

Einfluss des Feuchtigkeitsgehaltes auf das kapillare Saugen

P. Prim¹ und F.H. Wittmann²

¹Ehemals Laboratoire des matériaux de construction,
EPF Lausanne, Schweiz

²Institut für Baustoffe,
ETH Zürich, Schweiz

Zusammenfassung

Bei einigen oberflächentechnologischen Massnahmen wie etwa beim Hydrophobieren oder beim Realkalisieren wird die kapillare Saugfähigkeit als treibende Kraft genutzt. Deshalb stellt sich vor einer solchen Massnahme immer die Frage nach dem kritischen zulässigen Feuchtigkeitsgehalt. An einer Reihe unterschiedlicher poröser Werkstoffe des Bauwesens wurde zunächst das poröse Gefüge charakterisiert. Porosität und Porengrössenverteilung wurden an 3 unterschiedlichen Arten von Porenbeton, an Zementsteinproben mit drei unterschiedlichen Wasser-Zement-Werten, an Sandstein und an gebranntem Ziegel bestimmt. An identischen Proben wurden die Sorptionsisotherme und bei jedem Gleichgewichtsfeuchtigkeitsgehalt die kapillare Saugfähigkeit gemessen. Es zeigte sich, dass für Werkstoffe mit eher grobporösem Gefüge wie etwa bei Sandstein oder bei gebranntem Ziegel, der Feuchtigkeitsgehalt nur einen geringen Einfluss auf das kapillare Saugen hat. Demgegenüber nimmt die kapillare Saugfähigkeit des Zementsteins mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt stark ab und erreicht in der Nähe von 100 % r. F. vernachlässigbar kleine Werte. Die hier vorgelegten Ergebnisse erlauben eine Aussage zum kritischen Feuchtigkeitsgehalt vor einer oberflächentechnologischen Massnahme. Gleichzeitig können die Werkstoffgruppen angegeben werden, bei denen der Feuchtigkeitsgehalt vor einer Massnahme zu kontrollieren ist. Es muss an dieser Stelle aber noch darauf hingewiesen werden, dass die Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes an der

Oberfläche nicht genügt, sondern das Feuchtigkeitsprofil muss mindestens bis in die Tiefe, die mit der geplanten Massnahme angestrebt wird, ermittelt werden.

Stichwörter: Kapillares Saugen, Sorptionsisotherme, Feuchtigkeitsgehalt, Porosität, Porengrößenverteilung

Influence of Moisture Content on Capillary Suction

Abstract

Some surface treatments such as hydrophobing and realcalisation rely on capillary suction as the driving force. In this context, the critical admissible moisture content must be known. The porous structure of a series of different building materials has been characterized. The porosity and pore size distribution has been determined on 3 different types of autoclaved aerated concrete (AAC), on samples made of hardened cement paste with 3 different water-cement ratios, on natural sandstone and on burned brick. The sorption isotherm and at each equilibrium moisture content the remaining capillary suction has been measured on identical specimens. It can be shown that capillary suction of materials with a coarse porous structure such as sandstone or burnt brick depends slightly only on the moisture content. Capillary suction of hardened cement paste with a fine porous system, in contrast, is drastically diminished with increasing moisture content and reaches negligible values near 100 % RH. Results presented in this contribution allow us to fix a critical admissible moisture content for different building materials. At the same time, building materials can be identified for which the moisture content has to be carefully controlled before surface treatment is to be applied. It must be mentioned, however, that in critical cases the moisture profile must be determined up to the intended depth of the treatment instead of the surface moisture content.

Key words: Capillary suction, sorption isotherm, moisture content, porosity, pore size distribution

1 Einleitung

Dem kapillaren Saugen poröser Werkstoffe des Bauwesens kommt im Zusammenhang mit der Dauerhaftigkeit eine zentrale Bedeutung zu. Einerseits werden gelöste Schadstoffe wie Chloride oder Sulfate über das aufgenommene Wasser ins Innere eines Porensystems transportiert. Andererseits versucht man, bei Instandsetzungsmassnahmen und beim vorbeugenden Bautenschutz gezielt entsprechende Substanzen ins Innere der betreffenden Werkstoffe zum Imprägnieren oder Versiegeln zu bringen. Beispiele dafür sind das Hydrophobieren, das nachträgliche Einbringen von Inhibitoren oder das Realkalisieren.

