

Wie lange noch? - Semiprobabilistische Dauerhaftigkeitsbemessung bei Parkdecks mit Chlorideinwirkung mittels Einbezugs von LIBS-Untersuchungen

Dr. Matthias Bernhard Lierenfeld, Valtest AG, CH-Lalden
Nathan Metthez, Valtest AG, CH-Lalden
Philipp Truffer, Valtest AG, CH-Lalden

Zusammenfassung

Bei Tragwerken müssen die Anforderungen an die Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit eingehalten werden. Um die vereinbarte Nutzungsdauer zu erreichen, müssen sie zudem noch dauerhaft sein, damit sie bei Beanspruchungen durch Einwirkungen aus Betrieb und Umwelt genügend beständig sind. Bei Neubauten wird die Dauerhaftigkeit der Betonbauteile aktuell noch durch die Einhaltung von empirischen Erfahrungswerten erreicht. Diese normbasierten Regelungen umfassen in Abhängigkeit der Exposition des Bauteils im Wesentlichen Vorgaben bezüglich der Mindestzementmenge, dem maximalen Wasser-Zementwert sowie der Einhaltung einer minimalen Bewehrungsüberdeckung. Bei der Beurteilung von bestehenden Betonbauwerken und insbesondere bei Fragestellungen, inwieweit die vorgesehene Nutzungsdauer aufgrund des Alters und der Beanspruchung erreicht werden kann, liefern die oben erwähnten deskriptiven Regelungen jedoch keine Hilfestellung.

In den letzten Jahren wurden vermehrt leistungsorientierte Konzepte zur Bemessung der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken hinsichtlich Betonstahlkorrosion entwickelt. Mittels sogenannten semiprobabilistischen Nachweiskonzepten zur Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung stehen heute entsprechende Hilfsmittel zur Beantwortung der oben aufgeführten Fragestellungen zur Verfügung. Im vorliegenden Beitrag wird hierauf unter Einbezug von Messdaten und -auswertungen aus LIBS (Laser-induzierte Breakdown Spektroskopie) -Untersuchungen eingegangen.

1. Ausgangslage

Bauwerke müssen tragsicher, gebrauchstauglich und im Normalfall auch dauerhaft sein. “Damals dachte man, Beton halte ewig.” – eine Aussage des Brückenbauers Michel Virogeux¹ zum Einsturz des Polcevera-Viadukts 2018 in Genua. Das Thema Dauerhaftigkeit von Beton ist nicht erst seit der erwähnten Katastrophe aktuell. Ihr wird seit längerer Zeit vermehrt Aufmerksamkeit geschenkt. Gemäss Prof. Ueli Angst von der ETH Zürich verursachen korrosionsbedingte Schäden jährlich Kosten in der Grössenordnung von 3% des Bruttoinlandsprodukts in der Schweiz.

Stahlbeton ist unter der Voraussetzung, dass er fachgerecht hergestellt und verarbeitet sowie optimal nachbehandelt wurde, eigentlich ein dauerhafter Baustoff. Stark und Wicht definieren in [14] die Dauerhaftigkeit von Beton dementsprechend, dass

Bauteile aus Beton bei Beanspruchungen durch Einwirkungen aus Betrieb und Umwelt über die vorgesehene Nutzungsdauer bei ausreichender Wartung und Instandhaltung genügend beständig sind.

Während für den Nachweis der Tragsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit entsprechende Bemessungs- und vielfach normenbasierte Nachweisverfahren vorhanden sind, werden die Anforderung an die Dauerhaftigkeit über erfahrungsbasierte, empirische Regeln abgehandelt. Je nach Exposition des Betonbauteils muss der Beton hierbei eine Mindestzementmenge, einen maximalen Wasser-Zementwert und eine minimale Bewehrungsüberdeckung aufweisen sowie eine optimale Nachbehandlung gewährleistet werden. Es handelt sich bei diesen Vorgaben um rein empirische Werte. Mit der Einhaltung dieser deskriptiven Regelungen aus der Betonnorm EN 206 [10] wird davon

¹ Schweizerische Bauzeitung TEC21, 22.02.2019, Nr. 7-8

im Grundsatz ausgegangen, dass damit Bauteile aus Beton eine Nutzungsdauer von 50 Jahren erreichen.

Betonbauteile unterliegen vielfältigen und hohen Beanspruchungen aus nutzungs- und umweltbedingten Einwirkungen. Die dadurch ausgelösten Schäden nehmen über das Bauteilalter progressiv zu und verursachen erhebliche Kosten. Bei Fragen zur weiteren Schadensentwicklung und zur Restnutzungsdauer, versagen jedoch oben erwähnte deskriptive Ansätze mangels fehlender Informationen zur Zusammensetzung der Baustoffe.

Bei Einwirkungen auf Betonbauteile infolge Karbonatisierung und/oder Chloridbeaufschlagung liefern semiprobabilistische Bemessungsansätze hierzu bessere und wertvolle Lösungsansätze.

2. Bemessung der Dauerhaftigkeit und Lebensdauerprognose

Bei neu zu erstellenden Bauwerken gilt es die Dauerhaftigkeit (Lebensdauer) zu bemessen, bei bestehenden Bauten wird hingegen eine Lebensdauerprognose (wie lange noch?) erforderlich. Grundsätzlich bestehen bei semiprobabilistischen Dauerhaftigkeitsbemessungen, welche nachfolgend näher erläutert werden, keine Unterschiede ob diese bei einer Dauerhaftigkeitsbemessung (Neubau) oder einer Lebensdauerprognose (Bestandesbau) zur Anwendung kommen. Es finden die gleichen Schädigungs-Zeit-Gesetze, probabilistischen Methoden und Grenzzustandsdefinitionen Verwendung. Nachfolgend wird schwergewichtig auf die Lebensdauerprognose bei bestehenden Bauwerken eingegangen werden.

