

Beton- und Stahlbetonbau

102. Jahrgang, Juli 2007 Nr. 7



■ **Transport von drückendem Wasser in Betonbauteilen**
Petra Rucker, Robin E. Beddoe

■ **Kein kritischer Wasserdampfdurchtritt in WU-Betonkonstruktionen**
Michael Schäper, Jörn Kreye



**HEIDELBERGER
BETON**
HEIDELBERGCEMENT Group

Petra Rucker
Robin E. Beddoe

Transport von drückendem Wasser in Betonbauteilen

Der Einfluss von Wasserdruck auf den Transport von Feuchte durch Beton wurde untersucht. Dazu wurden die Aufnahme von drückendem Wasser und die Feuchteabgabe an der gegenüberliegenden trockenen Seite von Betonzyklindern unterschiedlicher Höhe über einen Zeitraum von 500 Tagen gemessen. Zusätzlich wurde ^1H Kernspinresonanz (NMR) eingesetzt, um direkt Wassereindringprofile in Mörtelprismen zu beobachten.

Den Untersuchungen zufolge wird sowohl die Eindringtiefe als auch die Menge des aufgenommenen Wassers durch die Selbstabdichtung des Betons begrenzt. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Feuchtetransport durch Bauteile aus WU-Beton mit einer Dicke von mindestens 200 mm auch bei der Wirkung einer Druckwassersäule von 50 m vernachlässigbar gering ist. Ist ein Bauteil einer drückenden NaCl-Lösung ausgesetzt, wird das Eindringen der Salzlösung ebenfalls durch die Selbstabdichtung reduziert. Im Vergleich zu Wasser dringen Salzlösungen langsamer ein und weniger Flüssigkeit wird aufgenommen.

Effect of Water Pressure on Moisture Transport in Concrete Structural Components

The effect of water pressure on moisture transport in concrete has been investigated. The uptake of water under pressure at an end surface of concrete cylinders and the release of moisture at the opposite dry surface were measured over a period of 500 days. In addition, ^1H NMR was used to observe directly the penetration of water into mortar prisms. The results show that penetration depth and amount of absorbed water are both limited by the self-sealing effect in concrete. It is concluded that moisture transport through water-tight concrete thicker than 200 mm is negligible for water pressures up to 5 bar. Self-sealing also reduces liquid penetration when concrete is exposed to NaCl solutions under pressure. The penetration of salt solutions is slower than water, less liquid being taken up.

1 Einleitung

Bodenplatten und Wände aus Beton wie Weiße Wannen, die in direktem Kontakt mit Wasser oder dem Erdreich stehen, können einem ständigen oder zeitweise auftretenden Wasserdruck ausgesetzt sein. Die hochwertige Nutzung von Räumen auf der Innenseite solcher Bauwerke setzt voraus, dass der Transport des außen anstehenden Wassers durch das Betonbauteil hindurch so gering ist, dass der Einfluss auf das Innenraumklima vernachlässigbar ist. Die Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit solcher Bauteile werden in der DAfStb-Richtlinie „Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton“ (WU-Richtlinie) ge-

regelt [1]. Voraussetzung für die Wirksamkeit dieser Bauweise ist neben der fachgerechten Ausführung unter Berücksichtigung der Regeln zur Rissbreitenbeschränkung die Einhaltung bestimmter Mindestdicken bei geeigneter Betonqualität. Je nach Ausführungsart wird hier für die Mindestdicke des Bauteils ein Wert zwischen 200 und 250 mm empfohlen, der allgemein für den Kontakt mit drückendem und nicht drückendem Wasser sowie zeitweise aufstauendem Sickerwasser gilt.

Basierend auf Versuchen an Betonzyklindern unterschiedlicher Höhe, die über die obere Stirnseite austrockneten, während sie über die untere Stirnseite nichtdrückendes Wasser aufnahmen (Fußbadlagerung), wurde ein einfaches Arbeitsmodell zur Beschreibung des Transports von Feuchte durch Betonbodenplatten aus WU-Beton, die außenseitig in Kontakt mit Wasser stehen, entwickelt [2]. Danach bilden sich ein innenseitiger Austrocknungsbe- reich bis in eine Tiefe von rd. 80 mm und ein wasserseitiger Kapillarbereich mit einer Tiefe von rd. 70 mm aus. Bei Bauteildicken von weniger als etwa 150 mm überschneiden sich diese Bereiche, was zu einem verstärkten Feuchtetransport durch das Bauteil führt. Dies hat zur Folge, dass der Wassergehalt des Betons ansteigt und somit eine größere Feuchtigkeitsmenge an die Innenseite abgegeben wird. Die Ursache für den verstärkten Feuchtetransport bei Überschneidung des Austrocknungs- und Kapillarbereichs wird durch den Mechanismus Verdampfungsfließen und durch Aufheben des Selbstabdichtungseffekts im Beton erklärt. Mit Verdampfungsfließen wird hier der erhöhte Feuchtetransport mit zunehmender Bauteilfeuchte erklärt, der sich in der Abnahme der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ mit zunehmender Feuchte widerspiegelt. Bei größeren Bauteildicken überschneiden sich der Austrocknungs- und Kapillarbereich nicht, so dass der Feuchtetransport durch das Bauteil gering ist. Die innen-seitige Wasserdampf-abgabe wird in diesem Fall im Wesentlichen von der Abgabe der Betoneigenfeuchte bestimmt. Auf der Grundlage dieses Arbeitsmodells kommt man in [3] zu dem Schluss, dass sich Betonbauwerke, die als Weiße Wanne mit ausreichend niedrigem Wasserzementwert ausgeführt werden, langfristig hinsichtlich der Beeinflussung des Innenraumklimas gleich verhalten wie beispielsweise Schwarze Wannen, d. h. Bauteile mit außenseitiger Abdichtung. Berechnungen, die in [4] dokumentiert sind, veranschaulichen, dass Feuchteschäden an der Innenseite von WU-Konstruktionen meist der Bildung von Kondenswasser infolge kühler Oberflächen bei unzu-

reichender Wärmedämmung und unzureichender Belüftung zuzuschreiben sind. Dass eine zusätzliche wasserseitige Abdichtung unabhängig vom anstehenden Wasserdruck im Hinblick auf die Wasserdampfabgabe an den Innenraum wirkungslos ist, solange die Anforderungen an die WU-Richtlinie eingehalten werden, ist im Positionspapier des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton zur WU-Richtlinie [5] unlängst bekräftigt worden.

Der Einfluss des Wasserdrucks auf die Mechanismen, die das Innenraumklima von Bauteilen aus WU-Beton bestimmen, ist bisher nicht eindeutig geklärt. Erste mit [2] vergleichbare Untersuchungsergebnisse [6] zeigen, dass das Eindringen von Wasser weitgehend unabhängig von einem Wasserdruck bis 5 bar ist. Bei dünnen Probekörpern (rd. 45 mm) wurden hier zwar durch Variation des anstehenden Drucks bis 5 bar Unterschiede in der abgegebenen Wasserdampfmenge an die Trocknungsseite beobachtet. Bei Probekörpern mit einer Dicke ab 200 mm konnte allerdings kein Einfluss des anstehenden Druckwassers auf die innenseitige Abgabe von Wasserdampf festgestellt werden.

Gegenstand dieser Arbeit ist die Klärung des Druckeinflusses auf den Transport von Feuchte durch WU-Betonbauteile unterschiedlicher Dicke über einen längeren Zeitraum. Dazu wurden Betonzylinder aus WU-Beton entsprechend der WU-Richtlinie [1] über einen Zeitraum von knapp zwei Jahren einseitig mit drückendem Wasser beaufschlagt und die Wasserdampfabgabe an den trockenen Innenraum zeitgleich mit der Wasseraufnahme beobachtet. Simulierend für Regionen, in denen Betonkonstruktionen drückendem Salzwasser ausgesetzt sind, wurden zusätzlich Versuche mit 3,3 M.-% Natriumchloridlösung, die dem mittleren Salzgehalt der Nordsee entspricht, durchgeführt. Zusätzlich wurden Eindringprofile von drückendem Wasser in einen Mörtel mittels H^1 Kernspinresonanzmessungen beobachtet, um Rückschlüsse auf die Mechanismen ziehen zu können.

2 Feuchtetransportvorgänge in Betonbauteilen

Die Geschwindigkeit, mit welcher das Porensystem des Betons Wasser aufnimmt, wird im Wesentlichen von dem internen Kapillardruck p_K des Wassers in den saugenden Poren, der Höhe des externen hydrostatischen Drucks p sowie der bremsenden Wirkung des viskosen Widerstands des Porenwassers und der Selbstabdichtung des Betons bestimmt. Ohne Berücksichtigung der Wirkung der Selbstabdichtung würde das Wasser nach dem Wurzel-Zeit-Gesetz bis in die Tiefe h des Betongefüges eindringen.

$$h \sim \sqrt{(p + p_K)t} \quad (1)$$

Während bei grobporigen Materialien wie Sandstein die Aufnahme von Wasser i. A. linear mit der Wurzel der Zeit erfolgt, dringt Wasser in das feinporige Gefüge des Betons mit zunehmender Zeit deutlich langsamer ein, als es nach dem Wurzel-Zeit-Gesetz zu erwarten wäre. Dieser Effekt wird als Selbstabdichtung bezeichnet. Der Mechanismus der Selbstabdichtung gegen eindringendes Wasser bei kapillarem Saugen wird nach [7] hauptsächlich durch die Umlagerung von Wasser aus den Kapillarporen in den

Gelporenraum verursacht. Durch das Quellen der Gelporen wird die Kontinuität des Kapillarporenraums reduziert und dadurch die Wasseraufnahme des Betons gebremst [8]. Die Geschwindigkeit der Wasserumlagerung ist wesentlich langsamer als das anfängliche Kapillarsaugen, wobei die Stärke der Abweichung vom Wurzel-Zeit-Verhalten mit der Menge des Gelporenwassers zunimmt.