Die meisten Bauteile sind während ihrer Nutzungsdauer Luft mit einer variablen relativen Feuchtigkeit und Temperatur ausgesetzt. Werkstoffe auf der Basis mineralischer Bindemittel werden zunächst je nach der Umgebung, in der sie sich befinden, Wasser durch Trocknen verlieren. In einem Teil des Porengefüges wird dadurch das ursprünglich vorhandene Wasser durch Luft ersetzt. Bei einem modernen Hochleistungsbeton genügt bereits die Hydratation des Zementes, um das poröse Gefüge bis ins Gleichgewicht mit vergleichsweise niedrigen relativen Feuchten zu trocknen [1].

Wenn bei einer oberflächentechnologischen Massnahme die kapillare Saugfähigkeit des zu behandelnden Werkstoffes eine Rolle spielt, wie etwa beim Hydrophobieren oder beim Realkalisieren, so stellt sich immer die Frage, welcher kritische Feuchtigkeitsgehalt ist in einer Probe vor der Behandlung noch zulässig. Bei dieser Betrachtung geht man davon aus, dass die kapillare Saugfähigkeit mit zunehmendem Feuchtigkeitsgehalt geringer wird. Dies ist sicher plausibel, der entsprechende Zusammenhang wurde aber bisher nur für einzelne Werkstoffe des Bauwesens näher untersucht [2-4].

In diesem Beitrag sollen zunächst einige theoretische Grundlagen erläutert werden. Dann werden Ergebnisse von Messungen an einigen Werkstoffen mit stark unterschiedlichen porösen Gefügen vorgestellt. Daraus können Kriterien für den zulässigen Feuchtigkeitsgehalt einzelner Werkstoffgruppen abgeleitet werden.

2 Kapillares Saugen und Kapillarkondensation

Obwohl wir in einem realen Werkstoff des Bauwesens keine geradlinigen zylinderförmigen Kapillaren nachweisen können, hat es sich als nützlich erwiesen, die Wechselwirkung mit Feuchtigkeit in Analogie zu einfachen Zylinderporen zu beschreiben. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss man jedoch berücksichtigen, dass der Radius einer Zylinderpore beispielsweise in diesem Fall als ein effektiver Wert zu betrachten ist, der ein unregelmässiges poröses System

mit Porenradien, die über viele Größenordnungen verteilt sein können, nur in grober Näherung wiedergeben kann.

Durch die kapillare Saugkraft wird eine benetzende Flüssigkeit in eine zylinderförmige Kapillare mit dem Radius r und der Eindringgeschwindigkeit dx/dt aufgenommen:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{r^2}{8\eta x} \left(\frac{2\sigma}{r} - g\rho x \right) \quad (1)$$

darin bedeuten x eine Ortskoordinate parallel zur Zylinderachse, t die Zeit, η die Viskosität der Flüssigkeit, σ die Oberflächenspannung, g die Erdbeschleunigung und ρ die spezifische Masse. Betrachten wir der Einfachheit halber die horizontale Flüssigkeitsaufnahme oder beschränken wir uns auf Eindringtiefen, die klein im Vergleich zur maximalen Steighöhe sind, so können wir Gl (1) vereinfachend wie folgt schreiben:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{r\sigma}{4\eta x} \quad (2)$$

Nach Separieren der Variablen kann diese Differentialgleichung wie folgt durch Integrieren gelöst werden:

$$\frac{1}{2}x^2 = \frac{1}{4} \frac{r\sigma}{\eta} t + C \quad (3)$$

Mit der Anfangsbedingung $x = 0$ bei $t = 0$ wird die Integrationskonstante gleich Null. Damit erhalten wir die bekannte und oft benutzte Beziehung zwischen Eindringtiefe x und Saugdauer t :

$$x = \sqrt{\frac{r\sigma}{2\eta}} \sqrt{t} \quad (4a)$$

$$x = B\sqrt{t} \quad (4b)$$

Experimentell ist es viel leichter, die aufgenommene Wassermenge als Funktion der Zeit zu bestimmen. Die Wasseraufnahme ΔW als Funktion der Zeit lässt sich analog zu Gl (4b) wie folgt beschreiben:

