



Doctoral Thesis

**Perkolationsbetrachtungen zum Feuchtigkeitstransport in porösen Körpern  
Anwendung der Perkolationstheorie auf den kapillaren Wassertransport in Zementstein**

**Author(s):**

Flückiger, Dieter

**Publication Date:**

1993

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000897427> →

**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 Nr. 10223

# **Perkolationsbetrachtungen zum Feuchtigkeitstransport in porösen Körpern**

## **Anwendung der Perkolations- theorie auf den kapillaren Wassertransport in Zementstein**

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

vorgelegt von  
DIETER FLÜCKIGER  
Dipl. Bauingenieur ETH Zürich  
geboren am 5. Juli 1960  
von Huttwil BE

Angenommen auf Antrag von  
Prof. Dr. H. Böhni, Referent  
Prof. Dr. L. Gauckler, Korreferent  
Dr. B. Elsener, Korreferent



CatE

## Zusammenfassung

Aufgrund der klassischen Theorie wird die kapillare Wasseraufnahme poröser Stoffe wie Beton, Mörtel oder Zemenstein mit Hilfe des Kapillar- bzw. Potentialmodells beschrieben. Beide Theorien sind in ihrer Aussage äquivalent und liefern als Ergebnis, dass die Massenaufnahme proportional ist zur Wurzel der Zeit ( $\sqrt{\text{Zeit}}$ -Gesetz). In Aufsaugversuchen im Labor zeigt sich aber weltweit, dass in der Regel die theoretische Beziehung nicht bzw. nur angenähert beobachtet werden kann. Das  $\sqrt{\text{Zeit}}$ -Gesetz stimmt umso besser, je poröser der untersuchte Werkstoff ist und bei kleineren Porositäten umso schlechter, je länger die Beobachtungszeit gewählt wird. Systematische Untersuchungen diesbezüglich jedoch fehlen. Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, diese Abweichungen von der Theorie systematisch, d. h. in Funktion der Porosität, zu erfassen und quantitativ zu beschreiben. Als zu untersuchender Werkstoff wird Zementstein gewählt, da dieser gegenüber praxisnäheren Werkstoffen den Vorteil der grösseren Homogenität aufweist. Mit Zementsteinprüfkörpern ( $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ ) sind Aufsaugversuche durchgeführt und statistisch analysiert worden. Der kapillar füllbare Porenraum hat zwischen 28 und 43 % betragen. Die Auswertung hat ergeben, dass die statistische Aussage signifikant ist und dass der kinetische Prozess nicht mit einem Potenzgesetz beschrieben werden kann.

Auf der theoretischen Seite wird die Struktur mit Methoden aus der theoretischen bzw. statistischen Physik als ungeordnetes, zufälliges System aufgefasst und als Perkolationsgitter (3-d) idealisiert. Unter einem Perkolationssystem versteht man ein Gitter, welches sich aus zufällig verteilten, erlaubten und nicht erlaubten Plätzen zusammensetzt (Poren im Zementstein mit Wahrscheinlichkeit  $p$  bzw. Festkörper mit Wahrscheinlichkeit  $1-p$ ). Erlaubte Plätze bilden zusammen sog. Cluster, wenn sie benachbart sind. Als Gittertyp ist ein quadratisches Gitter im Raum gewählt worden ( $d = 3$ ), welches als Perkolationsschwelle den Wert  $p_c \approx 31\%$  aufweist (kritische Konzentration, bei der zum ersten Mal ein infinites Cluster existiert). Die Perkolationstheorie behandelt nun die strukturellen (Geometrie, fraktale Dimension  $d_f$ ) und dynamischen (Transport, fraktale Dimension  $d'_w$ ) Eigenschaften eines solchen Gebildes. Bei der Erweiterung auf dynamische Eigenschaften wird jedem Gitterplatz eine physikalische Grösse (Diffusivität bzw. Kapillarität) zugeordnet. Mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen wird ein Diffusionsprozess nachgebildet. Es zeigt sich, dass aufgrund der teil- und zeitweisen fraktalen (selbstähnlichen) Eigenschaften der Perkolationssysteme die physikalischen Ge-

setze eine wesentliche Änderung erfahren und anomal werden. In einem geordneten System erfolgt die Diffusion bzw. der kapillare Transport einem  $\sqrt{\text{Zeit}}$ -Gesetz, welches durch den Exponenten 0.5 charakterisiert ist. Wenn die Transportstruktur ungeordnet ist und fraktale Eigenschaften aufweist, ändert sich der Exponent. Dieser kann durch die fraktale Dimension  $d_w$  (für infinite Cluster) bzw.  $d'_w$  für Perkolationsysteme beschrieben werden. Die effektive fraktale Dimension  $d'_w$  (Steigung im log-log-Masstab) ist nicht notwendigerweise eine feste Grösse, sie kann zeitabhängig sein. Sie variiert zwischen 2 und  $\infty$  und wird durch die Geometrie bestimmt. Dies rührt davon her, dass die fraktale Natur des Transportsystems sich mit der Zeit ändern kann. Die fraktalen Dimensionen sind sog. universelle Grössen, welche nicht durch den Gittertyp (bzw.  $p_c$ ) bestimmt sind, sondern nur von der euklidischen Dimension  $d$  abhängen.

