

10

114. Jahrgang
Oktober 2019, S. 767-775
ISSN 0005-9900

Sonderdruck

Beton- und Stahlbetonbau



Lebenszykluskostenbetrachtungen für chloridexponierte Bauteile von Brücken- und Tunnelbauwerken

Angelika Schießl-Pecka
Anne Rausch
Marc Zintel
Christian Linden

Lebenszykluskostenbetrachtungen für chloridexponierte Bauteile von Brücken- und Tunnelbauwerken

Vergleich verschiedener Instandsetzungs-/Instandhaltungsstrategien zur Sicherstellung einer hundertjährigen Dauerhaftigkeit

An Verkehrsbauwerken mit nur sehr geringem Alter sind in der Vergangenheit vermehrt Schäden aufgetreten. Ursache ist die hohe Chloridbelastung durch Streusalz/Sole aus dem Winterdienst, welche chloridinduzierte Bewehrungskorrosion hervorruft. Die Instandsetzung resultierender Schäden ist nicht zuletzt aufgrund in der Regel erforderlicher Verkehrssicherungsmaßnahmen sehr kostenintensiv. Immer öfter stellt sich die Frage, welche Maßnahmen zu ergreifen sind, um zum einen Kosten zu reduzieren und zum anderen aber eine hohe Dauerhaftigkeit bei gleichzeitiger Robustheit der Maßnahme sicherzustellen. In diesem Zusammenhang wurden Lebenszykluskostenbetrachtungen für stark chloridbeaufschlagte Bauteile, wie Brückenkappen, Brückenmittelpfeiler, Tunnelnotgehwege, Tunnelinnenwände durchgeführt. Es wurden verschiedene Stahlgüten (konventionelle vs. nichtrostende Bewehrung) und Oberflächenschutzsysteme (OS-System vs. Tiefenhydrophobierung) sowie verschiedene Instandsetzungsvarianten (Erneuerung OS-System vs. Instandsetzung) verglichen. Für eine abschließende Bewertung relevanter Varianten wurden neben den Lebenszykluskosten zusätzlich auch die Themen „Dauerhaftigkeit“ sowie „Baupraktische Gesichtspunkte“ berücksichtigt.

1 Einleitung

Der Bestand an Tunnel- und Brückenbauwerken im Bundesfernstraßennetz besteht zu einem großen Anteil aus Stahl- und Spannbetonkonstruktionen. Bei der Planung dieser Konstruktionen stehen die Baukosten im Vordergrund, die Kosten für zukünftige Instandhaltungen und Instandsetzungen fließen bei der Ausschreibung und Vergabe bisher selten als Entscheidungskriterium mit ein.

In der jüngsten Vergangenheit [1] wurde bereits darauf hingewiesen, dass bisher bei der Planung und Errichtung von Tunnel- und Brückenbauwerken der Aspekt der Dauerhaftigkeit, insbesondere in Bezug auf die chloridinduzierte Bewehrungskorrosion, vernachlässigt wurde. Aktuelle Analysen zeigen, dass dies heute Auswirkungen auf die an Verkehrsbauwerken untersuchten Schäden hat – nach [2] beträgt der Anteil von Schäden infolge chloridinduzierter Bewehrungskorrosion am Gesamtschadensvolumen der Brückenbauwerke im deutschen Autobahnnetz rd. 66%. Die Instandsetzung dieser Schäden verursacht hohe Kosten sowie Verkehrssperrungen während der laufenden Maßnahmen. Aus diesem Grund wurden in letzter Zeit vom BMVI mehrere Pilotprojekte lanciert, bei denen die Dauerhaftigkeit verschiedener Verkehrs-

Life cycle cost considerations for chloride exposed components of bridges and tunnels – Comparison of different repair/maintenance strategies to ensure 100-year durability
In the past, more and more damage has occurred to traffic structures of very low age. The cause is the high chloride load caused by deicing salts (dry/fluid) from winter road clearance services, which causes chloride-induced reinforcement corrosion. The repair of resulting damage is very cost-intensive, not least due to the generally necessary traffic safety measures. More and more often the question arises which possibilities can be taken in order to reduce costs on the one hand and on the other hand to ensure a high durability with simultaneous robustness. In this context, life cycle cost considerations were carried out for components with a high chloride load, such as bridge caps, bridge centre piers, tunnel emergency paths and tunnel inner walls. Different steel grades (conventional vs. corrosion-resistant reinforcement) and surface protection systems (surface protection system vs. water repellent agents) as well as different repair variants (renewal surface protection system vs. repair) were compared. For a final evaluation of relevant variants, in addition to the life cycle costs, the topics “durability” and “practical construction aspects” were also considered.

bauwerke durch konstruktive und materialtechnische Maßnahmen optimiert werden soll (z.B. Greißelbachbrücke [3], Tunnel Eching/Etterschlag [4], Tunnel Tutting).

Von den Kritikern dieser Herangehensweise werden als Gegenargument häufig die hohen Baukosten der neuen Bauweisen ins Feld geführt. Jedoch hat auch die ab dem 01.01.2021 agierende Bundesautobahngesellschaft das Ziel, zukünftig einen Lebenszyklusansatz einzuführen, bei dem Planen, Bauen, Betreiben, Erhalten, Finanzierung und vermögensmäßige Verwaltung aus einer Hand gewährleistet werden [5].

Im Rahmen des vorliegenden Beitrags werden verschiedene Maßnahmen zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit hinsichtlich Lebenszykluskosten untersucht und mit der herkömmlichen Bauweise verglichen.

2 Lebenszyklus von Stahlbetonbauwerken

Der Lebenszyklus einer Stahl- oder Spannbetonkonstruktion umfasst die Phasen Planung, Herstellung/Ausführung, Nutzung und Rückbau/Abriss, Bild 1. Demnach muss eine umfassende vergleichende Kostenbetrachtung

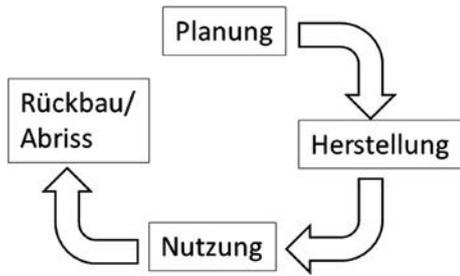


Bild 1 Vereinfachter Lebenszyklus eines Stahlbetonbauwerks
Simplified life cycle of a reinforced concrete structure

eigentlich diese vier Stationen im Leben eines Bauwerks berücksichtigen. Der hier vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit den Kosten, die während der ersten drei Phasen eines Lebenszyklus mit definierter Lebensdauer auftreten. Die Kosten für Abriss und Rückbau am Ende des Lebenszyklus werden nicht betrachtet.

