

Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbrücken über kostenlose Webanwendung

Dr. Marc Zintel¹, Christian Linden¹, Prof. Dr. Ueli Angst²

Zusammenfassung

Die Schädigung der Verkehrsinfrastruktur wird zu einem großen Teil durch chloridinduzierte Korrosion verursacht. Schäden an stark exponierten Brückenbauteilen im Spritzwasserbereich (XD3; z. B. Kappen und Mittelpfeiler) treten häufig vor Ende der geplanten Lebensdauer auf und verursachen enorme Instandsetzungskosten. Obwohl anerkannte Modelle zur probabilistischen Lebensdauerbemessung vorliegen und in Regelwerken verankert sind, ist deren Anwendung und damit die Überprüfung der Bemessung aufgrund komplizierter und kostenintensiver Statistiksoftware derzeit nur Experten vorbehalten.

Mit Hilfe der neu entwickelten und frei zugänglichen Webanwendung „OCIMA“ (*Online Corrosion Initiation Modeling App*) können Ziel Lebensdauern auf Bauteilebene bereits in der Planungsphase überprüft werden. Werden die Ziellebensdauern nicht erreicht, kann die Wirkung betontechnologischer Optimierungen live abgeschätzt werden.

1 Einleitung

Der Bestand an Brückenbauwerken im Bundesfernstraßennetz besteht zu einem großen Teil aus Stahl- und Spannbetonkonstruktionen. Bei der Planung dieser Bauwerke stehen die Baukosten im Vordergrund. Die Kosten für die spätere Erhaltung und Instandsetzung (Lebenszykluskostenansatz) werden bisher nur selten als Entscheidungskriterium bei der Ausschreibung und Vergabe berücksichtigt.

Bereits in der jüngeren Vergangenheit [1] wurde darauf hingewiesen, dass bei der Planung und Ausführung von Tunnel- und Brückenbauwerken der Aspekt der Dauerhaftigkeit, insbesondere im Hinblick auf chloridinduzierte Bewehrungskorrosion, bisher vernachlässigt wird. Eine aktuelle Analyse [2] zeigt, dass sich dies heute auf die untersuchten Schäden an Verkehrsbauwerken auswirkt – hier beträgt der Anteil der Schäden infolge chloridinduzierter Bewehrungskorrosion am Gesamtschadensaufkommen der Brückenbauwerke im deutschen Autobahnnetz ca. 77 %, vgl. Bild 1.

Nach [3] betragen die direkten Kosten der Korrosion an Ingenieurbauwerken im Straßennetz der Schweiz bzw. der USA ca. 0,1 % des Bruttoinlandsprodukts (BIP). Überträgt man diesen Ansatz auf das durchschnittliche BIP der vergangenen fünf Jahre in Deutschland (2018 bis 2022), so kann von jährlichen direkten Kosten durch Korrosion an Ingenieurbauwerken im deutschen Straßennetz in Höhe von 3,6 Mrd. € ausgegangen werden.

Werden die angestrebten Ziellebensdauern nicht erreicht und entsprechende Instandsetzungen erforderlich, sind hohe Kosten sowie Einschränkungen der Verfügbarkeit während der laufenden Maßnahmen (z. B. Staus) die Folge. Aus diesem Grund hat das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) in

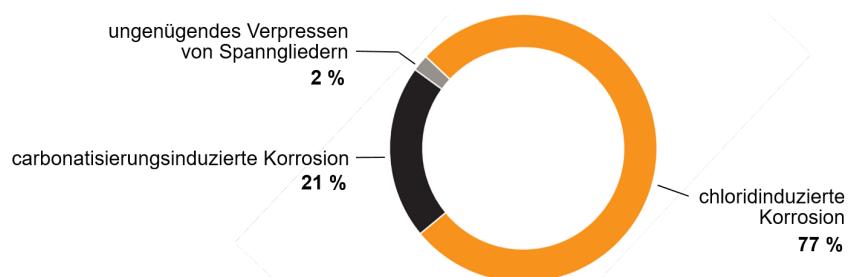


Bild 1 Verteilung von Schäden an Brückenbauwerken im Deutschen Autobahnnetz
Diagramm: Steeltec AG, nach [2]

¹ Steeltec AG, Emmenbrücke (Schweiz)

² Institute for Building Materials (IfB), ETH Zürich (Schweiz)

jüngster Zeit mehrere Pilotprojekte initiiert, in denen die Dauerhaftigkeit verschiedener Verkehrsbauwerke durch konstruktive und materialtechnische Maßnahmen optimiert werden soll (z. B. Tunnel Eching/Etterschlag [4]).

