

Probabilistischer Ansatz zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von bestehenden Stahlbetonbauten

Michael H. Faber, Zürich

Christoph Gehlen, München

Inspektionsergebnisse sind immer mit geringen Unsicherheiten behaftet. Eine auf Inspektionsergebnissen basierende Instandhaltungsplanung muß diesen Umstand berücksichtigen. In diesem Beitrag wird erläutert, wie Inspektionen zweckmäßig einzusetzen und zu interpretieren sind, um die Entscheidung mit Blick auf präventiven Schutz oder korrigierendes Eingreifen treffen zu können.

Probabilistic Approaches in Assessment of Concrete Structures.

The present paper outlines the problem complex – design, assessment and maintenance of concrete structures subject to corrosion deterioration. New formulations allowing for the modelling of the spatial distributed deterioration are introduced and discussed. Finally the probabilistic modelling of the quality of inspections is addressed and it is illustrated how inspections may be utilized to identify a life cycle cost optimal balance between preventive and corrective maintenance.

1 Einführung

Carbonatisierungs- oder chloridinduzierte Korrosion von Betonstahlbewehrung ist häufig Ursache für Schäden an Stahlbetonbauten. Aufgrund dessen muß es heute mehr denn je Ziel sein, ungewollte Bauteilzustände, d. h. mangelnde Dauerhaftigkeit, durch geeignete Planung auf der einen Seite sowie geeignete Maßnahmen während der Herstellung und im Zuge der Instandhaltung auf der anderen Seite wirksam zu vermeiden.

Traditionell werden unsere Bauwerke nach deskriptiven Regeln entworfen, d. h. expositionsabhängige Anforderungen z. B. an den Mindestzementgehalt, den maximalen Wasserzementwert und die Mindestbetondeckung sind zu erfüllen. Sind diese erfüllt, geht man davon aus, daß das Stahlbetonbauwerk über eine ausreichende Dauerhaftigkeit (unbekannter Länge) gegenüber schädigenden Umwelteinwirkungen verfügt.

Diese Dauerhaftigkeitsbemessung ist historisch gewachsen und steht im krassen Gegensatz zur Tragwerksbemessung gegenüber statischer und dynamischer Beanspruchung, bei der Belastung und Bauteilwiderstand direkt miteinander verglichen werden können. Ein wesentlicher Nachteil der übrigens oft geänderten deskriptiven Vorschriftenpraxis ist, daß bei der „Bemessung“ gegenüber dauerhaftigkeitsrelevanten Einwirkungen für den planenden Ingenieur nicht ersichtlich ist, welche Bedeutung und Wertigkeit einzelne Kennwerte haben, die sich in den derzeitigen Vorschriften befinden.

Die weiterhin hohe Anzahl an Bauwerksschäden (Dauerhaftigkeitsprobleme) unterstreichen die dringende Not-

wendigkeit, einen nachvollziehbaren, wahrscheinlichkeitstheoretisch abgestützten Zusammenhang zwischen normativ fixierten Konstruktions- und Inspektionsregeln auf der einen Seite und bislang erarbeiteten gesicherten Forschungserkenntnissen auf der anderen Seite zum Zwecke einer neuen transparenten Konzeption mit Blick auf Bemessung, Zustandserfassung, Beurteilung und Instandsetzung von Stahlbetonbauwerken herzustellen.

2 Korrosion der Betonstahlbewehrung

Der Schädigungsprozeß von Betonbauteilen kann zutreffend in verschiedene Schädigungsphasen unterteilt werden (Bild 1). Die Schädigungsphasen sind mit unterschiedlichen Konsequenzen für das Bauteil verbunden und können durch Inspektionen differenziert werden. Bei der Betrachtung von korrosionsinduzierter Schädigung ist die erste Phase die Einleitungsphase, an deren Ende der im Betonquerschnitt außen liegende Bewehrungsstahl depassiviert wird und korrosionsbereit vorliegt. Die Depassivierung kann durch das Eindringen von Chloriden in den Beton, durch die Carbonatisierung des Betons oder durch eine Kombination beider Vorgänge hervorgerufen werden.

Der Erfolg einer Instandhaltungsmaßnahme hängt vom Wann und Wie ab.

Nach erfolgter Depassivierung des Betonstahls setzt sich in Abhängigkeit weiterer Einflußgrößen, z. B. Umgebungsfuchte, der Schädigungsprozeß fort. Korrosionsprodukte

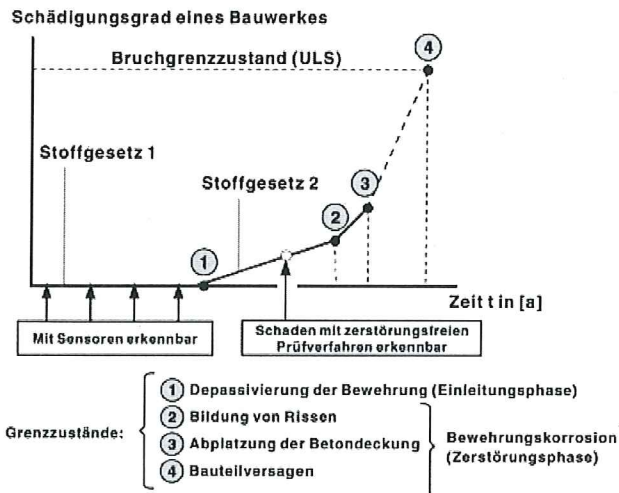


Bild 1 Schadensfortschrittmodellierung
Fig. 1 Global deterioration modelling

werden an der Oberfläche des Bewehrungsstahls gebildet. Dieser volumenfordernde Prozeß kann nach einiger Zeit zu schmalen Rissen (Haarrissen) in der Betondeckung führen. Im weiteren Verlauf können die Korrosionsprodukte durch die Risse wandern, wodurch Rostfahnen an der Bauteiloberfläche sichtbar werden. Sichtbare Korrosionsspuren sind ein starkes Indiz dafür, daß ein signifikanter Korrosionsfortschritt stattgefunden hat. In der Praxis ist deshalb das Ausmaß der sichtbaren Korrosionsspuren ein wichtiges Kriterium, wenn Entscheidungen bezüglich korrigierender Instandsetzungsmaßnahmen getroffen werden.

Ein weiteres Wachstum von Korrosionsprodukten an der Bewehrung kann schließlich zu einem Abplatzen der Betondeckung führen, wodurch die Bewehrung den Umwelteinwirkungen noch direkter ausgesetzt ist. Dies wiederum kann den Zerstörungfortschritt weiter beschleunigen. Letztendlich kann der Schädigungsprozeß an der Bewehrung solange fortschreiten, bis die Tragfähigkeit des Bauteils erschöpft ist (Bruchgrenzzustand). Die mit fortlaufender Schädigung des Bauwerks verbundenen nachteiligen Konsequenzen müssen durch Zustandskontrollen im Zusammenhang mit Instandhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen in akzeptablen Grenzen gehalten werden.