In Bezug auf die Dauerhaftigkeit müssen im Rahmen der Planung zunächst die Einwirkungen und die gewünschte Lebensdauer festgelegt werden. Im Anschluss muss der Planer in Abhängigkeit von den Einwirkungen entsprechende Vorgaben zu den dauerhaftigkeitsrelevanten Eigenschaften des Bauwerks liefern. Die aktuell in Deutschland bausaufsichtlich eingeführten Normen [6] und [7] bieten hier wenige Variationsmöglichkeiten. Sie nutzen die heute existierenden technischen Möglichkeiten und wissenschaftlichen Erkenntnisse nur wenig, z. B. [8–10], um das Bauwerk mit einer optimalen Dauerhaftigkeit auszustatten. Das im Jahr 2017 eingeführte BAW-Merkblatt Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC) enthält performanceorientierte Bemessungsansätze [11], allerdings werden diese aktuell, z. B. bei der Planung und Ausführung von Verkehrsbauwerken, noch wenig angewandt.

Während der Herstellung/Ausführung müssen die Planungsvorgaben umgesetzt werden. Bei dieser Phase macht sich zunehmend das öffentliche deutsche Vergabewesen bemerkbar. Da grundsätzlich der kostengünstigste Bieter den Zuschlag erhält, rückt die Qualität der Ausführung in den Hintergrund. Dies hat zahlreiche Schäden oder Mängel zur Folge, die während der Nutzung häufig zu einer Verringerung der Dauerhaftigkeit führen.

Nach der Fertigstellung des Bauwerks beginnt die dritte Phase, die sogenannte „Nutzungsphase“. Die im Rahmen der ersten beiden Phasen erzielte Dauerhaftigkeit des Bauwerks hat einen erheblichen Einfluss auf das Verhalten (Performance) des Bauwerks im Betrieb. Instandhaltungs- und Instandsetzungskosten infolge von z. B. auftretender Bewehrungskorrosion stehen in einem engen Zusammenhang mit den planerischen Vorgaben und der Umsetzung im Zuge der Herstellung. Darüber hinaus kann durch ein systematisches Monitoring der Bauwerke im Hinblick auf kritische Punkte (z. B. Chlorideindringfront) frühzeitig eingegriffen werden und mit verhältnismäßig günstigen Maßnahmen eine kostenintensive

Instandsetzungsmaßnahme hinausgezögert oder ganz vermieden werden.

Vor diesem Hintergrund stellen die nachhaltige Planung und Herstellung sowie die systematische Erhaltung von Infrastrukturbauwerken eine zentrale Aufgabe für den Bauwerksbetreiber dar. Aufgrund limitierter Haushaltsmittel spielen hierbei Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen über die gesamte Nutzungsdauer des Bauwerks eine große Rolle. Dabei ist zu beachten, dass eine Baumaßnahme nicht zwingend dann ökonomisch ist, wenn Planungs- und Herstellungskosten gering sind. Vielmehr kann eine Investition aus ökonomischer Sicht erst dann erschöpfend beurteilt werden, wenn über die angestrebte Nutzungsdauer auch alle relevanten Folgekosten von anfallenden Erhaltungsmaßnahmen bis hin zum Abriss bzw. Neubau in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen mit einfließen.

3 Übersicht zu dauerhaftigkeitsrelevanten Einflussfaktoren bei chloridinduzierter Korrosion

Um bei chloridinduzierter Bewehrungskorrosion die geplante Dauerhaftigkeit von Verkehrsbauwerken zu gewährleisten bzw. zu steuern, müssen relevante Einwirkungen und Bauteilwiderstände identifiziert und gegenübergestellt werden. Die entsprechenden Einflussfaktoren wurden bereits in früheren Veröffentlichungen im Detail beschrieben [1] und werden an dieser Stelle noch einmal kurz aufgezählt:

Einwirkungsseite:

- Streusalzaufkommen,
- Verkehrsintensität,
- Entfernung der Chloridquelle vom Bauteil,
- Bauteilausrichtung.

Widerstandsseite:

- Betondeckung,
- Materialwiderstand Beton,
- Materialwiderstand Betonstahl (z. B. unlegierter Stahl, nichtrostender Stahl, verzinkter Stahl),
- Oberflächenschutzsystem (OS-System).

4 Strategien zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit

Chloridinduzierte Korrosion tritt bei Stahlbetonbauteilen auf, bei denen Chloride von der Bauteiloberfläche zur Bewehrungsfläche transportiert werden und infolge von Aufkonzentrationen der Chloridgehalt auf Bewehrungshöhe den kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt von Betonstahl überschreitet. Daraus ergeben sich auf der Widerstandsseite, vgl. Abschn. 3, bei der Planung und Ausführung von Brückenbauwerken nach [12] drei mögliche Lösungsstrategien (Bild 2), um Korrosion zu unterbinden oder die Korrosionsinitiierung so weit zeit-

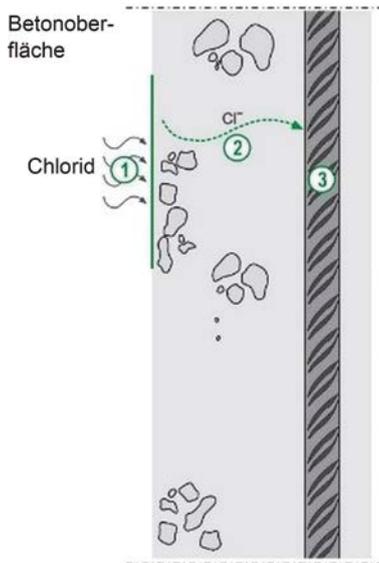


Bild 2 Mögliche Strategien zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit
Possible strategies for improving durability

lich zu verzögern, dass während der Nutzungsdauer nicht von einer relevanten Schädigung auszugehen ist:

1. Verlangsamen des Chloridtransports zur Bewehrung durch betontechnologische Maßnahmen,
2. Erhöhen des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts durch Verwenden von nichtrostender Bewehrung,
3. Unterbinden des Chlorideindringens in den Konstruktionsbeton durch Aufbringen eines Oberflächenschutzsystems (Tiefenhydrophobierung oder Beschichtung).