Eine nachhaltige Instandsetzungsplanung erfordert gemäss der DAfStb-Instandsetzungsrichtlinie [1] eine detaillierte aktuelle Zustandserfassung des betroffenen Betonbauwerks. Hierbei gilt es u.a. auch Schäden und deren Schädigungsentwicklung zu bewerten, welche einen wesentlichen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit des Betons ausüben.

Mit dem heutigen deskriptiven Ansatz ist eine wirkliche Dauerhaftigkeitsbemessung jedoch nicht möglich. Trotzdem sollten Fachleute fundierte Aussagen zur weiteren Entwicklung der Schädigung am Bauwerk (Lebensdauerprognose) und über mögliche einzuleitende Massnahmen machen können, damit das Bauwerk die angestrebte Nutzungsdauer erreicht. Aussagen zur Restnutzungsdauer oder zu Instandsetzungsmassnahmen sollten nicht willkürlich getätigt werden, sondern auf der Berechnung des fortschreitenden d.h. zeitabhängigen Dauerhaftigkeitsverlusts beruhen.

3. Dauerhaftigkeitsrelevante Schädigungen

Im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauteilen ist die karbonatisierungs- und chloridinduzierte Bewehrungskorrosion bei zahlreichen Bauwerken die wesentlichste Schadensbeanspruchung. Für die Beurteilung dieser Schädigungsmechanismen können schon semiprobabilistische Nachweisconzepte zur Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung angewandt werden. Bei der Frost-Tausalz-Beanspruchung von Beton laufen derzeit Forschungsvorhaben mit dem Ziel ebenfalls Modelle für eine entsprechende Lebensdauerbemessung zu erhalten [15]. Nachfolgend wird dabei schwergewichtig auf die Bewehrungskorrosion im Beton eingegangen.

Der Stahl im Beton ist durch die Alkalität der Porenlösung (pH-Wert 12.5 bis 13.5) vor Korrosion geschützt. Die mikroskopisch dünne Passivschicht unterbindet dabei die anodische Eisenauflösung. Wenn der pH-Wert des Betons infolge Karbonatisierung unter ca. 9.0 abfällt oder der Chloridgehalt des Betons einen charakteristischen kritischen Grenzwert überschreitet, wird die Passivschicht und damit auch der Korrosionsschutz der Bewehrung degradiert.

Der Schädigungsablauf bei der karbonatisierungs- oder chloridinduzierten Bewehrungskorrosion läuft grundsätzlich gleich ab (Abb. 3-1). In der Einleitungsphase dringen die Karbonatisierungfront, Chloride oder andere schädlichen Bestandteile aus der Umgebung zur Oberfläche der Bewehrung vor. Während dieser Phase sind am Bauwerk noch keine eigentlichen Schädigungen festzustellen. Am Ende dieser Phase ist die Passivschicht nicht mehr stabil, d.h. die Bewehrung ist depassiviert.

In der Zerstörungsphase beginnt die eigentliche Schädigung der Bewehrung aufgrund der einsetzenden Korrosion, welche sich je nach Grad der Schädigung zuerst in Form von auftretenden Rissen und anschliessend fortschreitend mit Abplatzungen über den Bewehrungen zeigt. Das Erreichen des Grenzzustands bedeutet schliesslich, dass ein bestimmter Grad der Zerstörung erreicht worden ist, bei welchem entweder eine umgehende Instandsetzung/Verstärkung erforderlich wird oder das Ende der Lebensdauer des Bauteils erreicht worden ist.

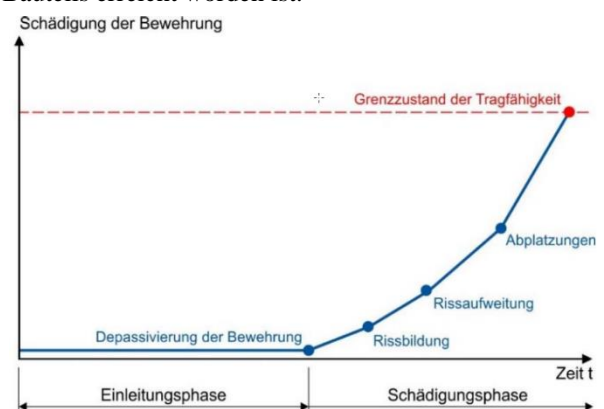


Abb. 3-1 zeitliche Entwicklung der Bauteilschädigung durch Bewehrungskorrosion [18]

4. Deskriptiver Dauerhaftigkeitsansatz

Bei der Beurteilung des aktuellen (Korrosions-)Zustands und der Einleitung von möglichen Massnahmen bei Stahlbetonbauten stehen heute zahlreiche Grundlagen in Form von Richtlinien und Normen zur Verfügung. So sind in der DAfStb-Instandsetzungsrichtlinie [1] verschiedene Prinzipien und Verfahren bei unterschiedlichen Einwirkungen und Schädigungsgraden beschrieben.

Dabei wird beispielsweise beim Verfahren 7.2 „Ersatz von schadstoffhaltigem oder karbonatisiertem Beton“ vorgeschlagen, bei grossen Chlorideindringtiefen den Beton bis mindestens 30 mm hinter die Bewehrung zu entfernen. Dabei darf der Chloridgehalt im verbleibenden Altbeton 1.5 M-% bezogen auf den Zementgehalt nicht überschreiten (Abb. 4-1). Bei dieser Vorgabe handelt es sich um einen Erfahrungswert.