Die Kosten/Nutzen-Effizienz jeder Instandhaltungs- und/oder Instandsetzungsmaßnahme hängt im wesentlichen davon ab, wann und wie diese durchgeführt wird. Wenn der Schädigungsprozeß in einem frühen Stadium erkannt wird, ist es möglich, mit maßhaltigen und dadurch kostengünstigen Instandhaltungsmaßnahmen das Risiko von großen und teuren Reparaturen in der Zukunft zu reduzieren.

Für den Großteil der betonstahlbewehrten Betonbauwerke werden vor Erreichen eines Bruchzustandes entsprechende Warnzeichen in Form von Rostfahnen, Rissen und Betonabplatzungen sichtbar. Diese Anzeichen sind meistens schon aus ästhetischen Gesichtspunkten, d. h. zeitlich weit vor dem Erreichen eines Bruchgrenzzustandes, nicht akzeptabel. Zusammen mit zerstörungsfreien und/oder -armen Prüf- bzw. Inspektionstechniken bilden diese Indikatoren die Informationsbasis zur Zustandsbeschreibung des Bauteils.

Die Beobachtungen in der Gesamtheit werden dann zur Entscheidungsfindung von Instandhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen herangezogen.

Bei Betonbauteilen, bei denen die kritischen Bereiche, an denen zuerst eine Schädigung zu erwarten ist, bekannt sind (z. B. Bauteile mit konzentrierter Beanspruchung, Bauteilbereiche mit geringerer Betondeckung als Nachbarbereiche, die gleicher Beanspruchung ausgesetzt sind), kann das Auftreten von sichtbaren Schäden ein Kriterium zur Ausführung von präventiven Instandhaltungs- bzw. Schutzmaßnahmen sein. Vergleichbares gilt für Stahlbetonbauteile, bei denen zu erwarten ist, daß die Schäden zufällig verteilt auftreten werden. Dort sind dann im Prinzip alle Bereiche gleich kritisch. Ein Kriterium zur Ausführung von präventiven Maßnahmen kann nach einer Gegenüberstellung von „Depassivierungstiefe“ und „Betondeckung“ abgeleitet werden. Entscheidungen über ggf. erforderliche Instandhaltungsmaßnahmen könnten z. B. mit Hilfe einer Potentialfeldmessung unterstützt werden. Entscheidungskriterium kann hier beispielsweise ein über einen bestimmten Oberflächenanteil hinausgehend ermitteltes Korrosionsrisiko für die Betonstahlbewehrung sein.

3 Entscheidungsprobleme

3.1 Allgemeine Vorgehensweise

Die folgenden grundlegenden Prinzipien der Bayesschen Statistik, beschrieben in [1], können zur Optimierung des aus der Existenz des Bauwerks erwachsenden Nutzens unter Berücksichtigung der Lebensdauer (erwarteter Gesamtnutzen unter Einbezug der Instandhaltungs- und Instandsetzungsproblematik) $E[B_T]$ angewendet werden,

$$E[B_T] = E[I_S] - E[C_C] - E[C_I] - E[C_R] - E[C_F] - E[C_D] \quad (1)$$

wobei $E[I_S]$, $E[C_C]$, $E[C_I]$, $E[C_R]$, $E[C_F]$ und $E[C_D]$ der zu erwartende Ertrag, die Planungs- und Ausführungskosten, die Instandhaltungs- und die Instandsetzungskosten, die Kosten, die bei einem Versagen des Bauwerks entstehen, und die entsprechenden Stilllegungs- bzw. Rückbaukosten sind. Die Erwartungswerte für diese Parameter werden durch die Multiplikation der Wahrscheinlichkeit, daß ein ertrags- bzw. kostenverursachender Vorfall eintritt, mit den damit verbundenen Erträgen/Kosten bestimmt. In der Praxis können in Abhängigkeit der vorherrschenden Randbedingungen auch andere Ziele relevant werden. So ist z. B. der Etat für Instandhaltungs- und Instandsetzungskosten oft begrenzt, wodurch das Zuweisen von Geldern zur Optimierungsaufgabe wird.

Der erwartete Gesamtnutzen eines Bauwerks wird durch die Wahl der Ausführung und die gewählte Inspektions- und Instandhaltungsstrategie maximiert. Daher haben die folgenden Variablen einen entscheidenden Einfluß:

- Bauteilgeometrie,
- Wahl des Materials,
- Betondeckung,
- passive und aktive Korrosionsschutzmaßnahmen,
- Inspektionsmethoden,

- Schadensindikatoren,
- Inspektionsintervalle,
- inspizierter Bauteilbereich und Prozentsatz der inspizierten Fläche bezogen auf das Gesamtbauteil,
- Instandsetzungskriterien,
- Instandsetzungsmethoden.

Aus gesamtwirtschaftlichen Erwägungen ist es notwendig, daß nicht nur die Planung und Ausführung, sondern auch die Instandhaltung und damit im weitesten Sinne der Betrieb des Bauwerks optimiert werden. In Abhängigkeit der Verantwortlichkeiten, welche die Investoren/Eigentümer/Betreiber/Nutzer des Bauwerks oft jeweils getrennt voneinander tragen, ist eine gesamtwirtschaftliche Betrachtung jedoch äußerst selten.

Um den Betrieb eines Bauwerks zu optimieren, müssen die zu erwartenden Instandhaltungs- und Instandsetzungskosten $E[C_R]$ und die Kosten $E[C_F]$, die bei einem Bauwerksversagen entstehen nicht nur vor dem Hintergrund der physikalischen Eigenschaften und der Unsicherheiten, die den Schädigungsprozeß beeinflussen, beurteilt werden, sondern auch vor dem Hintergrund politischer und strategischer Überlegungen, die die Instandhaltung und Instandsetzung betreffen. Um diese Aspekte detaillierter zu berücksichtigen, ist in Bild 2 ein Betonbauteil durch eine aus mehreren individuellen Elementen zusammengesetzte Struktur dargestellt. Jedes Element der in Bild 2 dargestellten Diskretisierung stellt einen Bereich dar, in dem Korrosion auftreten kann. Die Wahrscheinlichkeit, daß die Schädigung der Struktur zu einem gegebenen Zeitpunkt einen Zustand erreicht hat, der eine Instandsetzung notwendig macht, ist von verschiedenen zeitlich und örtlich streuenden Einflußgrößen abhängig.

Bedingt durch inhomogene äußere Einwirkungen und/oder durch Streuungen innerhalb der strukturellen Detaillierung wird sich in einigen Fällen die Schädigung auf kleine Bereiche (Elemente) konzentrieren. Diese Bereiche werden als „hot spots“ bezeichnet. In anderen Fällen, in denen die äußeren Einwirkungen homogen sind, kann die Wahrscheinlichkeit von auftretender Schädigung als gleich hoch für alle Elemente vorausgesetzt werden. In solch einem Fall sind im Prinzip alle Elemente gleich kritisch.