$$\Delta W = A \cdot \sqrt{t} \quad (5)$$

Kennt man die kapillar aufnehmbare Wassermenge, die Wasserkapazität ψ , so kann man B aus dem gemessenen Wert für A berechnen:

$$B = A \cdot \frac{1}{\psi \cdot \rho} \quad (6)$$

Wenn B mit Hilfe von Gl (4b) aus experimentell bestimmten Daten errechnet wurde, so kann ein effektiver Radius des betreffenden porösen Systems r_{eff} ermittelt werden:

$$r_{\text{eff}} = B^2 \frac{2\eta}{\sigma} \quad (7)$$

Mit $\eta = 0.001 \text{ Ns/m}^2$ und $\sigma = 0.074 \text{ N/m}$ erhält man daraus:

$$r_{\text{eff}} = 0.027B^2 \quad (8)$$

Wenn B in $\text{m/s}^{1/2}$ eingesetzt wird, so wird r_{eff} in m ausgedrückt. Die so ermittelten effektiven Radien sind so klein, dass sie keine direkte physikalische Bedeutung haben. Dafür gibt es mehrere Erklärungsmöglichkeiten. Kapillar saugen können natürlich nur leere Poren. Sehr feine Poren füllen sich jedoch im Kontakt mit Luft mit einer relativen Feuchtigkeit über 50 % durch Kapillarkondensation. Diese feinen Poren stehen also bei höheren Luftfeuchtigkeiten für die kapillare Wasseraufnahme nicht mehr zur Verfügung. In zementgebundenen Werkstoffen kann der Anteil an sehr feinen Poren vergleichsweise hoch sein.

Die Kapillarkondensation wird über die Kelvin-Gleichung beschrieben:

$$r_k = \frac{2\sigma V}{RT \ln(p/p_0)} \quad (9)$$

Darin bedeuten V das Molvolumen des Wassers, R die allgemeine Gaskonstante und T die Temperatur. Setzt man die entsprechenden Werte in Gl (6) ein ($\sigma = 0.074 \text{ N/m}$, $V = 1.805 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{Mol}$, $R = 8.314 \text{ J/Mol} \cdot \text{K}$, $T = 293 \text{ K}$), so erhält man den folgenden Ausdruck, der den Kelvinradius r_k bei dem gerade Kapillarkondensation eintritt, als Funktion des relativen Dampfdruckes p/p_0 :

$$r_k = \frac{1.097 \cdot 10^{-9}}{\ln(p/p_0)} \quad [\text{m}] \quad (10)$$

Gl (10) ist zur besseren Anschaulichkeit in Abb. 1 noch graphisch dargestellt. Poren mit einem Radius von etwa 1 nm bis etwas mehr als 100 nm sind also durch Kapillarkondensation füllbar. Ist der Anteil dieser Poren in einem Werkstoff hoch, so ist damit zu rechnen, dass die Feuchtigkeit der Umgebung einen starken Einfluss auf die kapillare Saugfähigkeit haben wird.

3 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

3.1 Porengrößenverteilung und Sorptionsisotherme

Um den Einfluss des Porengefüges auf die kapillare Saugfähigkeit zu untersuchen, wurden Messungen an Werkstoffen mit stark unterschiedlicher Porosität und Porengrößenverteilung durchgeführt. Zunächst wurden die Porosität und die Porengrößenverteilung über Vakuumsättigung mit Wasser bzw. mit der Quecksilberdruckporosimetrie bestimmt. Alle Ergebnisse sind in einem internen

