

Numerische Modellierung der Korrosion in Stahlbetonbauten

Anwendung der Boundary Element Methode

Doctoral Thesis

Author(s):

Brem, Martin

Publication date:

2004

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004756366>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

DISS. ETH Nr. 15567

Numerische Modellierung der Korrosion in Stahlbetonbauten

Anwendung der Boundary Element Methode

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels
DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

MARTIN BREM

Dipl. Bauingenieur ETH Zürich
geboren am 11. September 1975
von Zürich ZH und Rudolfstetten-Friedlisberg AG

Angenommen auf Antrag von
Prof. T. Vogel, Referent
Prof. em. Dr. H. Böhni, Korreferent (Leiter der Dissertation)
Dr. Y. Schiegg, Korreferent

2004

Zusammenfassung

Der Stromfluss in einem Makroelement, welcher bei der Korrosion von Bewehrungsstahl im Beton auftritt, wird durch die elektrochemischen Reaktionen an Anode und Kathode sowie dem Stofftransport im Beton gesteuert. Welche dieser Steuergrößen massgebend die Korrosionsgeschwindigkeit bestimmt, wird von zahlreichen Parametern wie Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Betonrezeptur, geometrische Anordnung der Bewehrung etc. bestimmt. Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, mittels numerischer Modellierung den Anteil der Steuergrößen für unterschiedliche Umgebungsbedingungen zu quantifizieren.

Als Eingabegrößen für die numerische Modellierung werden der spezifische Betonwiderstand und die anodischen und kathodischen Polarisationskurven verwendet. Die Eingabeparameter für die numerische Modellierung werden aus systematischen Untersuchungen an Laborprüfkörpern bestimmt. Die Prüfkörper werden bis zum Erreichen der Gewichtskonstanz verschiedenen relativen Luftfeuchten ausgesetzt und die Eingabegrößen bei Temperaturen von -10 °C bis 50 °C gemessen. Die Resultate zeigen, dass die anodische Polarisationskurve stark von der Betonfeuchtigkeit beeinflusst wird. Einen Einfluss der Betonfeuchtigkeit auf die kathodische Polarisationskurve kann nicht festgestellt werden. Die Zeitabhängigkeit der Polarisationskurven wird in der vorliegenden Arbeit nur beispielhaft untersucht. Die anodische Polarisationskurve ist stark zeitabhängig. Der spezifische Betonwiderstand wird von der relativen Luftfeuchtigkeit, der Temperatur und dem Chloridgehalt beeinflusst. Chloridhaltiger Beton weist einen viel tieferen spezifischen Betonwiderstand auf als chloridfreier Beton.

Ein Modell einer Stahlbetonplatte wird für die numerischen Simulationen verwendet. Es werden der Einfluss von Temperatur und Feuchtigkeit und der Einfluss der Geometrie untersucht. Die Resultate zeigen, dass der Makroelementstrom von der Temperatur und der Feuchtigkeit beeinflusst wird. Die Steuerung des Makroelementstromes wird durch den Ausbreitungswiderstand an der Anode bestimmt. Ein grosser Ausbreitungswiderstand führt zu einer ohm'schen oder einer gemischten Steuerung (an-

odisch und ohm'sch). Ein kleiner Ausbreitungswiderstand führt zu einer anodischen Steuerung des Makroelements. Die Anodenfläche hat einen starken Einfluss auf den Makroelementstrom. Der Makroelementstrom wird durch die Betonüberdeckung und den Bewehrungsabstand nicht beeinflusst. Der Makroelementstrom wird bei tiefem spezifischem Betonwiderstand anodisch oder gemischt gesteuert. Bei hohem spezifischem Betonwiderstand liegt eine ohm'sche Steuerung vor. Eine teilweise kathodische Steuerung des Makroelementstromes liegt nur bei einem Flächenverhältnis $F_K/F_A < 300$ vor. Die Berechnungen an einem Modell mit nichtrostendem Stahl als Kathode zeigen, dass der nichtrostende Stahl keinen Einfluss auf den Makroelementstrom hat, wenn $F_K \gg F_A$, was in einem realen Makroelement vorwiegend der Fall ist.

