

Projekt D der DFG-Forschergruppe 537: Modellierung des Schadensfortschritts bei Bewehrungskorrosion und Entwicklung von Dauerhaftigkeitsbemessungsmodellen für Stahlbetonbauteile

Wissenschaftlicher Kurzbericht Nr. 28 (2011)

Dipl.-Ing. Kai Osterminski, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Peter Schießl

AG 3, Stahl und Korrosion

1 Einleitung

Die zentrale Aufgabe von Projekt D der DFG-Forschergruppe 537 „Modellierung des Schadensfortschritts bei Korrosion von Stahl in Beton und Bemessung von Stahlbetonbauteilen auf Dauerhaftigkeit“ war das physikalisch korrekt und komplexe Schädigungsmodell in ein anwendungsfreundliches Ingenieurmodell zu transformieren. Hierfür wurden die in den Teilprojekten A1, A2 und A3 gemessenen Systemparameter zunächst statistisch quantifiziert und im Anschluss auf Korrelationen untereinander untersucht. Darauf folgend wurden die quantifizierten Systemparameter im Schädigungsmodell eingesetzt und auf Grundlage umfangreicher Parameterstudien auf Ihre Dominanz für das Ergebnis des Modells hin untersucht. Das gleiche Vorgehen wurde für die Sensitivität des Modells im Hinblick auf die Streuungen der Systemparameter gewählt. Aus allen Ergebnissen ließ sich abschließend beurteilen, welche Systemparameter für eine weitere Betrachtung im Ingenieurmodell mitzuführen sind und welche vernachlässigbar waren. Die übriggebliebenen Eingangsgrößen des vereinfachten Ingenieurmodells wurden quantifiziert. Gemäß den Vorgaben des JCSS Probabilistic Model Codes für probabilistische Bemessungsmodelle wurde das Ingenieurmodell selbst abschließend auf Sensitivität und Dominanz hin untersucht, um die entscheidenden Eingangsgrößen für das Modell zu identifizieren. Die statistischen Untersuchungen wurden mit dem Programmpaket Struel (Comrel V.8.1, Sysrel V.9.6 und Statrel V.3.1) durchgeführt.

2 Analyse des Schädigungsmodells

Der Ausgangspunkt für die Entwicklung des vereinfachten Ingenieurmodells, welches die Bemessung von Stahlbetonbauteilen auf Bewehrungskorrosion ermöglicht, ist das Schädigungsmodell der Gleichung 1. Dieses komplexe Schädigungsmodell setzt sich aus mehreren Systemparametern zusammen, deren Größenordnung selbst von unterschiedlichen Einflüssen (Beton-

zusammensetzung, Expositionsbedingungen und Zeit) abhängt. Daher wurden umfangreiche Untersuchungen in der DFG-FOR 537 durchgeführt, die eine statistische Analyse dieser Einflüsse auf die Systemparameter und schließlich deren Bedeutung für die Modellaussage erlauben.

$$I_{\text{corr}} = \frac{E_{0,C} - E_{0,A}}{\frac{r_{P,A}}{A_A} + \frac{r_{P,C}}{A_C} + k_e \cdot \rho_e} + I_{\text{corr,self}} \quad (1)$$

I_{corr} :	Gesamter Korrosionsstrom	[A]
$E_{0,C}$:	Ruhepotential Kathode	[V _{NHE}]
$E_{0,A}$:	Ruhepotential Anode	[V _{NHE}]
$r_{P,C}$:	Spez. Polarisationswid. Kathode	[Ωm ²]
$r_{P,A}$:	Spez. Polarisationswid. Anode	[Ωm ²]
A_A, A_C :	Fläche Anode; Kathode	[m ²]
ρ_e :	Spez. Elektrolytwiderstand Beton	[Ωm]
k_e :	Geometrie konstante	[m ⁻¹]
$I_{\text{corr,self}}$:	Eigenkorrosionsstrom	[A]

Nach einer umfangreichen Quantifizierung der Ergebnisse aus Labor- und Auslagerungsversuchen wurden die Systemparameter auf Korrelationen hin untersucht. Im Anschluss daran wurde das Schädigungsmodell mit Hilfe der erlangten Erkenntnisse auf Dominanz und Sensitivität analysiert. Eine Dominanzanalyse ermöglicht die Beurteilung der Bedeutung eines jeden Systemparameters für die Größenordnung des modellierten Korrosionsstroms I_{corr} . Bei der Sensitivitätsanalyse werden die Systemparameter identifiziert, die einen maßgeblichen bzw. einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Streuung von I_{corr} besitzen. Eine abschließende Betrachtung von dominanten Mechanismen im Schädigungsmodell schloss dessen Analyse ab und ermöglichte das Herleiten eines vereinfachten Ingenieurmodells.