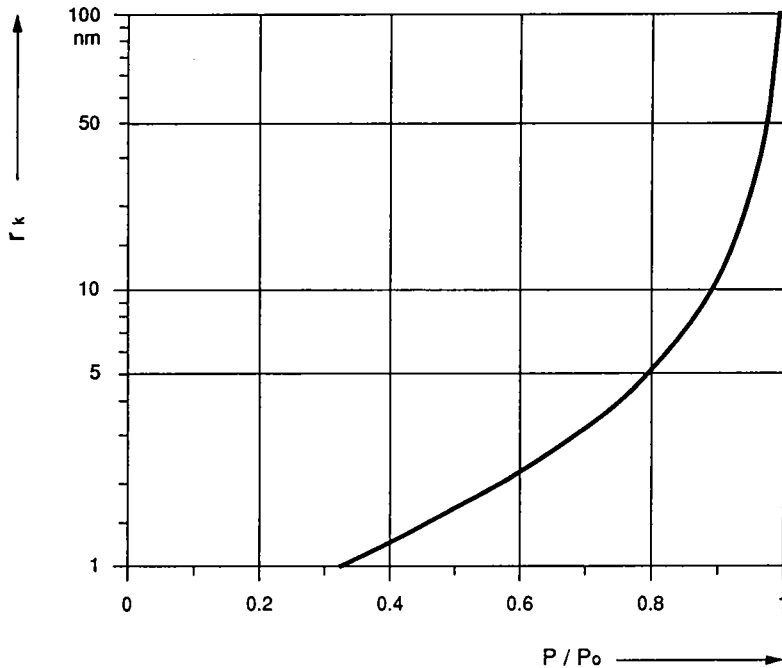


Abb. 1: Graphische Darstellung von Gl. (10)

Fig. 1: Graphical representation of equ (10)

Institutsbericht zusammengetragen [5]. Aus folgenden Werkstoffen des Bauwesens wurden Prismen mit den Abmessungen 40 x 40 x 160 hergestellt:

Porenbeton	L,	$\rho = 379 \text{ kg/m}^3$
Porenbeton	N,	$\rho = 419 \text{ kg/m}^3$
Porenbeton	H,	$\rho = 526 \text{ kg/m}^3$
Zementstein	W/Z = 0.40 ,	$\rho = 1709 \text{ kg/m}^3$
Zementstein	W/Z = 0.35 ,	$\rho = 1795 \text{ kg/m}^3$
Zementstein	W/Z = 0.28 ,	$\rho = 1924 \text{ kg/m}^3$
gebrannter Ziegel,		$\rho = 1735 \text{ kg/m}^3$
Sandstein (Villarlod bleue),		$\rho = 2220 \text{ kg/m}^3$

Die Gesamtporosität P variierte dabei zwischen etwa 86 % beim Porenbeton und etwa 17 % beim Sandstein. An allen Proben wurde neben der Gesamtporosität die Porengrößenverteilung gemessen. Die Ergebnisse sind in der Abb. 2 zusammengestellt. Beim Porenbeton können die feinen Poren der Zellwände mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie gemessen werden. Die künstlich eingebrachten Poren müssen aber mit einer anderen Methode, z.B. bildanalytisch, vermessen werden [6]. Beim Zementstein sind es umgekehrt die feinen Gelporen, die mit der Quecksilberdruckporosimetrie nicht mehr aufgelöst werden können.