Neben der Kapillarleitung wird der Transport von Feuchte in Betonbauteilen von der Wasserdampfdiffusion beeinflusst. Sie ist bestimmend für die Abgabe der Feuchte an der Innenseite von WU-Bauteilen.

3 Messung von Wassergehaltsprofilen mittels Kernspinresonanz

3.1 Probenvorbereitung

Zur Beobachtung des Eindringens von drückendem Wasser mit Kernspinresonanz (NMR) wurde ein Balken ($700 \cdot 150 \cdot 150 \text{ mm}^3$) aus Mörtel mit Münchner Sand mit 515 kg/m^3 CEM I 42,5 R und einem w/z-Wert von 0,60 hergestellt. Der Balken wurde nach 24 h ausgeschalt und unter Wasser gelagert. Im Alter von drei Tagen wurden Prismen mit einer Querschnittsfläche von $45 \cdot 45 \text{ mm}^2$ und einer Länge von 100 bis 250 mm aus dem zentralen Bereich des Balkens herausgesägt, um den Einfluss der Schal- bzw. Einfüllseite auszuschließen. Nach einer dreimonatigen Wasserlagerung trockneten die Probekörper zunächst rd. einen Monat bei $50 \text{ }^\circ\text{C}$ und wurden anschließend bis zur Massekonstanz im Umgebungsklima $23 \text{ }^\circ\text{C}/50\% \text{ r.F.}$ gelagert, so dass das Alter zu Prüfbeginn mindestens ein Jahr betrug. Im Anschluss an die Vorlagerung wurden die Mantelflächen der Prismen mit einer mehrlagigen Epoxydharzbeschichtung versehen, um den Verlust bzw. die Aufnahme von Feuchte über die Mantelflächen vernachlässigbar gering zu halten und eindimensionale Transportbedingungen sicherzustellen. Vor Versuchsbeginn wurden die Stirnflächen der Probekörper mit einer Drahtbürste aufgeraut und die Ausgangsmasse der Prismen erfasst.

3.2 Versuchsdurchführung

Nach Wägung der Prismen im Anschluss an die Vorlagerung wurde zunächst eine Trockenmessung mittels NMR durchgeführt. Für die Untersuchung wurden die Probekörper in eine Druckapparatur (Bild 1) eingebaut, mit der sie einseitig mit dem jeweiligen Wasserdruck beaufschlagt wurden. In den Räumen, in denen die Versuche durchgeführt wurden, betrug die Temperatur durchschnittlich $20 \text{ }^\circ\text{C}$ und die relative Luftfeuchte durchschnittlich $40\% \text{ r.F.}$, so dass an der gegenüberliegenden Stirnseite des Prismas von diesem Umgebungsklima ausgegangen werden kann.

Zu definierten Zeiten wurden der integrale Wassergehalt mittels Wägung ermittelt und eine NMR-Messung entlang des Mörtelprismas in engen Messpunktabständen ($< 1 \text{ mm}$) durchgeführt. Das gemessene Signal ist bei grobporigen Materialien proportional der Anzahl der im Messvolumen vorhandenen Wasserstoff-Protonen und somit zum Wassergehalt in der Probe [9]. Aus dem Verhältnis der gravimetrisch ermittelten aufgenommenen Wassermenge der gesamten Probe und dem integralen NMR-



Bild 1. Beaufschlagung der Mörtelprismen mit drückendem Wasser; die Ränder der Prismen wurden mit schmalen Gummidichtungen abgedichtet
Fig. 1. Exposure of mortar prisms to water pressure. Narrow rubber seals were used to provide water-tight connections at the prism surfaces

Messsignal, welches durch das aufgenommene Wasser über die gesamte Probekörperhöhe erzeugt wird, ergibt sich ein Faktor F . Mit diesem Faktor F werden die einzelnen Messpunkte der NMR-Messung multipliziert, um Wassergehaltsprofile in Liter/m^3 zu berechnen. Für die hier gezeigten Untersuchungen wurde der Faktor F an einem Probekörper bestimmt, in den über einen Zeitraum von einer Stunde Wasser ohne einen zusätzlichen äußeren Druck kapillar eingedrungen war. Dabei wird angenommen, dass nach dieser kurzen Zeit das Messsignal hauptsächlich durch den Wassergehalt in den Kapillarporen bestimmt wird, die eine im Vergleich zum Gelporenraum hohe Sauggeschwindigkeit aufweisen.

3.3 Ergebnisse

Bild 2 zeigt einen Versuch, bei welchem die Stirnseite eines Prismas mit einer Höhe von 144 mm über einen Zeitraum von rd. 550 Stunden mit einem Wasserdruck von 1 bar beaufschlagt wurde. Die Ergebnisse der gravimetrischen Wassergehaltsbestimmung sind im Bild 2a) links dargestellt. Innerhalb der ersten Stunden verläuft die

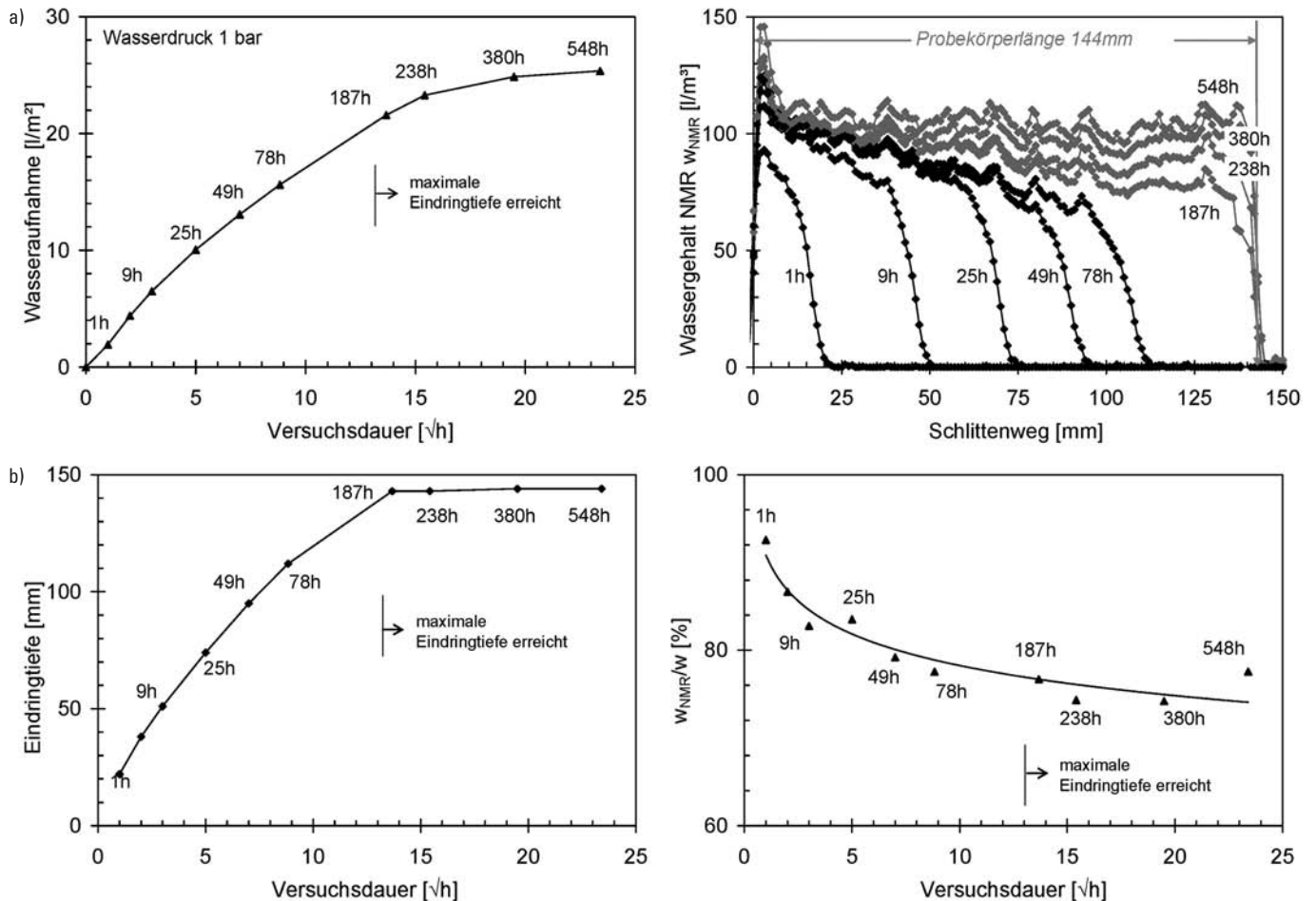


Bild 2. Ergebnisse für den untersuchten Mörtel, $515 \text{ kg}/\text{m}^3$ CEM I 42,5 R, $w/z = 0,60$; a) links: integrale Wasseraufnahme über eine Stirnseite des untersuchten Prismas abhängig von der Wurzel der Zeit; a) rechts: mittels Kernspinresonanz ermittelte Wassereindringprofile w_{NMR} ; b) links: NMR Eindringtiefe abhängig von der Wurzel der Zeit; b) rechts: integraler Wassergehalt w_{NMR} berechnet aus den Eindringprofilen aus den NMR-Messungen bezogen auf den gravimetrisch ermittelten integralen Wassergehalt w