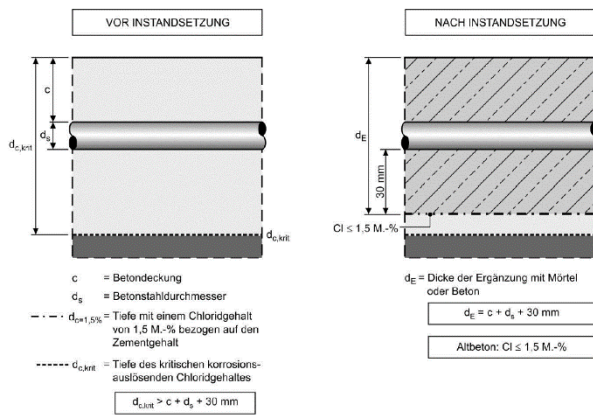


Abb. 4-1 Verfahren 7.2 „Ersatz von schadstoffhaltigem oder karbonatisiertem Beton“ [1] Tiefe des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts über 30 mm hinter der Bewehrung (deskriptiver Ansatz)

Höhere verbleibende Chloridgehalt über 1.5 M-% bez. auf den Zement sind nur bei entsprechenden Nachweisen zulässig. Im Kapitel 5 der erwähnten Richtlinie sind hierzu informative Verfahren zur einfachen Abschätzung sowie auf semiprobabilistischer und probabilistischer Grundlage aufgeführt.

Das Verfahren 7.7 „Beschichtung“ darf bei Chlorideinwirkung nur dann angewendet werden, wenn sichergestellt ist, dass durch die Umverteilung der bereits im Altbeton vorhandenen Chloride über den Zeitraum der Restnutzungsdauer keine Depassivierung der Bewehrung erfolgt. Dies kann als gegeben angenommen werden, wenn der Abstand des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts (C_{crit}) zur Bewehrungsoberfläche > 10 mm beträgt (Abb. 4-2).

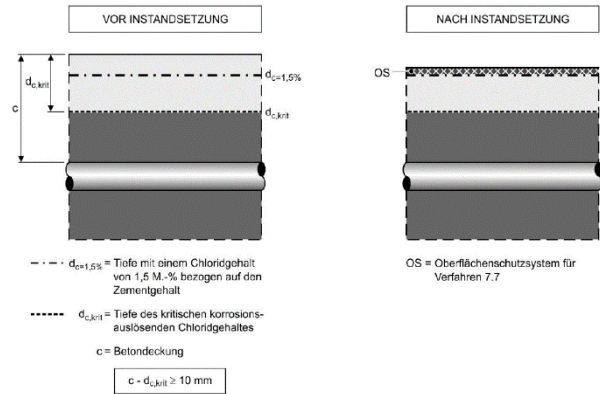


Abb. 4-2 Verfahren 7.7 „Beschichtung“ [1] Tiefe des kritischen korrosionsauslösenden bei Chloridbeaufschlagung (deskriptiver Ansatz)

Diese und andere Vorgaben berücksichtigen nicht die konkrete materialtechnologische Situation oder die effektiv vorhandene Exposition. Es handelt sich dabei um eine Art „Rezeptvorschläge“, um auf die sichere (?) Seite zu gelangen.

5. Semiprobabilistisches Bemessungsmodell

5.1. Modellansatz

Im Bereich der Tragsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit hat sich das semiprobabilistische Sicherheitskonzept auf der Basis von Grenzzuständen durchgesetzt. Dabei werden zufallsverteilte Einwirkungen E den ebenfalls zufallsverteilten Tragwiderständen R gegenübergestellt. Da für beide Zufallsgrößen vielfach unzureichende empirische Kenntnisse vorliegen, wird der Ansatz dementsprechend so gewählt, dass zwischen den Bemessungswerten der jeweiligen Verteilungsfunktionen ein genügend grosser Sicherheitsabstand vorliegt. Ein Versagen des Tragwerks d.h. Überschreiten des Grenzzustands wird vermieden, wenn folgende Bedingung eingehalten wird:

$$R - E > 0 \quad (1)$$

Bei der leistungsbezogenen Dauerhaftigkeitsbemessung wird nun das gleiche Grundprinzip herangezogen. Den möglichen Beton- und Bauteilwiderständen werden die zu erwartenden umgebungsbedingten Beanspruchungen aus der jeweiligen Exposition gegenübergestellt. Als Grenzzustand bei der Bewehrungskorrosion wird festgelegt, dass eine Depassivierung der Betonstahloberfläche ausgeschlossen werden kann. Die Stahloberfläche wird dabei, wie oben beschrieben, entweder durch die Karbonatisierung oder durch eindringende Chloride depassiviert.

Beim semiprobabilistischen Nachweiskonzept zur Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkungen wird eine mögliche Depassivierung des Betonstahls durch das Erreichen

eines C_{crit} auf Höhe der Betonstahloberfläche zugrunde gelegt [4]. Mit dem Erreichen dieses Werts an der Betonstahloberfläche ist der Grenzzustand für die chloridinduzierte Betonstahlkorrosion erreicht [3]. Es gilt dann folgende Grenzzustandsgleichung

$$g(X,t) = C_{crit} - C(c, t_{SL}) \quad (2)$$

Darin sind:

- C_{crit} kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt [M-%/b]
- $C(c, t_{SL})$ Chloridgehalt an der Betonstahloberfläche zum Zeitpunkt t_{SL} [M-%/b]
- c Bewehrungsüberdeckung [m]
- t_{SL} Nutzungsdauer (Service Life) [Jahr]

Die Zustandsprognose erfolgt durch eine Zuverlässigkeitsanalyse mit Hilfe der Grenzzustandsgleichung (2) und durch Festlegung eines Zielwertes des Zielzuverlässigkeitsindex β_0 , mit welchem die Anforderung an die Sicherheit des Bauwerks für den betrachteten Zeitpunkt ausgedrückt wird.

Bei der vorliegenden Modellbetrachtung gilt es zu beachten, dass sich die Aussagen ausschliesslich auf den Zeitpunkt der Korrosionsinitiierung d.h. den Beginn der Schädigungsphase (siehe Abb. 3-1) beziehen. Der weitere Korrosionsprozess kann aktuell modellmässig noch nicht abgebildet werden. Zudem gilt das Modell nicht im Bereich von gerissenen Bauteilen, da hier andere, sich z.T. überlagernde Transportmechanismen wirken.