Für Bauteile, bei denen angenommen werden kann, daß nur eine begrenzte Anzahl solcher „hot spots“ existiert, kann die Inspektionsplanung diese individuellen Gegebenheiten berücksichtigen. Auf diesen Aspekt wird im weiteren eingegangen. Bei Bauteilen, die im Prinzip ausschließlich aus „hot spots“ bestehen, ist es jedoch notwendig, die Instandsetzungsmaßnahmen in Verbindung mit einem Schadensausmaß zu definieren. Dies wirft die Frage nach dem Ausmaß der zu inspizierenden Fläche auf.

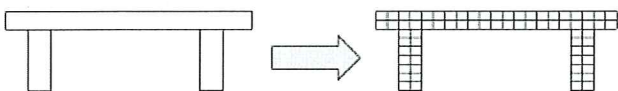


Bild 2 Diskretisierung einer Betonstruktur (Brücke) durch zusammengesetzte Elemente
Fig. 2 Discretisation of a concrete structure (bridge) by an ensemble of elements

Im weiteren wird die Problematik der Inspektions- und Instandhaltungsplanung für örtlich begrenzte und zufällig verteilte Schadensbereiche dargestellt.

3.2 Inspektion und Instandhaltungsplanung – örtlich begrenzt auftretende Bewehrungskorrosion

Für Betonbauwerke, bei denen eine kritische Schädigung örtlich begrenzt auftritt, wird die Planung der Inspektions- und Instandhaltungsaktivitäten auf Basis der Auswertung vom zu erwartenden Nutzen über die Lebensdauer durchgeführt (vgl. Gl. (1)). Unter Berücksichtigung des nachfolgend in Bild 3 dargestellten Entscheidungsbaums kann diese Inspektions- und Instandhaltungsplanung optimiert werden.

Bei lokaler Schädigung kann die Instandhaltung auf Basis des Nutzens über die Lebensdauer geplant werden.

Im Bild 3 nimmt CV Bezug auf Ereignisse, die sich auf sichtbare Korrosionsspuren zur Zeit der Inspektion beziehen, wohingegen CI sich auf Ereignisse bezieht, die im Zusammenhang mit der Korrosionsinitiierung stehen. I_D bezieht sich auf Ereignisse, bei welchen die initiierte Korrosion bei der Inspektion erkannt wurde. \overline{CV} , \overline{CI} und $\overline{I_D}$ beziehen sich jeweils auf das Komplementäreignis. Das Verzweigen des Ereignisbaums findet zwischen den ausgeführten Inspektionen statt.

Der in Bild 3 skizzierte Ereignisbaum stellt eine mögliche Struktur von Ereignis- und Entscheidungsszenarien dar, wie sie zum Zwecke der Planung von Inspektionen und Instandhaltungsplanungen zusammengefügt werden können. Es wird hierbei angenommen, daß eine visuelle Inspektion in regelmäßigen Intervallen erfolgt, d. h. zu den Zeitpunkten, die mit t_V gekennzeichnet sind. Wenn über die Lebensdauer des Bauwerks eine sichtbare Schwächung festgestellt wird, zieht dies eine größere korrigierende Reparaturmaßnahme R_1 nach sich. Zerstörungsfreie Inspektionsmethoden bieten häufiger die Entscheidungshilfe, den richtigen Zeitpunkt für präventive Instandhaltungsmaßnahmen zu identifizieren. Präventivmaßnahmen sind im Vergleich zu korrigierenden Maßnahmen häufig von geringerem Kostenumfang: R_2 . Im

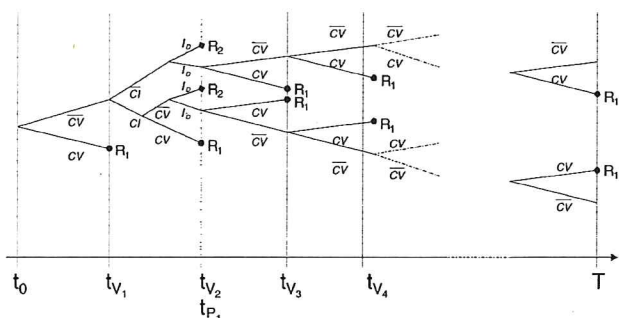


Bild 3 Entscheidungs-/Ereignisbaum für Inspektions- und Instandhaltungsplanung für Betonbauwerke, welche örtlich begrenzte Schäden aufweisen
Fig. 3 Illustration of an event/decision tree for inspection and maintenance planning of concrete structures subject to localised deterioration

dargestellten Ereignisbaum wurde der Einfachheit halber angenommen, daß die Verzweigungen, welche zu Interventionen (Präventivmaßnahmen, korrigierende Maßnahmen) führen, im weiteren Verlauf keine Kosten mehr verursachen. Diese Annahme setzt eine perfekte Reparaturmaßnahme voraus, was in der Praxis häufig nicht der Fall ist. Um die Dauerhaftigkeit von Reparaturmaßnahmen realistischer zu modellieren, ist es notwendig, Daten und Erfahrungen diesbezüglich zu sammeln und auszuwerten.

Unter der Voraussetzung, daß für die Einleitungs- und die Schädigungsphase Vorhersagemodelle auf probabilistischer Basis verfügbar sind, sowie der Grenzzustand für das Ereignis eines sichtbaren/detektierbaren Schadens zeitabhängig formuliert werden kann, können die unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten einer Reparatur über Bauteilzuverlässigkeiten mit Standardwerkzeugen wie FORM/SORM und/oder anderen Simulationen, vgl. Madsen et al. [2], berechnet werden. Um dem Umstand Rechnung zu tragen, daß die zerstörungsfreien Inspektionsmethoden i. d. R. nur Indizien über den wahren Bauwerkszustand liefern bzw. deren Aussagegenauigkeit bestimmten Grenzen unterworfen ist, muß diese zusätzliche Unsicherheit im Ereignisbaum an entsprechender Stelle berücksichtigt werden (siehe Abschn. 5).

3.3 Inspektion und Instandhaltungsplanung – Zufällig verteilt auftretende Bewehrungskorrosion

Ist die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines zu erwartenden Schadens an jedem Ort des Bauteils gleich, so spielt die räumliche Verteilung des fortschreitenden Schädigungsprozesses eine wichtige Rolle. Dieser Umstand sollte beachtet werden, wenn die stochastischen Parameter der wesentlich auf den Schädigungsprozeß Einfluß nehmenden Basisvariablen bestimmt werden. Die von Hergenröder [3] z. B. an der Carbonatisierungsproblematik demonstrierten Untersuchungen zur räumlichen Verteilung solcher Basisvariablen (hier die Basisvariable Carbonatisierungstiefe) weisen darauf hin, daß solche Komponenten typische Abmessungen von rd. 2 m × 2 m haben.