Fig. 2. Results for the investigated mortar, $515 \text{ kg}/\text{m}^3$ CEM I 42.5 R, $w/c = 0.60$, a) left: total water uptake by a prism end face as a function of the square root of time, a) right: water penetration profiles w_{NMR} determined by NMR, b) left: penetration depth by NMR as a function of the square root of time, b) right: total water content w_{NMR} calculated from NMR penetration profiles expressed as fraction of total water content w determined by weighing

Wasseraufnahme annähernd linear mit der Wurzel der Zeit. Später weicht das Wasseraufnahmeverhalten zunehmend vom Wurzel-Zeit-Gesetz ab. Im Bild 2a) rechts sind die mittels kernmagnetischer Resonanz ermittelten Eindringprofile des Wassers in den Probekörper dargestellt. Nach einer Versuchsdauer von 187 Stunden hat das Wasser bereits das Ende des Probekörpers erreicht. Mit zunehmender Versuchsdauer wird jedoch weiter Wasser aufgenommen und der Wassergehalt steigt über die gesamte Probekörperlänge an, bis ein gleichmäßiger Wassergehalt erreicht wird. Hier wird der Effekt der unterschiedlichen Porengrößen im Porensystem deutlich. Zunächst wird die Wasseraufnahme vornehmlich durch die großen Kapillaren dominiert, die aufgrund des geringen Strömungswiderstands schnell das Wasser aufsaugen und weitertransportieren bis der Probekörper durchdrungen ist, vgl. 2a) rechts, rd. 187 h. Mit fortschreitender Zeit füllen sich zunehmend kleinere Poren, die aufgrund des geringeren Durchmessers einen erhöhten Strömungswiderstand aufweisen und somit das Kapillarwasser langsamer aufnehmen und weiterleiten. Aus den Fronten der Feuchteprofile wurden entsprechende Eindringtiefen abgelesen, Bild 2b) links. Demnach erfolgt nicht nur die Wasseraufnahme, sondern auch das Eindringen der Wasserfront mit der Zeit zunehmend langsamer als nach \sqrt{t} .

Wassereindringen erfolgt unter Druck mit zunehmender Zeit langsamer als nach \sqrt{t} .

Untersuchungen, die in [9] dokumentiert sind, zeigen, dass durch das verwendete NMR-Gerät lediglich Wasser erfasst wird, welches sich innerhalb von Poren befindet, die einen Radius größer als rd. 5 nm haben. Wasser, welches in den Gelporenraum eingelagert wird, wird demnach durch das verwendete Gerät nicht erfasst. Bild 2b) rechts stellt abhängig von der Wurzel der Zeit den Anteil an aufgenommenem Wasser dar, der mittels NMR-Messung erfasst wird. w_{NMR}/w ist das Verhältnis zwischen dem Wassergehalt aus NMR w_{NMR} und dem gravimetrisch ermittelten Wassergehalt w . Die Änderung von w_{NMR}/w ist ein Hinweis auf die Wassermenge, die aus den Kapillarporen in die Gelporen umgelagert wird. Mit zunehmender Versuchsdauer wird offensichtlich ein zunehmender Anteil des aufgenommenen Wassers in den Gelporenraum umgelagert.

Nach der Methode von *Powers* und *Brownyard* wurde der Anteil an Gelporen für den vollständig hydratisierten Mörtel zu 100 l/m^3 berechnet. Bei der Gleichgewichtsfeuchte des Mörtels im Umgebungsklima $23 \text{ }^\circ\text{C}/50\% \text{ r.F.}$, die zu Versuchsbeginn vorlag, wurde eine Porenfüllung von 42 l/m^3 gemessen. Es ist aus diesem Grund davon auszugehen, dass ausreichend Gelporenraum (rd. 60 l/m^3) für die Umverteilung vorhanden ist.

Durch Variation der Probekörperhöhe sollte festgestellt werden, inwieweit Oberflächeneinflüsse und Randbedingungen an der dem Wasser abgewandten trockenen Probenseite das kapillare Eindringverhalten beeinflussen. Die für diese Versuche verwendeten Prismen hatten eine Höhe von 66, 116, 174 und 191 mm. Der Wasserdruck betrug bei allen Probekörpern 1,0 bar. Bild 3 zeigt die entsprechenden Versuchsergebnisse.

Unabhängig von der Höhe der Mörtelprismen schreitet die Eindringfront des Wassers bei einer zunehmenden Abweichung vom Wurzel-Zeit-Gesetz mit nahezu identischer Geschwindigkeit in den einzelnen Probekörpern voran, bis das Ende des Probekörpers erreicht ist. Bis zu diesem Zeitpunkt verläuft die Aufnahme der Menge an anstehendem Wasser ebenfalls identisch. Nachdem das Ende der Probekörpertiefe erreicht ist, werden entsprechend dem zuvor beschriebenen Versuch (Bild 2) die Poren kleineren Durchmessers durch weitere Wasseraufnahme gefüllt, was sich in Bild 3a) links in der zwar stark reduzierten aber fortlaufenden Wasseraufnahme nach vollständiger Durchdringung des Probekörpers bemerkbar macht.

Bild 3b) links zeigt, dass nach einer Versuchsdauer von beispielsweise 80 h nur noch rund 80% des tatsächlich im Probekörpervolumen enthaltenen Wassers durch die NMR-Messung erfasst wird, was bedeutet, dass ein Anteil des aufgenommenen Wassers von rund 20% in den kleinen Gelporen der Zementsteinmatrix (Porenradius $< 5 \text{ nm}$) gebunden ist. Bild 3b) rechts zeigt die Auswirkung des in die Gelporen umverteilten Wassers auf das Ausmaß der vom Wurzel-Zeit-Gesetz abweichenden Wasseraufnahme. Mit zunehmender Menge an Gelporenwasser nimmt die Abweichung vom Wurzel-Zeit-Gesetz für alle untersuchten Proben zu, d. h. der Selbstabdichtungseffekt wird mit der Zunahme des in die Gelporen umverteilten Wassers verstärkt. Aufgrund der hohen wasserführenden Porosität (freie Wassersättigung $w_f = 188 \text{ kg/m}^3$) der verwendeten Mörtelprismen durchdringt das Wasser unabhängig von der Höhe den Probekörper schon nach kurzen Saugzeiten. Weil die Umlagerung des Wassers in die Gelporen relativ langsam geschieht, ist die selbstabdichtende Wirkung der Zementsteinmatrix hier nicht so ausgeprägt, dass diese ein Durchdringen des Probekörpers verhindert. Der Einfluss der großen Kapillaren, die den Transport bestimmen, überwiegt hier. Der Einfluss der trockenen Probenrückseite ist bei diesen kurzen Saugzeiten gering.

In einer zweiten Versuchsreihe wurden Prismen mit einer Höhe von 225 mm verwendet und der Wasserdruck zwischen 0,0 bar, 0,5 bar und 1,0 bar variiert, um den Einfluss des Wasserdrucks auf die Eindringtiefe und die Wasseraufnahme zu untersuchen.

Bild 4 zeigt die Entwicklung der Wasseraufnahme, der Eindringtiefe und des Verhältnisses w_{NMR}/w im Wurzel-Zeit-Maßstab sowie die mittels NMR gemessenen Eindringprofile bei Wasserdrücken von 0 bzw. 1 bar zu ausgewählten Zeitpunkten. Außerdem ist im Bild 4c) die Abweichung der Wasseraufnahme bzw. der Eindringtiefe vom Wurzel-Zeit-Gesetz der durch das NMR-Gerät nicht erfassten Menge an Wasser gegenübergestellt.

Wie erwartet steigt die aufgenommene Wassermenge und dementsprechend die Eindringtiefe mit dem Wasserdruck. Auch das drückende Wasser dringt deutlich langsamer ein, als nach dem Wurzel-Zeit-Gesetz zu erwarten wäre. Dem Verhältnis w_{NMR}/w zufolge, in Bild 4b) links für die Drücke 0 bar und 1 bar dargestellt, wird mit zunehmendem Druck ein mit der Zeit zunehmend höherer Anteil des Wassers aus Kapillarporen in kleine Gelporen umverteilt. Auch das Eindringen von drückendem Wasser scheint demnach durch den Selbstabdichtungseffekt verzögert zu werden. Bild 4c) zeigt, dass die Abweichung der Wasseraufnahme wie auch gleichermaßen die Abwei-