3 Ingenieurmodell der Bewehrungskorrosion

Das Ingenieurmodell für Bewehrungskorrosion ermöglicht die Modellierung des Masseverlusts von Stahl in Beton infolge chloridinduzierter Korrosion, Gleichung 2.

$$\dot{m}_{\text{corr}} = 9.134 \cdot \left[\frac{\Delta E}{1,25 \cdot (C + \rho_e) \cdot G} \right] \cdot f_{\text{self}} \quad (2)$$

\dot{m}_{corr} :	Gesamte Korrosionsabtragsrate	[g/Jahr]
ΔE :	Treibspannung	[V]
C:	Widerstand der Kathode	[Ωm]
ρ_e :	Spez. Elektrolytwiderstand Beton	[Ωm]
G:	Geometriefaktor	[m^{-1}]
f_{self} :	Faktor für Eigenkorrosion	[-]

In Gleichung 2 ist das Faraday'sche Gesetz der Elektrolyse eingearbeitet, das den Zusammenhang zwischen Massenumsatz und Ladungsmenge beschreibt. Der Abtrag am Stahl in [m] oder [μm] kann berechnet werden, wenn Gleichung 2 über die Zeit integriert wird. Zusätzlich werden die Fläche der Anode und die Dichte von Eisen eingesetzt, so dass die Abtragsrate nach Gleichung 3 ermittelt werden kann. Die Integration wird notwendig, da einzelne Eingangsparameter des Ingenieurmodells selbst zeitabhängig sind. Dazu gehören die Fläche der Anode und der spezifische Elektrolytwiderstand von Beton.

$$x_{\text{corr}} = \int_{t_{\text{ini}}}^t \left(\frac{\dot{m}_{\text{corr}}}{\rho_{\text{Fe}} \cdot A_A} \right) dt \quad (3)$$

x_{corr} :	Korrosionsabtragstiefe	[m]
ρ_{Fe} :	Dichte von Eisen	[g/m^3]
A_A :	Fläche der Anode	[m^2]

Das Ingenieurmodell berücksichtigt die maßgebenden Einflusskenngrößen auf die Eingangsparameter. Diese Einflüsse können über Faktoransätze kombiniert werden. Beispielhaft ist der Faktoransatz für den spezifischen Elektrolytwiderstand des Betons in Gleichung 4 dargestellt.

$$\rho_e(T, t) = \rho_{e,0} \cdot k_{e,t} \cdot k_{e,m} \cdot k_{e,C} \cdot k_{e,Cl} \cdot k_{e,T}(T) \cdot h_e(t) \quad (4)$$

$\rho_e(T, t)$:	Spez. Elektrolytwiderstand Beton	[Ωm]
$\rho_{e,0}$:	Referenzwert (t=28d)	[Ωm]
$k_{e,t}$:	Faktor Testmethode	[-]
$k_{e,m}$:	Faktor Feuchtigkeit	[-]
$k_{e,C}$:	Faktor Carbonatisierung	[-]

$k_{e,Cl}$:	Faktor Chloridgehalt	[-]
$k_{e,T}(T)$:	Faktor Temperatur	[-]
$h_e(t)$:	Faktor Hydratation	[-]

Durch die Untersuchungen der DFG-FOR 537 und die Quantifizierung der maßgebenden Einflüsse in Projekt D konnte eine Datenbank aufgebaut und zur Verfügung gestellt werden, die eine Bemessung von Stahlbetonbauteilen auf Dauerhaftigkeit hinsichtlich chloridinduzierter Bewehrungskorrosion ermöglicht. Durch Anwendung des Ingenieurmodells an instrumentierten Stahlbetonprobekörpern und Bauwerksuntersuchungen konnte das Modell validiert werden. Hierzu ist auf Kurzbericht Nummer 29 verwiesen.

4 Zusammenfassung

Das komplexe Schädigungsmodell für Bewehrungskorrosion konnte auf maßgebende Eingangsparameter reduziert werden. Die übriggebliebenen Eingangsparameter wurden in Abhängigkeit von signifikanten Einflüssen statistisch untersucht und für eine Bemessung quantifiziert. Die Datenbank der DFG-FOR 537 beschränkt sich auf chloridinduzierte Bewehrungskorrosion.

In Kombination mit den voll-probabilistischen Bemessungsmodellen der Einleitungsphase der Bewehrungskorrosion kann nun erstmals eine vollständige, voll-probabilistische Dauerhaftigkeitsbemessung durchgeführt werden.

Weitere Informationen zur DFG-Forschergruppe können <http://for537.cbm.bv.tum.de> entnommen werden.

5 Ausblick

Die Ergebnisse von Projekt D der DFG-FOR 537 wurden in weiterführenden Untersuchungen eingehender analysiert und auf die Anwendung auf carbonatisierungsinduzierte Bewehrungskorrosion hin untersucht /1/.

6 Danksagung

Die Autoren möchten der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Einrichtung der DFG-FOR 537 und die Förderung der selbiger danken.

7 Literatur

- /1/ Osterminski, K.: Durability Design of Reinforced concrete structures - Full-probabilistic modelling of reinforcement corrosion. Dissertation, TU München, 2011 (In Vorbereitung)