der Chlorid-Migrationskoeffizient beschreibt das Verhalten des Betons im Hinblick auf die Transportvorgänge für Chloridionen. Durch die Wirkung einer elektrischen Spannung wird der Transport intensiviert und die Messzeit verkürzt. Der gewonnene Messwert D_{RCM} ist ein Maß für die Geschwindigkeit des Chloridtransportes durch Diffusionsprozesse. Er wird in der Maßeinheit [$10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$] angegeben. Mit steigenden Werten nimmt die erwartete Geschwindigkeit der Chloridmigration zu. Der Chlorid-Migrationskoeffizient unterliegt einer zeitabhängigen Veränderung. Mit zunehmendem Betonalter verringert sich der Migrationskoeffizient, d.h. der Widerstand gegen Eindringen von Chlorid steigt.

6 Laborprüfkörper

6.1 Allgemeines

Zum Studium von Materialeigenschaften, die für das Eindringen und die Ausbreitung von Chloriden maßgebend sind, wurden Laborprüfkörper hergestellt. Die wesentlichen, für die Untersuchungen varierten Parameter werden in Abschnitt 6.5, Tabelle 26 zusammenfassend dargestellt und in den Tabellen der folgenden Abschnitte punktuell wiederholt.

6.2 Betone

Parallel zu den geplanten Bauwerksuntersuchungen werden Laboruntersuchungen an gesondert hergestellten Proben durchgeführt. Dazu wurden vier Betonblöcke unter Verwendung zweier unterschiedlicher Zementarten mit jeweils zwei w/z-Werten hergestellt.

Für die Untersuchungen wurden die Zemente

- Portlandzement CEM I und
- Portlandhüttenzement CEM II/B-S

verwendet. Diese Zemente wurden gewählt, weil sie am besten die Situation der von der Länderabfrage erfassten, zum Teil älteren, Bauwerke widerspiegeln. Es besteht die Erwartung, dass

mit den Laborversuchen ein Einfluss der Zementart auf das Eindringverhalten von Chloridionen sichtbar wird, wie er sich auch aus praktischen Erfahrungen ergibt.

Für beide Zementarten wurden Betonmischungen mit w/z -Werten von 0,50 und 0,55 hergestellt. Diese w/z -Werte sind ein Kompromiss zwischen den Anforderungen aus Praxisrelevanz der Mischung, Verarbeitbarkeit des Betons und versuchstechnisch ausreichender Variation des Parameters. Einzelheiten der Betonrezepturen sind in Anlage 2 dargestellt.

6.3 Herstellung

Die Prüfkörper wurden im Betonlabor der MFPA Leipzig GmbH hergestellt. Bild 109 zeigt die Schalungen für die Probekörper. In Anlage 2 sind Daten zur Herstellung, zur verwendeten Mischung und Verdichtungstechnik sowie die festgestellten Frischbetoneigenschaften aufgeführt. Ergebnisse der Festbetonprüfungen lagen zum Berichtszeitpunkt noch nicht vor. Weiterhin sind in Anlage 2 Fotos der Prüfkörperherstellung enthalten.



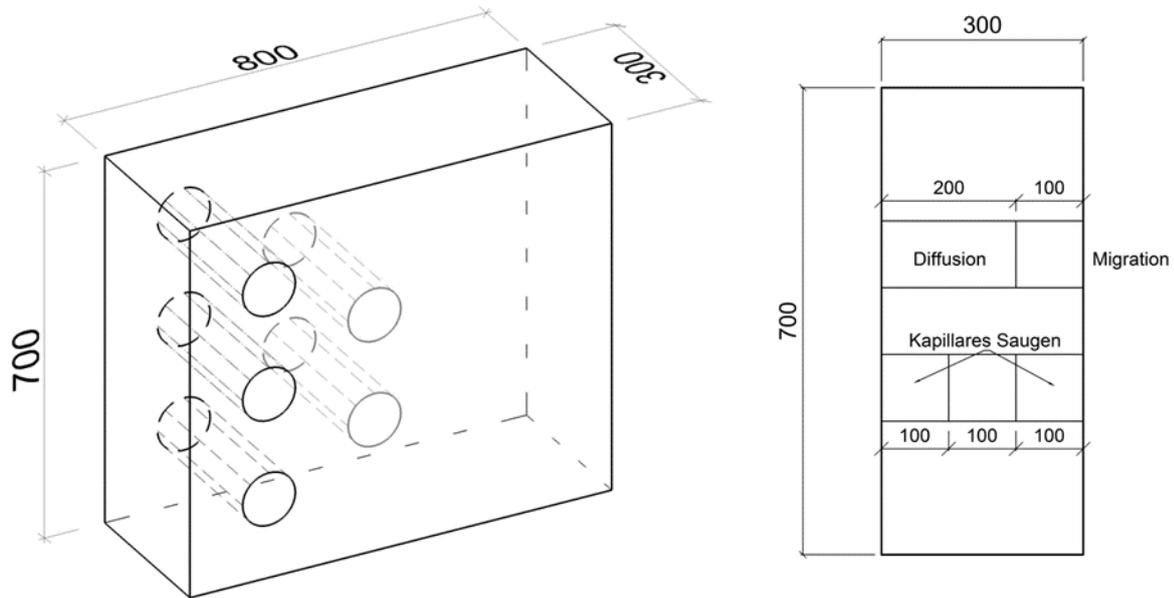
Bild 109: Schalungen für zwei Probekörper

6.4 Probenahme

Aus den Blöcken wurden, jeweils von einer geschalteten Seitenfläche ausgehend, Bohrkerne entnommen. Bild 110 zeigt schematisch die Probekörper und die Anordnung der Bohrkerne. An den Bohrkerne sind folgende Untersuchungen geplant:

- Chloridmigrationskoeffizient je einer Serie (3 PK)
- kapillare Wasseraufnahme
- Chloriddiffusion

Ein Teil der Seitenfläche der Probekörper wird nicht für die Entnahme der geplanten Bohrkerne benötigt. Die Fläche ist für Messungen der Luftpermeabilität und des spezifischen elektrischen Widerstandes vorgesehen. Sie steht bei Bedarf außerdem für weitere Probenahmen zur Verfügung.



a) Isometrie;

b) Schnitt

Bild 110: Probekörper für Laboruntersuchungen;

6.5 Chlorid-Migrationskoeffizient

Eine wesentliche Eingangsgröße aller Modelle zur Chloridmigration ist der Migrationskoeffizient. Dieser Kennwert wurde für die Betone der Laborprüfkörper nach den Vorgaben des BAW-Merkblattes (BAWMERKBLATT 11.2012) bestimmt.

Die Ergebnisse zeigen erwartungsgemäß Unterschiede zwischen den Betonen, die unter Verwendung von Portlandzement hergestellt wurden und denjenigen, deren Bindemittel Portlandhüttenzement war.

Die einzelnen Ergebnisse der Bestimmung sind in Anlage 3 dargestellt und in der folgenden Tabelle zusammengefasst. Die Tabelle zeigt auch die Verhältnisse zwischen den Betonen mit unterschiedlichen w/z Werten bei gleicher Zementart bzw. den Einfluss der Zementart bei gleichem w/z Wert.

Aus den Werten in Anlage 3, die für jeden Beton zu zwei Prüfzeitpunkten ermittelt wurden, ist die zeitabhängige Abnahme des Migrationskoeffizienten erkennbar. Die Werte in Tabelle 26 gelten für das Prüfalter ca. 170 Tage.

Probekörper	1	2	3	4
Zementart	CEM I	CEM I	CEM II/B-S	CEM II/B-S
Zementgehalt [kg/m ³]	340	340	340	340
Wasser / Zement Wert	0,55	0,50	0,55	0,50
Druckfestigkeits- klasse	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37
Migrationskoeffi- zient [10 ⁻¹² m/s]	26,8	21,2	6,2	5,9
Verhältnis w/z 0,55 zu w/z 0,50	1,26		1,05	
Verhältnis CEM I / CEM II für w/z 0,55	→	4,32	←	
Verhältnis CEM I / CEM II für w/z 0,50		→	3,59	←

Tabelle 26: Chloridmigrationskoeffizienten des Betons der Laborprobekörper

6.6 Wasseraufnahme

An den Probekörpern für die Laboruntersuchungen wurden mit den Prüfröhrchen nach Karsten folgende Wasseraufnahmekoeffizienten ermittelt. Wesentliche Unterschiede, abhängig von der Zementart, waren nicht erkennbar.

Probekörper	1	2	3	4
Zementart	CEM I	CEM I	CEM II/B-S	CEM II/B-S
Wasser / Zement Wert	0,55	0,50	0,55	0,50
Zeit [h]	7,76	7,96	7,83	7,96
kap. Wasseraufnahme [kg/m ²]	10,76	10,87	12,80	9,02
Wasseraufnahmekoeff. [kg/(m ² xh ⁰⁵)]	3,86	3,85	4,58	3,20

Tabelle 27: Wasseraufnahmekoeffizienten

6.7 Luftpermeabilität

Die Messung der Luftpermeabilität hatte die in Tabelle 28 dargestellten Ergebnisse. In Bild 111 sind die Ergebnisse grafisch dargestellt. Es zeigte sich, dass die unter Verwendung von Portlandhüttenzement hergestellten Proben tendenziell eine etwas geringere Permeabilität aufweisen. Sichtbar ist aber auch, dass selbst bei Messungen unter Laborbedingungen erhebliche Streuungen auftreten, die die Nutzbarkeit des Verfahrens in Frage stellen. Eine deutliche Erhöhung der Anzahl von Messungen ist für den hier verfolgten Zweck, eine einfache und relativ schnelle Diagnose vor Ort zu ermöglichen, nicht zielführend.

Probekörper	1	2	3	4
Zementart	CEM I	CEM I	CEM II/B-S	CEM II/B-S
Wasser / Zement Wert	0,55	0,50	0,55	0,50
Messung 1 K_T [10^{-16} m^2]	0,098	0,146	0,039	0,055
Messung 2 K_T [10^{-16} m^2]	0,084	0,038	0,035	0,037
Messung 3 K_T [10^{-16} m^2]	0,078	0,439	0,073	0,044
Messung 4 K_T [10^{-16} m^2]	0,113	0,422	0,053	0,077
Mittelwert K_T [10^{-16} m^2]	0,093	0,261	0,050	0,053

Tabelle 28: Luftpermeabilität

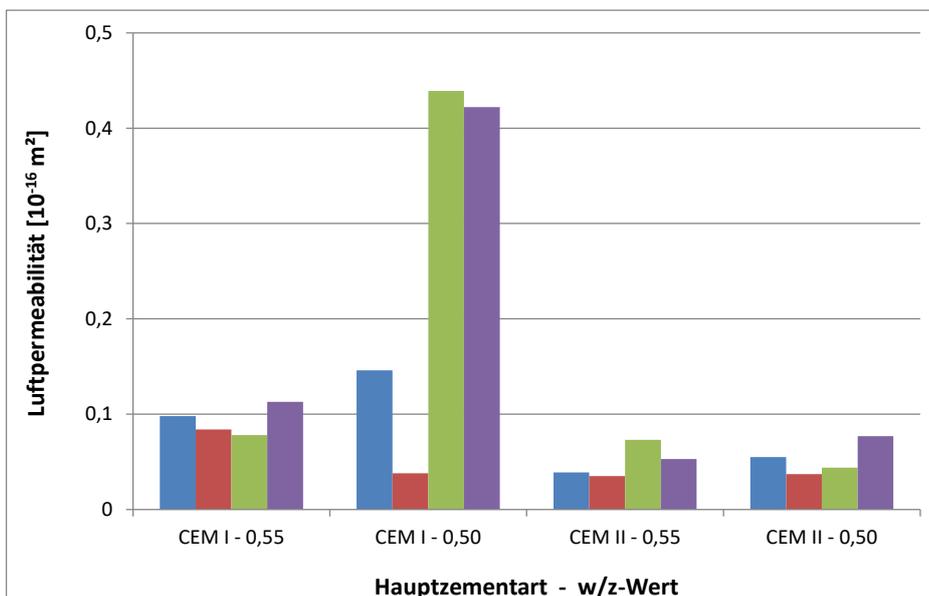


Bild 111: Messergebnisse der Luftpermeabilität

6.8 Leitfähigkeit

An den Probekörpern für die Laboruntersuchungen wurden mit dem Messgerät Resipod folgende spezifische elektrische Widerstände gemessen. Die angegebenen Werte sind Mittelwerte aus jeweils 18 Einzelmessungen. Unter Verwendung der in Tabelle 24 und Tabelle 25 genannten Anhaltswerte besteht ohne Berücksichtigung der Schutzwirkung durch Alkalität für die Bewehrung eine mittlere bis geringe Korrosionsgefahr bei Proben mit CEM I und eine geringe Korrosionsgefahr bei Proben mit CEM II/B-S. Die Korrosionsgeschwindigkeit bei einsetzender Korrosion wäre bei allen Proben gering.

Probekörper	1	2	3	4
Zementart	CEM I	CEM I	CEM II/B-S	CEM II/B-S
Wasser / Zement Wert	0,55	0,50	0,55	0,50
spezifischer elektrischer Widerstand [kΩ cm]	50	66	45	46

Tabelle 29: spezifischer elektrischer Widerstand

7 Untersuchungen an Tunnelbauwerken

7.1 Auswahl

Dem Angebot zum Forschungsvorhaben entsprechend, waren Untersuchungen an drei bayrischen Tunnelbauwerken durchzuführen. Aus den Tunnelbauwerken, zu denen im Ergebnis der Länderabfrage Informationen vorlagen, wurden Bauwerke ausgewählt, die sich in Merkmalen unterscheiden, die für chloridinduzierte Korrosion von Bedeutung sind. Wesentliche Unterscheidungsmerkmale waren dabei das Bauwerksalter, die Bauweise, die verwendete Zementart und ggf. Zusatzstoffe. Ausschlusskriterien waren vorangegangene grundlegende Instandsetzungsarbeiten sowie Besonderheiten der Bauweise, die die Anwendung einiger zerstörungsfreier Prüfverfahren einschränken oder ausschließen, wie z.B. die Anordnung einer oberflächennahen Mattenbewehrung, die nicht die Tragbewehrung ist.

Im Ergebnis der Anwendung der Kriterien wurden die Tunnel Farchant, (Teilbauwerk D1, Abschnitt in geschlossener Bauweise), Tunnel Prüfening (A 93BW 28/1, Teilbauwerk 2, Fahrtrichtung 1) und Paffenstein (A 93BW 22, Teilbauwerk 1, Fahrtrichtung 2) ausgewählt. Einige Eigenschaften der untersuchten Bauwerke sind in Tabelle 30 zusammengestellt.

	Tunnel Farchant	Tunnel Prüfening	Tunnel Pfaffenstein
Alter zum Prüfzeitpunkt [a]	19	17	41
Bauweise	geschlossen	offen	geschlossen
Querschnitt	Gewölbe	Rechteck	Gewölbe
Oberflächenschutzsystem	nachgerüstet	ohne	ohne
Zementart	Portlandhüttenzement	Portlandkalksteinzement	Portlandzement
untersuchte Blöcke	25 Ost- u. Westseite 84 Ost- u. Westseite	23 - 24 Westseite 50 - 51 Westseite	49 - 50 Ostseite 50 Westseite 76 - 77 Ostseite

Tabelle 30: ausgewählte Eigenschaften der untersuchten Tunnel und Blöcke

Zur Untersuchung wurden grundsätzlich in jedem Tunnel 2 Blöcke ausgewählt. Dabei sollte ein Block möglichst in der Nähe der Tunneleinfahrt liegen, der zweite zu untersuchende Block in Fahrtrichtung mindestens 250 m Richtung Tunnelmitte. Weiterhin sollte die Lage von Beprobungsstellen früherer Untersuchungen berücksichtigt werden, so dass ggf. Vergleiche möglich sind. Weitere Einschränkungen bei der Auswahl ergaben sich durch Lärmschutzverkleidungen, Installationen und Ausrüstungen auf der Tunnelwand, Notrufrischen u. dgl. auf der Tunnelwand.

Bei den Tunneln Prüfening und Pfaffenstein wurde, einem Hinweis aus der Dienststelle Regensburg der Autobahndirektion Südbayern folgend, jeweils die von der Donau weg führende Tunnelröhre beprobt. Dort sei ein vergleichsweise schlechterer Bauwerkszustand als in der Gegenrichtung beobachtet worden.

Während im Tunnel Farchant wegen Wartungsarbeiten beide Seiten der untersuchten Röhre ohne Einschränkungen an allen Untersuchungstagen zugänglich waren, war in den beiden anderen Tunneln der auf einer Spur geführte Verkehr zu berücksichtigen. Zur Gewinnung möglichst vieler Informationen wurden Blöcke paarweise untersucht, wenn aus versuchstechnischen Gründen nur eine Seite der Tunnelröhre beprobt werden konnte. Die Auswahl der Untersuchungsstellen stellte das erreichbare Optimum unter Berücksichtigung der genannten Randbedingungen dar. Je Tunnel wurden an drei aufeinander folgenden Tagen vier bis fünf Personen eingesetzt. Insgesamt nahmen die Untersuchungen vor Ort 39 Tagewerke in Anspruch.

7.2 Tunnel Farchant

7.2.1 Visuelle Feststellungen

Die Ulmenbereiche beidseitig wurden nachträglich bis in 3 m Höhe über dem Notgehweg mit einem Oberflächenschutzsystem versehen, das den optischen Eindruck des Tunnels dominiert. Augenscheinlich handelt es sich um ein System mit einem Schichtenaufbau entsprechend OS-C

mit einer Spachtelschicht als Untergrund. Das Verhalten der Betonoberfläche unmittelbar oberhalb des Oberflächenschutzsystems beim Befeuchten gab Anlass zu der Vermutung, dass auf den Untergrund zusätzlich eine Hydrophobierung aufgebracht wurde.

Im Block 25 ergaben sich folgende Feststellungen:

Durch die nicht rissüberbrückende Beschichtung schlagen aus dem Untergrund Risse durch. Bis zu einer Höhe von ca. 1,80 m über dem Notgehweg dominieren vertikale und schräge Einzelrisse mit Rissbreiten unter 0,3 mm das Rissbild. Oberhalb dieser ungefähren Grenze sind überwiegend Netzrisse geringer Breite sichtbar. Die Ursache der Netzrisse war visuell nicht zweifelsfrei festzustellen. Unmittelbar oberhalb der Beschichtung waren beim Befeuchten der Betonoberfläche keine Netzrisse sichtbar. Möglicherweise sind die Netzrisse in der Spachtelschicht unter dem Oberflächenschutzsystem entstanden.

Der unbeschichtete Firstbereich des Tunnels war, ebenso wie die Ulmenbereiche, ohne Schäden, die auf Chlorideinwirkung zurückgeführt werden können. Stellenweise zeigte die Betonoberfläche in der Firste Feinkornanreicherungen und Schlieren. Vereinzelt waren kleine Reparaturstellen an der Betonoberfläche sichtbar.

Ein signifikanter Unterschied des visuell erkennbaren Zustandes zwischen östlichem und westlichem Bereich der Tunnelinnenschale war nicht feststellbar.

Im Block 84 ergab sich ein grundsätzlich gleichartiges Bild.