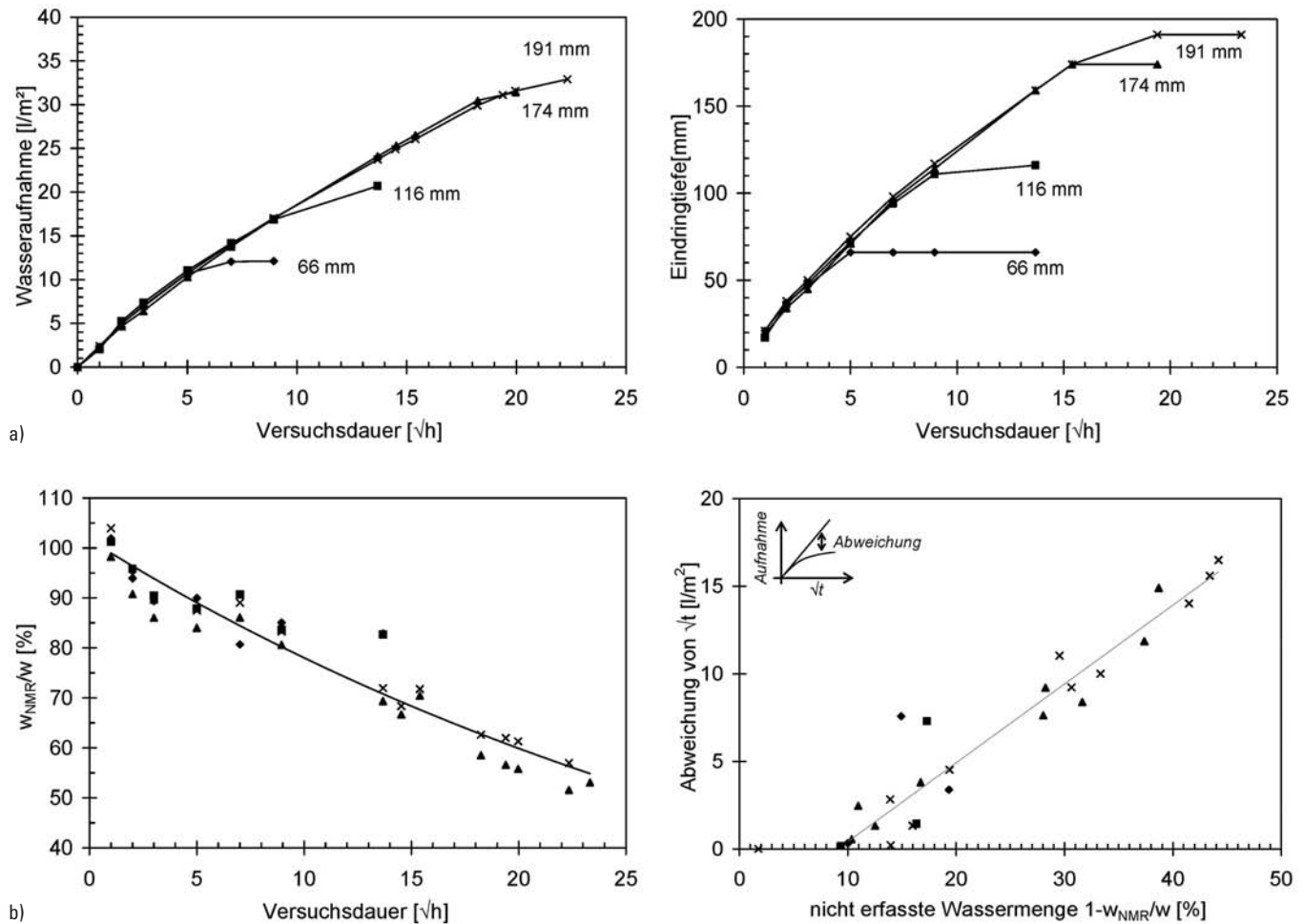


Bild 3. Eindringen von drückendem Wasser bei 1 bar abhängig von der Probekörperhöhe; a) links: Wasseraufnahme; a) rechts: NMR Eindringtiefe; b) links: NMR Wassergehalt w_{NMR} bezogen auf den gravimetrisch ermittelten integralen Wassergehalt w ; b) rechts: Abhängigkeit zwischen der Abweichung vom Wurzel Zeit-Gesetz und der durch das verwendete NMR-Messgerät nicht erfassten Menge Wasser, die ein Maß für die in den Gelporenraum umverteilte Wassermenge darstellt
 Fig. 3. Penetration of water at 1 bar for various specimen heights, a) left: water uptake, a) right: NMR penetration profiles, b) left: ratio of total NMR water w_{NMR} to total water by weighing w ; b) right: dependence of departure of water uptake from root time behaviour on amount of water not registered by NMR equipment – a measure of water redistributed into gel pores

chung der Eindringtiefe vom Wurzel-Zeit-Gesetz mit der Menge des umgeleiteten Wassers zunimmt. Dies gilt sowohl bei 0 bar wie auch bei 1 bar. Der Selbstabdichtungseffekt wird demnach maßgebend durch die Menge an Wasser bestimmt, die in den Gelporenraum umgelagert wurde. Es liegt die Vermutung nahe, dass infolge des Drucks ein größerer Anteil des eingedrungenen Wassers in kürzerer Zeit mit den Gelporen in Wechselwirkungen tritt und so der Selbstabdichtungseffekt schneller wirkt.

Unter Wasserdruck wirkt der Selbstabdichtungseffekt schneller.

Durch einen zusätzlichen äußeren Druck werden Poren, die zunächst durch kapillares Saugen nicht gefüllt werden bzw. dadurch alleine nicht zugänglich sind, mit Wasser gefüllt. Dies bewirkt eine Erhöhung des Sättigungsgrades durch Füllung einer zusätzlichen Anzahl an kleinen Poren, die durch Quellen auch zur Selbstabdichtung beitragen.

Die Versuche mittels H^1 Kernspinresonanz zeigen, dass durch den Einfluss hydrostatischen Drucks einerseits

das Eindringen des Wassers beschleunigt wird, andererseits erreicht jedoch durch den Druck das Wasser auch schneller den Gelporenraum, was zu einem schnelleren Einsetzen der Selbstabdichtung führt. Mit zunehmender Druckhöhe wird demnach die selbstabdichtende Wirkung beschleunigt und ist hier ausgeprägter. Unabhängig von der Druckhöhe ist das Maß der Selbstabdichtung davon abhängig, wie viel Wasser in den Gelporenraum umverteilt wurde.

4 Untersuchungen mit WU-Beton

4.1 Versuchsdurchführung

Unter Verwendung einer für die Praxis relevanten Betonrezeptur wurden Betonzylinder hergestellt, mit welchen Bauteildicken von 75, 100, 150, 200, 250, 300 und 400 mm simuliert werden sollten. Als Schalung dienten PVC-Rohre mit einem Innendurchmesser von 100 mm, die auf die entsprechenden Probekörperlängen zurechtgeschnitten wurden. Der WU-Beton hatte bei einem w/z-Wert von 0,50 einen Zementgehalt von 320 kg/m^3 CEM I 32,5 R. Als Gesteinskörnung wurden Münchener Kies und Sand der Sieblinie A/B 16 verwendet. Bei Prüfung der Wasser-

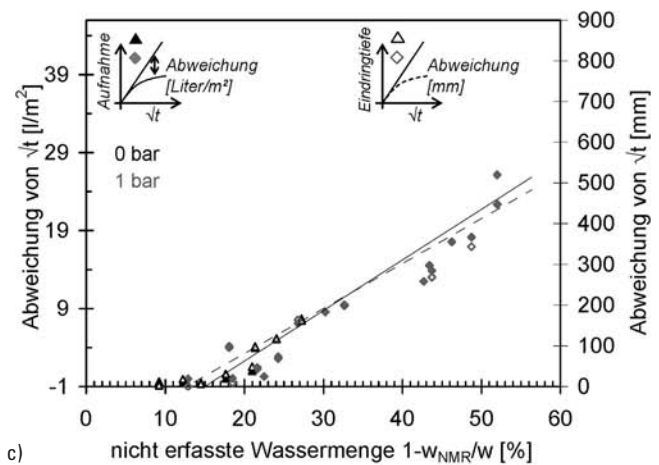
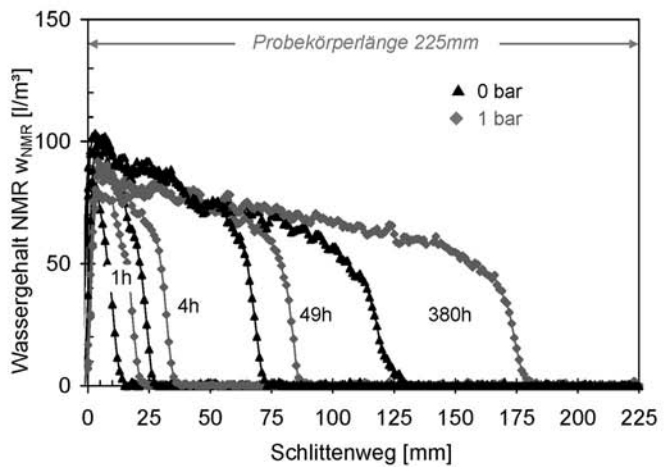
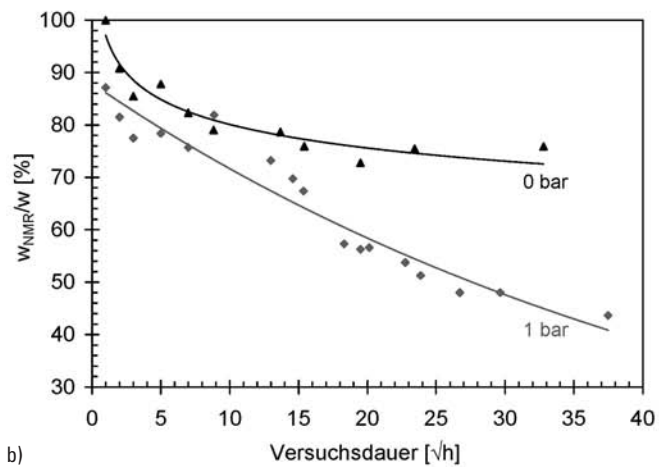
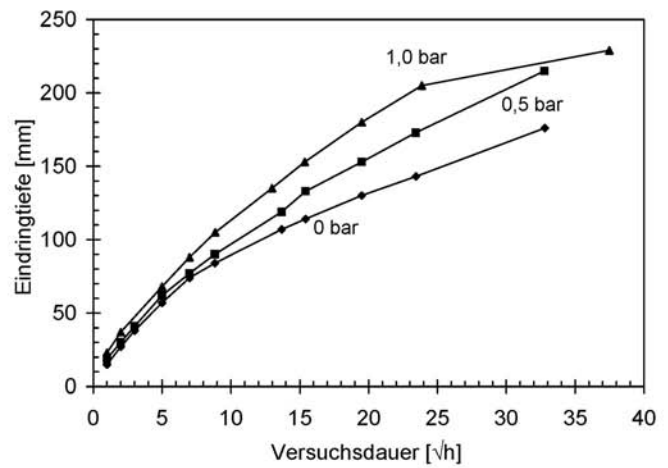
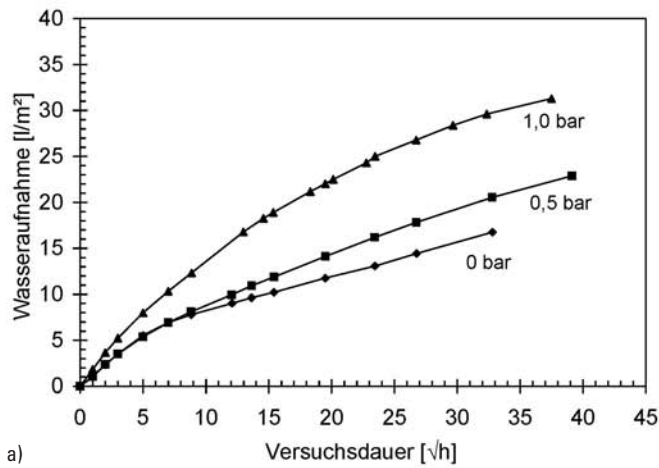