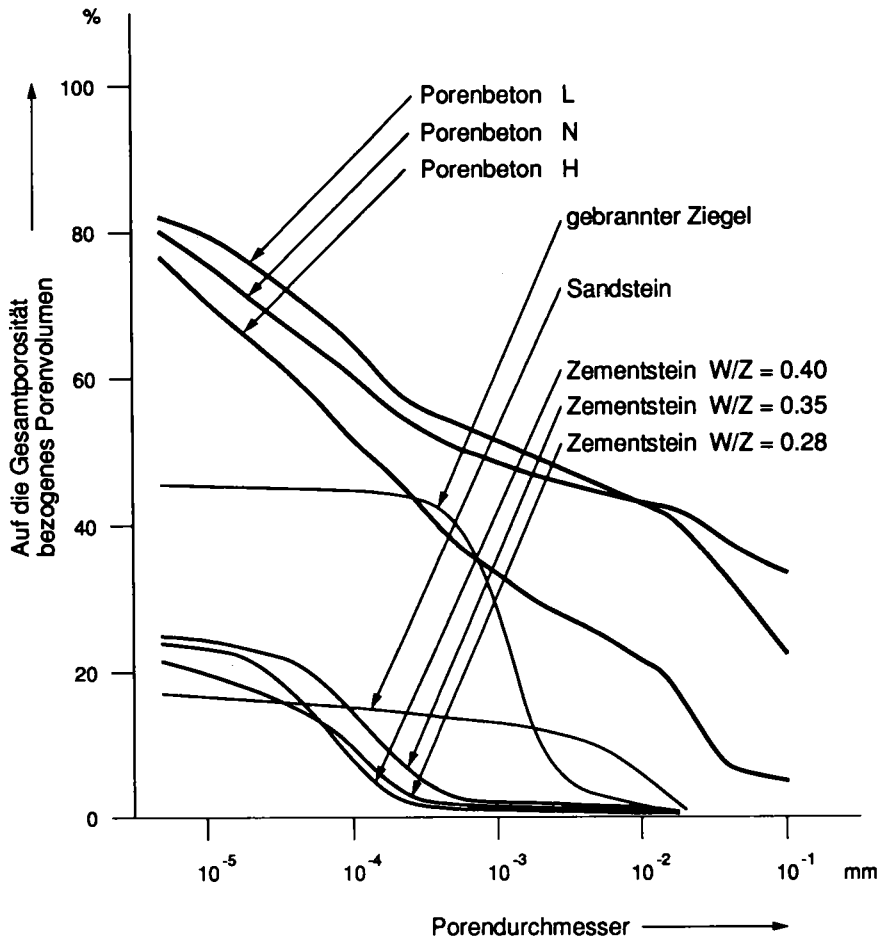


Abb. 2: Porengrößenverteilung der untersuchten Werkstoffe
 Fig. 2: Pore size distribution of the investigated materials

Da der Einfluss des Feuchtigkeitsgehaltes auf das kapillare Saugen festgestellt werden sollte, wurden die Proben in Exsikkatoren bei unterschiedlichen Feuchtigkeiten gelagert. Vor der Messung der Saugfähigkeit wurde der Gleichgewichtsfeuchtigkeitsgehalt bestimmt. Damit erhält man die Sorptionsisotherme der untersuchten Werkstoffe bei 20°C . In diesem Fall wurde der Desorptionsast der Sorptionsisotherme aufgenommen. Die Ergebnisse sind in Abb. 3 dargestellt.

Aus dem Verlauf der Sorptionsisothermen können bereits wertvolle Informationen bezüglich des betreffenden porösen Gefüges abgeleitet werden. Der Feuchtigkeitsgehalt bei etwa 30 % r. F. entspricht ungefähr einer monomolekularen

Bedeckung der inneren Oberfläche [7]. Aus der Sorptionsisotherme kann damit die innere Oberfläche O_i näherungsweise bestimmt werden. Kennt man ausserdem das Porenvolumen p , so lässt sich damit der hydraulische Radius errechnen.

$$r_H = \frac{V_p}{O_i} \quad (11)$$

Die innere Oberfläche O_i erhält man über das Volumen Wasser V_m , das notwendig ist, um eine monomolekulare Bedeckung zu erreichen über Gl (9) [7].

$$O_i = 37.9 \cdot 10^2 V_m \quad (12)$$

Wenn man in Gl (12) V_m (in kg/kg) einsetzt, so erhält man O_i in m^2/g . Für den Porenbeton erhält man so Werte zwischen $79 m^2/g$ (H) und $99 m^2/g$ (L). Die innere Oberfläche des Zementsteins liegt dagegen zwischen $295 m^2/g$ ($W/Z = 0.4$) und $236 m^2/g$ ($W/Z = 0.28$). Für Backstein erhält man den vergleichsweise kleinen Wert von $1.7 m^2/g$ und für Sandstein entsprechend $20.5 m^2/g$. Würde man die innere Oberfläche wie üblich aus dem Adsorptionsast der Sorptionsisotherme bestimmen, so erhielte man insbesondere beim Zementstein deutlich niedrigere Werte.

Die Feuchtigkeit, die oberhalb von 50 % r. F. aufgenommen wird, befindet sich in erster Linie in den durch Kapillarkondensation füllbaren Poren. Ob ein Werkstoff in der Nähe von 100 % r. F. noch hohe Saugfähigkeit besitzt, hängt also in erster Linie davon ab, wie gross der Porenraum im Gefüge ist, der durch Kapillarkondensation nicht gefüllt werden kann.

3.2 Feuchtigkeitsgehalt und kapillares Saugvermögen

In Abschnitt 2 wurde gezeigt, dass die Saugfähigkeit näherungsweise und für einen begrenzten Zeitraum mit der Werkstoffkenngrösse A oder B beschrieben werden kann. Mit Hilfe von Gl. (7) kann aus B ein effektiver Porenradius des saugenden porösen Systems bestimmt werden. In Abb. 4 sind die experimentell bestimmten Werte A für die unterschiedlichen Werkstoffe als Funktion der relativen Luftfeuchtigkeit, in der die Proben vor der Messung lagerten, aufgetragen. Mit Gl. (6) kann aus A der Wert für B berechnet werden.