Es ist jedoch zu erwarten, daß dieses Resultat signifikant vom betrachteten Bauteiltyp, der Planung und der Ausführung abhängt. Aus diesem Grund sind weitere Untersuchungen dringend notwendig.

Um die Wahrscheinlichkeit zu bestimmen, daß ein gegebener Anteil des Bauteils einen kritischen Grad der Schädigung erreicht hat, ist es im Prinzip notwendig, den folgenden Ausdruck auszuwerten:

$$P(d(t) \geq n/N) = P \left(\bigcup_{i=1}^{K_{N,n}} \left\{ \bigcap_{j=1}^{m_i} \{g_j(X, t) \leq 0\} \bigcap_{k=m_i}^N \{g_k(X, t) > 0\} \right\} \right), \quad (2)$$

wobei $d(t)$ der Anteil des Bauteils ist, der visuell erkennbare Schädigungen zum Zeitpunkt t aufweist. Der Kleinbuchstabe n steht für die Anzahl von Elementen des Bauteils, die den kritischen Zerstörungsanteil aufweisen. N ist die Anzahl aller Elemente, aus denen sich das Bauteil zusammensetzt.

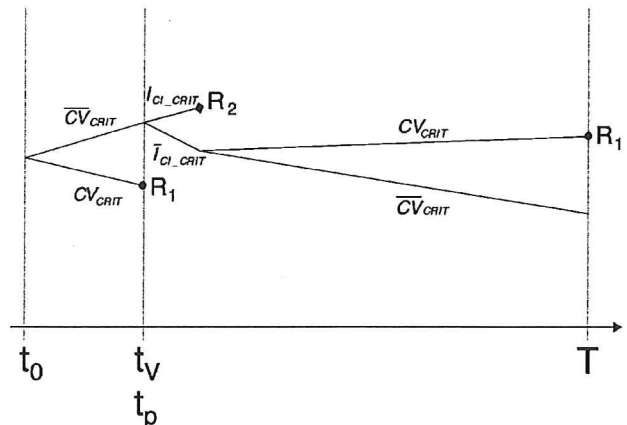


Bild 4 Darstellung eines Ereignisbaums zur Inspektions- und Instandhaltungsplanung für Betonbauwerke, welche zufällig verteilt auftretende Schäden aufweisen

Fig. 4 Illustration of an event tree for inspection and maintenance planning of concrete structures subject to distributed deterioration

$K_{N,n}$ ist die Anzahl der verschiedenen Kombinationen von Elementen, welche den kritischen Schädigungsanteil oder mehr aufweisen. Die Variable m_i steht für die Anzahl von Elementen, welche in der i -ten Kombination vorkommen. Schließlich ist $g_j(X, t)$ die Grenzzustandsgleichung, welche den kritischen Schädigungszustand des j -ten Elements beschreibt. Die beschreibende Statistik zur Quantifizierung der einzelnen Variablen aus Gl. (2) sollte sich folgerichtig nicht nur auf die Beschreibung einer einzelnen Komponente beschränken, sondern auch die Streuung von Element zu Element berücksichtigen.

Die Entscheidungsproblematik kann gleichartig behandelt werden wie im Fall der örtlich begrenzten Schäden, d. h., es gilt zu identifizieren, wann zum ersten Mal zerstörungsfreie Untersuchungen (zFP) zum Zeitpunkt t_p am Bauwerk im Rahmen von Inspektionen durchgeführt werden sollten und wie groß der dabei zu untersuchende Flächenanteil ζ_{INSP} sein sollte. Im Fall, daß während einer visuellen Inspektion das kritische Schadensausmaß an der Bauteiloberfläche X_{CRIT} überschritten wurde (entspricht Ereignis CV_{CRIT} in Bild 4), zieht dies eine größere korrigierende Reparaturmaßnahme R_1 nach sich, vgl. [4]. Wenn eine Inspektion mittels zFP auf ein Schadensausmaß hinweist, das über dem kritischen Flächenanteil ψ_{CRIT} liegt, wird eine Reparaturmaßnahme mit geringfügigem Umfang R_2 ausgeführt. Dies entspricht Ereignis I_{CL_CRIT} in Bild 4. Es wird davon ausgegangen, daß der Parameter X_{CRIT} , der das kritische Schadensausmaß an der Bauteiloberfläche beschreibt, vom Eigentümer/Betreiber festgelegt wird. Die Entscheidungsvariablen reduzieren sich daher auf die Kenngrößen t_p , ζ_{INSP} und ψ_{CRIT} .

4 Modellbildung zur Beschreibung der zeitabhängigen Schädigungsmechanismen

4.1 Allgemeine Modellbildung

Initiiert von Prof. Rüschi wurden an der TU München bereits Ende der 1950er Jahre umfangreiche Versuchsreihen zum Studium der Dauerhaftigkeit von Betonkonstruktionen ins-

besondere im Hinblick auf den Korrosionsschutz der Bewehrung begonnen. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihen haben zur Modellierung des Carbonatisierungsfortschritts sowie der Korrosionsvorgänge im Bereich von Rissen geführt.

Auf europäischer Ebene hat sich das CEB Ende der 1970er Jahre mit der Bildung der Task Group Durability dem Thema Dauerhaftigkeit von Betonkonstruktionen gewidmet. Im Bulletin d'Information N° 148 mit dem Titel „Durability of Concrete Structures, State-of-the-Art Report“ [5] wurde 1982 ein umfassender Sachstandsbericht vorgestellt, der den Stand der Erkenntnisse zu allen Dauerhaftigkeitsaspekten zusammenfassend darstellt. In der zweiten Arbeitsperiode innerhalb des CEB wurde ein Bemessungsleitfaden zur Dauerhaftigkeit erarbeitet – CEB Bulletin N° 182 „Design Guide for Durable Concrete Structures“ [6] – in dem in kurzer zusammenfassender Form u. a. die Schädigungsmechanismen (Schadensfortschrittmodelle) dargestellt werden.

4.2 Modelle auf probabilistischer Basis („Punkt im Raum“ Modelle)

Ein erster Ansatz für eine Modellierung auf probabilistischer Basis wurde ebenfalls im CEB erarbeitet. Die Task Group 5.1 der CEB Commission 5 Durability hat das Ergebnis 1997 im CEB Bulletin N° 238 zusammengestellt und veröffentlicht [7].

Die vollprobabilistische Bemessungsmethode wird bereits erfolgreich angewandt.

Aufbauend auf diesem Ansatz wurden im Fünften Rahmenprogramm der EU im Rahmen des Projektes DuraCrete für die verschiedensten Schädigungsmechanismen Modelle identifiziert, die nach statischer Quantifizierung der darin enthaltenen Variablen für Bemessungs- und Beurteilungszwecke verwendet werden können [8], [9]. Dieses neue Konzept ermöglicht die Bemessung und Beurteilung von bewehrten Betonstrukturen über eine definierte Lebensdauer. Das Lebensdauernachweiskonzept setzt sich im wesentlichen aus drei Grundbausteinen zusammen:

- weitgehend abgesicherte Stoffgesetze,
- nachvollziehbar quantifizierte Bauteilbeanspruchungen und
- ein Sicherheitskonzept auf probabilistischer Grundlage.

