

# Umverteilung des Porenwassers in das Zementgel des Betons

M. Krus<sup>1</sup>, P. Rucker<sup>2</sup> und R. E. Beddoe<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen

(Leiter: Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis)

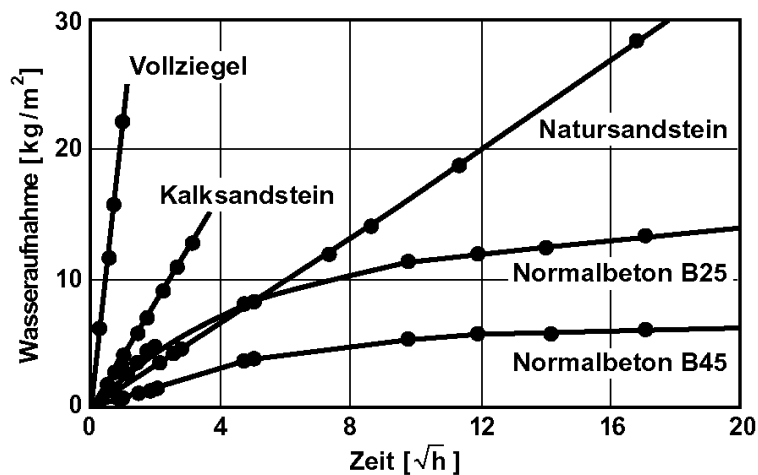
<sup>2</sup> Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung, Technische Universität München

## Kurzfassung

Beton zeigt bezüglich des Wassertransports ein Verhalten, das von dem der meisten anderen mineralischen Baustoffe abweicht. Neben den im Beton ablaufenden Vorgängen wie der Hydratation und Carbonatisierung ist hierfür der deutlich unterschiedliche Porenraum verantwortlich. Zu den in allen mineralischen Baustoffen vorhandenen Kapillarporen kommen bei diesem Material die extrem kleinen Gelporen hinzu. Die direkte Messung der Wassergehalte in diesen Poren ist aber derzeit mit keiner Messmethode ausreichend genau erfassbar. Bei Messverfahren, die auf der Kernmagnetischen Resonanz beruhen, ergeben sich durch die starke physikalische Bindung der Wassermoleküle äußerst niedrige Relaxationszeiten. Dies führt dazu, dass die Wasserstoffkerne nach Beendigung des Anregungsimpulses in die Ausgangslage zurückfallen, bevor eine Erfassung des Messsignals erfolgen kann. Gerade dieser Effekt kann aber auch genutzt werden, um im Beton die Umverteilung des Wassers aus den Kapillarporen in die Gelporen messtechnisch zu beobachten und daraus Transportkoeffizienten für die rechnerische Modellierung dieses Vorganges zu ermitteln. Dies kann Hinweise liefern, die häufig zu beobachtende Selbstabdichtung bei zementgebundenen Baustoffen zu erklären.

## Einleitung und Zielsetzung

Im Allgemeinen erfolgt die kapillare Wasseraufnahme poröser mineralischer Baustoffe linear mit der Wurzel der Zeit ( $\sqrt{t}$ -Gesetz) [1]. In Abbildung 1 ist die Wasseraufnahme verschiedener mineralischer Baustoffe aufgetragen. Mit Ausnahme der Betonproben zeigen alle eine mit der Wurzel der Zeit lineare Aufnahme. Zu den in allen mineralischen Baustoffen vorhandenen Kapillarporen kommen bei diesem Material die extrem kleinen Gelporen des Zementsteins hinzu.