Neuere Erkenntnisse für Stahlbetonbrücken [5] zeigen, dass die externen Umweltwirkungen (z. B. durch Staus infolge von Instandsetzungen) die Umweltwirkungen der Herstellung je nach Wirkungskategorie um ein Vielfaches übersteigen können. Im Falle der CO₂-Emissionen (*Global Warming Potential*, GWP) übersteigen die externen Umweltwirkungen die Umweltwirkungen der Herstellung der Brücke um etwa den Faktor 4!

Daraus lässt sich für den Brückenbau eindeutig ableiten, dass eine nachhaltige Bauweise nur durch eine 100%ige Verfügbarkeit über die gesamte Lebensdauer ohne Instandsetzung erreicht werden kann. Die Fokussierung auf rein herstellungsbedingte CO₂-Emissionen bei der Auswahl von Bauwerksvarianten greift folglich zu kurz und kann bei einer Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus zu deutlichen Fehleinschätzungen führen.

2 Regelung der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken: Status Quo und Ausblick

Die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken wird derzeit durch die Einhaltung deskriptiver Regeln (z. B. Betondeckung, Betonfestigkeit, w/z-Wert) bestimmt. Die in den Normen der Reihe DIN EN 1992-1-1 [6] und DIN EN 206-1 [7] deskriptiv festgelegten Anforderungen sollen für die jeweilige Expositionsklasse eine Nutzungsdauer von mindestens 50 Jahren sicherstellen. Eine leistungsbezogene Bewertung nach dem Performance-Konzept gemäß DIN EN 1990 [8] und analog zur Tragwerksbemessung ist bisher die Ausnahme (z. B. für 100 Jahre Lebensdauer).

Praktische Erfahrungen zeigen, dass mit dem deskriptiven Ansatz selbst angestrebte Nutzungsdauern von 50 Jahren hinsichtlich der chloridinduzierten Betonstahlkorrosion nicht in jedem Fall mit ausreichender Wahrscheinlichkeit erreicht bzw. teilweise sogar deutlich verfehlt werden [9]. Dies bedeutet, dass bei sehr hohen XD3-Chloridbelastungen im Infrastrukturbereich die Ziellebensdauer von 50 Jahren mit den derzeitigen Regeln zum Teil nicht gewährleistet werden kann. Es ist wei-

terhin anzumerken, dass eine Ziellebensdauer von 100 Jahren derzeit nicht durch den deskriptiven Ansatz abgedeckt ist, jedoch häufig für Infrastrukturbauwerke gefordert wird.

Bestehende Bemessungskonzepte auf Basis geprüfter Leistungsfähigkeiten (Performance, z. B. Chlorideindringwiderstand nach BAW [10]) sind in der Regel aufwändiger und erfordern zudem spezielles Fachwissen und spezielle Software. Mit der Entwicklung eines semiprobabilistischen Nachweiskonzeptes zur Dauerhaftigkeitsbemessung mit Hilfe von Bemessungsnomogrammen wurde eine wegweisende Vereinfachung erreicht [11].

In der europäischen Normung (pr EN 1992-1-1, kurz EC2 [12]) wird derzeit die Einführung eines leistungsbezogenen Dauerhaftigkeitskonzeptes für Stahlbetonbauwerke angestrebt. Grundlage dieses Konzeptes sind Prognosemodelle (analog [13]) für die Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken. In diesem Zusammenhang ist eine neue Klassifizierung von Betonen in sogenannte Expositionswiderstandsklassen (XRDS) vorgesehen. Es ist zu erwarten, dass Mindestbetondeckungen für XD zukünftig in Abhängigkeit vom Chlorideindringwiderstand des Betons über XRDS variiert werden können. Zusätzliche Reduzierungen der Betondeckung werden voraussichtlich z. B. für höherlegierten Betonstahl möglich sein.