Hinzu kommt ferner, daß Bauteilwiderstände über Materialprüfung nachgewiesen werden müssen.

Eine erste praktische Anwendung der vollprobabilistischen Bemessungsmethode erfolgte bei dem Großprojekt Tunnel Westerschelde in den Niederlanden. Die Bemessung bezog sich auf die Bewehrungskorrosion auf der Außenseite und der Innenseite der Tunnelkonstruktion unter Einbeziehung möglicher Leckagen in den Fugen für eine Lebensdauer von 100 Jahren [10], [11]. Mit der Hochzoller Lechbrücke in Augsburg [11] und dem Olympiaturm München

[12] wurden auch schon bestehende Bauwerke auf Grundlage dieser Modellierung beurteilt. In [11] sind wesentliche Modelle hinreichend erläutert.

4.3 Depassivierung von Bewehrungsstahl – räumliche Betrachtungen

Der Großteil bisheriger Modellierungsarbeiten auf dem Gebiet der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken hat sich darauf konzentriert, Vorhersagemodelle für einen bestimmten Punkt („hot spot“) im Raum zu formulieren. Eine der ersten Arbeiten, die auf dem Gebiet der räumlichen Modellierung (Ausbreitung) von Schädigungsprozessen erschien, ist die Arbeit von *Hergenröder* [3]. Die von [3] mit Blick auf die Carbonatisierungsproblematik an rd. zehn Jahre alten Betonprismen erzielten Ergebnisse zeigen, daß die Carbonatisierungstiefe von Beton räumlichen Fluktuationen unterworfen ist: einem langwelligen Trägerprozeß und einem kurzwelligen Störprozeß. Der langwellige Trägerprozeß in der Größenordnung $L = 1-2$ m (z. B. der Verdichtungsvorgang, der örtlich möglicherweise in unterschiedlicher Intensität durchgeführt wird) wird ausführungstechnischen Einflußgrößen zugeordnet, der kurzwellige Störprozeß (Wellenlänge in Größenordnung der Zuschlaggröße) ist zufällig.

Jüngste Arbeiten wurden von *Sterrit et al.* [13] und *Faber und Sørensen* [14] veröffentlicht. Die Grundidee dieser Modellierung basiert auf der Aufteilung des Gesamtbauwerks in viele kleine Einzelelemente (finite Oberflächenbereiche). Die Ansammlung der Elemente, die nun für einen größeren Oberflächenbereich stehen, sollte sich hinsichtlich der am Schädigungsprozeß beteiligten Haupteinflußgrößen homogen verhalten. Die finite Netzgröße sollte sich an der Vorgabe orientieren, daß sich die einzelnen grenzzustandsbasierten Versagenswahrscheinlichkeiten von Element zu Element weitgehend unabhängig, d. h. zufällig, ergeben.

Beim Mechanismus der chloridinduzierten Bewehrungskorrosion ist die Einleitungsphase, d. h. das Eindringen von Chloriden, ein meist diffusionskontrollierter Vorgang. Nach *Engelund* und *Sørensen* [15] ist die mit zunehmender Auslagerungsdauer zunehmende Korrosionsgefahr für den Bewehrungsstahl am stärksten von den Zufallsvariablen Betondeckung, Chloriddiffusionskoeffizient, Chloridoberflächenkonzentration und kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt in Höhe der Bewehrungslage abhängig.

Die aus kleinen Untersuchungsbereichen mit Hilfe von Chloridprofilen berechneten Chloriddiffusionskoeffizienten (z. B. an einer finiten Bauteiloberfläche, vgl. hierzu Bild 5) sind i. d. R. mit geringeren Streuungen behaftet als die Koeffizienten, die ausgedehntere Bauteiloberflächen repräsentieren. Dieser Effekt kann dem langwelligen, auf ausführungstechnische Einflußgrößen zurückgehenden Trägerprozeß zugeordnet werden. Jeder im langwelligen Abstand ermittelte Diffusionskoeffizient entstammt daher einer unabhängigen Einzelproduktion.

Ein Modell, in dem nicht nur der Diffusionskoeffizient, sondern auch die Oberflächenkonzentration für jedes Element durch identisch verteilte aber bedingt unabhängig verteilte Zufallsvariablen mit unsicherem Mittelwert aber

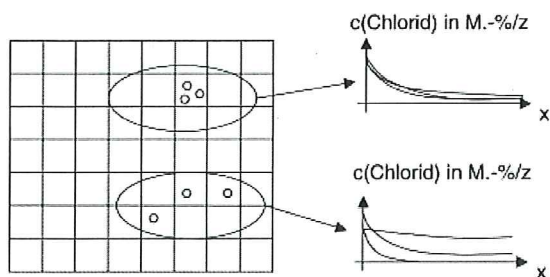


Bild 5 Modellierung der räumlichen Streuung von Chloridprofilen mit Hilfe einer diskretisierten Bauteiloberfläche
Fig. 5 Modelling of spatial variability by finite element discretisation and sampled chloride profiles

bekanntem Variationskoeffizienten modelliert ist, trägt dem oben beschriebenen Phänomen Rechnung [14]. Der unsichere Mittelwert, der für jede Elementenklasse durch eine allgemeine Zufallsvariable modelliert ist, schließt den langen Wellenteil in die räumliche Variabilität der Parameter ein und kann statistisch durch eine Streuungsanalyse der Chloridprofilgruppen, die jeweils aus verschiedenen Bauteilbereichen und -elementen stammen, abgeschätzt werden.

Probabilistische Modelle für die Beschreibung der Betondeckung stehen vor dem Hintergrund folgender Überlegungen: vom Standpunkt der Diskretisierung mit finiten Elementen aus gesehen ist klar, daß die für die Schädigung der Einzelemente kritische Stärke der Betondeckung nicht ein zufälliges Maß im Raum (eines Elementes), auch nicht der Mittelwert der Betondeckung innerhalb eines Elements, sondern die kleinste gemessene Betondeckung eines Elementes ist. Im Gegensatz zu üblicherweise angewandten Verteilungen zur Beschreibung dieser Variablen sind Extremwertverteilungen zweckmäßig, z. B. Beta-, Weibull- oder Neville-Verteilungen.