**Abbildung 1:** Kapillare Wasseraufnahme verschiedener mineralischer Baustoffe [3]

Allerdings zeigen Messungen an einem Material mit einer dem Zementstein vergleichbaren Porenradienverteilung ein Wasseraufnahmeverhalten entsprechend dem  $\sqrt{t}$ -Gesetz [2]. Führt man Saugversuche mit unpolarem Hexan statt mit Wasser durch, erhält man auch für Betonbaustoffe einen linear mit der Wurzel der Zeit ansteigenden Hexangehalt [3]. Allerdings ergibt sich im Gegensatz zum Saugversuch mit Wasser hierbei keine messbare Quellung des Materials. Bei lang andauerndem Wasserkontakt nimmt die Aufnahme weiter ab bis sie sich vollständig einstellt. Es kommt zu der so genannten Selbstabdichtung des Betons [4, 5]. Es hat inzwischen von zahlreichen Autoren recht unterschiedliche Erklärungsansätze für dieses abweichende Verhalten zementgebundener Baustoffe gegeben (z.B. [6] bis [10]), letztendlich sind aber die auftretenden Vorgänge derzeit noch nicht wirklich geklärt. Ein Grund dafür könnte darin liegen, dass der Feuchtetransport in den Gelporen derzeit mit keinem Messverfahren ausreichend genau erfasst werden kann. Die vorliegende Arbeit zeigt dazu, wie mit Hilfe der kernmagnetischen Resonanz, mit der ebenfalls das Wasser in den Gelporen nicht erfassbar ist, indirekt die Umverteilung des Wassers von den Kapillarporen in die Gelporen bestimmt werden kann. Die ablaufenden Vorgänge werden dazu anhand eines einfachen Modells rechnerisch nachvollzogen, um erste Näherungen für die Transportkoeffizienten dieses Vorgangs zu erhalten.

### Kernmagnetische Resonanz

Die kernmagnetische Resonanz ist ein Messverfahren, das seit einigen Jahren auch in der Bauphysik als zerstörungsfreie Messung der Feuchteverteilung eingesetzt wird [11, 12]. Sie beruht auf dem Drehimpuls der positiv geladenen Protonen und dem daraus resultierenden magnetischen Moment. In einem konstanten äußeren Magnetfeld verhalten sich die Wasserstoffkerne wie präzedierende magnetische Dipole. Dabei sind zwei mögliche Orientierungen (bzw. Energieniveaus) erlaubt. Durch die Einstrahlung eines elektromagnetischen Impulses bestimmter Frequenz,

senkrecht zum konstanten Feld, werden Übergänge zwischen den beiden Energieniveaus induziert. Nach Beendigung des Hochfrequenz-Impulses kehren die angeregten Kerne mit einem Zeitverhalten, das mit der Relaxationszeit  $T_1$  beschreibbar ist, in die Ausgangslage zurück. Diese longitudinale Relaxationszeit ist mit einer Energieabgabe an die Umgebung verbunden.  $T_1$  ist vor allem von der physikalischen Bindung des Wasserstoffkernes abhängig, also im Falle des Wassers davon, ob es als Feststoff (Eis) oder in flüssiger Form vorhanden ist, aber auch von der Bindung an den Porenwänden und damit vom Porendurchmesser. Unter Abgabe der aufgenommenen Energie stellt sich wieder der ursprüngliche Zustand ein. Die gemessene Spannung in Volt, die durch die abgegebene Energie in einer Spule induziert und erfasst wird, ist proportional der Anzahl der im Messvolumen vorhandenen Protonen. Da in mineralischen Baustoffen Wasserstoffkerne nur in dem darin vorhandenen Wasser enthalten sind, ist auch das Messsignal proportional zum Wassergehalt in der Probe und kann als Maß für den Feuchtegehalt dienen. Dieses Messverfahren kann somit für die meisten mineralischen Baustoffe als ein direktes Feuchtemessverfahren angesehen werden.

Um eine möglichst hohe Ortsauflösung zu erreichen wird bei der NMR-Anlage des IBP (siehe Abbildung 2) dem permanenten Magnetfeld bei der Messung ein Feldgradient aufgeschaltet. Da die Resonanzfrequenz proportional dem Magnetfeld ist, ist somit jedem Ort eine eigene Frequenz zugeordnet. Bei der Messung wird der Anregungsimpuls breitbandig eingestrahlt und danach das Gesamtsignal erfasst. Durch Fourrierrücktransformation wird dieses dann in die Frequenzbereiche aufgeteilt und somit dem Ort zugeordnet. Die vorhandene Messanlage ist so ausgelegt, dass auf diese Weise mit einer Messung 12 mm mit einer Auflösung von nahezu einem Millimeter auf einmal erfasst werden können.

