



**Transportvorgänge beim Eindringen von Chloriden in Normalbeton**  
Transport-mechanisms of chloride in concrete

Wang, S., Moersch, J., Brauer, N.

**1 EINLEITUNG**

Die Bewehrung im Betonbauteil wird i. d. R. durch eine stabile Passivschicht vor Korrosion geschützt. Diese Passivschicht wird bei Erreichen der kritischen Chloridkonzentration in der Porenlösung an der Stahloberfläche örtlich durchbrochen, was zur Bewehrungskorrosion führt. Für die Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen ist es entscheidend, wann die kritische Konzentration unter praxisnahen Voraussetzungen (Betonqualität, Umweltbedingungen) in Höhe der Bewehrungslage erreicht wird. Zur Berechnung des Chloridtransportes wurde deshalb im ibac ein Rechenmodell entwickelt.

**2 RECHENANSÄTZE**

**2.1 Transportmechanismen**

Zur Berechnung der zeitabhängigen Chloridverteilung im Beton müssen die maßgebenden Transport- und Speichermechanismen mathematisch dargestellt werden. Bei konstanten Feuchtigkeitsgehalten in einem Bauteil findet nur Chloriddiffusion zum Ausgleich von Konzentrationsunterschieden statt. Unabhängig von der Chloriddiffusion kann bei kapillarer Wasseraufnahme chloridhaltiges Wasser in den Porenraum des Betons eindringen. Der hierbei stattfindende Chloridtransport ist ein Strömungsprozeß, und wird in der Literatur häufig unter dem Begriff Huckepacktransport erwähnt.

Zur mathematischen Beschreibung von Transportvorgängen ist es neben der Betrachtung von Diffusions- und Huckepackmechanismen erforderlich, die Einbindung von Chlorid in den Zementstein und die Speicherung in der Porenlösung zu erfassen.

**2.2 Mathematischer Rechenansatz**

**2.2.1 Diffusion**

Nach dem 1. Fick'schen Gesetz verhält sich die Massenbewegung infolge Diffusion proportional zum Konzentrationsgradienten wie folgt:

$$\dot{M}_d = D_c \frac{dK_c}{dx} \quad (1)$$

$\dot{M}_d$ : Massenstromdichte infolge Diffusion

**2.2.2 Strömung**

Ein über die Tiefe im Beton unterschiedlicher Porenlösungsgehalt verursacht eine Feuchtebewegung z. B. infolge Kapillarzug. Die hierbei transportierte Chloridmenge ist zudem direkt proportional zur Chloridkonzentration in der Porenlösung, und kann gemäß Gleichung 2 berechnet werden.

$$\dot{M}_s = K_c \frac{\dot{W}}{\rho_w} \quad (2)$$

$\dot{M}_s$ : Massenstromdichte infolge Feuchtebewegung

$\dot{W}$ : Strömung der Porenlösung

$\rho_w$ : Dichte der Porenlösung (Wasser)

In [1] wurden die Mechanismen der Feuchtebewegung untersucht und zur Erfassung des Feuchtezustandes im überhygroskopischen Bereich der Hilfsparameter der äquivalenten relativen Luftfeuchte eingeführt. Mit diesem Hilfsparameter kann der Feuchtebewegung nach Gleichung (3) erfaßt werden:

$$-\frac{\partial W}{\partial rL'} \cdot \frac{\partial rL'}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( D_w \cdot K_w \frac{\partial rL'}{\partial x} \right) = 0 \quad (3)$$

$rL'$ : äquivalente relative Luftfeuchte

$D_w$ : scheinbarer Wasserdampfdiffusionskoeffizient

$K_w$ : Konzentration des gesättigten Wasserdampfs

**2.2.3 Überlagerter Chloridtransport**

Die mathematische Erfassung des aus beiden Transportvorgängen überlagerten Chloridtransportes ist der Gleichung 4 zu entnehmen. Zusätzlich ist zur Beschreibung der Bindungsgeschwindigkeit von Chlorid im Zementstein der Term:

$$\dot{S}_z = \frac{\partial S_z}{\partial t}$$



eingeführt worden.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ D_c \frac{\partial K_c}{\partial x} \right] + \frac{D_w K_w}{\rho_w} \frac{\partial rL'}{\partial x} \frac{\partial K_c}{\partial x} + K_c \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{D_w K_w}{\rho_w} \frac{\partial rL'}{\partial x} \right]$$

$$= \frac{\partial S_z}{\partial K_c} \frac{\partial K_c}{\partial t} + \dot{S}_z + \frac{W}{\rho_w} \frac{\partial K_c}{\partial t} + \frac{\partial W}{\rho_w \partial rL'} \frac{\partial rL'}{\partial t} K_c \quad (4)$$

