

Untersuchungen zum Einfluss von Modellparametern auf die Lebensdauerprognose für Brückenbauwerke

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 149

The logo for the Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) is displayed in a bold, green, lowercase sans-serif font. The letters are thick and have a slight shadow effect, giving them a three-dimensional appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

Untersuchungen zum Einfluss von Modellparametern auf die Lebensdauerprognose für Brückenbauwerke

von

Sylvia Keßler
Christoph Gehlen

Technische Universität München
Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 149

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 Öffentlichkeitsarbeit.

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 Öffentlichkeitsarbeit.

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

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 15.0481/2009/DRB
Untersuchungen zum Einfluss von Modellparametern auf die Lebensdauerprognose für Brückenbauwerke

Fachbetreuung

Maria Teresa Alonso Junghanns

Referat

Betonbau

Herausgeber

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

Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

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 978-3-95606-500-2

Bergisch Gladbach, Februar 2020

Kurzfassung – Abstract

Untersuchungen zum Einfluss von Modellparametern auf die Lebensdauerprognose für Brückenbauwerke

Die Dauerhaftigkeitsbemessung von neu zu errichteten Infrastrukturbauwerken erfolgt nach aktuellen Regelwerken rein deskriptiv über die Zuordnung von Expositionsklassen. In Abhängigkeit der zugeordneten Expositionsklasse werden Mindestanforderungen an die Betonzusammensetzung und die Betondeckung gestellt. Diese Mindestanforderungen der Normung sollen eine geplante Nutzungsdauer für chloridbeanspruchte bzw. einer Karbonatisierung ausgesetzten Bauwerke von mindestens 50 Jahren unter üblichen Instandhaltungsbedingungen sicherstellen. Die Bemessung auf Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken mit Blick auf karbonatisierungs- und chloridinduzierte Bewehrungskorrosion kann heutzutage aber auch auf Basis voll-probabilistischer Prognosemodelle durchgeführt werden.

Ziel dieses Forschungsvorhabens sind Untersuchungen zum Einfluss von Modellparametern eines voll-probabilistischen Modells auf die Lebensdauerprognose von Brückenbauwerke im Zuge von Bundesfernstraßen mit dem Fokus auf Depassivierung der Bewehrung aufgrund von Chlorideindringen und Karbonatisierung. Für die Überprüfung wurden Bemessungssituationen für XD- und XC-exponierte Brückenbauwerke bei deskriptiver Dauerhaftigkeitsbemessung aufgestellt. Jede Bemessungssituation wurde mithilfe der voll-probabilistischen Modelle zur Einleitungsphase der Bewehrungskorrosion gegengerechnet. Die Auswahl der Modellparameter hatte zum Ziel, sowohl günstige (schwache Einwirkung – hohe Materialwiderstände) als auch ungünstige (starke Einwirkung – niedrige Materialwiderstände) Last-Einwirkungszenarien abzubilden.

Innerhalb der Expositionsklassen XC und XD werden bei der Dauerhaftigkeitsbemessung breite berechnete Zuverlässigkeitsspektren erreicht, die von Unterschreiten von üblicherweise angestrebter Zielzuverlässigkeit bis hin zu einer deutlichen Überschreitung führen kann. Die resultierenden Zuverlässigkeitsspektren lassen ohne Inspektionsdaten für das Bauwerk keine bauwerkspezifischen Zuverlässigkeitswerte ableiten. Eine sinnvolle Anwendung von voll-probabilistischen Modellen auf bestehenden Bauwerken stellt hohe Anforderungen an die Quantität und Qualität der Inspektionsergebnisse.

The influence of model parameters on the service life prediction of reinforced bridge structures

The durability design of new structures is currently standardized via prescriptive rules by assignment of exposure classes. Each exposure class requires other prerequisites regarding concrete composition and concrete cover. These minimum requirements in the standards shall ensure a service life of about 50 years with respect to common repair conditions for structures exposed to chlorides or carbonation. However, nowadays the full-probabilistic models are available to estimate the time to corrosion initiation for chloride-induced and carbonation-induced reinforcement corrosion. These models can support the durability design for new structures.

The objective of the research study is the investigation of the influence of the model input parameters on the probabilistic service life prediction of reinforced concrete bridges from federal highways with regard to carbonation and chloride ingress. Parts of the study are sensitivity and dominance analyses which show the influence of the model input parameters on the model outcome. Design situations of each exposure class (XD and XC) are defined with regard to the prescriptive design rules and the corresponding reliability index is calculated based on the full-probabilistic models. The aim of the design situations was to cover the most favorable (weak stresses – great material resistances) and as well the most unfavorable (high stresses – low materials resistances) combination of loading conditions which are in accordance to the common standards.

The results show that the reliability spectrum calculated based on the full-probabilistic models can cover a broad range within one exposure class such as XC and XD. The calculated reliability index can be lower than the commonly striven target reliability and can also be much higher than the target reliability. The reliability spectra based from the design situations cannot be used to derive reliability information for an existing structure. Therefore, inspection data are required. The prerequisite for the application of full-probabilistic models for existing structures places high demands on inspection quality and quantity.

Summary

The influence of model parameters on the service life prediction of reinforced bridge structures

The efficiency of our infrastructure depends decisively on the durability of its reinforced concrete structures such as bridges. The durability design of new structures is currently standardized via prescriptive rules by assignment of exposure classes. Each exposure class requires other prerequisites regarding concrete composition and concrete cover. In detail, specifications are set on the maximal water-to-binder ratio, minimal cement content, minimal compressive strength, and maximal crack width. These standard requirements are the result of scientific studies, product standards of concrete raw material and national experiences and shall ensure a service life of about 50 years with respect to common repair conditions for structures which are exposed to chlorides and carbonation.

The disadvantage of the prescriptive durability design is that the remaining service life remains unknown. A performance-based durability design based on full-probabilistic service life prediction would be the most expedient solution. However, full-probabilistic service life models for predicting the service life in case of carbonation-induced and chloride-induced reinforcement corrosion are available. The limit states are defined when a critical chloride concentration or the carbonation depth reaches the reinforcement level. The outcome of the full-probabilistic service life is a reliability index or failure probability in dependence of time which can be compared to specific target reliability.

The objective of the research study is the investigation of the influence of the model input parameters on the probabilistic service life prediction of reinforced concrete bridges from federal with regard to carbonation and chloride ingress. Parts of the study are sensitivity and dominance analyses which show the influence of the model input parameters on the model outcome. Design situations of each exposure class (XD and XC) are defined with regard to the prescriptive design rules and the corresponding reliability index is calculated based on the full-probabilistic models. The aim of the design situations was to cover the most favorable (weak stresses – great material resistances) and

as well the most unfavorable (high stresses – low material resistances) combination of loading conditions which are in accordance to the common standards. The resulting calculated reliability will be compared to inspection data from existing structures.

Normally, bridge structures are exposed as well to XF-Exposition (freeze attack with and without chlorides) if they can be assigned to XC and XD exposure. Since the material requirements are higher in XD and XF exposure these requirements become mandatory and are taken into account in the XC design situations.

The results show that the reliability spectrum within one exposure class, XC and XD, could cover a broad range. The reliability index of components with regard to XC2 exposure is in a range of $4 \leq \beta \leq 14.5$ after 100 years in service. The target reliability of 1.5 is fulfilled safely. This means that components assigned to XC2 are protected against carbonation-induced corrosion in case that XD2 is mandatory. The same applies for the benchmark of the XC3 design situations. The calculated reliability is never lower than the target reliability of $\beta = 0.5$. In the unfavorable design situation of low material resistances compared to strong stresses the resulting reliability is never lower than 1. In the opposite case of low stresses and great material resistances the resulting reliability is about 4. The reliability range from exposure class XC4 after 100 years goes from $3.6 \leq \beta \leq 9$. Hence, the reliability is never lower than the target reliability of 1.5. The sensitivity and the dominance analyses of exposure class XC lead to the conclusion that the concrete cover is usually the most sensitive and dominant parameter. Therefore, the determination of the real concrete cover of an existing structure can reduce model uncertainty. These results are only valid for structures which are exposed to chlorides and to carbonation. These results cannot be transferred to structures, which are exclusively assigned to exposure classes XC.

The reliability range of XD1, $1.3 \leq \beta \leq 3.8$, show values which are lower than the defined target reliability of 1.5. The target reliability is reached after 55 years under the assumptions of an unfavorable design situation. In case of the XD2 design situation the reliability range $-1.2 \leq \beta \leq 1.3$ is even smaller and the target reliability of 0.5 is exceeded after few years in service. The same outcome applies to the XD3 exposure class with a resulting reliability range of $-1.5 \leq \beta \leq 1.0$. The target

reliability of 0.5 cannot be guaranteed. The result of the XD sensitivity and dominance analysis show that the model uncertainty can be reduced by accurate determination of the model input parameters age factor, which describes the time-dependency of the diffusion behavior, surface chloride concentration and temperature.

Several structures (6 bridge and 2 tunnel structures) are available for the update of the model input parameters and the model outcome. Additionally, a dataset of several chloride profiles from different bridge structures in Germany completes the verification of the model input parameters. In total four bridges structures and the two tunnel structures can be assigned to exposure class XD1 whereas the other two bridges belong to exposure class XC3.

The dataset of different chlorides profiles from different bridge structures in Germany could be used only partly since only few profiles fulfilled the basic requirements for a regression analyses such as at least three chloride concentration in different depths. The usable data have been fitted to derive the apparent chloride diffusion coefficient and the surface chloride concentration. Nevertheless, the data set includes data from different structures, different ages, different concrete composition and different locations. A direct comparison to the input parameters of the defined design situation was not possible. The data set was too small to form own classes with regard to age, concrete composition and exposition.

The results of the XD1 and XC3 bridge structures show that the reliability of the existing structures copes very well with the corresponding reliability range from the model analysis. The actual condition state was always higher than the target state. Even after 100 years the calculated reliability remains higher than the target reliability.

The resulting reliability of both tunnel structures is much lower than the calculated reliability spectra from the XD1 design situation. Its actual reliability fits much better to the reliability spectra of exposure class XD3. Under consideration of the inspection data the reliability increases but not high enough to ensure the target reliability after 100 years. The tunnel structures show very high chloride impact which leads to a high probability of corrosion initiation. This assumption has been confirmed based on half-cell potential measurements and selected probings. These examples show that even

though the mean reliability is above the target reliability corrosion initiation is likely in spots with high chloride impact. Consequently, spatial information from inspection methods should be recorded and should be used for condition assessment. Higher chloride impact is expected in tunnel structures in comparison to bridge structures due to manufacturing aspects and production relating processes (e.g. joints and e.g. concrete compaction). The results from the tunnel structures cannot be transferred to bridge components such as abutments, columns and pillars due to more severe exposure conditions in tunnel structures.

In a last step a flow charts summarizes the procedure of a full-probabilistic service life prediction with a list of all input parameters which needs to be defined. Additionally the flow chart presents criteria for the determination of inspection intervals with respect to the outcome of the a priori service life prediction.

In future, a higher number of bridges structures would be beneficial for the verification of the model analysis with a broader range of different exposure conditions and concrete compositions. The corresponding inspection data shall fulfill basic requirements such as at least 4, better 5, layers of chloride results per profile. In dependency of the structure dimensions more chloride profiles or carbonation depths are necessary. Additionally the concrete composition should be known and the concrete cover data should be available.

The results show full-probabilistic durability design of bridges structures from federal highways is possible with respect to the limit state reinforcement depassivation due to chloride exposure or carbonation. Inspection data are necessary to estimate the service life of a specific structure. The prerequisite for the application of full-probabilistic models for existing structures places high demands on inspection quality and quantity.

Inhalt

1	Einleitung	9	5.2	Auswertung der Chloridprofile aus FE.15.383.03	33
2	Forschungskonzept und geplantes Vorgehen	10	5.3	Brücke Rennekoven	36
3	Voll-probabilistische Lebens- dauerbemessung	11	5.4	Brücke Schirik	38
3.1	Grenzzustände	11	5.5	Brücke Hülscheid-Winkeln	40
3.2	Zielzuverlässigkeit	11	5.6	Brücke Rölvede	42
3.3	Karbonatisierung	12	5.7	Brücke Putzbrunn	44
3.4	Chlorideindringen	14	5.8	Lechbrücke	46
3.5	Bayes'sches Update	17	5.9	Tunnel A und B	48
3.6	Bayes'sche Netze	18	6	Bewertungskriterien zur Fest- legung von Inspektionsinter- vallen auf Basis einer probabi- listischen Zustandsbewertung und -prognose	57
4	Rechnerische Prognose für ausgewählte Bemessungs- situationen	18	7	Zusammenfassung	58
4.1	Standortwahl	19		Literatur	61
4.2	Festlegung der Bemessungs- situationen	20		Bilder	62
4.2.1	Streuung der Betondeckung	21		Tabellen	63
4.3	Einfluss des Rechenverfahrens	22		Anhang	65
4.4	Ergebnisse zur Zuverlässigkeits- entwicklung	22	1	Sensitivitätsanalyse	65
4.4.1	Zuverlässigkeitsspektren der XC-Exposition	22	2	Dominanzanalyse	66
4.4.2	Sensitivitäts- und Dominanzanalyse der XC-Expositionen	25			
4.4.3	Zuverlässigkeitsspektren der XD-Exposition	27			
4.4.4	Sensitivitäts- und Dominanzanalyse der XD-Exposition	27			
5	Überprüfung der Dauerhaftig- keitsbemessung anhand von Inspektionsdaten	31			
5.1	Vorstudie zum Fitten der Modell- eingabeparameter: Bayes'sche Netze vs. Regressionsanalyse	31			

1 Einleitung

Eine leistungsfähige Infrastruktur ist das Rückgrat des Wirtschaftsstandortes Deutschland. Die Ingenieurbauwerke sind hierbei die neuralgischen Punkte – nicht nur weil sie zu den teureren, sondern auch zu den langlebigeren Gütern einer Verkehrsinfrastruktur zählen. Die Dauerhaftigkeitsbemessung von neu zu errichtenden Infrastrukturbauwerken erfolgt nach aktuellen Regelwerken [1] – [3] rein deskriptiv über die Zuordnung von Expositionsklassen. Für Bauwerke, die der Verkehrsinfrastruktur an Bundesfernstraßen angehören, sind meist die Expositionsklassen für Chlorideinwirkung (XD), Karbonatisierung (XC) und auch für Frostangriff mit und ohne Taumittel (XF) zu berücksichtigen (siehe Tabelle 1-1).

In Abhängigkeit der zugeordneten Expositionsklasse werden Mindestanforderungen an die Betonzusammensetzung und die Betondeckung gestellt. Im Einzelnen werden Vorgaben zum max. Wasserzementwert, Mindestzementgehalt, hinsichtlich höchstzulässiger Mehlkorngelbheit, zugelassene Ze-

mentart, Mindestdruckfestigkeit, Mindestbetondeckung und falls erforderlich auch zum Mindestluftporengehalt gemacht. Darüber hinaus ist sowohl das zulässige Vorhaltemaß der Betondeckung, der maximale Eigenchloridgehalt und die maximale Rissbreite geregelt [1] – [4]. Diese Mindestanforderungen der Normung beruhen neben wissenschaftlichen Erkenntnissen und Produktnormen von Betonausgangsstoffen im Wesentlichen auf nationalen Erfahrungen und sollen eine geplante Nutzungsdauer der Bauwerke von mindestens 50 Jahren unter üblichen Instandhaltungsbedingungen sicherstellen [2].

Die deskriptive Dauerhaftigkeitsbemessung hat den großen Nachteil, dass eine Beurteilung der Lebensdauer bzw. der Restnutzungsdauer bestehender Bauwerke nicht möglich ist. Manchmal liegen Informationen über die Betonzusammensetzung nicht vor und darüber hinaus lassen sie sich Informationen aus Bauwerksinspektionen nur schwer in der Bewertung der Restlebensdauer integrieren und somit bleibt die tatsächliche Zuverlässigkeit eines jeden Bauwerks bleibt unbekannt. Zielführender

Klasse	Beschreibung der Umgebung	Beispiele
Bewehrungskorrosion, ausgelöst durch Chloride, ausgenommen Meerwasser		
XD1	mäßige Feuchte	Sprühnebelbereich, z. B. Überbauten, Pfeiler, Widerlager auch unterhalb von Talbrücken Sonstiger Bereich, z. B. Innenflächen von Hohl Pfeilern, Widerlagern, Hohlkästen
XD2	nass, selten trocken	Mittelbarer Spritzwasserbereich, z. B. Trog-, Tunnel-, Stütz- und Widerlagerwände, Stützen, Pfeiler
XD3	wechselnd nass und trocken	Unmittelbarer Spritzwasserbereich, z. B. Kappen, Schutz- und Leiteinrichtungen
Bewehrungskorrosion, verursacht durch Karbonatisierung		
XC1	trocken oder ständig nass	
XC2	nass, selten trocken	
XC3	mäßige Feuchte	Vor Witterung geschützter Bereich, z. B. Innenflächen von Hohl Pfeilern, Widerlagern, Hohlkästen
XC4	wechselnd nass und trocken	Frei bewitterter Bereich, z. B. Kappen, Schutz- und Leiteinrichtungen, Teilbereiche von Trog-, Tunnel-, Stütz- und Widerlagerwänden, Stützen, Pfeiler, auch horizontale Flächen, Überbauten, Widerlager
Frostangriff mit und ohne Taumittel		
XF1	Mäßige Wassersättigung ohne Taumittel	
XF2	Mäßige Wassersättigung mit Taumittel	Sprühnebelbereich, z. B. Überbauten, Pfeiler, Widerlager auch unterhalb von Talbrücken. Mittelbarer Spritzwasserbereich, z. B. Teilbereiche von Trog-, Tunnel-, Stütz- und Widerlagerwänden, Stützen, Pfeiler
XF3	Hohe Wassersättigung ohne Taumittel	
XF4	Hohe Wassersättigung mit Taumittel	Unmittelbarer Spritzwasserbereich, z. B. Kappen, Schutz- und Leiteinrichtungen; Teilbereiche von Trog-, Tunnel-, Stütz- und Widerlagerwänden, Stützen, Pfeiler

Tab. 1-1: Expositionsklassen nach ZTV-ING [1] für Chloridbeanspruchung, Karbonatisierung und Frostangriff

und praktikabler ist ein auf Performance basierendes Bemessungsverfahren [5] – [9], das durch den Einsatz von voll-probabilistischen Bemessungen realisierbar ist.

Für die Bemessung der Dauerhaftigkeit im Bereich der karbonatisierungs- und chloridinduzierten Bewehrungskorrosion stehen in Regelwerken aufbereitete voll-probabilistische Prognosemodelle zur Verfügung [6], [10] – [12], die den Zeitraum bis zur Depassivierung der Bewehrung abbilden. Für frostbeanspruchte Bauwerke fehlen zurzeit noch die Schädigungsmodelle, um eine probabilistische Dauerhaftigkeitsbemessung durchführen zu können.

2 Forschungskonzept und geplantes Vorgehen

Ziel dieses Forschungsvorhabens sind Untersuchungen zum Einfluss von Modellparametern eines voll-probabilistischen Modells auf die Lebensdauerprognose von Brückenbauwerken im Zuge von Bundesfernstraßen mit dem Fokus auf Depassivierung der Bewehrung aufgrund von Chlorideindringen und Karbonatisierung. Zunächst wird eine Überprüfung der deskriptiven Dauerhaftigkeitsbemessung durchgeführt. Dabei werden die mithilfe von Modellen voll-probabilistisch berechneten Lebensdauern den aus deskriptiver Lebensdauer erwarteten gegenüber gestellt. Konkret bedeutet dies, die Beantwortung der Frage, ob die geforderten Lebensdauern mit der deskriptiven Lebensdauerbemessung rechnerisch eingehalten werden kann.

Für die Berechnung der voll-probabilistischen Dauerhaftigkeitsbemessung stehen zwei gängige Approximationsverfahren (FORM und SORM) und die Monte-Carlo Simulation zur Verfügung. Bevor die eigentliche Modellanalyse durchgeführt wird, werden die Berechnungsmethoden miteinander verglichen und eine hinreichend genaue Berechnungsmethode für die weitere Vorgehensweise identifiziert.

In einem ersten Schritt wird eine Modellanalyse mit virtuellen Bemessungssituationen basierend auf der deskriptiven Dauerhaftigkeitsbemessung durchgeführt. Die Modellanalyse umfasst die probabilistische Berechnung der Zuverlässigkeit von XD- und XC-exponierten Brückenbauwerken bei deskriptiver Bemessung nach DIN 1045-2:2008 [2], d. h., es werden nur die Betonzusammensetzungen und Be-

tondeckungen gewählt, die nach deskriptiver Bemessung für die jeweilige Expositionsklasse mindestens einzuhalten sind. Die ausgesuchten Bemessungssituationen von virtuellen Brückenbauwerken sind in günstige (schwache Einwirkung – hohe Materialwiderstände) und ungünstige (starke Einwirkung – niedrige Materialwiderstände) Bemessungssituationen aufgeteilt. Zur Beschreibung der Einwirkung werden für jede Expositionsklasse reale Wetterdaten aus verschiedenen Standorten aus Deutschland herangezogen.

Parallel zu jeder einzelnen voll-probabilistischen Bemessung in der Modellanalyse werden auch die Ergebnisse einer Sensitivitätsanalyse diskutiert und für eine ausgesuchte Fallstudie zusätzlich eine Dominanzanalyse durchgeführt. Die Sensitivitätsanalyse liefert Informationen dazu, wie stark sich Änderungen der Streuungen der Modelleingabeparameter auf die Modellprognose auswirken. Die Dominanzanalyse beschreibt den Einfluss der Änderung des Mittelwertes auf das Modellergebnis.

Nach der Modellanalyse werden die getroffenen Annahmen aus der Dauerhaftigkeitsmessung anhand von Inspektionsdaten aus unterschiedlichen Brücken- und auch zwei Tunnelbauwerken überprüft. Das Ziel ist zum einen, die Inspektionsdaten aus verschiedenen Ingenieurbauwerken dazu zu nutzen, die Eingabeparameter der Modelle mit realen Daten zu vergleichen. Zum anderen werden die Inspektionsdaten zum Updaten der Lebensdauerprognose herangezogen, um das Modellergebnis mit unabhängigen, realen Daten zu überprüfen. Als Soll-Zustand wird die a priori Berechnung definiert, die meist auf Basis der Planungsdaten berechnet werden kann. Der Ist-Zustand wird a posteriori berechnet, nachdem eine Bauwerksinspektion stattgefunden hat und deren (real gemessenen) Ergebnisse in die Modellanalyse eingebunden werden.

Zum Fitten der Modelleingabeparameter aus realen Inspektionsdaten wird zuvor überprüft, in wie weit sich dafür Bayes'sche Netzwerke nutzen lassen, um die a priori Annahmen zu aktualisieren. Final werden mithilfe der voll-probabilistischen Dauerhaftigkeitsbemessung Bewertungskriterien für ein zustandsbasierten Inspektionskonzept aufgestellt. Zuvor werden die Grundlagen der voll-probabilistischen Lebensdauerbemessung zusammengefasst.

3 Voll-probabilistische Lebensdauerbemessung

3.1 Grenzzustände

Im Rahmen der Dauerhaftigkeitsbemessung wird die Differenz (Z) aus den Zufallsvariablen der Einwirkung (S) aus Exposition und dem Material-Widerstand (R) in Abhängigkeit der Zeit in einer Grenzzustandsfunktion $g(R,S)$ gegenübergestellt, Gleichung (3-1):

$$g(R, S) = R - S = Z \quad (3-1)$$

Aus dem Mittelwert und der Standardabweichung der Variablen Z (μ_Z , σ_Z) lässt sich der Zuverlässigkeitsindex β bzw. die sogenannte Versagenswahrscheinlichkeit p_f (failure probability) berechnen, Gleichung (3-2):

$$p_f = \Phi\left(-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) = \Phi(-\beta) \quad (3-2)$$

Der Grenzzustand der Depassivierung der Bewehrung wird entweder dann erreicht, wenn ein kritischer Chloridgehalt die Betonstahloberfläche erreicht wurde, oder wenn die Karbonatisierungsfront bis zur ersten Bewehrungslage vordringt. Die Grenzzustände (Gleichungen (3-3) und (3-4)) für die chlorid- und karbonatisierungsinduzierte Bewehrungskorrosion können dann folgendermaßen aufgestellt werden:

$$g(X, t) = C_{crit} - C(c, t_{SL}) \quad (3-3)$$

$$g(X, t) = c - x_c(t_{SL}) \quad (3-4)$$

mit

C_{crit} kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt bezogen auf Bindemittelgehalt im Beton [M.-%/b]

$C(c, t_{SL})$ Chloridkonzentration an der Betonstahloberfläche zum Zeitpunkt t_{SL} bez. auf Binde [M.-%/b]

c Betondeckung [mm]

$x_c(t_{SL})$ Karbonatisierungstiefe zum Ende der planmäßigen Nutzungsdauer [mm]

t_{SL} Nutzungsdauer (Service Life) [a]

3.2 Zielzuverlässigkeit

Die berechnete Zuverlässigkeit wird dann der zuvor definierten Zielzuverlässigkeit gegenübergestellt. Die Zielzuverlässigkeit beschreibt die Anforderungen an die Sicherheit des Bauwerks und wird in Form des Zuverlässigkeitsindex β_0 ausgedrückt, der immer grenzzustandsbezogen angenommen wird. Das Positionspapier des DAfStb [13], [14] listet expositionsabhängig Zielzuverlässigkeitsindices für den Zustand Korrosionsinitiierung unter Berücksichtigung der Korrosionsintensität auf. Somit wurde beispielhaft für die Expositionsklasse XC1 (trocken) keine Sicherheitsanforderung gestellt (kein β_0), da aufgrund fehlender Umgebungsfeuchte bei dieser Exposition die Gefahr eines Auslösens und Fortschreitens der Korrosion des Betonstahls nach seiner Depassivierung durch die Karbonatisierung des Betons vernachlässigbar klein ist. Des Weiteren wurde das Verhältnis zwischen dem Aufwand zur Risikominimierung beim Herstellen des Bauteils und dem Aufwand einer Instandsetzung nach dem Grenzzustandsüberschreiten mit einbezogen. Für Zustände mit mittleren irreversiblen Folgen für das Bauteil variieren die zusammengefassten β_0 -Werte zwischen 0,5 und 1,5 Tabelle 3-1. Diese Zielzuverlässigkeiten bewegen sich im Rahmen üblicher Zuverlässigkeitsanforderungen für Grenzzustände mit Blick auf Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks [13], [14].

Beim Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wird in erster Linie zwischen reversiblen und irreversiblen Folgen des Grenzzustandsüberschreitens unterschieden. Der Grenzzustand der Depassivierung der Bewehrung ist genau genommen kein klassischer Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit, weil mit einer gerade stattgefundenen Depassivierung des Betonstahls noch kein Schaden entstanden ist. Jedoch startet nach einer erfolgten Depassivierung des Betonstahls unter bestimmten Bedingungen eine korrosionsbedingte Schädigung des

Expositionsklasse	β_0 [-]
XC1 (trocken)	Keine Anforderung
XC1 (ständig nass), XC2, XC4, XD1	$\geq 1,5$
XC3, XD3*, XD2*	$\geq 0,5$
* bei schwieriger Zugänglichkeit, fehlenden Inspektionen: $\beta = 1,5$	

Tab. 3-1: Zuverlässigkeitsindex β_0 zum Ende der vereinbarten techn. Lebensdauer für den Grenzzustand der Depassivierung [13], [14]

Bauteils. Korrosionsbedingte Schädigungen werden als irreversibel angesehen.

Die in diesem Bericht angewendeten Modelle zur Beschreibung der Karbonatisierung des Betons sowie des Chlorideindringen in Beton werden in Kapitel 3.3 und 3.4 ausgeführt.

3.3 Karbonatisierung

Der Prozess der Karbonatisierung im ungerissenen Beton wird folgendermaßen modelliert [6], Gleichung (3-5):

$$x_c(t) = \sqrt{2 \cdot R_{NAC,0}^{-1} \cdot C_S \cdot k_e \cdot k_c \cdot \sqrt{t} \cdot W(t)} \quad (3-5)$$

mit

x_c Karbonatisierungstiefe zum Zeitpunkt t [m]

C_S CO₂-Konzentration der Umgebung [kg/m³]

k_e Übertragungsparameter für Umwelteinwirkungen [-]

k_c Übertragungsparameter Ausführungsqualität bzw. Nachbehandlungsdauer [-]

$W(t)$ Wasserbenetzungsgrad [-]

$R_{NAC,0}^{-1}$ inverser effektiver Karbonatisierungswiderstand unter dem Einfluss der klimatischen Rahmenbedingungen (65 ± 5 % RH und 20 ± 2 °C), ermittelt bei natürlicher CO₂-Konzentration (rund 0,04 ± 0,005 Vol.-%) mit der Normalkarbonatisierungsmethode NAC [(m²/s)/(kg/m³)], Gleichung (3-6) [5]:

$$R_{NAC,0}^{-1} = R_{ACC,0}^{-1} \cdot k_t + \varepsilon_t \quad (3-6)$$

mit

$R_{ACC,0}^{-1}$ inverser effektiver Karbonatisierungswiderstand von trockenem Beton. Rahmenbedingungen (65 % ± 5 % RH und 20 ± 2 °C Temperatur), ermittelt bei erhöhter CO₂-Konzentration bei 2 Vol.-% mit der Schnellkarbonatisierungsmethode ACC [(m²/s)/(kg/m³)]

ε_t Errorterm in der Einheit von $R_{ACC,0}^{-1}$ zur Berücksichtigung prüftechnisch bedingter Fehler beim Prüfverfahren ACC [(m²/s)/(kg/m³)]

k_t Faktor zur Berücksichtigung von prüfbedingten Abweichungen der Schnellkarbonatisierung gegenüber der natürlichen Karbonatisierung [-]

Der Einfluss der Ausführungsqualität wird über die Nachbehandlungsdauer mit dem Parameter k_c folgendermaßen berechnet, Gleichung (3-7):

$$k_c = \left(\frac{t_c}{7}\right)^{b_c} \quad (3-7)$$

mit

t_c Nachbehandlungsdauer [d]

b_c Regressionsexponent [-]

Der Einfluss von Umwelteinwirkungen wird über den Parameter k_e , Gleichung (3-8), der den Einfluss der relativen Luftfeuchte auf den Karbonatisierungswiderstand beschreibt, bestimmt:

$$k_e = \left(\frac{1 - \left(\frac{RH_{IST}}{100}\right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{REF}}{100}\right)^{f_e}} \right)^{g_e} \quad (3-8)$$

mit

RH_{IST} relative Luftfeuchtigkeit am Bauwerk [%]

RH_{REF} Referenzfeuchte, konstant 65 % [%]

f_e Regressionsexponent

g_e Regressionsexponent

Der Wasserbenetzungsgrad setzt sich zusammen aus Gleichungen (3-9) und (3-10):

$$W(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^w \quad (3-9)$$

$$w = \frac{(p_{SR} \cdot ToW)^{b_w}}{2} \quad (3-10)$$

mit

t_0 Referenzzeitpunkt, t_0 [a] = 0,0767 (konstant)

w Witterungsexponent

b_w Regressionsexponent

p_{SR} Schlagregenwahrscheinlichkeit [-]

ToW Regenhäufigkeit (Time of Wetness) [-], Gleichung (3-11):

$$ToW = \frac{\text{Regentage mit } h_{ND} > 2,5\text{mm}}{365} \quad (3-11)$$

mit

h_{ND} Anzahl der Tage mit Niederschlagsmengen größer 2,5 mm

Alle für die Modellierung der Karbonatisierung notwendigen Eingabeparameter sind in Tabelle 3-2 zusammengefasst. Die Eingabeparameter können von der Exposition des Bauwerkes (Einwirkung) oder auch vom verwendeten Material (Widerstand) abhängen.

Die expositionsabhängigen Eingabeparameter relative Luftfeuchtigkeit, Regenhäufigkeit und Schlagregenhäufigkeit können unterteilt nach Expositionsklasse die folgenden Werte annehmen (Tabelle 3-3 bis Tabelle 3-5).

Im Fall von erwarteter Karbonatisierung des Betons sind in Übereinstimmung mit den aktuell gültigen Normen [2], [3] die aufgeführten maximal zulässigen w/z-Werte, die Mindestzementgehalte und die Mindestbetondeckung zu beachten (Tabelle 3-6).

Das Vorhaltemaß für die Betondeckung wird in Übereinstimmung mit [3] mit 5 mm in die Modellanalyse eingebunden. Darüber hinaus wird ein weiteres Vorhaltemaß von 15 mm in der Parameterstudie berücksichtigt.