Der Übergang vom deskriptiven zum Performance-Ansatz ist auch unter dem Aspekt neuer klinkerreduzierter Zemente und der Ressourcenschonung (gezielter Materialeinsatz) ein wichtiger Baustein für einen nachhaltigen Brückenbau. Daraus lassen sich Anforderungen an einen Performance-Ansatz ableiten:

1. **Mit neuen Bindemitteln bemessen können.** Trifft der bisherige deskriptive Ansatz noch auf die neue Bindemittelgeneration zu? Langzeitverhalten?
2. **Neue Bindemittel effizient einsetzen.** Ein gutes Verhältnis zwischen der Einwirkung (S) und dem Widerstand (R) ist erforderlich.
3. **Mit neuen Bindemitteln dauerhaft bauen.** Kompensation möglicher Nachteile hinsichtlich der Dauerhaftigkeit (Karbonatisierungsgeschwindigkeit, Chlorideindringwiderstand), z. B. durch selektiven Einsatz nichtrostender Bewehrung.
4. **Vorteile des Lebenszyklusansatzes heben.** Lebenszykluskostenvergleiche in der Pla-

nungsphase sind nur mit verlässlichen Prognosemodellen bis zu 100 Jahren möglich!

Unter Berücksichtigung des vom BMDV aufgestellten Brückenmodernisierungsprogramms (vgl. [14]) ist in Deutschland in den nächsten Jahren mit einem deutlichen Anstieg der Anzahl der Brückenmodernisierungen zu rechnen, siehe Bild 2.

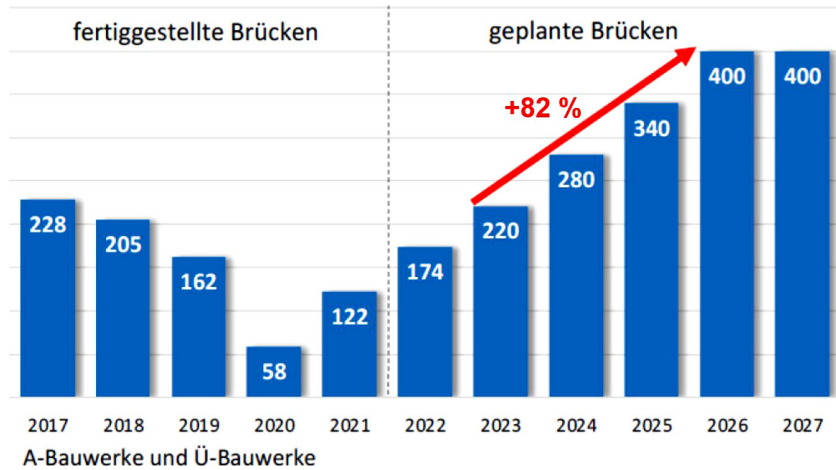


Bild 2 Geplante Steigerung der Brückenmodernisierung im Bereich der Autobahn
Diagramm: BMDV, aus [14]

Die Autobahn GmbH hat sich zum Ziel gesetzt, die Zahl der fertig sanierten Brücken schrittweise von derzeit 220 im Jahr 2023 auf 400 im Jahr 2026 zu erhöhen. Dies entspricht einer prozentualen Steigerung von 82 %. Generelles Ziel ist es, innerhalb von zehn Jahren alle rund 4.000 Brücken des Brückenmodernisierungsnetzes zu verstärken oder zu erneuern.

Allein bei den zahlreichen Ersatzneubauten könnten durch eine einfache (webbasierte) Kontrolle der Ziellebensdauern für neuralgische Bauteile wie Kappen oder Mittelpfeiler die Lebenszykluskosten über die nächsten 50 bzw. 100 Jahre um ein Vielfaches reduziert werden [15]. Darüber hinaus werden durch den Wegfall von Instandsetzungsarbeiten direkt und indirekt (externe Umwelteffekte, z. B. durch Staus) hohe CO₂-Emissionen vermieden.