5.2. Widerstand

In der Grenzzustandsgleichung (2) stellt C_{crit} den Widerstand dar. Dabei handelt es sich um einen angenommenen Schwellenwert, der u.a. von der Dicke und Qualität der Betondeckung abhängig ist.

In der Wissenschaft ist man sich im Grundsatz einig, dass es nicht einen fixen für alle Anwendungen gleichbleibenden C_{crit} gibt. Er ist von einer Vielzahl von Parametern abhängig. Die Schweizer Norm SIA 269/2 [17] beschreibt, dass bei Chloridgehalten < 0.4 M-%/Z kaum Korrosion vorhanden und zwischen 0.4 bis 1.0 M-%/Z Korrosion möglich ist. In [8] wird ein unterer Grenzwert des Chloridgehalts von 0.5 M-%/Z für C_{crit} bestätigt.

Verschiedenste Untersuchungen zeigen, dass C_{crit} sehr stark streuen kann (0.04 ... 8.34 % Chlorid bezogen auf das Zementgewicht [11]). „Eine verlässliche Abschätzung der verbleibenden Zeit bis zur Korrosionsinitiierung ist damit nach dem heutigen Stand des Wissens nicht möglich.“ [11]. Bei den vereinfachten Methoden der semiprobabilistischen Dauerhaftigkeitsbemessung wird für C_{crit} eine statistische Betaverteilung mit einem Mittelwert von 0.6 M-%/z_{eq} angenommen [4]. Es handelt sich folglich zwar um eine Zufallsgrösse mit einer entsprechenden Streuung, aber berücksichtigt damit weder die lokalen noch die materialtechnologischen Gegebenheiten.

Angst et al. beschreibt in [11] ein standardisiertes Verfahren zur Bestimmung des C_{crit} im Labor. Dabei werden Probekörper aus einem chloridbelasteten Bauwerk entnommen und nach einer entsprechenden Präparation ausgelagert (Chloridexponierung). Durch einen Chlorideintrag durch den Überdeckungsбетон wird rein über Diffusion ein Chloridtransport bis zur Bewehrung ausgelöst. Die Detektion der Korrosionsinitiierung erfolgt mittels Potenzialfeldmessung. Sobald das Potenzial ausgehend von einem ursprünglich definierten Passivlevel innerhalb von 24 Stunden um 150 mV abfällt und anschliessend das Potenzial während 7 Tagen auf diesem Niveau verweilt, wird dies als der stabile Anfang der Korrosionsinitiierung angenommen (Abb. 5-1).

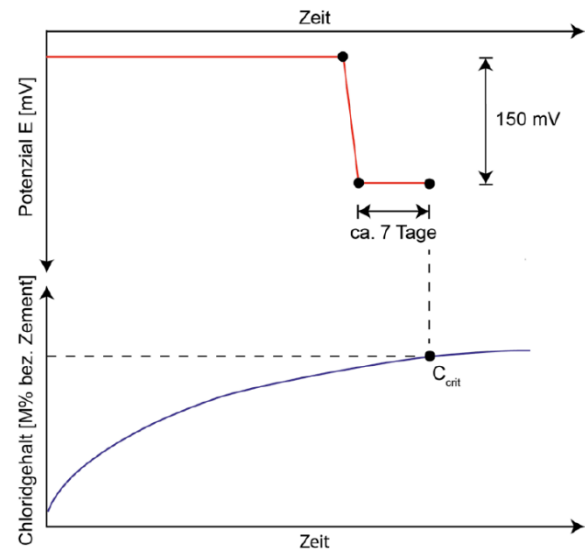


Abb. 5-1 Kriterium der Korrosionsinitiierung zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts gemäss RILEM TC 235-CTC (aus [11])

Die Untersuchungen von Angst et al. zeigten, dass teilweise sehr hohe Chloridgehalte tolerierbar sind, ohne dass Korrosion einsetzt. Der oben erwähnte C_{crit} von 0.4 M-%/Z kann dabei als sehr konservativ betrachtet werden. Insgesamt steht folglich ein Instrument zur Verfügung, welches es ermöglicht bauteilbezogen im konkreten Fall den effektiven C_{crit} zu bestimmen.

5.3. Einwirkung

Der vorhandene Chloridgehalt an der Betonstahloberfläche zum Zeitpunkt t repräsentiert die Einwirkung [3]. Die Grenzzustandsgleichung (2) kann somit auch wie folgt beschrieben werden:

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

- c Bewehrungsüberdeckung [m]
- $x_{crit}(t_{SL})$ Tiefenlage des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts zum Zeitpunkt t_{SL} [m]

Zur Abschätzung des Zeitraums vom Beginn der Chloridbeaufschlagung bis zur Depassivierung des Betonstahls (Initiierungsphase) wird der zeit- und tiefenabhängige Chlorideindringverlauf im Beton bestimmt. Es handelt sich dabei um einen Diffusionsprozess gemäss des zweiten Fick'schen Diffusionsgesetz [4].

$$C(x,t) = C_0 + (C_{S,\Delta x} - C_0) \cdot \operatorname{erfc} \frac{x-\Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{app}(t) \cdot t}} \quad (4)$$

$C(x,t)$	Chloridgehalt [M-%/z _{eq}] in der Tiefe x von der Bauteil- bzw. Probekörperoberfläche [mm] zum Zeitpunkt t
$C_{S,\Delta x}$	Chloridgehalt an der Bauteiloberfläche (bei $\Delta x=0$) bzw. in der Tiefe Δx zum Beobachtungszeitpunkt in Abhängigkeit der anstehenden Chloridquelle, welche als konstante Einwirkung angenommen wird (Oberflächenchloridgehalt) [M-%/z _{eq}]
Δx	Tiefenbereich, in dem ggf. das Chlorideindringverhalten durch intermittierende Chlorideinwirkung vom Fick'schen Diffusionsverhalten abweicht [mm]
C_0	Eigenchloridgehalt des Betons [M-%/z _{eq}]
$D_{app}(t)$	scheinbarer Chloriddiffusionskoeffizient des Betons [mm ² /Jahr] zum Zeitpunkt t
t	Zeitdauer vom Beginn der Beaufschlagung bis zur Inspektion bzw. die Lebensdauer [Jahr]
erfc	Komplementäre der Gauss'schen Fehlerfunktion (=1-erf)