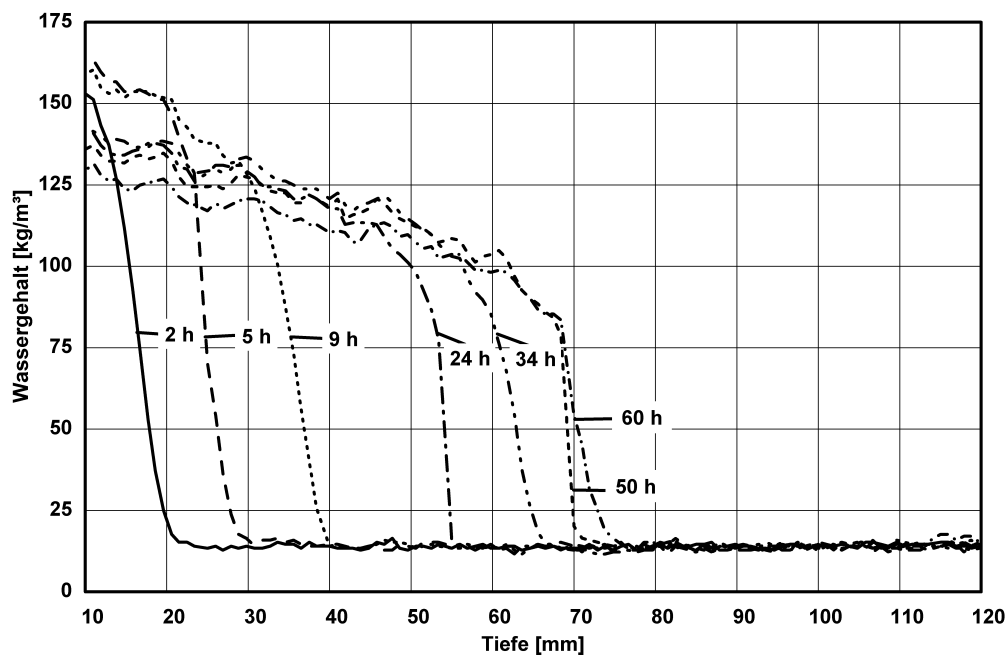
Die verwendete Spule dient sowohl zur Einstrahlung der Anregungsimpulsfolge als auch zum Empfang des Nutzsignals. Durch das Umschalten von Senden auf Empfangen besitzt die Messspule eine gewisse Totzeit. In den Gelporen des Zementsteins ist das Wasser aber aufgrund der kleinen Porendurchmesser und Oberflächeneffekten extrem stark gebunden. Diese Tatsache führt zu einer sehr kleinen Relaxationszeit  $T_1$  der Wasserstoffkerne (Protonen) in den Gelporen des Zementsteins. Nach Anregung der Wasserstoffkerne relaxieren diese bereits innerhalb der Totzeit der Messspule so weit, dass sie nicht mehr oder nur noch zum Teil erfasst werden können.