Expositionsklasse	Verteilung	RH _{IST} [%]	
		μ	σ
XC1	Konstante	65	-
XC2	Konstante	90	-
XC3	Weibullverteilung	$75 \leq \mu \leq 80$	$10 \leq \sigma \leq 12$
XC4	$\omega = 100$	$75 \leq \mu \leq 85$	$8 \leq \sigma \leq 12$

Tab. 3-3: Angesetzte relative Luftfeuchtigkeit RH_{IST} nach XC-Exposition [8]

Expositionsklasse		Verteilung	ToW [-]	p _{SR} [-]
XC1	trocken	Konstante	0	0
	nass		1	1
XC2	0,02 – 0,8		1	
XC3	0		0	
XC4	gemäßigt	0,2 – 0,25	0,1 – 1,0	
	maritim	0,25 – 0,3	0,3 – 1,0	

Tab. 3-4: Regenhäufigkeit, ToW und Schlagregenhäufigkeit p_{SR}, nach XC-Exposition [8]

Ausrichtung	p _{SR} [-]
horizontale Bauteile	1,0
vertikale Bauteile mit Windbeaufschlagung	0,3 – 0,6
vertikale Bauteile im Windschatten	0,1 – 0,3

Tab. 3-5: Schlagregenhäufigkeit p_{SR}, nach Ausrichtung des Bauteils [8]

Parameter	Einheit	Verteilung	μ	σ
R _{ACC,0} ⁻¹	(mm ² /Jahr)/(kg/m ³)	Normalverteilung	widerstandsabhängig	
ϵ_t	(mm ² /Jahr)/(kg/m ³)	Normalverteilung	315,5	48
k_t	-	Normalverteilung	1,25	0,35
b_c	-	Normalverteilung	-0,567	0,024
t_c	Tag	Konstante	8	
RH _{IST} (Tabelle 3-3)	%	Weibull $\omega = 100$	expositionsabhängig	
RH _{ref}	%	Konstante	65	-
g_e	-	Konstante	2,5	-
f_e	-	Konstante	5	-
ToW (Tabelle 3-4)	-	Konstante	expositionsabhängig	
p _{SR} (Tabelle 3-4 und Tabelle 3-5)	-	Konstante	expositionsabhängig	
b_w	-	Normalverteilung	0,446	0,163
t_0	Jahr	Konstante	0,0767	-
C_s	kg/m ³	Konstante	0,00083	0,0001
c	mm	Normalverteilung	widerstandsabhängig	
t _{SL}	Jahr	Konstante	100	-

Tab. 3-2: Allgemeine Modellparameter: Karbonatisierung [5]

Expositions-klasse		max. w/z-Wert [-]	min. Zement-gehalt [kg/m ³]	min. Beton-deckung [mm]
Karbona-tisierung	XC1	0,75	240	10
	XC2			20
	XC3	0,65	260	20
	XC4	0,60	280	25

Tab. 3-6: Grenzwerte der w/z-Werte, Zementgehalte und Betondeckung der entsprechenden XC-Expositions- klassen [2]

Zementsorten [15]		XC1	XC2	XC3	XC4
CEM I					
CEM II	A-S				
	B-S				
	A-D				
	A-P				
	B-P				
	A-Q				
	B-Q				
	A-V				
	B-V				
	A-W				
	B-W				
	A-T				
	B-T				
	A-LL				
	B-LL				
	A-L				
B-L					
A-M					
B-M					
CEM III	A				
	B				
	C				
CEM IV					
CEM V					
grau: zulässig; weiß: nicht zulässig					

Tab. 3-7: Zugelassene Anwendung der Zementsorten in Abhängigkeit der Expositions-klasse [2]

Zusätzlich werden die in Abhängigkeit der Expositi- onsklasse zulässigen Zementsorten [2] berücksich- tigt (Tabelle 3-7).

Tabelle 3-8 zeigt gemessene Karbonatisierungs- widerstände in Abhängigkeit verschiedener Beton- zusammensetzung.

Zementart	Zement-gehalt [kg/m ³]	w/b-Wert [-]	μ	σ
CEM I	340	0,45	1.641	788
CEM I	300	0,50	2.145	971
CEM I	300	0,55	3.092	1.292
CEM I	280	0,60	4.228	1.648
CEM I	260	0,65	7.659	2.620
CEM I 42,5	150	0,55	3.092	1.291
CEM I + 5 % Silikastaub	290	0,55	4.733	1.800
CEM II/A	250	0,60	8.515	2.846
CEM II/B 42,5	260	0,55	7.888	2.681
CEM III/A	300	0,55	9.465	3.090
CEM III/B	300	0,50	8.392	2.814
CEM III/B	300	0,55	13.977	4.188
CEM III/B	280	0,60	25.240	6.641
CEM III/B	260	0,65	39.336	9.388

Tab. 3-8: Karbonatisierungswiderstand, $R_{ACC,0}^{-1}$, in Abhängig- keit der Betonzusammensetzung [5], [8]

3.4 Chlorideindringen

Die nachstehende Gleichung (3-12) basierend auf dem 2. Fick'schen Diffusionsgesetz beschreibt die Entwicklung der zeit- und tiefenabhängigen Chlorid- konzentration in ungerissenen Beton [6]:

$$C(x, t) = C_0 + (C_{S,\Delta x} - C_0) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{app}(t) \cdot t}} \right] \tag{3-12}$$

mit

$C(x,t)$ Chloridkonzentration in Tiefe x zum Zeit- punkt t bezogen auf den Bindemittelgehalt [M.-%/b]

C_0 Eigenchloridgehalt des Betons [M.-%/b]

$C_{S,\Delta x}$ Ersatzoberflächenchloridkonzentration [M.-%/b]

Δx Tiefe der Ersatzoberfläche [m]

x Tiefe der korrespondierenden Chlorid- konzentration [m]

t Betonalter [s]

$D_{app}(t)$ scheinbarer Chloriddiffusionskoeffizient des Betons [m²/s]

$D_{app}(t)$ mittels Diffusionsversuch, Gleichung (3-13) [9]:

$$D_{app}(t) = k_e \cdot D_{nss}(t_0) \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^{\alpha_{nss}} \quad (3-13)$$

mit

$D_{nss}(t_0)$ instationärer Chloriddiffusionskoeffizient [m^2/s] nach dem einseitigen Diffusionsversuch in Anlehnung an DIN EN 12390-11: 2015 [16]

t_0 Referenzzeitpunkt; Dauer der Beaufschlagung des Prüfkörpers mit Chloridlösung [d]

α_{nss} Altersexponent [-] ermittelt durch Diffusionsversuche

k_e Umweltparameter zur Berücksichtigung der Umgebungstemperatur [-]

$D_{app}(t)$ mittels Migrationsversuch, Gleichung (3-14) [9]:

$$D_{app}(t) = k_e \cdot D_{RCM}(t_0) \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^{\alpha_{RCM}} \quad (3-14)$$

mit

$D_{RCM}(t_0)$ Chloridmigrationskoeffizient [m^2/s] nach dem Schnellchloridmigrationstest RCM nach BAW-Merkblatt 2017 [17]

t_0 Referenzzeitpunkt; Zeitpunkt zu Beginn des RCM-Versuchs [d]

α_{RCM} Altersexponent [-]

k_e Umweltparameter zur Berücksichtigung der Umgebungstemperatur [-]

Anhaltswerte für α_{RCM} (Expositionsklassen XD1, XD2 und XD3) finden sich in Tabelle 3-14.

$D_{app}(t)$ mittels Daten aus bestehenden Bauwerken und Labordiffusionstests, Gleichung (3-15) [9]:

$$D_{app}(t) = k_e \cdot D_{nss}(t_0) \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^{\alpha_{app}} \quad (3-15)$$

mit

$D_{nss}(t_0)$ instationärer (non-steady state) Chloriddiffusionskoeffizient [m^2/s] nach dem einseitigen Diffusionsversuch in Anlehnung an DIN EN 12390-11:2015 [16]

t_0 Referenzzeitpunkt [d]

α_{app} Altersexponent [-]

k_e Umweltparameter zur Berücksichtigung der Umgebungstemperatur [-]

Der Altersexponent α_{app} wird durch eine Regressionsanalyse der durch das Fitting der Chloridprofile aus den Bauwerken ermittelten Chloriddiffusionskoeffizienten berechnet. Um sicherzustellen, dass die ermittelten Chloriddiffusionskoeffizienten den realitätsnahen Widerstand des Betonbauteils gegen das Chlorideindringen in der exponierten Umgebung widerspiegeln, muss das erste einbezogene Chloridprofil mindestens 10 Jahre nach der Beaufschlagung des Bauteils erfolgen. Der zeitliche Abstand zwischen den weiteren Chloridprofilen muss mindestens 5 Jahre betragen [7], [9].

Der Umweltparameter k_e wird nach Gleichung (3-16) berechnet:

$$k_e = \exp\left(b_e \cdot \left(\left(\frac{1}{T_{REF}}\right) - \left(\frac{1}{T_{IST}}\right)\right)\right) \quad (3-16)$$

mit

b_e Regressionsparameter [K]

T_{ref} Referenztemperatur [K]

T_{ist} Temperatur der Umgebungsluft bzw. Bauteiltemperatur [K]

Die Eingabeparameter, die für die Bemessung der Lebensdauerdauer in Bezug auf chloridinduzierte Bewehrungskorrosion nach dem fib Model Code for Service Life Design [6] benötigt werden, sind in Tabelle 3-9 aufgestellt.

Auch bei der Modellierung des Chlorideindringens können einzelne Parameter der Exposition- oder der Widerstandsseite zugeordnet werden. Folgende Wertebereiche für die Oberflächenchloridkonzentration und die Ersatzoberflächen können in Abhängigkeit der jeweiligen Expositionsklasse angesetzt werden (siehe Tabelle 3-10).

Wie schon im Fall von Karbonatisierung sind auch bei erwarteter Chloridexposition Vorgaben für die maximalen w/z-Werte, die Mindestzementgehalte und die Mindestbetondeckung einzuhalten (siehe Tabelle 3-11).

Das Vorhaltemaß für die Betondeckung wird in Übereinstimmung mit [3] mit 5 mm in die Modellanalyse eingebunden. Darüber hinaus wird ein weiteres Vorhaltemaß von 15 mm in der Parameterstudie berücksichtigt.

Parameter	Einheit	Verteilung	μ	σ
$D_{RCM}(t_0)$	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Normalverteilung	widerstandsabhängig	
α_{RCM}	-	Beta-Verteilung	widerstandsabhängig	
t_0	Jahr	Konstante	0,0767	
t	Jahr	Konstante	100	
T_{ref}	K	Konstante	293	
T_{Ist}	K	Normalverteilung	expositionsabhängig	
b_e	K	Normalverteilung	4.800	700
$C_{S,\Delta x}$	M.-%/b	LogNormalverteilung	expositionsabhängig	
Δx	mm	Beta-Verteilung	expositionsabhängig	
C_{crit}	M.-%/b	Beta-Vert. (0,2; 2,0)	0,6	0,15
C_0	M.-%/b	Konstante	0	
c	mm	Normalverteilung	widerstandsabhängig	

Tab. 3-9: Allgemeine Modellparameter: Chlorideindringen [6]

Expositions- klasse	$C_{S,0}$ bzw. $C_{S,\Delta x}$ [M.-%/b] Lognormal-Verteilung (LND)		Δx [mm] Beta- verteilung
		CoV = 0,75	
XD1	0,5 – 1,5		0
XD2	2,0 – 4,0		0
XD3	2,0 – 5,0		$\mu = 10, \sigma = 5,$ $a = 0, b = 50$

Tab. 3-10: (Ersatz-)Oberflächenchloridkonzentration und Tiefe der Ersatzoberfläche in Abhängigkeit der Exposition [7]

Expositions- klasse		max. w/z-Wert	min. Zement- gehalt	min. Beton- deckung
		[-]	[kg/m ³]	[mm]
Chlorid- einwirkung	XD1	0,55	300	40
	XD2	0,50	320	40
	XD3	0,45		40

Tab. 3-11: Grenzwerte der w/z-Werte, Zementgehalte und Betondeckung der entsprechenden XD-Expositions-
klassen [2], [3]

Zusätzlich sind die in Abhängigkeit der Expositions-
klasse zulässigen Zementsorte nach Tabelle 3-12
zu berücksichtigen.

Tabelle 3-13 fasst gemessene Chloridmigrationswi-
derstände in Abhängigkeit der Betonzusammenset-
zung zusammen. Das altersabhängige Verhalten
der Betone wurde, über den sogenannten Alters-
exponenten ausgedrückt, bindemittelabhängig ab-
geschätzt, im Wesentlichen aus Auslagerungsver-
suchen im Labor abgeleitet (Tabelle 3-14).

Zementsorten [15]		XD1	XD2	XD3
CEM I				
CEM II	A-S			
	B-S			
	A-D			
	A-P			
	B-P			
	A-Q			
	B-Q			
	A-V			
	B-V			
	A-W			
	B-W			
	A-T			
	B-T			
	A-LL			
B-LL				
A-L				
B-L				
A-M				
B-M				
CEM III	A			
	B			
	C			
CEM IV				
CEM V				
grau: zulässig; weiß: nicht zulässig				

Tab. 3-12: Zugelassene Anwendung der Zemente in Abhängig-
keit der Expositions-kategorie [2]

Zementart	Zement- gehalt [kg/m³]	w/b-Wert [-]	μ	σ
CEM I	380	0,40	8,9	1,78
CEM I	-	0,45	6,3	1,26
CEM I	360	0,45	10,0	2,0
CEM I	-	0,50	10,2	2,04
CEM I	300	0,5	15,8	3,16
CEM I	-	0,55	13,0	2,6
CEM I	320	0,55	19,7	3,94
CEM I	300	0,6	25,0	5,0
CEM I + FA	-	0,45	9,5	1,9
CEM I + FA	-	0,50	11,1	2,22
CEM II/A-D	350	0,45	4,5	0,90
CEM II/A-D	325	0,50	4,8	0,96
CEM II/A-S	330	0,40	7,0	1,40
CEM II/A-V	380	0,40	6,9	1,38
CEM II/A-V	360	0,45	9,0	1,8
CEM II/A-V	320	0,5	10,9	2,18
CEM III/A	300	0,45	3,9	0,78
CEM III/A	-	0,55 – 0,6	5,0	1,0
CEM III/B	-	0,40	1,4	0,28
CEM III/B	350	0,45	1,9	0,38
CEM III/B	-	0,45	2,6	0,52
CEM III/B	-	0,50	3,4	0,68
CEM III/B	300	0,50	2,8	0,56
CEM III/B	320	0,55	3,0	0,6
CEM III/B	300	0,6	3,4	0,68

Tab. 3-13: Chloridmigrationswiderstände, D_{RCM} [$\cdot 10^{-12}$ m²/s] in Abhängigkeit der Betonzusammensetzung im Alter von 28 Tagen [7], [9]

Der Altersexponent α_{RCM} für die Expositionsklasse XD1 liegt bindemittelunabhängig betaverteilt bei 0,65 (Mittelwert)/0,12 (Standardabweichung) mit $a = 0,0$ und $b = 1,0$ [7].

3.5 Bayes'sches Update

Modellprognosen sind immer mit Unsicherheiten verknüpft. Zum einen wird der jeweilige Transportprozess vereinfacht beschrieben und zum anderen unterliegen die Annahmen zu Materialwiderständen und zukünftigen Einwirkungen Streuungen. Auf der Basis von Bauwerksinspektionen [18] können Informationen zu den realen Expositionsbedingungen

Zementart Nach [15]	Altersexponent μ/σ [-] Betaverteilung ($a = 0,0$ und $b = 1,0$)	
CEM I	0,30/0,12	
CEM II	CEM II/A-S	0,35/0,16
	CEM II/B-S	0,37/0,17
	CEM II/A-D	0,40/0,16
	CEM II/A-P	0,40/0,16
	CEM II/B-P	0,40/0,16
	CEM II/A-Q	0,40/0,16
	CEM II/B-Q	0,40/0,16
	CEM II/A-V	0,60/0,15
	CEM II/B-V	0,60/0,15
	CEM II/A-W	nicht ermittelt
	CEM II/B-W	nicht ermittelt
	CEM II/A-T	0,40/0,16
	CEM II/B-T	0,40/0,16
	CEM II/A-L	0,30/0,12
	CEM II/B-L	nicht ermittelt
	CEM II/A-LL	0,30/0,12
CEM II/B-LL	nicht ermittelt	
CEM II/A-M	nicht ermittelt	
CEM II/B-M	nicht ermittelt	
CEM III	CEM III/A	0,40/0,18
	CEM III/B	0,45/0,20
	CEM III/C	0,45/0,20
CEM IV	CEM IV/A	nicht ermittelt
	CEM IV/B	nicht ermittelt
CEM V	CEM V/A	nicht ermittelt
	CEM V/A	nicht ermittelt
CEM III/A + ca. 10 % Flugasche	0,50/0,20	

Tab. 3-14: Altersexponent α_{RCM} für die Expositionen XD2 und XD3 in Abhängigkeit der Zementart [9]

und Materialcharakteristika gewonnen werden. Die gemessenen Daten können dann mit der Modellprognose verglichen werden und ermöglichen somit eine Verifizierung der a priori Zuverlässigkeit. Die Aktualisierung der Lebensdauerprognose kann anschließend über ein Bayes'sches Update (Gleichung (3-17)) erfolgen, in dem die unsicheren Erwartungswerte (a priori) mithilfe der mit Unsicherheiten behafteten Inspektionsdaten in a posteriori Erwartungswerte überführt werden.

$$P(F|I) = \frac{P(F \cap I)}{P(I)} = \frac{1}{P(I)} P(I|F)P(F) \quad (3-17)$$

mit

F	Zustand
I	Inspektion
$P(F I)$	a posteriori Wahrscheinlichkeit bedingt durch die Information I
$P(F)$	a priori Wahrscheinlichkeit
$P(I)$	Normalisierungsfaktor
$P(I F)$	Inspektionsqualität in Abhängigkeit des Zustandes

Die Bedeutung des Bayes'schen Updates resultiert aus der Tatsache, dass die Wahrscheinlichkeit eines Zustandes, hier Depassivierung, auf beiden Seiten der Gleichung erscheint. Auf der rechten Seite ist es die a priori Wahrscheinlichkeit und auf der linken Seite die bedingte Depassivierungswahrscheinlichkeit aufgrund der vorliegenden Inspektionsergebnisse. Der Bayes'sche Satz quantifiziert somit Reduktion der Unsicherheit der Korrosionsinitiierung durch den Zugewinn an Wissen basierend auf den Inspektionsergebnisse. Es wird angenommen, dass die Inspektionsergebnissen nur von dem Bauwerkszustand zum Zeitpunkt der Inspektion abhängen.

3.6 Bayes'sche Netze

Eine Erweiterung des Bayes'schen Updates zur Berücksichtigung von Unsicherheiten bei der Modellierung von Schädigungsprozessen sowie zur Berechnung der Wahrscheinlichkeiten von Schädigungszuständen sind Bayes'sche Netze (BN) [19] – [21]. Neben der Möglichkeit stochastische Prozesse in Modelle zu integrieren, können mithilfe von Bayes'schen Netzwerken Schädigungsmodelle durch Inspektionsergebnisse aktualisiert werden. Bayes'sche Netze sind gerichtete, azyklische Graphen (Directed Acyclic Graphs, DAG), bei denen die Zu-

fallsgrößen X_i durch Knoten und ihre bedingten Wahrscheinlichkeiten $\Pr(X_i|X_k)$ durch gerichtete Kanten repräsentiert werden. Damit ist es möglich, die statistischen Abhängigkeiten der Variablen untereinander darzustellen und daraus die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsfunktion $p(x_1, \dots, x_n) = \Pr(X_1 = x_1, \dots, X_n = x_n)$ nicht nur zu bestimmen, sondern insbesondere zu vereinfachen und den Rechenaufwand ihrer Ermittlung zu reduzieren [19].

Bayes'sche Netze werden grafisch in Netzen dargestellt, in denen die Startknoten eines Pfeils als Eltern (Parents) und die Endknoten als Knoten (Children) bezeichnet werden. Bild 3-1 (a) zeigt ein Bayes'sches Netz mit einem Child, das die tiefenabhängigen Chloridkonzentration beschreibt. Die beiden Parents, Oberflächenchloridkonzentration und Chloriddiffusionswiderstand, sind unabhängig voneinander, daher kann dieses Netz zur Aktualisierung der (Ersatz-)Oberflächenchloridkonzentration genutzt werden. Für das Updaten des Chloriddiffusionskoeffizienten sind mehrere Childs notwendig, Bild 3-1 (b), die jedes für sich für eine Chloridkonzentration in einer bestimmten Tiefenlage stehen. Die Informationen zur Chloridkonzentration in der entsprechenden Tiefenlage können aus den während einer Inspektion gewonnenen Chloridprofilen gewonnen werden [21].

4 Rechnerische Prognose für ausgewählte Bemessungssituationen

Das bestehende deskriptive Bemessungskonzept XD- und XC-exponierter Brückenbauwerke wird mithilfe der oben aufgeführten voll-probabilistischen Dauerhaftigkeitsmodelle überprüft. Für jede Expositionsklasse (XD, XC) wird in einem Fallbeispiel das Zuverlässigkeitsspektrum bei Bemessung nach [1] – [3] ermittelt.

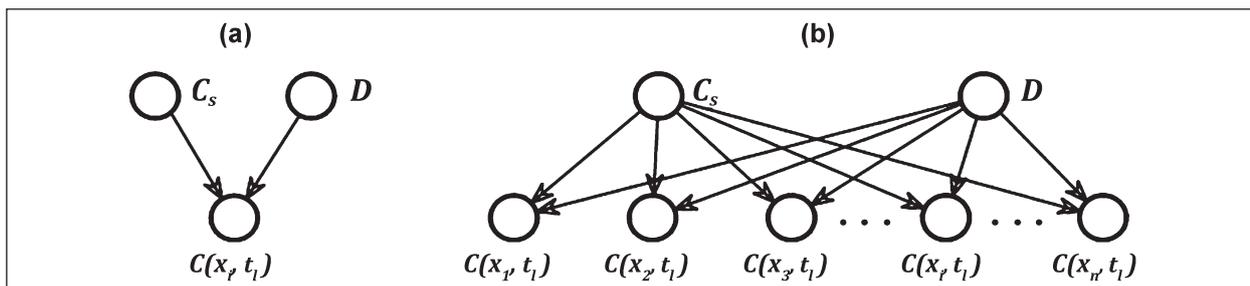


Bild 3-1: Bayes'sches Netzwerk zur Identifizierung von a) Oberflächenchloridkonzentration; b) Chloriddiffusionswiderstand [21]

Jedes einzelne Fallbeispiel steht für ein mögliches Bauteil, das in einer bestimmten Expositionsklasse unter Berücksichtigung der deskriptiven Regeln erbaut wurde. Aufgrund der innerhalb einer Expositionsklassen möglichen Auswahl an Zementarten oder auch w/z-Werten können Betone unterschiedlicher Materialwiderstände verwendet werden. Zudem können auch die klimatischen Bedingungen innerhalb einer Expositionsklasse variieren, wodurch auch die realen Einwirkungen von Bauwerk zu Bauwerk nicht immer vergleichbar sind. So ist im süddeutschen Raum mit einer höheren Chloridbeaufschlagung aufgrund von Winterdienst zu rechnen als in Norddeutschland. Dies könnte bei ungünstiger Kombination von starken Einwirkungen und schwächeren Materialwiderständen zu kritischen Bemessungssituationen führen. Im entgegengesetzten Fall stehen unnötig starke Materialwiderstände sehr schwachen Einwirkungen gegenüber.

Für jede Expositionsklasse und jede Bemessungssituation von Bauwerken im Zuge von Bundesfernstraßen wird eine Fallstudie inklusive Sensitivitätsanalyse gerechnet. Die betrachteten Bauwerke bilden ein breites Spektrum möglicher Umgebungsbedingungen ab. Auf der Widerstandseite wird ein möglichst breites Spektrum an Zementarten, w/z-Werten und Zementgehalt zusammengestellt.

Für beide Modelle, Chlorideindringen und Karbonatisierung, gilt, dass die Modelleingangsparameter entweder der Widerstands- oder der Einwirkungsseite zugeordnet werden können.

Beim Karbonatisierungsmodell gehören die Parameter Karbonatisierungswiderstand, der Übertragungsparameter für die Ausführungsqualität und die Betondeckung zur Widerstandseite und auf der Einwirkungsseite sind die standortspezifischen Informationen für die Parameter relative Luftfeuchtigkeit am Bauwerk, die Regenhäufigkeit, die Schlagregenwahrscheinlichkeit und die CO₂-Konzentration zu nennen.

Als Parameter der Einwirkungen im Modell zum Chlorideindringen sind das Chloridangebot der umgebenen Chloridquelle, der Altersexponent und die Umgebungstemperatur zu berücksichtigen während der Chlorideindringwiderstand und die Betondeckung der Widerstandsseite zu zuordnen sind.

Parallel zur eigentlichen Modellprognose sind sogenannte Sensitivitäts- und Dominanzanalysen

[Anhang] sinnvoll, zur Klärung in welchem Maß die Unsicherheit des Berechnungsergebnisses von den Verteilungen, den Streuungen und den Mittelwerten, der Eingangsvariablen abhängen. Das Maß der jeweiligen Beeinflussung wird in Form von Alphawerten α_R berechnet, die auch als Wichtungsfaktoren bezeichnet werden. Anders als bei der klassischen Sensitivitätsanalyse geschieht dies jedoch im Rahmen der SORM-Berechnung unter Berücksichtigung der Variabilität aller Variablen. In dem zur Berechnung dieser Sensitivitätsmaße verwendeten Programm STRUREL [22] wird die absolute Änderung des Zuverlässigkeitsindex β infolge der Variation des Mittelwerts oder der Standardabweichung um 1 % als Sensitivität bezeichnet. Das dementsprechende relative Sensitivitätsmaß wird als Elastizität e bezeichnet. Die Elastizitäten können somit als normierte Sensitivitäten betrachtet werden [22].

4.1 Standortwahl

Für die Zusammenstellung der Bemessungssituationen werden zunächst exemplarisch klimatische Daten von verschiedenen Orten in Deutschland mit schwacher und starker Einwirkung herausgesucht.

Die einzelnen Standorte wurden aus folgenden Gründen ausgewählt: Essen weist eine sehr hohe ToW (Gleichung (3-11)) aus und kann wahrscheinlich repräsentativ für das Ruhrgebiet mit seinen vielen Infrastrukturbauwerken stehen. In Berlin stehen zum einen viele Messstationen zur Verfügung, zum anderen ist im Stadtzentrum im Vergleich zum Flughafen am Stadtrand mit einer höheren mittleren Durchschnittstemperatur zu rechnen, die auch einen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit ausüben könnte. Die höchsten mittleren Temperaturen treten im Rheingraben auf. Exemplarisch dafür werden die Klimadaten von Mannheim hergenommen, da dort auch eine hohe Autobahndichte ist. Der Standort Bremen steht stellvertretend für eine Gegend mit hoher Luftfeuchtigkeit. Als fünfte Station wird aufgrund der niedrigen mittleren Temperaturen und aufgrund des im Winter dort erwartet hohen Taumitteleinsatzes der südliche Verkehrsknotenpunkt München in die Parameterstudie mit aufgenommen. Die vorhandenen Klimadaten sind in Tabelle 4-1 zusammengefasst. Die Werte sind über den Zeitraum zwischen 2000 und 2016 gemittelt.

4.2 Festlegung der Bemessungssituationen

Die Auswahl der schwachen und starken Materialwiderstände orientiert sich an den zuvor aufgeführten Tabellen. Die folgenden Bemessungssituationen für XC- (siehe Tabelle 4-2) und XD-Exposition (siehe Tabelle 4-3) werden voll-probabilistisch gerechnet. Der Index 1 steht für die Kombination starke Einwirkung mit niedrigem Materialwiderstand. Dem gegenüber steht der Index 2 für die Berücksichtigung von geringen Einwirkungen mit hohen Materialwiderständen.

Bei Brückenbauwerken ist davon auszugehen, dass wenn eine XC-Exposition vorliegt, das Bauteil ebenso einer XD-Exposition als auch einer XF-Exposition ausgesetzt ist. Da die XD bzw. XF-Exposition stets die höheren Materialwiderstände fordert und

diese somit maßgebend werden, wird dies entsprechend in den Bemessungssituationen der XC-Exposition berücksichtigt. Aber auch innerhalb der zulässigen Betonzusammensetzungen können die Widerstände gegenüber Karbonatisierung und Chlorideinwirkung schwanken. Für die Bemessungssituationen werden jeweils die stärksten und schwächsten Materialwiderstände berechnet, um die Ränder an möglichen Materialwiderständen abzubilden.

Zur Abbildung der stärksten und schwächsten Einwirkungen wird aus den Standortdaten aus Tabelle 4-1 für jede Expositionsklasse die günstigen und die ungünstigen Klimadaten herausgesucht und der entsprechenden Bemessungssituation zugeordnet. Beispielsweise sind für die Expositionsklasse XC4 die Standorte mit dem niedrigsten und größten Regenhäufigkeit ausgewählt wurden. Die für diese

Stadt	mittlere Temperatur [°C]		Regen, ToW [-]	mittlere Luftfeuchtigkeit [%]	
	μ^*	σ^*		μ^*	σ^*
Berlin Alexanderplatz	11,04	7,97	0,20	70,66	14,31
Berlin Schönefeld	9,90	7,82	0,18	77,20	13,18
Bremen	9,93	6,80	0,23	80,28	10,68
Essen	10,56	6,73	0,28	77,53	12,68
Mannheim	11,36	7,49	0,21	74,12	13,16
München	10,20	7,89	0,26	73,93	13,23

* μ : Mittelwert; σ : Standardabweichung

Tab. 4-1: Zusammenstellung der Klimadaten ausgesuchter Standorte

Zementart	XC2_1	XC2_2	XC3_1	XC3_2	XC4_1	XC4_2
	CEM III	CEM I	CEM III	CEM I	CEM III	CEM I
w/z-Wert	0,75	0,75	0,65	0,65	0,6	0,6
Z.-gehalt	240	240	260	260	280	280
Betondeck.	20	20	20	20	25	25
w/z-Wert*	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Z.-gehalt*	320	320	320	320	320	320
Parameter	$\mu; \sigma$					
Betondeck.*	45; 3	45; 3	45; 3	45; 3	45; 3	45; 3
+ Vorhaltermaß	55; 9	55; 9	55; 9	55; 9	55; 9	55; 9
$R_{ACC,0}^{-1}$	8.392; 2.814	2.145; 971	8.392; 2.814	2.145; 971	8.392; 2.814	2.145; 971
RH_{IST}	90	90	70,7; 14,3	80,3; 10,7	77,2; 13,2	77,5; 12,7
ToW	0,02	0,8	0	0	0,18	0,28
p_{SR}	1	1	0	0	0,2	0,6

* Anforderung aus XF- und XD-Exposition

Tab. 4-2: Bemessungssituationen für XC-Exposition

Zementart	XD1_1	XD1_2	XD2_1	XD2_2	XD3_1	XD3_2
	CEM I	CEM III/B	CEM I	CEM III/B	CEM I	CEM III/B
w/z-Wert	0,55	0,55	0,5	0,5	0,5	0,5
Z.-gehalt	300	300	320	320	320	320
w/z-Wert*	0,5	0,5				
Z.-gehalt*	320	320				
Parameter	$\mu; \sigma$					
Betondeck. + Vorhaltemaß	45; 3 55; 9					
$D_{RCM}(t_0)$	15,8; 3,16	2,8; 0,56	15,8; 3,16	2,8; 0,56	15,8; 3,16	2,8; 0,56
α_{RCM}	0,65; 0,12	0,65; 0,12	0,3; 0,12	0,45; 0,2	0,3; 0,12	0,45; 0,2
T_{real}	284,4; 7,5	283; 6,8	284,4; 7,5	283; 6,8	284,4; 7,5	283; 6,8
$C_{S,\Delta x}$	1,5; 1,1	0,5; 0,4	4,0; 3,0	2,0; 1,5	4,0; 3,0	2,0; 1,5
Δx	0	0	0	0	10; 5	10; 5

* Anforderung aus XF-Exposition

Tab. 4-3: Bemessungssituationen für XD-Exposition

Standorte gemessene Luftfeuchtigkeit wird ebenfalls übernommen.

Für Bauteile der Expositionsklasse XC1 ist ein Nachweis ausreichender Dauerhaftigkeit bezogen auf den Grenzzustand Depassivierung nicht sinnvoll [13], [14]. Daher wird dieser Fall nicht in die Bemessungssituationen mit aufgenommen.

Die Bemessungssituationen der XD-Exposition sind in Tabelle 4-3 zusammengefasst. Für die XD1-Exposition wurde unabhängig von der Zementart ein Alterungsexponent von 0,65 festgelegt [7]. Abweichend von der EN 206-1:2000/EN 206:2013 [4] wird in der ZTV-ING [1] für XD3-Exposition ein w/z-Wert von maximal 0,5 gefordert. Die Werte für die realen Temperaturen wurden aus den Standortdaten aus Tabelle 4-1 ausgewählt, während die Annahmen für Oberflächenchloridkonzentration und der Ersatzfläche aus Tabelle 3-10 übernommen wurden.