3 Probabilistische Lebensdauerbemessung

3.1 Allgemein

Die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton unter Chlorideinwirkung wird in vielen Fällen, wie in Abschnitt 1 für Brücken gezeigt, durch chloridinduzierte Bewehrungskorrosion bestimmt. Die chloridinduzierte Korrosion ist in der Regel eine lokale Korrosionsform, die häufig durch hohe Korrosionsgeschwindigkeiten (je nach Bedingungen bis zu 1 mm/a) gekennzeichnet ist. Aus diesem Grund wird die Lebensdauer häufig konservativ mit der Initiierung der Bewehrungskorrosion gleichgesetzt.

Der internationale Sachstand [13], [16]–[19] sieht vor, dass die Initiierung der Bewehrungskorrosion im Beton mit folgendem Ansatz konzeptionell beschrieben werden kann: Der

Chloridtransport durch die Betondeckung wird durch ein modifiziertes Diffusionsgesetz beschrieben und damit die Chloridkonzentration an der Stahloberfläche im Beton über die Zeit vorhergesagt. Sobald diese Chloridkonzentration einen kritischen Grenzwert, den sogenannten kritischen Chloridgehalt C_{crit} , überschreitet, wird davon ausgegangen, dass Bewehrungskorrosion einsetzt. Das Konzept zur Modellierung der Korrosionsinitiierung ist in Bild 3 schematisch dargestellt und in der vorliegenden Webapplikation „OCIMA“ (*Online Corrosion Initiation Modeling App*) umgesetzt.

Da bekannt ist, dass viele Modellparameter statistisch streuen, z. B. die Betondeckung oder die Diffusionseigenschaften des Betons, ist es üblich, dieses Modell probabilistisch zu berechnen. Konkret bedeutet dies, dass alle Modellparameter durch eine statistische Verteilung beschrieben werden. Gängige statistische Verteilungen sind z. B. die Normalverteilung oder die Lognormalverteilung.

Als Folge der statistischen Streuung der Einflussgrößen sind sowohl der Widerstand C_{crit}

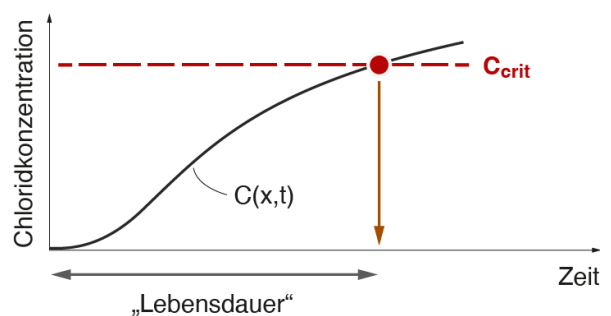


Bild 3 Konzept zur Modellierung der Korrosionsinitiierung
Grafik: Steeltec AG

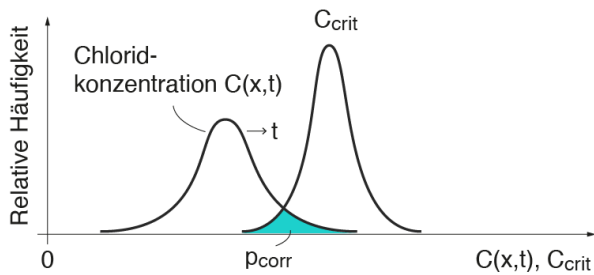


Bild 4 Probabilistisches Modell mit streuender Einwirkung (Chloridkonzentration auf Bewehrungstiefe x zur Zeit t) und streuendem Widerstand (kritischer Chloridgehalt C_{crit}) Grafik: Steeltec AG

als auch die Einwirkung $C(x,t)$ keine deterministischen Größen, sondern können als streuende Größen gegenübergestellt werden. Dieser Zusammenhang ist in Bild 4 dargestellt.