**Abbildung 2:** Ansicht des NMR-Magneten mit Messkopf

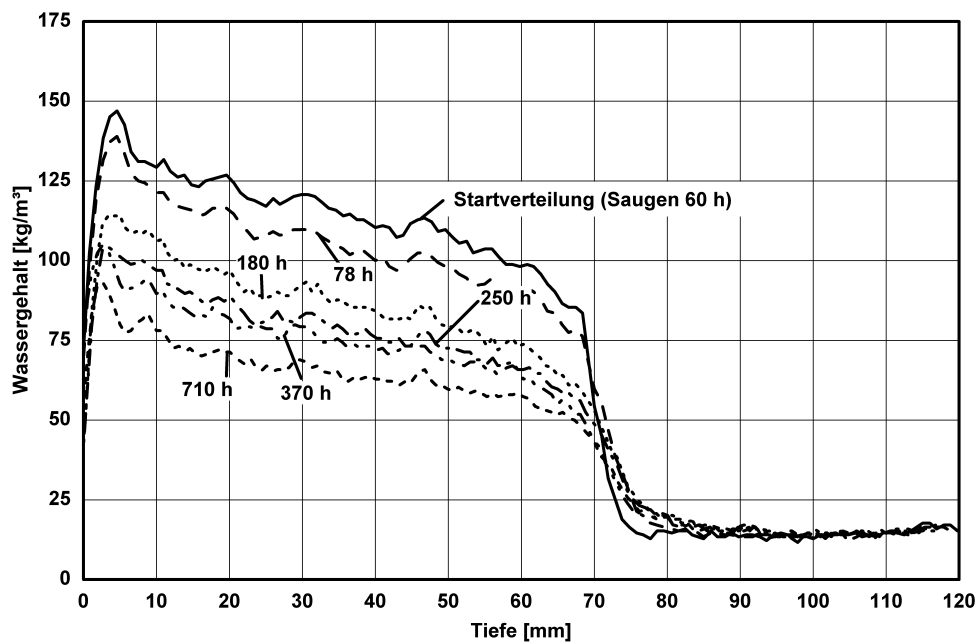
### **Messergebnisse und deren Interpretation**

Zur Untersuchung des Flüssigtransports in Beton werden Saugversuche an Mörtelprismen aus Portlandzement bei einem Wasser/Zement-Wert von 0,6 und einer Querschnittsabmessung von 5 cm X 5 cm durchgeführt. Die Probekörper lagern 28 Tage unter Wasser und 3 Monate im Klima 23°C/50 % r.F. Anschließend werden die Seitenflächen des Prüfkörpers mit Epoxidharz abgedichtet, um eindimensionale Verhältnisse zu erreichen. Der Saugvorgang erfolgt über eine der beiden nicht abgedichteten Stirnflächen. In Abbildung 3 sind die mit dem NMR gemessenen Wassergehaltsverteilungen über die Probenlänge zu bestimmten Zeiten während des Saugversuchs an einer Betonprobe dargestellt. Es zeigt sich deutlich, dass das Wasser nicht in Form einer „definierten“ Wasserfront, sondern – theoretischen Ansätzen für das kapillare Eindringverhalten bei porösen Baustoffen mit unterschiedlichen Porengrößen entsprechend – in differenzierter Weise mit zeitlich und örtlich unterschiedlichen Gradienten eindringt. Allerdings scheint nach etwa neun Stunden der Wassergehalt auf der Saugseite der Probe abzunehmen und dies trotz weiterem Wasserkontakt und tieferem Vordringen des Wassers.



**Abbildung 3:** Mit der NMR-Anlage gemessene Wassergehaltsverteilung in einer Mörtelprobe zu verschiedenen Zeiten des Saugvorganges

Nach Unterbrechung der Wasserzufuhr und Abdichtung der Stirnfläche bleibt das Feuchteprofil nicht erhalten, sondern es findet die sogenannte Weiterverteilung statt, bei der die kleineren Poren aufgrund der höheren Saugspannung die größeren entleeren (siehe auch [11]). Dies hat zur Folge, dass der hohe Wassergehalt auf der Saugseite abnimmt, das Wasser aber tiefer eindringt. Bei korrekter Abdichtung der Probe muss der Gesamtwassergehalt, entsprechend, also die Fläche unter den Kurven konstant bleiben. Dieser Vorgang läuft bei den meisten Baustoffen deutlich langsamer ab als der Saugvorgang, erkenntlich an den deutlich längeren Messzeiten. Abbildung 4 zeigt die im Anschluss an eine Saugzeit von 60 Stunden gemessenen Wassergehaltsprofile. Während anfänglich das Wasser noch ganz geringfügig tiefer eindringt, bleibt es nach etwa 180 Stunden und in der Folge bei einer Tiefe von etwa 90 mm praktisch stehen (Selbstabdichtung des Betons?). Obwohl kein tieferes Eindringen mehr zu beobachten ist, nimmt im gesamten Bereich bis 90 mm der gemessene Feuchtegehalt stetig ab, der Gesamtwassergehalt scheint geringer zu werden. Die Wägung der Probe zu den Messzeitpunkten ergibt dagegen nur eine geringfügige Gewichtsabnahme (nicht dargestellt).