4.2.1 Streuung der Betondeckung

In Anlehnung an fib 76 [7] wird der nominale Wert der Betondeckung als Mittelwert angenommen. Die Standardabweichung der Betondeckung berücksichtigt, dass bei geringeren Betondeckungen oftmals höhere Anforderungen an die Ausführungsqualität gestellt werden, wie beispielsweise bei der Fertigteilherstellung. Die minimale Betondeckung ist definiert als das 5%-Quantil der Normalverteilung. Die Standardabweichung wird folgendermaßen berechnet, Gleichung (4-1):

$$U_{0,05} = \mu + \sigma \cdot u_{0,05} \quad (4-1)$$

mit

$U_{0,05}$ 5%-Quantil der normalverteilten Betondeckung [mm]

μ Mittelwert der normalverteilten Betondeckung [mm]

σ Standardabweichung der normalverteilten Betondeckung [mm]

$u_{0,05}$ 5%-Quantil der Normalverteilung

Das Vorhaltemaß für Betonbrücken beträgt nach [3] 5 mm, das somit bei der Betondeckung für die Lebensdauerbemessung berücksichtigt wird. Darüber hinaus wird ein Vorhaltemaß von 15 mm in die Parameterstudie miteinbezogen.

Folgend aus der Berechnung nach Gleichung (4-1) ergibt sich bei einer Mindestbetondeckung $c_{min} = 40$ mm für eine mittlere Betondeckung von 45 mm eine Standardabweichung von 3 mm und bei einer mittleren Betondeckung von 55 mm liegt die Standardabweichung bei 9 mm. Die dazugehörigen Verteilungen sind in Bild 4-1 dargestellt.

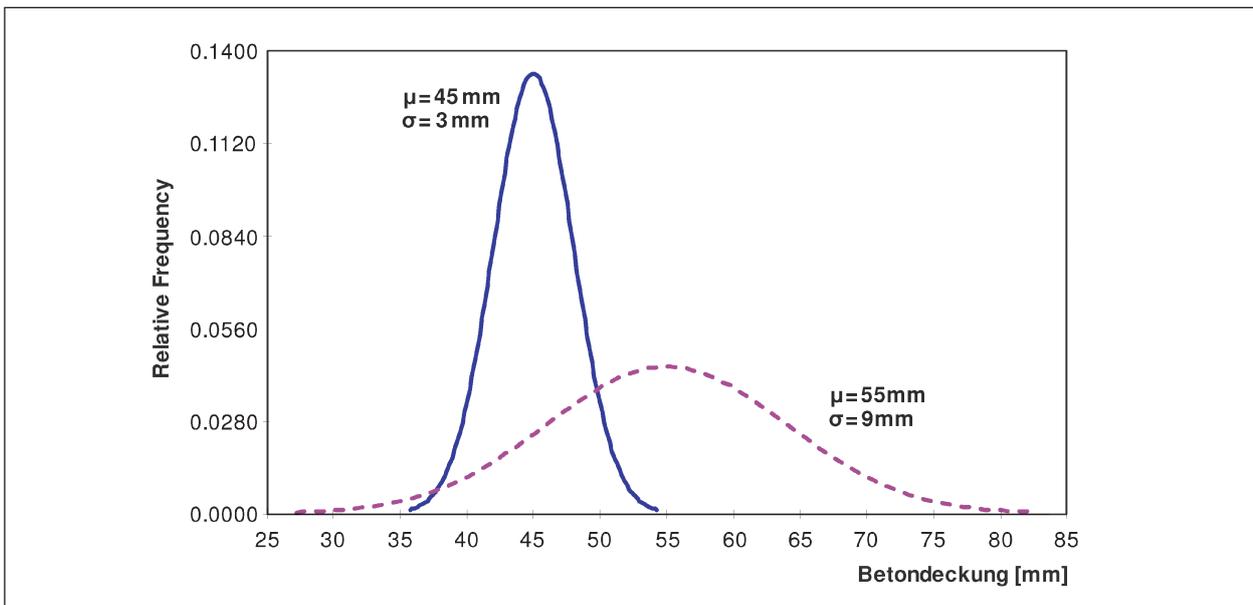


Bild 4-1: Verteilungen der Betondeckungen $c_{\min} = 40$ mm mit Vorhaltemaß 5 mm und 15 mm

4.3 Einfluss des Rechenverfahrens

Für die Berechnung der Lebensdauerprognosen sind Grenzzustandsfunktionen mit mehreren Zufalls- und Basisvariablen zu lösen, die n -dimensionalen Integralen entsprechen. Zur Lösung dieser Integrale stehen Approximationsverfahren 1. und 2. Ordnung (FORM: First Order Reliability Method, SORM: Second Order Reliability Method) oder die Monte-Carlo-Simulation zur Verfügung. In der Monte-Carlo-Simulation wurden 10.000 Simulationen durchgeführt.

In den Diagrammen (Bild 4-2) werden die unterschiedlichen Approximationsverfahren miteinander verglichen. Für die Gegenüberstellung wurden die Bemessungssituationen XC3_1_55 und XD3_2_55 ausgewählt. Für eine bessere Vergleichbarkeit sind ausgesuchte Ausschnitte eingefügt.

Der Vergleich der Rechenverfahren zeigt, dass das Approximationsverfahren SORM i. d. R. leicht höhere Zuverlässigkeit berechnet als das Approximationsverfahren FORM. Bei sehr flachen Kurvenbereichen kann dies dazu führen, dass die verfahrensabhängig berechnete Zuverlässigkeit zum Zeitpunkt t mit einer konkreten Grenzwertzuverlässigkeit verglichen zu unterschiedlichen Lebensdauern führt. Nach 50 Jahren liegt die Differenz der Zuverlässigkeit bei XC-Exposition bei 0,08 und bei XD-Exposition bei 0,10. Nach 100 Jahren verändert sich die Differenz zu 0,11 (XC) bzw. 0,10 (XD). Die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation streuen um die Werte der SORM-Berechnung.

Alle voll-probabilistischen Berechnungen wurden mit dem Programmpaket STRUREL der RCP GmbH durchgeführt [22]. Die Berechnung der Grenzzustandsgleichung erfolgt in den nachfolgenden Ergebnisdarstellungen ausschließlich mit SORM.

4.4 Ergebnisse zur Zuverlässigkeitsentwicklung

In diesem Kapitel werden zunächst die Dauerhaftigkeitsbemessungen der zuvor definierten Bemessungssituationen getrennt nach Expositionsklasse vorgestellt. Nach den Ergebnissen der Zuverlässigkeitsentwicklung wird die Sensitivitäts- und die Dominanzanalyse diskutiert.

4.4.1 Zuverlässigkeitsspektren der XC-Exposition

Die Zuverlässigkeitsentwicklung der Bemessungssituationen nach XC-Exposition sind in Bild 4-3 zusammengefasst. Der letzte Index in der Bemessungssituation steht stellvertretend für die Betondeckung inklusive Vorhaltemaß. Als Variation des Vorhaltemaßes wurden 5 und 15 mm angesetzt.

In der Expositionsklasse XC2, die für eine erhöhte Feuchtebeaufschlagung steht, kann eine Zuverlässigkeit von $\beta = 1,5$ über einen Zeitraum von 100 Jahren auch bei ungünstiger Bemessungssituation (hohe Einwirkungen bei niedrigen Materialwiderständen) sicher eingehalten werden. Die Zuverlässig-

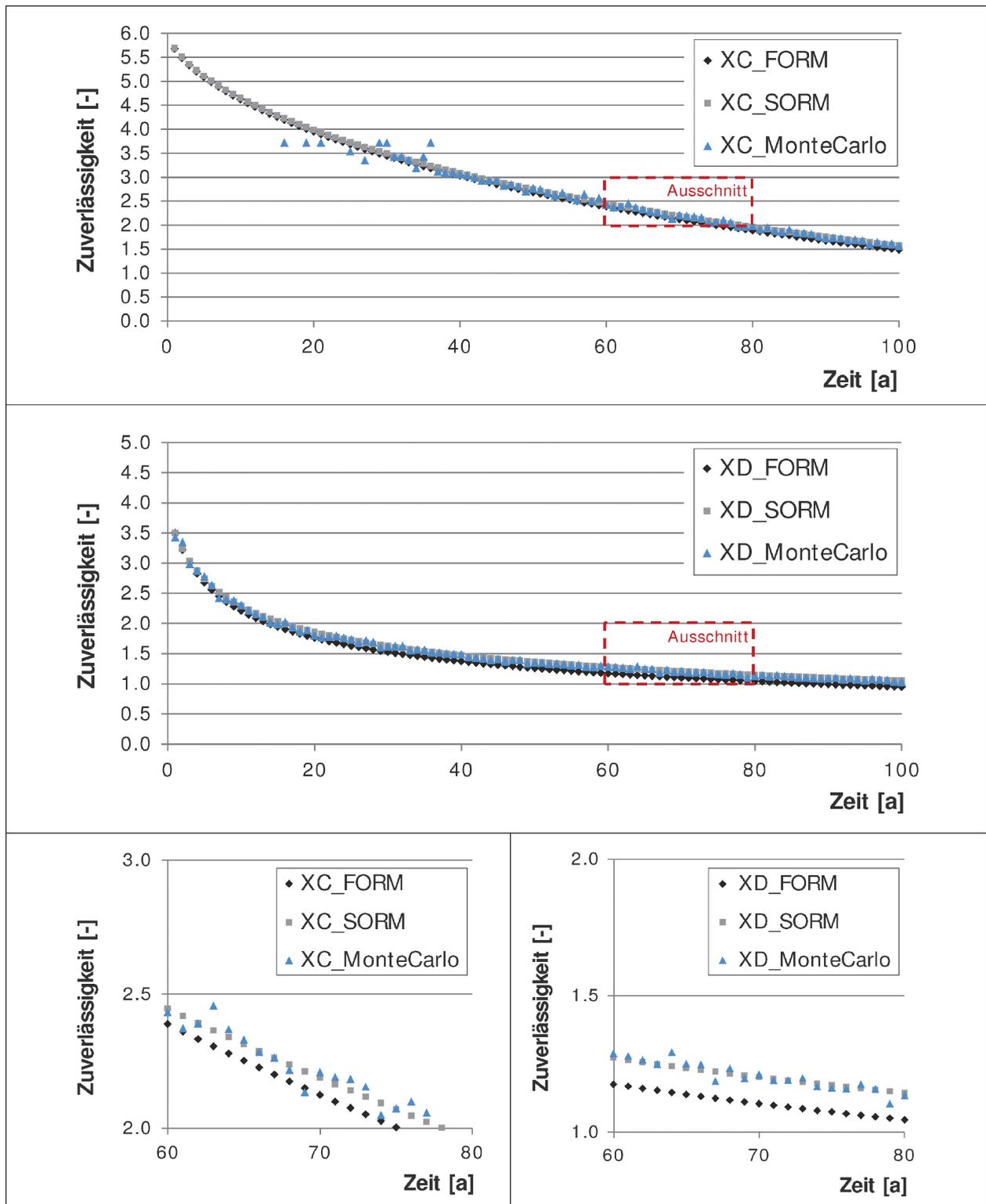


Bild 4-2: Zuverlässigkeitsentwicklung im Vergleich der Rechenverfahren FORM, SORM und Monte-Carlo (10.000 Simulationen) für die Bemessungssituationen XC3_1_55 und XD3_2_55

sicherheit liegt rechnerisch auch nach 100 Jahren noch größer als 4. Bei schwachen Einwirkungen gegen hohe Materialwiderstände sinkt β nie tiefer als 14,5 und ist weit auf der sichereren Seite im Vergleich zur Zielzuverlässigkeit von 1,5.

In der Expositionsklasse XC3 kann die Zielzuverlässigkeit von $\beta = 0,5$ sicher über einen Zeitraum von 100 Jahren eingehalten werden. Bei der ungünstigen Kombination von niedrigen Materialwiderständen zu starken Einwirkungen wird nach 100

Jahren rechnerisch ein β von ca. 1 erreicht. In der gegensätzlichen Kombination von schwachen Einwirkungen und starken Materialwiderständen wird nach 100 Jahren ein β von ca. 4 berechnet.

In der wechselnd nass-trockenen Expositionsklasse XC4 ist die Zielzuverlässigkeit von $\beta = 1,5$ auch unter ungünstigen Kombinationen von Materialwi-

derständen und Einwirkungen rechnerisch sichergestellt. Selbst bei schwachen Materialwiderständen mit hohen Einwirkungen wird nach 100 Jahren noch ein β von 3,6 erreicht.

Bei den zuvor diskutierten Ergebnissen ist zu beachten, dass bei XC-Expositionen von Brückenbauwerken meist die Anforderungen aus den XD-Expo-

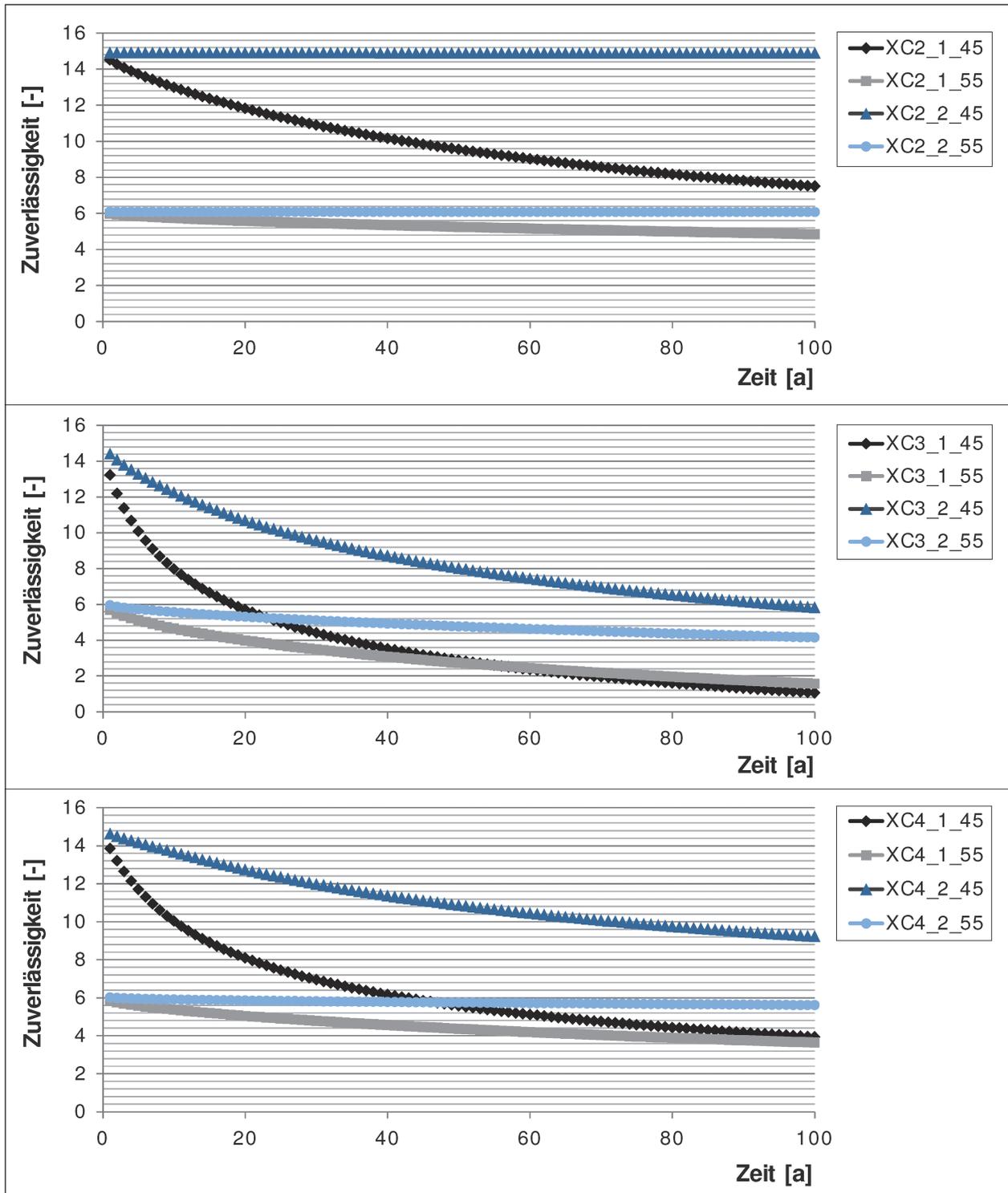


Bild 4-3: Zuverlässigkeitsentwicklung der Bemessungssituationen nach XC-Exposition

sitionen maßgebend sind. Dies wurde auch bei den hier vorgestellten Bemessungssituationen berücksichtigt. Auf Bauwerke mit reiner XC-Exposition sind diese Ergebnisse nicht übertragbar.

In allen betrachteten Expositionsklassen fällt auf, dass bei höherer Betondeckung zunächst eine niedrigere Zuverlässigkeit erreicht wird. Dieses Ergebnis wird unter Einbezug der Sensitivitäts- und Dominanzanalyse in Kapitel 4.4.2 diskutiert.

4.4.2 Sensitivitäts- und Dominanzanalyse der XC-Expositionen

Die Sensitivitätsanalysen [Anhang] der Bemessungssituationen der XC-Expositionsklassen sind in Bild 4-4 dargestellt. Der Vektor der α -Werte wurde dafür zu 1 normalisiert und die Werte im Kuchen diagramm entsprechen dem Quadrat der α -Werte (Gleichung 9-3).

Im überwiegenden Teil der Bemessungssituationen und besonders in der Expositionsklasse XC2 ist die

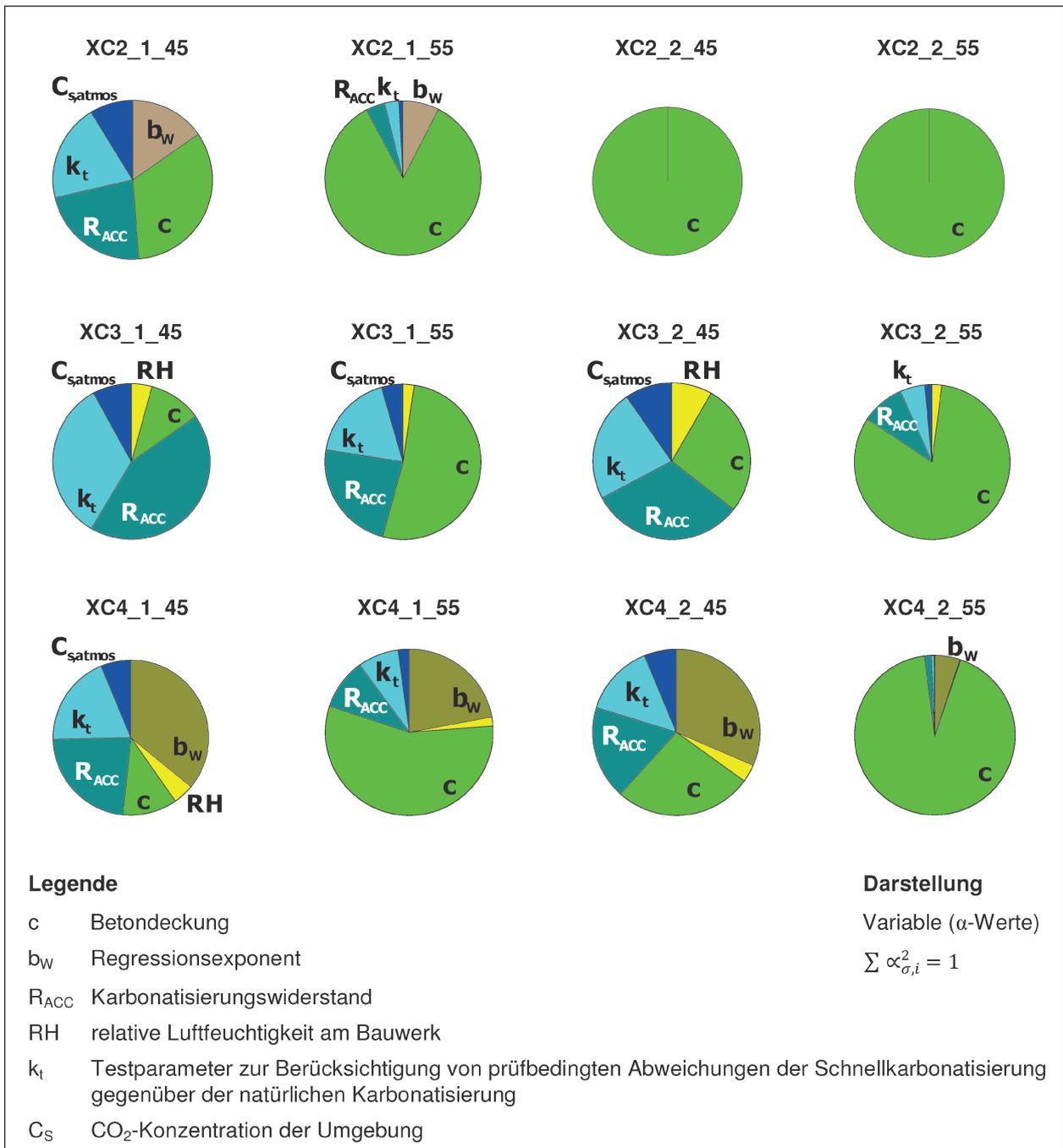


Bild 4-4: Sensitivitätsanalyse für die Bemessungssituationen bei XC-Exposition zum Zeitpunkt 100 Jahre

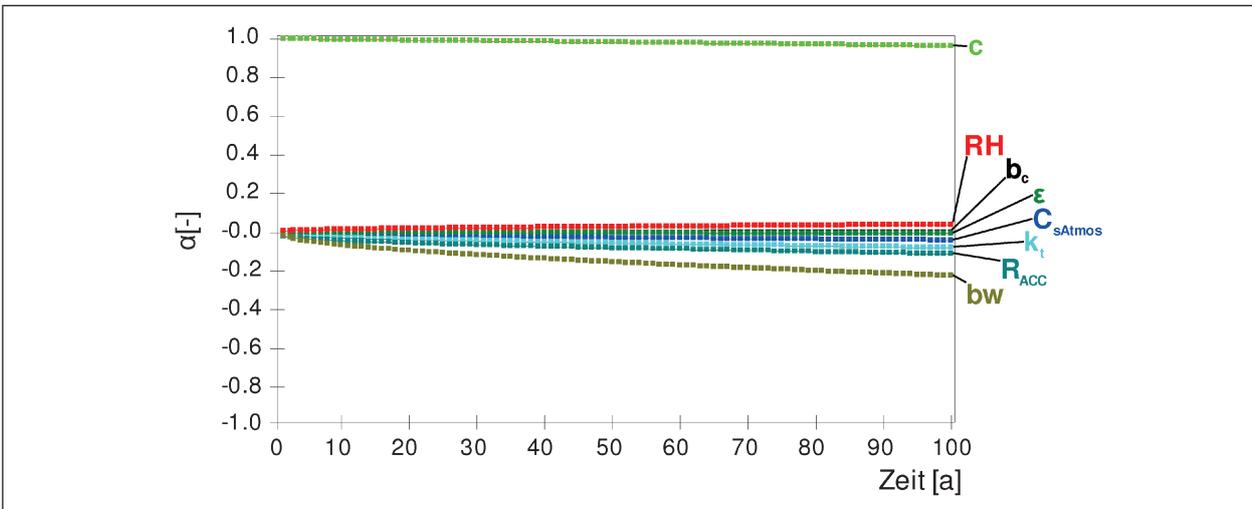


Bild 4-5: Alpha-Werte in Abhängigkeit der Zeit von Bemessungssituation XC4_2_55

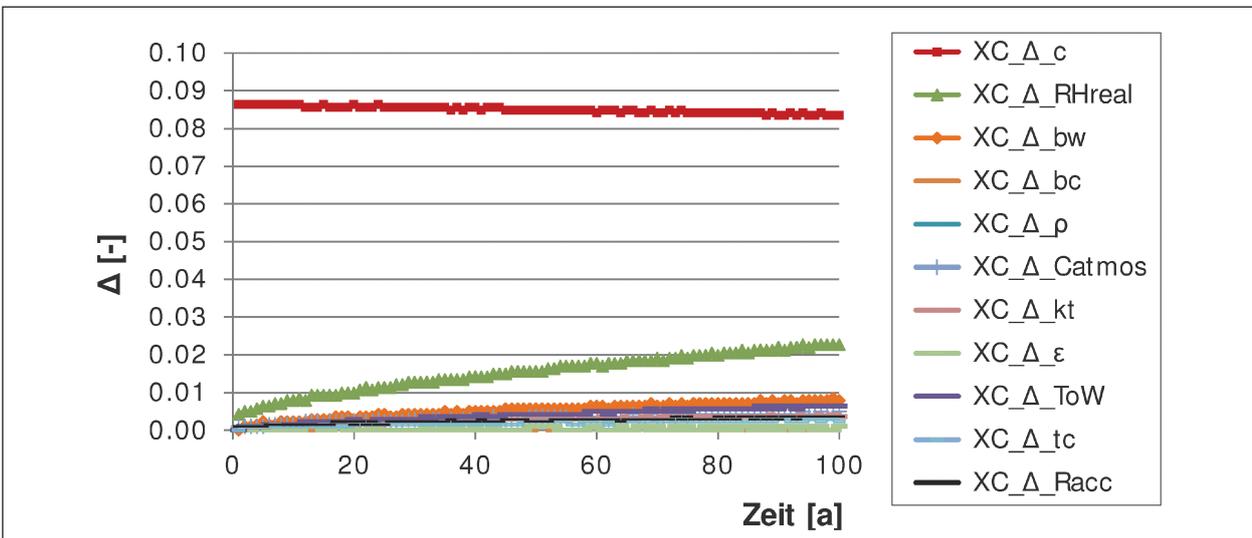


Bild 4-6: Dominanzanalyse für die Bemessungssituation XC4_2_55 in Abhängigkeit der Zeit

Betondeckung der sensitivste Parameter. Zusätzlich kann abgeleitet werden, dass mit steigender Betondeckung auch deren Sensitivität ansteigt. In der Expositionsklasse XC3 zeigen sowohl der Karbonatisierungswiderstand als auch der Testparameter eine hohe Sensitivität. Der Regressionsexponent wirkt sich besonders in der Expositionsklasse XC4 sensitiv aus. Allen anderen Modelleingabeparameter zeigen nur eine geringe bis vernachlässigbare Sensitivität auf das Modellergebn.

Die Zeitabhängigkeit der Alpha-Werte ist vernachlässigbar, wie Bild 4-5 am Beispiel der Bemessungssituation XC4_2_55 beispielhaft zeigt.

An der ausgesuchten Bemessungssituation XC4_2_55 wird zusätzlich eine Dominanzanalyse durchgeführt. Bild 4-6 zeigt die Dominanzen in Abhängigkeit der Zeit und während in Bild 4-7 die normierten

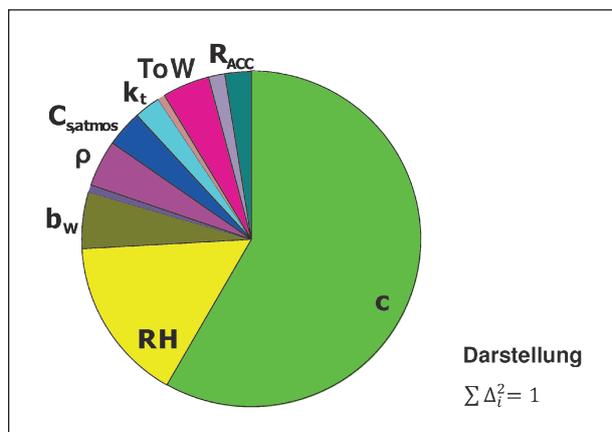


Bild 4-7: Normierte Dominanzanalyse für die Bemessungssituation XC4_2_55 zum Zeitpunkt 100 Jahre

Dominanzen zum Zeitpunkt 100 Jahre dargestellt sind.

Die Dominanzanalyse der Bemessungssituation XC4_2_55 zeigt die Betondeckung als mit Abstand dominantesten Parameter. Der Einfluss der Betondeckung sinkt leicht über den Zeitraum von 100 Jahren ab, während der Einfluss der anderen Eingangsparameter ansteigt. Am stärksten ist der Anstieg des Einflusses der Luftfeuchtigkeit, die nach der Betondeckung der dominanteste Parameter ist. Der Einfluss aller weiteren Parameter auf die Dominanz ist vernachlässigbar.

Aus den Ergebnissen der Sensitivitäts- und Dominanzanalyse kann abgeleitet werden, dass für die Modellierung des Karbonatisierungsfortschritts in den meisten Fällen die Betondeckung der sensitivste und der dominanteste Eingabeparameter ist. Dieses Erkenntnis erklärt den Sachverhalt, dass trotz größerem Vorhaltemaß, also bei größerer Betondeckung, die Zuverlässigkeitsentwicklung zum Teil unterhalb der Zuverlässigkeitsentwicklung der gleichen Bemessungssituation mit geringerem Vorhaltemaß liegt, siehe Bild 4-3. Im Fall der größeren Vorhaltemaßen wurde mit einer größeren Streuung der Betondeckung gerechnet. Die Verteilung der höheren Betondeckung weist bei den niedrigen Werten eine höhere Auftretenswahrscheinlichkeit auf, siehe Bild 4-1. Durch die größere Streuung ergibt sich auch eine größere Unsicherheit, die sich in der niedrigeren Zuverlässigkeitsentwicklung widerspiegelt. Die Unsicherheit aus den Betondeckungswerten kann einfach und schnell durch die Bestimmung der realen Betondeckungsmessung am Bauwerk reduziert werden.

4.4.3 Zuverlässigkeitsspektren der XD-Exposition

Bild 4-8 zeigt die Zuverlässigkeitsentwicklung für die untersuchten Bemessungssituationen der XD-Expositionsklassen.

In der Expositionsklasse XD1, die durch eine mäßige Feuchte charakterisiert ist, kann die hier zunächst angesetzte Zielzuverlässigkeit von $\beta = 1,5$ bei starker Einwirkung und schwachem Materialwiderstand rechnerisch nicht über 100 Jahre eingehalten werden. Im Fall des geringeren Vorhaltemaßes der Betondeckung erreicht β nach ca. 85 Jahren einen Wert unter 1,5. Liegen jedoch hohe Materialwiderstände bei schwachen Einwirkungen vor, fällt die Zuverlässigkeit rechnerisch auch nach 100 Jahren nicht unter 3,8 und ist damit auf der sicheren Seite.

Ist ein Bauteil eher nass und selten trocken und kann somit der Expositionsklasse XD2 zugeordnet werden, wird die Zielzuverlässigkeit von $\beta = 0,5$ schon nach wenigen Jahren im Fall der ungünstigen Bemessungssituation unterschritten. Liegt hingegen eine günstige Bemessungssituation vor, fällt die Zuverlässigkeit nicht unter einen Wert von 1.

Auch unter einer wechselnd nass-trocken Umgebung der XD3-Exposition wird die Zielzuverlässigkeit von 0,5 bei ungünstiger Kombination von Einwirkung und Materialwiderstand unterschritten. Es ist nach wenigen Jahren mit einer Depassivierung der Bewehrung zu rechnen. Bei schwachen Einwirkungen, starken Materialwiderständen und geringem Vorhaltemaß wird nach 100 Jahren lediglich ein β von 0,8 erreicht. Auch für Bauteile der XD3-Exposition, die nach den Anforderungen der deskriptiven Dauerhaftigkeitsbemessung erstellt worden sind, kann rechnerisch die Initiierung von Bewehrungskorrosion innerhalb der geplanten Lebensdauer nicht ausgeschlossen werden.

Im Gegensatz zur XC-Exposition hat bei den XD-Expositionen die Variation des Vorhaltemaßes einen wesentlich geringeren Einfluss.

4.4.4 Sensitivitäts- und Dominanzanalyse der XD-Exposition

Nachfolgend sind die Sensitivitätsanalysen der Bemessungssituationen der XD-Expositionsklassen ausgewertet (siehe Bild 4-9).

Über alle Bemessungssituationen der XD-Exposition hinweg ist der Alterungsexponent der sensitivste Eingabeparameter gefolgt von der Oberflächenchloridkonzentration. Je günstiger (hohe Materialwiderstände vs. schwache Einwirkung) die Bemessungssituation desto sensitiver ist der Einfluss des Alterungsexponenten. Einen geringen sensitiven Einfluss haben die Temperatur und der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt, während die restlichen Parameter kaum von Bedeutung sind.

Die Zeitabhängigkeit der repräsentativen Alpha-Werte zeigt Bild 4-10 am Beispiel der Bemessungssituation XD3_2_55.

In den ersten Jahren zeigt sich eine Zeitabhängigkeit des Altersexponenten, der Betondeckung und der Ersatzoberfläche, die aber mit fortschreitenden Jahren vernachlässigbar wird. Bei den restlichen Eingabeparametern ist die Zeitabhängigkeit der Alpha-Werte nicht sehr ausgeprägt.