5 Lebenszykluskostenbetrachtung für verschiedene Bauteile

5.1 Allgemeines

Für die nachfolgend vorgestellte Lebenszykluskostenbetrachtung wurden Bauteile aus Verkehrsbauwerken herausgegriffen, an denen in der Praxis häufig Schäden auftreten:

- Brückenmittelpfeiler,
- Brückenkappe,
- Tunnelnotgehweg,
- Tunnelwand.

5.2 Definition Lebenszykluskosten

Der Lebenszyklus eines Bauteils wird als Bauteilbiografie über die vorgesehene Nutzungsdauer betrachtet. Auf Basis der in Abschn. 4 vorgestellten Lösungsstrategien zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit stehen für jedes Bauteil verschiedene Ausführungsvarianten zur Verfügung. Die daraus resultierenden Instandhaltungsstrategien verlaufen je nach Variante unterschiedlich. Bild 3 zeigt exemplarisch die Bauteilbiografie von drei verschiedenen Varianten:

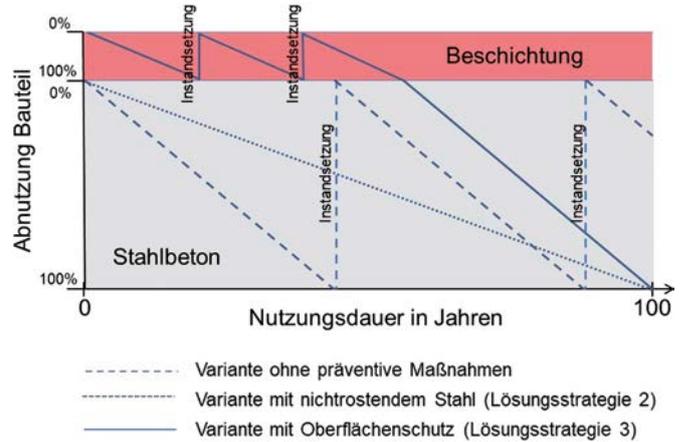


Bild 3 Schematische Darstellung betrachteter Instandhaltungsstrategien
Schematic representation of considered maintenance strategies

- Variante ohne präventive Maßnahmen, d. h. ohne Einsatz von nichtrostender Bewehrung oder von Oberflächenschutzsystemen,
- Variante mit nichtrostender Bewehrung (Lösungsstrategie 2).
- Variante mit Oberflächenschutzsystem (Lösungsstrategie 3),

100% Abnutzung des Stahlbetons entspricht in Bild 3 dem Erreichen des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts auf Bewehrungshöhe. In Abhängigkeit von der jeweiligen Bauteilbiografie unterscheiden sich damit zusätzlich zu den Kosten der Erstherstellung auch die im Zuge eines Lebenszyklus anfallenden Kosten der Instandhaltung. Kosten werden im Rahmen dieses Beitrags im Sinne von Ausgaben definiert [13]. Die Summe der Kosten für Erstherstellung und Instandhaltung entspricht hier den Lebenszykluskosten.

Die durchgeführte Lebenszykluskostenbetrachtung umfasst einen Vergleich der Kosten für unterschiedliche Varianten. Betrachtet werden die jeweiligen entscheidungsrelevanten Kosten während der Herstellung und Nutzung des jeweiligen Bauteils:

- Herstellung: Referenz ist hier die kostengünstigste Variante ohne präventive Maßnahmen (unlegierte Bewehrung ohne Oberflächenschutzmaßnahmen). Darüber hinaus gehende Aufwendungen sind entscheidungsrelevante Kosten (z. B. Mehraufwendungen für Material und ggf. Ausführung: Oberflächenschutzsystem, nichtrostende Bewehrung, ggf. Installation eines Monitoringsystems).
- Nutzung: Alle anfallenden Kosten während der Nutzung werden als entscheidungsrelevante Kosten berücksichtigt, z. B. Auslesen eines Monitoringsystems, Instandsetzung, Abbruch und Neubau vor Ende der Nutzungsdauer (Kappen, Notgehweg).

Rückbaukosten nach Ende der Nutzungsdauer werden nicht berücksichtigt. Die Kostenermittlung erfolgte an-

hand von bepreisten Leistungsverzeichnissen diverser vergleichbarer Infrastrukturprojekte. In die Lebenszykluskosten werden keine ökologisch-, sozial- oder volkswirtschaftlich-bedingten Folgekosten eingerechnet.

5.3 Randbedingungen und Varianten
5.3.1 Betonzusammensetzung

Für alle betrachteten Bauteile wird in Anlehnung an Lösungsstrategie 1 als Bindemittelkombination ein CEM II/B-S angesetzt. Für die in der Regel massigen Bauteile Brückenpfeiler und Tunnelwand wird die Zugabe von rd. 30 kg/m³ Flugasche berücksichtigt. Der w/z-Wert wird nach DIN-Fachbericht 100:2010 [7] entsprechend der Expositionsklasse XD3 mit w/z = 0,45 angesetzt und ist damit etwas geringer als nach ZTV-ING [14] für die betrachteten Bauteile üblich (w/z = 0,50).

5.3.2 Betrachtete Bewehrungsstähle

Folgende Betonstahlsorten werden im Rahmen der Lebenszykluskostenberechnung eingesetzt:

- unlegierter Bewehrungsstahl,
- ferritischer nichtrostender Stahl mit einem Chromgehalt > 12% und gebeizt, Werkstoffnummer 1.4003 (Top12-Stahl), vgl. auch [15, 16],

- austenitischer bzw. ferritisch-austenitischer nichtrostender Stahl, z.B. Werkstoffnummern 1.4571 (aust.), 1.4362, 1.4462 (ferr.-aust. bzw. Duplex), im Weiteren Edelstahl mit Korrosionswiderstand (KWK) ≥ III genannt.

(Anmerkung: Die Bezeichnung Edelstahl wird in der Stahlbetonbauweise umgangssprachlich für nichtrostende Stähle und Bewehrungsstähle mit KWK ≥ III mit den Werkstoffnummern 1.4571, 1.4362, 1.4462 verwendet.)