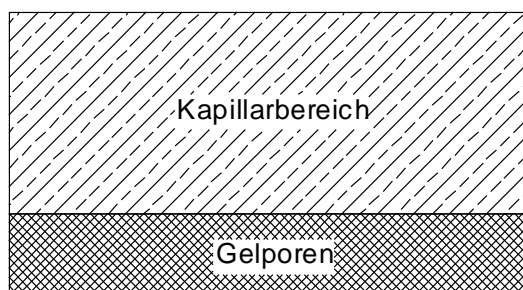
**Abbildung 4:** Mit der NMR-Anlage gemessene Wassergehaltsverteilung in einer Mörtelprobe zu verschiedenen Zeiten der Weiterverteilung

Die Ursache für dieses vermeintliche Verschwinden des Wassers beim Saugvorgang und bei der Weiterverteilung liegt darin, dass ein immer größerer Teil des Wassers bei der Messung mit Hilfe der NMR-Anlage nicht erfasst wird. Es ist anzunehmen, dass der Grund dafür in der extrem niedrigen Relaxationszeit des in den kleinen Poren des Zementsteins befindlichen Wassers liegt. Die Messungen zeigen, dass der Feuchtetransport in die Gelporen des Zementsteins deutlich langsamer abläuft als in die übrigen „normalen“ Kapillarporen. Da das Wasser in den Gelporen nicht mit dieser Anlage messtechnisch erfasst wird, können die üblichen Transportkoeffizienten für die Kapillarleitung nicht direkt bestimmt werden. Allerdings kann versucht werden, die gemessenen Profile durch eine einfache näherungsweise Modellierung der Vorgänge nachzuvollziehen, um auf diese Weise abschätzende Werte für die Transportkoeffizienten für die Umverteilung des Wassers in die Gelporen zu erhalten.

### **Modellierung der Transportvorgänge und Berechnungsergebnisse**

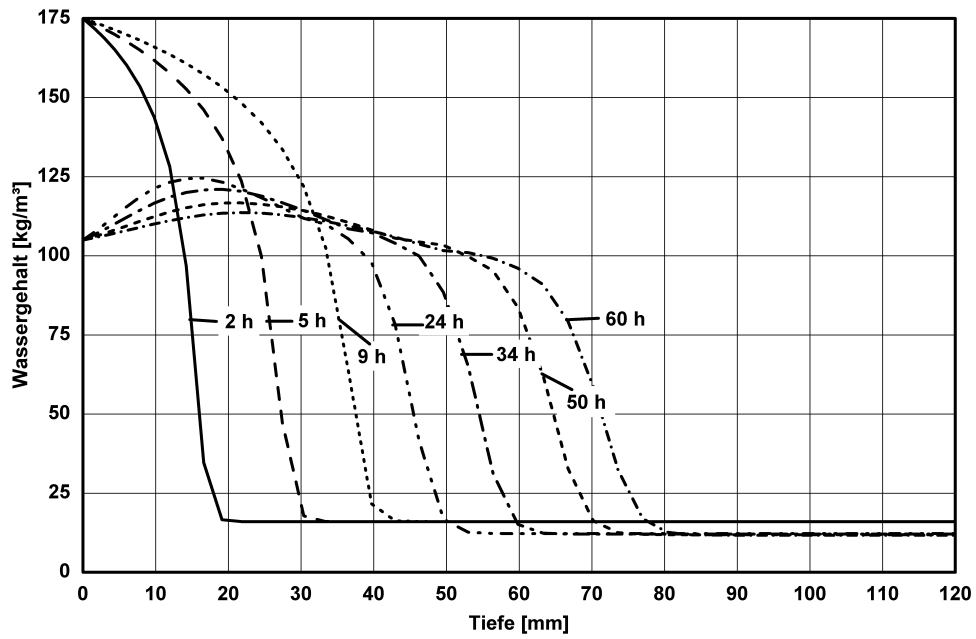
Die Schwäche der vorgestellten Messeinrichtung - das stark gebundene Wasser im Zementgel ist hiermit nicht erfassbar - kann auch als Vorteil genutzt werden, da erst hierdurch die Umverteilung des Porenwassers in das Zementgel des Betons zumindest indirekt beobachtbar wird. Die Durchführung der rechnerischen Untersuchungen erfolgt mit der zweidimensionalen Version des mehrfach verifizierten PC-Programms WUFI [12]. Zur Untersuchung der Umverteilung des