Der Vergleich der Exponent-Zeit-Abhängigkeit bei den Laborversuchen mit der entsprechenden Darstellung in den numerischen Versuchen zeigt die prinzipielle Ähnlichkeit im zeitlichen Verlauf. Die vollständige Überführung des kinetischen Prozesses aus den Perkolationsrechnungen auf die Aufsaugkurve aus den Labormessungen ist physikalisch nicht vollumfänglich begründet möglich. Der Grund liegt in der Unbestimmtheit der Perkolationschwelle (und des Systems) bei Zementstein. Für die Bestimmung der Amplitude (Aufnahmekoeffizient in der klassischen Theorie) lässt sich eine Beziehung herleiten, indem die Besetzungswahrscheinlichkeit  $p = 100\%$  als geordnetes System (= klassische Theorie) aufgefasst wird. Daraus ergibt sich die Definition eines Korrekturtermes als normierte Diffusivität im Perkolationsystem, welcher den Aufnahmekoeffizienten aus der klassischen Theorie korrigiert. Ein Vergleich zu den gemessenen Koeffizienten zeigt, dass dadurch für diesen Kennwert eine wesentlich verbesserte Möglichkeit besteht, aufgrund der Porencharakteristik eine Prognose zu formulieren. Im Zeitbereich lässt sich nur eine statistisch begründete Zeitkalibrierung vornehmen. Die Resultate zeigen aber, dass das Verhältnis Modell- zu realer Zeit nicht kritisch ist. Eine Ausgleichsrechnung liefert für alle Versuche eine Relation in der Grössenordnung von 0.2. Die Anwendung der Perkolationstheorie ist ein sehr gutes Beispiel in der Naturwissenschaft für die Einführung mathematischer bzw. Computer-Experimente. Die direkte Übertragung in die Natur ist mit Schwierigkeiten verbunden. Trotzdem lohnt es sich, diese Experimente durchzuführen, da sie vom mechanistischen Standpunkt aus gesehen einen vertieften Einblick in die realen Vorgänge in der Natur erlauben.

## Summary

The classical theory describes the capillary water absorption of porous media as concrete, mortar or cement paste with the capillary- or the potential-model. Both theories are equivalent and show that the absorption of water is proportional to the square root of the elapsed time. Laboratory tests on water absorption to cementitious materials generally show some differences between experiments and theory. The square-root-law does not fit the experiments at longer times and smaller porosity. At this state, no systematic studies about these phenomena have been carried out. The aim of this work is therefore to describe these differences from the theory systematically as a function of the geometry (porosity). Cement paste is chosen as material to examine the sorptivity due to its higher homogeneity compared to concrete or mortar. Water absorption tests have been performed on specimens of cement paste (40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup>). The porosity (corresponds to the space which is capable of being filled with water) was between 28 % and 43 %. The main results are that the kinetic process of the water absorption cannot be strictly described by a power law with given statistical significance.

A new model, based on the percolation theory, is proposed. It describes the structure of cement paste with a 3-d simple cubic lattice. Each site of the lattice is either occupied with probability  $p$  (corresponds to the pores of the cement paste) or empty (equals the matrix) with probability  $(1-p)$ . The occupied sites form a cluster if they are neighbored. The percolation threshold is now defined as the critical concentration  $p_c$  at which an infinite (spanning) cluster becomes possible for the first time (simple cubic lattice :  $p_c \approx 31\%$ ). The percolation theory with its static aspects deals with the structural properties (geometry, fractal dimension  $d_f$ ) and the dynamical properties (transport, fractal dimension  $d'_w$ ) of these systems. By the extension of the dynamical view, each lattice site has its own physical meaning (diffusivity, capillarity). A diffusion process can be described by Monte-Carlo-simulations. Due to the temporary and partial fractal properties (self similarity) of the percolation system, it can be shown that the physical law of the transport changes clearly and becomes anomalous. In an ordered system a diffusion process (or capillary absorption) is described with a power law with exponent 0.5 (square-root-law). If the structure is disordered and shows fractal properties, the exponent changes. It can be described with fractal dimension  $d_w$  (for infinite clusters) and respectively  $d'_w$  for percolation systems. The effective fractal dimension  $d'_w$  (slope in the log-log-plot of the absorption-time-dependence)

is not a constant. It depends on the time and varies between 2 and  $\infty$ . The type of variation depends on the geometry. The reason is that the fractal nature of the transport system changes with time. The fractal dimensions are universal. They are not determined by the lattice type (respectively  $p_c$ ) but only depend on the euclidean dimension  $d$ .

The comparison of the exponent-time-dependence of the laboratory tests and the numerical studies shows the general similarity. A transfer of the kinetic process of the percolation calculation to the absorption curve is not completely physically founded possible. The reason is the ignorance of the percolation system in the reality (cement paste) and its threshold. However the determination of the amplitude (absorption coefficient in the classical theory) is well founded possible. The classical theory is referring to a percolation system (ordered system) with occupation-probability  $p = 100\%$ . If a typical probability is studied, a correction term is defined as a normalized diffusivity in the percolation system which corrects the absorption coefficient from the classical theory. The comparison to the measured coefficients shows with this model enables a much better prediction of the absorption coefficient by a known porosity. In the time-space only a statistically founded transfer is possible (Time-Fit). The result shows that the relationship between the real and the model-time is not critical. The calculation of the most probable values gives approx. 0.2 for all geometries.

The use of percolation theory is a good example in the natural science for the introduction of mathematical respectively computer-experiments. A direct transfer to the reality is difficult. Nevertheless it is worth while to carry out such studies since from the mechanistic view the knowledge in the processes of nature can be improved.