Beim Gasbeton ist die kapillare Saugfähigkeit zwischen 0 % r. F. und etwa 80 % r. F. nahezu unabhängig von der relativen Luftfeuchtigkeit. Bei noch höheren Werten der Luftfeuchtigkeit nimmt Gasbeton stark überproportional Wasser auf und entsprechend sinkt die Saugfähigkeit etwas. Es bleibt aber auch bei 100 % r. F. noch genügend Porenraum ungefüllt. Zementstein saugt im trockenen Zustand stark. Die Kapillarporen werden aber oberhalb von 50 % r. F. durch Kondensation gefüllt und es bleiben nur wenig füllbare Poren bei etwa 100 % r. F. übrig. Folglich sinkt die kapillare Saugfähigkeit bei zementgebundenen Werkstoffen ohne künstliche Luftporen und ohne Verdichtungsporen die kapillare Saugfähigkeit auf nahezu Null ab.

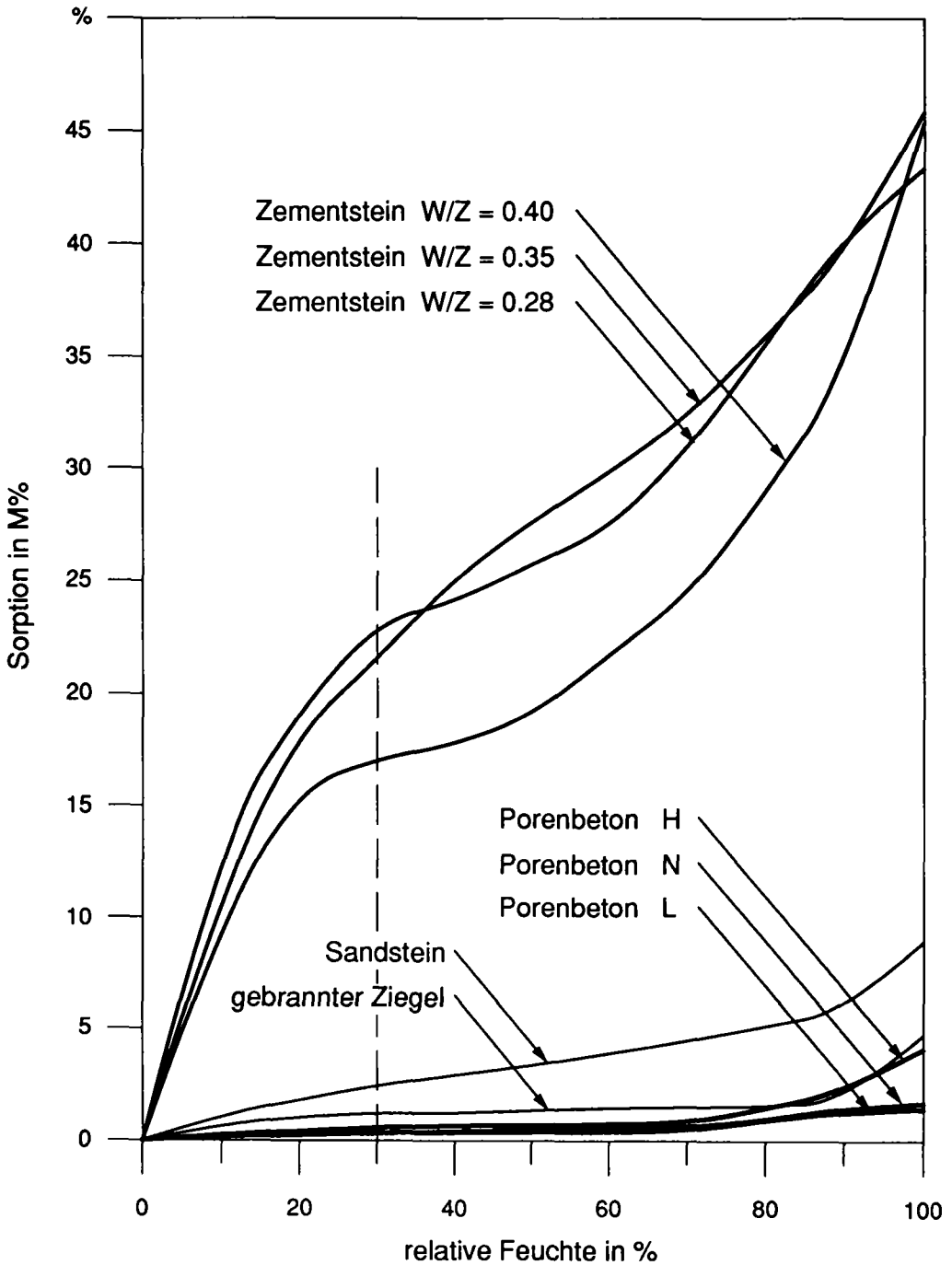