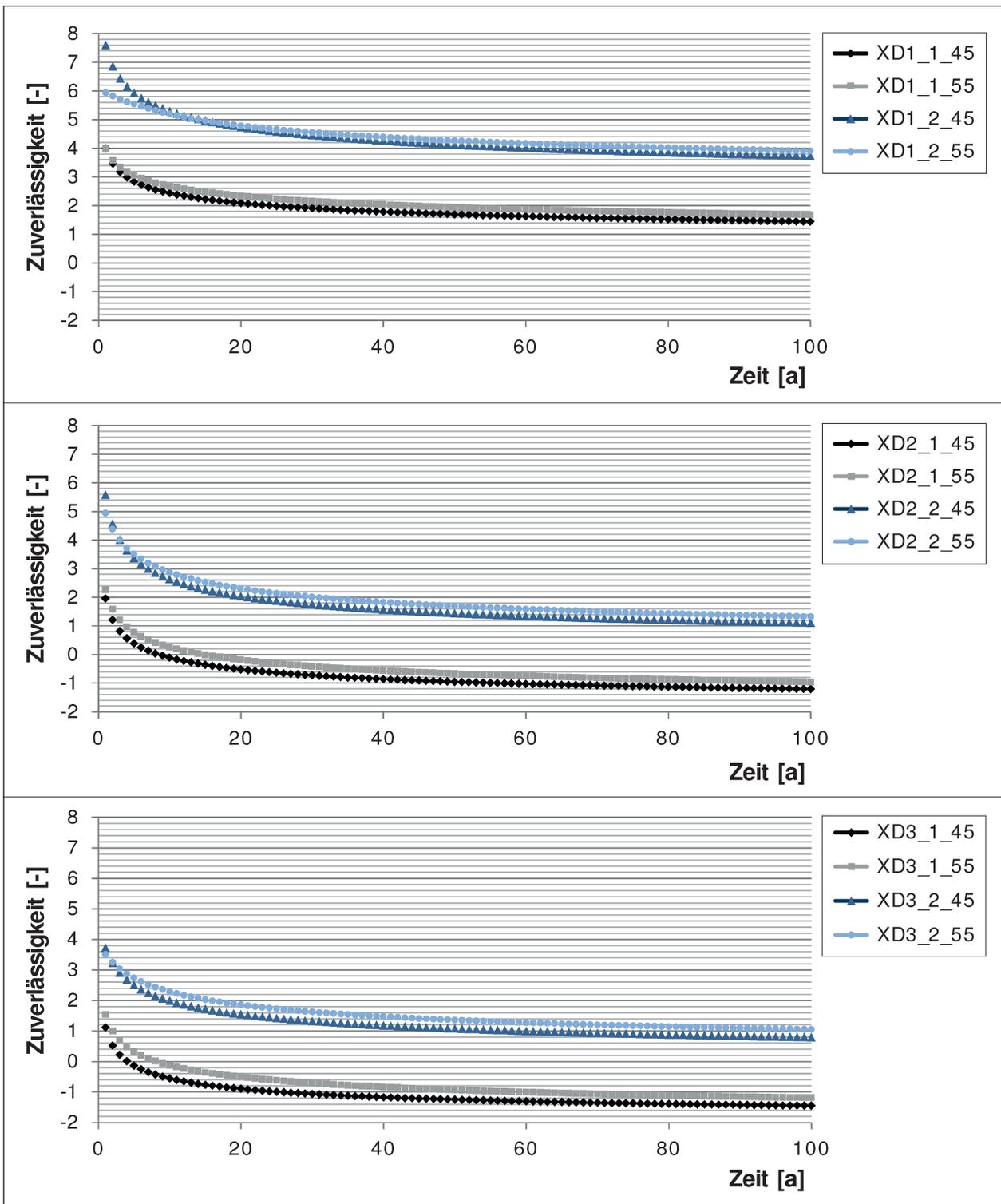


Bild 4-8: Zuverlässigkeitsentwicklung der Bemessungssituationen nach XD-Exposition

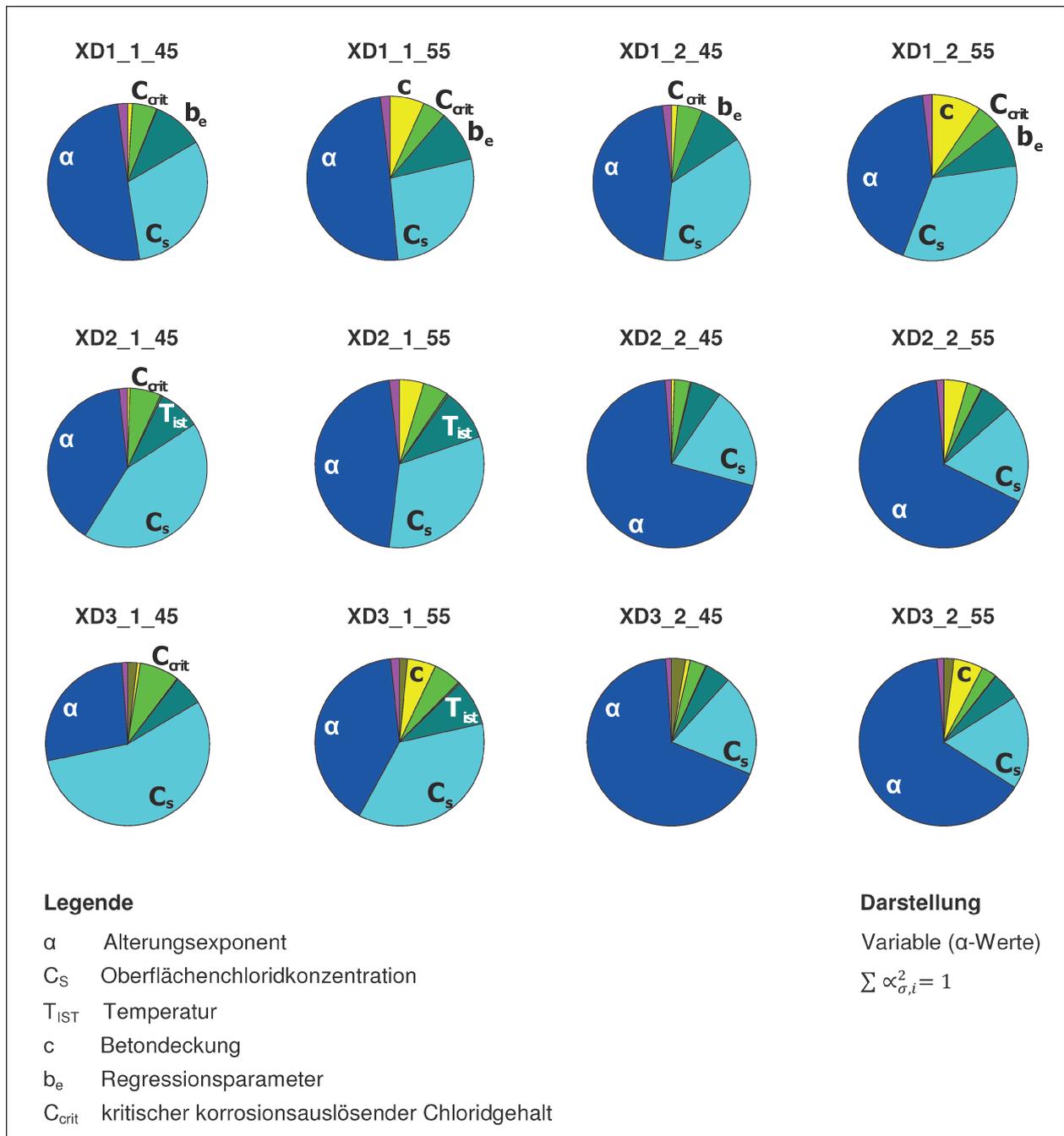


Bild 4-9: Sensitivitätsanalyse für die Bemessungssituationen bei XD-Exposition

Die Dominanzanalyse in der XD-Exposition wird an der Bemessungssituation XD3_2_55 exemplarisch durchgerechnet. Bild 4-11 zeigt die Dominanzen in Abhängigkeit der Zeit, während in Bild 4-12 die normierten Dominanzen zum Zeitpunkt 100 Jahre dargestellt sind.

In der Modellierung des Chlorideindringens in Beton zeigt die Temperatur den dominantesten Einfluss gefolgt von einem wesentlich schwächeren

Einflusses der Betondeckung und der Konvektionszone. Der Einfluss der restlichen Eingabeparameter ist vernachlässigbar.

Zusammenfassend aus Sensitivitäts- und Dominanzanalyse der XD-Exposition kann abgeleitet werden, dass bei einer sehr genauen Bestimmung der Eingabeparameter Alterungsexponent, Oberflächenchloridkonzentration und Temperatur die Modellunsicherheit reduziert werden kann.

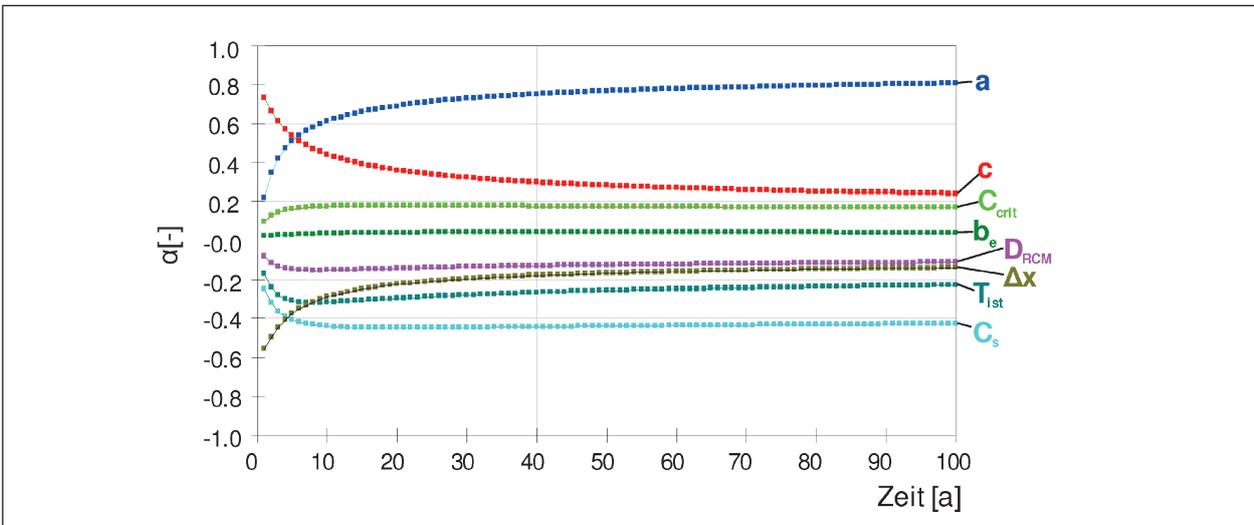


Bild 4-10: Alpha-Werte in Abhängigkeit der Zeit von Bemessungssituation XD3_2_55

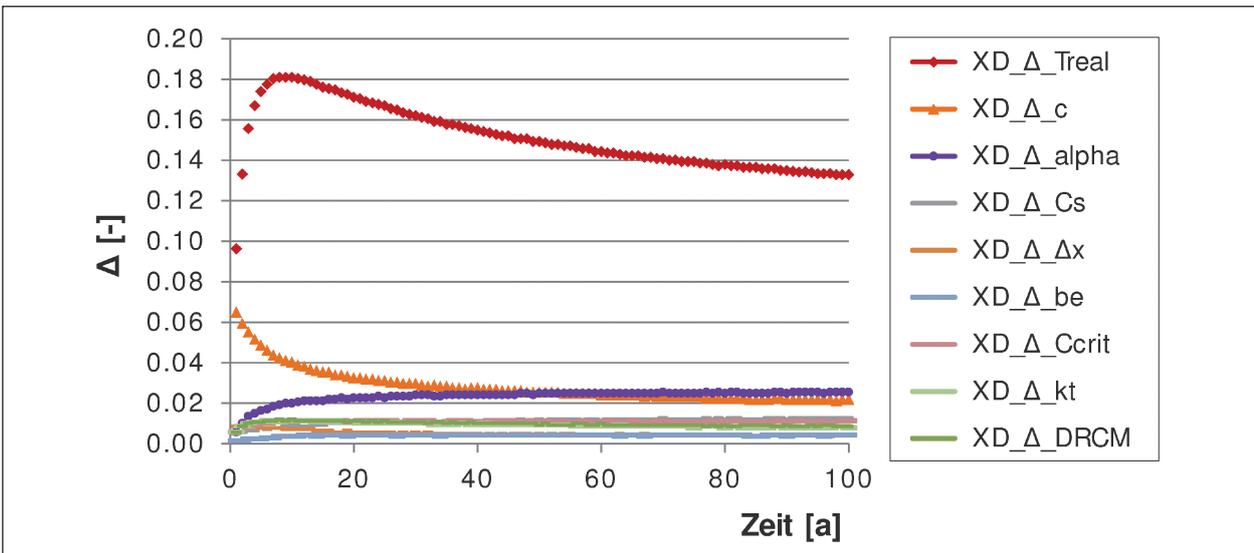


Bild 4-11: Dominanzanalyse für die Bemessungssituation XD3_2_55

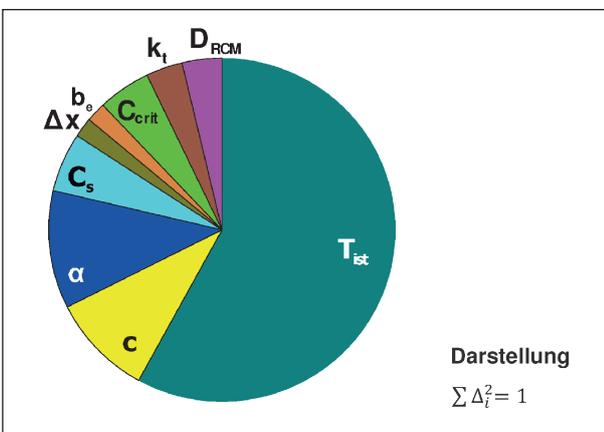


Bild 4-12: Normierte Dominanzanalyse für die Bemessungssituation XD3_2_55 zum Zeitpunkt 100 Jahre

5 Überprüfung der Dauerhaftigkeitsbemessung anhand von Inspektionsdaten

Für die Überprüfung der Annahmen aus der Dauerhaftigkeitsbemessung stehen Inspektionsdaten aus unterschiedlichen Brücken- und auch aus zwei Tunnelbauwerken zur Verfügung. Eine Übersicht über die ausgewählten Ingenieurbauwerke gibt Tabelle 5-1.

Die Inspektionsdaten aus den Ingenieurbauwerken werden zum einen dazu genutzt, Eingabeparameter der Modelle zu fitten und mit den Annahmen der Bemessungssituationen zu vergleichen. Zum anderen werden die Inspektionsdaten zum Update der Lebensdauerprognose herangezogen, um das Modellergebnis zu überprüfen. Als Soll-Zustand wird die a priori Berechnung definiert, die meist auf Basis der Planungsdaten berechnet werden kann. Der Ist-Zustand wird a posteriori berechnet, nachdem eine Bauwerksinspektion stattgefunden hat und deren Ergebnisse in die Modellanalyse eingebunden werden.

In fast allen Ingenieurbauwerken liegen Inspektionsdaten zur Betondeckung vor. In beiden Modellen (Chlorideindringen, Karbonatisierung) ist die Betondeckung ein wichtiger Parameter auf der Widerstandsseite. Mithilfe der realen Messdaten zur

Betondeckung kann das Aktualisieren der Modellprognose einfach über eine erneute Berechnung der Zuverlässigkeit erfolgen. Bei allen Bauwerken, die Chloridexposition ausgesetzt sind, stehen zusätzlich noch Chloridprofile aus Inspektionen zur Verfügung, aus denen der Chlorideindringwiderstand und die Oberflächenchloridkonzentration abgeleitet werden.

5.1 Vorstudie zum Fitten der Modelleingabeparameter: Bayes'sche Netze vs. Regressionsanalyse

Für die Bestimmung von Chlorideindringwiderstand und Ersatzoberflächenchloridkonzentration aus Inspektionsdaten, d. h. aus Chloridprofilen, können Regressionsanalysen und Bayes'sche Netzwerke verwendet werden. Der große Unterschied zwischen beiden Verfahren ist, dass bei der Regressionsanalyse ein einzelnes Chloridprofil gefittet wird, während beim Bayes'schen Netzwerk die Wahrscheinlichkeitsdichten von Chloridkonzentrationen in unterschiedlichen Tiefenlagen zur Aktualisierung der Modelleingabeparameter herangezogen werden (siehe Bild 5-1).

TRAN et al. [21] haben auf Basis von virtuell generierten Chloridprofilen gezeigt, dass die Anwendung von Bayes'schen Netzwerken für das Update von Modelleingabeparametern möglich ist. Die Herausforderung für die Übertragung des Modells nach Tran auf reale Bauwerke besteht nun darin, mit kleinen Datensätzen, d. h. so wenig Chloridprofilen wie möglich, Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen von Chloridgehalten je Tiefenlage zu bestimmen. Für die Ermittlung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen sind einige, wenige Randbedingungen einzuhalten. Für eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion dürfen nur Chloridgehalte einer Tiefenlage aus einer vergleichbaren Exposition und einer vergleichbaren Betonzusammensetzung zusammengefasst werden. Sollte Unsicherheit darüber bestehen, ob die Daten einer vergleichbaren Exposition und einer vergleichbaren Betonzusammensetzung zu geordnet werden können, also zu einer Wahrscheinlichkeitsdichte gehören, so können einfache statistische Tests [22] zur Verifizierung herangezogen werden.

In diesem Forschungsvorhaben konnten die Bayes'schen Netzwerke zur Aktualisierung der Modelleingabeparameter Oberflächenchloridkonzentra-

Bauwerk	BAB	Baujahr	Kurzbeschreibung
Chlorideindringen			
Diverse Brücken		diverse	FE.15.383.03 ([23])
Brücke Rennekoven	A 61	1970/71	Spannbetonplattenbalken 2-stegig
Brücke Schirik	A 61	1970/71	Spannbetonplattenbalken 2-feldrig
Brücke Hülscheid-Winkeln	A 45	1964/65	Spannbetonplattenbalken 4-feldrig
Brücke Rölvede	A 45	1964/66	Spannbetonplattenbalken 2-feldrig
Tunnel A	A 96	1995	2 Röhren mit Rechteckquerschnitten
Tunnel B	A 96	1998	2 Röhren mit Rechteckquerschnitten
Karbonatisierung			
Brücke Putzbrunn		2000	
Lechbrücke		1964/65	

Tab. 5-1: Übersicht der Ingenieurbauwerke

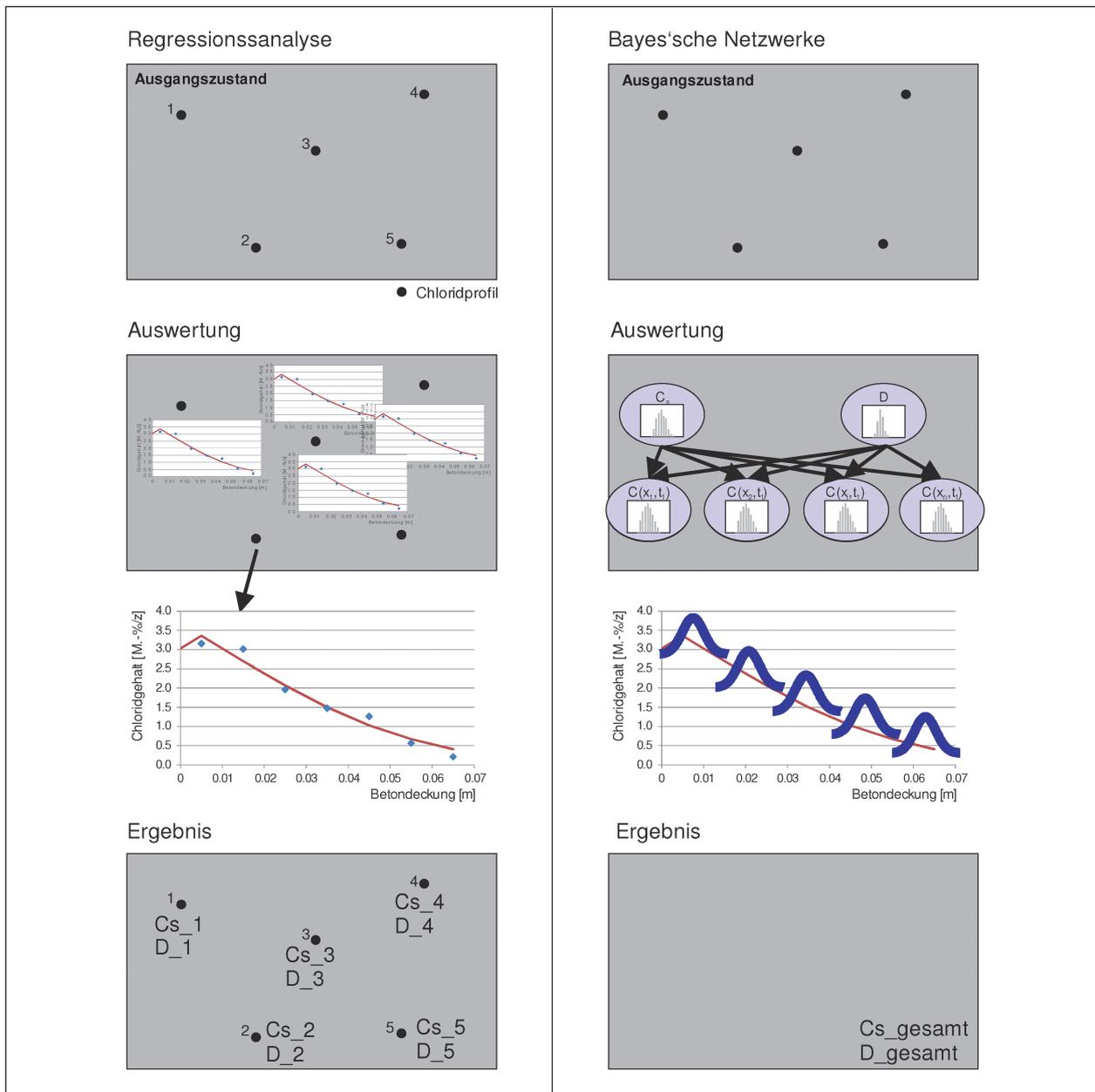


Bild 5-1: Vergleich Regressionsanalyse und Bayes'sche Netzwerke zum Fitten von Chlorideindringwiderstand und Chloridoberflächenkonzentration aus gemessenen Chloridprofilen

tion und Chlorideindringwiderstand nicht durchgeführt werden. Der zur Verfügung stehende Datensatz von Chloridprofilen variierte zu stark in der Wahl der untersuchten Tiefenlagen und im Nachhinein konnte die Expositionen, aus denen die Chloridprofile entnommen wurden, nicht immer differenziert werden. Daher werden alle Chloridprofile, die im Rahmen der Inspektionsergebnisse der Ingenieurbauwerke zur Verfügung stehen, mit der Regressionsanalyse gefittet.

Zur Umsetzung des Updates der Modelleingangsparameter auf Basis der Bayes'schen Netzwerke in

Zukunft ist der Aufbau einer kleinen Datenbank an Chloridprofilen hilfreich, die die folgenden Informationen enthält: Betonzusammensetzung (Zementart, Zementgehalt, Wasser-Zement-Wert); Exposition des Bauteils (wo wurde das Chloridprofil entnommen: Sprühnebel- oder Spritzwasserbereich, etc.), Bauwerksalter und Standort. Für die einheitliche Entnahme von Chloridprofilen ist die Festlegung von definierten Tiefenlagen und Anzahl der Tiefenlagen notwendig.

5.2 Auswertung der Chloridprofile aus FE.15.383.03

In dem vorangegangenen Forschungsvorhaben FE 15.383.03 der BAST [23] wurden Bauwerksdaten, wie Chloridgehalte und Karbonatisierungstiefen, aus Inspektionen von Autobahnbrücken systematisch zusammengetragen. Diese Daten werden in diesem Forschungsprojekt weiter ausgewertet. Für die Analyse des scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizienten D_{app} , und der Oberflächenchloridkonzentration C_s , werden alle Chloridgehalte mit mindestens drei Tiefenlagen aus einem intakten Bereich, d. h. keine Risse und keine Hohllagen, getrennt nach Bauteiltyp ausgewertet. Die Bauwerkstypen sind Überbaustege (SST), Widerlager (WL), Pfeiler (PF) und Kappen (KA). Die genauen Positionen der Probenentnahme im Bauteil sind unbekannt. Die Bauwerke wurden zwischen 1961 und 1979 gebaut und wurden nach unterschiedlichen Bauwerksaltern untersucht. Zusätzlich ist bei allen Bauwerken die Betonklasse, normaler Beton (NB, entsprechend C20/25 und C30/37) oder hochfester Beton (HB, entsprechend C35/45 und C45/55) sowie die Zementart, CEM I oder CEM III, bekannt. Die Abkürzungen der Bauwerksbezeichnungen werden aus dem vorangegangenen Forschungsvorhaben übernommen.

Das Fitten der Chloridprofile zur Abschätzung des scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizienten und der

Oberflächenchloridkonzentration erfolgt über eine Regressionsanalyse. Nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate wird die Differenz zwischen berechneten und gemessenen Chloridwerten minimiert. Die Oberflächenchloridkonzentration wird bezogen auf den Zementgehalt angegeben. Beim Fitten der Chloridprofile sind vereinzelt Ausreißer aufgetreten, die sich beispielsweise durch ein sehr schwaches Profil auszeichneten, das auf einen Riss oder eine Fehlstelle hindeutet. Diese Ergebnisse werden entsprechend als Ausreißer gekennzeichnet und werden für die darauffolgende Auswertung nicht weiter berücksichtigt.

Die Ergebnisse des scheinbaren Chlorideindringwiderstands und der Oberflächenchloridkonzentration sind getrennt nach Bauteiltyp in Tabelle 5-2 bis Tabelle 5-6 zusammengefasst.

Zur Untersuchung der Altersabhängigkeit des scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizienten und der Oberflächenchloridkonzentration werden die Datensätze getrennt nach Bauwerkstyp in Abhängigkeit des Prüfalters der Brückenbauwerke aufgetragen (siehe Bild 5-2).

Weder der scheinbare Chlorideindringwiderstand noch die Oberflächenchloridkonzentration zeigen bei einem Bauteiltyp eine signifikante Altersabhängigkeit. Die Oberflächenchloridkonzentration ist lediglich im jungen Bauwerksalter zeitabhängig,

Bezeichnung SST	Baujahr	Prüfjahr	Betonklasse	Zementart	D_{app} [$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$]	C_s [M.-%/z]
DE-HE-64	1963	2003	HB	CEM I	0,30	0,14
DE-HE-67	1964	2004	HB	CEM I	0,38	0,17
DE-HE-51	1965	1995	HB	CEM I	0,38	0,34
DE-HE-66	1965	2003	HB	CEM I	0,73	0,08
DE-HE-29	1966	1996	HB	CEM I	0,70	0,26
DE-HE-48	1967	2002	NB	CEM I	1,76	0,07
DE-HE-60	1967	2002	HB	CEM I	0,90	0,11
DE-HE-40	1968	2002	NB	CEM I	0,64	0,18
DE-HE-03	1971	1997	HB	CEM I	3,41	0,04
DE-HE-24	1971	1997	HB	CEM I	5,42*	0,04
DE-HE-28	1971	1997	HB	CEM I	1,50	0,05
DE-HE-63	1973	2003	HB	CEM I	0,95	0,18
DE-HE-68	1973	2002	HB	CEM I	2,39	1,20
DE-HE-39	1975	1995	HB	CEM I	1,01	0,43

* Ausreißer

Tab. 5-2: Scheinbarer Chlorideindringwiderstand und Oberflächenchloridkonzentration der Überbaustege, SST [23]

Bezeichnung WL	Baujahr	Prüfjahr	Betonklasse	Zementart	D_{app} [$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$]	Cs [M.-%/z]
DE-HE-35	1961	1997	NB	CEM I	n. e.	n. e.
DE-HE-27	1964	1995	NB	CEM I	5,18*	0,40
DE-HE-70	1966	2000	NB	CEM III	1,21	0,12
DE-HE-61	1967	2001	NB	CEM III	1,17	0,07
DE-HE-22	1968	1995	NB	CEM I	0,89	2,02
DE-HE-58	1970	2000	NB	CEM I	n. e.	n. e.
DE-HE-03	1971	1997	NB	CEM I	3,53	0,06
DE-HE-24	1971	1997	NB	CEM I	5,38*	0,05

* Ausreißer

Tab. 5-3: Scheinbarer Chlorideindringwiderstand und Oberflächenchloridkonzentration der Widerlager, WL [23]

Bezeichnung PF	Baujahr	Prüfjahr	Betonklasse	Zementart	D_{app} [$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$]	Cs [M.-%/z]
DE-NW-01	1962	1995	NB	CEM I	0,30	0,79
DE-NW-02	1962	1995	NB	CEM I	0,58	0,64
DE-NW-03	1962	1995	NB	CEM I	0,17	0,63
DE-NW-04	1962	1995	NB	CEM III	0,25	0,37
DE-NW-15	1962	1995	NB	CEM III	0,11	0,44
DE-NW-05	1963	1995	NB	CEM III	0,34	0,73
DE-NW-06	1963	1995	NB	CEM I	0,40	0,61
DE-NW-07	1963	1995	NB	CEM III	0,32	0,59
DE-NW-09	1963	1995	NB	CEM I	0,32	0,39
DE-NW-13	1963	1995	NB	CEM I	0,34	0,59
DE-NW-14	1963	1995	NB	CEM I	0,18	0,41
DE-NW-18	1963	1995	NB	CEM III	0,34	0,40
DE-NW-08	1964	1995	NB	CEM I	1,67	0,50
DE-NW-12	1964	1995	NB	CEM III	0,17	0,99
DE-NW-16	1964	1995	NB	CEM I	0,62	0,39
DE-NW-11	1964	1995	NB	CEM III	0,39	0,36
DE-HE-22	1968	1995	HB	CEM I	0,74	0,30
DE-BY-01	1973	2002	NB	CEM I	20,4*	0,23
DE-NW-10	1979	1995	NB	CEM III	0,25	0,61

* Ausreißer

Tab. 5-4: Scheinbarer Chlorideindringwiderstand und Oberflächenchloridkonzentration der Pfeiler, PF [23]

jedoch ist beim Chlorideindringwiderstand eine Altersabhängigkeit zu erwarten. Da diese Abhängigkeit nicht abgebildet wird, ist davon auszugehen, dass die hier zusammengefassten Datensätze nicht einer vergleichbaren Exposition und/oder einem vergleichbaren Materialwiderstand angehören. Für zukünftige Auswertungen ist es wichtig, Datensätze mit vergleichbarer Exposition und Materialwiderstand getrennt voneinander zu sam-

eln. Mit den hier vorliegenden Chloridprofilen ist eine Separierung nachträglich nicht mehr möglich. Auch kann der Einfluss des Bauteiltyps nicht ausreichend ausgewertet werden, da die Datensätze zu klein sind. Daher werden die ausgewerteten scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizienten und der Oberflächenchloridkonzentration aller Bauwerkstypen zusammen ausgewertet (siehe Tabelle 5-6).