Bild 6 zeigt eine Verteilungsfunktion, die in Abhängigkeit der Auslagerungsdauer für ein Bauteil anzeigt, welcher Prozentsatz des Bauteils zum Zeitpunkt t korrosionsbereit vorliegt (depassiviert wurde). Zum Vergleich ist auch die zeitabhängige Verteilung für einen willkürlich gewählten Punkt im Bauteil angegeben. Bild 6 zeigt deutlich den

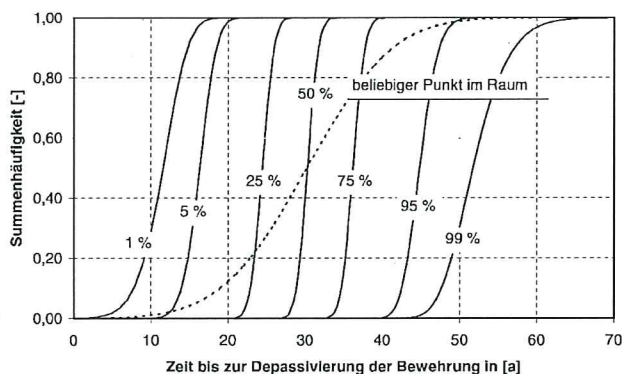


Bild 6 Verteilungsfunktionen für Depassivierungswahrscheinlichkeiten, diskretisierte und globale Betrachtung
Fig. 6 Probability distribution functions of the time till a given percentage of a concrete structure is subject to initiated corrosion

Unterschied zwischen der Charakterisierung der Schädigung infolge lokaler Schädigung bzw. flächigem Schadensangriff.

D. h., eine Inspektions- und Instandhaltungsplanung hat auch die Erkenntnisse, die sich in Zusammenhang mit einer Inspektion (zusammengetragene Daten und berechnete Versagenswahrscheinlichkeiten) ergeben, zu berücksichtigen. In [14] werden mögliche Modelle vorgestellt.

5 Probabilistische Behandlung von Inspektionsinformationen

Die Information über den Schädigungszustand des Bauteils ist auch Grundlage für die Entscheidungsfindung in Hinsicht auf die Wahl und Ausführung schützender und korrigierender Instandhaltungsmaßnahmen. Liegt diese Information infolge Inspektion vor, wird sie räumlich richtig interpretiert (modelliert) und sind die dazugehörigen Aussageunsicherheiten bekannt, basiert die Entscheidungsfindung über Notwendigkeit und Umfang von Instandhaltungsmaßnahmen auf einer nachvollziehbaren Grundlage.

Die Aussageunsicherheit einer Inspektionsmethode muß bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden.

Die Qualität der angewandten Inspektionsmethode wird zweckmäßigerweise durch die Wahrscheinlichkeit ausgedrückt, daß die Inspektionsmethode die vorliegende Schädigung auch als Schädigung erkennt, z. B. $P(I_D|D)$. Zusätzlich benötigt man die Wahrscheinlichkeit von Falschbefunden, d. h. die Irrtumswahrscheinlichkeit, daß die Inspektionsmethode trotz vorliegender Schädigung anzeigt, daß keine Schädigung vorliegt: $P(I_{\bar{D}}|\bar{D})$.

Als Inspektionsmethoden kommen beispielsweise einfache visuelle Inspektionen, zerstörungsfreie Untersuchungen, z. B. die Potentialfeldmessung oder irgendeine andere Messung in Frage, die Informationen über den Zustand des Bauteils (z. B. mit Blick auf eine eventuelle Korrosionsproblematik) liefern können.

Ergebnisse von Potentialfeldmessungen können in guter Näherung mit einer Normalverteilung beschrieben werden. Bei Messungen von Marshall [16], die an mehreren Betonplatten durchgeführt wurden, an denen Bewehrungskorrosion bereits eingesetzt hatte, liegen der Mittelwert und die Standardabweichung der gemessenen Potentiale bei rund $E_{CSE, m} = -0,35$ V bzw. $E_{CSE, s} = 0,1$ V. Mittelwert und Standardabweichungen bei vorausgesetzt nicht korrosionsbelasteten Bauteilen liegen bei rund $E_{CSE, m} = -0,20$ V bzw. $E_{CSE, s} = 0,1$ V.

Eine zentrale Frage betrifft die Bewertung der Meßergebnisse und ihre Zuordnung zur Fragestellung: „Korrosion“ oder „keine Korrosion“. Bei willkürlicher Wahl eines Inspektionsergebnisses $E_{CSE, i} = 0,25$ V ergibt sich folgendes Bild: $P(I_{\bar{D}}|CI) = 0,10$, $P(I_{\bar{D}}|\bar{C}I) = 0,71$, wobei CI für den Fall „Korrosion zum Zeitpunkt der Messung“ und $\bar{C}I$ für den Fall „kein Indikator“ steht. Die Wahrscheinlichkeit, einen Indikator für „keine Korrosion“ bei trotzdem vorliegender

Korrosion zu erhalten, liegt bei 0,1 (Irrtumswahrscheinlichkeit), während die Wahrscheinlichkeit, richtigerweise dann einen Indikator „keine Korrosion“ zu erhalten, wenn auch keine Korrosion vorliegt, bei 0,71 liegt. Daraus folgt: $P(I_D|CI) = 0,90$, $P(I_D|\bar{CI}) = 0,29$ mit I_D für bereits initiierte Korrosion.

Tabelle 1 zeigt Untersuchungsergebnisse von Lentz [17], bei welchen der Potentialindikator für beginnende Korrosion bei schweizer und dänischen Brücken bestimmt wurde. U_{lim} ergibt sich aus der Randbedingung $P(I_D|CI) = 0,90$. Da die Potentialfeldmessung z. T. sehr stark von den jeweiligen Feuchtebedingungen am Bauteil abhängt, wurden z. B. Untersuchungen an den Brückenober- und Unterseiten getrennt voneinander ausgewertet (vgl. hierzu auch Bild 7).

Die Quantifizierung der Inspektionsqualität sollte künftig, wenn möglich, zur Beurteilung der Wahrscheinlichkeit, ob ein Bauteil zu einem bestimmten Zeitpunkt in einem bestimmten Zustand ist, mit herangezogen werden.

Werden bei einer Inspektion keine Indizien für bereits initiierte Bewehrungskorrosion festgestellt, so berechnet sich die Wahrscheinlichkeit q , daß dieses Bauteil zu einem späteren Zeitpunkt sichtbare Korrosionserscheinungen zeigen wird, wie folgt, vgl. hierzu auch Bild 8a:

$$q = P(CV|I_D) = \frac{P(CV \cap CI) \cdot P(I_D|CI)}{K_1} + \frac{P(CV \cap \bar{CI}) \cdot P(I_D|\bar{CI})}{K_1}$$

mit

$$K_1 = P(I_D|CI) \cdot [P(CI \cap CV) + P(CI \cap \bar{CV})] + P(I_D|\bar{CI}) \cdot [P(\bar{CI} \cap CV) + P(\bar{CI} \cap \bar{CV})]$$