Abb. 3: Sorptionsisothermen der untersuchten Werkstoffe

Fig. 3: Sorption isotherms of the investigated materials

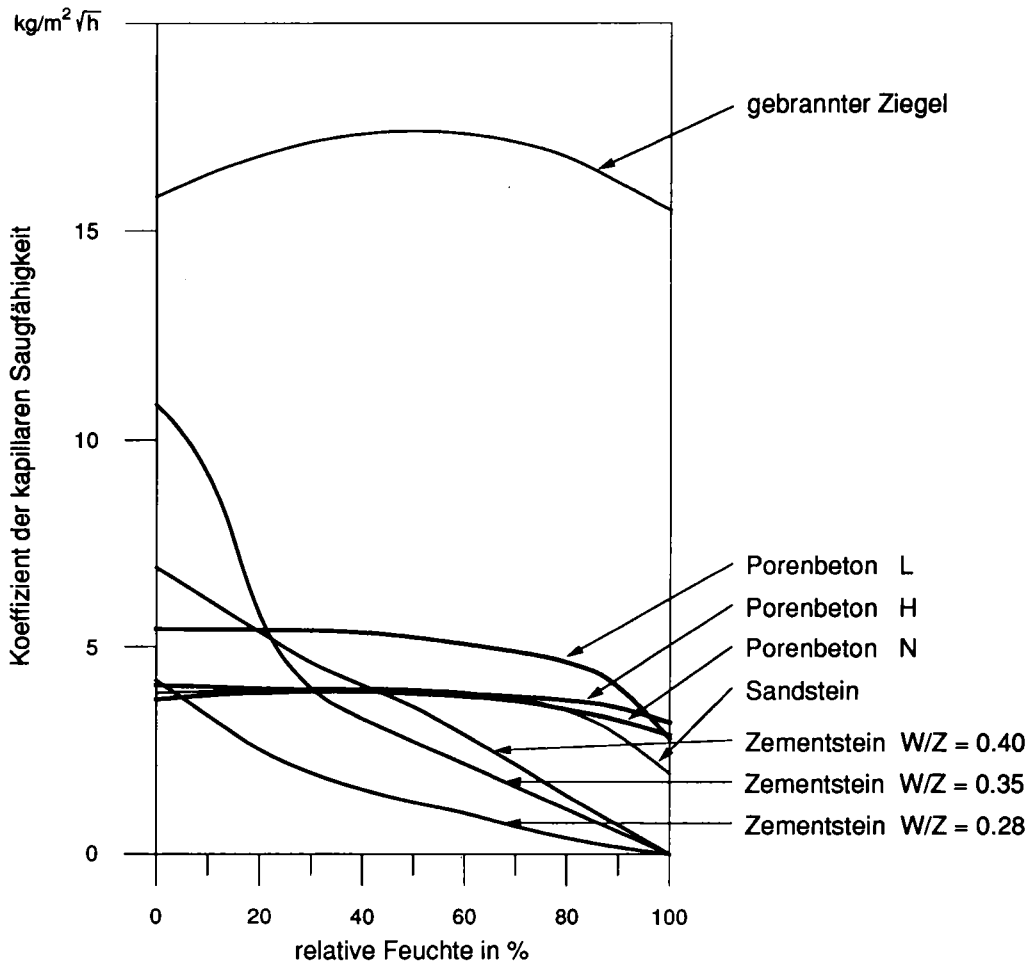


Abb. 4: Koeffizient der kapillaren Saugfähigkeit A als Funktion der relativen Feuchte

Fig. 4: Coefficient of capillary suction A as function of relative humidity

Der Ziegelstein hat über den gesamten Feuchtigkeitsbereich eine hohe Saugfähigkeit. Geringe Mengen Wasser, die an der inneren Oberfläche angelagert sind, erleichtern die Wasseraufnahme. Dies kann über den Benetzungswinkel erklärt werden. Beim untersuchten Sandstein liegt der Grossteil der Poren ausserhalb des kapillaren füllbaren Bereiches. Deshalb ist das Saugvermögen auch nur geringfügig, wie beim Backstein, von der relativen Luftfeuchtigkeit abhängig.