Für die Ermittlung der Restnutzungsdauer werden folgende Parameter bestimmt:

- scheinbarer Chloriddiffusionskoeffizient $D_{app(t)}$
- der Altersexponent α_{app} (siehe Abb. 5-3)
- der Oberflächenchloridgehalt bzw. der Chloridgehalt in der Tiefe Δx (Konvektionszone) $C_{S,\Delta x}$
- die Mindestdeckung c_{min} (5%-Quantil der am Bauteil gemessenen Betondeckung)

Weitere Eingangsparameter werden aus dem Chloridprofil abgeleitet. Der scheinbare Chloriddiffusionskoeffizient zum Zeitpunkt der Inspektion $D_{app(t_{insp})}$ sowie der Oberflächenchloridgehalt bzw. der Chloridgehalt in der Tiefe Δx (Konvektionszone) $C_{S,\Delta x,insp}$ werden durch eine Regressionsanalyse unter Verwendung der Gleichung (4) berechnet [4].

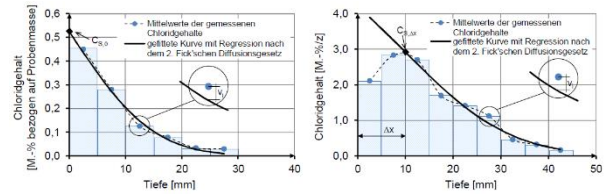


Abb. 5-2 Ermittlung von $D_{test(t)}$ und $C_{s,0}$ bzw. $C_{s,\Delta x}$ anhand von Chloridprofilen aus bestehenden Bauwerken oder Laborkurzzeitversuch [3]

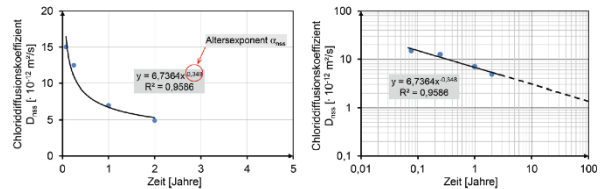


Abb. 5-3 Ermittlung des Altersexponenten α_{nss} mittels Regressionsanalyse an Chloriddiffusionskoeffizienten D_{nss} [3]

6. Laser-induzierte Breakdown Spektroskopie (LIBS)

Die Laser-induzierte Breakdown Spektroskopie (LIBS) ist ein berührungsloses Analyseverfahren zur Untersuchung von Baustoffen. Das Resultat ist eine zwei-dimensionale Darstellung der Elementverteilung der untersuchten Baustoffoberfläche. Bei der Messung kann die Probenoberfläche mit einem minimalen Raster von 0.1 x 0.1 mm automatisiert abgescannt werden (schematischer Aufbau in Abb. 6.1). Mit einem hochenergetischen gepulsten Laserpuls werden kleinste Materialmengen an der Oberfläche der Probe verdampft und in ein Plasma (Temperaturen von > 10.000° K) überführt, in dem die chemischen Bindungen aufgebrochen werden. Nach Beendigung der Energiezufuhr kühlt das Plasma ab und zerfällt wieder («breakdown»), wobei Element-charakteristische Strahlung emittiert wird. Durch Spektralanalyse des vom Plasma emittierten Lichts können in Abhängigkeit der Wellenlänge Spektrallinien identifiziert werden, wodurch eine Analyse von einzelnen Elementen ermöglicht wird.

Durch dieses Messprinzip sind grundsätzlich alle Elemente des Periodensystems zeitgleich nachweisbar. Es können alle für die Zusammensetzung des Zements und der Gesteinskörnung sowie die für die Schädigungsprozesse im Beton relevanten Elemente (z.B. Chlor, Schwefel, Natrium, Kalium, Kohlenstoff und Stickstoff) erfasst und bestimmt werden. Durch die Verwendung von Standards kann eine Kalibrierung und somit auch eine Quantifizierung der Ergebnisse ermöglicht werden.