Wassers in die Gelporen wird von folgendem einfachen Modell ausgegangen. Der Prüfkörper besteht aus zwei parallelen Teilen, einem Bereich des Betons mit nur „normalen“ Kapillarporen und einem Bereich in dem sich die extrem feinen Gelporen befinden (siehe Abbildung 5). Zwischen beiden „Materialien“ besteht hygrischer Kontakt. Bei der Berechnung des Saugvorganges werden die Kapillarporen Wasser aufnehmen, allerdings, wie bei mineralischen Baustoffen mit unveränderlicher Porenstruktur, linear mit der Wurzel der Zeit. Die Gelporen werden ebenfalls über die Stirnseite Wasser aufnehmen. Zusätzlich wird aber aufgrund der höheren Saugspannung des Zementgels auch über die Grenzfläche zum Beton Wasser aufgenommen werden. Das Wasser im Zementgel stellt den vom NMR nicht erfassbaren Anteil der Feuchte in der Betonprobe dar. Vom berechneten ortsabhängigen Wassergehalt des Betons wird für jeden Zeitpunkt der jeweilige Wassergehalt des Zementgels abgezogen, um den messbaren Anteil des Wassers in der Probe zu erhalten. Für die Weiterverteilung wird analog verfahren. Für den Beton werden dazu die in der Materialdatenbank von WUFI hinterlegten Kapillartransportkoeffizienten für den Saugvorgang und die Weiterverteilung verwendet. Die Transportkoeffizienten im Zementgel werden so lange angepasst, bis eine möglichst gute Übereinstimmung mit gemessenen Wassergehaltsverteilungen und auf die beschriebene Weise rechnerisch bestimmte „messbare“ Verteilungen erreicht wird. Die Umverteilung in das Zementgel wird allerdings, entsprechend der Messung gemäß Abbildung 3 erst nach einer Saugzeit von 9 Stunden gestartet.