In dem durch Einzelrisse gekennzeichneten Bereich bis 1,80 m Höhe über dem Notgehweg löste sich entlang der Risse bereichsweise die Beschichtung von der Spachtelschicht. An solchen Stellen ist die Schutzwirkung des Oberflächenschutzsystems gegen Eindringen von Chloriden eingeschränkt.

Vereinzelt waren an der Beschichtung beider Blöcke kleine mechanische Beschädigungen durch Fremdeinwirkung sichtbar. An den Kanten von Blockfugen traten einzelne Betonabplatzungen auf.

Fotos der visuellen Untersuchung und der Messungen sind in Anlage 4 enthalten.

7.2.2 Chloridgehalt des Betons

In den für die Untersuchungen ausgewählten Blöcken wurden in beiden Ulmen (Ost- und Westseite) Bohrmehlproben entnommen. Die Lage der Entnahmestellen und die Tiefenabstufung der Proben orientierten sich an den dokumentierten früheren Untersuchungen, um eine Vergleichsmöglichkeit zu schaffen. Die Vorgehensweise bei der Entnahme und das Prüfverfahren sind in Abschnitt 5.2 beschrieben.

Die Lage der Entnahmestellen, die Ergebnisse der Analyse sowie eine grafische Darstellung der Tiefenprofile des Chloridgehaltes sind in Anlage 5 dargestellt.

7.2.3 Betondeckungsmessung

An den untersuchten Tunnelblöcken wurde eine in vertikaler Richtung verlaufende obere Bewehrungslage festgestellt. Diese besteht aus gerippten Betonstählen \varnothing 10 mm. Im Ergebnis wurden horizontal orientierende Messlinien in folgenden Höhen über OK-Notgehweg aufgenommen: 0,5 m; 1,0 m; 1,5 m; 2,0 m; und 2,5 m.

Hierbei konnten Betondeckungen gemäß Tabelle 31 gemessen werden. Eine grafische Darstellung der aufgenommenen Messdaten enthält Anlage 6.

Block / Seite	Betondeckung c			Anzahl ²⁾ [-]
	mittel	min [mm]	max ¹⁾	
25 / Westseite	77	25	133	446
25 / Ostseite	82	44	170	437
84 / Westseite	89	27	167	418
84 / Ostseite	98	62	158	393

Anmerkung:¹⁾

Gemäß Tabelle 23 haben Werte > 100 mm allenfalls orientierenden Charakter.

²⁾

Anzahl der Messwerte und Anzahl der tatsächlich vorhandenen Betonstäbe können aufgrund der Verfahrensgrenzen des verwendeten Messverfahrens voneinander abweichen.

Tabelle 31: Betondeckungsmessung Tunnel Farchant

7.2.4 Potentialfeldmessungen

Wegen des Oberflächenschutzsystems auf dem Beton in den für die Messung vorgesehenen Bereichen war zunächst zu klären, ob das OS die elektrischen Eigenschaften der Betonoberfläche beeinflusst. Dazu wurden mit einer Stabelektrode an unmittelbar benachbarten Messpunkten mit und ohne Oberflächenschutzsystem vergleichende Messungen des Potentials durchgeführt. Die Differenz zwischen den an den unterschiedlichen Oberflächen ermittelten Werten lag innerhalb des zulässigen Bereiches nach (BEDIENUNGSANLEITUNG 2012a), so dass die Messungen wie vorgesehen durchgeführt werden konnten.

Die aufgenommenen Messwerte sind in Anlage 7 in Skizzen der untersuchten Tunnelwände grafisch dargestellt. In den Skizzen ist zusätzlich die Lage der Probenahmestellen, die auf der Grundlage der Potentialmessungen festgelegt wurden, eingetragen.

7.2.5 Leitfähigkeitsmessung

Die Lage der Messstellen wurde durch das vorhandene Oberflächenschutzsystem erzwungen. Probemessungen zeigten, dass in dem beschichteten Bereich keine plausiblen Messergebnisse zu erzielen waren.

Als Besonderheit im Tunnel Farchant wurden deshalb zwei horizontale Messlinien oberhalb der beschichteten Bereiche angeordnet. Entlang dieser Messlinien wurde der spezifische elektrische Widerstand als Maß für die Leitfähigkeitseigenschaften des Betons bestimmt.

Die Messungen wurden wie in Abschnitt 5.5 beschrieben, ausgeführt.

Die Lage der Messstellen und die Ergebnisse sind in Anlage 8 dargestellt.

7.2.6 Permeabilitätsmessung

Wie bei der Leitfähigkeitsmessung war es auch bei der Messung der Luftpermeabilität erforderlich, die Messstellen oberhalb des beschichteten Bereiches der Tunnelwand anzuordnen.

Die Messwerte der Luftpermeabilität sind in Anlage 9 in eine Ansicht der Tunnelwand eingetragen. Aus der Darstellung ist auch die Lage der Messstellen ersichtlich. Die Messwerte sind in der

Darstellung farbig unterlegt. Die Farbe korrespondiert mit der Bewertung der Permeabilität hinsichtlich der Dauerhaftigkeit auf der Grundlage von (JACOBS 05.1999).

7.2.7 Wasseraufnahme

Die Wasseraufnahme wurde im Tunnel Farchant, ebenso wie die vorangehend genannten Kennwerte, oberhalb des beschichteten Bereiches der Tunnelinnenschale gemessen.

Die Lage der Messstellen und die Messergebnisse, angegeben als Wasseraufnahme mit Ausgleichsgerade als Wasseraufnahmekoeffizient, sind in Anlage 10 angegeben.

7.2.8 Korrosionszustand der Bewehrung

Die Feststellung des Korrosionszustandes der Bewehrung erfolgte, wie in Abschnitt 5.8 beschrieben, an Untersuchungsstellen, die auf der Grundlage der Potentialmessungen festgelegt wurden. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Anlage 11 dargestellt.

7.2.9 Chlorid-Migrationskoeffizient

An acht Proben aus dem Tunnel (2 je Block und Seite) wurde der Chlorid-Migrationskoeffizient nach BAW-Merkblatt (BAWMERKBLATT 11.2012) bestimmt. Die Ergebnisse sind in Anlage 3 dargestellt. Wegen des unterschiedlichen Alters der drei untersuchten Bauwerke und der zeitabhängigen Veränderung des Migrationskoeffizienten lässt sich der Einfluss der Zementart auf den Migrationskoeffizienten nicht direkt ablesen.

7.3 Tunnel Prüfening

7.3.1 Visuelle Feststellungen

Der Tunnel wurde als Rechteckquerschnitt in offener Bauweise hergestellt und hat, verglichen mit anderen, bergmännisch hergestellten, Tunneln eine relativ geringe Überdeckung. Die Wandoberflächen des Tunnels haben eine deutlich sichtbare Brettschalungsstruktur. Vermutlich wurden vorgefertigte Schalungselemente, die jeweils die halbe Blocklänge hatten, verwendet. In der Mitte jedes Blockes zeichnet sich eine vertikale Schalungsfuge ab, an der beim Betonieren vermutlich Feinbestandteile des Frischbetons ausgetreten sind. Die Decke des Tunnels war eben, mit Vouten an den Außenwänden.

Im Block 50 waren an der mittigen Schalungsfuge unten Anzeichen beginnender Betonabplatzungen, angedeutet durch einen ca. 20 cm langen Riss, sichtbar.

Die Wände waren erkennbar verschmutzt, vermutlich durch Spritzwasser von Pfützen am Fahrbahnrand. Wahrscheinlich aus dem gleichen Grund befanden sich auf dem Notgehweg trockene Feinbestandteile. Die Verschmutzungen waren in Block 23 / 24 weniger ausgeprägt als im Einfahrtbereich des Tunnels.

Im gesamten untersuchten Bereich zeichnete sich am Wandfuß ein heller, augenscheinlich stärker als die übrige Wand verwitterter Streifen von 20 bis 30 cm Höhe ab. Stellenweise war an der Oberfläche die Zementhaut abgewittert, so dass grobe Gesteinskörnung frei lag.

Fotos der visuellen Untersuchung und der Messungen sind in Anlage 12 enthalten.

7.3.2 Chloridgehalt des Betons

In den für die Untersuchungen ausgewählten Blöcken wurden aus der Seitenwand Bohrmehlproben entnommen. Die Höhe der Entnahmestellen und die Tiefenabstufung der Proben orientierten sich an den Untersuchungen in den anderen Bauwerken, um eine Vergleichsmöglichkeit zu schaffen. Die Vorgehensweise bei der Entnahme und das Prüfverfahren sind in Abschnitt 5.2 beschrieben.

Die Lage der Entnahmestellen, die Ergebnisse der Analyse sowie eine grafische Darstellung der Tiefenprofile des Chloridgehaltes sind in Anlage 13 dargestellt.

7.3.3 Betondeckungsmessung

An den untersuchten Tunnelblöcken wurde eine in horizontaler Richtung verlaufende obere Bewehrungslage festgestellt. Diese besteht aus gerippten Betonstählen \varnothing 16 mm (Block 23/24) und \varnothing 10 mm (Block 50/51). Im Ergebnis wurden je Block 10 vertikal orientierende Messlinien im Abstand von 1,0 m aufgenommen.

Hierbei konnten Betondeckungen gemäß Tabelle 32 gemessen werden. Eine grafische Darstellung der aufgenommenen Messdaten enthält Anlage 14.

Block / Seite	Betondeckung c [mm]			Anzahl ²⁾ [-]
	mittel	min	max ¹⁾	
23 / Westseite	70	23	141	259
24 / Westseite	68	21	130	252
50 / Westseite	87	54	164	288
51 / Westseite	90	55	160	288

Anmerkung:¹⁾ Gemäß Tabelle 23 haben Werte > 100 mm / 140 mm allenfalls orientierenden Charakter.

²⁾ Anzahl der Messwerte und Anzahl der tatsächlich vorhandenen Betonstähle können aufgrund der Verfahrensgrenzen des verwendeten Messverfahrens voneinander abweichen.

Tabelle 32: Betondeckungsmessung Tunnel Prüfening

7.3.4 Potentialfeldmessungen

Vor Beginn der Messungen wurde in jedem zu untersuchenden Block die durchgängige elektrische Leitfähigkeit der Bewehrung mit positivem Ergebnis geprüft. Dadurch war sichergestellt, dass die Messwerte den Zustand der unmittelbar unter der Messstelle befindlichen Bewehrung repräsentieren.

Die aufgenommenen Messwerte sind in Anlage 15 in Skizzen der untersuchten Tunnelwände grafisch dargestellt. In den Skizzen ist zusätzlich die Lage der Probenahmestellen, die auf der Grundlage der Potentialmessungen festgelegt wurden, eingetragen.

7.3.5 Leitfähigkeitsmessung

Die Tunnelwand wies keine Besonderheiten auf, die sich auf die Lage der Messstellen auswirken. Die horizontalen Messlinien, auf denen die Messstellen angeordnet waren, wurden in dem Höhenbereich angeordnet, in dem auch die weiteren Messungen durchgeführt wurden. Entlang dieser Messlinien wurde der spezifische elektrische Widerstand als Maß für die Leitfähigkeitseigenschaften des Betons bestimmt.

Die Messungen wurden wie in Abschnitt 5.5 beschrieben, ausgeführt. Die Lage der Messstellen und die Ergebnisse sind in Anlage 16 dargestellt.

7.3.6 Permeabilitätsmessung

Die Messwerte der Luftpermeabilität sind in Anlage 17 in eine Ansicht der Tunnelwand eingetragen. Aus der Darstellung ist auch die Lage der Messstellen ersichtlich. Die Messwerte sind in der Darstellung farblich unterlegt. Die Farbe korrespondiert mit der Bewertung der Permeabilität hinsichtlich der Dauerhaftigkeit auf der Grundlage von (JACOBS 05.1999).

7.3.7 Wasseraufnahme

Die Messung der Wasseraufnahme wurde wie in Abschnitt 5.7 beschrieben durchgeführt.

Die Lage der Messstellen und die Messergebnisse, angegeben als Wasseraufnahme mit Ausgleichsgerade als Wasseraufnahmekoeffizient, sind in Anlage 18 angegeben.

7.3.8 Korrosionszustand der Bewehrung

Die Feststellung des Korrosionszustandes der Bewehrung erfolgte, wie in Abschnitt 5.8 beschrieben, an Untersuchungsstellen, die auf der Grundlage der Potentialmessungen festgelegt wurden. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Anlage 19 dargestellt.

7.3.9 Chlorid-Migrationskoeffizient

An sieben Proben aus dem Tunnel wurde der Chlorid-Migrationskoeffizient nach BAW-Merkblatt (BAWMERKBLATT 11.2012) bestimmt. Die Ergebnisse sind in Anlage 3 dargestellt. Wegen des unterschiedlichen Alters der drei untersuchten Bauwerke und der zeitabhängigen Veränderung des Migrationskoeffizienten lässt sich der Einfluss der Zementart auf den Migrationskoeffizienten nicht direkt ablesen.

7.4 Tunnel Pfaffenstein

7.4.1 Visuelle Feststellungen

Der Tunnel wurde in geschlossener Bauweise als Gewölbequerschnitt mit einer Stahlbeton-Innenschale vergleichsweise geringer Dicke hergestellt. Im Ulmenbereich wurden beidseitig große Kabelkanäle aus Stahlbeton nachgerüstet. Diese schränken den Zugang zur Tunnelwand ein. Bei allen Untersuchungen war dieser Kabelkanal bei der Festlegung der Lage der Messstellen zu berücksichtigen.

In den Blöcken ergaben sich folgende Feststellungen mit Verbindungen zur Chloridbelastung bzw. mit Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit:

- Risse in der Ulme, bis 0,8 mm breit, teilweise mit Wasserdurchgang und Aussinterungen (z.B. Block 82), auch in anderen Blöcken Risse mit meist geringeren Breiten, häufig schräg verlaufend, Block 63 mit Häufung breiter Risse mit Aussinterungen
- stellenweise frei liegende und verrostete Bewehrung, vormals sehr geringe Betondeckung (z.B. Block 70, 71 und 80)
- alte Bohrkernentnahmestellen mit Kunststoffstopfen verschlossen
- Blockfugen zwischen den Blöcken 49, 50 und 51 offen, 2 cm breit, 6 cm tief, Styropor-Abstellung erkennbar
- Blockfuge 50 / 51 mit seitlichem Versatz

- in der Umgebung der Blockfuge 63 / 64 Zementstein oberflächlich ausgewaschen oder verwittert

Fotos der visuellen Untersuchung und der Messungen sind in Anlage 20 enthalten.

7.4.2 Chloridgehalt des Betons

In den für die Untersuchungen ausgewählten Blöcken wurden aus dem Ulmenbereich Bohrmehlproben entnommen. Die Lage der Entnahmestellen und die Tiefenabstufung der Proben orientierten sich an den dokumentierten früheren Untersuchungen und an der Vorgehensweise in den anderen Bauwerken, um eine Vergleichsmöglichkeit zu schaffen. Die Vorgehensweise bei der Entnahme und das Prüfverfahren sind in Abschnitt 5.2 beschrieben.

Die Lage der Entnahmestellen, die Ergebnisse der Analyse sowie eine grafische Darstellung der Tiefenprofile des Chloridgehaltes sind in Anlage 21 dargestellt.

7.4.3 Betondeckungsmessung

An den untersuchten Tunnelblöcken wurde eine in vertikaler Richtung verlaufende obere Bewehrungslage festgestellt. Diese besteht aus gerippten Betonstählen \varnothing 12 mm. Im Ergebnis wurden horizontal orientierende Messlinien in folgenden Höhen über OK-Notgehweg aufgenommen: 1,5 m; 2,0 m; und 2,5 m. Hierbei konnten Betondeckungen gemäß Tabelle 33 gemessen werden. Eine grafische Darstellung der aufgenommenen Messdaten enthält Anlage 22.

Block / Seite	Betondeckung c [mm]			Anzahl ²⁾ [-]
	mittel	min	max ¹⁾	
49 / Ostseite	92	22	122	79
50 / Ostseite	77	41	132	241
50 / Westseite	106	61	162	205
76 / Ostseite	57	47	77	67
77 / Ostseite	53	23	104	119

Anmerkung:¹⁾ Gemäß Tabelle 23 haben Werte > 120 mm allenfalls orientierenden Charakter.

²⁾ Anzahl der Messwerte und Anzahl der tatsächlich vorhandenen Betonstähle können aufgrund der Verfahrensgrenzen des verwendeten Messverfahrens voneinander abweichen.

Tabelle 33: Betondeckungsmessung Tunnel Pfaffenstein

7.4.4 Potentialfeldmessungen

Vor Beginn der Messungen wurde in jedem zu untersuchenden Block die durchgängige elektrische Leitfähigkeit der Bewehrung mit positivem Ergebnis geprüft. Dadurch war sichergestellt, dass die Messwerte den Zustand der unmittelbar unter der Messstelle befindlichen Bewehrung repräsentieren.

Die aufgenommenen Messwerte sind in Anlage 23 in Skizzen der untersuchten Tunnelwände grafisch dargestellt. In den Skizzen ist zusätzlich die Lage der Probenahmestellen, die auf der Grundlage der Potentialmessungen festgelegt wurden, eingetragen. Der von den Kabelkanälen und anderen Ausrüstungen abgedeckte Teil der Innenschale wurde bei der Messung und der Darstellung der Ergebnisse ausgespart.

7.4.5 Leitfähigkeitsmessung

Die Tunnelwand wies keine Besonderheiten auf, die sich auf die Lage der Messstellen auswirken. Die horizontalen Messlinien, auf denen die Messstellen angeordnet waren, wurden in dem Höhenbereich angeordnet, in dem auch die weiteren Messungen durchgeführt wurden. Entlang dieser Messlinien wurde der spezifische elektrische Widerstand als Maß für die Leitfähigkeitseigenschaften des Betons bestimmt. Der Bereich der Kabelkanäle wurde bei der Messung ausgespart.

Die Messungen wurden wie in Abschnitt 5.5 beschrieben, ausgeführt.

Die Lage der Messstellen und die Ergebnisse sind in Anlage 24 dargestellt.

7.4.6 Permeabilitätsmessung

Die Messwerte der Luftpermeabilität sind in Anlage 25 in eine Ansicht der Tunnelwand eingetragen. Aus der Darstellung ist auch die Lage der Messstellen ersichtlich. Die Messwerte sind in der Darstellung farbig unterlegt. Die Farbe korrespondiert mit der Bewertung der Permeabilität hinsichtlich der Dauerhaftigkeit auf der Grundlage von (JACOBS 05.1999). Der Bereich der Kabelkanäle wurde bei der Messung ausgespart.

7.4.7 Wasseraufnahme

Die Messung der Wasseraufnahme wurde wie in Abschnitt 5.7 beschrieben durchgeführt.

Die Lage der Messstellen und die Messergebnisse, angegeben als Wasseraufnahme mit Ausgleichsgerade als Wasseraufnahmekoeffizient, sind in Anlage 26 angegeben. Der Bereich der Kabelkanäle wurde bei der Messung ausgespart.

7.4.8 Korrosionszustand der Bewehrung

Die Feststellung des Korrosionszustandes der Bewehrung erfolgte, wie in Abschnitt 5.8 beschrieben, an Untersuchungsstellen, die auf der Grundlage der Potentialmessungen festgelegt wurden. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Anlage 27 dargestellt.

