

Projekt A4 der DFG-Forschergruppe 537: Validierung und Kalibrierung der Schädigungsfortschrittsmodellierung

Wissenschaftlicher Kurzbericht Nr. 29 (2011)

Dipl.-Ing. Stefanie von Greve-Dierfeld, Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen

AG 3: Stahl und Korrosion

1 Einleitung

Im Rahmen der DFG-FOR 537 wurde ein probabilistisches Modell (Bemessungsmodell) zur Prognose des Korrosionsabtrags entwickelt (Kurzbericht Nr. 28).

Da jedoch jedes Modell eine vereinfachte Beschreibung der Realität darstellt, wurde im Rahmen dieser Arbeit das Modell validiert d. h. überprüft. Hierzu wurden u. a. Praxisbauteile untersucht und die modellgestützten Prognosen tatsächlich ermittelten, realen Bauwerkszuständen gegenübergestellt.

2 Untersuchte Praxisbauteile

Untersucht wurden insgesamt sieben Tiefgaragen und eine Mole. Das Alter der Bauwerke lag zwischen 5 und 41 Jahren. Die Bauwerksflächen wurden in Bauteile mit homogenen Belastungs- und Widerstandsgraden unterteilt z. B. in Wandfüße, Stützenfüße und horizontale Verkehrsflächen (= Bemessungssituationen). Die Bauteile wurden der jeweiligen Expositionsklasse und Umgebungsbedingung zugeordnet.

3 Korrosionsmodell und quantifizierte Modellparameter nach /1/

Die Prognose des Korrosionsabtrags wurde für die jeweilige Bemessungssituation mit dem nach /1/ entwickelten Modell durchgeführt.

$$X_{\text{corr}} = 11,63 \cdot 10^{-4} \cdot f_{\text{self}} \left[\frac{\Delta E}{1,25 \cdot A_{A,\text{tot}} \cdot k_A \cdot (C + \rho_e) \cdot G} \right] \cdot (t - t_{\text{ini}})$$

Für den überwiegenden Teil der hierin enthaltenen Modellparameter (Treibspannung ΔE , Geometrie konstante G , Kathodenfaktor C , Faktor zur Berücksichtigung der Eigenkorrosion f_{self} , spezifischer Elektrolytwiderstand ρ_e und Flächenfaktor k_A) wurden die maßgebenden Einflüsse identifiziert und statistisch quantifiziert. Die Kenngrößen wurden dann in Abhängigkeit der maßgebenden Einflüsse (z. B. Umgebungsbedingung, Expositions klasse und Betonzusammensetzung) zur Prognose des Korrosionsabtrags der Datenbank von /1/ entnommen.

4 Zu bestimmende Modellparameter

Demgegenüber mussten die sich zeitlich entwickelnde Anodenfläche $A_{A,\text{tot}}$ und der Korrosionsbeginn t_{ini} direkt am Objekt bestimmt werden. Die Bestimmung von Anodenfläche und Korrosionsbeginn erfolgte über die Modellierung der Einleitungsphase. In der Einleitungsphase dringen Chloride bis zur Bewehrung vor. Hat ein kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt die Bewehrung erreicht, liegt die Bewehrung depassiviert vor (Anodenfläche) und ein korrosionsbedingter Abtrag kann einsetzen (Korrosionsbeginn).

Der Korrosionsbeginn kann dabei über die folgende Gleichung berechnet werden.

$$t_{\text{ini}} = \frac{d_c}{4 \cdot D_{\text{Eff}}} \cdot \left[\text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{\text{crit}}}{C_s} \right) \right]^2$$

Zur objektbezogenen Prognose des Korrosionsbeginns wurden in Bauwerksuntersuchungen die Betondeckung d_c und Chloridprofile bestimmt. Chloridprofile geben sowohl Auskunft über die vor Ort vorhandene Chloridbelastung C_s als auch über den effektiven Diffusionskoeffizienten D_{Eff} . Zusammen mit dem kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt C_{crit} wurde der Korrosionsbeginn berechnet. Da die Modellkenngrößen innerhalb einer Bemessungssituation natürlichen Streuungen unterliegen, ist auch der Korrosionsbeginn eine streuende Größe (Zufallsvariable).

Die zeitliche Entwicklung der Anodenfläche erfolgt ebenfalls über die Modellierung der Einleitungsphase mit den vor Ort ermittelten Modellkenngrößen. Das Ergebnis ist dann ein dimensionsloser Anteil des depassivierten Flächenbereichs.

$$A_{A,\text{tot}}(t) = P_f(C_{\text{crit}} - C(d_c, t) < 0)$$

$A_{A,\text{tot}}(t)$: depassivierter Flächenbereich [-]

Aufgrund örtlicher Streuungen z. B. der Betondeckung innerhalb einer Bemessungssituation streut auch die zeitliche Entwicklung der Anodenfläche. Zur Ermittlung der Streuung innerhalb der Bemessungssituation wurden die Bauteile weiter

in Elemente unterteilt und z. B. an Bodenflächen die Betondeckung im Raster der Elemente aufgemessen. Mit der so ermittelten Betondeckung konnte der depassivierte Flächenanteil für jedes Element berechnet und die zeitliche Entwicklung der Anodenfläche ($A_{A,tot}(t)$) unter Ansatz der zugrundeliegenden Bewehrungsfläche getrennt für jede Bemessungssituation statistisch quantifiziert werden.