Bild 4. Einfluss von Wasserdruck; a) links: gravimetrische Wasseraufnahme; a) rechts: NMR-Eindringtiefe; b) links: Wasseranteil w/w_{NMR} ; b) rechts: Eindringprofile des Wassergehalts w_{NMR} für die Prismen, die mit 0 und 1 bar Wasserdruck beaufschlagt wurden; c) Abweichung der Wasseraufnahme bzw. der Eindringtiefe vom Wurzel-Zeit-Gesetz im Zusammenhang mit der durch das NMR-Gerät nicht erfassten Menge an Wasser

Fig. 4. Effect of water pressure, a) left: gravimetric water uptake, a) right: NMR penetration depths, b) left: water content ratio w_{NMR}/w , b) right: NMR penetration profiles for prisms exposed to 0 and 1 bar water pressure, c) dependence of departure of water uptake from root time behaviour on amount of water not registered by NMR equipment

eindringtiefe nach DIN 1048 Teil 5:1991 zeigte der Beton eine Wassereindringtiefe von 9 mm. Die Diffusionswiderstandszahl nach DIN EN ISO 12572:2001 (Versuchsbedingung A) betrug 128, nach DIN 12390 Teil 3:2002 wurde im Alter von 28 Tagen eine Druckfestigkeit von 40 N/mm² bestimmt.

In der Praxis werden Weiße Wannen teilweise bereits kurz nach Herstellung mit nicht drückendem oder drückendem Wasser beansprucht. Diese Bedingungen sollten für diesen Versuch simuliert werden. Die Probekörper wurden einen Tag in der Schalung belassen und bei einer relativen Luftfeuchte von 98% im Feuchteschrank gelagert. Nach einem Tag wurden die Zylinder ausgeschalt

und luftdicht in Kunststoffolie verpackt, um eine gleichmäßige Feuchteverteilung im Probekörper zu garantieren und einen möglichst hohen Hydratationsgrad zu erreichen. Um den Einfluss von Inhomogenitäten im Randbereich gering zu halten, wurden die Probekörper nach sieben Tagen an der Kopf- und Fußseite um mindestens 1 cm gekürzt und auf die gewünschte Höhe geschnitten. Die Oberflächen der Stirnseiten wurden mit einer Drahtbürste aufgeraut, um gleiche Bedingungen bezüglich der saugenden Fläche herzustellen. Anschließend lagerten die Zylinder bis zum Alter von 28 Tagen luftdicht verpackt bei 20 °C. Ab dem 28. Tag wurden die Probekörper an den Mantelflächen mehrlagig mit Epoxydharz beschichtet, um

eindimensionale Transportverhältnisse zu erreichen und ein Austrocknen dieser Flächen während der Versuche zu verhindern. Jeweils ein Probekörper je Höhenstufe wurde unter Ausparung einer Stirnseite komplett mit der mehrlagigen Epoxydharzbeschichtung versehen (Versuchsreihe „Eigenfeuchteabgabe“). Nach dem Trocknen der Epoxydharzschichten wurde auf eine Stirnseite aller Proben eine luftdichte Kappe aus thermoplastischem Kunststoff mit einem Hohlraum geklebt, innen zusätzlich abgedichtet und auf Luftdichtheit überprüft.

Im Alter von ca. 35 Tagen wurde auf die Unterseite der Zylinder der Versuchsreihe „Praxisfall: drückendes Wasser“ Wasser mit einem Druck von 1 bzw. 5 bar aufgebracht. Die Zylinder der Versuchsreihe „Praxisfall: nicht-drückendes Wasser“ wurden in ein Wasserbad gestellt. In den Hohlräumen der luftdichten Kappen sollte das Klima einer sehr trockenen Innenraumluft simuliert werden. Dazu wurde innerhalb der luftdichten Kappen auf einem Gitter ein mit Silicagel gefüllter Nylongewebebeutel gelagert, der im Hohlraum eine relative Feuchte von nominal 3% r.F. erzeugt.

Durch Wiegen der Probekörper und des Trocknungsmediums wurde über die Massenänderungen die Feuchteaufnahme und -abgabe über einen Zeitraum von rd. 500 Tagen ermittelt. Um die Wasserabgabe in den Trockenraum verfolgen zu können, wurde die Masseänderung des Trocknungsmittels durch Wägung ermittelt. Das Trocknungsmittel wurde regelmäßig, bevor die Sättigung erreicht war, ausgetauscht. Die Wasseraufnahme der Proben infolge drückenden bzw. nicht drückenden Wassers ergab sich aus der Massenänderung der Gesamtprobe, d. h. des Betonzylinders und der Kappe mit Trocknungsmittel.

Die Beaufschlagungs- und Trocknungsflächen, die durch eine mehrfache Epoxidharzbeschichtung begrenzt waren, hatten einen Durchmesser von 80 mm. In den folgenden Darstellungen liegt dieser Durchmesser den abgegebenen bzw. aufgenommenen Wassermengen über die Stirnseiten der Probekörper den angegebenen Mengen zu Grunde.

4.2 Ergebnisse

Unabhängig von der Höhe der Proben, die an ihrer Unterseite abgedichtet wurden, wird über 500 Tage in etwa die gleiche Menge der Betoneigenfeuchte an der Oberseite abgegeben, Bild 5. Da die minimal untersuchte Probenhöhe 75 mm betrug, bedeutet dies, dass auch bei den extremen Trocknungsbedingungen an der Oberseite die Austrocknungstiefe unter 75 mm liegt.

In Bild 6 sind jeweils für nicht drückendes Wasser (links) und einen Wasserdruck von 5 bar (rechts) die Ergebnisse für die Wasseraufnahme an der Unterseite, die Wasserabgabe an der Oberseite, die Änderung des Feuchtegehalts des Betons infolge Wasseraufnahme und -abgabe sowie die Wasserabgabe an der Oberseite abzüglich des Beitrags der Betoneigenfeuchte für verschiedene Probekörperhöhen dargestellt.

Der zeitliche Verlauf der Wasseraufnahme über die Unterseite (Bild 6a)) kann in zwei Zeitabschnitte aufgeteilt werden, die sowohl bei Beanspruchung mit drückendem als auch mit nicht drückendem Wasser zum Vor-

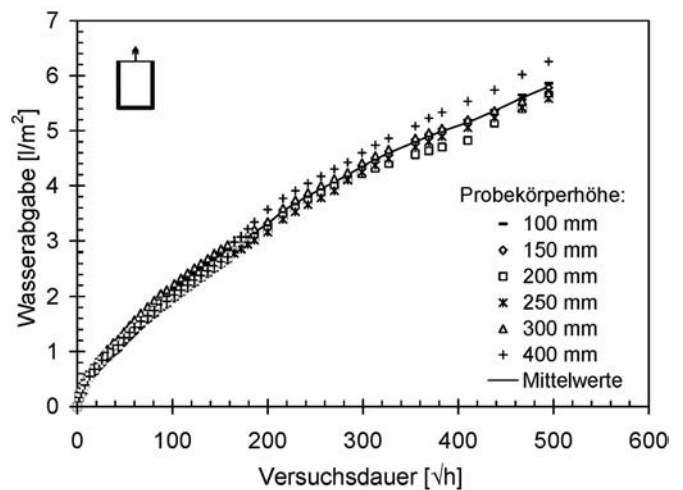


Bild 5. Eigenfeuchteabgabe in Abhängigkeit von der Probekörperhöhe

Fig. 5. Release of intrinsic moisture of concrete in dependence of specimen height

schein kommen. Während im Zeitabschnitt I die Wasseraufnahme mit zunehmender Zeit in geringerem Maße stattfindet, steigt die Wasseraufnahme im Zeitabschnitt II wieder an. Die Dauer, bis Zeitabschnitt II erreicht wird, sinkt mit abnehmender Probenhöhe. Vor allem bei dünneren Probekörpern nimmt nach einer gewissen Zeit die Wasseraufnahme verstärkt zu. Die Wasserdampf-abgabe an der Oberseite korreliert mit der Wasseraufnahme an der Unterseite. Dies wird vor allem bei Betrachtung der Wasserabgabe über die Oberseite abzüglich der reinen Eigenfeuchteabgabe über die Zeit verdeutlicht, vgl. Bild 6d). Dabei wird die abgegebene Wassermenge an den Innenraum dargestellt, die sich infolge der Fußbadlagerung bzw. Druckbeaufschlagung an der Unterseite durch den Probekörper ergibt. Mit abnehmender Probenhöhe findet tendenziell ein verstärkter Feuchtetransport durch die Probekörper hindurch statt. Mit Ausnahme des 75 mm hohen Probekörpers bewirkt hierbei eine Zunahme des Wasserdrucks eine vergleichsweise leicht erhöhte Wasserabgabe an den Innenraum. Bis zum Zeitpunkt der zunehmenden Wasserabgabe an den Innenraum – d. h. Eintritt von Zeitabschnitt II – wird im Wesentlichen nur die Betoneigenfeuchte abgegeben, wobei der Zeitpunkt der Zunahme der Wasserabgabe mit zunehmender Probendicke später eintritt.