7.4.9 Chlorid-Migrationskoeffizient

An sieben Proben aus dem Tunnel wurde der Chlorid-Migrationskoeffizient nach BAW-MERKBLATT (BAWMERKBLATT 11.2012) bestimmt. Die Ergebnisse sind in Anlage 3 dargestellt. Wegen des unterschiedlichen Alters der drei untersuchten Bauwerke und der zeitabhängigen Veränderung des Migrationskoeffizienten lässt sich der Einfluss der Zementart auf den Migrationskoeffizienten nicht direkt ablesen. Im Vergleich zum Tunnel Farchant, dessen Bauwerkalter etwa halb so groß ist, überwiegt der Alterseinfluss augenscheinlich etwas den Einfluss der Zementart auf den Migrationskoeffizienten.

7.5 Zeitliche Veränderung des Chloridgehaltes

Für die im Rahmen des Forschungsvorhabens untersuchten Tunnel lagen bereits Ergebnisse früherer Chloriduntersuchungen vor. Ein unmittelbarer Vergleich einzelner Untersuchungsstellen mit den in den Abschnitten 7.2.2, 7.3.2 und 7.4.2 beschriebenen eigenen Untersuchungen war nicht möglich, da die Methodik der Beprobung (Tiefenstufen, Analyseverfahren) zum Teil unterschiedlich war und in mehreren Fällen abweichende Entnahmestellen gewählt werden mussten. Ein Vergleich war deshalb am besten durch Mittelung der Ergebnisse aus vergleichbaren Entnahmehöhen jeweils an einer Wand des Tunnels möglich.

Die Ergebnisse dieses Vergleiches sind als Bestandteil der Prognose zukünftiger Chloridgehalte im Abschnitt 8.4 dargestellt. Sie belegen die dringende Notwendigkeit, die Entnahme von Chloridproben im Hinblick auf Bohrtiefen, Lage der Bohransatzpunkte und Analyseverfahren zu vereinheitlichen.

8 Modellierung der Chloridmigration

8.1 Grundlagen

Die Literaturstudie belegte, dass eine Vielzahl von Modellen existiert, die überwiegend auf der Annahme basieren, dass Diffusionsprozesse den wesentlichen Mechanismus des Chloridtransportes in das Bauteilinnere darstellen. Veröffentlichte Vergleiche zwischen Modellrechnungen und Messungen an realen Objekten zeigten, dass nicht in allen Fällen eine befriedigende Übereinstimmung zwischen Realität und Modell erreicht wurde. Ein Indiz für die noch unbefriedigende Konvergenz ist in der Vielzahl von Modifikationen bestehender Modelle durch Anpassungsfaktoren und Variation von Parametern zu sehen. Durch probabilistische Betrachtung können depassivierungs- bzw. korrosionsgefährdete Bereiche von Bauwerken auf der Grundlage der Eindringmodelle eingegrenzt werden. Das erfordert jedoch im Allgemeinen den Einsatz spezieller Modellierungssoftware und möglichst zahlreiche Messergebnisse. Die im Ergebnis des Forschungsvorhabens angestrebte Nutzung von Modellrechnungen in der Straßenbauverwaltung wird dadurch erschwert.

Bei anderen Modellen wird versucht, weitere Einflussfaktoren auf die Chlorideindringung zu erfassen und zu berücksichtigen. Diese Ansätze erfordern die Erfassung weiterer Kennwerte am Bauwerk, was aufwendig ist und nur bei zukünftigen Untersuchungen realisiert werden kann. Die bereits für zahlreiche Bauwerke vorliegenden Untersuchungsergebnisse sind somit nur eingeschränkt verwendbar.

8.2 Semi-probabilistische Lösung

Bei der Vorstellung von Zwischenergebnissen dieses Forschungsvorhabens bestand seitens der Beratergruppe Interesse an einer Modellierung der Chlorid-Eindringvorgänge, die auf der Grundlage von office-Software ausführbar und dadurch in der Straßenbauverwaltung ohne Zusätzlichen Aufwand nutzbar ist. Als Grundlage wurde der semi-probabilistische Ansatz von (RAHIMI 2016) und (RAHIMI 2017) gewählt. Mit den dort beschriebenen Beziehungen ist eine Abbildung der Diffusionsvorgänge in Microsoft-excel-Arbeitsblättern möglich.

Anders als in (RAHIMI 2017) bestand das Ziel der hier ausgeführten Berechnungen nicht in der Dauerhaftigkeitsbemessung neu zu errichtender Bauteile, sondern in der Prognose der weiteren Entwicklung des Chloridgehaltes in einem bestehenden Bauwerk, für das Chloridprofile aus Bauwerksuntersuchungen vorliegen.

Die Berechnungen basieren auf dem Ingenieurmodell aus (INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE 2006), das Grundlage vieler Modelle zur Chloridmigration ist:

$$C(x, t) = C_0 + (C_{s, \Delta x} - C_0) \cdot \operatorname{erfc} \frac{x - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{app}(t) \cdot t}} \quad (19)$$

mit:

$C(x, t)$	Chloridkonzentration [M.-%/b], bezogen auf den Bindemittelgehalt, in der Tiefe x zum Zeitpunkt t
C_0	Eigenchloridgehalt des Betons [M.-%/b], kann bei Werten unter 0,1 % gleich Null gesetzt werden wurde hier mit 0,05 M-% angesetzt, Werte bezogen auf Bindemittelanteil
$C_{s,\Delta x}$	Chloridkonzentration am Ende der Konvektionszone zum Beobachtungszeitpunkt. Der Wert wird als konstante Einwirkung angenommen. Für die hier dargestellte Prognoserechnung wurde der Wert durch Kurvenfitting des zugrunde gelegten Chloridprofils ermittelt.
x	Tiefe [m] mit zugehörigem Chloridgehalt $C(x, t)$
Δx	Tiefe [m], bis zu der das Chlorideindringverhalten vom Fickschen Diffusionsgesetz abweicht (Konvektionszone). Der Wert wurde nach Vergleichsrechnungen hier einheitlich mit 15 mm angesetzt
t	Betonalter [s]
$D_{app}(t)$	scheinbarer (apparent) Chloriddiffusionskoeffizient [m^2/s], Für die hier dargestellte Prognoserechnung wurde der Wert durch Kurvenfitting des zugrunde gelegten Chloridprofils ermittelt. Diese Vorgehensweise trägt der Tatsache Rechnung, dass außer der Diffusion noch andere Transportmechanismen in Frage kommen. Deren Wirkung wird teilweise durch den Diffusionskoeffizienten mit abgebildet. Bei der Prognoserechnung wird die zeitabhängige Veränderung des Wertes für den Prognosezeitraum nach der durchgeführten Beprobung durch Verwendung des Altersexponenten berücksichtigt. Mit zunehmendem Bauwerkalter nimmt der Einfluss des Altersexponenten auf den Chloriddiffusionskoeffizienten und damit auf das Ergebnis ab, so dass sich die Ergebnisse der Prognose nicht wesentlich von denen unterscheiden, die ohne Berücksichtigung des Altersexponenten ermittelt wurden.
$erfc$	komplementäre Gaußsche Fehlerfunktion

Die für die Berechnung zu wählenden Werte für die Tiefenausdehnung der Konvektionszone Δx und für den Eigenchloridgehalt des Betons C_0 wurden durch Variantenrechnungen, deren Ergebnisse mit den tatsächlich gemessenen Chloridkonzentrationen verglichen wurden, ermittelt.

Für die hier untersuchten Gegebenheiten ergaben sich die besten Ergebnisse mit

$\Delta x = 15 \text{ mm}$ und

$C_0 = 0,05 \text{ [M.-%/b]}$.

Diese Werte wurden für alle hier dargestellten Ergebnisse verwendet.

Die Veränderung des scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizienten mit dem Betonalter wird durch die Beziehung

$$D_{app}(t) = D_{test}(t_0) \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^\alpha \quad (20)$$

abgebildet. Darin sind:

$D_{test}(t_0)$	Widerstand des Betons gegen das Eindringen von Chloriden zum Zeitpunkt t_0 Er ist bei den hier ausgeführten Rechnungen das Ergebnis des Kurvenfittings von Chloridprofilen.
t_0	Betonalter [s] zum Zeitpunkt der Chloridbestimmung
t	Betonalter [s] zum Betrachtungszeitpunkt, auf den sich die Prognose bezieht
α	Altersexponent , abhängig von der Zementart, aus (RAHIMI 2017) siehe auch Tabelle 34

Zementart nach DIN EN 197-1		Altersexponent α_{RCM} [-]
CEM I		0,30 ³⁾
CEM II	CEM II/A-S	0,35 ⁴⁾
	CEM II/B-S	0,37 ⁴⁾
	CEM II/A-D	0,40 ⁴⁾
	CEM II/A-P	0,40 ⁴⁾
	CEM II/B-P	0,40 ⁴⁾
	CEM II/A-Q	0,40 ⁴⁾
	CEM II/B-Q	0,40 ⁴⁾
	CEM II/A-V ¹⁾	0,60 ³⁾
	CEM II/B-V	0,60 ⁴⁾
	CEM II/A-W	–
	CEM II/B-W	–
	CEM II/A-T	0,40 ⁴⁾
	CEM II/B-T	0,40 ⁴⁾
	CEM II/A-L	0,30 ⁴⁾
	CEM II/B-L	–
	CEM II/A-LL	0,30 ⁴⁾
CEM II/B-LL	–	
CEM II/A-M	–	

Zementart nach DIN EN 197-1		Altersexponent α_{RCM} [-]
	CEM II/B-M	–
CEM III	CEM III/A	0,40 ⁴⁾
	CEM III/B	0,45 ³⁾
	CEM III/C	0,45 ⁴⁾
CEM IV	CEM IV/A	–
	CEM IV/B	–
CEM V	CEM V/A	–
	CEM V/B	–
CEM III/A + ca. 10 % Flugasche ²⁾		0,50 ⁴⁾
¹⁾ Flugaschegehalt mindestens 18 M.-%/Gesamtmasse ²⁾ wirksame Bindemittelart; Zusammensetzung mit den Zementarten nach DIN EN 197-1 nicht abbildbar ³⁾ auf Basis von Untersuchungen, Gehlen (2000), abgeleiteter Wert ⁴⁾ auf Basis der Zementzusammensetzung angenommener Wert		

Tabelle 34: Altersexponent α_{RCM} in Abhängigkeit der Zementart für Expositionsklassen XD2, XD3, XS2 und XS3

Das Kurvenfitting wird in der Tabellenkalkulation durch wiederholten Aufruf des MS excel-solvers realisiert. Dabei werden in Formel (19) die Parameter $C_{s,\Delta x}$ und $D_{app}(t)$ variiert, bis die Abweichung vom ermittelten Chloridprofil als Summe der Fehlerquadrate ein Minimum erreicht. Zur Verringerung der erforderlichen Rechenzeit werden für beide Werte plausible Grenzen vorgegeben.

Das Kurvenfitting ist nur erfolgreich im Sinne brauchbarer Ergebnisse, wenn das zu Grunde liegende Chloridprofil prinzipiell dem Verlauf einer Diffusionskurve nach Gleichung (19) entspricht. Die oberflächennahen Abschnitte jedes Chloridprofils (Konvektionszone) müssen, wenn sie nicht dem 2. Fickschen Gesetz folgen, aus den zum Fitting verwendeten Daten entfernt werden.

Mit der Verwendung der beschriebenen Zusammenhänge und unter Nutzung der konkret an einem Bauwerk ermittelten Chloridprofile ist die Prognose der zukünftigen Chloridverteilung von den vorliegenden Analysewerten der Bauwerksuntersuchungen abhängig. Da diese je nach Entnahmestelle zum Teil erheblich streuen, ist es deshalb nach Meinung der Autoren nicht zweckmäßig, aus der Chloridverteilung einer einzelnen Messstelle eine auf ebendiese Messstelle bezogene Prognose abzuleiten. Zweckmäßiger ist es, nach bauwerksbezogenen Kriterien gemittelte Tiefenprofile des Chloridgehaltes zu verwenden und für den einbezogenen Bereich eine einheitliche Prognose abzuleiten.

Kriterien für die Mittelung einzelner Messungen sollten sein:

- gleiche Tiefenabstufung der Messstellen
- gleicher Beton, insbesondere gleicher Zement an allen einbezogenen Messstellen
- gleiche oder zumindest ähnliche Entnahmehöhe
- Messungen aus einer Tunnelröhre

- Entnahme der Proben aus einer Seite der Röhre hinsichtlich Haupt- und Überholspur
- bei großer Probenanzahl getrennte Betrachtung des Einfahrt-, des Mittel- und des Endbereiches des Tunnels

8.3 Verwendung bestehender Daten aus Bauwerksuntersuchungen

Die Auswertung der vorliegenden Untersuchungen für die Tunnel Farchant, Prüfening und Pfaffenstein sowie der Vergleich mit den eigenen Untersuchungen zeigte, dass die Randbedingungen der Beprobung sehr unterschiedlich waren.

Unterschiede ergaben sich insbesondere im Hinblick auf

- Verteilung der untersuchten Blöcke über die Bauwerkslänge
Hier spielte bei den früheren Untersuchungen der Zweck, die Zugänglichkeit, die Lage von Einbauten, Pannenbuchten, Querschlägen usw. eine Rolle.
- Höhenlage der Entnahmestellen
Auch dieser Parameter wurde zum Teil durch bauliche Besonderheiten der Tunnel bestimmt.
- Tiefenabstufung der entnommenen Chloridproben
- Analysemethode

Die Bauwerksdaten der betrachteten Tunnel enthielten bei unterschiedlichen Messungen überwiegend Werte für den Gesamtchloridgehalt nach Heft 401 (DAFSTB 1989), was regelkonform ist, teilweise aber auch nur den Gehalt an wasserlöslichen Chloriden, der i.d.R. unter dem Gesamtchloridgehalt liegt.

Für die Auswertung im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden die Messwerte aus einer Entnahmehöhe zusammengefasst und den eigenen Messungen aus einer ähnlichen Entnahmehöhe gegenübergestellt. Stichprobenartige Vergleichsrechnungen hatten ergeben, dass eine bessere Übereinstimmung zwischen Prognoserechnung und Kontrollmessungen erreicht wird, wenn die Messwerte für Chlorid gemittelt werden und das Kurvenfitting an den Mittelwerten ausgeführt wird. Die Alternative wäre das Kurvenfitting an den einzelnen Chloridprofilen und die Mittelung der gefitteten Parameter.

Im Abschnitt 9.1 wird ein Vorschlag zur Vereinheitlichung der Probenahme unterbreitet, der die Erfahrungen bei der Auswertung berücksichtigt.

8.4 Ergebnisse der Prognose

8.4.1 Tunnel Prüfening

Für den Tunnel Prüfening standen Untersuchungsergebnisse der Chloridbestimmung aus dem Jahr 2012 (PRÜFBERICHT NR. 5624669 05.11.2012) zur Verfügung. Wegen der im Abschnitt 7.1 beschriebenen Auswahlkriterien für die Beprobungsstellen im Rahmen dieses Forschungsthemas standen keine unmittelbar vergleichbaren Punkte zur Verfügung. Die Mittelwertbildung über die Entnahmestellen ungefähr gleicher Höhenlage erbrachte nicht in allen Fällen plausible Ergebnisse.

Aus den Chloridprofilen des Jahres 2012 wurde eine Prognose für die Jahre 2018 und 2030 abgeleitet, wobei die Prognose für 2018 unter Beachtung der beschriebenen Einschränkungen (Entnahmestellen) mit den 2018 tatsächlich ermittelten Werten verglichen werden kann.

Die folgenden Diagramme enthalten die Chloridprofile der alten Messungen (2012), der eigenen Messungen (2019) sowie Prognoserechnungen auf der Grundlage der alten Messungen für die Jahre 2019 und 2030.

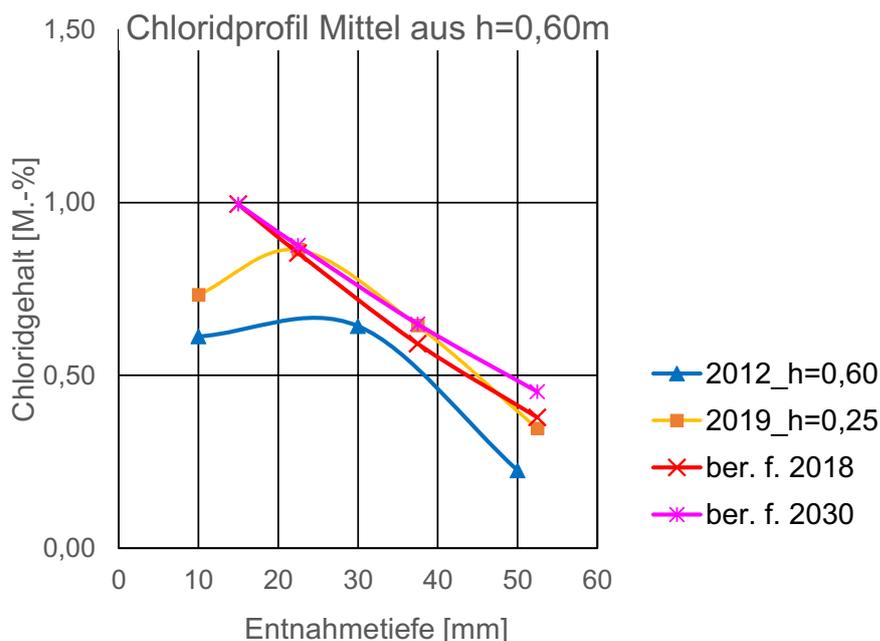


Bild 112: Chloridprofile der Messungen 2012 und 2018, Entnahmehöhe 60 cm bzw. 25 cm sowie Prognose 2012 → 2018 und 2012 → 2030 (Tunnel Prüfening)

Die Zunahme der Messwerte von 2012 bis 2018 ist plausibel, ebenso der Kurvenverlauf. Die Prognose 2012 → 2018 stimmt sehr gut mit den Messwerten überein, siehe Bild 112.

In der Entnahmehöhe 1,20 m bzw. 1,50 m ist die Entwicklung der Tiefenprofile über die Zeit nicht plausibel, was auf die unterschiedlichen Entnahmestellen zurückgeführt wird, siehe Bild 113. Dem entsprechend ist die Überprüfung der Prognose 2012 → 2018 mit den Messwerten von 2018 nicht erfolgreich.

Für beide Entnahmehöhen (0,60 m und 1,20 m) wäre bei den Messwerten aus dem Jahr 2012 eine zusätzliche Tiefenstufe des Profils hilfreich gewesen. Mit den vorhandenen Profilen standen für das Kurvenfitting jeweils nur zwei Messwerte zur Verfügung, was die Aussagekraft der Ergebnisse einschränkt. Es ist zudem wahrscheinlich, dass für die Messungen von 2012 ein Maximalwert des Chloridgehaltes zwischen 10 mm und 30 mm Entnahmetiefe existiert, der durch die vorliegenden Messergebnisse nicht abgebildet wird.