In der Regel ist es nicht möglich, dieses Problem analytisch zu lösen. Um die Korrosionswahrscheinlichkeit p_{corr} zu berechnen, stützt sich OCIMA deshalb auf Monte-Carlo-Simulationen mit einem an der ETH Zürich entwickelten Algorithmus (30.000 Iterationen pro Rechenlauf bei 2–3 s Rechenzeit). Dies ermöglicht die Gegenüberstellung der Verteilungen von Widerstand und Einwirkung über die Zeit und die Berechnung von p_{corr} zu jedem Zeitpunkt. In der Dauerhaftigkeitsmodellierung ist es üblich, anstelle von p_{corr} dessen Umrechnung in den sogenannten Zuverlässigkeitsindex β zu verwenden. Der Zusammenhang zwischen p_{corr} und β ergibt sich aus folgender Gleichung (1):

$$\beta = -\Phi^{-1}(p_{corr}) \quad (1)$$

Der Zuverlässigkeitsindex β für die Bewehrungskorrosion wird üblicherweise im Bereich von 1,5 bis 0,5 angenommen, was einer Korrosionswahrscheinlichkeit im Bereich von 7 % bis 31 % entspricht [20].

In OCIMA wird die Korrosionswahrscheinlichkeit p_{corr} als Funktion der Zeit dargestellt, da dieser Wert intuitiv leichter zu verstehen ist als die Umrechnung in den Zuverlässigkeitsindex.

3.2 Modell für den Chloridtransport

Analog zum *fib Model Code for Service Life Design* [13] wird für die Modellierung des Chloridtransports durch den ungerissenen Beton folgende Gleichung verwendet:

$$C(x,t) = C_s \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - 0,01}{2 \cdot \sqrt{D_{app,0} \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \cdot t}} \right) \right) \quad (2)$$

Mit den folgenden Parametern:

$C(x,t)$	Chloridkonzentration im Beton auf Bewehrungsniveau zum Zeitpunkt t , bezogen auf den Zementgehalt z , in M.-%/z
C_s	Chloridkonzentration im Beton in einer Tiefe von 10 mm (μ, σ) in M.-%/z
erf	Gauss'sche Fehlerfunktion
x	Betondeckung (μ, σ) in mm
$D_{app,0}$	Referenz-Diffusionskoeffizient gemessen zum Zeitpunkt t_0 (μ, σ) in m^2/s
t	Zeit in s
n	Alterungsexponent [-]
$C_{crit,B500B}$	Kritischer Chloridgehalt für konventionellen B500B (μ, σ) in M.-%/z
$C_{crit,Top12}$	Kritischer Chloridgehalt für Top12 (μ, σ) als Edelstahlbewehrung [21] in M.-%/z

Gleichung (2) wurde aus dem Fick'schen Diffusionsgesetz abgeleitet, insbesondere für den Fall der eindimensionalen Diffusion und unter der Annahme bestimmter Randbedingungen, die im Allgemeinen als repräsentativ für die am Bauwerk vorliegenden Verhältnisse angesehen werden. Basierend auf einer umfangreichen Datensammlung und Analyse von kritischen Chloridgehalten (C_{crit}) wurde festgestellt, dass C_{crit} gut durch eine Lognormalverteilung dargestellt werden kann [22].

4 OCIMA – Online Corrosion Initiation Modeling App

Der oben beschriebene Ansatz wurde in der frei zugänglichen Webanwendung OCIMA umgesetzt. Damit ist es möglich, bereits in der Planungsphase die angestrebten Nutzungsdauern zu überprüfen und ggf. die Wirkung von Gegenmaßnahmen, wie z. B. optimierte Betontechnologie, angepasste Betondeckung etc. schnell abzuschätzen.

Innerhalb von OCIMA wird der Anwender zunächst anhand des Projektstandortes, einer Bauwerksauswahl (Brücke, Tunnel, Parkhaus) und einer zugehörigen Bauteilauswahl (z. B. Brücke → Mittelpfeiler) durch das Programm geführt. Für alle notwendigen Eingabeparameter, wie z. B. die anzusetzende Chloridbelastung

C_s oder die tolerierbare Korrosionswahrscheinlichkeit p_{corr} für die Grenzzustandsberechnung, werden Empfehlungen gegeben. Um die Lebensdauerberechnung zu starten, müssen lediglich der Bindemitteltyp inkl. w/z-Wert definiert und die Betondeckung angegeben werden.