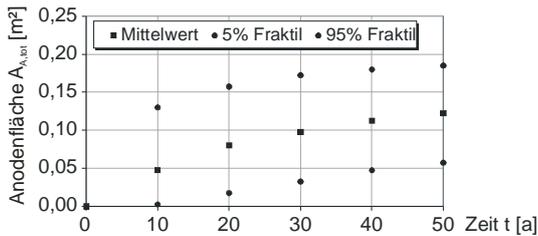


Abb.1: Zeitliche Entwicklung der Anodenfläche

5 Prognose des Korrosionsabtrags

Über das Korrosionsmodell, die in /1/ quantifizierten Modellkenngößen zusammen mit der zeitlichen Entwicklung der Anodenfläche und dem Korrosionsbeginn wurde für jede Bemessungssituation der Korrosionsverlauf prognostiziert.

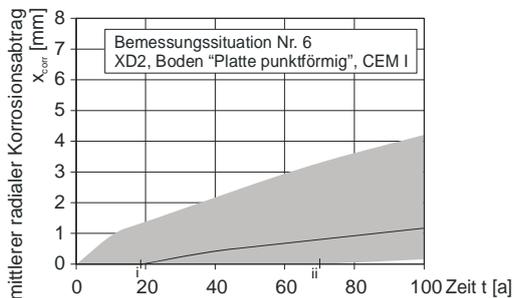


Abb.2: Zeitliche Entwicklung des Korrosionsabtrags

Da die maßgebend die örtliche Verteilung bestimmenden Kenngößen der Einleitungsphase vor Ort gemessen wurden, kann gefolgert werden, dass nach 19 Jahren 50 % der betrachteten Fläche korrodieren (i), nach rund 70 Jahren sind es 95 %. Insgesamt nehmen die korrodierenden Flächenbereiche ab dem Zeitpunkt der Chloridbelastung (0 Jahre) stetig zu. Da an manchen Flächen schon früher mit Korrosion zu rechnen ist, ist an diesen Flächen zum betrachteten Zeitpunkt mit einer längeren Korrosionsdauer zu rechnen. Folglich sind hier auch höhere Korrosionsabträge zu erwarten als an Flächenbereichen mit späterem Korrosionsbeginn.

Für die Prognose des Schädigungsfortschritts konnten keine Modellkenngößen direkt bestimmt werden. Deshalb kann angenommen werden, dass dieser, wie für ein Bemessungsmodell üb-

lich, für eine Vielzahl von ähnlich belasteten und zusammengesetzten Bauteilen Gültigkeit besitzt.

6 Gemessener Abtrag zum Zeitpunkt der Inspektion

In Sondierungen wurde der Querschnittsverlust abgeschätzt. Zur Ermittlung des höchsten Korrosionsabtrags wurden die Elemente mit den höchsten Korrosionswahrscheinlichkeiten sondiert. Innerhalb eines Elements wurde angenommen, dass der Korrosionsabtrag homogen verteilt ist, d. h. eine Sondierung die Information über das gesamte Element liefert.

7 Ergebnis: Validierung und Modellunsicherheit

Zur Validierung wurden die prognostizierten Abträge zum Inspektionszeitpunkt den maximalen, sondierten Abträgen gegenübergestellt.

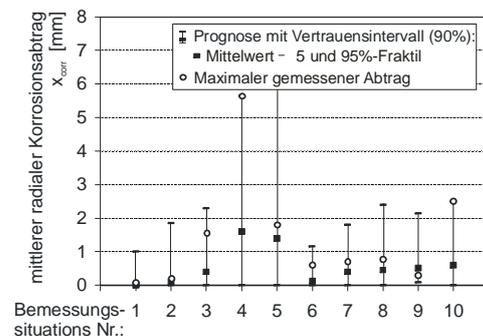


Abb. 3: Gegenüberstellung von prognostizierten und gemessenen Abträgen

Das Ziel der Validierung ist die Bestimmung der Modellunsicherheit. Ist eine Modellunsicherheit vorhanden, wird diese als zusätzlicher Faktor dem Modell beigelegt und erhöht die Gesamtunsicherheit. Voraussetzung zur Quantifizierung der Modellunsicherheit ist eine statistisch quantifizierbare, repräsentative Stichprobe des gemessenen Abtrags, die Untersuchung einer, die Bandbreite an möglichen Bemessungssituationen berücksichtigende Anzahl an Bauwerken bzw. Bauteilen und die Zuschärfung der Prognose auf das jeweilige Bauwerk bzw. Bauteil.

Zur Überprüfung, ob eine Modellunsicherheit Berücksichtigung finden muss, wurde für die betrachtete Bandbreite an Bemessungssituationen die externe Validität überprüft. Da alle gemessenen Abträge innerhalb des Vertrauensbereichs (95 % Fraktile) lagen, wurde die externe Validität des Bemessungsmodells für die untersuchten Bemessungssituationen als gegeben erachtet, so dass hier keine Modellunsicherheit berücksichtigt werden musste.