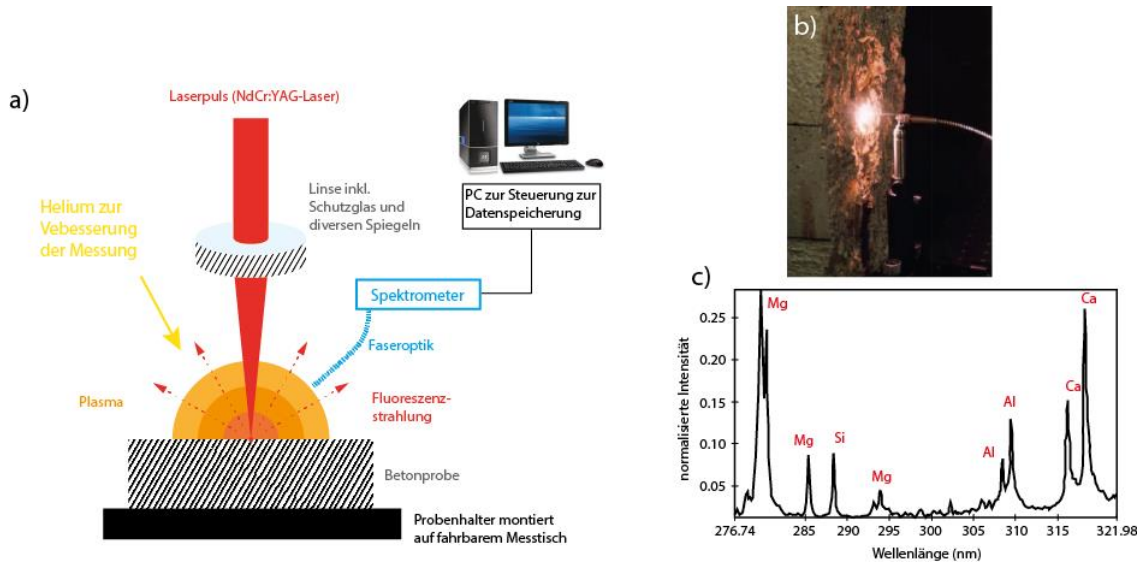


Abb. 6-1 a) Schematische Darstellung des verwendeten Messprinzips des LIBS-Messgeräts bei der Valtest AG. b) Foto eines erzeugten Plasmas auf einer Betonoberfläche. c) Typischen Messspektrum eines Betons im Wellenlängenbereich von 276 nm zu 322 nm.

LIBS kann u.a. bei den folgenden Fragestellungen angewendet werden:

- Nachweis der Chlorverteilung und des -gehalts in der Bindemittelmatrix
- Nachweis der Karbonatisierungsfront und -verteilung im Beton
- Ermittlung von bauschädlichen Salzen z.B. Sulfatgehalt und -verteilung bei biogener Schwefelsäurekorrosion
- Bestimmung des Eintrags von Alkalien (Alkaliengehalt) in den Beton bei AAR-Untersuchungen
- Visualisierung von Transport- und Umverteilungsvorgängen innerhalb des Betons
- Kennwertermittlung (scheinbarer Chloriddiffusionskoeffizient) bei semiprobabilistischen Dauerhaftigkeitsbemessungen (Ermittlung von Restnutzungsdauern oder Bemessung von Schichtdicken für Betonersatz bei Chloridbeaufschlagung)
- Identifizierung von Zusatzstoffen, wie z.B. Silikastaub im Festbeton
- Nachweis von Zusatzmitteln, wie z.B. Beschleuniger im Spritzbeton
- Bestimmung von Schadstoffen oder Kontaminationen im Beton
- Messung der Eindringtiefe des Wirkstoffs bei Hydrophobierungen
- Nachweis von spezifischen Elementen bei belastetem Strahlenschutzbeton

Das LIBS-Verfahren bietet dabei folgende Vorteile:

- Die Probe wird zweidimensional abgescannt und die Elementverteilung orts aufgelöst dargestellt. Die Heterogenität des Betons wird bei der Ergebnisdarstellung berücksichtigt, da die Gesteinskörnung durch die Verwendung von bestimmten Algorithmen ausgeschlossen werden kann.
- Die Elementgehalte können quantifiziert dargestellt werden.
- Durch die simultane Detektion von unterschiedlichen Elementen können mehrere für eine mögliche Schädigung in Frage kommende Einflussgrößen gleichzeitig analysiert werden (Multi-Element-Analyse).
- Die Probenvorbereitung und -präparation ist einfach und schnell. Durch das automatisierte Messverfahren liegen die Resultate innert kürzester Zeit vor.

Mittels Auswertungen von Chloridprofilen aus LIBS-Messungen ist es nun möglich die erforderlichen Eingangparameter für eine semiprobabilistische Dauerhaftigkeitsbemessung zu bestimmen.

7. Anwendungen

Nachfolgend sollen einige konkrete Anwendungen von LIBS-Analysen bei Dauerhaftigkeitsbemessungen vorgestellt werden.

Die nachfolgenden Auswertungen beruhen auf durchgeführten LIBS-Untersuchungen an aus dem Bauwerk entnommenen Bohrkernen. Dabei ist zu beachten, dass dabei der C_{crit} jeweils angenommen und nicht mit dem unter Kapitel 5.2. beschriebenen Verfahren von Angst et al. bestimmt wurde.

7.1. Beispiel Parkdecke ohne Beschichtung

Bauwerksalter: 40 Jahre

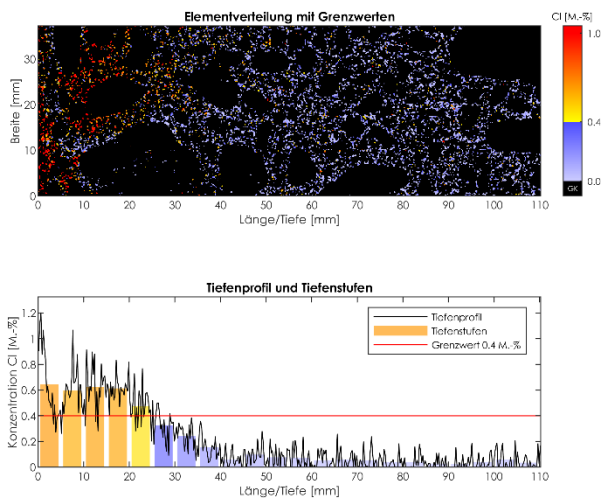


Abb. 7-1 oben: flächige Darstellung der Chlorverteilung mit Ausschluss der Gesteinskörnung unten: Chloridtiefenprofil mit dem Konvektionsbereich in einer Tiefe zwischen rund 5 bis 15 mm

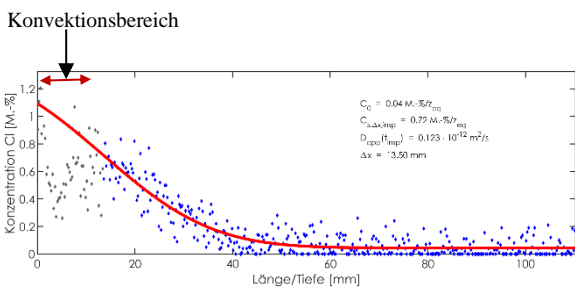


Abb. 7-2 Mittels Regressionsanalyse (Methode der kleinsten Fehlerquadrate) wurden die gefittete Kurve und daraus die Eingangsparameter für die Lebensdauerbemessung ermittelt:

- $C_0=0.04$ M-%/Z
- $C_{s,\Delta x,insp}=0.72$ M-%/Z
- $D_{app}(t_{insp})=0.123 \cdot 10^{-12}$ m²/s
- $\Delta x=13.50$ mm

7.2. Beispiel Parkdecke mit Hartbetonbelag (ca. 35 mm)

Bauwerksalter: 12 Jahre

Die ortsaufgelöste Darstellung der Chlorverteilung in Abb. 7-3 zeigt, dass der porösere Hartbetonbelag (Schichtstärke ca. 35 mm) die Chloride wie ein Schwamm aufgesogen hat.