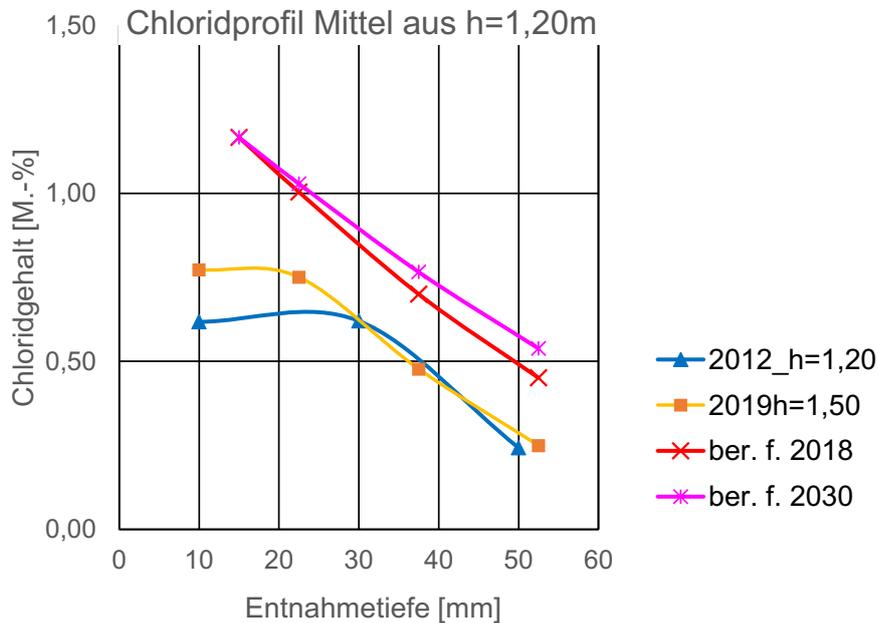


Bild 113: Chloridprofile der Messungen 2012 und 2018, Entnahmehöhe 120 cm bzw. 150 cm sowie Prognose 2012 → 2018 und 2012 → 2030 (Tunnel Prüfening)

8.4.2 Tunnel Pfaffenstein

Für den Tunnel Pfaffenstein standen Chlorid-Messwerte aus den Jahren 2012 / 2013, bestimmt durch die MPA Bau an der TU München (PROJEKT G1222 19. März 2013) und die Citec GmbH (BERICHT-NR. 1800-2012-01 31. Januar 2013) zur Verfügung.

Die Messwerte der TU München beziehen sich nur auf die Höhe 0,1 m über dem Notgehweg (unterhalb des Kabelkanals). Es wurden deshalb die Messwerte der Citec GmbH als Grundlage der Prognoserechnung verwendet. Diese Werte wurden auf der Grundlage einer unternehmens-eigenen Vorschrift als Gehalt an wasserlöslichem Chlorid bestimmt. Verwendet wurden hier die Mittelwerte der Messungen jeweils einer Entnahmehöhe.

Während für die Messstellen unmittelbar über dem Notgehweg (unterhalb des Kabelkanals im Ulmenbereich, h=0,10 m) die Chloridausbreitung von der Modellrechnung etwas unterschätzt wird, zeigen die Messstellen oberhalb des Kabelkanals eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Prognose und Messung aus dem Jahr 2018. Die Ursache für die Abweichung zwischen Prognose und Messung 2018 für die Entnahmehöhe 0,10 m ist in erster Linie nicht im Ausbreitungsmodell und seiner Anwendung zu sehen, sondern im unterschiedlichen Verlauf der Chloridprofile, bedingt durch abweichende Tiefenstufen bei der Entnahme.

Im Vergleich zum neueren Tunnel Prüfening fallen die weitaus höheren Absolutwerte des Chloridgehaltes, insbesondere im unteren Bereich, auf. Als wahrscheinliche Ursache ist neben dem höheren Bauwerksalter der verwendete Zement (hier CEM I) zu nennen.

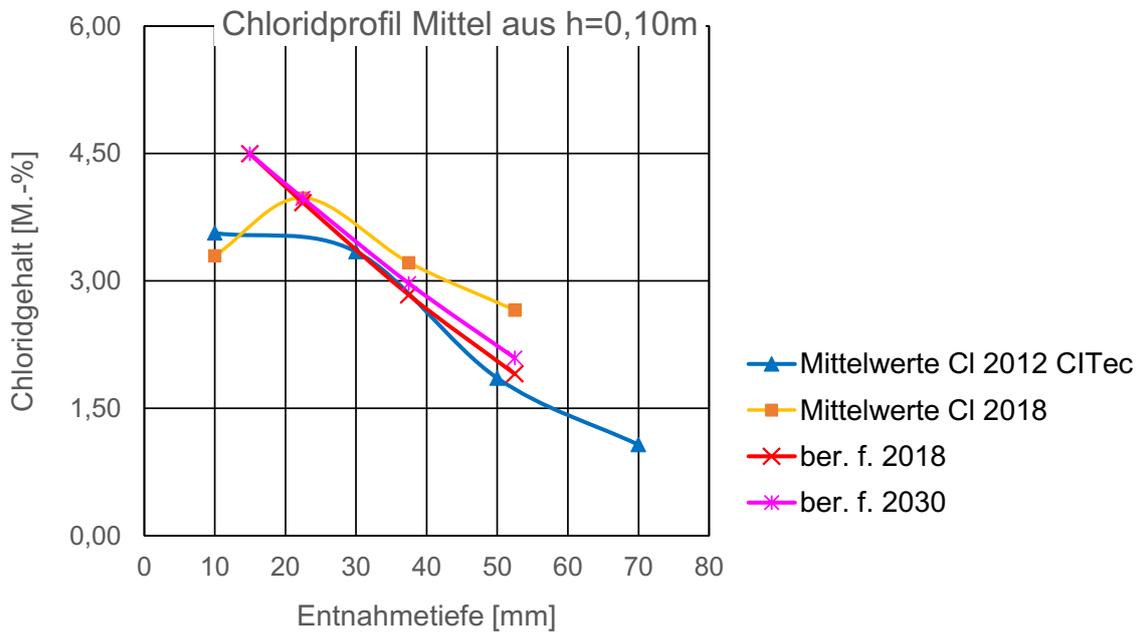


Bild 114: Chloridprofile der Messungen 2012 und 2018, Entnahmhöhe 25 cm sowie Prognose 2012 → 2018 und 2012 → 2030 (Tunnel Pfaffenstein)

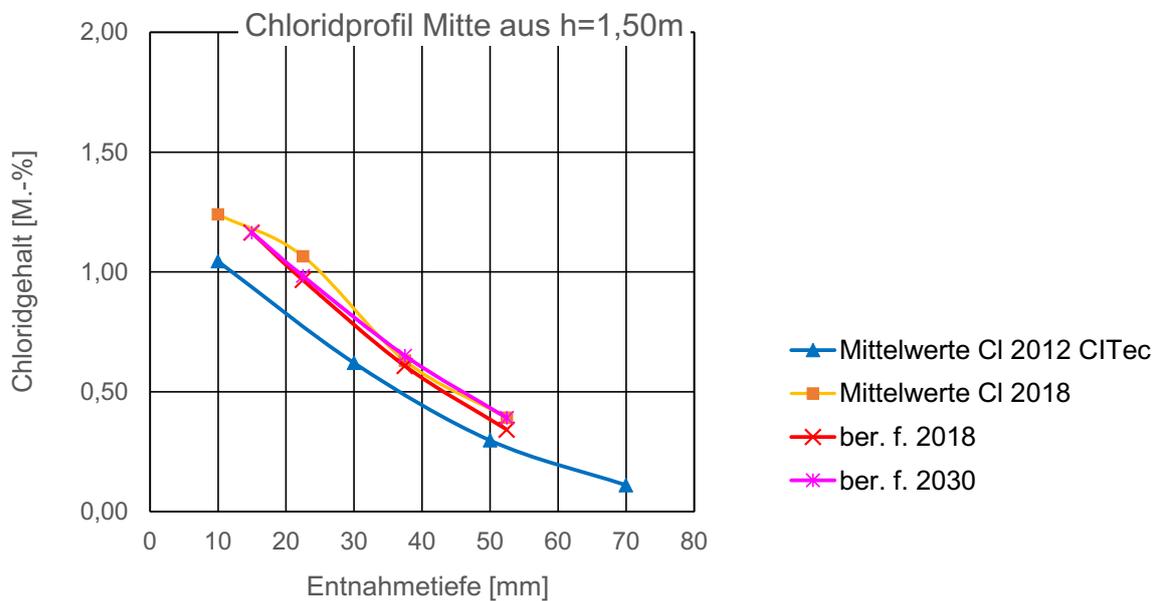


Bild 115: Chloridprofile der Messungen 2012 und 2018, Entnahmhöhe 25 cm sowie Prognose 2012 → 2018 und 2012 → 2030 (Tunnel Pfaffenstein)

8.4.3 Tunnel Farchant

Für den Tunnel Farchant standen aus den vorhandenen Unterlagen Messungen des Chloridgehaltes aus dem Jahr 2010 (PROJEKT-NR. P10009 14.04.2010) zur Verfügung. Die vorliegende Dokumentation enthielt die genaue Lage der Untersuchungsstellen. Die eigenen Probenahmen im Jahr 2018 konnten, da die Oströhre ohne Einschränkungen für Untersuchungen zur Verfügung stand, in unmittelbarer Nähe zu den alten Untersuchungsstellen durchgeführt werden. Das betraf sowohl die Lage in Längsrichtung als auch die Höhe der Entnahmestellen über dem Notgehweg.

Eine Besonderheit hinsichtlich der Bewertung der Chloridmigration besteht beim Tunnel Farchant darin, dass nach ersten Messung, im Jahr 2013, ein Oberflächenschutzsystem auf die Innenschale aufgebracht wurde. Von dem Oberflächenschutzsystem war eine Unterbrechung der Chloridzufuhr in die Innenschale zu erwarten.

Die nachfolgend dargestellten Chloridprofile als Mittelwert der untersuchten Blöcke 25 und 84, die hinsichtlich Bauweise und Betonmischung vergleichbar waren, liefern die folgenden Informationen:

- Die aus den Werten des Jahres 2010 abgeleiteten Prognosen erwiesen sich beim Vergleich mit den Messwerten von 2018 erwartungsgemäß als nicht zutreffend, da sich mit der Applikation des Oberflächenschutzsystems der Chloridtransport im Bauteil verändert hat.
- Die Chloridprofile von 2010 haben teilweise einen unerwarteten Verlauf (z.B. Bild 117).
- Der Vergleich der Chloridprofile der Jahre 2010 und 2018 zeigt in einigen Fällen die erwartete Vergleichmäßigung nach Aufbringen des Oberflächenschutzsystems (z.B. Bild 116 und Bild 118)
- An anderen Untersuchungsstellen sind offenbar auch nach Aufbringen der Beschichtung noch Chloride in den Beton eingedrungen oder bei der Probenahme 2018 wurde zufällig ein gestörter Betonbereich (Riss, Fehlstelle o.ä.), der unter der Beschichtung nicht sichtbar war, erfasst (z.B. Bild 117 und Bild 120). Letzteres ist nach den Ergebnissen der visuellen Beurteilung unwahrscheinlich, da der nicht beschichtete Bereich der Innenschale diesbezüglich keine Auffälligkeiten zeigte.

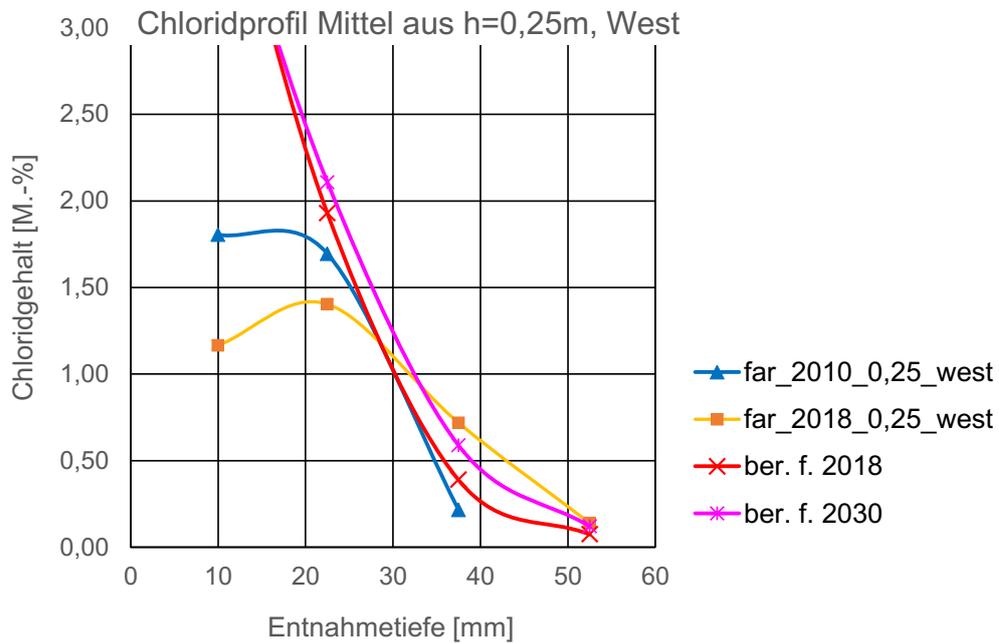


Bild 116: Chloridprofile der Messungen 2010 und 2018, Entnahmhöhe 25 cm sowie Prognose 2010 → 2018 und 2010 → 2030 (Tunnel Farchant, westliche Wand)

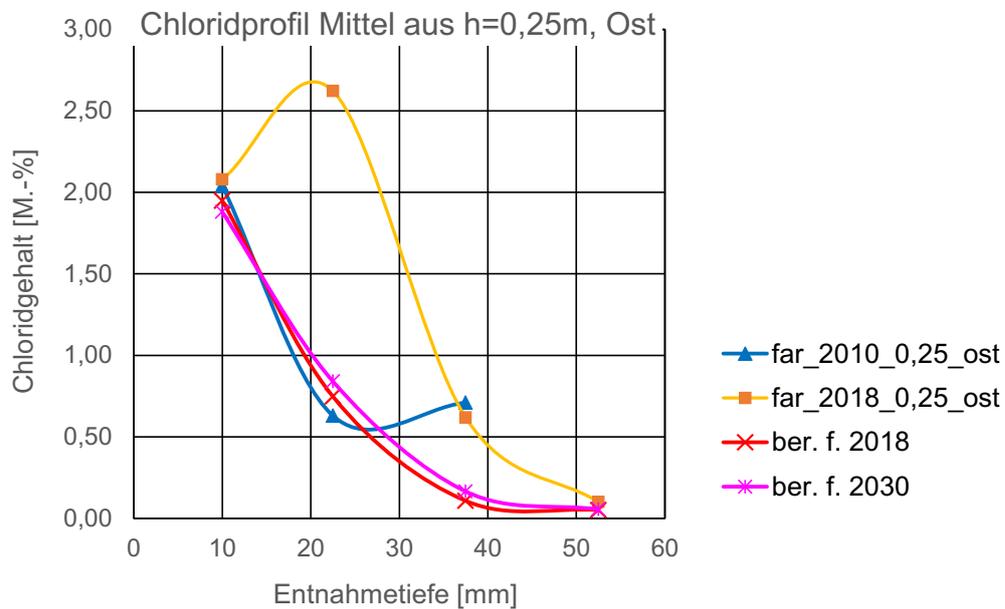


Bild 117: Chloridprofile der Messungen 2010 und 2018, Entnahmhöhe 25 cm sowie Prognose 2010 → 2018 und 2010 → 2030 (Tunnel Farchant, östliche Wand)

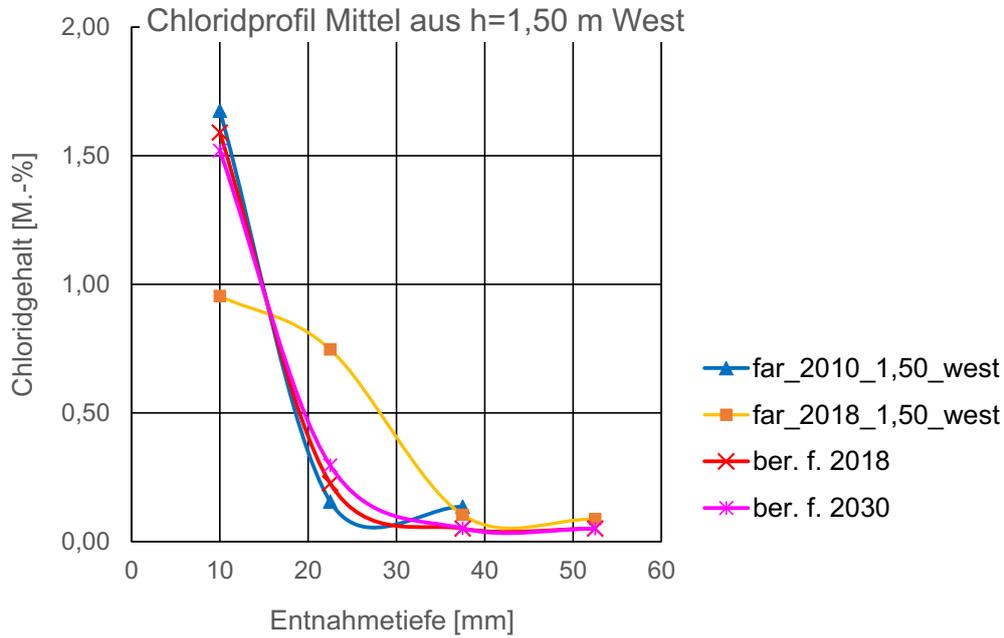


Bild 118: Chloridprofile der Messungen 2010 und 2018, Entnahmhöhe 1,50 m sowie Prognose 2010 → 2018 und 2010 → 2030 (Tunnel Farchant, westliche Wand)

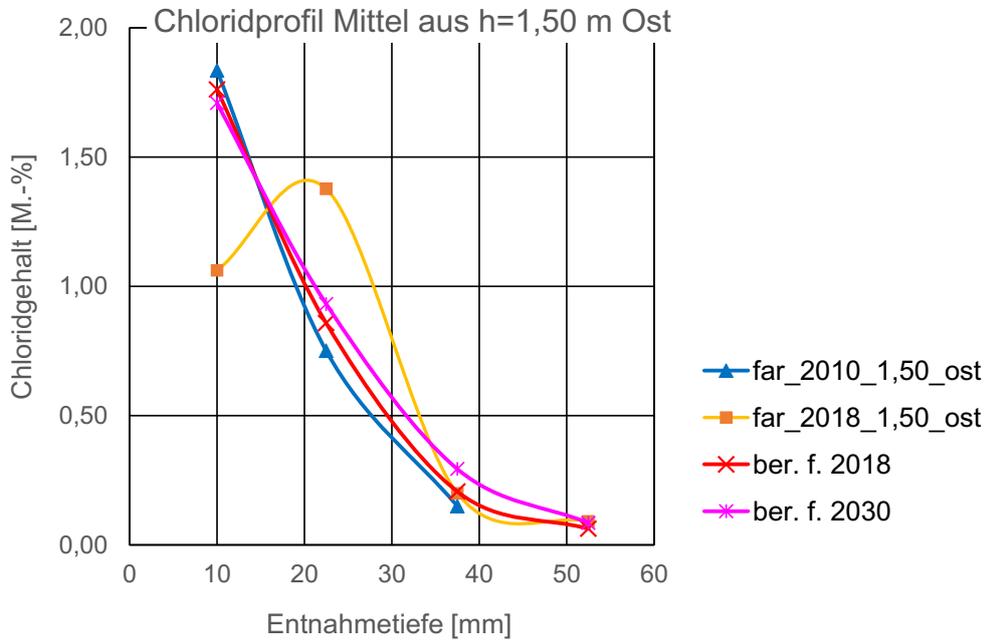


Bild 119: Chloridprofile der Messungen 2010 und 2018, Entnahmhöhe 1,50 m sowie Prognose 2010 → 2018 und 2010 → 2030 (Tunnel Farchant, östliche Wand)