Das Berechnungsergebnis stellt eine Abschätzung der Dauerhaftigkeit in Form einer erreichbaren Nutzungsdauer in Jahren dar. Das Ergebnis kann durch Anpassung der Parameter optimiert werden, z. B. durch Wahl eines anderen Bindemittels oder durch Anpassung der Betondeckung. Die Ergebnisanzeige beinhaltet einerseits die mit konventionellem Betonstahl (B500B) erreichbare Lebensdauer und andererseits die mit Top12 als nichtrostende Bewehrung erreichbare verlängerte Lebensdauer ($C_{crit,Top12} \gg C_{crit,B500B}$). Bild 5 zeigt einen Screenshot der Anwendung mit der Darstellung einer Beispielrechnung für einen Brückenmittelpfeiler auf einer Autobahn. Links neben der Ergebnisdarstellung (Kurvendarstellung und erreichte Lebensdauern) sind die für die Berechnung gewählten, aber auch nachträglich noch veränderbaren Eingangsparameter aufgeführt.

Grundsätzlich umfasst die Webanwendung OCIMA zwei Modi: Für den ersten, sogenannten Standardmodus sind keine Vorkenntnisse erforderlich, hier wird der Benutzer durch Abfragen und ergänzende Hinweise durch das Programm geführt. Die entsprechenden Antworten bzw. die getroffene Auswahl (z. B. Zementart mit w/z-Wert) werden im Hintergrund z. T. direkt in relevante Modellparameter übersetzt. Alle im Standardmodus verwendeten und damit im Backend verknüpften Modelleingabeparameter basieren auf anerkannten Literaturangaben, z. B. [23].

Das Berechnungsergebnis mit den gewählten Parametern kann als PDF-Dokument zur Archivierung heruntergeladen werden. Um frühere Berechnungen mit den aktuellen Ergebnissen vergleichen zu können, steht ein Dropdown-Menü zum Wiederaufrufen früherer Berechnungen zur Verfügung.

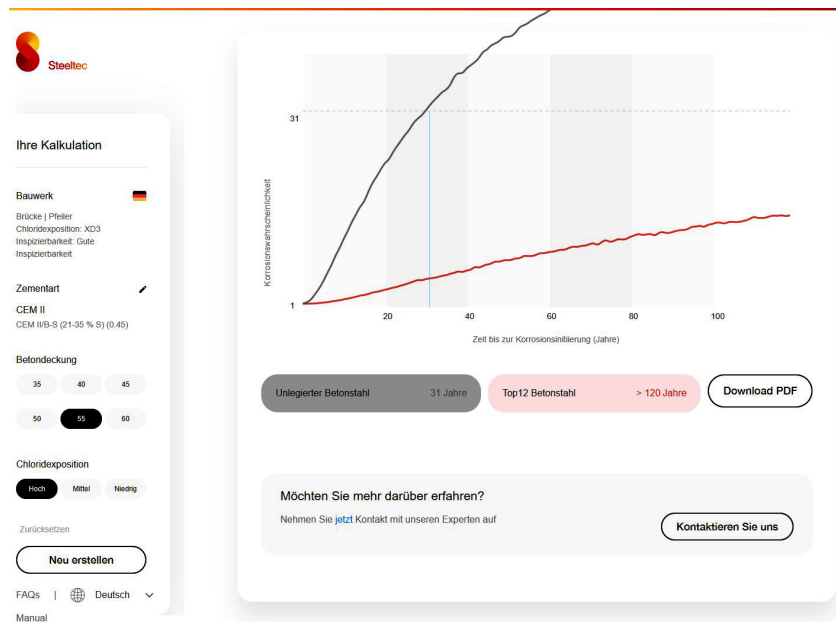


Bild 5 Screenshot der frei zugänglichen Webanwendung OCIMA im Standardmodus
Screenshot: Steelttec AG

Im zweiten, sogenannten Expertenmodus (nur in englischer Sprache verfügbar) können alle Modelleingangsparameter als statistische Kenngrößen mit Mittelwert (μ) und Standardabweichung (σ) frei numerisch eingegeben werden. Zusätzlich besteht in diesem Modus die Möglichkeit, die Ergebnisdaten als CSV-Datei zu exportieren und damit extern weiterzuverarbeiten.