Bezeichnung KA	Baujahr	Prüfjahr	Betonklasse	Zementart	D_{app} [$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$]	C_s [M.-%/z]
DE-HE-05	1967	1995	NB	CEM I	1,09	0,38
DE-HE-63	1973	2003	HB	CEM I	0,90	0,16
DE-HE-04	1974	1995	NB	CEM I	0,23	0,58
DE-HE-38	1974	2004	NB	CEM I	0,20	0,64

* Ausreißer

Tab. 5-5: Scheinbarer Chlorideindringwiderstand und Oberflächenchloridkonzentration der Kappen, KA [23]

Bauteiltyp	SST		WL		KA		PF	
Anzahl	n = 14		n = 8		n = 4		n = 19	
Parameter	D_{app} [$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$]	C_s [M.-%/z]	D_{app} [$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$]	C_s [M.-%/z]	D_{app} [$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$]	C_s [M.-%/z]	D_{app} [$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$]	C_s [M.-%/z]
μ	1,16	0,23	2,89	0,45	0,61	0,44	0,42	0,52
σ	0,90	0,30	2,08	0,78	0,46	0,22	0,35	0,19
$\mu_{CEM I}$	1,16	0,23	3,75	0,63	0,61	0,44	0,53	0,53
$\sigma_{CEM I}$	0,90	0,30	2,08	0,94	0,46	0,22	0,44	0,15
$\mu_{CEM III}$	-	-	1,19	0,10	-	-	0,27	0,56
$\sigma_{CEM III}$	-	-	0,03	0,04	-	-	0,09	0,22
GESAMT – alle Bauwerkstypen (n = 45)								
	D_{app} [$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$]				C_s [M.-%/z]			
μ	0,81				0,41			
σ	0,81				0,37			

Tab. 5-6: Scheinbarer Chlorideindringwiderstand und Oberflächenchloridkonzentration aller Bauwerke

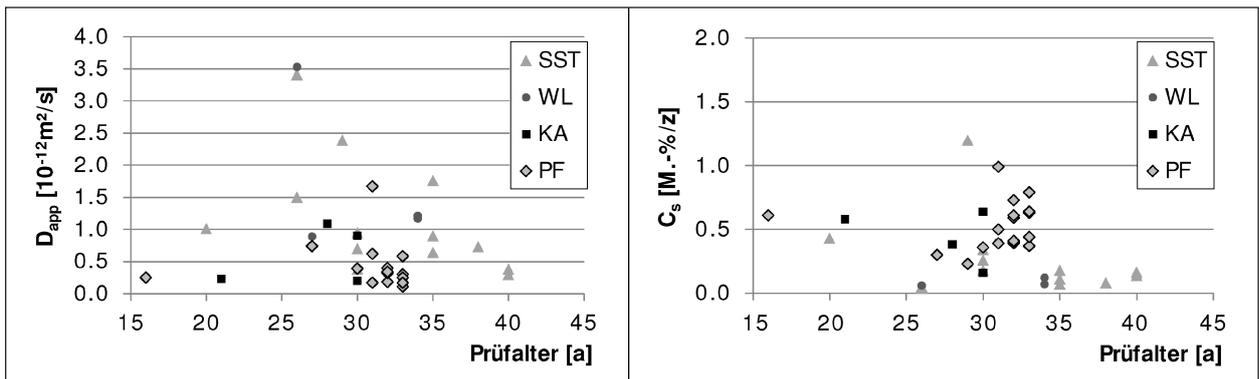


Bild 5-2: Scheinbarer Chlorideindringwiderstand (links) und Oberflächenchloridkonzentration (rechts) der in Abhängigkeit des Prüfalters

Der Datensatz zu den Brückenpfeilern beinhaltet die meisten Bauwerke. Bei den Pfeilern liegt der scheinbare Chloriddiffusionskoeffizient in einem Wertebereich von $0,1$ bis $1,7 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ und der Oberflächenchloridkonzentration streut von $0,23$ bis $0,99$ M.-%/z. Der scheinbare Chloriddiffusionskoeffizient der Überbaustege streut in einem weiten Bereich von $0,3$ bis $5,4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Die Oberflä-

chenchloridkonzentration liegt in einem Wertebereich von $0,04$ bis $1,2$ M.-%/z. Im Datensatz der Widerlager befanden sich zwei Datensätze, deren scheinbarer Chloriddiffusionskoeffizient und Ersatzoberflächenkonzentration nicht zu fiten waren. Bei den ermittelbaren scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizienten streuen die Werte sehr stark in einem Bereich von $0,9$ bis $5,4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Die Oberflä-

Chloridkonzentration streut ebenfalls stark mit Werten von 0,07 bis 2,0 M.-%/z. Der scheinbare Chloriddiffusionskoeffizient der Kappen weist Werte von $0,2 - 1,1 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ und die Oberflächenchloridkonzentration von 0,16 bis 0,64 M.-%/z auf.

Über alle Bauwerkstypen und Zementarten gemittelt liegt der Chloriddiffusionskoeffizient bei $0,81 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ mit einer Standardabweichung von $0,81 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$. Generell sind der Mittelwert und die Standardabweichung des Chloriddiffusionskoeffizienten bei den Widerlagern am größten gefolgt von den Überbaustegen. Die geringsten Werte zeigt der Datensatz der Brückenpfeiler. Ebenso liegen die Werte bei Betonen aus Portlandzement höher als bei Betonen aus Hochofenzement.

Der Mittelwert der Oberflächenchloridkonzentration unter Berücksichtigung aller Bauwerkstypen beträgt 0,41 M.-%/z mit einer Standardabweichung von

0,37 M.-%/z. Innerhalb der Bauwerkstypen als auch der unterschiedlichen Zementarten variiert die Oberflächenchloridkonzentration kaum. Die Bauwerke aus dem Datensatz können ausschließlich der Expositionsklasse XD1 zugeordnet werden. Die ausgewerteten Oberflächenchloridkonzentrationen liegen in dem Bereich, der auch für die Annahmen der Oberflächenchloridkonzentration der Bemessungssituationen für die XD1-Exposition angenommen wurden (Tabelle 4-3). Die Annahmen der Bemessungssituation XD1 können folglich aus realistisch eingestuft werden.

5.3 Brücke Rennekoven

Einen Überblick über die Brücke Rennekoven mit den zur Verfügung stehenden Inspektionsdaten gibt Tabelle 5-7 [24].

Bauwerk/Bauteil		
Spannbetonplattenbalken, 2-stegig		
Baujahr	1970/1971	
Standort	Rennekoven	
Exposition	XD1 maßgebend	
Bild 5-3: Längsschnitt Brücke Rennekoven		
Betonrezeptur		Nennmaß der Betondeckung
Zementtyp	W/Z-Wert	
Hochofenzement, 350 kg/m ³	0,5 (Annahme)	45 mm
Zustand		
1. Daten aus Besichtigung (Risse, Abplatzungen etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • Fokus: Brückenüberbau. • Visuelle Untersuchung 09/1980: keine Information. • Visuelle Untersuchung 06/1999: <ul style="list-style-type: none"> – Risse auf der Unterseite quer zur Spanngliedführung, – keine größeren Rostfahnen und Betonabplatzungen, – vereinzelte Rostflecken auf der Unterseite. 	
2. Vorhandene Messdaten aus Bauwerksüberwachungen (Betondeckung, Chloridgehalt etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • Betondeckung (Profometer): $\mu = 33 - 40 \text{ mm}$; $\sigma = 5 - 9 \text{ mm}$. • Karbonatisierungstiefe (15 Bohrkernen): $\mu = 5,2 \text{ mm}$ (3,8 mm); $\sigma = 2,1 \text{ mm}$ (1,0 mm); (Untersuchung 10/1980). • Chloridprofil: ungerissener Bereich, Stegobenseite (Tabelle 5-8). 	
3. Bereits durchgeführte Instandsetzungsmaßnahmen (wann und welche Maßnahmen)	Nicht bekannt	
Bemerkungen	–	

Tab. 5-7: Übersicht Brücke Rennekoven

Die Ergebnisse der Chloridprofilentnahme inklusive der daraus resultierenden Chloriddiffusionskoeffizienten und Oberflächenchloridkonzentration sind in Tabelle 5-8 zusammengefasst. Die Chloridprofile stammen ausschließlich aus ungerissenen Betonbereichen.

Der scheinbare Chloriddiffusionskoeffizient nach 29 Jahren liegt im Mittel bei $0,8 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Dieser Wert entspricht dem erwarteten Wertebereich für den verwendeten Beton mit einem Hochofenzement und einem w/z-Wert von 0,5. Die Oberflächenchloridkonzentration ist mit einem Mittelwert von 0,23 M.-%/z als sehr gering einzuschätzen.

In Tabelle 5-9 sind die Modelleingabeparameter zu Modellierung der Chlorideinwirkung der Brücke Rennekoven zusammengefasst. Zuerst wird der Soll-Zustand aus den Bemessungsdaten berechnet und danach dem Ist-Zustand unter Berücksichtigung der Inspektionsdaten überprüft. Die Eingabe-

parameter für den Soll-Zustand (a priori Bemessung) sind in Klammer angegeben.

Die Gegenüberstellung des Soll- zum Ist-Zustandes der Brücke Rennekoven zeigt Bild 5-4. Da es sich bei dem betrachteten Bauteil um ein Bauteil im Sprühnebelbereich handelt, ist das Zuverlässigkeitsspektrum der XD1-Exposition grau hinterlegt. Das Zuverlässigkeitsspektrum bildet die Spanne der Zuverlässigkeitsentwicklung über die Zeit ab, die auf Basis der der Expositionsklasse zugeordneten günstigen und ungünstigen Bemessungssituationen ergeben kann.

Der Soll-Zustand der Brücke Rennekoven weist geringere Zuverlässigkeitswerte auf als der Ist-Zustand, obwohl die reale, gemessene Betondeckung sehr gering ist. Dafür ist die angenommene Chloridbelastung wesentlich schwächer als die reale Oberflächenchloridkonzentration, die aus den Chloridprofilen abgeleitet wurde. Die Zielzuverlässigkeit

Tiefe [mm]	1 [M.-%/z]	2 [M.-%/z]	3 M.-%/z]	4 [M.-%/z]	
0 – 5	0,30	0,12	0,24	0,12	
5 – 10	0,21	0,15	0,25	0,12	
10 – 15	0,17	0,14	0,24	0,13	
15 – 25	0,13	0,11	0,13	0,10	
25 – 50	0,11	0,07	0,07	0,07	
D_{app} [m ² /s]	$6,44 \cdot 10^{-13}$	$10,51 \cdot 10^{-13}$	$6,28 \cdot 10^{-13}$	$12,43 \cdot 10^{-13}$	$\mu = 0,8 \cdot 10^{-12}$ $\sigma = 0,3 \cdot 10^{-12}$
C_s [M.-%/z]	0,28	0,18	0,28	0,16	$\mu = 0,23$; $\sigma = 0,06$

Tab. 5-8: Ergebnisse Chloridprofile (ungerissener Bereich) inklusive Chloriddiffusionskoeffizienten und Oberflächenchloridkonzentration aus der Brücke Rennekoven

Parameter	Einheit	Verteilung	μ	σ
$D_{RCM}(t_0)/D_{app}$	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Normalverteilung	(2,8)/0,8	(0,56)/0,3
α_{RCM}	-	Beta-Verteilung	0,65	0,12
t_0	Jahr	Konstante	0,0767/29	
T	Jahr	Konstante	100	
T_{ref}	K	Konstante	293	
T_{real}	K	Normalverteilung	284,2	6,62
b_e	K	Normalverteilung	4.800	700
$C_{S,\Delta x}$	M.-%/b	LogNormalverteilung	(1,0) 0,23	(0,75) 0,06
Δx	mm	Beta-Verteilung (0; 50)	0	
C_{crit}	M.-%/b	Beta-Vert. (0,2; 2,0)	0,6	0,15
C_0	M.-%/b	Konstante	0	
c	mm	Normalverteilung	(45) 33	(5) 9

Tab. 5-9: Modelleingabeparameter für die Brücke Rennekoven

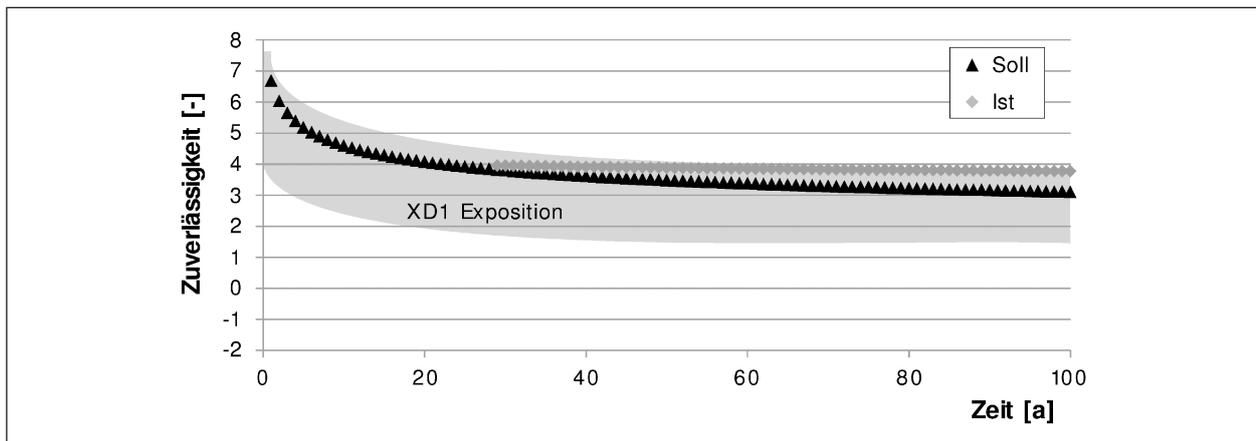


Bild 5-4: Gegenüberstellung Soll-/Ist-Zustand der Brücke Rennekoven

von $\beta = 1,5$ wird über 100 Jahre sicher eingehalten. Die Zuverlässigkeit des Ist-Zustandes beträgt auch nach 100 Jahren noch 3,8. Für die sprühnebelbeaufschlagten Bereiche des Brückenbauwerks ist auch nach 100 Jahren die Wahrscheinlichkeit einer chloridinduzierten Bewehrungskorrosion sehr gering.

5.4 Brücke Schirik

Tabelle 5-10 zeigt die Übersicht zur Brücke Schirik [24].

Die Ergebnisse der Chloridprofilentnahme inklusive der daraus resultierenden Chloriddiffusionskoeffizienten

Bauwerk/Bauteil		
Spannbetonplattenbalken, 2-feldrig		
Baujahr		
1970/1971		
Standort		
Schirik		
Exposition		
XD1 maßgebend	Bild 5-5: Längsschnitt Brücke Schirik	
Betonrezeptur		Nennmaß der Betondeckung
Zementtyp	W/Z-Wert	45 mm
Hochofenzement, 350 kg/m ³	0,5 (Annahme)	
Zustand		
1. Daten aus Besichtigung (Risse, Abplatzungen etc.)	<ul style="list-style-type: none"> Fokus: Brückenüberbau. Visuelle Untersuchung 09/1980: keine Information. Visuelle Untersuchung 06/1999: <ul style="list-style-type: none"> Risse auf der Unterseite quer zur Spanngliedführung, keine größeren Rostfahnen und Betonabplatzungen. 	
2. Vorhandene Messdaten aus Bauwerksüberwachungen (Betondeckung, Chloridgehalt etc.)	<ul style="list-style-type: none"> Karbonatisierungstiefe (15 Bohrkerne): $\mu = 2,1$ mm (3,0 mm); $\sigma = 0,9$ mm (1,0 mm); (Untersuchung 10/1980). Chloridprofile: ungerissener Bereich (Tabelle 5-11). 	
3. Bereits durchgeführte Instandsetzungsmaßnahmen (wann und welche Maßnahmen)	Nicht bekannt	
Bemerkungen	-	

Tab. 5-10: Übersicht Brücke Schirik

Tiefe [mm]	1 [M.-%/z]	2 [M.-%/z]	3 M.-%/z]	
0 – 5	0,32	0,24	0,13	
5 – 10	0,13	0,09	0,09	
10 – 15	0,07	0,08	0,09	
15 – 25	0,05	0,07	0,05	
25 – 50	0,05	0,07	0,07	
D_{app} [m ² /s]	$0,63 \cdot 10^{-13}$	$0,97 \cdot 10^{-13}$	$6,72 \cdot 10^{-13}$	$\mu = 0,3 \cdot 10^{-12}$ $\sigma = 0,3 \cdot 10^{-12}$
C_s [M.-%/z]	0,37	0,25	0,13	$\mu = 0,25$ $\sigma = 0,1$

Tab. 5-11: Ergebnisse Chloridprofile (ungerissener Bereich) inklusive Chloriddiffusionskoeffizienten und Oberflächenchloridkonzentration aus der Brücke Schirik

Parameter	Einheit	Verteilung	μ	σ
$D_{RCM}(t_0)/D_{app}$	10^{-12} m ² /s	Normalverteilung	(2,8)/0,3	(0,56)/0,3
α_{RCM}	-	Beta-Verteilung	0,65	0,12
t_0	Jahr	Konstante	0,0767/29	
T	Jahr	Konstante	100	
T_{ref}	K	Konstante	293	
T_{real}	K	Normalverteilung	284,2	6,62
b_e	K	Normalverteilung	4.800	700
$C_{S,\Delta x}$	M.-%/b	LogNormalverteilung	(1,0) 0,25	(0,75) 0,1
Δx	mm	Beta-Verteilung (0; 50)	0	
C_{crit}	M.-%/b	Beta-Vert. (0,2; 2,0)	0,6	0,15
C_0	M.-%/b	Konstante	0	
c	mm	Normalverteilung	(45)	(5)

Tab. 5-12: Modelleingabeparameter für Brücke Schirik

enten und Oberflächenchloridkonzentration sind in Tabelle 5-11 zusammengefasst. Die Chloridprofile stammen aus ungerissenen Betonbereichen.

Der scheinbare Chloriddiffusionskoeffizient von $0,3 \cdot 10^{-12}$ m²/s nach 29 Jahren liegt in dem Bereich, der für den verwendeten Beton erwartet werden kann. Der scheinbare Chloriddiffusionskoeffizient von der Brücke Schirik ist leicht niedriger als der vergleichbaren Brücke Rennekoven.

Beide Brücken liegen nur wenige Kilometer auseinander und deshalb ist auch eine vergleichbare Chloridexposition zu erwarten. Dies bestätigt sich durch eine Oberflächenchloridkonzentration von im Mittel 0,25 M.-%/z (Brücke Schirik), die damit in der gleichen Größenordnung liegt wie die 0,23 M.-%/z von Brücke Rennekoven.

Die Eingabeparameter zur Modellierung der Chlorideinwirkung der Brücke Schirik sind in Tabelle

5-12 zusammengefasst. Die Soll-Werte sind wieder in Klammer. Da für dieses Bauwerk keine Daten zur realen Betondeckung vorliegen, werden die Bemessungsdaten auch für die Berechnung des Ist-Zustand verwendet.

Die Ergebnisse der Lebensdauerbemessung der Brücke Schirik unter Berücksichtigung von Soll- und Ist-Zustand zeigt Bild 5-6.

Im Brückenbauwerk Schirik ist die Zuverlässigkeit des Ist-Zustandes größer als die des Soll-Zustandes und liegt am oberen Rand des Zuverlässigkeitsspektrums. Die angenommene Chlorideinwirkung ist wesentlich schwächer im Vergleich zur definierten Grundeinwirkung. Auch noch nach 100 Jahren wird eine Zuverlässigkeit von 3,8 berechnet, die weit über der Zielzuverlässigkeit von 1,5 liegt. Die Korrosionswahrscheinlichkeit ist auch noch nach 100 Jahren vernachlässigbar.

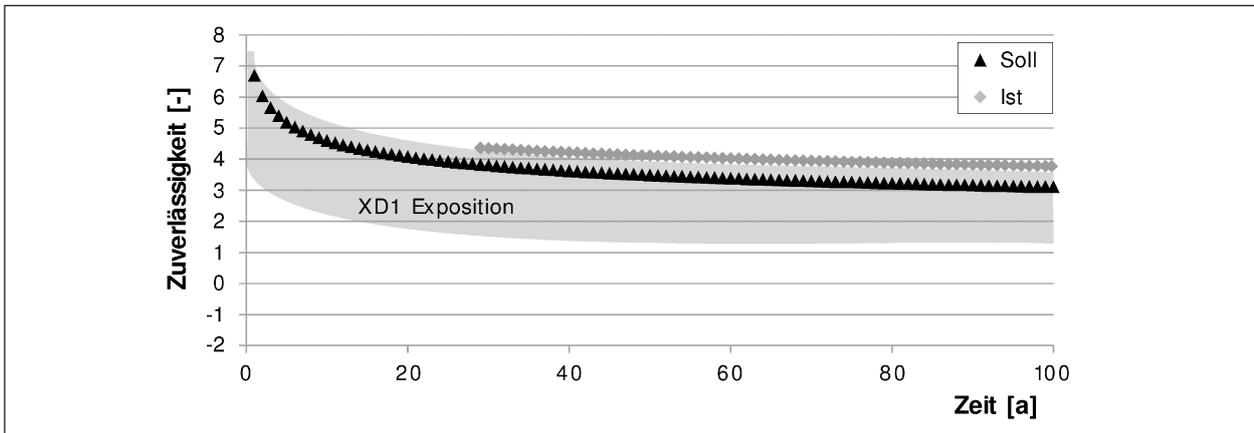


Bild 5-6: Gegenüberstellung Soll-/Ist-Zustand der Brücke Schirik

5.5 Brücke Hülscheid-Winkeln

Das Brückenbauwerk Hülscheid-Winkeln wird in Tabelle 5-13 vorgestellt [24].

Die Chloridprofile aus ungerissenen Bereichen der Brücke C sind mit den ermittelten scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizienten und Oberflächenchloridkonzentration zusammengefasst (siehe Tabelle 5-14).

Bauwerk/Bauteil		
Spannbetonplattenbalken, 4 feldrig		
Baujahr		
1964/1965		
Standort		
Hülscheid-Winkeln		
Exposition		
XD1 maßgebend		
Bild 5-7: Längsschnitt Brücke Hülscheid-Winkeln		
Betonrezeptur		Nennmaß der Betondeckung
Zementtyp	W/Z-Wert	
Portlandzement, 350 kg/m ³	0,38	45 mm
Zustand		
1. Daten aus Besichtigung (Risse, Abplatzungen etc.)	Visuelle Untersuchung 06/1999 <ul style="list-style-type: none"> • Risse quer zur Fahrtrichtung mit Rissbreiten bis zu 0,65 mm im Überbau, • nur vereinzelt Abplatzungen und Rostflecken auf der Unterseite, • Sondierung im Rissbereich: Lochfraßkorrosion. 	
2. Vorhandene Messdaten aus Bauwerksüberwachungen (Betondeckung, Chloridgehalt etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • Betondeckung (Profometer) $\mu = 40 \text{ mm}; \sigma = 7,8 \text{ mm}$ Bereich A; $\mu = 37 \text{ mm}; \sigma = 7,2 \text{ mm}$ Bereich B; $\mu = 38 \text{ mm}; \sigma = 8,7 \text{ mm}$ Bereich C; $\mu = 33 \text{ mm}; \sigma = 5,5 \text{ mm}$ Bereich D. • Karbonatisierungstiefe (15 Bohrkernen) $\mu = 1,5 \text{ mm}; \sigma = 0,5 \text{ mm}$ Bereich A, $\mu = 1,3 \text{ mm}; \sigma = 0,6 \text{ mm}$ Bereich B, $\mu = 1,0 \text{ mm}; \sigma = 0,0 \text{ mm}$ Bereich D. • Potenzialfeldmessung: keine Stahlkorrosion zu orten, • Chloridprofile: ungerissener Bereich (Tabelle 5-14). 	
3. Bereits durchgeführte Instandsetzungsmaßnahmen (wann und welche Maßnahmen)	Nicht bekannt	
Bemerkungen	-	

Tab. 5-13: Übersicht Brücke Hülscheid-Winkeln

Wie für sprühnebelbeaufschlagte Bauteile zu erwarten, liegen die Ergebnisse des scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizienten hier in der Größenordnung von den scheinbaren Chloriddiffusions-

koeffizienten der vorangegangenen Brückenbauwerke, obwohl bei dem Brückenbauwerk Hülscheid-Winkeln ein Portlandzement anstatt eines Hochfenzementes zum Einsatz kam. Die Brücke

Tiefe [mm]	A [M.-%/z]	A [M.-%/z]	A [M.-%/z]	B [M.-%/z]	D [M.-%/z]	E [M.-%/z]
0 – 5	0,24	0,21	0,41	0,21	0,52	0,13
5 – 10	0,15	0,15	0,26	0,15	0,26	0,11
10 – 15	0,09	0,1	0,15	0,11	0,15	0,09
15 – 25						
25 – 50			0,04			
D_{app} [m ² /s]	$1,6 \cdot 10^{-13}$	$2,6 \cdot 10^{-13}$	$1,8 \cdot 10^{-13}$	$3,2 \cdot 10^{-13}$	$1,0 \cdot 10^{-14}$	$8,4 \cdot 10^{-13}$
C_s [M.-%/z]	0,29	0,24	0,49	0,24	0,68	0,14

$\mu_{Dapp} = 0,3 \cdot 10^{-12}$; $\sigma_{Dapp} = 0,3 \cdot 10^{-12}$
 $\mu_{Cs} = 0,35$; $\sigma_{Cs} = 0,2$

Tab. 5-14: Ergebnisse Chloridprofile inklusive Chloriddiffusionskoeffizienten und Oberflächenchloridkonzentration

Parameter	Einheit	Verteilung	μ	σ
$D_{RCM}(t_0)/D_{app}$	10^{-12} m ² /s	Normalverteilung	(8,9)/0,3	(1,78)/0,3
α_{RCM}	-	Beta-Verteilung	0,65	0,12
t_0	Jahr	Konstante	0,0767/35	
T	Jahr	Konstante	100	
T_{ref}	K	Konstante	293	
T_{real}	K	Normalverteilung	284,2	6,62
b_e	K	Normalverteilung	4.800	700
$C_{S,\Delta x}$	M.-%/b	LogNormalverteilung	(1,0) 0,35	(0,75) 0,2
Δx	mm	Beta-Verteilung (0; 50)	0	
C_{crit}	M.-%/b	Beta-Vert. (0,2; 2,0)	0,6	0,15
C_0	M.-%/b	Konstante	0	
c	mm	Normalverteilung	(45,0) 33,0	(5,0) 5,5

Tab. 5-15: Modelleingabeparameter für Brückenbauwerk Hülscheid-Winkeln

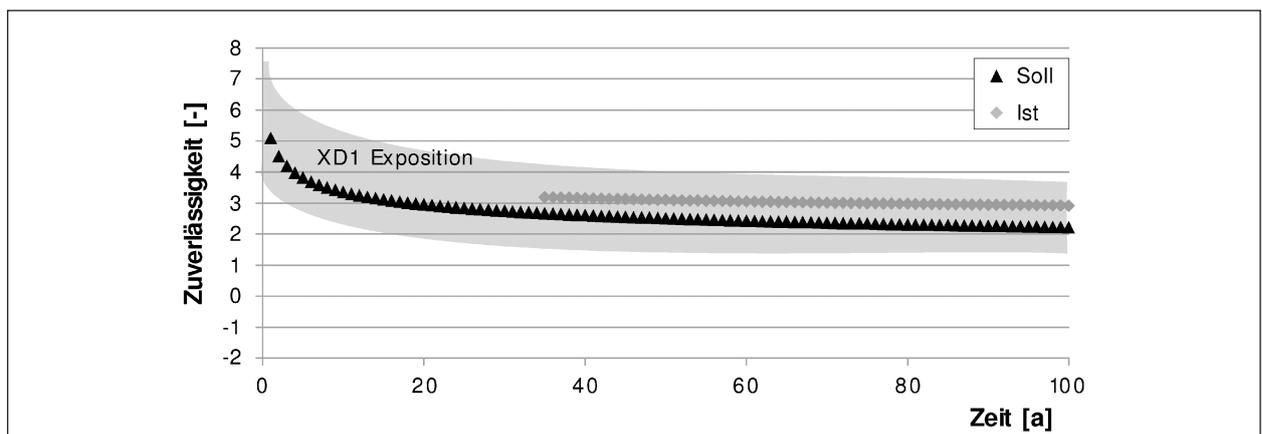


Bild 5-8: Gegenüberstellung Soll-/Ist-Zustand der Brücke Hülscheid-Winkeln

Hülscheid-Winkeln ist Bestandteil der BAB 45 und nicht wie die vorangegangenen Bauwerke, die zur BAB 61 gehören. Die Oberflächenchloridkonzentration weist mit im Mittel 0,35 M.-%/z (ungerissen) leicht höhere Werte auf, die wahrscheinlich in einem stärkeren Winterdienst begründet liegen. Tabelle 5-15 listet die Modelleingabeparameter für den Vergleich des Soll- gegenüber dem Ist-Zustandes der Zuverlässigkeitsentwicklung der Brücke Hülscheid-Winkeln auf.

In Bild 5-8 ist die Zuverlässigkeitsentwicklung Brücke Hülscheid-Winkeln im Soll- und Ist-Zustand dargestellt.

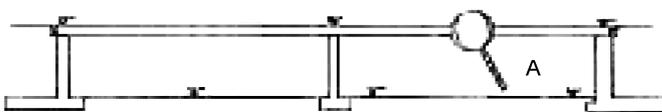
Die Zuverlässigkeitsentwicklung im Soll-Zustand befindet sich mitten im Zuverlässigkeitsspektrum für Bauwerke der XD1-Exposition. Die Zuverlässigkeitsindices im Ist-Zustand sind wieder größer, als die im

Soll-Zustand, obwohl die reale Betondeckung sehr gering ausfällt. Jedoch ist die reale Chloridbelastung auch wesentlich schwächer als die zunächst angenommene Oberflächenchloridkonzentration. Auch noch nach 100 Jahren wird rechnerisch eine Zuverlässigkeit von rd. 3 erreicht und damit ist der Zuverlässigkeitsindex doppelt so groß wie der geforderte Zielzuverlässigkeitsindex.

5.6 Brücke Rölvede

Das Brückenbauwerk Rölvede gehört, wie die zuvor betrachtete Brücke, zur Sauerlandlinie und wird in Tabelle 5-16 vorgestellt [24].

Auch im Brückenbauwerk Rölvede wurden Chloridprofile aus ungerissenen Bereichen (siehe Tabelle 5-17) entnommen und daraus Chloriddiffusions-

Bauwerk/Bauteil			
Spannbetonplattenbalken, 2-feldrig			
Baujahr			
1964/1966			
Standort			
Rölvede			
Exposition			Bild 5-9: Ansicht Brücke Rölvede
XD1 maßgebend			
Betonrezeptur		Nennmaß der Betondeckung	
Zementtyp	W/Z-Wert		
Portlandzement, 350 kg/m ³	0,38 – 0,4	45 mm	
Zustand			
1. Daten aus Besichtigung (Risse, Abplatzungen etc.)	Visuelle Untersuchung 06/1999 <ul style="list-style-type: none"> Keine größeren Rostfahnen und Betonabplatzungen, Risse quer zur Fahrtrichtung mit Rissbreiten bis zu 0,2 mm im Überbau. 		
2. Vorhandene Messdaten aus Bauwerksüberwachungen (Betondeckung, Chloridgehalt etc.)	<ul style="list-style-type: none"> Betondeckung (Profometer) <ul style="list-style-type: none"> $\mu = 44$ mm; $\sigma = 9,7$ mm Bereich A, $\mu = 49$ mm; $\sigma = 9,7$ mm Bereich B, $\mu = 41$ mm; $\sigma = 9,9$ mm Bereich C. Karbonatisierungstiefe <ul style="list-style-type: none"> $\mu = 1,0$ mm; $\sigma = 0,3$ mm Bereich A, $\mu = 1,0$ mm; $\sigma = 0,0$ mm Bereich C. Potenzialfeldmessung: keine Stahlkorrosion zu orten, Chloridprofile: aus ungerissenen Bereichen (Tabelle 5-17). 		
3. Bereits durchgeführte Instandsetzungsmaßnahmen (wann und welche Maßnahmen)	Nicht bekannt		
Bemerkungen	–		

Tab. 5-16: Übersicht Brückenbauwerk Rölvede

koeffizienten als auch die Chloridoberflächenkonzentration abgeleitet.

Die ermittelte scheinbare Chloriddiffusionskoeffizient ist mit einem Wert von $0,07 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ nach 35 Jahren sehr gering. Die Berechnung des $D_{\text{app},35\text{a}}$ auf den Ausgangswert ergibt ein $D_{\text{app},0} = 3,7 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$. Dieser Wert ist geringer als der angenommene Ausgangswert von $8,9 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$. Der $D_{\text{app},35\text{a}}$ wird aus realen Praxisbedingungen aus Chloridprofilen abgeleitet. Unter realen Praxisbedingungen ist der Beton nicht vollständig wassergesättigt und Chloridbelastung tritt nur periodisch in den Wintermonaten auf. Es ist daher davon auszugehen, dass die diffusionswirksamen Zeiträume noch geringer waren als angenommen, was zu einen noch größeren Altersexponenten, bzw. zu einer stärkeren zeitabhängigen Reduktion des scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizienten führt. Die Oberflächenchloridkonzentration liegt mit 0,27 M.-%/z in

der gleichen Größenordnung wie Brückenbauwerk Hülseid-Winkeln.

In Tabelle 5-18 sind die Modelleingabeparameter zu Modellierung der Chlorideinwirkung des Brückenbauwerks Rölvede zusammengefasst.

Die Gegenüberstellung des Soll- zum Ist-Zustandes des Brückenbauwerks Rölvede zeigt Bild 5-10.

Die Zuverlässigkeitsentwicklung im Soll-Zustand entspricht dem Soll-Zustand der vorangegangenen Brücke und liegt wieder mitten im Zuverlässigkeitsspektrum der XD1-Exposition. Die Zuverlässigkeit des Ist-Zustandes ist wesentlich höher und befindet sich oberhalb des Zuverlässigkeitsspektrums nicht nur aufgrund des sehr niedrigen scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizienten, sondern auch aufgrund der schwachen Chloridbelastung. Nach 100 Jahren wird rechnerisch immer noch eine Zuverlässigkeit von ca. 4,3 erreicht.