Werden bei einer Inspektion Indizien für bereits initiierte Bewehrungskorrosion festgestellt, so berechnet sich die Wahrscheinlichkeit p , daß dieses Bauteil zu einem späteren Zeitpunkt sichtbare Korrosionserscheinungen zeigen wird, wie folgt:

$$p = P(CV|I_D) = \frac{P(CV \cap CI) \cdot P(I_D|CI)}{K_2} + \frac{P(CV \cap \bar{CI}) \cdot P(I_D|\bar{CI})}{K_2}$$

mit

$$K_2 = P(I_D|CI) \cdot [P(CI \cap CV) + P(CI \cap \bar{CV})] + P(I_D|\bar{CI}) \cdot [P(\bar{CI} \cap CV) + P(\bar{CI} \cap \bar{CV})]$$

Datenquelle	U_{lim}	$P(I_D \bar{CI})$
	mV (CSE)	[%]
1. Brückenuntersichten (Schweiz)	-238	1,3
2. Brückenoberseiten (Schweiz)	-259	18,1
3. Brückenpfeiler (Schweiz)	-193	33,1
4. Brückenpfeiler (Dänemark)	-201	29,0
Daten 1-4	-207	24,0

Tabelle 1 Potentialindikatoren für verschiedene Brückenbauteile

Table 1 Potential indicator values for different types of bridge structural components

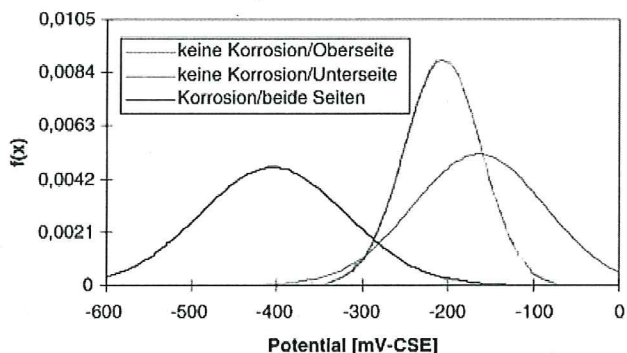
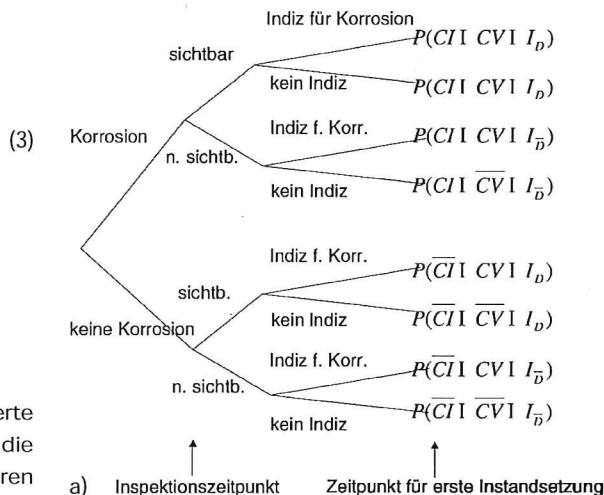
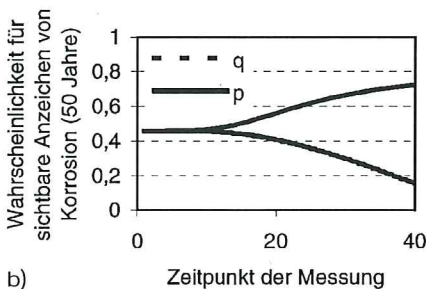


Bild 7 Dichtefunktionen von Potentialfeldbefunden, korrespondierend zu Bauteilzuständen „Korrosion“ und „keine Korrosion“

Fig. 7 Illustration of the conditional probability density functions for the measured potential conditional on corrosion and no corrosion. Upper side corresponds to dry conditions and lower sides to humid conditions



a) Inspektionszeitpunkt Zeitpunkt für erste Instandsetzung



b) Zeitliche Entwicklung der Wahrscheinlichkeiten q und p

Fig. 8 a) Event tree for observations and concrete conditions. b) Strength of the indicators p and q as function of the inspection time

Bild 8b, [14], zeigt die zeitliche Entwicklung der Wahrscheinlichkeiten q und p bezogen auf die Aussagegenauigkeit mit Blick auf ein vorherzusagendes Ereignis „Anzeichen von Korrosion sind nach 50-jähriger Bauteilauflagerung visuell zu erkennen“. Erst nach 20 bis 30 Jahren erreicht die Aussagegenauigkeit der Inspektionsmethode ein akzeptables Niveau.

6 Diskussion und Schlußfolgerungen

Betrachtungen von Stahlbetonbauten unter dem Aspekt der Dauerhaftigkeit sind immer mit Entscheidungsfragen verknüpft, die erwartete Aufwendungen beginnend mit Kosten für die Bemessung und Herstellung, zu erwartende Kosten für Inspektionen, Instandhaltung und bei Nutzungsänderungen ggf. Kosten für die nachträgliche Ertüchtigung bis hin zu Rückbaukosten einzubeziehen haben.

Dieser Beitrag konzentriert sich auf die probabilistische Schadensfortschrittmmodellierung von korrosionsgefährdeten Stahlbetonbauwerken mit besonderem Schwerpunkt auf die räumliche Variabilität des Schädigungsprozesses. Inspektionsmethoden und damit verknüpfte Bewertungen hinsichtlich Bauteilzustand und Instandsetzungsbedarf werden vorgestellt.

Für Bauwerke, für die die fortschreitende Schädigung mit ausreichender Genauigkeit mit dem „Punkt im Raum“ Modell modelliert werden kann, sind die erforderlichen Werkzeuge zur wirklichkeitsnahen/zutreffenden Zustandserfassung, -bewertung gegeben. Beides sind fundamentale Voraussetzungen für eine effiziente Instandhaltungsplanung.

Um auf diesem Wege weiter voranschreiten zu können, sind weitere Aspekte zu bearbeiten:

1. die Vereinheitlichung (Normung) probabilistischer Modelle für die punktuelle und räumliche Vorhersage individueller Schädigungsprozesse (Korrosionsproblematik, Frostproblematik, ...),
2. Formulierung probabilistischer Modelle zur Quantifizierung der Aussagegenauigkeit von (zerstörungsfreien) Inspektionsmethoden.

Zur Vereinheitlichung der Modelle (Aspekt 1) wird derzeit von der aus dem CEB und der FIP im Jahre 1998 hervorgegangenen *fédération internationale du béton (fib)* in Zusammenarbeit mit dem *Joint Committee on Structural Safety (JCSS)* ein „Model Code of Service Life Design, fib MC SLD“ erarbeitet, in dem die probabilistische Dauerhaftigkeitsbemessung einschließlich notwendiger Modellierungsarbeit in ein Normformat gebracht wird. Das Ergebnis dieser Arbeit wird in den neuen *fib Model Code* einfließen, der im Jahre 2005 erscheinen soll. Weiterhin ist geplant, nach Vorliegen des „Model Code of Service Life Design“ diesen in eine ISO-Norm, die im Rahmen des ISO TC 71 geplant ist, einzubringen.