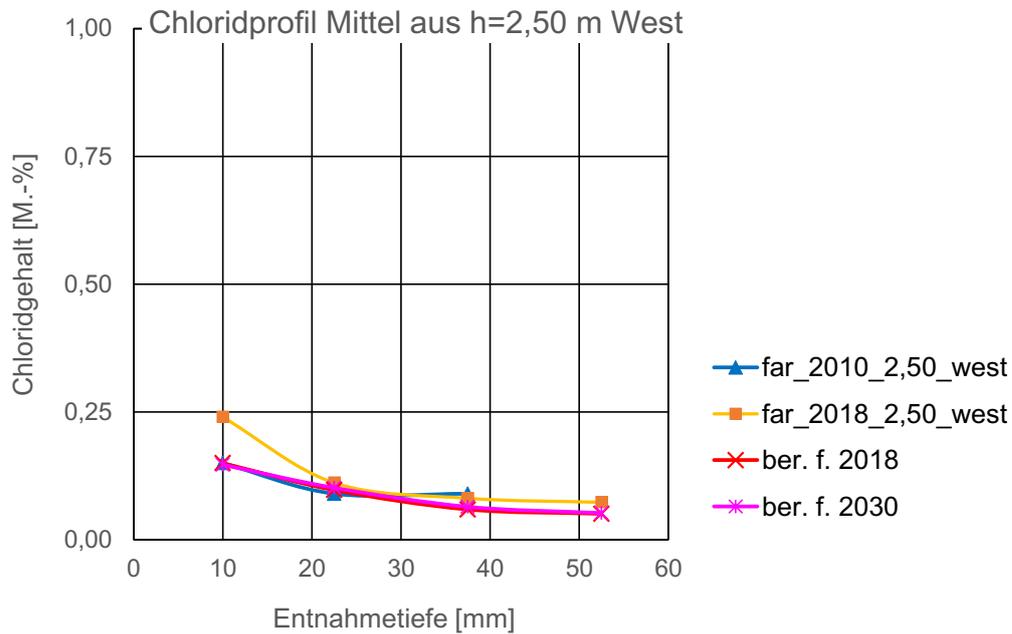


Bild 120: Chloridprofile der Messungen 2010 und 2018, Entnahmhöhe 2,50 m sowie Prognose 2010 → 2018 und 2010 → 2030 (Tunnel Farchant, westliche Wand)

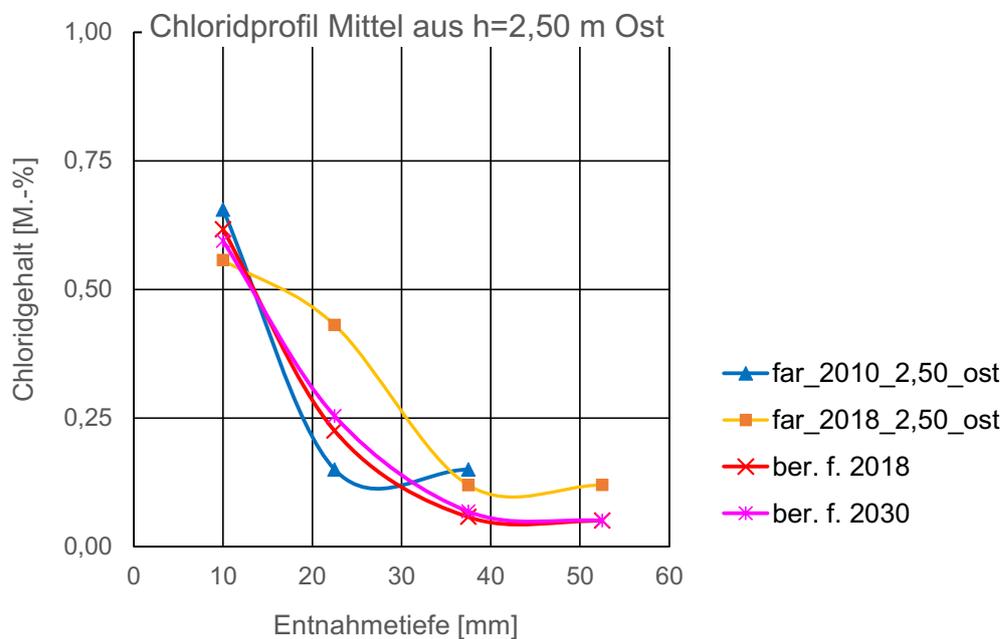


Bild 121: Chloridprofile der Messungen 2010 und 2018, Entnahmhöhe 1,50 m sowie Prognose 2010 → 2018 und 2010 → 2030 (Tunnel Farchant, östliche Wand)

9 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

9.1 Empfehlungen zur Probenahme und Analyse

Die Proben zur Messung des Chloridgehaltes im Beton sollten als Bohrmehl entnommen werden. Dafür sprechen die trockene Entnahme und der geringere Aufwand zur Probenvorbereitung vor der Analyse im Labor. Die Entnahme von Bohrkernen ist, verglichen mit der Bohrmehlentnahme, mit einer Reihe von Nachteilen verbunden:

- größere Gefahr der Beschädigung von Bewehrung bei dicht bewehrten Bauteilen
- Verlust von Material durch das Herausschneiden von Scheiben, besonders bei eng abgestuften Bohrtiefen
- höherer Aufwand zur Probenvorbereitung im Labor
- Beeinflussung von Menge und Verteilung der Chloridionen beim Nassbohren
- ungenaue Tiefenzuordnung bei Trockenbohrkernen, die in mehreren Teilen ausgebrochen werden.

Bei der Entnahme von Bohrmehl wird zur Minimierung systembedingter Fehler zu folgenden Vorkehrungen geraten:

- Mindestanzahl von Bohrungen je Untersuchungsstelle nach Heft 401 (DAFSTB 1989),
- zur Vermeidung zufälliger Einflüsse und bei unbekannter Größe der Gesteinskörnung sollten besser in jedem Fall drei Bohrungen ausgeführt werden,
- Verwendung von Hohlbohrern mit innerer Absaugung des Bohrmehls, Reinigung der Entnahmeeinrichtung nach jeder Tiefenstufe.

Die Tiefenabstufung bei der Probenahme sollte sicherstellen, dass

- ein Chloridprofil mit wenigstens 4 Punkten dargestellt werden kann, wobei
- der absteigende Ast des Profils für das Kurvenfitting mindestens drei Punkte enthalten sollte,
- an Hand der Messwerte der oberflächennahe Bereich des Betons, in dem die Diffusion von Chloridionen stark durch andere Einflüsse überlagert wird, erkennbar ist und
- die Vergleichbarkeit von Messungen gewährleistet ist.

Es wird die folgende Abstufung vorgeschlagen, kleinere Stufen sind bei besonderen Anforderungen an die Messung grundsätzlich möglich.

Stufe 1	5 bis 15 mm Tiefe	beinhaltet die Konvektionszone (Diffusion untergeordnet)
Stufe 2	16 bis 30 mm Tiefe	
Stufe 3	31 bis 45 mm Tiefe	
Stufe 4	46 bis 60 mm Tiefe	
Stufe 5	61 bis 75 mm Tiefe	
Stufe 6	76 bis 90 mm Tiefe	
Stufe 7	91 bis 104 mm Tiefe	

Wird zur Bewertung der Chloridprofile die Chloridkonzentration an der Oberfläche benötigt, muss der Tiefenbereich 0 bis 5 mm mit erfasst werden.

Es sollten mindestens Proben aus den Tiefenstufen 1 bis 5 untersucht werden. Bei älteren Bauwerken, bei sehr großer Betondeckung der Bewehrung oder bei erwarteter hoher Durchlässigkeit des Betons für Chloridionen sind ggf. auch Proben aus den Tiefenstufen 6 und 7 zu entnehmen und zu prüfen.

Die Höhe der Entnahmestellen über dem Notgehweg beeinflusst den Chloridgehalt der Proben. Maximalwerte sind im unteren Bereich zu erwarten. Um den Einfluss von vertikalem Kapillartransport salzhaltigen Wassers im Beton durch Stauwasser auf der Fahrbahn oder dem Notgehweg zu minimieren, sollte die untere Entnahmestelle 25 cm über Fahrbahn / Notgehweg liegen. Weitere Entnahmehöhen werden in 1,50 m Höhe (ohne Hilfsmittel erreichbar) und in 2,50 m Höhe empfohlen.

Die Untersuchung der Proben sollte nach den Vorgaben des Heftes 401 (DAFSTB 1989) durchgeführt werden. Dort sind Regelungen für Aufschluss und Analyse enthalten.

9.2 Zweckmäßiges Handeln der Verwaltung

9.2.1 Nutzung von Analyseverfahren

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde erprobt, ob mit einfach durchzuführenden, möglichst zerstörungsarmen alternativen Verfahren eine Einschätzung der möglichen Chloridbelastung der Tunnelinnenschale und der daraus resultierenden Korrosionsgefahr für die Bewehrung möglich ist.

Dazu wurden bei den Untersuchungen vor Ort neben den „direkten“ Untersuchungen, der Aufnahme von Chloridprofilen, der Messung der Betondeckung, der elektrochemischen Potentialmessung und der Beurteilung des Korrosionszustandes der Bewehrung, folgende ergänzende Untersuchungen erprobt:

- Messung der elektrischen Leitfähigkeit bzw. des spezifischen elektrischen Widerstandes des Betons
- Messung der kapillaren Wasseraufnahme des Betons (Karsten-Röhrchen)
- Messung der Luft-Permeabilität des Betons

Voraussetzung für die Nutzung der letztgenannten Verfahren zur Untersuchung von Tunnelinnenschalen ist eine nachweisbare Korrelation der Ergebnisse mit denen der „direkten“ Untersuchungen.

Das eigentliche Ziel der Untersuchungen soll in der Vermeidung bzw. rechtzeitigen Feststellung von chloridinduzierter Korrosion der Bewehrung bzw. hohem Chloridgehalt des Betons im Bereich der Bewehrung bestehen. Der Korrosionszustand der Bewehrung bzw. der Chloridgehalt des Betons wird deshalb als Referenz verwendet, mit der die Ergebnisse der anderen, alternativen Untersuchungen verglichen werden.

Um die Messwerte der verschiedenartigen Untersuchungen, die unterschiedliche Eigenschaften der Tunnelinnenschale beschreiben und deshalb in unterschiedlichen Maßeinheiten vorliegen, vergleichbar zu machen, wurden die Messwerte hinsichtlich ihres Einflusses auf die Korrosion

der Bewehrung und den Chloridgehalt normiert. Das geschah in der Form, dass für jede Art von Untersuchungen (Klasse von Messungen) der Messwert mit der größten Auswirkung auf die Korrosion der Bewehrung zu 1 gesetzt wurde. Die anderen Messwerte der gleichen Klasse erhielten proportional kleinere Werte. Wegen der Auswirkung der jeweiligen Messwertklasse auf die Wahrscheinlichkeit der Bewehrungskorrosion heißt das z.B., der jeweils größte Messwert des Chloridgehaltes und des Betrages des Korrosionspotentials, aber der kleinste Messwert der Betondeckung oder des spezifischen elektrischen Widerstandes wurden jeweils zu 1 gesetzt.

Das Prinzip der Normierung ist für den Chloridgehalt in der Tiefenstufe 30 - 45 mm für den Tunnel Prüfling (Mittelwerte) in Tabelle 35 dargestellt.

Messwert Chlorid 30 - 45 mm [M.-% (Z)]	normierter Wert [--]
0,714	0,77 (=0,714 / 0,933)
0,912	0,98 (=0,912 / 0,933)
0,660	0,71 (=0,660 / 0,933)
0,933	1,00 (=0,933 / 0,933)

Tabelle 35: Normierung der Messwerte zur Schaffung einer Vergleichsmöglichkeit zwischen unterschiedlichen Klassen von Messwerten

Eine ergänzende Untersuchungsmethode ist möglicherweise für die Lokalisierung korrosionsgefährdeter Bereiche dann geeignet, wenn zwischen den normierten Werten der ergänzenden Untersuchungsmethoden und der gewählten Referenz (Korrosionszustand oder Chloridgehalt) eine positive Korrelation besteht.

Die Korrelation muss signifikant, also bei allen untersuchten Bauwerken und möglichst auch bei kleinen Werten deutlich erkennbar sein.

Die Ergebnisse des Vergleiches sind in den Diagrammen Bild 122, Bild 123 und Bild 124 dargestellt.

Die Gegenüberstellungen enthalten folgende Klassen von Messwerten. Bei den kursiv gedruckten Klassen wurde zur Normierung der kleinste Messwert zu 1 gesetzt, bei den übrigen Klassen der größte Messwert.

Cl ⁻ (15-30 mm)	Chloridgehalt, Entnahmestelle in Nähe der Bohrkernentnahmestelle, vorzugsweise geringe Höhe, Tiefenbereich 15 mm bis 30 mm
Cl ⁻ (30-45 mm)	wie vor, Tiefenbereich 30 mm bis 45 mm
<i>Betondeckung</i>	Betondeckung der Bewehrung
Potential	Betrag des gemessenen Korrosionspotentials, das regelmäßig negativ ist

<i>el. Widerstand 1</i>	spezifischer elektrischer Widerstand des Betons, gemessen mit Elektrodenanordnung nach Wenner, Mittelwert einer horizontalen Messlinie
<i>el. Widerstand 2</i>	wie vor, weitere Messlinie, Lage bauwerksabhängig
Luftpermeabilität	Luftpermeabilität des Betons (Torrent)
Wasseraufnahme	kapillare Wasseraufnahme des Betons (Karsten-Röhrchen)
Korr. Zustand	visuell festgestellter Korrosionszustand der bei der Bohrkernentnahme freigelegten Bewehrung, bewertet wurde der korrodierte Flächenanteil der sichtbaren Bewehrungsoberfläche wesentliche chloridbedingte Korrosionserscheinungen wie Lochfraßkorrosion wurden an keiner Probe festgestellt
DRCM	Chloridmigrationskoeffizient, gemessen nach BAW-Merkblatt an Proben aus dem Bauwerk

Tunnel	Referenzmerkmal	positive Korrelation mit	Bemerkung
Farchant	Korrosionszustand Bewehrung (Maximum in Block 25 O)	Betondeckung Korrosionspotential Cl ⁻ 15 - 30 mm	
	Korrosionszustand Bewehrung (Minimum in Block 84 W)	Luftpermeabilität Wasseraufnahme Korrosionspotential	
	Cl ⁻ 30 - 45 mm (Maximum in Block 84 O)	el. Widerstand	
	Cl ⁻ 30 - 45 mm (Minimum in Block 25 W)	Betondeckung el. Widerstand	
Prüfening	Korrosionszustand Bewehrung (Maximum in Block 50 W)	Luftpermeabilität Korrosionspotential	
	Korrosionszustand Bewehrung (Minimum in Block 23 W, 24 W)	Luftpermeabilität Korrosionspotential	
	Cl ⁻ 30 - 45 mm (Maximum in Block 51 W)	Korrosionspotential el. Widerstand	
	Cl ⁻ 30 - 45 mm (Minimum in Block 50 W)	Betondeckung	
Pfaffenstein	Korrosionszustand Bewehrung (Maximum in Block 49 O)	--	
	Korrosionszustand Bewehrung (Minimum in Block 50 O, 50 W)	--	
	Cl ⁻ 30 - 45 mm (Maximum in Block 76 O)	el. Widerstand Cl ⁻ 15 - 30 mm DRCM	

Tunnel	Referenzmerkmal	positive Korrelation mit	Bemerkung
	Cl ⁻ 30 - 45 mm (Minimum in Block 50 W)	Betondeckung Korrosionspotential	Korrosionspotential wie bei Block 76 O (dort max. Cl ⁻)

Tabelle 36: Korrelationen zwischen Referenzmerkmalen und ergänzenden Untersuchungen

