



Doctoral Thesis

## Modeling of humidity-transport in concrete

**Author(s):**

Moro, Fabrizio

**Publication Date:**

2003

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004518554> →

**Rights / License:**

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

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

*Diss. ETH No. 14984*

# *Modeling of Humidity-Transport in Concrete*

*A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
ZÜRICH*

*for the degree of  
Doctor of Technical Sciences*

*presented by*

*FABRIZIO MORO  
Dipl. Phys. ETH  
born on March 18, 1966  
Italy*

*accepted on the recommendation of*

*Prof. Dr. H. Böhni, examiner  
Prof. Dr. L. Gauckler, co-examiner  
Prof. Dr. P. Bühlmann, co-examiner*

2003

# Summary

One of the critical properties controlling the service life of concrete structures is the resistance that concrete has against the ingress of deleterious species such as chloride and sulfate ions. The ingress of deleterious species is closely coupled to humidity transport and the understanding of these processes is essential for predicting the service life of concrete or if more durable concrete is to be designed.

In developing and validating any modeling approach of transport in porous media, it is essential to have good experimental methods for measuring local water contents within porous materials, ideally, methods that are nondestructive, accurate and that have appropriate spatial resolution. Magnetic Resonance Imaging (MRI) is confirmed to be a promising means for this when applied to cement-based materials. Despite the improvements achieved in MRI-technology in the past few years, limitations in  $^1\text{H}$  MRI restricts its application to young porous samples made with white cements. Nevertheless, a uni-directional moving waterfront was detected supporting such a one-dimensional approach in sorptivity studies.

Depending on the conditions of exposure endured by a concrete structure, different transport processes are responsible for changes in local moisture content. Among these processes, desorption and capillary suction are often the most important with respect to the structure's durability and extensively studied in laboratory. Presently known models are evaluated and a new model for accumulated responses is developed, the *exponential* model, which can be applied to suction and desorption data. Compared to other commonly used models, it provides the best approximation to the data, can even be applied to samples with non-homogenous humidity distribution, and allows for a thorough classification of the transport behavior of the materials tested. The  $\sqrt{t}$ -law is often assumed to be a physically correct description of the suction behavior. According to recent literature, the assumptions that lead to the Poiseuille approximation and  $\sqrt{t}$ -law are proved invalid, the  $\sqrt{t}$ -law being physically inconsistent. The correct Poiseuille approximation of the Navier-Stokes equation corresponds to the exponential model proposed here, in so far as the time-dependence is also characterized by an exponential time-law.

Chloride induced corrosion of rebars is the main cause of damage to reinforced concrete bridge structures. Corrosion propagation is primarily influenced by the conductivity of the concrete, the degree of humidity saturation of the concrete, the temperature and the oxygen content in the pore solution, which in their turn depend on the concrete and the currently and laggedly locally effective ambient environment. A proper model for the estimation of the individual influences of the parameters of the microclimates near the concrete surface on the resistivities in the concrete cover of real structures has been developed. For a correct estimation of the model parameters, a mixed temperature model is essential. It has been found that the concrete resistance shows a strong simultaneous temperature dependence and a complex humidity dependence lagged over many days. The temperature dependence of the concrete resistance (b-value) is not affected by humidity changes over the measuring period (13 months). This finding contrasts with laboratory results obtained by exposing concrete samples to different constant humidities. The complex humidity dependence of the resistance is described by the humidity transfer functions. Both, strength and duration of such an effect and the thickness of cover concrete zone sensing environmental humidity changes depend on the material used and the ambient conditions effective at the specific exposer site.

Most properties of porous media are determined by the microstructure and porosity of a material. Mercury intrusion porosimetry (MIP) is a widely used method for studying porous materials, in particular, cement-based materials. The effect that sample size has on the MIP characteristics of concrete samples, like the ink-bottle effect and hysteresis, was studied by measuring additional extrusion and intrusion cycles. In order to characterize the extrusion and ink-bottle behavior, the amount of entrapped mercury  $\chi(p)$  was estimated. Superimposition of extrusion and second intrusion curves is achieved if the contact angle  $\theta$  is adjusted from  $\theta_i$ , the intrusion contact angle, to  $\theta_e$ , the extrusion contact angle. Assuming an intrusion contact angle of  $130^\circ$ , an extrusion contact angle of  $104^\circ$  is estimated for the concrete samples tested. The threshold radius is often assumed to be a dominant pore radius, yet in this study the entrapped mercury content shows no evidence for the presence of a dominant pore radius. Even if characteristic properties of cement-based materials can be estimated with MIP, comparison of results is rendered difficult by the significant effects of sample preparation techniques and sample size and the ink-bottle effect due to randomly present air voids.

# Zusammenfassung

Zwischen dem Eindringen von schadenverursachenden Stoffen und dem Feuchte-transport im Beton besteht ein enger Zusammenhang, so dass es von wesentlicher Bedeutung ist, beide Prozesse zu verstehen, soll die Lebensdauer von Betonbauwerken vorausgesagt oder ein Beton mit längerer Lebensdauer entworfen werden.