5.3.3 Betrachtete Beschichtungssysteme

Im Rahmen der Lebenszykluskostenbetrachtung werden Oberflächenschutzsysteme betrachtet, die derzeit baupraktisch zur Anwendung kommen. Dies sind für vertikale und horizontale Bauteile OS-A-Systeme sowie für vertikale Bauteile OS-B-Systeme, vgl. auch [14]. Als OS-A-System werden in der vorliegenden Studie ausschließlich Tiefenhydrophobierungen betrachtet, da diese das Eindringen von Chloriden wirksam unterbinden, vgl. [17]. Diese Tiefenhydrophobierungen müssen als Cremes oder Gele auf Silanbasis einen Wirkstoffgehalt von mindestens 80% aufweisen. Da der Einsatz von Tiefenhydrophobierungen derzeit noch keine Regelanwendung ist (z.B. auch in der Rili-SIB [18] noch nicht als Oberflächenschutzmaßnahme im Spritzwasserbereich aufgeführt) und keine optische Kontrolle der Wirksamkeit möglich ist (transpa-

Bauteil (Nutzungsdauer)	Brückenkappe (50 Jahre)	Mittelpfeiler Straßenbrücke (100 Jahre)	Tunnelnotgehweg (50 Jahre)	Tunnelwand (100 Jahre)
Erstherstellung	←			
	Stahl	Unlegierter Stahl $C_{crit} = 0,6 \text{ M.-%/z}$	Top12 (1.4003) $C_{crit} = 1,8 \text{ M.-%/z}$	Edelstahl (z.B. 1.4571)
Bindemittel	→			
	CEM II/B-S, ggf. mit 30 kg/m ³ Flugasche	CEM II/B-S, ggf. mit 30 kg/m ³ Flugasche	unabhängig von der Bindemittelart	
Oberflächen-schutz	ohne OS-System	Tiefenhydrophobierung oder ggf. OS-B-System	ohne OS-System	ohne OS-System
	Rissbereich: Zusätzliche Maßnahmen im Rissbereich vorsehen?			
Instandsetzung	Abbruch/Neubau oder Betoninstandsetzung	Erneuerung OS-System	Keine Maßnahmen erforderlich	
	Varianten	K-US-TH-0 Pf-US-TH-0 Pf-US-OSB-0 TNG-US-TH-0 TW-US-TH-0 TW-US-OSB-0	K-T12-0-0 Pf-T12-0-0 TNG-T12-0-0 TW-T12-0-0	K-ES-0-0 Pf-ES-0-0 TNG-ES-0-0 TW-ES-0-0

Bild 4 Darstellung der untersuchten Varianten
 Representation of the investigated variants

rent), sollte bei Einsatz einer Tiefenhydrophobierung zur Überprüfung der Wirksamkeit ein Monitoringsystem installiert werden.

5.3.4 Zusammenstellung der untersuchten Varianten

Eine Zusammenstellung aller untersuchten Varianten ist Bild 4 zu entnehmen.

5.4 Lebensdauerberechnung

5.4.1 Allgemeines

Die Anzahl der zu durchlaufenden Instandhaltungs- bzw. Lebenszyklen im Verlauf der Nutzungsdauer wird bestimmt durch den Zeitraum, den ein unbeschichtetes Bauteil einem Chloridangriff widerstehen kann. Dieser Zeitraum wurde auf Basis von vollprobabilistischen Lebensdauerberechnungen [19] für das ungerissene Stahlbetonbauteil ermittelt. Als Sicherheitsniveau wurde nach [20] der üblicherweise für Bauteile der Expositionsklasse XD3 zu verwendende Zuverlässigkeitsindex $\beta = 0,5$ gewählt, welcher mit einer Wahrscheinlichkeit der Bewehrungsdepassivierung $p_f = 31\%$ korreliert. Eine regelmäßige Inspektion wird vorausgesetzt.

Zur Berücksichtigung des höheren korrosionsauslösenden Chloridgehalts von Top12-Stahl wurde im Modell der Parameter „kritischer Chloridgehalt“ im Vergleich zu unlegiertem Stahl verdreifacht [15]. Für Edelstahl mit $KWK \geq III$ wurden keine Lebensdauerberechnungen durchgeführt, da hier definitionsgemäß keine chloridinduzierte Bewehrungskorrosion auftritt. Die anvisierte Lebensdauer von Notgehwegen und Kappen beträgt 50 Jahre, die von Pfeilern und Tunnelwänden 100 Jahre.

5.4.2 Ermittlung von Oberflächenchloridkonzentrationen

Gemäß fib-Bulletin 76 [21] sind für die hier betrachtete Expositionsklasse XD3 mittlere Oberflächenchloridkonzentrationen $C_{s,\Delta x}$ zwischen 2,0 und 4,0 M.-%/z anzusetzen, der Variationskoeffizient beträgt jeweils 75%.

Genauere Vorgaben für die aktuell betrachteten Bauteile werden dort nicht festgelegt. RAHIMI [22] setzt in seiner Dissertation die Obergrenze für die Oberflächenchloridkonzentration von XD3-Bauteilen auf Basis von Erfahrungswerten zu 5,0 M.-%/z.

Um für die im Rahmen der vorliegenden Studie betrachteten Bauteile die tatsächlich in der Praxis vorkommenden Oberflächenchloridkonzentrationen zu bestimmen, wurden Chloridprofile, gemessen an Tunnelwänden, Tunnelnotgehwegen, Brückenpfeilern und Brückenkappen, nach BAW-Merkblatt MDCC [11] ausgewertet. Für Tunnelbauwerke wurden im Vergleich zu den zuvor genannten Vorgaben des fib-Bulletin 76 [21] verhältnismäßig hohe mittlere Oberflächenchloridkonzentrationen errechnet. In den hier durchgeführten Berechnungen wird deshalb für Tunnelwände im Mittel $C_{s,\Delta x} = 4,0$ M.-%/z angesetzt und für Tunnelnotgehwege $C_{s,\Delta x} = 5,0$ M.-%/z.

An Brückenbauwerken wurden insgesamt niedrigere Oberflächenkonzentrationen ermittelt als in Tunnelbauwerken. Für Pfeiler entlang stark befahrener Straßen wird im Mittel $C_{s,\Delta x} = 3,0$ M.-%/z und für Brückenkappen $C_{s,\Delta x} = 3,5$ M.-%/z angesetzt.

5.4.3 Ergebnisse der Lebensdauerberechnung

Bei Verwendung von unlegiertem Bewehrungsstahl und Berücksichtigung des Zuverlässigkeitsniveaus von $\beta = 0,5$ liegt die errechnete Lebensdauer der betrachteten Bauteile unter der angestrebten Nutzungsdauer von 50 Jahren (Kappen, Notgehwege) bzw. 100 Jahren (Pfeiler, Tunnelwand), Bild 5.