Für Konstruktionen, bei denen die räumliche Verteilung des Schädigungsprozesses von Bedeutung ist, sind Betrachtungen der räumlichen Ausbreitung/Verteilung von Schäden unerlässlich. Auf Grundlage des gegenwärtigen Wissensstandes und auf Grundlage der momentan verfügbaren

Modelle ist es mit Einschränkungen möglich, zu erwartende Reparaturkosten auch unter Einbezug von räumlichen Streuungen abzuschätzen.

Die gegenwärtige Situation für den oben angesprochenen Aspekt 2 ist weniger positiv. In diesen Bereich wurde bislang zu wenig Forschungsarbeit gesteckt. Der Anspruch, industriell akzeptierte Standards für Inspektionsqualität bereits in naher Zukunft erreichen zu können, ist unrealistisch. Hier besteht dringender Forschungsbedarf.

Dank

Teile der hier vorgestellten Arbeit wurden von der *Swiss National Science Foundation (SNF)* finanziell unterstützt.

Literatur

- [1] Benjamin, J. R. und Cornell, C. A.: Probability, statistics and decision for civil engineers. McGraw-Hill, NY. (1970).
- [2] Madsen, H. O., Krenk, S. und Lind, N. C.: Methods of Structural Safety. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ 07632, (1986).
- [3] Hergenröder, M.: Zur statistischen Instandhaltungsplanung für bestehende Bauwerke bei Karbonatisierung des Betons und möglicher Korrosion der Bewehrung. Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau, TU München, 4/92, 1992.
- [4] Englund, S., Sørensen, J. D. und Sørensen, B.: Evaluation of repair and maintenance strategies for concrete coastal bridges on a probabilistic basis. *ACI Materials Journal*, (1998).
- [5] Comité Euro-International du Béton (CEB): Durability of Concrete Structures. State-of-the-Art, 1982. Paris: Comité Euro-International du Béton (CEB). In: *Bulletin d'Information* (1982), N° 148.
- [6] Comité Euro-International du Béton (CEB): Durable Concrete Structures. CEB Design Guide, Second Edition, 1989. Lausanne: Comité Euro-International du Béton. – In: *Bulletin d'Information* (1989), N° 182.
- [7] Comité Euro-International du Béton (CEB): New Approach to Durability Design: An Example for Carbonation Induced Corrosion. Lausanne: Comité Euro-International du Béton. – In: *Bulletin d'Information* (1997), N° 238.
- [8] The European Union – Brite EuRam III: Statistical Quantification of the Variables in the Limit State Functions. DuraCrete: Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures. Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, Document BE95-1347/R9, January 2000.
- [9] The European Union – Brite EuRam III: DuraCrete, Final Technical Report. DuraCrete: Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures. Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, Document BE95-1347/R17, May 2000.

- [10] *Gehlen, Ch. und Schießl, P.*: Probability-Based Durability Design for the Western Scheldt Tunnel. In: Structural Concrete Journal of the fib P1 (1999), N° 2, pp. 1–7.
- [11] *Gehlen, Ch.*: Lebensdauerbemessung – Zuverlässigkeitsberechnungen zur wirksamen Vermeidung von verschiedenartig induzierter Bewehrungskorrosion. Beton- und Stahlbetonbau 96 (2001) Heft 7, S. 478–487, 2001.
- [12] *Schießl, P. und Gehlen, Ch.*: Carbonatisierung des Betons – Von der Modellierung zur Dauerhaftigkeitsbemessung. In: Bauingenieur Sonderpublikation: Massivbau 2002, Forschung, Entwicklungen und Anwendungen, 6. Münchner Massivbauseminar 2002 (11./12.04.2002). Hrsg.: *Konrad Zilch*, TU München, Springer VDI-Verlag, ISBN 3-935065-05-1.
- [13] *Sterrit, G., Chrystantopoulos, M. K. and Shetty, N.*: Reliability Based Inspection Planning for RC Highway Bridges, IABSE, International Conference Safety, Risk, Reliability – Trends in Engineering, St. Julians, Malta, 21–23 March, 2001.
- [14] *Faber, M. H. und Sørensen, J. D.*: Bayesian Sampling using Condition Indicators. In: Proc. to the ICOSAR, July 2001, Newport Beach, California.
- [15] *Engelund, S. und Sørensen, J. D.*: A probabilistic Model for Chloride-Ingress and Initiation of Corrosion in Reinforced Concrete Structures, Journal of Structural Safety, 1997.
- [16] *Marschall, S. J.*: Evaluation of Instrument-Based, Non-Destructive Inspection Methods for Bridges. M.Sc.-Thesis, University of Colorado, Boulder, Colorado, 1996.
- [17] *Lentz, A.*: Potentialmessungen zur Unterhaltungsplanung bei Stahlbetonbauten. M.Sc.-Thesis, Institute of Structural Engineering, Swiss Federal Institute of Technology, 2001.

Schlüsselwörter:

Carbonatisierung – Chloride – Bewehrungskorrosion – Modellbildung – Inspektion – Wahrscheinlichkeitstheorie – örtliche Fluktuation



Prof. Dr. Michael H. Faber
ETH Höggerberg
Institut für Baustatik und Konstruktion
HIL E 32.3
8093 Zürich

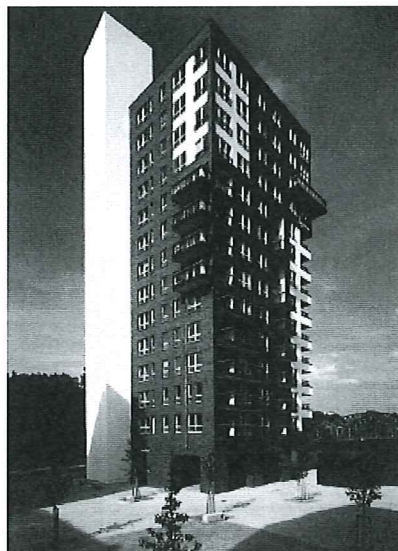


Dr.-Ing. Christoph Gehlen
Ingenieurbüro Prof. Schießl
Wotanstraße 70
80639 München

Attraktiver Wohnturm in Berlin-Spandau

Auf dem ehemaligen Schultheiss-Gelände in Berlin-Spandau entstand ein städtebauliches Ensemble, das aufgrund seiner unmittelbaren Lage am Spandauer See als „Wasserstadt“ bezeichnet wird. Ein Gebäude dieses Ensembles ist der 13 Stockwerke hohe Seeturm des Architekturbüros Reichen & Robert.

Neben der Verwendung von Klinkern in dieser Bauhöhe zeichnet den Seeturm die versetzte und dadurch asymmetrisch wirkende Staffelung vorspringender und zurückliegender Balkone aus, die wie die Klinker dem Gebäude Individualität verleihen.



Der Seeturm mit seinen 13 Stockwerken unmittelbar am Spandauer See
(Photo: Klinkerwerke Hagemeister, Nottuln)