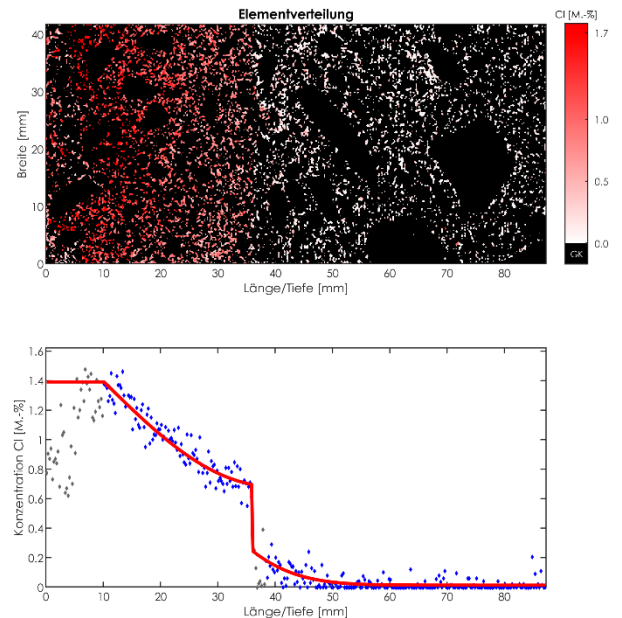


Abb. 7-3 oben: flächige Darstellung der Chlorverteilung mit Ausschluss der Gesteinskörnung unten: numerisch ermittelte Fittingkurve

Bei einem zweischichtigen System erfolgt die Bestimmung der gefitteten Kurve numerisch. Es wurden dabei folgende statistischen Parameter gewählt:

- Zuverlässigkeitsindex $\beta_0=1.5$
- Kritischer Chloridgehalt: 0.6 M-%/Z
- Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_a=1.2$ (Altersexponent)
- Mindestbewehrungsüberdeckung 5%-Quantil

Die Auswertung lieferte folgende Ergebnisse:

Prüfresultate

Bewehrungsbetonschicht		
Eigenchloridgehalt des Betons	C_0	0.01 [M-%/Z _{eq}]
Chloridgehalt an der Bauteiloberfläche	C_s	[M-%/Z _{eq}]
Scheinbarer Chloriddiffusionskoeffizient (t)	$D_{app}(t)$	0.214 [10^{-12} mm ² /s]
Scheinbarer Chloriddiffusionskoeffizient (t_0)	$D_{app}(t_0)$	1.543 [10^{-12} mm ² /s]
Tiefe des Übergangs	Δx	[mm]
Bewehrungsüberdeckung (5%-Quantil)	c	46 [mm]
Geschätzte Nutzungsdauer		
	t	24 [Jahre]
Geschätzte Restnutzungsdauer		
	t_{rest}	12 [Jahre]

7.3. Beispiel Parkhausdecke mit nachträglicher Schutzbeschichtung

Parkhaus mit Hartbetonbelag, Bauwerksalter 2 Jahre (siehe Beispiel in 7.2.)

In diesem Beispiel sind erste Überlegungen aufgezeigt, was geschieht, wenn auf eine chloridbelastete Betonoberfläche nachträglich ein wasser- und dampfdichtes Oberflächenschutzsystem aufgebracht wird. Kommt es zu einer Umverteilung der Chloride im Beton und in welcher Zeit? Die Abbildung 7-4 stellt den Ist-Zustand dar.

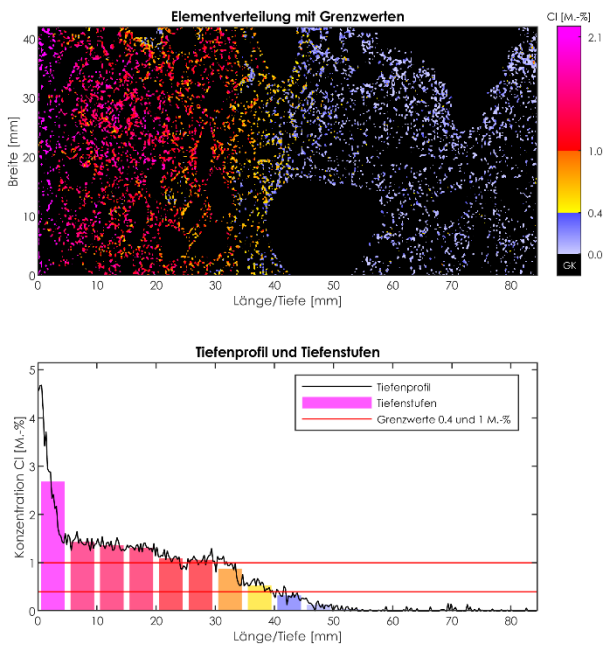


Abb. 7-4 Ist-Situation
oben: flächige Darstellung der Chlorverteilung mit Ausschluss der Gesteinskörnung
unten: Chloridtiefenprofil

Die folgende Abbildung 7-5 zeigt die Analyse der Chloridverteilung zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach der Applikation eines vollflächigen Oberflächenschutzsystems. Nachdem eine weitere Chloridzufuhr nicht mehr möglich ist, kommt es im Hartbeton mit der Zeit zu einem Konzentrationsausgleich. Gleichzeitig steigt im bewehrten Konstruktionsbeton der Chloridgehalt an, erreicht aber auch mit fortschreitendem Alter nicht einen vergleichbaren Wert wie im Hartbeton. Der C_{crit} auf Höhe der Bewehrung wird nach rund weiteren 25 Jahren (Restnutzungsdauer) erreicht.