Nach Ablauf der rechnerischen Lebensdauer (Erreichen des Grenzzustands der Bewehrungsdepassivierung) muss demnach eine Instandsetzungsmaßnahme eingeleitet werden. Alternativ kann die Lebensdauer durch den präventiven Auftrag und die regelmäßige Erneuerung eines Oberflächenschutzsystems verlängert werden.

Bei Einsatz eines Top12-Stahls oder auch bei einem Edelstahl mit $KWK \geq III$ wird der Grenzzustand der Depassi-

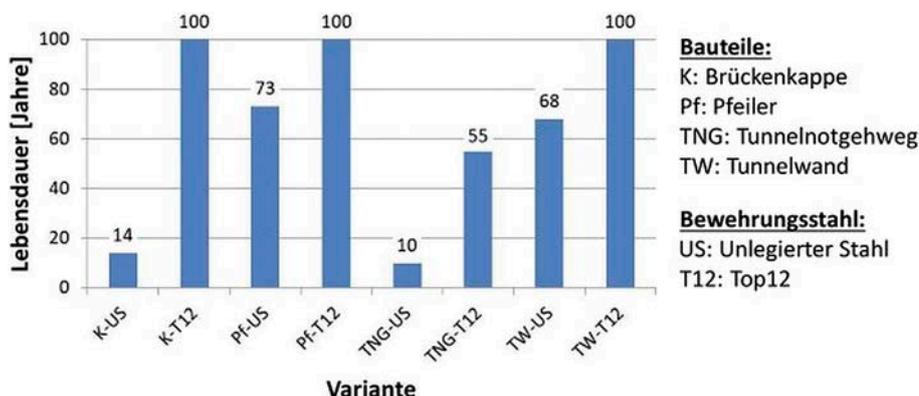


Bild 5 Ergebnisse der Lebensdauerberechnung
 Results of the service life calculation

vierung vor Ablauf der angestrebten Nutzungsdauer rechnerisch nicht erreicht. Zusätzliche Oberflächenschutz- oder Instandsetzungsmaßnahmen sind beim Einsatz von nichtrostendem Bewehrungsstahl somit nicht erforderlich.

5.4.4 Zeitpunkt des Abbruchs bzw. der Instandsetzung des Bauteils

Für die Bauteile Brückenpfeiler und Tunnelwand wurde die Annahme getroffen, dass nach Ablauf der rechnerischen Lebensdauer Instandsetzungsmaßnahmen eingeleitet werden (relevant für die Varianten mit unlegiertem Stahl). Im Gegensatz dazu werden Kappen und Tunnelnotgehewe häufig nicht instandgesetzt, sondern im Rahmen der Abdichtungserneuerung der Fahrbahn abgebrochen und neu gebaut. Dabei wird in der Praxis bis zum Abbruch ein über den im Rahmen der Lebensdauerbemessung definierten Grenzzustand (Depassivierung der Bewehrung) hinausgehendes Maß an Korrosion in Kauf genommen. Für diese Bauteile wird daher ein Zeitzuschlag von rd. sieben Jahren vom rechnerischen Ende der Lebensdauer bis zum Abbruch vorgenommen. Der Zeitzuschlag wurde auf Basis von Erfahrungswerten ermittelt.

5.4.5 Lebensdauern Oberflächenschutzsysteme

Für die betrachteten Oberflächenschutzsysteme werden die folgenden Lebensdauern angesetzt:

- Tiefenhydrophobierung mit Monitoringsystem: 15 Jahre,
- OS-B-System: 10 Jahre.

Nach Ablauf dieser Lebensdauern müssen die Oberflächenschutzsysteme überarbeitet bzw. erneuert werden. Das Monitoringsystem, welches im Fall der Tiefenhydrophobierung Berücksichtigung findet, wird bei Bauteilherstellung installiert und dann über die angesetzte Lebensdauer der Tiefenhydrophobierung jährlich ausgelesen und fünfjährlich bewertet.

5.5 Kostenermittlung

5.5.1 Allgemeines

Die Preise, welche der Kostenermittlung zugrunde gelegt wurden, sind mittlere Nettopreise und umfassen auch mit der Maßnahme verbundene Nebenarbeiten, wie z.B. Untergrundvorbereitung, Baustelleneinrichtung usw. Da die Preise je nach Objekt und Größe der bearbeiteten Fläche deutlich schwanken können, sollte der Variantenvergleich als orientierend betrachtet werden.

Bezugswert bei der Stahlkostenermittlung ist der unlegierte Bewehrungsstahl mit 1.000 €/t ohne Einbau. Für Edelstahl mit KWK \geq III wurde ein Kostenfaktor von 7 angesetzt (Mehrkosten von Edelstahl mit KWK \geq III im Vergleich zu unlegiertem Stahl rd. 6.000 €/t). Für Top12

wurde ein diesbezüglicher Kostenfaktor von 4,5 angesetzt (Mehrkosten Top12-Stahl im Vergleich zu unlegiertem Stahl von rd. 3.500 €/t). Kosten für den Einbau wurden nicht gesondert berücksichtigt, da für alle Stahlsorten von gleichen Einbaukosten ausgegangen werden kann.

Bei der Kostenermittlung wurden die präventiven Maßnahmen (Top12-Stahl bzw. Edelstahl mit KWK \geq III, Oberflächenschutzsysteme) bis in eine Höhe von rd. 5 m berücksichtigt. Kosten für die Behandlung von Rissen wurden nicht angesetzt. Die angesetzten Nettopreise können [23] entnommen werden.