Tiefe [mm]	A [M.-%/z]	B [M.-%/z]	C M.-%/z]	
5	0,24	0,12	0,19	
10	0,09	0,05	0,07	
20	0,06	0,04	0,06	
30				
40	0,02	0,01		
D_{app} [m ² /s]	$3,2 \cdot 10^{-14}$	$1,07 \cdot 10^{-13}$	$7,63 \cdot 10^{-14}$	$\mu_{D_{\text{app}}} = 0,07 \cdot 10^{-12}$ $\sigma_{D_{\text{app}}} = 0,04 \cdot 10^{-12}$
C_s [M.-%/z]	0,4	0,15	0,25	$\mu_{C_s} = 0,27$; $\sigma_{C_s} = 0,13$

Tab. 5-17: Ergebnisse Chloridprofile inklusive Chloriddiffusionskoeffizienten und Oberflächenchloridkonzentration aus der Brücke Rölvede

Parameter	Einheit	Verteilung	μ	σ
$D_{\text{RCM}}(t_0)/D_{\text{app}}$	$10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$	Normalverteilung	(8,9)/0,07	(1,78)/0,04
α_{RCM}	-	Beta-Verteilung	0,65	0,12
t_0	Jahr	Konstante	0,0767/35	
T	Jahr	Konstante	100	
T_{ref}	K	Konstante	293	
T_{real}	K	Normalverteilung	284,2	6,62
b_e	K	Normalverteilung	4.800	700
$C_{s,\Delta x}$	M.-%/b	LogNormalverteilung	(1,0) 0,27	(7,5) 0,13
Δx	Mm	Beta-Verteilung (0; 50)	0	
C_{crit}	M.-%/b	Beta-Vert. (0,2; 2,0)	0,6	0,15
C_0	M.-%/b	Konstante	0	
c	Mm	Normalverteilung	(45,0) 41,0	(5,0) 9,9

Tab. 5-18: Modelleingabeparameter für Brückenbauwerk Rölvede

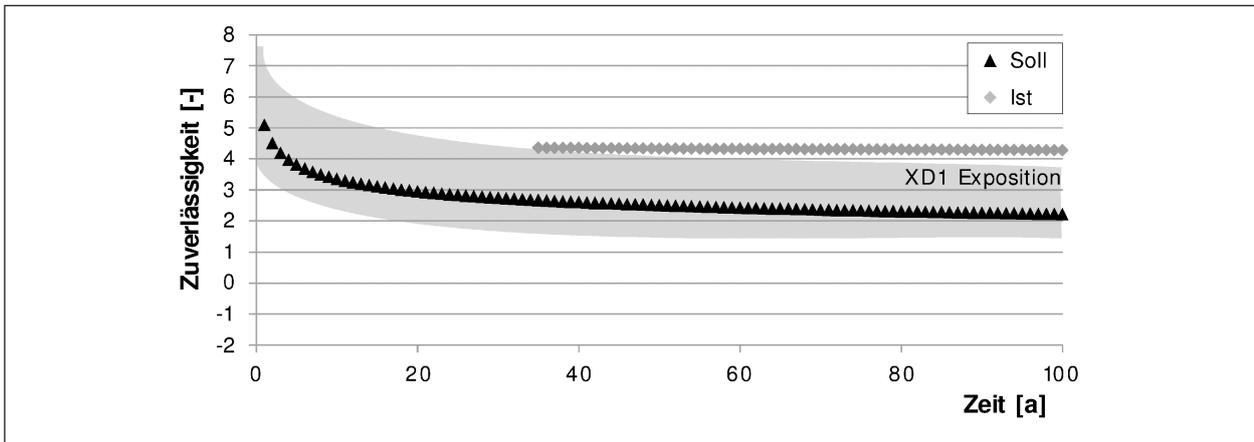


Bild 5-10: Gegenüberstellung Soll-/Ist-Zustand der Brücke Rölvede

5.7 Brücke Putzbrunn

Im Brückenbauwerk Putzbrunn liegt der Fokus auf der Modellierung des Karbonatisierungsfortschritts (siehe Tabelle 5-19).

Die Eingabeparameter zur Modellierung der Einleitungsphase der karbonatisierungsinduzierten Bewehrungskorrosion sowohl für den Kragarm als

auch für das Widerlager sind in Tabelle 5-20 und Tabelle 5-21 aufgelistet.

Bild 5-12 zeigt den Vergleich der Zuverlässigkeitsentwicklung vom Soll- und Ist-Zustand der Brücke Putzbrunn mit dem Fokus auf die Bauteile Kragarm und Widerlager, bei denen Minderbetondeckungen festgestellt wurden. Der grau hinterlegte Bereich

Bauwerk/Bauteil		
Rahmenkonstruktion		
Baujahr		
2000		
Standort		
Putzbrunn		
Exposition		
Maßgebend XC3 RH _{IST} : $\mu = 76,9 \%$, $\sigma = 12,2 \%$	Bild 5-11: Querschnitt Brücke Putzbrunn	
Betonrezeptur		Nennmaß der Betondeckung
Zementtyp	W/Z-Wert	$c_{nom} = 45 \text{ mm}/c_{min} = 40 \text{ mm}$
CEM I 32,5 R	0,50/B 35	
Zustand		
1. Daten aus Besichtigung (Risse, Abplatzungen etc.)	Visuelle Untersuchung (02/2001): Keine Anmerkungen	
2. Vorhandene Messdaten aus Bauwerksüberwachungen (Betondeckung, Chloridgehalt etc.)	Betondeckung (Profometer) • Minderdeckung Widerlager West: $\mu = 43,7 \text{ mm}$; $\sigma = 8,8 \text{ mm}$, • Minderdeckung Kragarm Süd: $c_{min} = 18 \text{ mm}$; $\mu = 43,9 \text{ mm}$; $\sigma = 10,5 \text{ mm}$, • ansonsten Mittelwert über 45 mm.	
3. Bereits durchgeführte Instandsetzungsmaßnahmen (wann und welche Maßnahmen)	Nicht bekannt	
Bemerkungen	—	

Tab. 5-19: Übersicht Brückenbauwerk Putzbrunn

Parameter	Einheit	Verteilung	μ	σ
$R_{ACC,0}^{-1}$	$(\text{mm}^2/\text{Jahr})/(\text{kg}/\text{m}^3)$	Normalverteilung	5.331	1.972
k_t	-	Normalverteilung	1,25	0,35
ε_t	$(\text{mm}^2/\text{Jahr})/(\text{kg}/\text{m}^3)$	Normalverteilung	315,5	48
b_c	-	Normalverteilung	-0,567	0,024
t_c	Tag	Konstante	8	
RH_{IST}	%	Weibull $\omega = 100$	76,9	12,2
RH_{ref}	%	Konstante	65	-
g_e	-	Konstante	2,5	-
f_e	-	Konstante	5	-
ToW	-	Konstante	0	
p_{SR}	-	Konstante	0	
b_w	-	Normalverteilung	0,446	0,163
t_0	Jahr	Konstante	0,0767	-
C_S	kg/m^3	Konstante	0,00083	0,0001
c	mm	Normalverteilung	43,9	10,5
t_{SL}	Jahr	Konstante	100	-

Tab. 5-20: Eingangsparameter für die Modellierung des Karbonatisierungsfortschritts des Kragarms

Parameter	Einheit	Verteilung	μ	σ
$R_{ACC,0}^{-1}$	$(\text{mm}^2/\text{Jahr})/(\text{kg}/\text{m}^3)$	Normalverteilung	5.331	1.972
k_t	-	Normalverteilung	1,25	0,35
ε_t	$(\text{mm}^2/\text{Jahr})/(\text{kg}/\text{m}^3)$	Normalverteilung	315,5	48
b_c	-	Normalverteilung	-0,567	0,024
t_c	Tag	Konstante	8	
RH_{IST}	%	Weibull $\omega = 100$	76,9	12,2
RH_{ref}	%	Konstante	65	-
g_e	-	Konstante	2,5	-
f_e	-	Konstante	5	-
ToW	-	Konstante	0	
p_{SR}	-	Konstante	0	
b_w	-	Normalverteilung	0,446	0,163
t_0	Jahr	Konstante	0,0767	-
C_S	kg/m^3	Konstante	0,00083	0,0001
c	mm	Normalverteilung	43,7	8,8
t_{SL}	Jahr	Konstante	100	-

Tab. 5-21: Eingangsparameter für die Modellierung des Karbonatisierungsfortschritts des Widerlagers

gibt die Grenzen der deskriptiven Dauerhaftigkeitsbemessung der XC3-Exposition aus der vorangestellten Modellanalyse wieder.

Der Bemessungszustand der Brücke Putzbrunn liegt mitten in dem Zuverlässigkeitsspektrum, das nach den deskriptiven Regeln für ein Bauwerk der Expositionsklasse XC3 zu erwarten ist. Der Ist-Zu-

stand in den Bereichen mit Minderbetondeckungen liegt bei der Zuverlässigkeitsentwicklung zunächst unter dem Zuverlässigkeitsspektrum und somit auch weit unter dem Soll-Zustand, aber es werden immer noch hohe β -Werte erreicht, dass auch nach 100 Jahren im Ist-Zustand immer noch ein β von 1,6 im ungünstigsten Fall des Kragarms erreicht wird. Damit ist die Zuverlässigkeit nach 100 Jahren im-

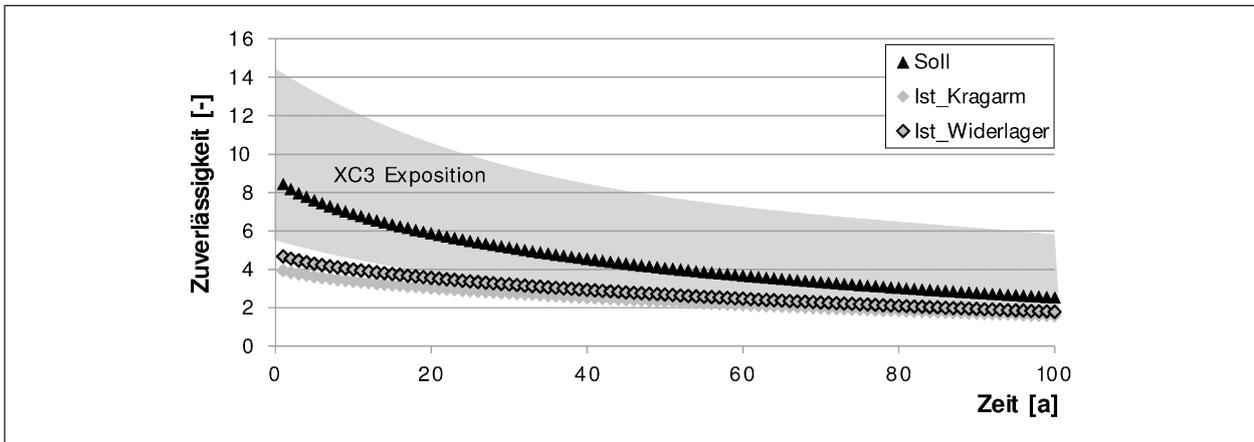


Bild 5-12: Zuverlässigkeitsentwicklung der Brücke Putzbrunn: Vergleich Soll- und Ist-Zustand von Kragarm und Widerlager

mer noch wesentlich größer als die nach XC3-Exposition geforderte Zielzuverlässigkeit von 0,5. Auch nach 100 Jahren ist die Wahrscheinlichkeit einer karbonatisierungsinduzierten Bewehrungskorrosion sehr gering.

Die Eingabeparameter für die Modellierung der Einleitungsphase der Karbonatisierung sind in Tabelle 5-23 zusammengefasst.

In der Modellierung der Zuverlässigkeitsentwicklung der Brücke F wird der Soll-Zustand mit einer nominalen Betondeckung mit der realen, am Bauwerk gemessenen Betondeckung miteinander verglichen. Die Ergebnisse der Lebensdauerbemessung sind in Bild 5-13 dargestellt. Der grau hinterlegte Bereich gibt die Grenzen der deskriptiven

5.8 Lechbrücke

Die Übersicht über die Lechbrücke gibt Tabelle 5-22 [25].

Bauwerk/Bauteil		Keine Skizze vorhanden
Brückenbauwerk über Lech (Hohlkastenquerschnitt), Brückenunterseite		
Baujahr		
1964/1965		
Standort		
Friedberger Str. Augsburg		
Exposition		
Maßgebend XC3 RH _{IST} : $\mu = 78,9 \%$; $\sigma = 10,9 \%$		
Betonrezeptur		Nennmaß der Betondeckung
Zementtyp	W/Z-Wert	
CEM I 42,5R	0,47	
c_{nom} = 50 mm		
Zustand		
1. Daten aus Besichtigung (Risse, Abplatzungen etc.)	Visuelle Untersuchung: Keine Angabe	
2. Vorhandene Messdaten aus Bauwerksüberwachungen (Betondeckung, Chloridgehalt etc.)	Betondeckungsmessung: $\mu = 42,6 \text{ mm}$; $\sigma = 10,9 \text{ mm}$	
3. Bereits durchgeführte Instandsetzungsmaßnahmen (wann und welche Maßnahmen)	Nicht bekannt	
Bemerkungen	Zielzuverlässigkeit 1,5	

Tab. 5-22: Übersicht Lechbrücke

Parameter	Einheit	Verteilung	μ	σ
$R_{ACC,0}^{-1}$	$(\text{mm}^2/\text{Jahr})/(\text{kg}/\text{m}^3)$	Normalverteilung	2.200	987
k_t	-	Normalverteilung	1,25	0,35
ε_t	$(\text{mm}^2/\text{Jahr})/(\text{kg}/\text{m}^3)$	Normalverteilung	315,5	48
b_c	-	Normalverteilung	-0,567	0,024
t_c	Tag	Konstante	4	
RH_{IST}	%	Weibull $\omega=100$	78,3	11,3
RH_{ref}	%	Konstante	65	-
g_e	-	Konstante	2,5	-
f_e	-	Konstante	5	-
ToW	-	Konstante	0	-
p_{SR}	-	Konstante	0	-
b_w	-	Normalverteilung	0,446	0,163
t_0	Jahr	Konstante	0,0767	-
C_S	kg/m^3	Konstante	0,00083	0,0001
c	Mm	Normalverteilung	42,9	10,9
t_{SL}	Jahr	Konstante	100	-

Tab. 5-23: Eingangsparameter für die Modellierung des Karbonatisierungsfortschritts der Lechbrücke

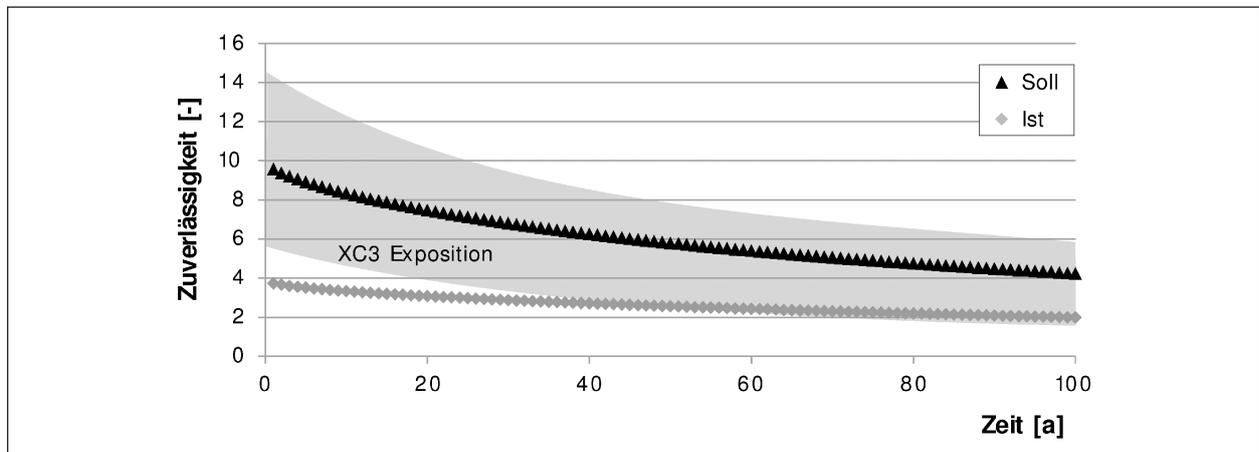


Bild 5-13: Zuverlässigkeitsentwicklung der Lechbrücke: Vergleich Soll- und Ist-Zustand

Dauerhaftigkeitsbemessung der XC3-Exposition aus der vorangestellten Modellanalyse wieder.

Die Zuverlässigkeitsentwicklung des Soll-Zustandes der Lechbrücke befindet sich am oberen Ende des Zuverlässigkeitsspektrums nach XC3-Exposition. Der Ist-Zustand hingegen weist wesentlich geringere Zuverlässigkeiten auf und liegt auch hier zu Beginn teilweise unterhalb des Zuverlässigkeits-

spektrums. Aber auch im Fall der Lechbrücke wird nach 100 Jahren immer noch eine Zuverlässigkeit von 2,0 erreicht, die wesentlich größer ist als die geforderte Zielzuverlässigkeit von 0,5.

5.9 Tunnel A und B

In diesem Kapitel werden zwei Tunnelbauwerke der BAB 96, Tunnel A (Tabelle 5-24) und Tunnel B (Tabelle 5-25), untersucht. Beide Bauwerke sind ungefähr gleich alt und liegen nur wenige Kilometer voneinander entfernt, daher werden beide Bauwerke zusammen ausgewertet.

Die aus der Bauwerksinspektion 2014 gewonnenen Chloridprofile aus den Tunneln A und B wurden ebenfalls auf den scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizienten und die Oberflächenchloridkonzentration gefittet, Tabelle 5-26 und Tabelle 5-27. Die Positionen der Chloridentnahmestellen sind bekannt, wodurch die Chloridparameter in Abhängigkeit der Bauteilhöhe ausgewertet werden können. Auf Basis der visuellen Untersuchung werden die Chloridprofile aufgeteilt in Bereiche mit intakten, ungeschädig-

ten Beton und geschädigten Beton in Form von Risse, Abplatzungen, Hohllagen usw. Nicht für alle Chloridprofile liegen ausreichend Tiefenlagen vor, um den scheinbaren Chlorideindringwiderstand fit-ten zu können. Generell sind in beiden Tunneln erhöhte Chloridkonzentrationen bis in große Tiefenlagen messbar.

Zum Vergleich sind in Tabelle 5-28 und Bild 5-14 die ermittelten Chloriddiffusionskoeffizienten und Oberflächenchloridkonzentration der Tunnel A und B in Abhängigkeit der Tunnelwandhöhe zusammengefasst.

Der scheinbare Chloriddiffusionskoeffizient im Tunnel A streut von minimal $0,23 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ bis maximal $1,77 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ (siehe Tabelle 5-26). Der Mittelwert liegt bei $0,95 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ mit einer Standardabweichung von $0,45 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$. Der Tunnel B

Bauwerk/Bauteil		
2 Röhren mit Rechteckquerschnitten		
Baujahr		
1995		
Standort		
Südbayern		
Exposition		
Maßgebend XD1 Angenommen XD3	Keine Skizze vorhanden	
Betonrezeptur		Nennmaß der Betondeckung
Zementtyp	W/Z-Wert	
Portlandzement, B25	0,5 (Annahme)	$c_{\text{nom}} = 60 \text{ mm}$ (Annahme)
Zustand		
1. Daten aus Besichtigung (Risse, Abplatzungen etc.)	Visuelle Untersuchung (05/2014) <ul style="list-style-type: none"> • vereinzelt freiliegende Bewehrung, • vereinzelt Hohllagen und Kiesnester, • Risse, • Querschnittsverluste an der Bewehrung. 	
2. Vorhandene Messdaten aus Bauwerksüberwachungen (Betondeckung, Chloridgehalt etc.)	Betondeckungsmessung (Ferroscan) <ul style="list-style-type: none"> • mittlere Betondeckung von rd. 60 mm und ein 10%-Quantil von rd. 50 mm (unter Ansatz einer Neville-Verteilung). Potenzialfeldmessung <ul style="list-style-type: none"> • hohe Korrosionswahrscheinlichkeit besonders in den Rissbereichen. Chloridprofile: ungerissenen Bereichen (Tabelle 5-26).	
3. Bereits durchgeführte Instandsetzungsmaßnahmen (wann und welche Maßnahmen)	Nein	
Bemerkungen	Großflächige Ablösung vom Oberflächenschutzsystem, appliziert 1996, die Chloridprofile wurden aus Bereichen der abgelösten Beschichtung entnommen.	

Tab. 5-24: Übersicht Tunnelbauwerk A

weist höhere Chloriddiffusionskoeffizienten von im Mittel $1,46 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ mit einer Standardabweichung von $0,52 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ auf. Da beide Tunnel ungefähr gleich alt sind, kann der Unterschied im Chlorideindringwiderstand maßgeblich auf die Betonzusammensetzung zurückgeführt werden. Jedoch wurde im Tunnel B (CEM I B35) ein Beton mit einer höheren Druckfestigkeit verbaut als im Tunnel A (CEM I B25), daher wären eigentlich niedrigere Chloriddiffusionskoeffizienten im Tunnel B erwartet worden. Der Chloriddiffusionskoeffizient zeigt keine klare Abhängigkeit in Bezug auf die Tunnelwandhöhe.

Die Oberflächenchloridkonzentration im Tunnel A streut von minimal 0,91 M.-%/z bis maximal 5,2 M.-%/z. Der Mittelwert liegt bei 3,25 M.-%/z mit einer Standardabweichung von 1,23 M.-%/z. Der Tunnel B weist leicht niedrigere Oberflächenchloridkonzentration von im Mittel 2,93 M.-%/z mit einer Stan-

dardabweichung von 0,82 M.-%/z auf. Die Oberflächenchloridkonzentration zeigt nur im Tunnel B eine sehr schwache Abhängigkeit über die Tunnelwandhöhe auf. Je höher die Tunnelwandhöhe ist desto leicht niedriger ist die Oberflächenchloridkonzentration. Für den Tunnel A ist keine Abhängigkeit identifizierbar. Zudem ist auch keine Abhängigkeit der Chloridbelastung in Bezug auf die Tunnellänge messbar.

Generell liegen die Werte der Oberflächenchloridkonzentration in dem Wertebereich, die für die Bemessungssituationen der Expositionsklassen XD2 und XD3 als pessimal angenommen wurden, obwohl die Tunnelbauwerke nach ZTV-ING [1] der Expositionsklasse XD1 zuzuordnen sind. Die Annahmen zur Oberflächenchloridkonzentration aus den Bemessungssituationen wird durch die Inspektionsergebnisse von Tunnel A und B verifiziert.

Bauwerk/Bauteil		
2 Röhren mit Rechteckquerschnitten		
Baujahr		
1998		
Standort		
Südbayern		
Exposition		
Maßgebend XD1 Angenommen XD3	Keine Skizze vorhanden	
Betonrezeptur		Nennmaß der Betondeckung
Zementtyp	W/Z-Wert	
Portlandzement, B35	0,5 (Annahme)	$c_{\text{nom}} = 60 \text{ mm}$ (Annahme)
Zustand		
1. Daten aus Besichtigung (Risse, Abplatzungen etc.)	Visuelle Untersuchung (05/2014) <ul style="list-style-type: none"> • vereinzelt freiliegende Bewehrung, • vereinzelt Hohllagen und Kiesnester, • Risse, • Querschnittsverluste an der Bewehrung. 	
2. Vorhandene Messdaten aus Bauwerksüberwachungen (Betondeckung, Chloridgehalt etc.)	Betondeckungsmessung (Ferroskan) <ul style="list-style-type: none"> • mittlere Betondeckung von rd. 65 mm und ein 10%-Quantil von rd. 55 mm (unter Ansatz einer Neville-Verteilung). Potenzialfeldmessung <ul style="list-style-type: none"> • hohe Korrosionswahrscheinlichkeit. Chloridprofile: aus ungerissenen Bereichen (Tabelle 5-27).	
3. Bereits durchgeführte Instandsetzungsmaßnahmen (wann und welche Maßnahmen)	Nein	
Bemerkungen	–	

Tab. 5-25: Übersicht Tunnelbauwerk B

Nr. [-]	Höhe [m]	Beton intakt [-]	D_{app} [$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$]	C_s [M.-%/z]
1	0,10	Nein		4,41
2	1,56	Nein	0,84	5,20
3	1,80	Ja	0,78	1,18
4	2,73	Ja	0,23	4,16
5	0,10	Ja		3,43
6	1,17	Ja		3,43
7	1,95	Ja		2,40
8	2,99	Ja		3,60
9	keine Daten vorhanden	Konstante	0	
10	0,10	Ja	0,77	3,09
11	0,78	Nein		2,80
12	0,39	Nein	1,35	2,50
13	0,30	Nein		3,60
14	0,80	Nein		3,25
15	0,80	Ja	1,35	3,54
16	0,10	Nein		3,36
17	1,75	Nein		3,50
18	2,99	Ja		2,50
19	0,10	Ja	0,48	3,72
20	0,50	Ja	0,69	3,18
21	1,20	Nein	1,49	
22	0,10	Nein		5,23
23	0,40	Ja	1,77	3,65
24	0,10	Nein		4,41
25	0,80	Nein		0,91
26	1,90	Nein		1,26
27	2,70	Ja		
28	0,10	Ja		5,20
29	1,10	Ja	0,84	2,89
30	0,30	Nein		3,17
31	0,70	Nein	0,84	5,20

Tab. 5-26: Scheinbarer Chlorideindringwiderstand und Oberflächenchloridkonzentration von Tunnel A

Nr. [-]	Höhe [m]	Beton intakt [-]	D_{app} [$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$]	C_s [M.-%/z]
1	0,30	Ja	0,88	3,70
2	1,50	Ja	0,99	5,20
3	2,40	Ja		2,03
4	0,20	Ja	1,92	4,85
5	0,10	Nein	1,97	3,20
6	1,00	Ja		2,66
7	1,95	Ja		2,59
8	2,55	Ja		1,47
9	1,90	Nein	1,18	1,57
10	0,20	Ja	1,33	3,02
11	0,10	Nein		1,96
12	0,45	Nein		2,80
13	0,25	Ja		3,30
14	0,10	Nein	1,07	2,23
15	0,90	Nein		3,50
16	1,65	Ja		2,73
17	2,30	Ja		2,45
18	0,90	Ja	1,44	3,40
19	0,20	Nein	2,75	3,19
20	0,20	Nein	1,23	2,02
21	0,75	Ja		2,45
22	1,50	Ja		2,45
23	0,10	Ja	0,68	3,19
24	1,05	Ja		3,22
25	1,85	Ja		2,31
26	2,40	Ja		2,38
27	0,80	Nein	1,53	3,73
28	1,40	Ja	1,40	3,39
29	0,50	Ja	1,87	3,10
30	1,00	Ja	1,91	3,30
31	0,10	Ja	1,19	3,45

Tab. 5-27: Scheinbarer Chlorideindringwiderstand und Oberflächenchloridkonzentration von Tunnel B

Höhe [m]		Tunnel A		Tunnel B	
		D_{app} [$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$]	C_s [M.-%/z]	D_{app} [$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$]	C_s [M.-%/z]
0 – 1	μ	1,04	3,59	1,49	3,12
	σ	0,46	1,06	0,57	0,71
1 – 2	μ	0,99	2,84	1,37	2,94
	σ	0,34	1,40	0,40	0,96
2 – 3	μ	0,23	3,42	-	2,08
	σ	-	0,84		0,45
Gesamt	μ	0,95	3,25	1,46	2,93
	σ	0,45	1,23	0,52	0,82

Tab. 5-28: Zusammenfassung scheinbarer Chlorideindringwiderstand und Oberflächenchloridkonzentration von den Tunnel A und B in Abhängigkeit der Höhe

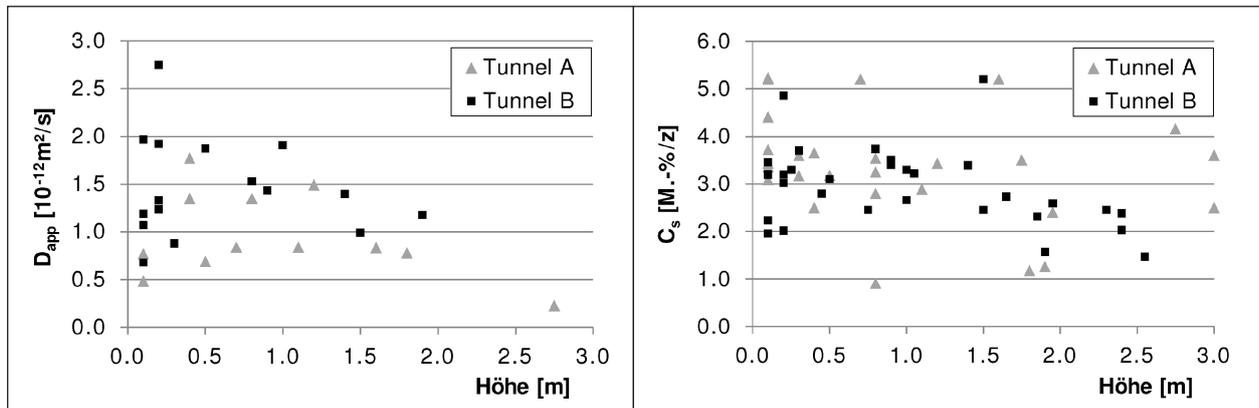


Bild 5-14: Scheinbarer Chloriddiffusionskoeffizient (links) und Oberflächenchloridkonzentration (rechts) der Tunnel A und B in Abhängigkeit der Tunnelwandhöhe

Die Eingabeparameter zur Modellierung der Chlorideinwirkung in den Tunneln A und B sind in Tabelle 5-29 und Tabelle 5-30 aufgelistet. Die Eingabeparameter sind auf eine XD3-Exposition abgestimmt.

Die Zuverlässigkeitsentwicklung der Tunnelbauwerke A und B zeigt Bild 5-15. Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Zuverlässigkeitsspektren von XD1- und XD3-Exposition hinterlegt.

Die Soll-Zustände beider Tunnel befinden sich weit unterhalb des Zuverlässigkeitsspektrums der XD1 Exposition und passen sich sehr gut in das Zuverlässigkeitsspektrum der XD3-Exposition ein. Schon nach weniger als 10 Jahren wird die Zielzuverlässigkeit von $\beta = 0,5$ unterschritten. Unter Berücksichtigung der Inspektionsdaten wird eine höhere Zuverlässigkeit im Ist-Zustand erreicht, aber die Erhöhung reicht nicht aus, die Zielzuverlässigkeit für 100

Jahre sicher zu stellen. Im Tunnel A wird nach ca. 40 Jahre rechnerisch die Zielzuverlässigkeit erreicht und im Tunnel B nach ca. 35 Jahren.

Die Zuverlässigkeitsermittlung aus Bild 5-15 spiegelt einen Mittelwert über die ganze Tunnellänge wider. Jedoch schon in den Tabellen zum scheinbaren Chlorideindringwiderstand als auch der Ersatzoberflächenchloridkonzentration ist ersichtlich, dass die Werte von einer Position im Tunnel zu einer nächsten Position stark schwanken können. Die räumliche Abhängigkeit der Modelleingabeparameter wird in Bild 5-15 vernachlässigt und infolgedessen auch die räumliche Abhängigkeit des Schädigungsmechanismus der Bewehrungskorrosion. Für die Tunnel A und B liegen aber noch weitere Messdaten, wie Betondeckungsmessung und Potenzialfeldmessung zur Verfügung, die eine räumliche

Parameter	Einheit	Verteilung	μ	σ
$D_{RCM}(t_0)/D_{app}$	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Normalverteilung	(15,8)/0,95	(3,16)/0,45
α_{RCM}	-	Beta-Verteilung	0,30	0,12
t_0	Jahr	Konstante	0,0767/18	
T	Jahr	Konstante	100	
T_{ref}	K	Konstante	293	
T_{real}	K	Normalverteilung	283	7
b_e	K	Normalverteilung	4.800	700
$C_{S,\Delta x}$	M.-%/b	LogNormalverteilung	(4) 3,25	(3) 1,23
Δx	mm	Beta-Verteilung (0; 50)	10	5
C_{crit}	M.-%/b	Beta-Vert. (0,2; 2,0)	0,6	0,15
C_0	M.-%/b	Konstante	0	
c	mm	Normalverteilung	(60) 60	6

Tab. 5-29: Modelleingabeparameter für Tunnelbauwerk A

Parameter	Einheit	Verteilung	μ	σ
$D_{RCM}(t_0)/D_{app}$	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Normalverteilung	(10,2) 1,46	(2,04) 0,52
α_{RCM}	-	Beta-Verteilung	0,30	0,12
t_0	Jahr	Konstante	0,0767/15	
T	Jahr	Konstante	100	
T_{ref}	K	Konstante	293	
T_{real}	K	Normalverteilung	283	7
b_e	K	Normalverteilung	4.800	700
$C_{S,\Delta x}$	M.-%/b	LogNormalverteilung	(4) 2,93	(3) 0,82
Δx	mm	Beta-Verteilung (0; 50)	10	5
C_{crit}	M.-%/b	Beta-Vert. (0,2; 2,0)	0,6	0,15
C_0	M.-%/b	Konstante	0	
c	mm	Normalverteilung	(60) 65	8

Tab. 5-30: Modelleingabeparameter für Tunnelbauwerk B

Auswertung der Wahrscheinlichkeit einer chlorid-induzierten Bewehrungskorrosion ermöglichen. Aus jedem Tunnel wird im Folgenden ein Tunnelsegment ausgewählt und die Depassivierungswahrscheinlichkeit in Anlehnung an [26] ausgewertet.

Zunächst werden in Bild 5-16 und Bild 5-17 die Betondeckungsdaten und Potenzialfelddaten der Tunnel A (Segment 36) und B (Segment 15, innen) vorgestellt.