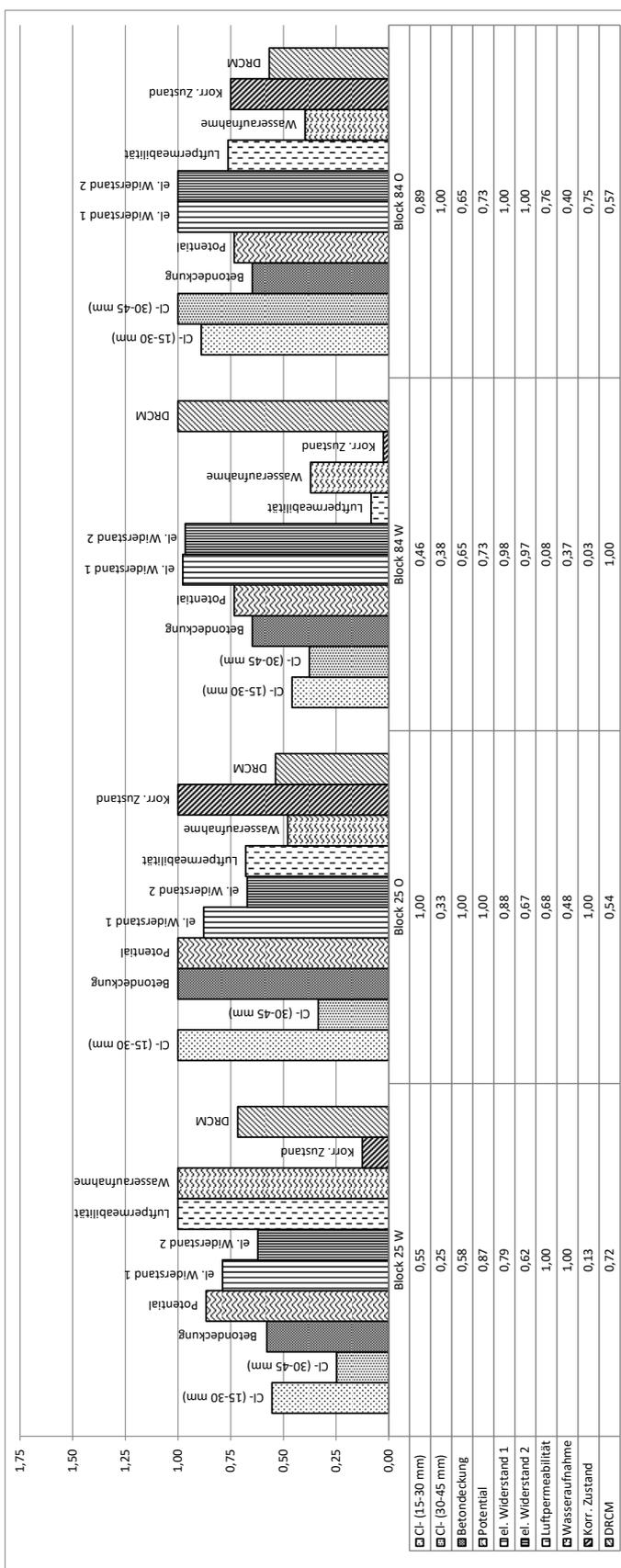


Bild 122: Vergleich Farchant

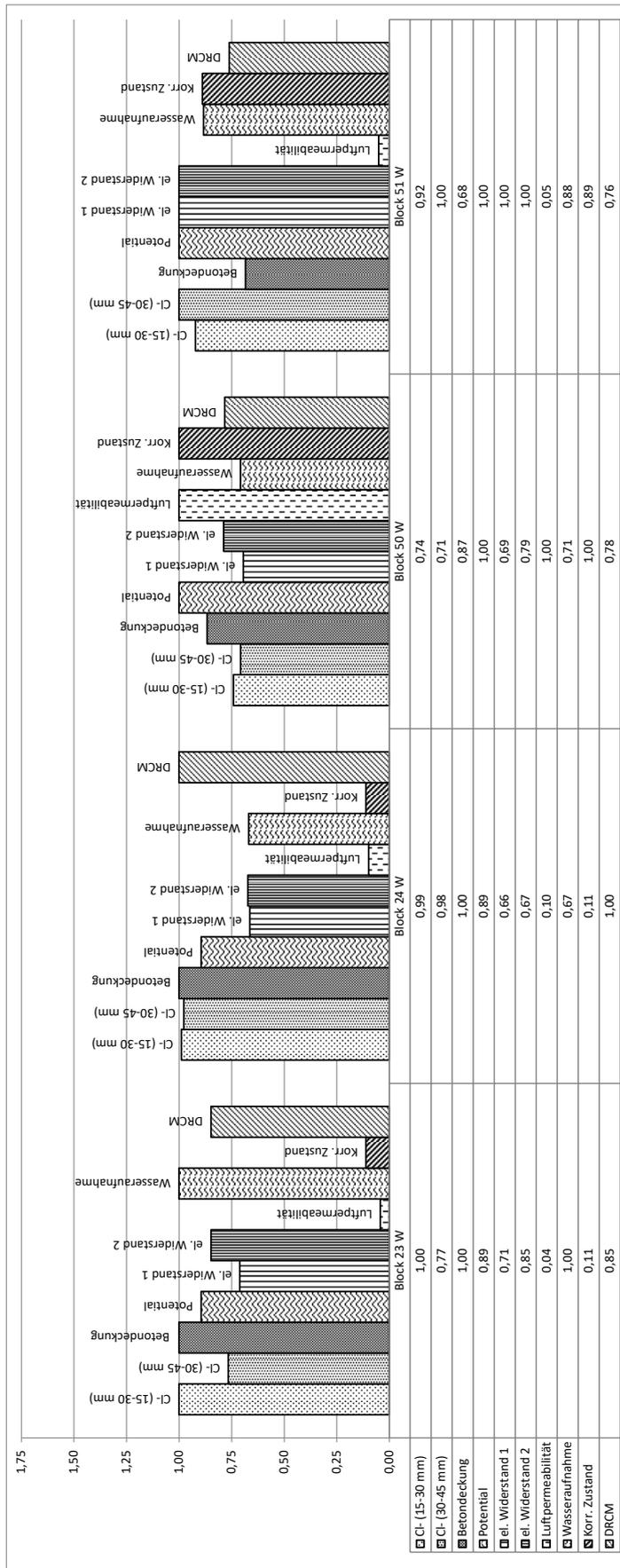


Bild 123: Vergleich Prüfung

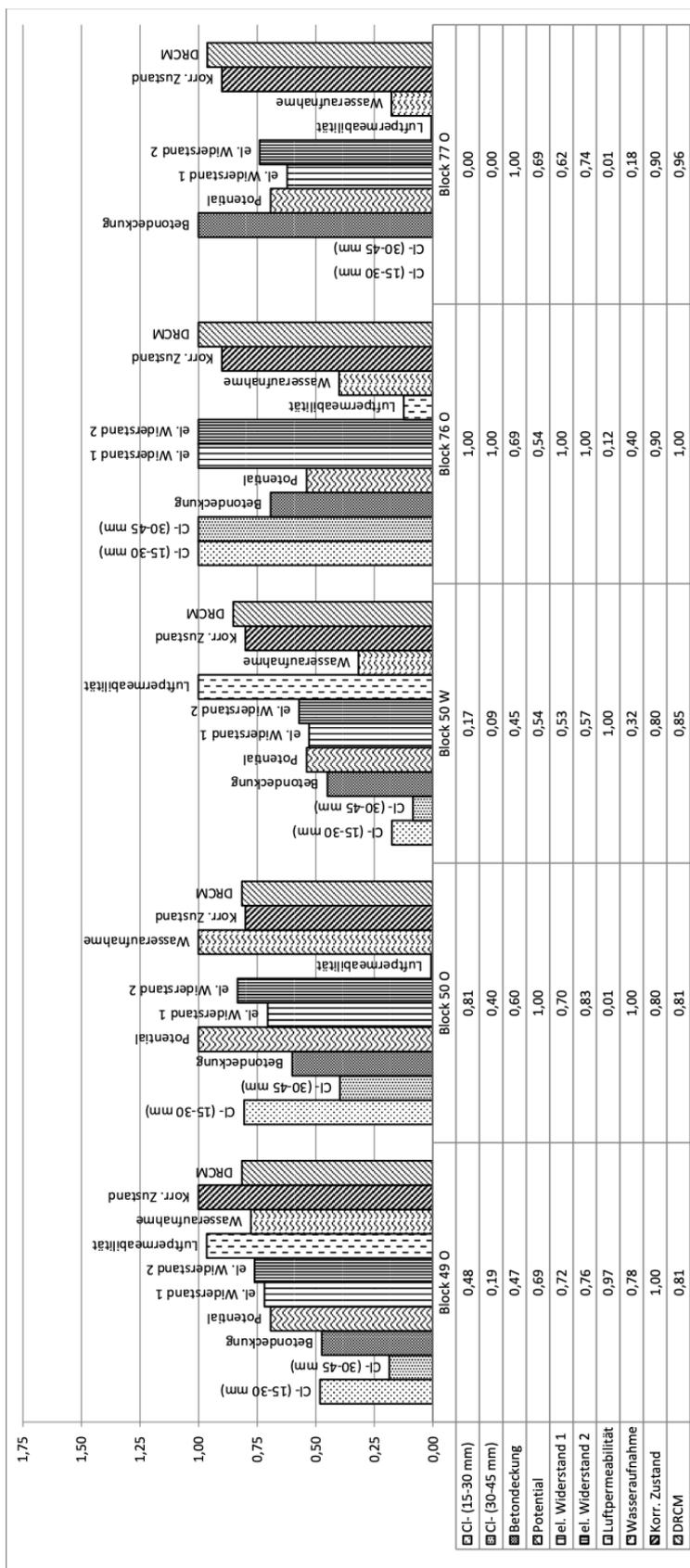


Bild 124: Vergleich Pfaffenstein

In den Diagrammen ist ein gewisser Zusammenhang zwischen dem Korrosionspotential und dem Korrosionszustand der Bewehrung erkennbar, was zu erwarten war, da es einen direkten physikalischen Zusammenhang gibt. Die Übereinstimmung ist nicht sehr ausgeprägt, vermutlich deshalb, weil in den untersuchten Bauwerken keine wesentliche Korrosion festzustellen war.

Im Bereich hoher Messwerte zeigt sich eine Übereinstimmung zwischen elektrischer Leitfähigkeit (niedriger spezifischer elektrischer Widerstand) und Chloridgehalt des Betons, was wegen der höheren elektrolytischen Leitfähigkeit salzbelasteten Betons plausibel ist. Problematisch ist, dass die Messwerte sehr stark streuen. Eine Trennung der Einflüsse auf die Messergebnisse zwischen Chloridgehalt, Wassergehalt und Gehalt an anderen Salzen ist nicht möglich. Die Trennschärfe der alternativen Messungen in Bezug auf die beabsichtigte Auswahl näher zu untersuchender Bauwerke ist gering.

Die Ergebnisse der überprüften alternativen Prüfverfahren korrelieren nicht ausreichend mit den Ergebnissen der direkten Untersuchungen, wobei zu berücksichtigen ist, dass keine wesentlichen Korrosionserscheinungen als Referenz feststellbar waren. Die Anwendung der alternativen Verfahren zur orientierenden Bewertung der Korrosionsgefahr für die Bewehrung von Tunnelinnenschalen kann auf der Grundlage der hier beschriebenen Untersuchungen nicht empfohlen werden. Stattdessen sind Verfahren anzuwenden, die eine direkte Messung der maßgebenden Parameter gestatten.

In erster Linie kommt die Aufnahme von Chloridprofilen, verbunden mit der Messung der Betondeckung in Frage. Dabei sollten für orientierende Messungen je Tunnelbauwerk zunächst wenige Blöcke untersucht werden.

Mit der Potentialfeldmessung lassen sich Bereiche mit aktiver Korrosion lokalisieren. Wenn, wie bei den hier beschriebenen Untersuchungen, keine starke Korrosion vorhanden ist, treten nur geringe Potentialunterschiede auf, was die Aussagekraft des Verfahrens reduziert, jedoch nicht aufhebt.

9.2.2 Empfehlung zur Beurteilung bestehender Tunnelbauwerke

Es ist anzustreben, einen Datenbestand zu schaffen, bei dem für alle Tunnelbauwerke mit Stahlbetoninnenschale Chloridprofile vorliegen. Bauwerke, bei denen das noch nicht gegeben ist, sollten nach folgenden Prioritäten untersucht werden:

- verwendete Zementsorte, Bauwerke mit Beton aus Portlandzement (CEM I) sollten wegen der erwarteten stärkeren Chloridmigration bevorzugt untersucht werden. Die Auswertung der Länderumfrage ergab keinen direkten Hinweis auf einen Einfluss der Zementsorte auf die Chloridbelastung. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass 85 % der betrachteten Tunnel mit CEM I hergestellt wurden und deshalb für andere Zemente keine ausreichende Datenbasis vorhanden war.
- Verkehrsbelastung
- Anzahl der Streutage im Jahr
- geografische Höhenlage des Bauwerkes
- Alter des Bauwerkes

Zusätzlich zur Chloridbestimmung sollte vorher in den zu untersuchenden Blöcken flächig die Betondeckung der Bewehrung gemessen werden. Bei Notwendigkeit ist der Chloridgehalt des Betons in einer weiteren Tiefenstufe zu untersuchen, siehe Abs. 9.1.

Sofern in der Tiefenlage der Bewehrung der Chloridgehalt annähernd den kritischen Wert von 0,5 M-% Chlorid, bezogen auf den Bindemittelgehalt des Betons erreicht, wird flächige Messung der Korrosionspotentiale in den betreffenden Blöcken empfohlen. An auffälligen Stellen, insbesondere im Bereich hoher Potentialgradienten, sollte Bewehrung freigelegt und ihr Korrosionszustand beurteilt werden.

Auf der Basis der vorhandenen Chloridprofile kann, wie im Abs. 8 beschrieben, eine Prognose für einen wählbaren Zeitraum erstellt werden. Auf ihrer Grundlage erneute Untersuchungen und ggf. Instandsetzungsmaßnahmen zu planen.

Eine Wiederholung der Chloridbestimmung ist zur Überprüfung der Prognosen zur Chloridmigration in größeren Abständen zu empfehlen. Entscheidend ist dabei die Einhaltung gleichwertiger Randbedingungen bei der Probenahme entsprechend Abs. 9.1.

Als Zeitintervall werden 12 Jahre, z.B. in Verbindung mit den Hauptprüfungen empfohlen.

9.3 Empfehlungen zur Fortschreibung der ZTV-ING

Zu empfehlen ist bei der Herstellung von Tunnelinnenschalen die Verwendung von Zementen, die zu einem hohen Eindringwiderstand des Betons gegenüber Chloriden führen. Die Eignung der Zemente bzw. Betone kann mittels der Bestimmung des Chloridmigrationswiderstandes im Rahmen der Erstprüfung von Tunnelinnenschalenbetonen erfolgen. Für die Zementart CEM II/B-S decken sich diesbezüglich die eigenen positiven Ergebnisse mit Literaturangaben, so dass eine Empfehlung zur Verwendung dieses Zementes gerechtfertigt erscheint. Zur Klärung der Fragestellung, ob auch andere Kompositzemente einen höheren Chloridmigrationswiderstand ermöglichen, als Portlandzement, werden die Auswertung weiterer Daten oder gesonderte Untersuchungen empfohlen.

Das Ergebnis könnte in Teil 3 Abschnitt 1 als Empfehlung oder Anforderung aufgenommen werden, ggf. mit Verweis auf die zusätzlichen Anforderungen an den Beton, die sich aus Kapitel 8 in Teil 5, Abschnitt 1 ergeben.

Für die Probenahme und Prüfung bei Chloriduntersuchungen sollte eine Handlungsanweisung in die ZTV-ING aufgenommen werden, die die Hinweise aus Abschnitt 9.1 enthält. Sie könnte als Anhang H zu Teil 3, Abschnitt 4 der ZTV-ING aufgenommen werden.

Grundsätzlich wirkt sich eine größere Betondeckung günstig auf den Korrosionsschutz der Bewehrung von Tunnelinnenschalen aus. Da mit einer Vergrößerung der Betondeckung eine Reihe statischer, wirtschaftlicher und brandschutztechnischer Fragen verbunden ist, die in diesem Forschungsvorhaben nicht betrachtet wurden, ist eine entsprechende Empfehlung hier nicht gerechtfertigt.

Literatur

- Abschlussbericht 14/318-067/1.3.1. Tunnel Eching und Etterschlag, A96, Gutachterliche Begleitung der Instandsetzung: (unveröffentlicht). München; 2017 Jun 23.
- Bamforth PB, Hrsg. A new approach to the analysis of time-dependent changes in chloride profiles to determine effective diffusion coefficients for use in modelling of chloride ingress: RILEM Publications SARL; 1995.
- BASt. Manuelle Straßenverkehrszählung 2015 – Ergebnisse auf Bundesautobahnen (26.01.2017); 2017.
- BASt. Manuelle Straßenverkehrszählung 2015 – Ergebnisse auf Bundesautobahnen (31.08.2017); 2017.
- BAWMerkblatt. Chlorideindringwiderstand von Beton (MCL): BAWMerkblatt; 11.2012. Verfügbar unter: http://henry.baw.de/bitstream/20.500.11970/102465/1/BAWMerkblatt_Chlorideindringwiderstand_MCL_2012_k.pdf.
- BAWMerkblatt. Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC). Karlsruhe: BAWMerkblatt; 2017.
- Bedienungsanleitung. Korrosionsanalysegerät canin +; 2012a.
- Bedienungsanleitung. Widerstandsmessgerät Resipod. Schwerzenbach, Schweiz; 2012b.
- Bericht Nr. 1690-2011-01. Bericht zur Korrosionsuntersuchung an Seitenwänden (Regelquerschnitt) des Straßentunnels Etterschlag im Zuge der BAB A96 (BW 146-1): (unveröffentlicht). Dresden; 2011 Nov 17.
- Bericht-Nr. 1800-2012-01. Bericht zur Korrosionsuntersuchung an Seitenwänden des Autobahntunnels Pfaffenstein Regensburg im Zuge der A93; (unveröffentlicht). Dresden; 2013 Jan 31.
- Bericht-Nr.: 10H0023-1. BAB A 96, BW 146-1, Tunnel Etterschlag - Entnahme und Auswertung von Chloridproben: (unveröffentlicht). Leipheim; 2010 Jun 7.
- Bericht-Nr.: 10H0023-2. BAB A 96, BW 139-1, Tunnel Eching – Entnahme und Auswertung von Chloridproben; (unveröffentlicht). Leipheim; 2010 Jun 7.
- Bericht-Nr.: 10H0033. BAB A 96, Tunnel Etterschlag und Tunnel Eching – Entnahme und Auswertung von Chloridproben, Decke: (unveröffentlicht). Leipheim; 2010 Jul 30.
- Bericht-Nr.: 17-344/1.1.1. Zusammenfassende Ergebnisdokumentation und -bewertung. Nachuntersuchung Allacher Tunnel: (unveröffentlicht). München; 2017 Dez 18.
- BMVI. Tunnel: Zahlen, Daten, Fakten; 2018. Verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/Shared-Docs/DE/Artikel/StB/tunnel-zahlen-daten-fakten.html>.
- Breitenbücher R. Service life design for the Western Scheldt Tunnel: Ottawa: NRC Research Press; 1999.
- Carlsen, J. E. & RILEM, Hrsg. Chloride penetration into concrete with lightweight aggregates; 2000.

- Colleparidi, M., Marcialis, A. & Turrziani, R. The kinetics of penetration of chloride ions into the concrete. *Il Cemento* 1970; (Vol. 67):157–64.
- Crank J. The mathematics of diffusion. 2. ed., reprinted, 1. publ. in pbk. Oxford: Oxford Univ. Press; 1979.
- DAfStb. Anleitung zur Bestimmung des Chloridgehaltes von Beton. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 1989.
- DAfStb. Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Instandsetzungs-Richtlinie). Berlin: Beuth Verlag GmbH; 2001.
- DAfStb. Abschätzung der Wahrscheinlichkeit tausalzinduzierter Bewehrungskorrosion. Baustein eines Systems zum Lebenszyklusmanagement von Stahlbetonbauwerken. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 2007.
- Dahme U. Chlorid in karbonatisierendem Beton: Speicher- und Transportmechanismen. 1. Aufl. Göttingen: Cuvillier; 2006.
- DIN 1045. Beton- und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 1972 01.1972.
- DIN 1045. Beton- und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 1978 12.1978.
- DIN 1045. Beton- und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 1988. (Deutsche NormDIN 1045) 07.1988.
- DIN 1045-1. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 1: Bemessung und Konstruktion. Juli 2001. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 2001. (Deutsche NormDIN 1045-1) 07.2001.
- DIN 1045-1. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 1: Bemessung und Konstruktion. August 2008. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 2008. (DIN 1045-1) 08.2008.
- DIN 1045-2. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Anwendungsregeln zu DIN EN 2061, einschl. Änderungen A1: 2005-01 und A2: 2007-06. 1. Aufl. Berlin: Beuth; 2001. (DIN-Fachbericht; vol 100) 07-2001.
- DIN 1045-2. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. August 2008. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 2008. (Deutsche NormDIN 1045-2) 08.2008.
- DIN EN 1992-2. Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 2: Betonbrücken - Bemessungs- und Konstruktionsregeln; Deutsche Fassung EN 1992-2:2005 + AC:2008. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 2008 12.2010.
- DIN EN 1992-2/NA. Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 2: Betonbrücken - Bemessungs- und Konstruktionsregeln. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 2013 04.2013.
- DIN EN 206-1. Beton Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität Deutsche Fassung EN 206-1:2000. Juli 2001. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 2001 07.2001.