5.5.2 Zinsen- und Kostensteigerung bei zukünftigen Aufwendungen

Zukünftige Zinsen- und Kostensteigerungen können bei einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung anhand der sogenannten Barwert-Methode berücksichtigt werden. Die „Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken“ vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung [24] wurde als Grundlage für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen herangezogen. Nach dieser Methode können zukünftige Ausgaben für die Instandhaltung in der Gegenwart, also zum heutigen Zeitpunkt, bewertet werden. Wenn z.B. in zehn Jahren ein Betrag x ausgegeben werden muss, wird zum jetzigen Zeitpunkt ein geringerer Rücklagenbetrag benötigt, da dieser in den zehn Jahren einen gewissen Zinsertrag (Zins und Zinseszins) erwirtschaftet, der vom Betrag x abgezogen werden kann. Ebenso ist jedoch davon auszugehen, dass zukünftige Instandsetzungskosten infolge Inflation teurer werden. Beide Faktoren werden mit nachfolgender Gl. (1) berücksichtigt:

$$K_M = K_{M,E} + \sum_{i=1}^n (K_{t,i} + K_v) \cdot q_1^{-n} \cdot q_2^n \quad (1)$$

mit:

K_M	Summe Mehrkosten
$K_{M,E}$	Mehrkosten Erstherstellung
$K_{t,i} (i = 1 \dots n)$	Kosten zum Zeitpunkt t infolge Beschichtungs- bzw. Instandsetzungsarbeiten etc. (n = Anzahl der Maßnahmen)
K_v	Kosten für Verkehrssicherung infolge von Instandsetzungsarbeiten (Beschichtung, Betoninstandsetzung)
q_1	Zinsfaktor Kapitalisierung $q_1 = 1,03$
q_2	Zinsfaktor Teuerung $q_2 = 1,02$
$t_i (i = 1 \dots n)$	Zeitpunkte der Maßnahmen im Verlauf der vorgesehenen Nutzungsdauer (Beschichtung, Monitoring, Instandsetzung) nach Erstherstellung in Jahren (n = Anzahl der Maßnahmen)

Die Kosten für die Verkehrssperrung liegen erfahrungsgemäß etwa im Bereich der Kosten für die Instandsetzungs- bzw. Beschichtungsmaßnahme selbst und wurden ebenfalls mit eingerechnet. Eine Ausnahme bildet die Erneue-

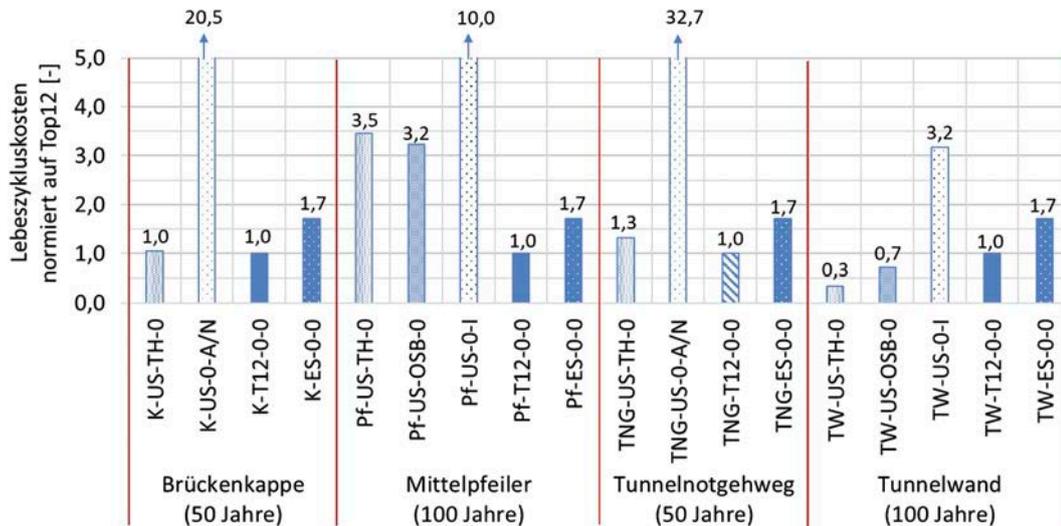


Bild 6 Ergebnisse der Lebenszykluskostenberechnung
Results of the life cycle cost calculation

rung der Oberflächenschutzsysteme am Pfeiler, die in der Regel im Rahmen einer Ein- oder Zweitagesbaustelle abgewickelt werden kann.

5.5.3 Ergebnisse der Lebenszykluskostenberechnung

In Bild 6 sind die Ergebnisse der Lebenszykluskostenberechnungen für eine geplante Nutzungsdauer von 50 bzw. 100 Jahren zusammengestellt. Da ein Absolutkostenvergleich bei der angewandten Barwert-Methode nicht unbedingt praxisgerecht wäre und es im Wesentlichen auf den relativen Vergleich ankommt, wurden die Lebenszykluskosten auf die in vielen Fällen wirtschaftlichste Variante (hier Top12-Stahl) normiert.

Die Ergebnisse der Lebenszyklusberechnungen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Verzicht auf präventive Maßnahmen (unlegierter Stahl, kein Oberflächenschutz): Diese Variante hat für alle Bauteile die höchsten Lebenszykluskosten zur Folge.
- Vergleich Top12-Stahl vs. unlegierter Stahl **ohne** Oberflächenschutzmaßnahmen: Top12-Stahl hat deutlich geringere Lebenszykluskosten, insbesondere bei niedrigem Bewehrungsgehalt.
- Vergleich Top12-Stahl vs. Edelstahl mit $KWK \geq III$: Die Lebenszykluskosten für eine Top12-Stahl-Bewehrung sind um rd. 40% niedriger.
- Vergleich Top12-Stahl vs. unlegierter Stahl **mit** Oberflächenschutzmaßnahme:
 - Bei Bauteilen mit kleinen Betonflächen (Pfeiler) ist die Variante mit Top12-Stahl günstiger.
 - Bei Bauteilen mit niedrigen Bewehrungsgehalten (z.B. Brückenkappen) liegen die Lebenszykluskosten in etwa in der gleichen Größenordnung.
 - Bei Bauteilen mit sehr niedrigen Bewehrungsgehalten (z.B. Tunnelnotgehwegen) ist die Variante mit Top12-Stahl etwas günstiger.

- Bei hochbewehrten Bauteilen mit großen Betonflächen, wie z.B. Tunnelinnenwänden, ist die Variante mit unlegiertem Bewehrungsstahl und OS-System günstiger.