Ziel der Webanwendung OCIMA ist es, die Lebensdauerabschätzung für Planer, Eigentümer oder Betreiber, die keinen Zugang zu spezieller Statistiksoftware haben, so einfach und intuitiv wie möglich zu gestalten. Hierdurch soll das Bewusstsein für die Dauerhaftigkeit geschärft und den Fachleuten ein Werkzeug an die Hand gegeben werden, mit dem sie den Einfluss verschiedener Eingabeparameter schnell abschätzen und verstehen können.

Obwohl das implementierte Lebensdauermodell dem international anerkannten Stand der Technik entspricht, möchten wir betonen, dass Simulationen immer stark von den getroffenen Annahmen abhängen und daher keine absoluten Lebensdauern liefern können. Das Ergebnis sind vielmehr Eintrittswahrscheinlichkeiten für die Korrosionsinitiation, die eine wertvolle Entscheidungshilfe bei der Auswahl verschiedener Ausführungsvarianten darstellen. Ein Beispiel ist der Vergleich verschiedener Stahlgüten, nämlich die Verwendung von Top12 als nichtrostende Bewehrung mit höherem Korrosionswiderstand [21] als konventioneller Betonstahl B500B.

Eine solche modellgestützte Entscheidungsfindung in der Planungsphase ist ein wichtiger Schritt, um ungewollt frühzeitige Instandsetzungen und deren negative ökonomische und ökologische Folgen zu vermeiden.

Die Webanwendung OCIMA ist im Standardmodus kostenlos und frei zugänglich unter www.ocima-swisssteel-group.com. Der Zugang zum Expertenmodus ist auf individuelle Anfrage grundsätzlich möglich.

Literatur

- [1] Schießl-Pecka, A.; Willberg, U.; Rausch, A.; Bäuml, W.: 100 Jahre Dauerhaftigkeit für Brücken- und Tunnelbauwerke. *Beton- und Stahlbetonbau* 113 (2018), S. 746–755 – DOI: 10.1002/best.201800032
- [2] Breit, W.: Kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt – Grenzwerte, Empfehlungen. In: InformationsZentrum Beton GmbH (Hrsg.): Tagungsunterlagen vom 4. Münchner Bausymposium „Tiefgaragen – Neues aus der Praxis“, 26.09.2019 in München, Hochschule München, 2019.
- [3] Yilmaz, D.; Angst, U.: Korrosionsbedingte Kosten an Ingenieurbauwerken im Schweizer Straßennetz. *Beton- und Stahlbetonbau* 115 (2020), S. 448–458 – DOI: 10.1002/best.202000004
- [4] Willberg, U.; Schneck, U.; Schießl-Pecka, A.: A 96 Tunnel Eching und Ettersschlag – Alternative Betoninstandsetzung. In: Schäfer, F. (Hrsg.): Tagungsband Kolloquium Straßenbau in der Praxis, 29./30.01.2019 in Esslingen, Techn. Akademie Esslingen, 2019, S. 503–507.
- [5] Zinke, T.: Nachhaltigkeit von Infrastrukturbauwerken – Ganzheitliche Bewertung von Autobahnbrücken unter besonderer Berücksichtigung externer Effekte. Diss., Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2016 – DOI: 10.5445/KSP/1000053695
- [6] DIN EN 1992-1-1:2011-01: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau: 2011-01 mit A1-Änderung: 2015-03.
- [7] DIN EN 206:2021-06: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206: 2013+A2: 2021.
- [8] DIN EN 1990:2021-10: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010.
- [9] Rahimi, A.; Gehlen, C.: Semiprobabilistische Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauten unter Chlorideinwirkung. *Beton- und Stahlbetonbau* 113 (2018), S. 13–21 – DOI: 10.1002/best.201700062
- [10] Bundesanstalt für Wasserbau (BAW, Hrsg.): BAW Merkblatt „Chlorideindringwiderstand von Beton (MCL)“. Karlsruhe, 2012 – www.baw.de.
- [11] Rahimi, A.: Semiprobabilistisches Nachweiskonzept zur Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkung. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb, Hrsg.): Schriftenreihe des DAfStb, Heft 626, Berlin: Beuth, 2016.
- [12] DIN EN 1992-1-1:2021-10 – Entwurf Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Regeln – Regeln für Hochbauten, Brücken und Ingenieurbauwerke; Deutsche und Englische Fassung prEN 1992-1-1:2021.
- [13] Federation internationale du beton (fib, Hrsg.): Bulletin 34: Model Code for Service Life Design. Lausanne, 2006 – DOI: 10.35789/fib.BULL.0034
- [14] Gunreben, Y.-C.: Brückenbilanz und Zukunftspaket leistungsfähige Autobahnbrücken. Vortrag auf der VDI-Fachtagung „Zukunftsprogramm Brückenmodernisierung“ am 23./24.11.2022 in Bonn.
- [15] Schießl-Pecka, A.; Rausch, A.; Zintel, M.; Linden, C.: Lebenszykluskostenbetrachtungen für chloridexponierte Bauteile von Brücken- und Tunnelbauwerken. *Beton- und Stahlbetonbau* 114 (2019), S. 767–775 – DOI: 10.1002/best.201900038
- [16] Tang, L.; Nilsson, L. O.; Basheer, P. A. M.: Resistance of Concrete to Chloride Ingress: Testing and modelling. Abingdon: Spon Press, 2012.
- [17] Bundesanstalt für Wasserbau (BAW, Hrsg.): BAW Merkblatt „Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC)“. Karlsruhe, 2019.
- [18] Gehlen, C.; Mayer, T. F.; von Greve-Dierfeld, S.: Lebensdauerbemessung. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.): Beton-Kalender 2011: Kraftwerke, Faserbeton, Berlin: Ernst & Sohn, 2011, S. 229–278.
- [19] Gehlen, C.: Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. In: Deutscher Ausschuss für Stahl-