- DIN-Fachbericht 100. Beton: Zusammenstellung von DIN EN 206-1 Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität und DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität ; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. [Stand:] März 2010. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 2010. (DIN-Fachbericht; vol 100) 03.2010.
- fib. fib Model Code for Concrete Structures 2010. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; 2013.
- Frederiksen, J. M. & Geiker, M., Hrsg. Chloride ingress prediction - part 1: analytical model for time dependent diffusion coefficient and surface concentration; 2008.
- Frederiksen, J. M. & Poulsen, E. Chloride penetration into concrete manual. Copenhagen: Ministry of Transportation, Road Directorate.; 1997. HETEK 123.
- Frederiksen, J. M., Mejlbro, L. & Nilsson, L.-O. Fick's 2nd law - Complete solutions for chloride ingress into concrete – with focus on time dependent diffusivity and boundary condition [Report TVBM Nr. 3146]. Lund: LTH, Lund University; 2009.
- Frederiksen, J. M., Mejlbro, L. & Poulsen, E., Hrsg. The HETEK model of chloride ingress into concrete made simpler by approximations; 2000.
- Friedl L. Experimentelle Untersuchungen zum Transport von Wasser und Chlorid in rezykliertem Beton und zu der daraus ableitbaren Gefahr der chloridinduzierten Stahlkorrosion [Dissertation]: Technische Universität München; 2003.
- Gehlen C. Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken: Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. Berlin: Beuth; 2000.
- Gutachten 13/009/1.1.1. Gutachterliche Stellungnahme. BAB A96, Tunnel Eching + Tunnel Eterschlag – Plausibilitätsprüfung: (unveröffentlicht). München; 2013 Feb 28.
- Gutachten 13/066-067/2.1.2. Gutachterliche Stellungnahme. Tunnelbauwerke Eching und Eterschlag auf der BAB A96. Zusammenfassende Bewertung und Empfehlungen für das weitere Vorgehen. (unveröffentlicht). München; 2014 Aug 5.
- Gutachten 13/067/1.1.1. Ergebnisdokumentation und -bewertung. Weiterführende Bauwerksuntersuchungen Tunnel Eterschlag, BAB A96: (unveröffentlicht). München; 2014 Aug 5.
- Gutachten 14/318/1.1.1. Gutachterliche Stellungnahme. Gutachterliche Beratung Tiefenhydrophobierung Tunnelbauwerke Eching/Eterschlag, A96: (unveröffentlicht). München; 2016 Mrz 9.
- Harnisch J, Raupach M. Untersuchungen zum kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt unter Berücksichtigung der Kontaktzone zwischen Stahl und Beton. Beton- und Stahlbetonbau 2011; 106(5):299–307. doi: 10.1002/best.201100008.
- IBwNr A 96BW146-1. Bauwerksbuch des Teilbauwerks Nummer 7933656: Straße IBwNr Straße A 96; 2018 Jun 4.
- International Federation for Structural Concrete. Model code for service life design. Lausanne: International Federation for Structural Concrete; 2006. Bulletin / International Federation for Structural Concrete Model code.

- Jacobs F. Beurteilung der Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen. beton 05.1999.
- Kapteina G. Modell zur Beschreibung des Eindringens von Chlorid in Beton von Verkehrsbauwerken [Dissertation]. München: Technische Universität München; 2011.
- Kapteina G. Modell zur Beschreibung des Eindringens von Chlorid in Beton von Verkehrsbauten. 1. Aufl. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 2013.
- Kapteina G, Hrsg. Eindringen von Chlorid in Straßenbauwerke: Erhaltung von Bauwerken. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen; 2017.
- Kirkpatrick TJ, Weyers RE, Anderson-Cook CM, Sprinkel MM. Probabilistic model for the chloride-induced corrosion service life of bridge decks. Cement and Concrete Research 2002; 32(12):1943–60. doi: 10.1016/S0008-8846(02)00905-5.
- Länderabfrage. Länderabfrage zur Chloridbelastung in Straßentunneln: Tunnel Etterschlag; 2014a Jan 31.
- Länderabfrage. Länderabfrage zur Chloridbelastung in Straßentunneln: Tunnel Prüfening; 2014b Jan 31.
- Lay S. Abschätzung der Wahrscheinlichkeit tausalzinduzierter Bewehrungskorrosion. Baustein eines Systems zum Lebenszyklusmanagement von Stahlbetonbauwerken. München: Technische Universität München; 2006. Dissertation.
- Lay S, Liebl S, Hilbig H, Schießl P. New method to measure the rapid chloride migration coefficient of chloride-contaminated concrete. Cement and Concrete Research 03.2004; (34):421–7.
- Lay S, Schießl P. Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonkonstruktionen: TUM, Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung; 2003.
- Maage, M., Helland, H., Poulsen, E., Vennesland, O. & Carlsen, J. E. Service Life Prediction of Existing Concrete Structures Exposed to Marine Environment. ACI Materials Journal 1996.
- Martin-Perez B. Service life modelling of R.C. highway structures exposed to chlorides: National Library of Canada = Bibliothèque nationale du Canada; 1999. Verfügbar unter: <https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/13268/1/NQ41230.pdf>.
- Merkblatt B 03. Merkblatt für Elektrochemische Potentialmessungen zur Detektion von Bewehrungsstahlkorrosion. Berlin; 2014.
- Ministry of Transport. D.A.R.T.S: Durable and Reliable Tunnel Structures – DARTS WP6 'Benchmarking of the 2nd Benelux tunnel (immersed tunnel): an integrated evaluation of durability, environmental and hazards aspects on component and system level. Utrecht; 03.2004 6.
- Ministry of Transportation, Road Directorate. Chloride penetration into concrete state-of-the-art: Transport processes, corrosion initiation, test methods and prediction models. Copenhagen: Ministry of Transportation, Road Directorate; 1996. HETEK 53.
- Nguyen PT, Bastidas-Arteaga E, Amiri O, El Soueidy C-P. An Efficient Chloride Ingress Model for Long-Term Lifetime Assessment of Reinforced Concrete Structures Under Realistic

Climate and Exposure Conditions. *Int J Concr Struct Mater* 2017; 11(2):199–213. doi: 10.1007/s40069-017-0185-8.

Nielsen EP, Geiker MR. Chloride diffusion in partially saturated cementitious material. *Cement and Concrete Research* 2003:133–8.

Nilsson L-O, Ollivier J-P. Chloride penetration into concrete: Proceedings of the RILEM international workshop ... St-Rémy-lès-Chevreuse, France, October 15-18, 1995. [Cachan France]: RILEM Publications; 1997.

Nilsson, L.-O., Poulsen, E., Sandberg, P. Sørensen, H. E. & Klinghoffer, O. Chloride penetration into concrete state-of-the-art. Transport processes, corrosion initiation, test methods and prediction models. Copenhagen; 1996.

Poulsen E, Hrsg. NIST_Modelling service life and life-cycle Cost of steel-reinforced concrete.; 1998.

Poulsen E, Mejlbro L. Diffusion of chloride in concrete: Theory and application. London, New York: Taylor & Francis; 2006.

Projekt G1222. Untersuchungsbericht NE-23132018 (unveröffentlicht): BV: Tunnel Pfaffenstein, Teil 2 - Materialprüfungen und Untersuchungen an Bohrkernen aus Stahlbetonbauteilen. München: Materialprüfungsanstalt für das Bauwesen; 2013 Mrz 19.

Projekt-Nr. P10009. Gutachten B2 neu Eschenlohe – Garmisch-Partenkirchen; K12/1 Tunnel Farchant: (unveröffentlicht). München; 2010 Apr 14.

Prüfbericht Nr. 5624669. Bestimmung des Chloridgehaltes an Bohrmehlproben (unveröffentlicht). Nürnberg; 2012 Nov 5.

Rahimi A. Semiprobabilistisches Nachweiskonzept zur Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkung. München; 2016.

Rahimi A. Vereinfachtes Nachweiskonzept zur leistungsbezogenen Bemessung von Stahlbetonbauten hinsichtlich chloridinduzierter Betonstahlkorrosion. Kompetenz für die Wasserstraßen — Heute und in Zukunft. Forschungs- und Entwicklungsprojekte der BAW 2017; (100):7–23.

RI-EBW-PRÜF. Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076: RI-EBW-PRÜF. Ausgabe 2017. Köln: FGSV-Verl.; 2017. (FGSV) 02.2017.

Sagüés AA, Scanell W, Soh FW, Hrsg. Development of a deterioration model to project future concrete reinforcement corrosion in a dual marine bridge. [Washington, D.C.]: U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration; 1998.

Samson E. STADIUMmodel. Technical basis: Cementitious Barriers Partnership. SIMCO Technologies Inc.; 2014.

Scheydt JC. Mechanismen der Korrosion bei ultrahochfestem Beton; Dissertation. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT); 2013.

Stipanovic Oslakovic I, Bjegovic D, Mikulic D. Evaluation of service life design models on concrete structures exposed to marine environment. *Mater Struct* 2010; 43(10):1397–412. doi: 10.1617/s11527-010-9590-z.

SVZ-BW. Verkehrszählung; 2018.

Tang L, Lindvall A. Validation of models for prediction of chloride ingress in concrete exposed in deicing salt road environment. IJSTRUCTE 2013; 4(1/2):86. doi: 10.1504/IJSTRUCTE.2013.050766.

Tang, L. & Nilsson, L.-O., Hrsg. Current development and verification of the numerical model ClinConc for predicting chloride penetration into concrete; 2000. (RILEM proceedings PRO; vol 19).

Tang, L. & Nilsson, L.-O., Hrsg. Prediction Of Chloride Penetration Into Concrete Exposed To Various Exposure Environments; 2002.

Thomas M, Bentz E. Modelling Chloride Ingress by the Combined Processes of Diffusion and Convection. [Place of publication not identified]: [publisher not identified]; 1999.

Tuutti K. Corrosion of steel in concrete. Stockholm; 1982.

Ungricht H. Wasserhaushalt und Chlorideintrag in Beton - Einfluss der Exposition und der Betonzusammensetzung; 09.2004.

Unzner C. Vortrag im Rahmen der regionalen Verkehrstagung Oberpfalz. Amberg; 2015.

Weyers RE. Service Life Model for Concrete Structures in Chloride Laden Environments. MJ 1998; 95(4). doi: 10.14359/387.

ZTV-ING. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten: ZTV-ING. Ausgabe 2003. Köln: FGSV-Verl.; 2003. (FGSV782/7) 2003.

ZTV-ING. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Ausgabe 2019. Köln: FGSV-Verl.; 2019. (FGSV) 2019.

ZTV-K. Zusätzliche technische Vertragsbedingungen für Kunstbauten. Ausg. 1996. Köln: FGSV Verl.; 1996. (FGSV; vol 010) 1996.

ZTV-K 76. Zusätzliche Technische Vorschriften für Kunstbauten. Dortmund: Verkehrsblatt-Verl.; 1979 1979.

ZTV-K 80. Zusätzliche technische Vorschriften für Kunstbauten. 4., unveränd. Aufl., Ausg. 1980. Dortmund: Verkehrsblatt-Verl.; 1980 1980.

ZTV-K 88. Zusätzliche technische Vertragsbedingungen für Kunstbauten: ZTV-K 88. Ausg. 1989. Dortmund: Verkehrsbl.-Verl.; 1989. (Verkehrsblatt-Dokument B; vol 5218) 1989.

ZTV-Tunnel. ZTV-Tunnel: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Straßentunneln. Dortmund: Verkehrsblatt-Verl.; 1995. (Verkehrsblatt : Dokument B; vol 5330) 1995.

ZTV-Tunnel. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Straßentunneln. Ausg. 1999. Dortmund: Verkehrsblatt-Verl.; 1999. (Verkehrsblatt-DokumentB 5334) 1999.

Tabellen

Tabelle 1: Chloridmigration Vergleich wesentlicher Modelle.....	38
Tabelle 2: Rückmeldungen zur Länderabfrage (Sachsen)	48
Tabelle 3: Rückmeldungen zur Länderabfrage (Baden-Württemberg)	48
Tabelle 4: Rückmeldungen zur Länderabfrage (Bayern).....	48
Tabelle 5: Rückmeldungen zur Länderabfrage (Niedersachsen).....	49
Tabelle 6: Rückmeldungen zur Länderabfrage (Thüringen)	49
Tabelle 7: Rückmeldungen zur Länderabfrage (Saarland).....	49
Tabelle 8: Rückmeldungen zur Länderabfrage (NRW).....	49
Tabelle 9: Rückmeldungen zur Länderabfrage (Hessen)	49
Tabelle 10: Rückmeldungen zur Länderabfrage (Rheinland-Pfalz)	50
Tabelle 11: Tunnel mit Chloridbelastung.....	52
Tabelle 12: Chloridgehalt im Zusammenhang mit Straßentyp und Tunnelquerschnitt	61
Tabelle 13: Übersicht Tunnel Bayern	61
Tabelle 14: Übersicht Tunnel Bayern	88
Tabelle 15: BY1 – Pfaffenstein, Chloridgehalt.....	89
Tabelle 16: BY2 – Prüfening, Chloridgehalt	89
Tabelle 17: BY3 – Farchant, Chloridgehalt.....	89
Tabelle 18: BY4 – Eching, Chloridgehalt.....	89
Tabelle 19: BY5 – Eттerschlag, Chloridgehalt.....	90
Tabelle 20: BY6 – Allach, Chloridgehalt.....	90
Tabelle 21: Übersicht Tunnel Bayern – Streumittel und Streumittleinsatz	92
Tabelle 22: Übersicht Tunnel Bayern – Zement und Oberflächenbehandlung.....	94
Tabelle 23: Messgenauigkeit bei bekanntem Stabdurchmesser (Angabe Fa. Hilti)	98
Tabelle 24: Korrosionswahrscheinlichkeiten und spezifischer Widerstand	101
Tabelle 25: Korrosionsgeschwindigkeit und spezifischer Widerstand	101
Tabelle 26: Chloridmigrationskoeffizienten des Betons der Laborprobekörper.....	105
Tabelle 27: Wasseraufnahmekoeffizienten	105
Tabelle 28: Luftpermeabilität.....	106
Tabelle 29: spezifischer elektrischer Widerstand	107
Tabelle 30: ausgewählte Eigenschaften der untersuchten Tunnel und Blöcke	108
Tabelle 31: Betondeckungsmessung Tunnel Farchant.....	110
Tabelle 32: Betondeckungsmessung Tunnel Prüfening	112

Tabelle 33: Betondeckungsmessung Tunnel Pfaffenstein	114
Tabelle 34: Altersexponent α_{RCM} in Abhängigkeit der Zementart für Expositionsklassen XD2, XD3, XS2 und XS3	119
Tabelle 35: Normierung der Messwerte zur Schaffung einer Vergleichsmöglichkeit zwischen unterschiedlichen Klassen von Messwerten.....	130
Tabelle 36: Korrelationen zwischen Referenzmerkmalen und ergänzenden Untersuchungen.....	132

Bilder

Bild 1: Prinzipskizze des Migrationsapparates zur Bestimmung des Chloridmigrationskoeffizienten, Ausschnitt aus (BAWMERKBLATT 11.2012).....	20
Bild 2: Funktionaler Zusammenhang den Materialkennwerten $D_{RCM,0}$ und $p_{WER,0}$ in doppel-logarithmischer Darstellung (GEHLEN 2000)	22
Bild 3: Typisches Chloridprofil im Spritzwasserbereich eines Brückenbauwerks, inkl. Abweichung vom 2. <i>Fick'schen</i> Diffusionsgesetz (GEHLEN 2000)	23
Bild 4: Chloridkonzentration in Abhängigkeit der Bauteilhöhe und Tiefe (GEHLEN 2000).....	24
Bild 5: Vergleich der temperaturkompensierten spezifischen Widerstände (UNGRICHT 09.2004)	25
Bild 6: Vergleich des freien Chloridgehaltes im Porenwasser in Abhängigkeit von der Zeit (UNGRICHT 09.2004).....	26
Bild 7: Anzahl korrodierender, elektrisch isolierter Stäbe in Abhängigkeit von der Betonqualität und der Zeit (UNGRICHT 09.2004)	26
Bild 8: Umverteilung des Chloridgehaltes aus drei Großereignissen innerhalb von 9 Monaten (UNGRICHT 09.2004).....	27
Bild 9: Extrapolation für einen guten und einen durchschnittlichen Beton für 5 und 20 Jahre, Ausschnitt aus (UNGRICHT 09.2004)	28
Bild 10: Einfluss des Zementgehaltes bzw. des Zementsteinvolumens auf den Chloridmigrations-koeffizienten D_{RCM} , Ausschnitt aus (LAY 2006)	29
Bild 11: Abhängigkeit von D_{RCM} vom w/b-Verhältnis für unterschiedliche Bindemittelarten im Alter von 28 Tagen, Ausschnitt aus (LAY 2006).....	30
Bild 12: Chloridprofile von Mörtelproben, die mit unterschiedlichen Chloridgehalten (0,5, 1,0 und 1,5 %) im Anmachwasser vorbelastet wurden und an welchen anschließend ein RCM-Versuch mit einer Konzentration der Prüflösung von 3,0 M.-% NaCl durchgeführt wurde. Der Migrationskoeffizient D_{RCM} wurde durch Anpassung von Gleichung (4-13) an die Chloridprofile berechnet, Ausschnitt aus (DAFSTB 2007)	31
Bild 13: Chloridprofile von im RCM-Test mit unterschiedlichen Chloridgehalten (0,5; 1,0 und 1,5 %) vorbelasteten Proben nach Durchführung eines weiteren RCM-Versuchs bei	

	einer Standardkonzentration von 3,0 M.-% NaCl, sowie die Anpassung von Gleichung (4-13) und der sich danach ergebende Migrationskoeffizient D_{RCM} (DAFSTB 2007).....	32
Bild 14:	Quantifizierung der streuenden Konvektions-geschwindigkeit $v(t,r)$ [mm/a], als Funktion des Alters [a] und der Entfernung r [cm] zur Straße	33
Bild 15:	Dispersivität $\Delta l(w/b)$ von Beton berechnet aus Chloridprofilen nach 1,5-jähriger Auslagerung durch (NILSSON und OLLIVIER 1997); Unabhängig von der Bindemittelart für Betone mit Größtkorn 16 mm (DAFSTB 2007),.....	34
Bild 16:	Schadensverlauf infolge Bewehrungskorrosion (GEHLEN 2000)	37
Bild 17:	Schematische Darstellung eines Brückenpfeilers zur Darstellung der Definition der verschiedenen Expositionen in mariner Umgebung (submerged, splash, atmospheric) (FREDERIKSEN, J. M., MEJLBRO, L. & NILSSON, L.-O. 2009)	40
Bild 18:	Vergleich zwischen mit Life-365 berechneten Chloridprofilen und Versuchsdaten (STIPANOVIC OSLAKOVIC et al. 2010)	41
Bild 19:	Rückmeldungen zur Länderabfrage – Lage der Tunnel (Quelle: uMap / OSM).....	46
Bild 20:	Rückmeldungen Bauwerke nach Bundesländern	47
Bild 21:	Altersstruktur der gemeldeten Bauwerke (Alter im Jahr 2018).....	51
Bild 22:	Chloridbelastete Straßentunnel nach Straßentyp	51
Bild 23:	Verkehrsmenge (2015) in unmittelbarer Nähe zum Bauwerk (BAST 26.01.2017), (SVZ-BW 14.06.2018).....	53
Bild 24:	Chloridbelastete Straßentunnel nach Bauart	53
Bild 25:	Übersicht Tunnellänge und mittlere Höhe über NN.....	54
Bild 26:	Übersicht Tage mit Streumittleinsatz	54
Bild 27:	Verwendete Zementsorten in mit Chlorid belasteten Tunneln.....	55
Bild 28:	Schema zur Kennwertermittlung.....	56
Bild 29:	Chloridbelastung (Max,I) in Straßentunneln, aufsteigend nach den Werten der Tiefenstufe (0-20 mm) geordnet	56
Bild 30:	Chloridbelastung (Max,II) in Straßentunneln, aufsteigend nach den Werten der Tiefenstufe (0-20 mm) geordnet	57
Bild 31:	Chloridbelastung (Max,I) in Straßentunneln vs. Verkehrsaufkommen.....	57
Bild 32:	Chloridbelastung (Max,I) in Straßentunneln vs. mittlere Bauwerkslänge	58
Bild 33:	Chloridbelastung (Max,I) in Straßentunneln vs. mittlere Höhe	58
Bild 34:	Chloridbelastung (Max,I) in Straßentunneln vs. Bauwerksalter.....	59
Bild 35:	Chloridbelastung (Max,II) in Straßentunneln vs. Bauweise	59
Bild 36:	Chloridbelastung (Max,I) in Straßentunneln vs. Tage mit Streumittleinsatz	60
Bild 37:	Chloridbelastung (Max,I) in Straßentunneln vs. Zement	60
Bild 38:	Lage der Tunnel in Bayern (Quelle: uMap / OSM).....	62