4 Folgerungen

Die Porengrößenverteilung hat einen entscheidenden Einfluss auf die kapillare Saugfähigkeit poröser Werkstoffe bei unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt. Im Gleichgewicht mit einer gegebenen relativen Luftfeuchtigkeit stellt sich ein charakteristischer Feuchtigkeitsgehalt ein. Die Saugfähigkeit eines porösen Werkstoffes nimmt dann rasch mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt ab, wenn nur noch wenig füllbare kapillar saugende Poren übrig bleiben. Zementgebundene Werkstoffe wie Mörtel und Beton verlieren bei hoher Luftfeuchtigkeit die kapillare Saugfähigkeit fast vollständig. Diese Ergebnisse sind bei der Planung und Durchführung oberflächentechnologischer Massnahmen zu berücksichtigen, wenn das kapillare Saugen dabei eine entscheidende Rolle spielt.

Literaturverzeichnis

1. A.M. Alvaredo und F.H. Wittmann, *Shrinkage and cracking of normal and high performance concrete*, in High Performance Concrete: Material Properties and Design, F.H. Wittmann und P. Schwesinger Herausgeber, AEDIFICATIO Verlag, S. 91-110 (1995)
2. A. Volkwein, *Untersuchungen über das Eindringen von Wasser und Chlorid in Beton*, Dissertation, Techn. Universität München (1991)
3. L.J. Parrot, *Variations of water absorption rate and porosity with depth from an exposed concrete surface: effects of exposure conditions and cement type*, Cem. Concr. Res. **22**, 1077-1088 (1992)
4. P. Lunk, *Kapillare Wasseraufnahme und Eintrag von Schadstoffen in Beton*, Dissertation ETH Zürich (1996)
5. P. Prim, *Influence de la condensation capillaire sur l'absorption d'eau par capillarité: variations avec l'humidité relative de l'air*, Interner unveröffentlichter Bericht, Laboratoire des matériaux de construction, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), (1988)
6. P. Prim und F.H. Wittmann, *Structure and water absorption of aerated concrete*, in Autoclaved Aerated Concrete - Moisture Content and Properties, F.H., Wittmann Herausgeber, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, S. 55-69 (1983)
7. F.H. Wittmann, *Porosität und Feuchtigkeitsgehalt*, in WTA Schriftenreihe, Heft 3, Feuchtigkeitstransport und Dauerhaftigkeit von Beton, AEDIFICATIO Verlag, S. 1-22 (1992)



Dipl.-Ing. Pierre Prim, geb. 1923, schloss sein Studium an der Technischen Hochschule Lausanne, Schweiz, 1948 mit dem Diplom in Maschinenbau ab. Zehn Jahre lang war er dann in der Flugzeugentwicklung und als Testpilot tätig. In der Zeit von 1958 bis 1973 beschäftigte er sich mit dem Brennprozess in der Ziegelindustrie und mit der Technologie des Porenbetons. Von 1973 bis 1988 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstoffe des Bauwesens (Laboratoire des matériaux de construction) der Technischen Hochschule Lausanne (EPFL). Seine Hauptarbeitsgebiete während dieser Zeit waren die Analyse des Gefüges poröser Werkstoffe und der Feuchtigkeitstransport in porösen Werkstoffen.



Prof. Dr. F.H. Wittmann, WTA-Mitglied, studierte zunächst an den Universitäten Karlsruhe und München Physik, 1969 habilitierte er bei Prof. H. Rüschi an der TU München. Seit 1976 ist er ordentlicher Professor für Werkstoffe des Bauwesens, zuerst in Delft, dann in Lausanne und heute an der ETH in Zürich. Er befasst sich vorwiegend mit Fragen der Dauerhaftigkeit zementgebundener Werkstoffe und der Anwendung der Bruchmechanik im Bauwesen.