- beton (DAfStb, Hrsg.): Schriftenreihe des DAfStb, Heft 510, Berlin: Beuth, 2000.
- [20] Positionspapier des DAfStb zur Umsetzung des Konzepts von leistungsbezogenen Entwurfsverfahren unter Berücksichtigung von DIN EN 206-1, Anhang J. Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008), S. 837–839 – DOI: 10.1002/best.200808229
- [21] Käthler, C. B.; Ebell, G.; Keßler, S.; Schiegg, Y.; Dauberschmidt, C.; Angst, U. M.: A comparison of methods to assess the resistance of reinforcing steel against chloride-induced corrosion in concrete: Particular consideration of 12% chromium steel. Mater. Corros. 73 (2022), S 1–20 – DOI: 10.1002/maco.202112826
- [22] Boschmann Käthler, C.; Angst, U. M.; Aguilar, A. M.; Elsener, B.: A systematic data collection on chloride-induced steel corrosion in concrete to improve service life modelling and towards understanding corrosion initiation. Corrosion Science 157 (2019), S. 331–336 – DOI: 10.1016/j.corosci.2019.06.008
- [23] Federation internationale du beton (fib, Hrsg.): Bulletin 76: Benchmarking of deemed-to-satisfy provisions in standards: Durability of reinforced concrete structures exposed to chlorides. Lausanne, 2015.



Bundesingenieurkammer (Hrsg.)
Ingenieurbaukunst 2023

Made in Germany

- die besten aktuellen Projekte von Bauingenieur:innen aus Deutschland
- neue Entwicklungen beim Bauen mit und im Bestand auf Bauwerks-, Bauteil- und Baustoffebene
- inspiriert vom Symposium Ingenieurbaukunst – Design for Construction #IngD4C

Das Buch diskutiert das Planen und Bauen mit und im Bestand und zeigt wichtige aktuelle Bauwerke von Ingenieur:innen aus Deutschland. Herausgegeben von der Bundesingenieurkammer werden hier die Leistungen des deutschen Bauingenieurwesens dokumentiert.

BESTELLEN
+49 (0)30 470 31-236
marketing@ernst-und-sohn.de
www.ernst-und-sohn.de/3385

* Der E-Preis gilt ausschließlich für Deutschland, inkl. MwSt.

Ernst & Sohn
A Wiley Brand

INGENIEURBAUKUNST 2023

2022 · 224 Seiten · 130 Abbildungen

Softcover	
ISBN 978-3-433-03385-2	€ 39,90*
eBundle (Print + ePDF)	
ISBN 978-3-433-03386-9	€ 52,90*