### 3 BERECHNUNGSVERFAHREN

Zur Lösung der Differentialgleichung (5) sind die in /1/ beschriebenen Verfahren angewandt worden. Dabei erfolgt die räumliche Diskretisierung (FEM) nach dem Galerkin's-Verfahren und die zeitliche Diskretisierung nach dem Crank-Nicolson-Verfahren. Die aus diesen Diskretisierungen aufgebaute Systemgleichung wird durch Kombination des Gaußschen Algorithmus und des Newton-Raphson-Verfahrens iterativ gelöst.

### 4 BERECHNUNGSBEISPIEL

Die Berechnung wurde für eine 100 mm dicke Betonrandschicht unter Berücksichtigung der folgenden Rand- und Anfangsbedingungen durchgeführt.

Randbedingungen:

Zeitintervall [d]	0-90	90-180	180-270	270-360
Luftfeuchte	Wasser	60 %	Wasser	Wasser
Chloridkonzentration $K_c$ [g/l]	20	0	0	20

Anfangsbedingungen:  $rL = 65 \%$ ,  $K_c = 0$

Die hier gewählten Materialparameter gelten für einen Beton mit  $w/z = 0,5$  aus Portlandzement. In Bild 1 wird die Feuchteverteilung der äußersten Betonschicht dargestellt und in Bild 2 der zugehörige Gesamtchloridgehalt.

Die in den beiden Bildern dargestellten Ergebnisse zeigen, daß die Simulation des Cl-Transportes unter realen Umweltbedingungen mit dem entwickelten Rechenmodell möglich ist.

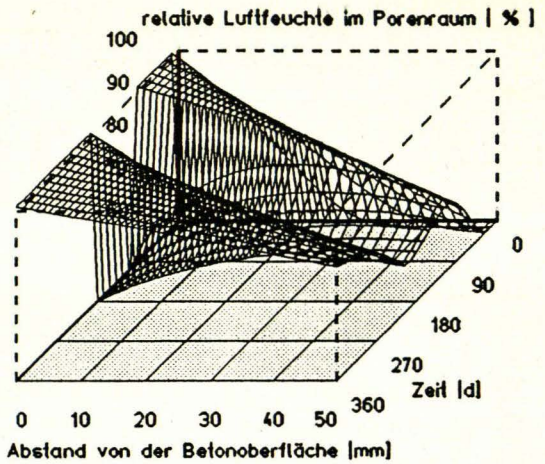


Bild 1: Feuchteverteilung über die Bauteiltiefe und Zeit

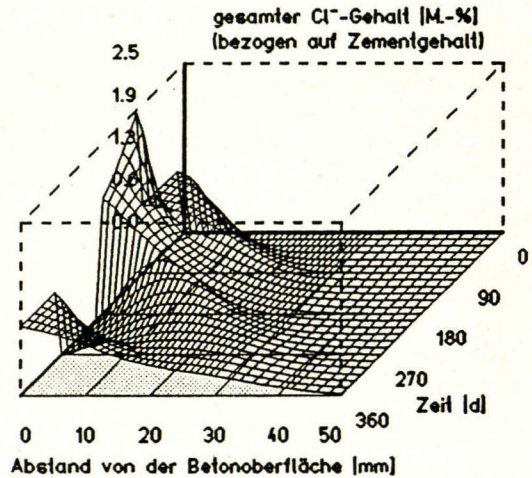


Bild 2: Gesamtchloridgehalt über die Bauteiltiefe und Zeit

### 5 LITERATUR

- /1/ Wang, S.: Berechnung des Karbonatisierungsfortschritts im Betonaußenbauteil. Dissertation an der RWTH-Aachen (1993)
- /2/ Schießl, P., Moersch, J., Wang, S., Brauer, N.: Transportvorgänge beim Eindringen von Chlorid in Normalbeton, Institut für Bauforschung der RWTH-Aachen, Abschlußbericht in Vorbereitung

Dieses Forschungsvorhaben wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert.



Herausgeber:

**Institut für Bauforschung Aachen**  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule

Postanschrift: 52056 Aachen  
Lieferanschrift: Schinkelstr. 3, 52062 Aachen  
Tel. (02 41) 80-5100, FAX (02 41) 80-5120  
Telex 8 32 704 thac d

**Direktoren:**  
Prof. Dr.-Ing. H. R. Sasse  
Prof. Dr.-Ing. P. Schießl