Bei Probekörperhöhen > 150 mm ist kaum Druckeinfluss auf die Wasserdampf-abgabe zu erkennen.

Dieses Verhalten kann mit dem einfachen Arbeitsmodell in [2] erklärt werden. Im Laufe der Zeit dringt die kapillare Eindringfront tiefer in den Probekörper hinein, bis es je nach Probekörperhöhe zum Kontakt mit dem obigen Austrocknungsbereich und dadurch zur Erhöhung des Feuchtetransports durch den Beton kommt und Verdampfungsfließen den Transport von Feuchte durch den Beton erhöht.

Bild 7 zeigt den Einfluss der Druckhöhe auf den Wassertransport für Probenhöhen von 75 mm und 200 mm.

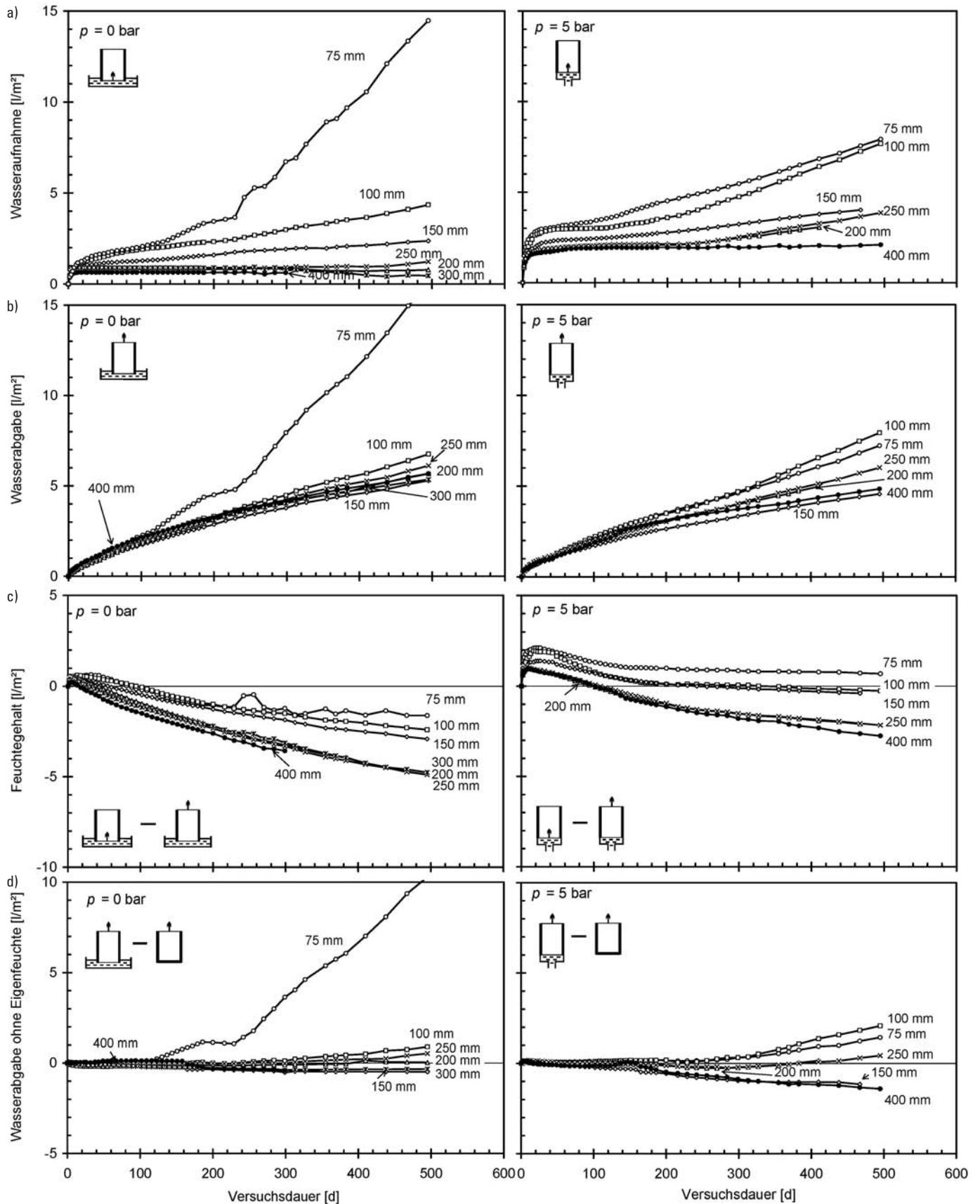


Bild 6. Einfluss der Probenhöhe: Kapillare Wasseraufnahme, Wasserdampfabgabe, Feuchtegehalt und Wasserdampfabgabe abzüglich Betoneigenfeuchte bei Fußbadlagerung bzw. 5 bar Wasserdruckbeanspruchung

Fig. 6. Effect of specimen height for pressures of 0 and 5 bar: capillary uptake, release of water vapour, moisture content and water vapour release minus release of intrinsic moisture

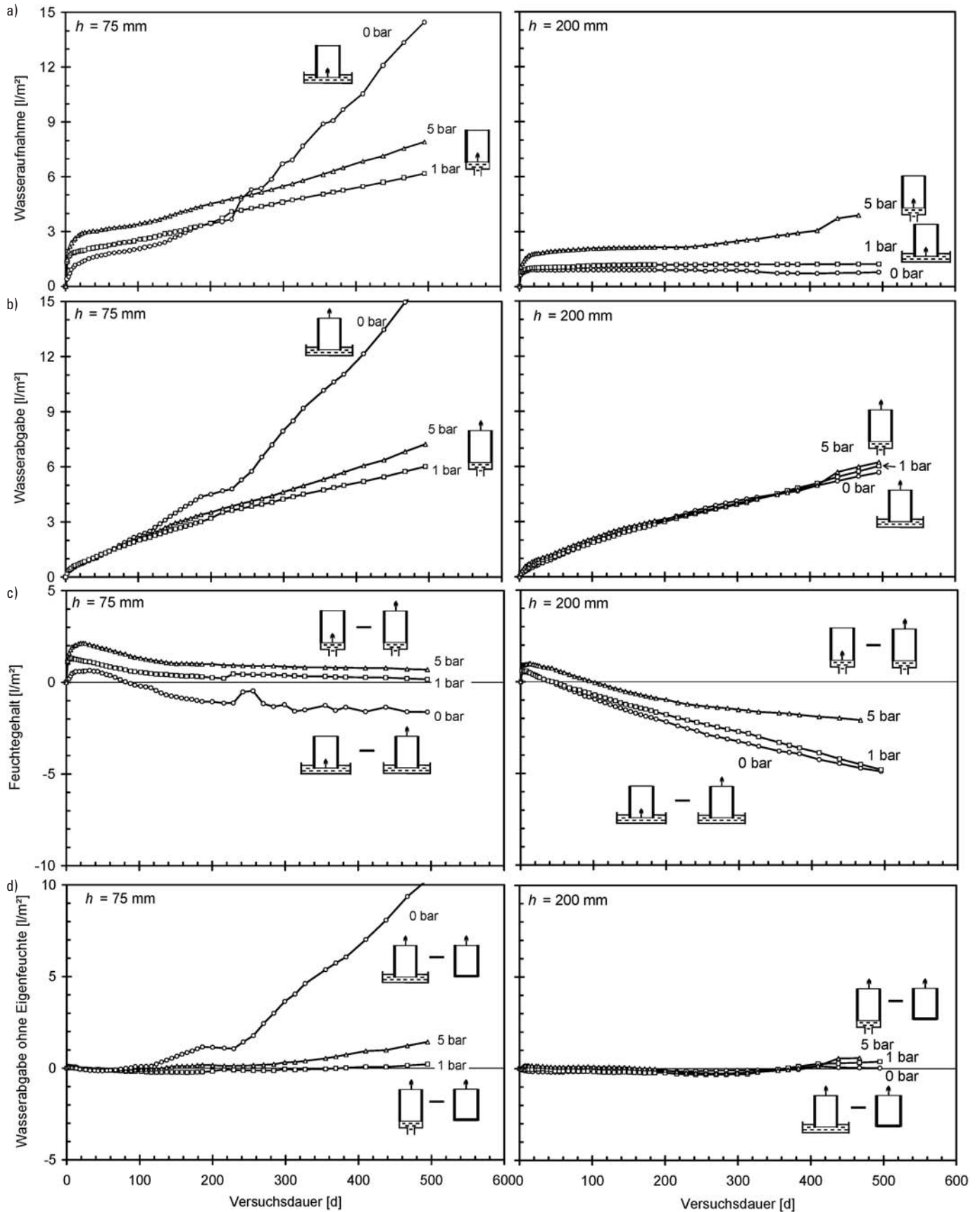


Bild 7. Einfluss der Druckhöhe (0 bar, 1 bar, 5 bar): Kapillare Wasseraufnahme, Wasserdampfabgabe, Feuchtegehalt und Wasserdampfabgabe ohne Betoneigenfeuchte bei Probenhöhe von 75 und 200 mm