5.5.4 Baupraktische Gesichtspunkte

Neben der Dauerhaftigkeit und den Mehrkosten sollten für eine abschließende Bewertung auch baupraktische Gesichtspunkte berücksichtigt werden. Hier bieten die nichtrostenden Betonstähle (Top12 oder Edelstahl mit $KWK \geq III$) gegenüber den Oberflächenschutzsystemen Vorteile:

- OS-B-Systeme haben in der Praxis nur eine geringe Dauerhaftigkeit bewiesen. Es hat sich gezeigt, dass diese Systeme eine hohe Empfindlichkeit gegenüber klimatischen Bedingungen (Mindesttemperatur, Taupunkttemperatur und Oberflächenfeuchte) haben und sie sich deshalb häufig nach nur kurzer Zeit ablösen. Außerdem ist die Chloriddichtigkeit dieser Systeme als vergleichsweise niedrig einzustufen, sodass in der Regel bereits vor Ablauf der angesetzten Lebensdauer des OS-B-Systems Chloride in den Beton eindringen.
- Tiefenhydrophobierungen können ebenfalls nur bei bestimmten klimatischen Bedingungen aufgetragen werden, die Anforderungen sind aber niedriger und somit leichter einzuhalten als für OS-B-Systeme.
- Die dauerhaftkeitsrelevanten Eigenschaften bei nichtrostenden Betonstählen werden unabhängig von der Ausführung auf der Baustelle erreicht. Bei Oberflächenschutzsystemen ist eine gute Ausführungsqualität (Untergrundvorbereitung (OS-B-System), Auftragsmenge, Sorgfalt beim Auftrag etc.) für die Funktionalität entscheidend.
- Beim Einsatz nichtrostender Betonstähle sind bei den hier betrachteten Lebenszyklen zudem über die geplanten 50 bzw. 100 Jahre keine Instandsetzungsmaß-

Tab. 1 Variantenvergleich unter Berücksichtigung der Dauerhaftigkeit, Lebenszykluskosten und baupraktischer Gesichtspunkte
Comparison of variants under consideration of durability, life cycle costs and practical construction aspects

Kategorie	Dauerhaftigkeit			Lebenszykluskosten			Baupraktische Gesichtspunkte			
	Variante*	-US-TH-0	-T12-0-0	-ES-0-0	-US-TH-0	-T12-0-0	-ES-0-0	-US-TH-0	-T12-0-0	-ES-0-0
Bauteil										
Brückenkappe	+	+	++	+	+	-	-	++	++	
Singulärer Mittelpfeiler	+	+	++	0	+	-	-	++	++	
Tunnelnotgehweg	+	+	++	+	+	-	-	++	++	
Tunnelwand	+	+	++	+	0	-	-	++	++	

Bewertung: ++ sehr gut | + gut | 0 neutral | - schlecht

* Bewehrungsstahl: US = unlegierter Stahl | T12 = Top12 | ES = Edelstahl mit KWK ≥ III
Oberflächenschutz: TH = Tiefenhydrophobierung | OSB = OS-B-System
Betoninstandsetzung: I = Instandsetzung | A/N = Abbruch/Neubau

nahmen erforderlich. Demzufolge ist die Kostenermittlung bei der Planung von Varianten mit nichtrostenden Betonstählen mit deutlich geringeren Unsicherheiten behaftet als die der Planung von Varianten mit nachträglichen Instandsetzungsmaßnahmen (z. B. mit regelmäßigem Neuauftrag des OS-Systems).

Es bleibt zu bemerken, dass der in der Studie verwendete Beton einen um ca. 60% höheren Chlorideindringwiderstand mitbringt als der gemäß ZTV-ING [14] geforderte Standardbeton. Die errechnete Lebensdauer bei der Mindestanforderung würde bei < 20 Jahren liegen.

5.5.5 Abschließender Variantenvergleich und Bewertung

In der nachfolgenden Bewertung werden die Varianten mit OS-B-System aufgrund deren hohen Empfindlichkeit in Bezug auf klimatische Bedingungen, Ausführungsqualität und Chloriddichtigkeit nicht berücksichtigt. Auch die Varianten ohne präventive Maßnahmen werden nicht in eine Bewertung mit einbezogen, da die Kosten um ein Vielfaches über jenen für die Varianten mit Top12-Stahl oder mit unlegiertem Stahl und Tiefenhydrophobierung liegen.

In Tab. 1 wird eine Bewertung der Varianten hinsichtlich der Themenbereiche Dauerhaftigkeit, Lebenszykluskosten und baupraktische Gesichtspunkte vorgenommen. Bezieht man alle betrachteten Themenbereiche in die

Bewertung mit ein, so schneidet die Variante mit Top12-Stahl am besten ab.

6 Ergebnistransfer und Ausblick

Bisher wird die Dauerhaftigkeit gegenüber chloridinduzierter Bewehrungskorrosion von Brückenbauwerken in der Stahlbeton- und Spannbetonbauweise nach ZTV-ING [14] indirekt über die Zuweisung bestimmter Betondeckungen sowie Expositionsklassen und damit verbundenen Anforderungen an die Betonzusammensetzung berücksichtigt. Zahlreiche Schäden zeigen aber, dass für besonders stark beanspruchte Bauteile wie z. B. Brückenmittelpfeiler, Brückenkappe, Tunnelnotgehweg und Tunnelwand weitere Maßnahmen ergriffen werden müssen, um die Dauerhaftigkeit über eine derzeit angestrebte Nutzungsdauer von 50 bzw. 100 Jahren sicherzustellen. Die Ergebnisse der Lebenszykluskostenberechnung liefern hilfreiche Hinweise, wie in Bezug auf chloridinduzierte Bewehrungskorrosion dauerhafter und bei Betrachtung der gesamten Nutzungsdauer auch kostengünstiger gebaut werden kann. In der Folge können aus wirtschaftlicher und volkswirtschaftlicher Sicht sehr aufwendige Instandsetzungen an stark frequentierten Verkehrsbauwerken vermieden bzw. minimiert werden.

Dieser Beitrag wurde in ähnlicher Form im Tagungsband des 29. Dresdner Brückenbausymposium veröffentlicht [25].