Um Modelle des Stofftransports in porösen Medien zu entwickeln und zu verifizieren, ist es wesentlich, lokale Feuchteverteilungen zu messen, idealerweise zerstörungsfrei und mit einer guten quantitativen und örtlichen Auflösung. Die Kernspinresonanz-Tomographie (*MRI*) ist eine vielversprechende Methode um Feuchteverteilungen in Zement-gebundenen Baustoffen zu messen. Trotz der während den letzten Jahren erzielten Vorschritte in der MRI-Technologie, bleibt der Einsatz von  $^1\text{H}$  MRI weiterhin auf junge Weisszement Proben beschränkt. Solche Messungen zeigen auf, dass bei Aufsaugversuchen eine eindringene Wasserfront sich bildet und somit eine eindimensionale Betrachtungsweise von Aufsaugversuchen gerechtfertigt ist.

Je nach Exposition eines Betonbauwerkes sind verschiedene Transportprozesse für die Veränderungen der Feuchteverteilung im Beton relevant. Desorption und kapillares Saugen sind dabei oft die wichtigsten Transportprozesse. Akzeptierte Modelle, die diese Prozesse beschreiben, werden überprüft und ein neues Modell wird vorgestellt, das solche akkumulierte Datenreihen beschreibt: das *Exponential Modell*. Dieses beschreibt die gemessenen Datenreihen am besten, setzt keine homogene Trocknung der Proben voraus und erlaubt eine weitreichende Klassifizierung der gemessenen Proben bezüglich ihres Feuchtehaushaltes. Meist wird angenommen, dass das  $\sqrt{t}$ -Gesetz die physikalisch korrekte Beschreibung des kapillaren Saugen sei. Gemäss neuerer Literatur erfüllt das  $\sqrt{t}$ -Gesetz die Voraussetzungen, die der Poiseuille-Approximation zugrunde liegen, nicht. Die korrekte Poiseuille-Approximation der Navier-Stokes Gleichung entspricht dem hier vorgestellten exponential Modell insofern, als die Zeitabhängigkeit bei beiden durch eine exponentielle Funktion der Zeit beschrieben wird.

Chlorid-induzierte Korrosion der Bewehrung ist die am häufigsten auftretende Schadensursache armierter Betonbauwerke. Der Korrosionsfortschritt wird dabei mehrheitlich durch die Leitfähigkeit des Betons, die Sättigung des Porenstruktur des Betons, die Temperatur und die Sauerstoffkonzentration in der Betonporenlösung bestimmt. Diese Messgrößen wiederum hängen von den Betoncharakteristiken und den aktuellen und in der Vergangenheit lokal wirksamen klimatischen Bedingungen ab. Mit Hilfe der Zeitreihentheorie wurde die Temperatur- und Feuchteabhängigkeit des Betonwiderstandes analysiert. Der Betonwiderstand weist eine instantane Temperatur-Abhängigkeit und eine komplexe Feuchteabhängigkeit auf, die bis zu vier Wochen verzögert wirksam ist. Für den betrachteten Zeitraum (13 Monate), wies die Temperatur-Abhängigkeit des Betonwiderstandes (b-Wert) keine Feuchte-Abhängigkeit auf. Die komplexe Feuchteabhängigkeit des Betonwiderstandes wird durch sogenannte Feuchte-Transferfunktionen beschrieben. Intensität und Dauer der Feuchteeinwirkung als auch die Tiefe bis zu der äussere klimatische Einwirkungen wahrgenommen werden (Transportzone) hängen einerseits von der Betonqualität und andererseits von den lokal wirksamen klimatischen Bedingungen ab.

Die meisten Eigenschaften poröser Stoffe werden durch deren Porenstruktur bestimmt. Die Quecksilberdruck-Porosimetrie (engl. *MIP*) ist eine weit verbreitete Methode, welche bei der Untersuchung von porösen Stoffen, insbesondere Zementgebundenen Baustoffen eingesetzt wird. Die übliche Interpretation solcher Messungen setzt gewisse Eigenschaften der Porenstruktur voraus. Durch die Messung von zusätzlichen Intrusions- und Extrusionszyklen wird der Einfluss der Probengröße auf die MIP-Charakteristik von Betonproben, wie den Flaschenhalbsporen-Effekt und den Hysterese-Effekt, untersucht. Dazu wird für jeden Intrusions-/Extrusionszyklus der Anteil des nach Abschluss der Extrusion in den Poren zurückgehaltenen Quecksilbers bestimmt. Durch die Wahl je eines Benetzungswinkels für den Intrusionsprozess ( $\theta_i$ ) und den Extrusionsprozess ( $\theta_e$ ) kann eine Überlagerung der jeweiligen Kurven erzielt werden. Wird für den Intrusionsprozess ein Benetzungswinkel von  $130^\circ$  angenommen, so wurde für alle Proben ein Extrusionsbenetzungswinkel von  $104^\circ$  bestimmt. Oft wird angenommen, dass der Grenzradius (engl. *threshold radius*) einem besonders häufig vorkommenden Porenradius entspricht. Betrachtet man die Menge des zurückgehaltenen Quecksilbers in Funktion des maximal angewandten Quecksilberdruckes, so deutet nichts auf die Existenz eines solchen Porenradius. Selbst wenn charakteristische Eigenschaften Zementgebundener Baustoffe mit Hilfe der MIP bestimmt werden können, so erschwert der Einfluss der Probenvorbereitung und Probengröße und der Flaschenhalbsporen-Effekt aufgrund der zufällig vorkommenden Luftporen den Vergleich und die Interpretation von Resultaten.