Fig. 7. Effect of pressure (0, 1 and 5 bar) for specimen heights of 75 and 200 mm: capillary uptake, water vapour release, moisture content and water vapour release minus release of intrinsic moisture

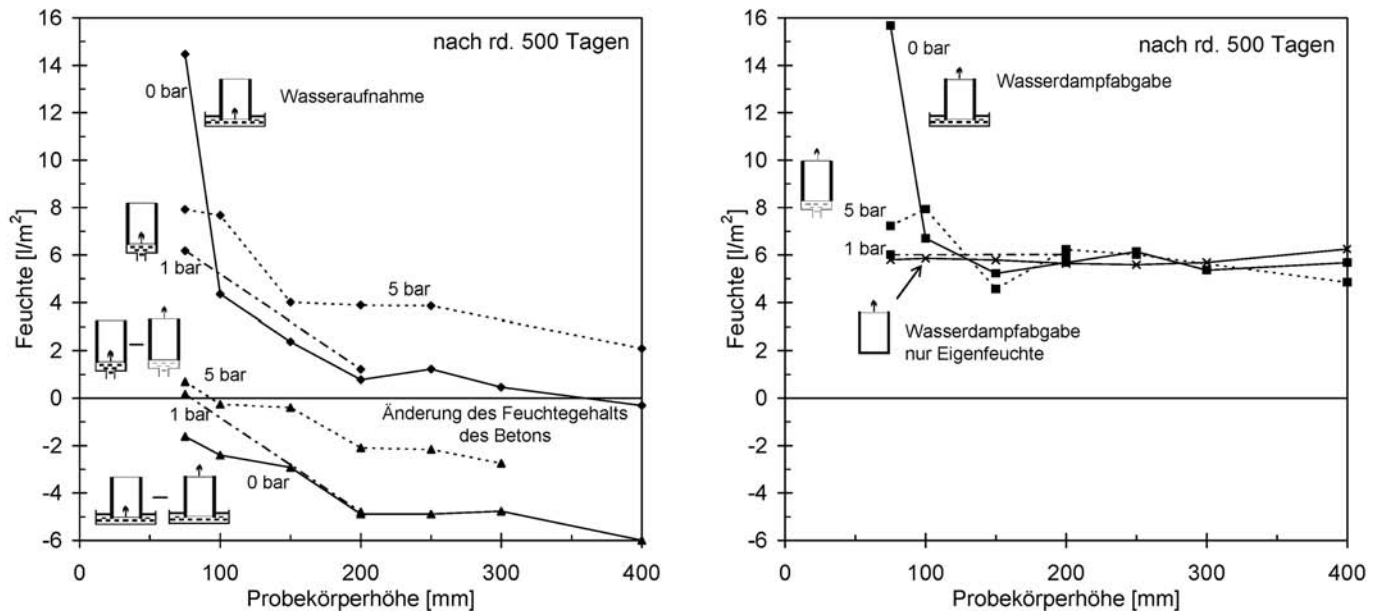


Bild 8. Einfluss von Druck und Probenhöhe auf, links, die Wasseraufnahme an der Betonunterseite und den Feuchtegehalt des Betons sowie, rechts, die Wasserdampfabgabe an der Betonoberseite und die Abgabe der Betoneigenfeuchte nach 500 Tagen

Fig. 8. Effect of pressure and specimen height on, left, water uptake at the bottom concrete surface and moisture content of concrete and on, right, water vapour release at the top surface and the release of intrinsic moisture after 500 days

Bei Probekörpern mit Höhen von 200 mm werden in den ersten ca. 250 Tagen unabhängig von der Höhe der Druckbeanspruchung Feuchtemengen in der Größenordnung der Betoneigenfeuchte an der Oberseite abgegeben, Bild 7b) rechts. Auch nach einem Zeitraum von 500 Tagen ist die Gesamtmenge an abgegebenem Wasserdampf an der Oberseite nur geringfügig größer, als dies durch die reine Eigenfeuchteabgabe der Fall ist; je nach Druck liegt sie höchstens ca. 10% über der reinen Betoneigenfeuchteabgabe. Eine zeitlich verzögerte Erhöhung der Feuchteabgabe an der Oberseite scheint unwahrscheinlich, da selbst bei einer Wasserdruckbeaufschlagung von 5 bar die 200 mm Probekörper in Summe kontinuierlich trockener werden, vgl. Bild 7c).

Bei Bauteildicken > 200 mm ist der Feuchtetransport auch bei 5 bar vernachlässigbar gering.

Bei Probenhöhen von 75 mm wird hingegen der Feuchtetransport durch den Beton – vor allem im Zeitabschnitt II – durch den Druck stärker beeinflusst (Bild 7d). Im reinen kapillaren Saugversuch (0 bar) übertreffen die Feuchteabgabe und -aufnahme die entsprechenden Feuchtemengen bei 1 und 5 bar. Wie schon im Zusammenhang mit den NMR-Untersuchungen erwähnt, werden durch zusätzlichen äußeren Druck zunehmend kleinere Poren (Gelporen) gefüllt. Dadurch wird zum einen der Sättigungsgrad erhöht, zum anderen wird die bremsende Wirkung der Selbstabdichtung gegen das eindringende Wasser verstärkt. Bei dem dargestellten Versuch der dünnen Probe (75 mm, 0 bar) hat die Wirkung der Selbstabdichtung offensichtlich zur Folge, dass die Überschneidung des Kapillar- und Austrocknungsbereichs größer ist als im Versuch mit 1 bzw. 5 bar zusätzlichem äußeren

Druck bei gleicher Probenhöhe. Die Zunahme der Feuchtemengen zwischen 1 bar und 5 bar resultiert aus dem Einfluss des Drucks auf den Sättigungsgrad und die Eindringtiefe des Kapillarbereichs.

Bild 8 fasst den Einfluss von Druck- und Probenhöhe auf den Feuchtehaushalt nach einem Beobachtungszeitraum von 500 Tagen zusammen. Mit zunehmender Dicke der Betonschicht sinken, wie schon in [2] beobachtet, sowohl die insgesamt aufgenommene Wassermenge nach einem betrachteten Zeitraum von hier 500 Tagen, wie auch der Gesamtfeuchtegehalt des Betons. Bei Probenhöhen kleiner als 200 mm steigt die aufgenommene und an den Innenraum abgegebene Wasserdampfmenge mit abnehmender Dicke stark an. Die mit abnehmender Probenhöhe verstärkte Wasseraufnahme und der dementsprechende höhere Feuchtegehalt des Betons können mit der Überschneidung des Austrocknungs- und Kapillarbereichs erklärt werden.

Durch Wasserdruck wird je nach Druckhöhe die Wasseraufnahme an der Unterseite erhöht. Für Probekörperhöhen über 150 mm ist kein deutlicher Druckeinfluss auf die Wasserdampfabgabe an der Oberseite zu erkennen. Eine Erhöhung der Druckstufe bewirkt nicht zwangsläufig ein Überschneiden der Kapillar- und Austrocknungsfrent in größeren Tiefen. Wie bei den Untersuchungen mit Kernspinresonanz beobachtet, wird auch hier der Sättigungsgrad im Kapillarbereich erhöht, ohne dass das Wasser proportional zum Wurzel-Druck (Gl. (1)) tiefer eindringt.

4.3 Ergebnisse Salzeinfluss

Bild 9, links zeigt den Einfluss im Wasser gelöster Salze auf die Lösungsaufnahme (3,3 M.-% NaCl-Lösung), die Wasserdampfabgabe und die Füllmenge der Probekörper