Das numerische Modell wird mit den Daten aus einem Feldversuch überprüft. In der Leitmauer einer Stahlbetonbrücke werden Makroelemente eingebaut. Die kontinuierlich gemessenen Daten werden mit der numerischen Simulation des Feldversuches verglichen. Es kann eine gute Übereinstimmung zwischen den numerischen und den experimentellen Resultaten gefunden werden.

Die Anwendung der numerischen Modellierung in der Forschung ist ein geeignetes Hilfsmittel, um effizient Parameterstudien durchzuführen. Die Berechnungen der vorliegenden Arbeit zeigen, dass mit einer detaillierten Modellierung des Anodenbereichs die wesentlichen Einflussgrößen erfasst werden. Deshalb kann auch bei grossen Bauteilen mit relativ einfachen Modellen der Makroelementstrom und die Steuerung abgeschätzt werden. Die detaillierte Modellierung von grösseren Bauteilen ist möglich. Der zeitliche Aufwand ist aber sehr gross und deshalb ist dies nur in Spezialfällen zu empfehlen. Die Bestimmung der Eingabegrößen ist entscheidend für eine gute Übereinstimmung von Experiment und Simulation. Mit einer Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit der Eingabegrößen kann die Übereinstimmung in Zukunft noch wesentlich verbessert werden.

Abstract

The current flow in a macro element which occurs during the corrosion of reinforcing steel in concrete is controlled by the electrochemical reactions at the anode and cathode as well as by the ionic flow in the concrete. The decisive controlling factor with regards to the rate of corrosion is determined by numerous parameters such as temperature, relative humidity, concrete mixture, geometrical arrangement of the reinforcement etc. The objective of the present thesis is to quantify the influence of the controlling factors for varying environmental conditions using numerical models.

Specific concrete resistance and the anodic and cathodic polarization curves were used as input parameters for numeric modeling. The input parameters for numeric modeling were determined in the laboratory from systematic investigations on mortar and concrete samples. The samples were exposed to varying relative humidity until they reached constant weight. The input parameters were measured over a temperature range of $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. The results show that the anodic polarization curve is strongly affected by the concrete humidity. An influence of concrete humidity upon the cathodic polarization curve cannot be established. The time dependence of the polarization curves is only examined exemplarily in the present thesis. The anodic polarization curve shows a strong time dependence. The specific concrete resistance is influenced by relative humidity, temperature and chloride content. Concrete with a high chloride content has a much lower specific resistance than a concrete with no chlorides.

A model of a reinforced concrete slab is used for the numerical simulations. The influences of temperature, humidity and geometry are investigated. The results show an influence of temperature and relative humidity upon the macro cell current. The control of the macro cell current is mainly determined by the spreading resistance of the anode. A high spreading resistance leads to ohmic or mixed (anodic and ohmic control) control. A small spreading resistance leads to an anodic control of the macro cell current. The anode area has a strong influence on the macro cell current. Macro cell current is not influenced by concrete cover depth or the spacing of steel reinforcement. For low specific concrete resistance, current

flow is controlled anodically or mixed. For high specific concrete resistance, an ohmic control of the macro cell occurs. Only at an area ratio of $A_C/A_A < 300$ is partial cathodic control of the macro cell current present. Simulations of a macro cell using stainless steel as cathode material show that stainless steel does not have an influence upon the macro cell current for $A_C \gg A_A$, which is the predominant case in a real macro cell.

The results from a field test are compared with the results of the numerical model. Macro cells were mounted in an edge beam of a reinforced concrete bridge. The continuously measured data were compared with the numeric simulations of the field test. A strong correlation between the numeric and the experimental results can be found.

Application of numerical modeling in research is a suitable tool for performing efficient parameter studies. The results of the present thesis show that with a detailed modeling of the anode region, the substantial influential parameters are won. Therefore the macro cell current and the controlling resistance can be determined even for large structural elements by means of relatively simple models. The numeric modeling of larger structural elements is possible. This is very time intensive, however, and is therefore recommended for special cases only. The determination of the input parameters is crucial for a good agreement between experiment and simulation. With a consideration of the time dependence of the input parameters, the agreement between experiment and simulation can be substantially improved in the future.