Bild 39:	Lageplan Tunnel Pfaffenstein	63
Bild 40:	Tunnel Pfaffenstein – Gradiente (vereinfachte Darstellung)	63
Bild 41:	Tunnel Pfaffenstein – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Holledau, FS, Entnahmehöhe 0,3 m.....	64
Bild 42:	Tunnel Pfaffenstein – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Holledau, ÜS, Entnahmehöhe 0,3 m.....	64
Bild 43:	Tunnel Pfaffenstein – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Holledau, FS, Entnahmehöhe 1,3 m.....	65
Bild 44:	Tunnel Pfaffenstein – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Holledau, ÜS, Entnahmehöhe 1,3 m.....	65
Bild 45:	Tunnel Pfaffenstein – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Weiden, FS, Entnahmehöhe 0,3 m.....	65
Bild 46:	Tunnel Pfaffenstein – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Weiden, ÜS, Entnahmehöhe 0,3 m.....	66
Bild 47:	Tunnel Pfaffenstein – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Weiden, FS, Entnahmehöhe 1,3 m.....	66
Bild 48:	Tunnel Pfaffenstein – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Weiden, ÜS, Entnahmehöhe 1,3 m.....	66
Bild 49:	Tunnel Pfaffenstein – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Holledau, FS, Entnahmehöhe 1,3 m, Vgl. Messergebnisse (BERICHT-NR. 1800-2012-01 31. Januar 2013) und (PROJEKT G1222 19. März 2013).....	67
Bild 50:	Lageplan Tunnel Prüfening	68
Bild 51:	Tunnel Prüfening – Gradiente (vereinfachte Darstellung).....	69
Bild 52:	Tunnel Prüfening – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Weiden, FS, Höhe 0,6 m	69
Bild 53:	Tunnel Prüfening – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Weiden, FS, Höhe 1,2 m	69
Bild 54:	Tunnel Prüfening – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Weiden, FS, Höhe 1,8 m	70
Bild 55:	Lageplan Tunnel Farchant	70
Bild 56:	Tunnel Farchant – Gradiente (vereinfachte Darstellung).....	71
Bild 57:	Tunnel Farchant – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, FS, Höhe 0,25 m	71
Bild 58:	Tunnel Farchant – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, ÜS, Höhe 0,25 m	72
Bild 59:	Tunnel Farchant – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, FS, Höhe 1,50 m	72

Bild 60:	Tunnel Farchant – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, ÜS, Höhe 1,50 m.....	72
Bild 61:	Tunnel Farchant – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, FS, Höhe 2,50 m.....	72
Bild 62:	Tunnel Farchant – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, ÜS, Höhe 2,50 m.....	73
Bild 63:	Tunnel Farchant – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Garmisch, FS, Höhe 0,25 m.....	73
Bild 64:	Tunnel Farchant – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Garmisch, ÜS, Höhe 0,25 m.....	73
Bild 65:	Tunnel Farchant – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Garmisch, FS, Höhe 1,50 m.....	74
Bild 66:	Tunnel Farchant – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Garmisch, ÜS, Höhe 1,50 m.....	74
Bild 67:	Tunnel Farchant – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Garmisch, FS, Höhe 2,50 m.....	74
Bild 68:	Tunnel Farchant – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Garmisch, ÜS, Höhe 2,50 m.....	75
Bild 69:	Lageplan Tunnel Eching.....	75
Bild 70:	Tunnel Eching – Gradiente (vereinfachte Darstellung).....	76
Bild 71:	Tunnel Eching – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Lindau, FS, Höhe 0,75 m (gestrichelt: Tunnelbauwerk)	76
Bild 72:	Tunnel Eching – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Lindau, ÜS, Höhe 0,75 m.....	77
Bild 73:	Tunnel Eching – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Lindau, FS, Höhe 1,50 m (gestrichelt: Tunnelbauwerk)	77
Bild 74:	Tunnel Eching – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Lindau, ÜS, Höhe 1,50 m.....	77
Bild 75:	Tunnel Eching – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Lindau, FS, Höhe 2,25 m (gestrichelt: Tunnelbauwerk)	78
Bild 76:	Tunnel Eching – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Lindau, ÜS, Höhe 2,25 m.....	78
Bild 77:	Tunnel Eching – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, FS, Höhe 0,75 m.....	78
Bild 78:	Tunnel Eching – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, ÜS, Höhe 0,75 m.....	79
Bild 79:	Tunnel Eching – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, FS, Höhe 1,50 m.....	79

Bild 80:	Tunnel Eching – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, ÜS, Höhe 1,50 m	79
Bild 81:	Tunnel Eching – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, FS, Höhe 2,25 m	80
Bild 82:	Tunnel Eching – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, ÜS, Höhe 2,25 m	80
Bild 83:	Lageplan Tunnel Etterschlag	81
Bild 84:	Tunnel Etterschlag – Gradiente (vereinfachte Darstellung)	81
Bild 85:	Tunnel Etterschlag – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Lindau, FS, Höhe 0,75 m	82
Bild 86:	Tunnel Etterschlag – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Lindau, ÜS, Höhe 0,75 m	82
Bild 87:	Tunnel Etterschlag – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Lindau, FS, Höhe 1,50 m	83
Bild 88:	Tunnel Etterschlag – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Lindau, ÜS, Höhe 1,50 m	83
Bild 89:	Tunnel Etterschlag – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Lindau, FS, Höhe 2,25 m	83
Bild 90:	Tunnel Etterschlag – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Lindau, ÜS, Höhe 2,25 m	84
Bild 91:	Tunnel Etterschlag – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, FS, Höhe 0,75 m	84
Bild 92:	Tunnel Etterschlag – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, ÜS, Höhe 0,75 m	84
Bild 93:	Tunnel Etterschlag – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, FS, Höhe 1,50 m	85
Bild 94:	Tunnel Etterschlag – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, ÜS, Höhe 1,50 m	85
Bild 95:	Tunnel Etterschlag – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, FS, Höhe 2,25 m	85
Bild 96:	Tunnel Etterschlag – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR München, ÜS, Höhe 2,25 m	86
Bild 97:	Lageplan Tunnel Allach	86
Bild 98:	Tunnel Allach – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Stuttgart, FS, Höhe 0,20 m	87
Bild 99:	Tunnel Allach – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Stuttgart, ÜS, Höhe 0,20 m	87
Bild 100:	Tunnel Allach – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Stuttgart, FS, Höhe 1,50 m	87

Bild 101:	Tunnel Allach – Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen, FR Stuttgart, ÜS, Höhe 1,50 m.....	88
Bild 102:	Verkehrsmenge (2015) in unmittelbarer Nähe zum Bauwerk (BAST 26.01.2017), (BAST 31.08.2017), (SVZ-BW 14.06.2018).....	88
Bild 103:	Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen (Maximalwert aus Mittelwerten je Fahrspur und -richtung; unabhängig von Höhe und Abstand zum Portal)	90
Bild 104:	Chloridgehalt in verschiedenen Tiefen (größter nachgewiesener Einzelwert).....	91
Bild 105:	Chloridgehalt in bayrischen Tunneln (BY1-BY6) in verschiedenen Tiefen in Abhängigkeit des Bauwerksalters; links: Max,I; rechts: Max,II	92
Bild 106:	Querschnitt Tunnel Prüfening (UNZNER 11.10.2015)	93
Bild 107:	Prinzip der Potentialfeldmessung, aus (MERKBLATT B 03 2014).....	99
Bild 108:	Beispiele für Potentiale bei unterschiedlichen Korrosionsarten, aus (MERKBLATT B 03 2014).....	100
Bild 109:	Schalungen für zwei Probekörper.....	103
Bild 110:	Probekörper für Laboruntersuchungen;.....	104
Bild 111:	Messergebnisse der Luftpermeabilität.....	106
Bild 112:	Chloridprofile der Messungen 2012 und 2018, Entnahmhöhe 60 cm bzw. 25 cm sowie Prognose 2012 → 2018 und 2012 → 2030 (Tunnel Prüfening)	121
Bild 113:	Chloridprofile der Messungen 2012 und 2018, Entnahmhöhe 120 cm bzw. 150 cm sowie Prognose 2012 → 2018 und 2012 → 2030 (Tunnel Prüfening)	122
Bild 114:	Chloridprofile der Messungen 2012 und 2018, Entnahmhöhe 25 cm sowie Prognose 2012 → 2018 und 2012 → 2030 (Tunnel Pfaffenstein).....	123
Bild 115:	Chloridprofile der Messungen 2012 und 2018, Entnahmhöhe 25 cm sowie Prognose 2012 → 2018 und 2012 → 2030 (Tunnel Pfaffenstein).....	123
Bild 116:	Chloridprofile der Messungen 2010 und 2018, Entnahmhöhe 25 cm sowie Prognose 2010 → 2018 und 2010 → 2030 (Tunnel Farchant, westliche Wand).....	125
Bild 117:	Chloridprofile der Messungen 2010 und 2018, Entnahmhöhe 25 cm sowie Prognose 2010 → 2018 und 2010 → 2030 (Tunnel Farchant, östliche Wand)....	125
Bild 118:	Chloridprofile der Messungen 2010 und 2018, Entnahmhöhe 1,50 m sowie Prognose 2010 → 2018 und 2010 → 2030 (Tunnel Farchant, westliche Wand).....	126
Bild 119:	Chloridprofile der Messungen 2010 und 2018, Entnahmhöhe 1,50 m sowie Prognose 2010 → 2018 und 2010 → 2030 (Tunnel Farchant, östliche Wand)....	126
Bild 120:	Chloridprofile der Messungen 2010 und 2018, Entnahmhöhe 2,50 m sowie Prognose 2010 → 2018 und 2010 → 2030 (Tunnel Farchant, westliche Wand).....	127

Bild 121:	Chloridprofile der Messungen 2010 und 2018, Entnahmehöhe 1,50 m sowie Prognose 2010 → 2018 und 2010 → 2030 (Tunnel Farchant, östliche Wand)....	127
Bild 122:	Vergleich Farchant.....	133
Bild 123:	Vergleich Prüfening	134
Bild 124:	Vergleich Pfaffenstein	135

Anlagen

Anlage 1	Zeitliche Entwicklung der Anforderungen an Beton und Betondeckung
Anlage 2	Betonzusammensetzung Laborversuche
Anlage 3	Chloridmigrationskoeffizient nach BAW-Merkblatt
Anlage 4	Fotodokumentation Tunnel Farchant
Anlage 5	Chloridgehalt des Betons – Tunnel Farchant
Anlage 6	Betondeckungsmessung – Tunnel Farchant
Anlage 7	Potentialfeldmessung – Tunnel Farchant
Anlage 8	Leitfähigkeitsmessung Beton – Tunnel Farchant
Anlage 9	Permeabilitätsmessung – Tunnel Farchant
Anlage 10	kapillare Wasseraufnahme – Tunnel Farchant
Anlage 11	Korrosionszustand der Bewehrung – Tunnel Farchant
Anlage 12	Fotodokumentation Tunnel Prüfening
Anlage 13	Chloridgehalt des Betons – Tunnel Prüfening
Anlage 14	Betondeckungsmessung – Tunnel Prüfening
Anlage 15	Potentialfeldmessung – Tunnel Prüfening
Anlage 16	Leitfähigkeitsmessung Beton – Tunnel Prüfening
Anlage 17	Permeabilitätsmessung – Tunnel Prüfening
Anlage 18	kapillare Wasseraufnahme – Tunnel Prüfening
Anlage 19	Korrosionszustand der Bewehrung – Tunnel Prüfening
Anlage 20	Fotodokumentation Tunnel Pfaffenstein
Anlage 21	Chloridgehalt des Betons – Tunnel Pfaffenstein
Anlage 22	Betondeckungsmessung – Tunnel Pfaffenstein
Anlage 23	Potentialfeldmessung – Tunnel Pfaffenstein
Anlage 24	Leitfähigkeitsmessung Beton – Tunnel Pfaffenstein
Anlage 25	Permeabilitätsmessung – Tunnel Pfaffenstein
Anlage 26	kapillare Wasseraufnahme – Tunnel Pfaffenstein
Anlage 27	Korrosionszustand der Bewehrung – Tunnel Pfaffenstein

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2017

B 135: Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln

Kohl, Kammerer, Leucker, Leismann, Mühlberger, Gast
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 136: HANV als Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-1-Schäden

Stranghöner, Lorenz, Raake, Straube †, Knauff
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 137: Verstärkung von Stahlbrücken mit hochfestem Beton

Mansperger, Lehmann, Hofmann, Krüger, Lehmann € 14,50

B 138: Rückhaltesysteme auf Brücken – Einwirkungen aus Fahrzeuganprall und Einsatz von Schutzeinrichtungen auf Bauwerken

Mayer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 139: Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie

Sperber, Gößmann, Reget, Müller, Nolden, Köhler, Kremkau € 16,50

B 140: Untersuchungen zum Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5

U. Kuhlmann, Chr. Schmidt-Rasche, J. Frickel, V. Pourostad
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 141: Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln

Moormann, Buhmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 142: Einsatz von offenporigen Belägen in Einhausungs- und Tunnelbauwerken

Baltzer, Riepe, Zimmermann, Meyer, Brungsberg, Mayer, Brenberger, Jung, Oeser, Meyer, Koch, Wienecke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2018

B 143: Analyse des menschlichen Verhaltens bei Aktivierung von stationären Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln

Mühlberger, Gast, Plab, Probst € 15,50

B 144: Nachrechnung von Stahl- und Verbundbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke

Neumann, Brauer € 16,50

B 145: 8. BAST-Tunnelsymposium vom 6. Juni 2018 in der Bundesanstalt für Straßenwesen Bergisch Gladbach – Tagungsband

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2019

B 147: Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen

Blosfeld, Schreck, Decker, Wawrzyniak
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2020

B 146: Beurteilung der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Seilen mit Korrosionsschäden

Paschen, Dürer, Gronau, Rentmeister
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 148: Übergreifungslängen von Betonstahlbewehrung Maßgebende Einflussparameter in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit

Maurer, Bettin
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 149: Untersuchungen zum Einfluss von Modellparametern auf die Lebensdauerprognose für Brückenbauwerke

Keßler, Gehlen € 16,00

B 150: Beurteilung der Querkraft- und Torsionstragfähigkeit von Brücken im Bestand – erweiterte Bemessungsansätze

Hegger, Herbrand, Adam, Maurer, Gleich, Stuppak, Fischer, Schramm, Scheufler, Zilch, Tecusan
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 151: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit von dauerüberwachten Bestandsbrücken

Ralbovsky, Prammer, Lachinger, Vorwagner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 152: Bemessung von Kopfbolzendübeln in Randlage unter Vermeidung eines Versagens infolge Herausziehens

Kuhlmann, Stempniewski
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 153: Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn – Pilotprojekt

Eilers, Friedrich, Quaas, Rogalski € 15,00

B 154: Korrosionsschutz von Brückenseilen – Wickelverfahren mit Korrosionsschutzbändern

Friedrich € 9,00

B 155: Innovativer und nachhaltiger Ersatzneubau von Betonbrücken

Wirker, Donner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 156: Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen – Entwicklung eines Konzepts für die Analyse von Nutzen und Kosten

Schubert, Faber, Betz, Straub, Niemeier, Ziegler, Walther, Majka
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 157: 9. BAST-Tunnelsymposium – Tagungsband

€ 16,00

B 158: Beanspruchung orthotroper Fahrbahnplatten infolge der Erneuerung des Brückenbelags

Friedrich, Eilers, Quaas, Robrecht, Schamne, Staack
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 159: Lebenszyklusmanagement für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur – Entwicklung eines verkehrsträgerübergreifenden, indikatorgestützten Systems

Lebhardt, Seiler, Gerdas € 15,50

2021

B 160: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für intelligente Kalottenlager

Butz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**B 161: Lagerwege von Brücken**

Butz, Mack, Krawtschuk, Maldonado

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**B 162: Druckgurtanschluss in Hohlkastenbrücken – Ingenieurmodelle zur wirklichkeitsnahen Ermittlung der Tragfähigkeit**

Müller

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**B 163: Dauerüberwachung von Bestandsbrücken – Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen**

Hindersmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**B 164: Intelligente Bauwerke – Verfahren zur Auswertung, Verifizierung und Aufbereitung von Messdaten**

Kleinert, Sawo

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**B 165: Reaktions- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen**

Deublein, Roth, Bruns, Zulauf

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**B 166: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen**

Finger, Stolz, Fischer, Hasenstein, Rinder

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**B 167: Erfahrungssammlung zu Fahrbahnübergängen aus Polyurethan**

Staeck, Eilers

€ 15,50

B 168: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke Messtechnische Erfassung von Verkehrsdaten auf der Basis von instrumentierten Fahrbahnübergängen

Rill

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**B 169: Entwicklung von Bemessungshilfen für bestehende Stahlbetonkragarme auf Basis nichtlinearer Berechnungen**

Neumann, Brauer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**B 170: Feuerverzinken als dauerhafter Korrosionsschutz für Stahlverbundbrücken – Praxisbericht zum Pilotprojekt**

Ansorge, Franz, Düren-Rost, Friedrich, Huckshold, Lebelt, Rademacher, Ungermann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**B 171: Bauwerksprüfung gemäß DIN 1076 – Unterstützung durch (halb-) automatisierte Bildauswertung durch UAV (Unmanned Aerial Vehicles – Unbemannte Fluggeräte)**

Morgenthal, Rodehorst, Hallermann, Debus, Benz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**B 172: Querkrafttragfähigkeit von Spannbetonbrücken – Erfassung von Spannungszuständen in Spannbetonversuchsträgern mit Ultraschallsensoren**

Niederleithinger, Werner, Galindo, Casares, Bertschat, Mierschke, Wang, Wiggenhauser

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**B 173: Vermeidung chloridinduzierter Korrosion in Tunnelinnenschalen aus Stahlbeton**

Rudolph, Orgass, Schneider, Lorenz, Reichel, Schmidt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.