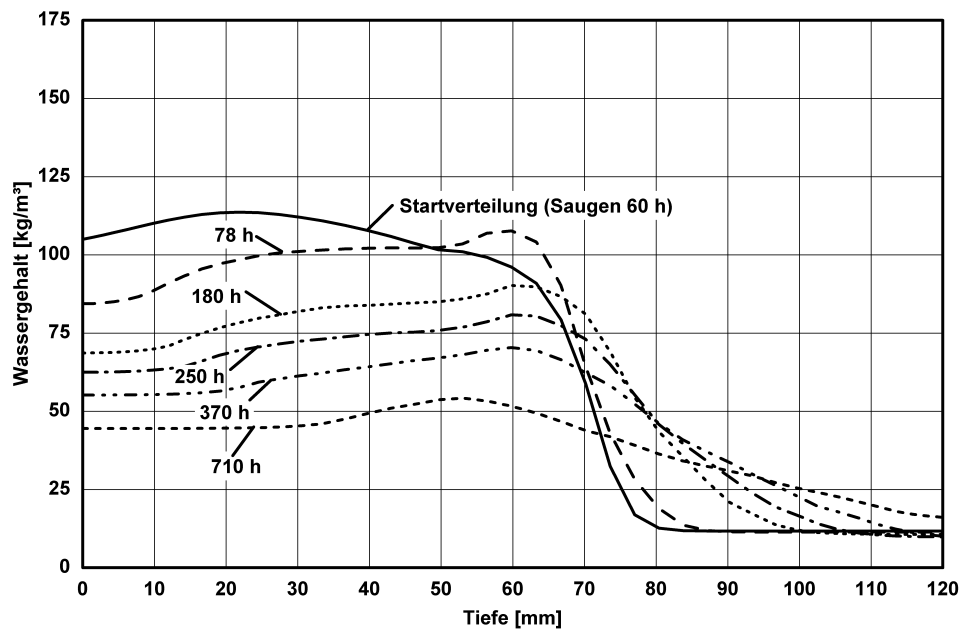


**Abbildung 5:** Modellhafte Aufteilung des Betons in zwei Schichten zur Untersuchung der Umverteilung des Wassers in das Zementgel

Abbildung 6 zeigt die auf die beschriebene Weise berechneten messbaren Anteile der Wassergehaltsverteilung zu verschiedenen Zeiten des Saugvorganges. Abgesehen von den ersten 10 mm ergibt sich eine gute Übereinstimmung von Messung und Rechnung. Auch die in Abbildung 7 dargestellten Berechnungsergebnisse für die Weiterverteilung zeigen ein den Messungen ähnliches Verhalten, wengleich hier im Gegensatz zu den Messungen noch eine geringfügige Weiterverteilung zu beobachten ist. Erreicht wurde diese Übereinstimmung, indem für das Zementgel die in der WUFI-Materialdatenbank abgelegten Kapillartransportkoeffizienten des Betons um den Faktor 100 erniedrigt wurden.



**Abbildung 6:** Berechnete messbare Anteile der Wassergehaltsverteilung in einer Mörtelprobe zu verschiedenen Zeiten des Saugvorganges



**Abbildung 7:** Berechnete messbare Anteile der Wassergehaltsverteilung in einer Mörtelprobe zu verschiedenen Zeiten der Weiterverteilung



## Zusammenfassung

Misst man das Eindringverhalten von Wasser in Beton mit Hilfe der kernmagnetischen Resonanz, scheint nach etwa neun Stunden der Wassergehalt auf der Saugseite der Probe abzunehmen und dies trotz weiterem Wasserkontakt und tieferem Vordringen des Wassers. Die Messung der Weiterverteilung nach Unterbrechung der Wasserzufuhr ist kein tieferes Eindringen mehr zu beobachten. Im gesamten Bereich der Wassereindringtiefe nimmt trotz außenseitiger Abdichtung der gemessene Feuchtegehalt stetig ab, der Gesamtwassergehalt scheint geringer zu werden. Dies steht im Widerspruch zu den parallel durchgeführten Wassergehaltsbestimmungen durch Wägung. Die Ursache für dieses vermeintliche Verschwinden des Wassers beim Saugvorgang und bei der Weiterverteilung liegt darin, dass ein immer größerer Teil des Wassers bei der Messung mit Hilfe der NMR-Anlage nicht erfasst wird. Es ist anzunehmen, dass der Grund dafür in der extrem niedrigen Relaxationszeit des in den kleinen Poren des Zementsteins befindlichen Wassers liegt.

Diese Schwäche der vorgestellten Messeinrichtung, dass das stark gebundene Wasser im Zementgel hiermit nicht erfassbar ist, kann auch als Vorteil genutzt werden, da erst hierdurch die Umverteilung des Porenwassers in das Zementgel des Beton zumindest indirekt beobachtet wird.