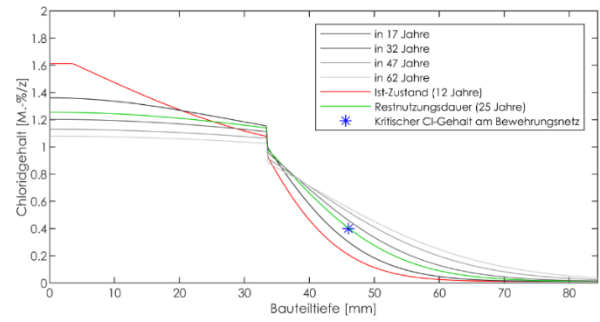


Abb. 7-5 Chloridumverteilung im Hartbeton und Konstruktionsbeton über die Zeit

8. Fazit

Mittels LIBS-Auswertungen erhält man eine, gegenüber nasschemisch ermittelten Chloridprofilen, präzisere Datengrundlagen für nachfolgende semiprobabilistische Dauerhaftigkeitsbemessungen. Wenn zusätzlich noch die effektiv vorhandene C_{crit} am Bauwerk bestimmt werden kann, sind relativ gute d.h. fundierte Aussagen hinsichtlich einer Restnutzungsdauer des Bauwerks möglich.

Dabei sind jedoch folgende Einschränkungen zu beachten:

- Die Auswertungen beruhen auf punktuell ermittelten Probenahmen am Bauwerk. Hierzu folgendes Zitat aus [3]: «Die Lage der Probestellen sowie der Ablauf der Probenahme sind vor grosser Bedeutung. Die Chloridproben müssen expositionsgerichtet und aus repräsentativen Stellen entnommen werden und keine Singularitäten z.B. Risse beinhalten. Eine nicht sachgerechte Probenahme und Festlegung von Probenahmestellen führt zu Ermittlung von Chloridgehalten, die zu fehlerhaften Bewertung des Bauteils sowie des Modells führen.»
- Die Aussagen beziehen sich auf ungestörte bzw. unbeschädigte Betonbauteile. So sind beispielsweise bei Rissen separate Betrachtungen erforderlich.
- Die Ergebnisse beziehen sich auf das Ende der Einleitungsphase bzw. den Beginn der Schädigungsphase. Wie und in welcher Zeitspanne der anschließende Korrosionsprozess abläuft, kann mit dem vorliegenden semiprobabilistischen Bemessungsmodell nicht vorhergesagt werden.

9. Literatur

- [1] DAfStb Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie Instandhaltung von Betonbauteilen, Gelbdruckentwurf (Stand: 2016-06-04)
- [2] DAfStb Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauteilen auf Bewehrungskorrosion - Teil 1: Systemparameter der Bewehrungskorrosion, Heft 601, 2012
- Teil 2: Rissbildung infolge Bewehrungskorrosion, Heft 602, 2012
- [3] Rahimi A.: Semiprobabilistisches Nachweiskonzept zur Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkung, DAfStb Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 2017, Heft 626
- [4] BAW Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe: Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC), BAW-Merkblatt Ausgabe 2017
- [5] Rahimi A.: Vereinfachtes Nachweiskonzept zur leistungsbezogenen Bemessung von Stahlbetonbauten hinsichtlich chloridinduzierter Betonstahlkorrosion, BAW Mitteilungen Nr. 100/2017
- [6] Rahimi A.; Gehlen Ch.: Semiprobabilistische Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkung Beton- und Stahlbetonbau 113(2018), Heft 1
- [7] Rahimi A., Gehlen Ch.: Leistungsbezogene Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung hinsichtlich chloridinduzierter Betonstahlkorrosion – Ermittlung der Restnutzungsdauer und Schichtdickenbemessung beim Betonersatz, 5. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken, 2017, Technische Akademie Esslingen
- [8] Breit W. et al: Zum Ansatz eines kritischen Chloridgehaltes bei Stahlbetonbauwerken, Beton- und Stahlbetonbau 106(2011), Heft 5
- [9] Kapteina, G.: Eindringen von Chlorid in Strassenbauwerke, 5. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken, 2017, Technische Akademie Esslingen
- [10] EN 206:2013 Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- [11] Angst U. et al: Methode zur Bestimmung des kritischen Chloridgehaltes an bestehenden Stahlbetonbauwerken, Forschungsauftrag AGB 2012/010 Bundesamt für Strassen, Bern
- [12] Weise F., Millar St., Wilsch G.: Analyse des Tausalzeintrags in Fahrbahndeckenbetone mit neuartiger Prüftechnik, Beton- und Stahlbeton 113(2018), Heft 9
- [13] Millar St. et al. Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) im Bauwesen – automatisierte Baustoffanalyse; Beton- und Stahlbetonbau 110(2015), Heft 8
- [14] Stark J., Wicht B.: Dauerhaftigkeit von Beton, SpringerVieweg, 2013
- [15] Müller M. et al: Frost-Tausalz-Angriff auf Beton, Beton- und Stahlbetonbau 114 (2019), Heft 6
- [16] Gartz B., Warkus J.: Tiefgaragen und andere Parkbauten, Fraunhofer IRB-Verlag
- [17] SIA 269/2:2011 Erhaltung von Tragwerken – Betonbau
- [18] Tuutti, K.: Corrosion of Steel in Concrete. CBI Research No. Fo 4:82, 1982