Literatur

- [1] SCHIESSL-PECKA, A.; WILLBERG, U.; MÜLLER, G.; GEHLEN, C.: *100 Jahre Dauerhaftigkeit für Brücken- und Tunnelbauwerke*. In: CURBACH, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 28. Dresdner Brückenbausymposium – Planung, Bauausführung, Instandsetzung und Ertüchtigung von Brücken am 12./13.3.2018 in Dresden, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2018, S. 157–168.
- [2] SCHIESSL, P.; MAYER, T. F.: *Lebensdauermanagement-system – Teilprojekt A2*. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb, Hrsg.): Schriftenreihe des DAfStb, Heft 572, Schlussberichte zur ersten Phase des DAfStb/BMBF-Verbundforschungsvorhabens „Nachhaltig Bauen mit Beton“, Berlin: Beuth, 2007, S. 49–100.
- [3] HEISS, N.; FISCHER, O.; HIERL, M.; SEIDL, G.: *Straßenbrücke ohne Belag und Abdichtung*. In: DBV (Hrsg.): Tagungsband Deutscher Bautechnik-Tag 2015, 23.04.2015 in Stuttgart, 2015, S. 105–106
- [4] WILLBERG, U.; SCHNECK, U.; SCHIESSL-PECKA, A.: *A 96 Tunnel Eching und Etterschlag Alternative Betoninstandsetzung*. In: SCHÄFER, F. (Hrsg.): Tagungsband Kolloquium

- Straßenbau in der Praxis am 29./30.1.2019 in Esslingen, Technische Akademie Esslingen, 2019.
- [5] KRÜGER, A.: *Zukunft Bundesautobahngesellschaft – von der Verwaltung zum Management*. In: Schäfer, F. (Hrsg.): Tagungsband Kolloquium Straßenbau in der Praxis am 29./30.1.2019 in Esslingen, Technische Akademie Esslingen, 2019.
- [6] DIN EN 1992-1-1:2011, Eurocode 2: *Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010.
- [7] DIN-Fachbericht 100:2010-03: *Beton – Zusammenstellung von DIN EN 206-1 Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität und DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton; Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1*.
- [8] V. GREVE-DIERFELD, S.; GEHLEN, CH.: *Performance-based durability design, carbonation, Part 1 – Benchmarking of European present design rules*. Structural Concrete (2016) 3, S. 309–328.
- [9] V. GREVE-DIERFELD, S.; GEHLEN, CH.: *Performance-based durability design, carbonation, Part 2 – Classification of concrete*. Structural Concrete (2016) 4, S. 523–532
- [10] V. GREVE-DIERFELD, S.; GEHLEN, CH.: *Performance-based durability design, carbonation, Part 3 – PSF approach and a proposal for the revision of deemed-to-satisfy rules*. Structural Concrete (2016) 5, S. 718–728.
- [11] Bundesanstalt für Wasserbau (BAW, Hrsg.): *BAW-Merkblatt Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC)*. Ausgabe 2017.
- [12] MAYER, T. F.; SCHIESSL-PECKA, A.: *Lösungsstrategien zur Chloridbelastung in Straßentunneln*. Tagungsunterlagen zur VSVI-Tagung 2017, 25.1.2017 in Garching, 2017.
- [13] SCHWARZ, J.: *Forschungsprogramm: Zukunft Bau – Berücksichtigung von Lebenszykluskosten bei der Vergabe von Bauleistungen als Zuschlagskriterium*. Endbericht Az 10.8.17.7-15.02. Universität der Bundeswehr München, Neubiberg 2015.
- [14] ZTV ING:2017: *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten*.
- [15] V. GREVE-DIERFELD, S.; BISSCHOP, J.; SCHIEGG, Y.: *Nicht-rostende Bewehrungsstähle zur Verlängerung der korrosionsfreien Lebensdauer von Stahlbetonbauwerken*. Beton- und Stahlbetonbau 112 (2017), Heft 9, S. 601–610 – <https://doi.org/10.1002/best.201700038>.
- [16] SCHIESSL-PECKA, A.; RAUSCH, A.; ZINTEL M.; LINDEN, CH.: *Brückennittelpfeiler – Optimierte Lebenszykluskosten für 100 Jahre Dauerhaftigkeit*. In: SCHÄFER, F. (Hrsg.): Tagungsband Kolloquium Straßenbau in der Praxis am 29./30.1.2019 in Esslingen, Technische Akademie Esslingen, 2019, Beitrag angenommen.
- [17] SCHIESSL-PECKA, A.; BUSCHMEIER, S.: *Einsatz von Hydrophobierungen nach dem Gelbdruck der Instandhaltungs-Richtlinie – Praxisbeispiele und Vorgehen aus der Perspektive des Planers*. Raupach, M. (Hrsg.): Tagungsband 6. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken am 22./23.01.2019 in Esslingen, Technische Akademie Esslingen, 2019.
- [18] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Hrsg.): *Richtlinie „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“* (Rili-S1B 2001). Ausgabe 2001.
- [19] Federation internationale du beton (fib, Hrsg.): *Bulletin 34 – Model Code for Service Life Design*. Lausanne (Schweiz), 2006.
- [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) 9, S. 837–839 – <https://doi.org/10.1002/best.200808229>.
- [21] Federation internationale du beton (fib, Hrsg.): *Bulletin 76 – Benchmarking of deemed-to-satisfy provisions in standards. State-of-the-art report*. Lausanne (Schweiz), 2015.
- [22] RAHIMI, A.: *Semiprobabilistisches Nachweiskonzept zur Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkung*. Diss., TU München, 2016.
- [23] SCHIESSL-PECKA, A.; RAUSCH, A.: *Top12, Fa. Swiss Steel – Lebenszykluskostenbetrachtung*. Gutachterliche Stellungnahme 16-192/1.1.3 vom 26.7.2018, Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat, München.
- [24] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS, Hrsg.): *RI-WI-BRÜ – Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken*. Berlin, 2004.
- [25] SCHIESSL-PECKA, A.; RAUSCH, A.; ZINTEL, M.; LINDEN, CH.: *Lebenszykluskostenbetrachtungen für chloridexponierte Bauteile von Brücken- und Tunnelbauwerken*. In: CURBACH, M. (Ed.): Tagungsband des 29. Dresdner Brückenbausymposium, Planung, Bauausführung, Instandsetzung und Ertüchtigung von Brücken. 11./12.03.2019 in Dresden, 161–170.

Autoren



Dr.-Ing. Angelika Schießl-Pecka
Ingenieurbüro Schießl · Gehlen · Sodeikat GmbH
Landsberger Str. 370
80687 München
schiessl-pecka@ib-schiessl.de



Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Anne Rausch
Ingenieurbüro Schießl · Gehlen · Sodeikat GmbH
Landsberger Str. 370
80687 München
rausch@ib-schiessl.de



Marc Zintel, Dr.-Ing., MBA and Eng.
Swiss Steel AG
Emmenweidstrasse 90
6020 Emmenbrücke, Schweiz
mzintel@swiss-steel.com



Christian Linden, Dipl.-Ing., MBA Luzern
Swiss Steel AG
Emmenweidstrasse 90
6020 Emmenbrücke, Schweiz
clinden@swiss-steel.com