Im Rahmen dieser Arbeit wird mit WUFI versucht diese Umverteilung des Porenwassers modellhaft nachzubilden und die Transportkoeffizienten dabei solange anzupassen bis eine optimale Übereinstimmung der berechneten „messbaren“ Feuchteverteilungen mit den Messergebnissen erreicht wird. Der Probekörper wird dazu rechnerisch in zwei Schichten unterteilt, eine Schicht nur mit normalen Kapillarporen und eine Schicht mit den Gelporen. Es wird auf diese Weise, trotz des verwendeten sehr einfachen Ansatzes eine akzeptable Übereinstimmung erreicht, indem für den Zementgelbereich die Kapillartransportkoeffizienten um den Faktor 100 niedriger angesetzt werden als für den Beton mit seinen Kapillarporen. Gemäß diesen Ergebnissen, scheint der Flüssigtransport in den Gelporen erst nach einer Zeitverzögerung von etwa neun Stunden und dann wesentlich langsamer als in den Kapillarporen abzulaufen.

Es ist klar, dass dies nur einen ersten Schritt zum Verständnis der im Beton ablaufenden Vorgänge darstellt. Weitere messtechnische Untersuchungen müssen noch erfolgen. Vor allem aber sollte das vorgestellte einfache Modell weiterentwickelt und verbessert werden, um auch Effekte wie die Selbstabdichtung des Betons erklärbar zu machen.

Die dargestellten Untersuchungen wurden im Rahmen eines Forschungsvorhabens

zum Schwerpunktthema „Vorhersage des zeitlichen Verlaufs von physikalisch-chemischen Schädigungsprozessen an mineralischen Baustoffen“ von der DFG gefördert.

## Literatur

- [1] B. Schwarz, *Die kapillare Wasseraufnahme von Baustoffen*, Gesundheitsingenieur 93 (1972), H. 7, S. 206-211.
- [2] K. Winter, M. Krus, H.M. Künzel, *Feuchtetransport in feinporigen Materialien*, Intern. Zeitschrift für Bauinstandsetzen 3 (1997), H. 1, S. 1-14.
- [3] M. Krus, H.M. Künzel, *Das Wasseraufnahmeverhalten von Betonbaustoffen*, IBP-Mitteilung 22 (1995) Nr. 273.
- [4] R.E. Beddoe, und R. Springenschmid, *Feuchtetransport durch Bauteile aus Beton*, Beton- und Stahlbetonbau 94 (1999) H. 4, S.158-166
- [5] N. Hearn, and C.T. Morley, *Self-Sealing Property of Concrete - Experimental Evidence*, Materials and Structures 30 (1997), S.404-411
- [6] B.K. Marsh, et al., *The effect of solvent replacement upon the pore structure characterisation of portland cement paste*, Proceedings, Principles and Applications of Pore Structural Characterisation, Milan/Italy, 1983.
- [7] M. Sosoro, *Modell zur Vorhersage des Eindringverhaltens von organischen Flüssigkeiten in Beton*, Diss. Universität Stuttgart 1994.
- [8] A. Volkwein, *Untersuchungen über das Eindringen von Wasser und Chlorid in Beton*, Berichte aus dem Baustoffinstitut der TU München (1991), H. 1, S. 1-131.
- [9] C. Hall, et al., *Water anomaly in capillary liquid absorption by cement-based materials*, Journal Of Materials Science Letters 14 (1995), p. 1178-1181.
- [10] A. Holm, M. Krus, H.M. Künzel, *Grenzen der Feuchtetransportberechnung bei Betonaußenbauteilen*, Tagungsband 5. Internationales Kolloquium – Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen. AEDIFICATIO Publishers, Freiburg 1999, S. 405-414.

- [11] M. Krus, K. Kießl, *NMR-Messung kapillarer Flüssigkeitsbewegungen in porösen Gesteinen und Ableitung neuer Kapillartransport-Kenngrößen*, Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinzerfall – Steinkonservierung (1989), Band 1, Verlag Ernst & Sohn, S. 39-45.
  
- [12] M. Krus, *Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe*, Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken. Dissertation Universität Stuttgart 1995.
  
- [13] H.M. Künzel, *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten*, Dissertation Universität Stuttgart (1994)