Die Betondeckung im Segment vom Tunnel A streut ca. von 35 bis 70 mm. Höhere Betondeckungswerte befinden sich auf der rechten unteren Seite, während am linken unteren Rand relativ niedrige Werte gemessen werden. In den Daten der Potenzialfeldmessung ist an der unteren Kante zwischen 1 und 2 m ein klarer Potenzialgradient mit sehr niedrigen Potenzialen erkennbar. Die restlichen Potenzialwerte erscheinen unkritisch. Mit steigender Wandhöhe werden die Potenzialwerte positiver, was

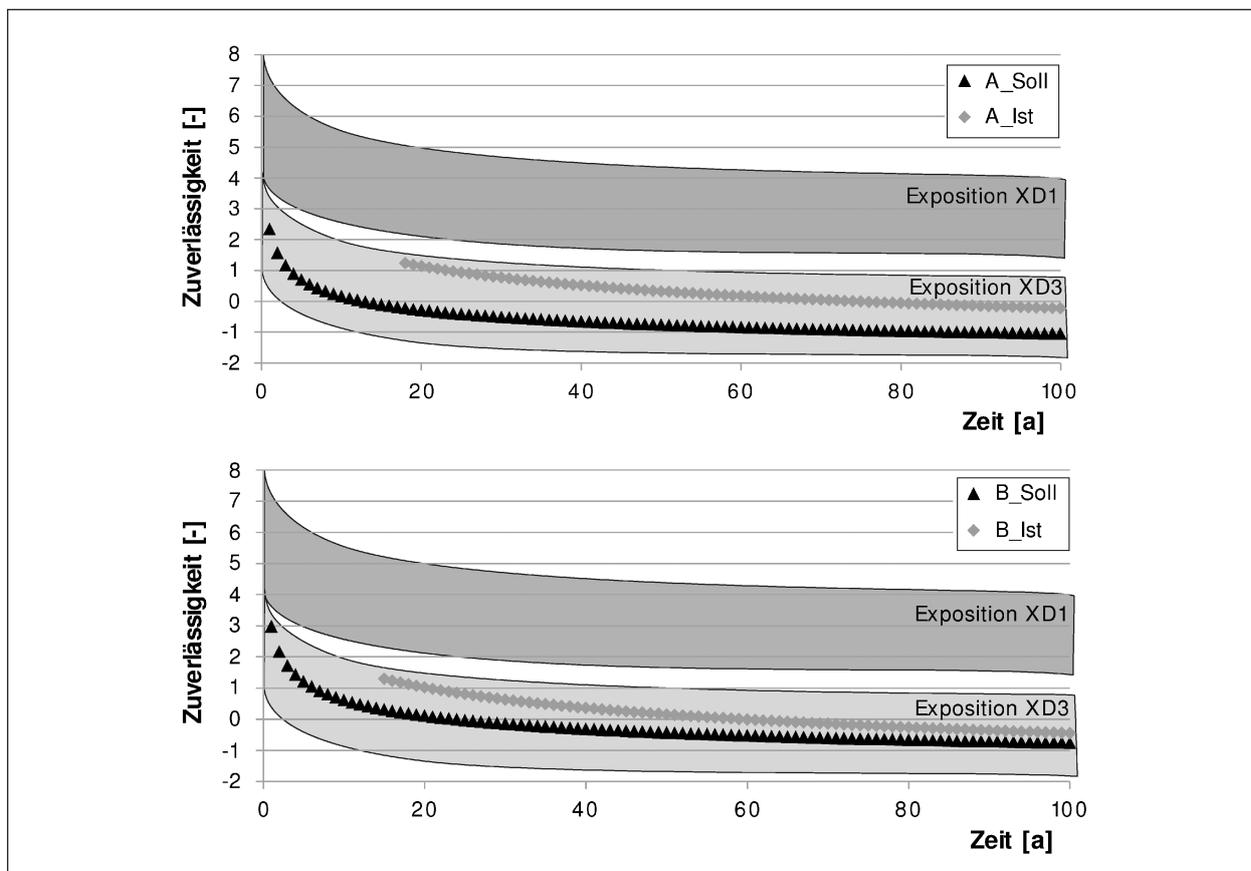


Bild 5-15: Gegenüberstellung Soll-/Ist-Zustand der Tunnelbauwerke A (oben) und B (unten)

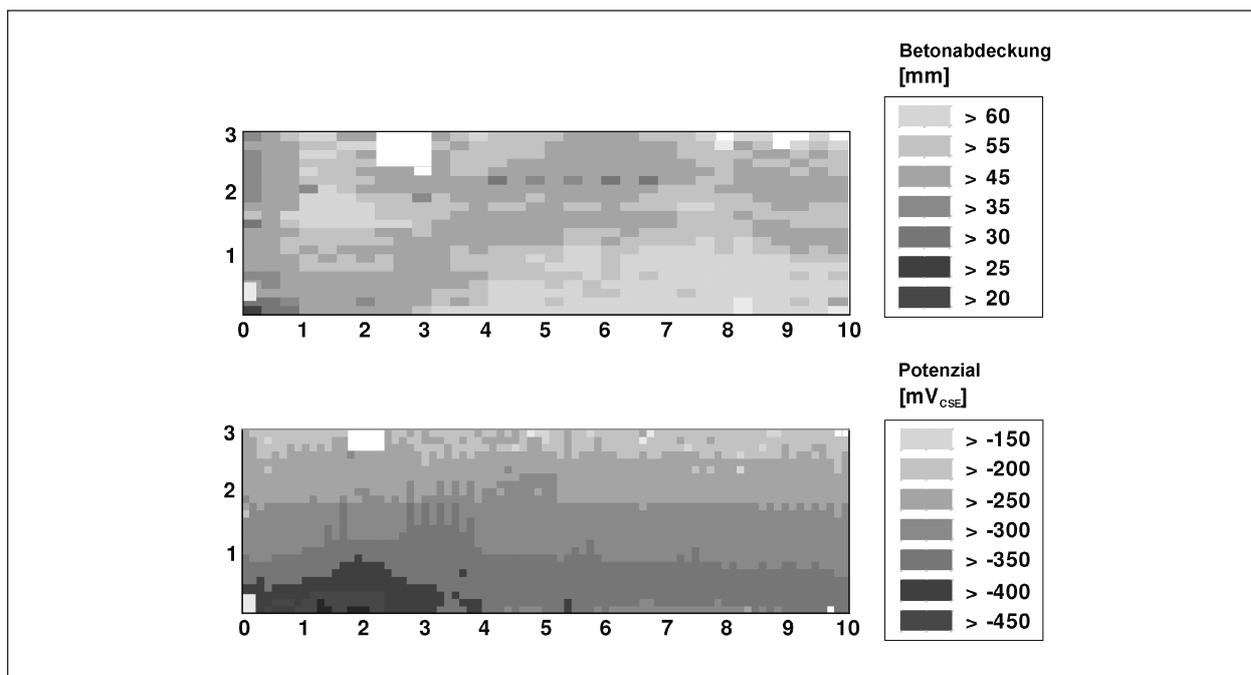


Bild 5-16: Betondeckungsmessung und Potenzialfeldmessdaten des Segments 36 Tunnel A

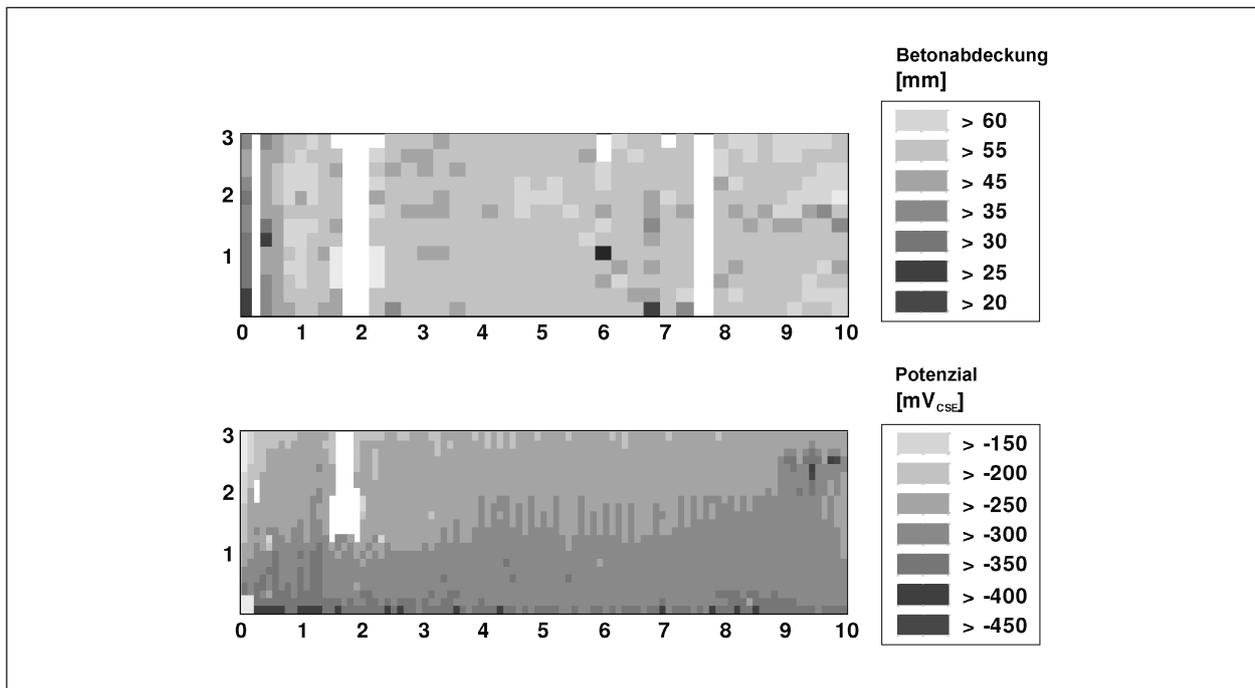


Bild 5-17: Betonabdeckungsmessung und Potenzialfeldmessdaten des Segments 15 (Innen) Tunnel B

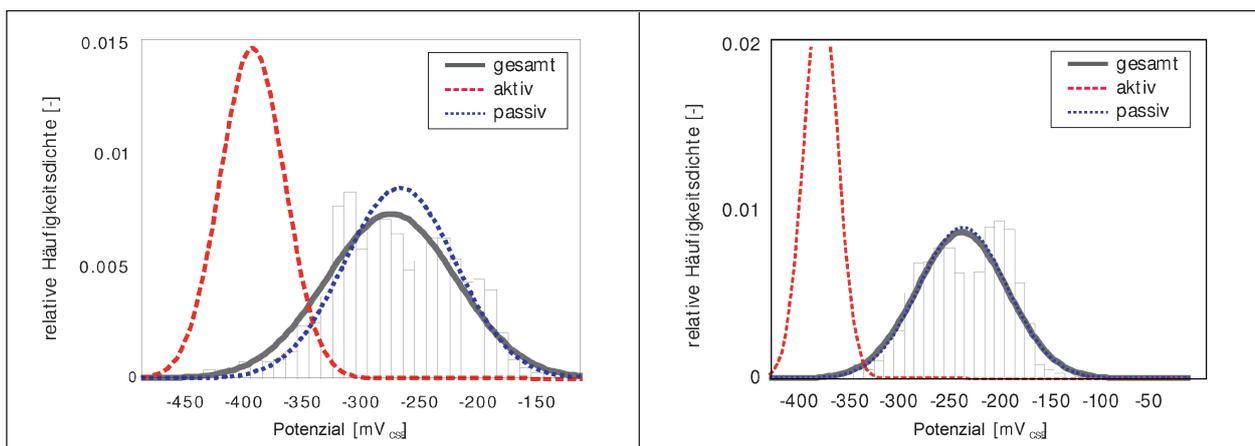


Bild 5-18: Auswertung der Potenzialfeldmessungen: A (links); B (rechts)

wahrscheinlich im Anstieg des Elektrolytwiderstandes über die Tunnelwand begründet liegt.

Die Betonabdeckung im Tunnelsegment B ist im Mittel etwas höher als im Tunnelsegment A. Es lassen sich keine klaren Bereiche mit höheren oder niedrigeren Betonabdeckungen identifizieren. In den Potenzialfelddaten ist wieder die Abhängigkeit des Elektrolytwiderstands über die Tunnelwandung erkennbar. Leichte Potenzialgradienten befinden sich in regelmäßigen Abständen auf Höhe der Bordsteinkante und auf der rechten oberen Ecke.

Die Potenzialfelder aus beiden Tunnelsegmenten wurden anschließend statistisch ausgewertet (siehe

Bild 5-18). In der statistischen Auswertung wird die Grundgesamtheit an Potenzialwerte in Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der aktiven, korrodierenden und der passiven Bewehrung aufgeteilt.

Die Grundgesamtheiten der Potenzialwerte in Tunnel A und B liegen im Bereich von $-450 \text{ mV}_{\text{CSE}}$ bis $-150 \text{ mV}_{\text{CSE}}$. Die Verteilungen der aktiven und passiven Wahrscheinlichkeitsdichten treffen sich ca. bei einem Potenzialwert von $-350 \text{ mV}_{\text{CSE}}$. Als Definition eines Grenzpotenzials, ab dem die Potentiale als kritisch oder unkritisch eingestuft werden können, wird jeweils das 80%-Quantil der aktiven Wahrscheinlichkeitsdichte angenommen. Damit liegt das

Grenzpotenzial von A bei $E_{Gr,A} = -365 \text{ mV}_{CSE}$ und das von B bei $E_{Gr,B} = -358 \text{ mV}_{CSE}$. Die daraus folgenden Abhängigkeiten für das Bayes'sche Updaten nach [26] lauten:

Tunnel A:

$$P(I|C) = 0.80 \quad P(\bar{I}|C) = 0.20$$

$$P(\bar{I}|\bar{C}) = 0.82 \quad P(I|\bar{C}) = 0.18$$

Tunnel B:

$$P(I|C) = 0.80 \quad P(\bar{I}|C) = 0.20$$

$$P(\bar{I}|\bar{C}) \approx 0.99 \quad P(I|\bar{C}) \approx 0.01$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass Bewehrungskorrosion detektiert wird unter der Voraussetzung, dass es korrodiert ist, Gleichung (5-1):

$$P(C|I) = \frac{P(I|C) \cdot P(C)}{P(I|C) \cdot P(C) + P(I|\bar{C}) \cdot P(\bar{C})} \quad (5-1)$$

Im Gegensatz dazu ist die Wahrscheinlichkeit, dass es nicht korrodiert und dass keine Korrosion detektiert wird, Gleichung (5-2):

$$P(\bar{C}|\bar{I}) = \frac{P(\bar{I}|\bar{C}) \cdot P(\bar{C})}{P(\bar{I}|\bar{C}) \cdot P(\bar{C}) + P(\bar{I}|C) \cdot P(C)} \quad (5-2)$$

mit

C Korrosion

I Detektion

Für das Update der Lebensdauerprognose wird zunächst das Tunnelsegment in Elemente eingeteilt mit der Größe entsprechend dem Messraster. Anschließend wird für jedes Element die a priori De-

passivierungswahrscheinlichkeit mit der dem Element zugeordneten Betondeckung neu berechnet. Die räumliche Information aus der Betondeckungsmessung bleibt erhalten. Jedes Element wird dann in einem weiteren Schritt über die dazugehörigen Potenzialfelddaten upgedatet. Die räumlichen Informationen aus der Potenzialfeldmessung ergeben ein differenziertes Bild über die Korrosionswahrscheinlichkeit der jeweiligen Elemente. Die Auswertung von Segment 36 aus A und dem Segment 15 aus B sind in Bild 5-19 und Bild 5-20 abgebildet.

Das Update lediglich auf Basis der Betondeckungsmessung ergibt ein zur reinen Betondeckungsmessung gleiche räumliche Aufteilung. Anstatt der Betondeckung wird nun die Depassivierungswahrscheinlichkeit angegeben. Nach dem Updaten der Depassivierungswahrscheinlichkeit mittels der Betondeckungsmessung und der Potenzialfelddaten ergibt sich ein viel differenzierteres Ergebnis als nach dem Updaten nur auf Basis der Betondeckungsmessung. Das Segment 36 weist im unteren linken Bereich sehr hohe Depassivierungswahrscheinlichkeiten auf, die sich deutlich vom Rest des Segments abgrenzen. Außerhalb dieses Bereiches ist die Depassivierungswahrscheinlichkeit des Segments vernachlässigbar.

Im Tunnelsegment von B ergibt die neue Berechnung der a priori Depassivierungswahrscheinlichkeit einzelne Spots mit hohen Korrosionswahrscheinlichkeiten, dort wo vereinzelt sehr niedrige Betondeckungen gemessen wurden. Werden die Informationen aus der Potenzialfeldmessung mit in das Update der Korrosionswahrscheinlichkeit inte-

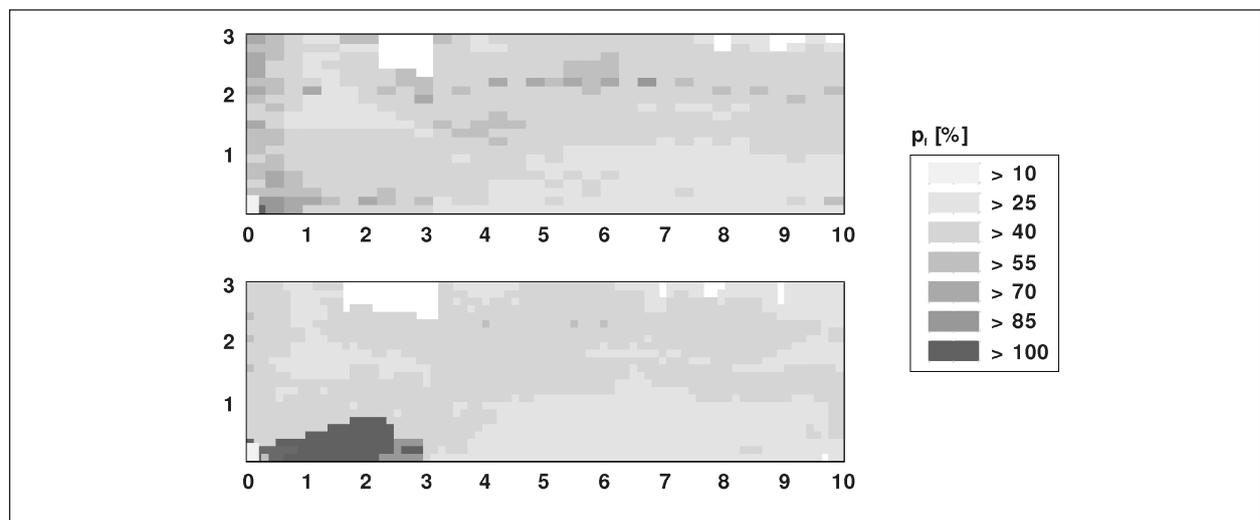


Bild 5-19: Update der Depassivierungswahrscheinlichkeit Tunnel A auf Grundlage der Betondeckungsmessung (oben) und Betondeckungsmessung inklusive Potenzialfelddaten (unten)

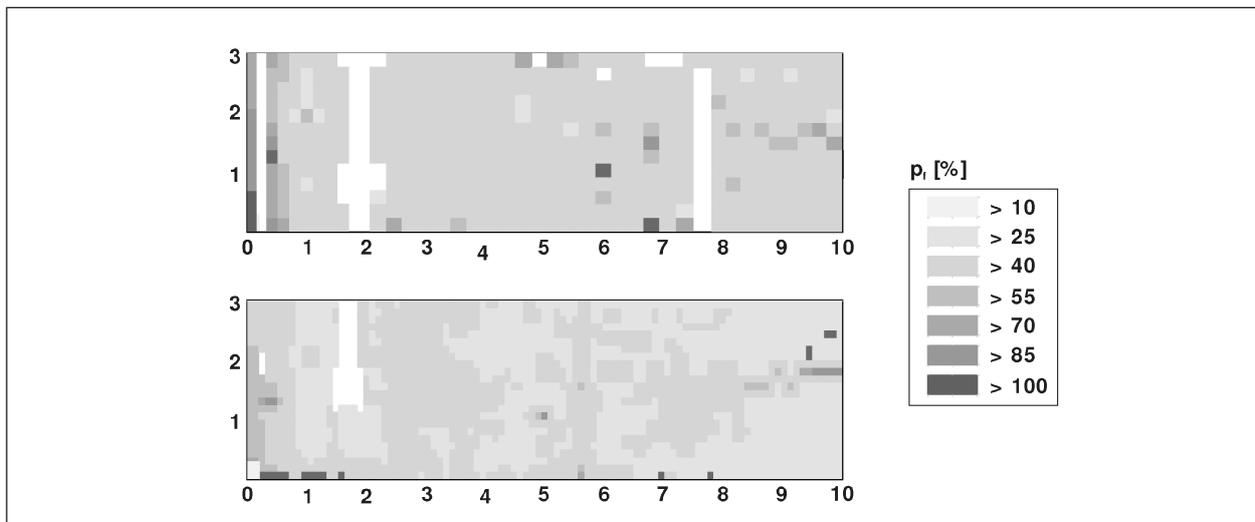


Bild 5-20: Update der Depassivierungswahrscheinlichkeit Tunnel B auf Grundlage der Betondeckungsmessung (oben) und Betondeckungsmessung inklusive Potenzialfelddaten (unten)

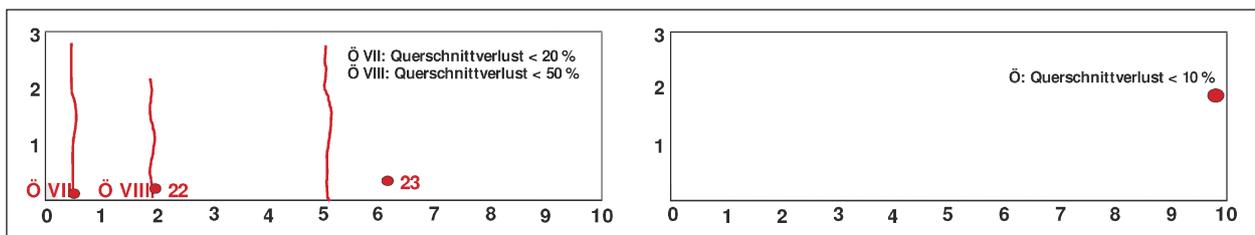


Bild 5-21: Visuelle Inspektion und Entnahmestellen von Chloridprofilen Tunnel A (links); Tunnel B (rechts)

griert, zeigen sich mehrere kleine Spots mit sehr hohen Korrosionswahrscheinlichkeiten, die sich wieder deutlich von den angrenzenden Bereichen abzeichnen. Diese Spots liegen auf Höhe der Bordsteinkante und auf ca. 2 Meter Höhe auf der rechten Seite des Segments.

Wird nun die Depassivierungswahrscheinlichkeit nach dem Update mit der Betondeckungsmessung mit der Depassivierungswahrscheinlichkeit nach dem Update mit der Betondeckungsmessung und den Potenzialfelddaten miteinander verglichen, so zeigt sich, dass die auffälligen Bereich aus dem Update mit der Betondeckungsmessung im Update der Potenzialfeldmessung nur vereinzelt erscheinen. Die Betondeckungsmessung kann den Zustand eines Stahlbetonbauwerks nur indirekt beschreiben. Modelle zur Abschätzung des Chlorideintrags berücksichtigen meist nicht die räumliche Variation des Chlorideintrags. Daher reflektiert mit steigendem Bauwerksalter und damit steigender Korrosionswahrscheinlichkeit die Potenzialfeldmessung indirekt die räumliche Abhängigkeit der Chloridbeaufschlagung. Im Fall eines korrosionsaktiven Stahlbetonbauwerkes liefert die Potenzialfeldmessung we-

sentlich mehr Informationen zum Bauwerkszustand als die Betondeckungsmessung.

Final werden die Ergebnisse aus der räumlichen Auswertung der Depassivierungswahrscheinlichkeit mit den Informationen aus der visuellen Inspektion verglichen. Bild 5-21 zeigt die Ergebnisse der visuellen Inspektion mit Rissen, Chloridentnahmestellen in Übereinstimmung mit Tabelle 5-26 und die Lage der Sondierungen (Ö).

Im Segment aus Tunnel A wurden zwei Öffnungsstellen inspiziert, die beide in einem Rissbereich liegen. In beiden Öffnungsstellen wurde Querschnittsverluste von < 20 bzw. < 50 % aufgrund von Bewehrungskorrosion identifiziert. Die Lage der Öffnungsstellen liegen in Bereichen mit einer sehr hohen Depassivierungswahrscheinlichkeit nach Bild 5-20. Auch im Segment des Tunnels B wurde eine Öffnungsstelle mit Querschnittsverlusten an der Bewehrung markiert. Auch an dieser Position liegt singular eine sehr hohe Depassivierungswahrscheinlichkeit vor. Die Ergebnisse aus der räumlichen Auswertung der Depassivierungswahrscheinlichkeit sind somit partiell validiert.

6 Bewertungskriterien zur Festlegung von Inspektionsintervallen auf Basis einer probabilistischen Zustandsbewertung und -prognose

Basierend aus den Ergebnissen der vorangegangenen Berechnungen kann der Ablauf einer probabilistischen Zustandsbewertung und -prognose nach Bild 6-1 zusammengefasst werden.

Am Anfang einer voll-probabilistischen Zustandsbewertung und -prognose steht das Zusammentragen

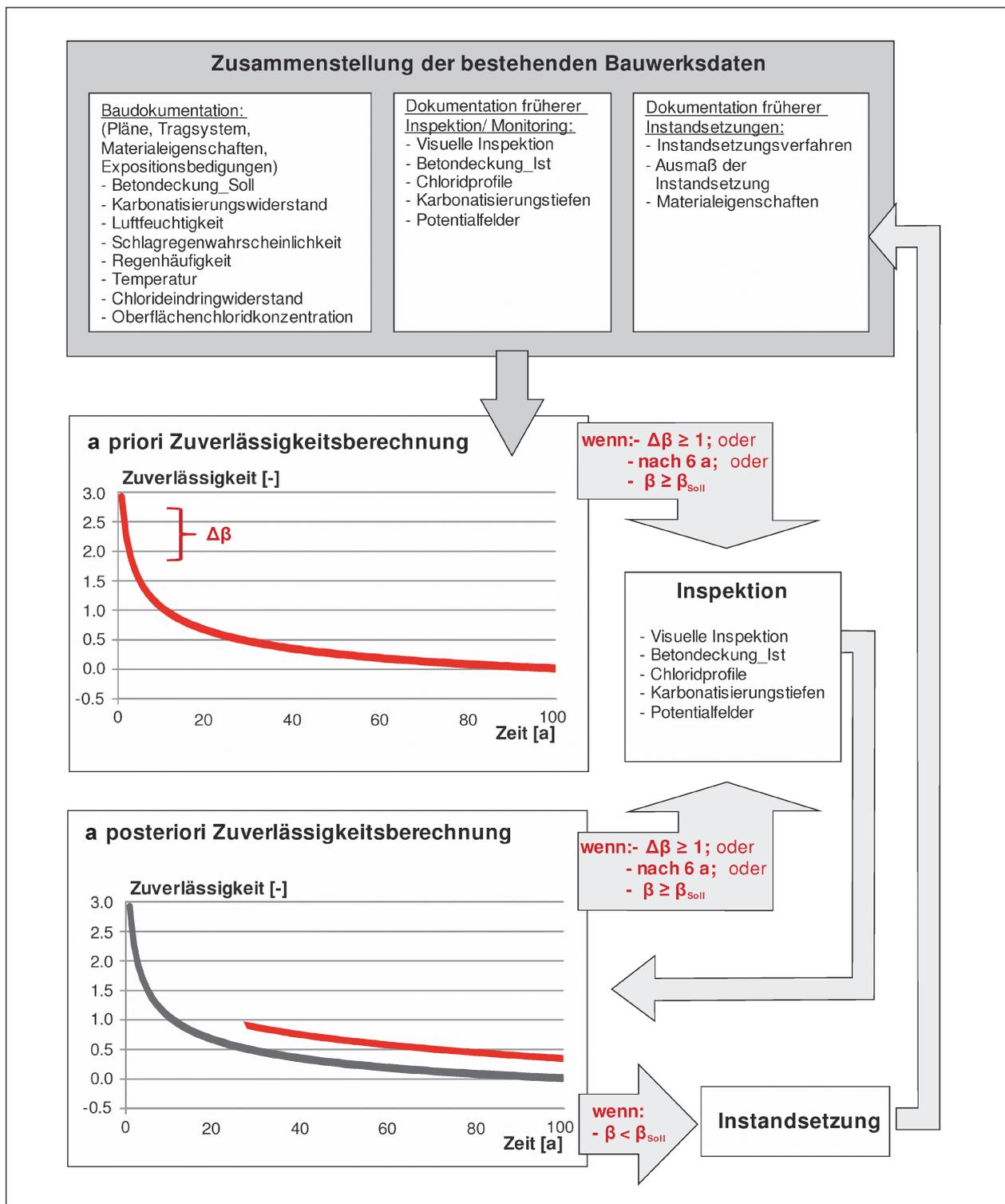


Bild 6-1: Ablauf der probabilistischen Zustandsbewertung und -prognose

aller möglichen Bauwerksdaten aus Bauplänen, Statik und falls das Bauwerk schon länger besteht, aus Inspektionsergebnissen und gegebenenfalls Instandsetzungsmaßnahmen. Für die a priori Zuverlässigkeitsberechnung zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit der Korrosionsinitiierung aufgrund von Karbonatisierung sind die folgenden Parameter festzulegen: Betondeckung, Karbonatisierungswiderstand des Betons (Karbonatisierungstiefen zum Inspektionszeitpunkt), Luftfeuchtigkeit am Bauwerk und, falls das Bauwerk frei bewittert ist, Schlagregenwahrscheinlichkeit und Regenhäufigkeit. Soll die Einleitungsphase chloridinduzierter Bewehrungskorrosion abgeschätzt werden, sind Betondeckung, Durchschnittstemperatur am Bauwerk, Chlorideindringwiderstand, Alterungsexponent und Oberflächenchloridkonzentration zu bestimmen.

Die Parameter Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Regenhäufigkeit können über eine nahegelegene Wetterstation abgerufen bzw. ausgewertet werden. Die Betondeckung kann aus den Planungsdaten abgelesen werden. Für die Materialwiderstandsparameter Karbonatisierungswiderstand, Chlorideindringwiderstand und Alterungsexponent können je nach Betonzusammensetzung Werte aus den Tabellen in Kapitel 3 herausgesucht werden oder anhand von Performanceprüfungen gleich bei der Erstellung des Bauwerkes am originalen Beton im Labor bestimmt werden.

Nach Zusammenstellung der Daten kann die a priori Zuverlässigkeitsentwicklung des Bauwerks berechnet werden. Je nach Verlauf der Zuverlässigkeitsentwicklung bieten sich mehrere Kriterien zur Festlegung von Inspektionsintervallen an:

- $\Delta\beta \geq 1$,
- nach 6 Jahren,
- $\beta \geq \beta_{\text{Soll}}$.

Das dritte Kriterium setzt natürlich voraus, dass eine Zielzuverlässigkeit festgelegt wurde. Zur Festlegung einer Zielzuverlässigkeit bietet das Positionspaper der DAfStb [13], [14] Orientierung.

Bei der ersten Bauwerksinspektion ist die Messung der realen Betondeckung dringend zu empfehlen, falls die Betondeckung bei der Abnahme nicht bestimmt wurde. Neben der Bestimmung der Karbonatisierungstiefe ist die Entnahme von Chloridprofilen sinnvoll. Bei der Entnahme von Chloridprofilen ist dabei zu beachten, dass mindestens vier, besser fünf Tiefenlagen entnommen werden. Die Größe ei-

ner Tiefenlage kann zwischen 5 und 20 mm gewählt werden. Für eine Regressionsanalyse sind mindestens drei Tiefenlagen erforderlich. Jedoch sollten für Bauteile der XD3-Exposition die Chloridkonzentrationen aus der Konvektionszone nicht in die Regressionsanalyse miteinbezogen werden.

Liegen nun die aktuellen Daten aus einer Bauwerksinspektion vor, kann die a posteriori Zuverlässigkeitsentwicklung berechnet werden und mit den gleichen Kriterien der nächste Inspektionszeitpunkt bestimmt werden.

Je länger das Bauwerk einer Chloridexposition ausgesetzt ist und je höher die Wahrscheinlichkeit der Korrosionsinitiierung ist, desto mehr bietet sich die Durchführung einer Potenzialfeldmessung an. Auf Basis von Potenzialfelddaten kann verifiziert werden, ob und wo Bewehrungskorrosion initiiert wurde ist. Die Potenzialfelddaten können dann in flächige Informationen zur Depassivierungswahrscheinlichkeit umgerechnet werden.

Fällt die Zuverlässigkeit unter den Wert der Zielzuverlässigkeit, werden Instandsetzungsmaßnahmen notwendig und der Ablauf der probabilistischen Zustandsbewertung und -prognose fängt von vorne an.

7 Zusammenfassung

In diesem Forschungsvorhaben wurden die Einflüsse von Modellparametern auf die Lebensdauerprognose von Brückenbauwerke im Zuge von Bundesfernstraßen mithilfe von voll-probabilistischen Prognosemodellen untersucht. Hierfür wurden die deskriptiven Bemessungsregeln zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von Chlorid (XD-) und Karbonatisierungs (XC-)exponierten Brückenbauwerken herangezogen. Die rechnerische Einflüsse der Eingangs- Modellparametern werden über Sensitivitäts- und Dominanzanalyse untersucht. Als Soll-Zustand werden die Ergebnisse der a priori Bemessung definiert, die meist auf Basis der Planungsdaten berechnet werden kann. Der Ist-Zustand (a posteriori) unter Anwendung von Inspektionsdaten wird im Anschluss berechnet.

Im Einzelnen wurden Bemessungssituationen für jede Expositionsklasse aufgestellt, die die Bandbreite an zulässigen Betonzusammensetzungen und möglichen Einwirkungen abbildet. Im Fokus stand dabei die Abdeckung des kompletten Zuver-

lässigkeitsspektrums für eine Expositionsklasse. Dafür wurden kritische und unkritische Bemessungssituationen aufgestellt. Eine unkritische Bemessungssituation ist die Kombination von hohen Materialwiderständen und schwachen Einwirkungen während in der kritischen Bemessungssituation niedrige Materialwiderstände starken Einwirkungen gegenüber gestellt werden. Final wurden die resultierenden Zuverlässigkeitsspektren mit der Zielzuverlässigkeit nach 100 Jahren Lebensdauer miteinander verglichen.

Da bei Brückenbauwerken meist eine Kombination von XC-, XF- und XD-Exposition auftreten, wurde für die Bestimmung der Materialwiderstände jeweils der maßgebende Bemessungsfall angesetzt.

Das für Brückenbauwerke berechnete Zuverlässigkeitsspektrum für Bauwerke gegenüber dem Grenzzustand „Depassivierung infolge Karbonatisierung bei hoher Wassersättigung“ erreicht Werte von $4 \leq \beta \leq 14,5$ nach 100 Jahren Lebensdauer. Auch bei Anwendung der im Rahmen der deskriptiven Lebensdauerbemessung zulässigen niedrigen Materialwiderstände, wird die Zielzuverlässigkeit von 1,5 sicher eingehalten. D. h., für die Expositionsklasse XC2 bei maßgebender Exposition XD2 ist das Bauwerk gegenüber karbonatisierungsinduzierter Bewehrungskorrosion sicher geschützt. Die Zielzuverlässigkeit von $\beta = 0,5$ gegenüber dem Grenzzustand „Depassivierung infolge Karbonatisierung bei mäßiger Wassersättigung (XC3)“ kann über einen Zeitraum von 100 Jahren ebenfalls sicher eingehalten werden. Bei der ungünstigen Kombination von niedrigen Materialwiderständen mit starken Einwirkungen wird nach 100 Jahren rechnerisch ein β von ca. 1 erreicht. In der gegensätzlichen Kombination von schwachen Einwirkungen und hohen Materialwiderständen wird nach 100 Jahren ein β von ca. 4 berechnet. In der wechselnd nass-trockenen Expositionsklasse XC4 ist die Zielzuverlässigkeit von $\beta = 1,5$ auch unter ungünstigen Kombinationen von Materialwiderständen und Einwirkungen rechnerisch sichergestellt. Selbst bei schwachen Materialwiderständen mit starken Einwirkungen wird nach 100 Jahren noch ein β von 3,6 erreicht.

Die Sensitivitäts- und Dominanzanalyse zeigen, dass die Betondeckung für die Modellierung des Karbonatisierungsfortschritts in den meisten Fällen der sensitivste und der dominanteste Eingabeparameter ist. Die Bestimmung der realen Betondeckungsmessung am Bauwerk kann die Streuung durch die Betondeckungswerte im Modell reduzieren.

Für Bauwerke, die einer reinen XC-Exposition unterliegen, d. h. nicht gleichzeitig auch chloridbeaufschlagt sind, können die Ergebnisse aus dieser Überprüfung nicht übernommen werden. Hierfür müssten separate Berechnungsgänge durchgeführt werden.

Das Zuverlässigkeitsspektrum der XD1-Exposition $1,3 \leq \beta \leq 3,8$ nach 100 Jahren ist wesentlich schmaler, als die zuvor betrachteten Zuverlässigkeitsspektren. Die Zielzuverlässigkeit von 1,5 wird in der kritischen Bemessungssituation nach ca. 55 Jahren rechnerisch unterschritten. Auch im Rahmen der XD2-Exposition kann die avisierte Zielzuverlässigkeit nicht für jede Bemessungssituation sichergestellt werden. Das Zuverlässigkeitsspektrum von $-1,2 \leq \beta \leq 1,3$ liegt zum Teil deutlich unterhalb der hier zunächst angestrebten Zielzuverlässigkeit von 0,5, die bereits nach wenigen Jahren unterschritten werden könnte. Das Zuverlässigkeitsspektrum der XD3-Exposition mit $-1,5 \leq \beta \leq 1,0$ ist ebenfalls sehr schmal und die Zielzuverlässigkeit von 0,5 wird rechnerisch teilweise schon nach wenigen Jahren erreicht. Die Sensitivitäts- und Dominanzanalyse der XD-Exposition zeigen, dass die Modellunsicherheit durch eine genaue Bestimmung der Eingabeparameter Alterungsexponent, Oberflächenchloridkonzentration und Temperatur reduziert werden kann.

Für die Überprüfung der Modelleingabeparameter und zur Aktualisierung der Modellprognose standen dem Forschungsprojekt mehrere Ingenieurbauwerke, (6 Brücken- und 2 Tunnelbauwerke) und ein großer Datensatz aus Chloridprofilen unterschiedlicher Brückenbauteile aus ganz Deutschland zur Verfügung. Über die Ingenieurbauwerke konnten lediglich 6 XD1 Bauteile und 2 XC3 Bauteile untersucht werden. Die Auswahl an Standorten und somit unterschiedlichen Einwirkungen ist entsprechend genauso begrenzt wie die Berücksichtigung an unterschiedlichen Materialwiderständen.

Aus dem Datensatz der Chloridprofile aus unterschiedlichen Brückenbauwerken in Deutschland konnte nur ein kleiner Teil ausgewertet werden, da nur wenige Profile mindestens drei Tiefenlagen zum Fitten des scheinbaren Chlorideindringwiderstands und der Oberflächenchloridkonzentration aufwiesen. Die restlichen Daten wurden dann getrennt nach Bauteiltyp ausgewertet, jedoch sind in dem Datensatz Bauwerksdaten aus unterschiedlichen Bauwerksalter, Betonzusammensetzung und Standorten enthalten, wodurch eine klare Differen-

zierung und Vergleich zu den Bemessungssituationen nicht zielführend ist. Zur Bildung eigener Klassen mit vergleichbaren Bauwerksalter, Betonzusammensetzung und Exposition ist der Datensatz zu begrenzt.

Die 4 untersuchten Brückenbauteile der Expositions-kategorie XD1 fügen sich in ihrer Zuverlässigkeitsentwicklung sehr gut in das Zuverlässigkeitsspektrum für XD1-Bauwerke aus der Modellanalyse ein. Bei allen 4 Bauteilen lag die Zuverlässigkeit des Ist-Zustandes oberhalb der des Soll-Zustandes. Auch nach 100 Jahren Nutzungsdauer wird eine Zuverlässigkeit über der Zielzuverlässigkeit eingehalten.

Die zwei XC3-Bauwerke liegen im Soll-Zustand zunächst unterhalb des Zuverlässigkeitsspektrum für XC3-Bauwerke aus der Modellanalyse jedoch mit steigendem Bauwerksalter befinden sich die gerechneten Zuverlässigkeiten im Spektrum. Die aus den Inspektionsdaten berechnete Zuverlässigkeitsentwicklung des Ist-Zustandes liegt über der des Soll-Zustandes. Die Zielzuverlässigkeit wird nach 100 Jahren sicher eingehalten.

Für die zwei Tunnelbauwerke berechnen sich Zuverlässigkeiten für die Soll-Zustände, die weit unterhalb des mit dem Modell berechneten Zuverlässigkeitsspektrums für eine XD1 Exposition liegen. Sie passen sich sehr gut in das mit dem Modell berechnete Zuverlässigkeitsspektrum der XD3-Exposition ein. Unter Berücksichtigung der Inspektionsdaten wird eine höhere Zuverlässigkeit im Ist-Zustand als im Soll-Zustand erreicht. Die Erhöhung reicht nicht aus, die Zielzuverlässigkeit für 100 Jahre sicher zu stellen. In beiden Tunnelbauwerken konnte auf Basis der Potenzialfelddaten Bewehrungskorrosion detektiert werden, die an ausgesuchten Sondierungsstellen bestätigt wurde. Die Untersuchungen zeigen, dass auch wenn das Bauteil im Mittel eine Zuverlässigkeit oberhalb der Zielzuverlässigkeit aufweist, trotzdem die Bereiche mit höherer Chloridbelastung bereits Anzeichen von Bewehrungskorrosion aufweisen können. Umso wichtiger ist es, dass jegliche räumliche Information aus Inspektionsdaten für die finale Bewertung des Bauteils erhalten und verwertet werden. Bedingt durch konstruktive Aspekte und herstellungsbedingte Prozessen (z. B. die Fugensituation und z. B. die Verdichtung des Betons) ist ein höheres Chlorideindringen in Tunnel- als in Brückenbauwerken zu erwarten. Eine Übertragung der Ergebnisse für die XD3 Exposition in Tunnelbauwerke auf Widerlager, Pfei-

ler und Stützen von Brückenbauwerken ist aufgrund der vermuteten höheren Beanspruchung und Umgebungsbedingungen im Tunnel nicht möglich. Hierzu sind Inspektionsdaten von Brückenbauteile, die der Exposition XD3 zugeordnet werden können, notwendig.

Final wird ein Ablaufdiagramm zur Durchführung einer voll-probabilistischen Lebensdauerprognose vorgestellt. Neben der Zusammenstellung der notwendigen Eingabeparameter werden nach der Berechnung der a priori Zuverlässigkeitsentwicklung, Kriterien zur Festlegung von Inspektionsintervallen abgeleitet.

Aus den Ergebnissen dieses Forschungsprojektes wird deutlich, dass eine Bemessung der Dauerhaftigkeit im Bereich der karbonatisierungs- und chloridinduzierten Bewehrungskorrosion anhand voll-probabilistische Prognosemodelle für den Grenz-zustand der Depassivierung der Bewehrung für Brückenbauwerke im Zuge der Bundesstraße möglich ist. Jedoch sind die a priori berechnete Zuverlässigkeitsspektren sehr breit und für ein einzelnes Bauwerk lassen sich ohne Inspektionsdaten keine bauwerkspezifisch gültige Zuverlässigkeitswerte ableiten, d. h. die konkrete, bauwerksspezifische Restnutzungsdauer bleibt unbekannt. Eine sinnvolle Anwendung von voll-probabilistischen Modellen stellt hohe Anforderungen an die Quantität und Qualität der Inspektionsergebnisse.

Für zukünftige Forschungsarbeiten ist es sinnvoll, wesentlich mehr Ingenieurbauwerke aus allen Expositions-klassen mit einer breiteren Auswahl an Standorten/Expositionen und Betonzusammensetzungen zur Verifizierung der Modellanalyse auszuwerten. Zudem müssen die Inspektionsergebnisse aus den Ingenieurbauwerken Mindestanforderungen erfüllen. Im Fall der Chloridexposition ist die genaue Lage der Chloridprofile als auch die Entnahme von mindestens 4, besser 5 Tiefenlagen erforderlich. In Abhängigkeit der Bauteilgröße sollten entsprechend mehr Chloridprofile bzw. Karbonatisierungstiefen gemessen werden. Darüber hinaus sollte auf alle Fälle die Betonzusammensetzung bekannt sein und Messdaten zur Betondeckung vorliegen. Ein auf Performance-basierender Ansatz zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit kann die gesamte probabilistisch berechnete Lebensdauer ermöglichen und wäre die zweckmäßigste Lösung, um die Zuverlässigkeit für jedes Bauwerk/Bauteil individuell aufstellen zu können.

Literatur

- [1] ZTV-ING: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 3 Massivbau, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2017
- [2] DIN 1045-2:2008 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1
- [3] DIN EN 1992-2; NA:2013-04: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln; Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter.
- [4] DIN EN 206:2014 Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013
- [5] GEHLEN, C. (2000): Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 510, Beuth, Berlin, Dissertation
- [6] SCHIESSL, P.; BAMFORTH, P.; BAROGHELBOUNY, V.; CORLEY, G.; FABER, M.; FORBES, J., GEHLEN, C. et al. (2006): Model code for service life design. fib bulletin 34
- [7] GEHLEN, C., GREVE-DIERFELD, S.v., GULIKERS, J., HELLAND, S., RAHIMI, A. et al. (2015): Benchmarking of Deemed-to-Satisfy Provisions in Standards – Durability of Reinforced Concrete Structures Exposed to Chlorides. fib bulletin 76
- [8] GREVE-DIERFELD, S.v. (2015): Bemessungsregeln zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit XC-exponierter Stahlbetonbauteile, Dissertation TU München, 2015
- [9] RAHIMI, A. (2016): Semiprobabilistisches Nachweiskonzept zur Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkung, Diss. TU München
- [10] fib Model Code for Concrete Structures 2010
- [11] ISO 2394:1998 General principles on reliability of structures
- [12] DAfStb Instandhaltungsrichtlinie 201X: Gelbdruck, 2017
- [13] DAfStb Positionspapier 2008: Positionspapier des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton zur Umsetzung des Konzepts von leistungsbezogenen Entwurfsverfahren unter Berücksichtigung von DIN EN 206-1, Anhang J. In: Beton- und Stahlbetonbau 103, 2008, Heft 12
- [14] GEHLEN, C.; SCHIESSL, P.; SCHIESSL-PECKA, A. (2008): Hintergrundinformationen zum Positionspapier des DAfStb zur Umsetzung des Konzepts von leistungsbezogenen Entwurfsverfahren unter Berücksichtigung von DIN EN 206-1, Anhang J, für dauerhaftigkeitsrelevante Problemstellungen. In: Beton- und Stahlbetonbau 103, 2008, Heft 12
- [15] DIN EN 197-1:2014 (Entwurf) Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement; Deutsche Fassung EN 197-1:2014
- [16] DIN EN 12390-11:2015 Prüfung von Festbeton – Teil 11: Bestimmung des Chloridwiderstands von Beton – Einseitig gerichtete Diffusion
- [17] BAW-Merkblatt 2017: Chlorideindringwiderstand von Beton (MCL). Bundesanstalt für Wasserbau
- [18] GEHLEN, C.; MATTHEWS, S.; OSTERMINSKI, K.; STRAUB, D.; KESSLER, S.; MAYER, T.F.; Greve-Dierfeld, S. v.; Zintel, M. (2011): Condition Control and Assessment of Reinforced Concrete Structures Exposed to Corrosive Environments (Carbonation/Chlorides), fib bulletin 59, 2011
- [19] STRAUB, D. (2009): Stochastic modeling of deterioration processes through dynamic Bayesian

- networks. In: Journal of Engineering Mechanics 135 (10):1089-99
- [20] JENSEN, F.V.; NIELSEN, T.D. (2007): Bayesian Networks and Decision Graphs: Springer Publishing Company, Incorporated
- [21] TRAN, T.; BASTIDAS-ARTEAGA, E.; SCHOEFS, F. (2016): Improved Bayesian network configuration for probabilistic identification of degradation mechanism: Application to chloride ingress. In: Structure and Infrastructure Engineering, 2016, Vol. 12, No. 9, pp. 1162-1176
- [22] <http://www.strurel.de/>
- [23] BASt (2003): Daten aus Forschungsprojekt FE.15.383.03, unveröffentlicht
- [24] SCHIESSL, P.; BRAMESHUBER, W.; GEHLEN, C.; WIEGRINK, K.-H. (1999): Einfluß von Rissen auf die Korrosion von Spannstahl in Brücken, Forschungsbericht F390 (unveröffentlicht)
- [25] IB Schießl Gehlen Sodeikat, Gutachten (2001): Lebensdauerabschätzung hinsichtlich carbonatisierungsinduzierter Bewehrungskorrosion für einzelne Sichtbetonflächenbereiche der Brücke Solalindenstraße, (unveröffentlicht)
- [26] KESSLER, S.; GEHLEN, C. (2015): Probability of Detection of Potenzial Mapping and its Impact on Service Life Prediction. ICASP12 Vancouver, 2015 <http://hdl.handle.net/2429/53300>
- Bild 4-3: Zuverlässigkeitsentwicklung der Bemessungssituationen nach XC-Exposition
- Bild 4-4: Sensitivitätsanalyse für die Bemessungssituationen bei XC-Exposition zum Zeitpunkt 100 Jahre
- Bild 4-5: Alpha-Werte in Abhängigkeit der Zeit von Bemessungssituation XC4_2_55
- Bild 4-6: Dominanzanalyse für die Bemessungssituation XC4_2_55 in Abhängigkeit der Zeit
- Bild 4-7: Normierte Dominanzanalyse für die Bemessungssituation XC4_2_55 zum Zeitpunkt 100 Jahre
- Bild 4-8: Zuverlässigkeitsentwicklung der Bemessungssituationen nach XD-Exposition
- Bild 4-9: Sensitivitätsanalyse für die Bemessungssituationen bei XD-Exposition
- Bild 4-10: Alpha-Werte in Abhängigkeit der Zeit von Bemessungssituation XD3_2_55
- Bild 4-11: Dominanzanalyse für die Bemessungssituation XD3_2_55
- Bild 4-12: Normierte Dominanzanalyse für die Bemessungssituation XD3_2_55 zum Zeitpunkt 100 Jahre
- Bild 5-1: Vergleich Regressionsanalyse und Bayes'sche Netzwerke zum Fitten von Chlorideindringwiderstand und Chloridoberflächenkonzentration aus gemessenen Chloridprofilen
- Bild 5-2: Scheinbarer Chlorideindringwiderstand (links) und Oberflächenchloridkonzentration (rechts) der in Abhängigkeit des Prüfalters
- Bild 5-3: Längsschnitt Brücke Rennekoven
- Bild 5-4: Gegenüberstellung Soll-/Ist-Zustand der Brücke Rennekoven
- Bild 5-5: Längsschnitt Brücke Schirik
- Bild 5-6: Gegenüberstellung Soll-/Ist-Zustand der Brücke Schirik
- Bild 5-7: Längsschnitt Brücke Hülscheid-Winkeln

Bilder

- Bild 4-1: Verteilungen der Betondeckungen $c_{\min} = 40$ mm mit Vorhaltemaß 5 mm und 15 mm
- Bild 4-2: Zuverlässigkeitsentwicklung im Vergleich der Rechenverfahren FORM, SORM und Monte-Carlo (10:000 Simulationen) für die Bemessungssituationen XC3_1_55 und XD3_2_55

- Bild 5-8: Gegenüberstellung Soll-/Ist-Zustand der Brücke Hülscheid-Winkeln
- Bild 5-9: Ansicht Brücke Rölvede
- Bild 5-10: Gegenüberstellung Soll-/Ist-Zustand der Brücke Rölvede
- Bild 5-11: Querschnitt Brücke Putzbrunn
- Bild 5-12: Zuverlässigkeitsentwicklung der Brücke Putzbrunn: Vergleich Soll- und Ist-Zustand von Kragarm und Widerlager
- Bild 5-13: Zuverlässigkeitsentwicklung der Lechbrücke: Vergleich Soll- und Ist-Zustand
- Bild 5-14: Scheinbarer Chloriddiffusionskoeffizient (links) und Oberflächenchloridkonzentration (rechts) der Tunnel A und B in Abhängigkeit der Tunnelwandhöhe
- Bild 5-15: Gegenüberstellung Soll-/Ist-Zustand der Tunnelbauwerke A (oben) und B (unten)
- Bild 5-16: Betondeckungsmessung und Potenzialfeldmessdaten des Segments 36 Tunnel A
- Bild 5-17: Betondeckungsmessung und Potenzialfeldmessdaten des Segments 15 (Innen) Tunnel B
- Bild 5-18: Auswertung der Potenzialfeldmessungen: A (links); B (rechts)
- Bild 5-19: Update der Depassivierungswahrscheinlichkeit Tunnel A auf Grundlage der Betondeckungsmessung (oben) und Betondeckungsmessung inklusive Potenzialfelddaten (unten)
- Bild 5-20: Update der Depassivierungswahrscheinlichkeit Tunnel B auf Grundlage der Betondeckungsmessung (oben) und Betondeckungsmessung inklusive Potenzialfelddaten (unten)
- Bild 5-21: Visuelle Inspektion und Entnahmestellen von Chloridprofilen Tunnel A (oben); Tunnel B (unten)
- Bild 6-1: Ablauf der probabilistischen Zustandsbewertung und -prognose

Tabellen

- Tab. 1-1: Expositionsklassen nach ZTV-ING [1] für Chloridbeanspruchung, Karbonatisierung und Frostangriff
- Tab. 3-1: Zuverlässigkeitsindex β_0 zum Ende der vereinbarten techn. Lebensdauer für den Grenzzustand der Depassivierung [13], [14]
- Tab. 3-2: Allgemeine Modellparameter: Karbonatisierung [5]
- Tab. 3-3: Angesetzte relative Luftfeuchtigkeit RHIST nach XC-Exposition [8]
- Tab. 3-4: Regenhäufigkeit, ToW und Schlagregenwahrscheinlichkeit p_{SR} , nach XC-Exposition [8]
- Tab. 3-5: Schlagregenwahrscheinlichkeit p_{SR} , nach Ausrichtung des Bauteils [8]
- Tab. 3-6: Grenzwerte der w/z-Werte, Zementgehalte und Betondeckung der entsprechenden XC-Expositionsklassen [2]
- Tab. 3-7: Zugelassene Anwendung der Zementarten in Abhängigkeit der Expositionsklasse [2]. (grau: zulässig; weiß: nicht zulässig)
- Tab. 3-8: Karbonatisierungswiderstand, $R_{ACC,0-1}$, in Abhängigkeit der Betonzusammensetzung [5], [8]
- Tab. 3-9: Allgemeine Modellparameter: Chlorideindringen [6]
- Tab. 3-10: (Ersatz-)Oberflächenchloridkonzentration und Tiefe der Ersatzoberfläche in Abhängigkeit der Exposition [7]
- Tab. 3-11: Grenzwerte der w/z-Werte, Zementgehalte und Betondeckung der entsprechenden XD-Expositionsklassen [2], [3]
- Tab. 3-12: Zugelassene Anwendung der Zemente in Abhängigkeit der Expositionsklasse [2] (grau: zulässig; weiß: nicht zulässig)
- Tab. 3-13: Chloridmigrationswiderstände, $D_{RCM} \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ in Abhängigkeit der Betonzusammensetzung im Alter von 28 Tagen [7], [9]

- Tab. 3-14: Altersexponent α_{RCM} für die Expositionen XD2 und XD3 in Abhängigkeit der Zementart [9]
- Tab. 4-1: Zusammenstellung der Klimadaten ausgesuchter Standorte
- Tab. 4-2: Bemessungssituationen für XC-Exposition
- Tab. 4-3: Bemessungssituationen für XD-Exposition
- Tab. 5-1: Übersicht der Ingenieurbauwerke
- Tab. 5-2: Scheinbarer Chlorideindringwiderstand und Oberflächenchloridkonzentration der Überbaustege, SST [23]
- Tab. 5-3: Scheinbarer Chlorideindringwiderstand und Oberflächenchloridkonzentration der Widerlager, WL [23]
- Tab. 5-4: Scheinbarer Chlorideindringwiderstand und Oberflächenchloridkonzentration der Pfeiler, PF [23]
- Tab. 5-5: Scheinbarer Chlorideindringwiderstand und Oberflächenchloridkonzentration der Kappen, KA [23]
- Tab. 5-6: Scheinbarer Chlorideindringwiderstand und Oberflächenchloridkonzentration aller Bauwerke
- Tab. 5-7: Übersicht Brücke Rennekoven
- Tab. 5-8: Ergebnisse Chloridprofile (ungerissener Bereich) inklusive Chloriddiffusionskoeffizienten und Oberflächenchloridkonzentration aus der Brücke Rennekoven
- Tab. 5-9: Modelleingabeparameter für die Brücke Rennekoven
- Tab. 5-10: Übersicht Brücke Schirik
- Tab. 5-11: Ergebnisse Chloridprofile (ungerissener Bereich) inklusive Chloriddiffusionskoeffizienten und Oberflächenchloridkonzentration aus der Brücke Schirik
- Tab. 5-12: Modelleingabeparameter für Brücke Schirik
- Tab. 5-13: Übersicht Brücke Hülscheid-Winkeln
- Tab. 5-14: Ergebnisse Chloridprofile inklusive Chloriddiffusionskoeffizienten und Oberflächenchloridkonzentration
- Tab. 5-15: Modelleingabeparameter für Brückenbauwerk Hülscheid-Winkeln
- Tab. 5-16: Übersicht Brückenbauwerk Rölvede
- Tab. 5-17: Ergebnisse Chloridprofile inklusive Chloriddiffusionskoeffizienten und Oberflächenchloridkonzentration aus der Brücke Rölvede
- Tab. 5-18: Modelleingabeparameter für Brückenbauwerk Rölvede
- Tab. 5-19: Übersicht Brückenbauwerk Putzbrunn
- Tab. 5-20: Eingangsparameter für die Modellierung des Karbonatisierungsfortschritts des Kragarms
- Tab. 5-21: Eingangsparameter für die Modellierung des Karbonatisierungsfortschritts des Widerlagers
- Tab. 5-22: Übersicht Lechbrücke
- Tab. 5-23: Eingangsparameter für die Modellierung des Karbonatisierungsfortschritts der Lechbrücke
- Tab. 5-24: Übersicht Tunnelbauwerk A
- Tab. 5-25: Übersicht Tunnelbauwerk B
- Tab. 5-26: Scheinbarer Chlorideindringwiderstand und Oberflächenchloridkonzentration von Tunnel A
- Tab. 5-27: Scheinbarer Chlorideindringwiderstand und Oberflächenchloridkonzentration von Tunnel B
- Tab. 5-28: Zusammenfassung scheinbarer Chlorideindringwiderstand und Oberflächenchloridkonzentration von den Tunnel A und B in Abhängigkeit der Höhe
- Tab. 5-29: Modelleingabeparameter für Tunnelbauwerk A
- Tab. 5-30: Modelleingabeparameter für Tunnelbauwerk B

Anhang

1 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse untersucht den Einfluss der Streuungen der Modelleingabeparameter auf das Modellergebnis. Für die Sensitivitätsanalyse wird die Streuung von einer Variablen um -1 % und +1 % variiert. Anschließend wird das Ergebnis vom Referenzergebnis M_0 subtrahiert ($\Delta M +1 \% = M_0 - M^{+1 \%}$; $\Delta M -1 \% = M_0 - M^{-1 \%}$) und die ermittelten Differenzen quadratisch gemittelt, Gleichung (9-1):

$$\Delta_i = \sqrt{(\Delta M_i^{+1 \%})^2 + (\Delta M_i^{-1 \%})^2} \quad (\text{A-1})$$

Dieses Vorgehen wird für jede Variable wiederholt. Die Gewichtung der Sensitivitäten der Eingabeparameter erfolgt durch die Division der quadratischen Mittelwerte durch die Summe aller quadratischen Mittelwerte, Gleichung (9-2):

$$SEN X_i = \frac{\Delta_i}{\sum_{i=1}^n \Delta_i} \quad (\text{A-2})$$

Die Summe aller Sensitivitäten ergibt 100 %.

In dem Software-Programm STRUREL [22] wird die Sensitivität α folgendermaßen berechnet, Gleichung (9-3):

$$\alpha_{\sigma,i} \approx -\beta_E \alpha_i^2 \quad (\text{A-3})$$

Mit der generalisierten Zuverlässigkeit β_E (Gleichung 9-4), die sich aus der Grenzzustandsgleichung $g(X)$ ableitet.

$$\beta_E = -\phi^{-1}[P(g(U) \leq 0)] \quad (\text{A-4})$$

mit $g(U)$: Transformation der Grenzzustandsgleichung in den Standardnormalraum

Die Sensitivität kann über die Elastizität e normalisiert werden, Gleichung (9-5). Die Elastizität ist dimensionslos.

$$e_{\tau,i} = \frac{\partial \beta_E}{\partial \tau_i} \frac{\tau_i}{\beta_E} \quad (\text{A-5})$$

mit τ_i : time

2 Dominanzanalyse

Im Gegensatz zur Sensitivitätsanalyse hat die Dominanzanalyse das Ziel, den Einfluss der Mittelwerte der Modelleingangsparameter auf das Modellergebnis zu untersuchen. Für die Dominanzanalyse wird jeweils an einem Eingangsparameter der Mittelwert um -1 % und +1 % variiert. Anschließend wird das Ergebnis vom Referenzergebnis M_0 subtrahiert ($\Delta M +1 \% = M_0 - M^{+1 \%}$; $\Delta M -1 \% = M_0 - M^{-1 \%}$) und die ermittelten Differenzen quadratisch gemittelt, Gleichung (9-6):

$$\Delta_i = \sqrt{(\Delta M_i^{+1 \%})^2 + (\Delta M_i^{-1 \%})^2} \quad (\text{A-6})$$

Dieses Vorgehen wird für jeden Eingabeparameter wiederholt. Die Gewichtung der Dominanzen der Eingabeparameter erfolgt durch die Division der quadratischen Mittelwerte durch die Summe aller quadratischen Mittelwerte, Gleichung (9-7):

$$DOM X_i = \frac{\Delta_i}{\sum_{i=1}^n \Delta} \quad (A-7)$$

Die Summe aller Dominanzwerte ergibt 100 %.

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2015

B 112: Nachhaltigkeitsberechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken

Kuhlmann, Maier, Ummenhofer, Zinke,
Fischer, Schneider € 14,00

B 113: Versagen eines Einzelelementes bei Stützkonstruktionen aus Gabionen

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

B 114: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln

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

B 115: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln

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

B 116: Überwachungskonzepte im Rahmen der tragfähigkeitsrelevanten Verstärkung von Brückenbauwerken aus Beton

Schnellenbach-Held, Peeters, Brylka, Fickler, Schmidt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 117: Intelligente Bauwerke – Prototyp zur Ermittlung der Schadens- und Zustandsentwicklung für Elemente des Brückenmodells

Thöns, Borrmann, Straub, Schneider, Fischer, Bügler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 118: Überwachungskonzepte für Bestandsbauwerke aus Beton als Kompensationsmaßnahme zur Sicherstellung von Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit

Siegert, Holst, Empelmann, Budelmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 119: Untersuchungen zum Brandüberschlag in Straßentunneln

Schmidt, Simon, Guder, Juknat,
Hegemann, Dehn € 16,00

B 120: Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit an einem vorgespannten Zweifeldträger

Maurer, Gleich, Heeke, Zilch, Dunkelberg
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 121: Zerstörungsfreie Detailuntersuchungen von vorgespannten Brückenplatten unter Verkehr bei der objektbezogenen Schadensanalyse

Diersch, Taffe, Wöstmann, Kurz, Moryson
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 122: Gussasphalt mit integrierten Rohrregistern zur Temperierung von Brücken

Eilers, Friedrich, Quaaas, Rogalski, Staeck
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2016

B 123: Nachrechnung bestehender Stahl- und Verbundbrücken – Restnutzung

Geißler, Krohn € 15,50

B 124: Nachrechnung von Betonbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke

Fischer, Lechner, Wild, Müller, Kessner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 125: Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien für Infrastrukturbauwerke im Hinblick auf Nachhaltigkeit

Mielecke, Kistner, Graubner, Knauf, Fischer, Schmidt-Thrö
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 126: Konzeptionelle Ansätze zur Nachhaltigkeitsbewertung im Lebenszyklus von Elementen der Straßeninfrastruktur

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

B 127: Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-2-Schäden

Kuhlmann, Hubmann € 21,50

B 128: Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-3-Schäden

Ungermann, Brune, Giese € 21,00

B 129: Weiterentwicklung von Verfahren zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Verkehrsinfrastrukturen

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

B 130: Intelligente Straßenverkehrsinfrastruktur durch 3D-Modelle und RFID-Tags

Tulke, Schäfer, Brakowski, Braun
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 132: Pre-Check der Nachhaltigkeitsbewertung für Brückenbauwerke

Graubner, Ramge, Hess, Ditter, Lohmeier
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 133: Anforderungen an Baustoffe, Bauwerke und Realisierungsprozesse der Straßeninfrastrukturen im Hinblick auf Nachhaltigkeit

Mielecke, Graubner, Ramge, Hess, Pola, Caspari
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 134: Nachhaltigkeitsbewertung für Erhaltungs- und Erhaltungskonzepte von Straßenbrücken

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

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 <http://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 <http://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 <http://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 <http://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 <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

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

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

2020**B 146: Beurteilung der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Seilen mit Korrosionsschäden**

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

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

Keßler, Gehlen € 16,00

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 03-63

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.