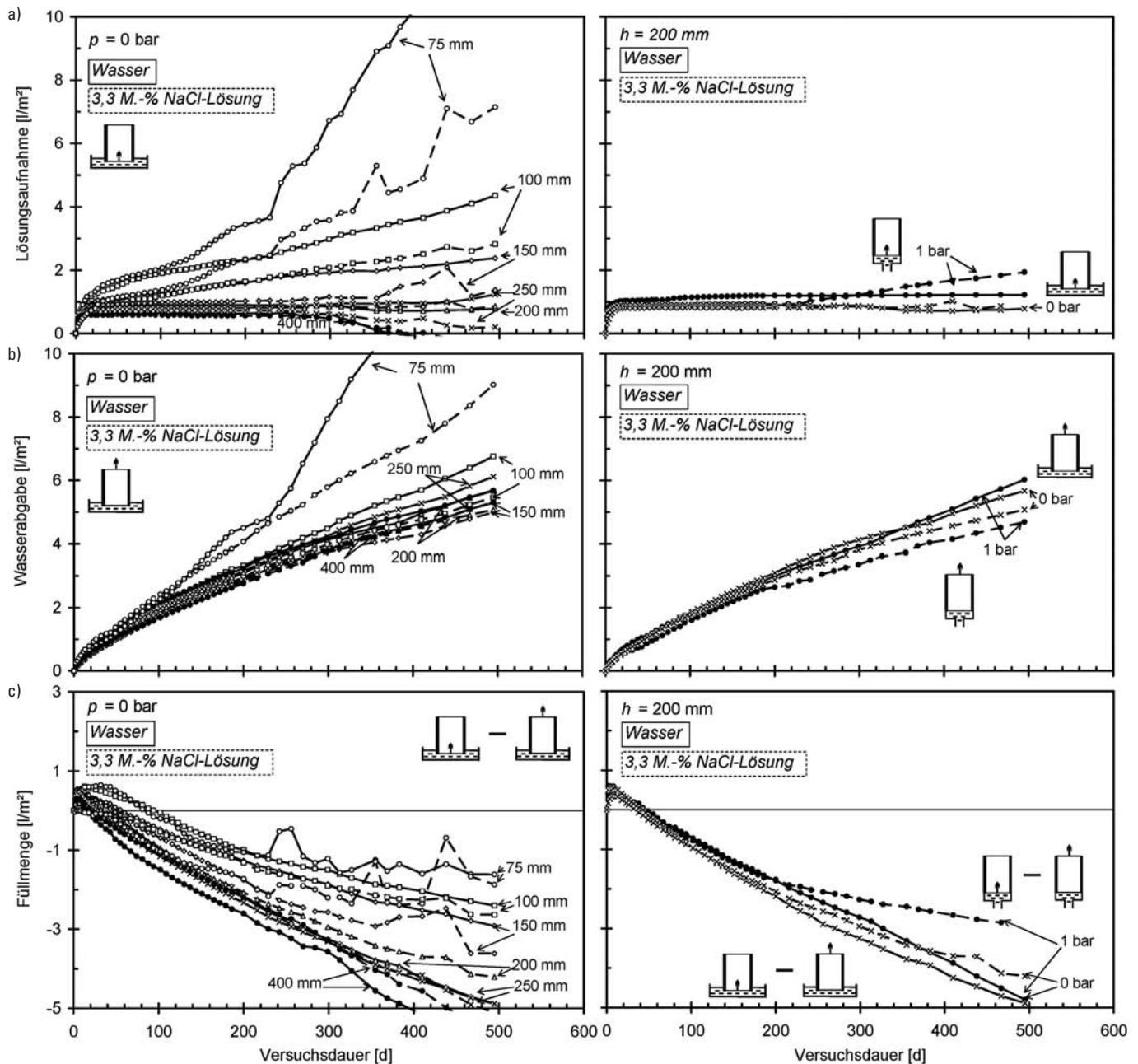


Bild 9. Links: Einfluss der Probenhöhe: Kapillare Wasser- bzw. Lösungsaufnahme, Wasserdampf- bzw. Lösungsaufgabe und Füllmenge bei Fußbadlagerung, rechts: Einfluss anstehenden Drucks für eine Probekörperhöhe von 200 mm

Fig. 9. Left: effect of specimen height on capillary suction of water and salt solution, water vapour release and liquid content of concrete, right: effect of liquid pressure for specimen height of 200 mm

bei reiner Fußbadlagerung für unterschiedliche Probekörperhöhen. Bild 9, rechts stellt entsprechend den Einfluss der gelösten Salze bei anstehendem Druck bzw. nicht-drückendem Wasser dar.

Die Aufnahme einer 3,3 M.-% NaCl-Lösung erfolgt im Vergleich zu reinem Wasser, vgl. Bild 9a), mit einer reduzierten Geschwindigkeit, was auf die veränderten physikalischen Eigenschaften infolge des gelösten Salzes (Viskosität, Oberflächenspannung, Dichte) zurückzuführen ist [8]. Entsprechend der geringeren Aufnahmegeschwindigkeit der NaCl-Lösung treten die verstärkte Wasseraufnahme – d. h. der Zeitabschnitt II – und die Überschneidung des Kapillar- und Austrocknungsbereichs zu einem späteren Zeitpunkt ein. Bei einer Probenhöhe von

beispielsweise 75 mm wird der Zeitabschnitt II bei aufgenommener Natriumchloridlösung rd. zehn Tage später als bei Aufnahme von reinem Wasser erreicht. Das bedeutet, die Lösungsfront erreicht die Austrocknungsfront zehn Tage später als dies bei reinem Wasser der Fall ist. Ein Transport durch das Bauteil findet auch bei NaCl-Lösungsaufnahme statt, wenn auch in geringeren Mengen als bei reinem Wasser.

Während bei der Aufnahme von reinem Wasser auch bei einer Probenhöhe von 150 mm eine kontinuierliche Aufnahme stattfindet, wird bei der Aufnahme der Natriumchloridlösung hingegen ab 100 Tagen nur noch eine vernachlässigbar geringe Feuchteaufnahme festgestellt. Ein Durchtritt der Feuchte ab dieser Probenhöhe ist daher

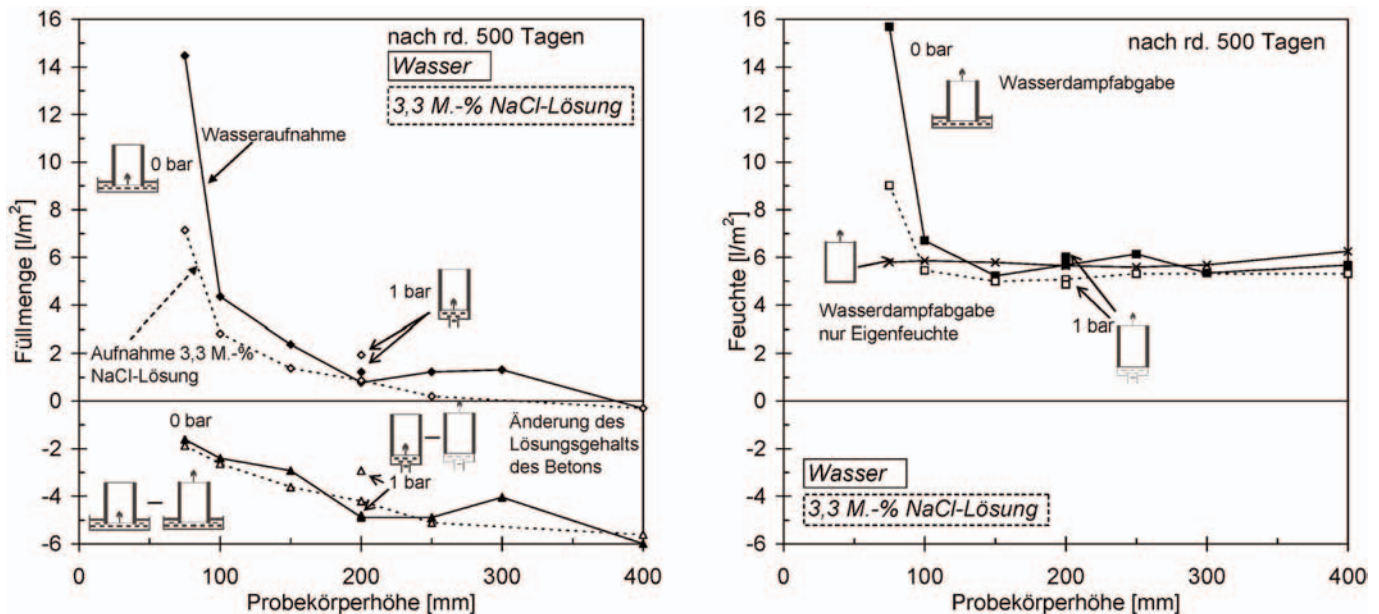


Bild 10. Einfluss der Probenhöhe auf, links, die Wasser- bzw. Lösungsaufnahme an der Betonunterseite und die Füllmenge des Betons sowie, rechts, die Wasserdampfabgabe an der Betonoberseite und die Abgabe der Betoneigenfeuchte nach 500 Tagen

Fig. 10. Effect specimen height after 500 days, left: water and solution uptake at the concrete bottom surface and liquid content of concrete, right: release of moisture and intrinsic moisture at the concrete top surface

bei Natriumchloridaufnahme nicht wahrscheinlich. Ab einer Probenhöhe von 200 mm ist sowohl bei der Aufnahme von reinem Wasser als auch bei der Aufnahme von Natriumchloridlösung nach ca. 15 Tagen keine bedeutsame weitere Feuchteaufnahme im betrachteten Versuchszeitraum mehr zu verzeichnen. Bild 9a) rechts zeigt den Salzeinfluss bei Druckhöhen von 0 bzw. 1 bar. Der Einfluss der Salze auf die Wasseraufnahme ist hier im Vergleich zum Einfluss der Druckhöhe gering. Auch mit Druck ist die kapillare Aufnahme der Salzlösung im Vergleich zu Wasser geringer.

Die Wasserabgabe an die Innenseite (Bild 9b) links) korreliert mit der Lösungsaufnahme entsprechend der Eindringtiefe der Salzlösung und der Dicke der jeweiligen Probe. Darüber hinaus bewirkt das aufgenommene Salz eine Dampfdruckerniedrigung im Porenraum, was den Transport von Wasserdampf zur oberen Seite vermindert. Mit abnehmender Probekörpertiefe wird dieser Einfluss verstärkt. Der Einfluss der Druckhöhe (Bild 9b), rechts) auf die Wasserdampfabgabe der 200 mm Probekörper ist in Hinblick auf den Salzeinfluss hingegen bedeutungslos.

Der Salzeinfluss auf den Gesamtfeuchtehaushalt wird in Bild 9c) dargestellt. Entsprechend der langsameren Eindringgeschwindigkeit in den Probekörper nehmen die durch die NaCl-Lösung belasteten Probekörper zwar weniger Flüssigkeit auf als die durch Wasser beanspruchten Proben. Sobald die Eindringfront die Austrocknungsfront erreicht hat, erfolgt die Wasserabgabe an den Trocknungsraum jedoch verlangsamt, da die Salze einen niedrigeren Dampfdruckgradienten erzeugen und somit der Trocknungsprozess reduziert wird.

Bild 10, rechts fasst die abgegebenen Wasserdampf-mengen abhängig von der Probenhöhe nach einem Zeitraum von rd. 500 Tagen zusammen. Ob mit oder ohne Druck, die Wasserdampf-abgabe der salzbelasteten Proben

liegt für Probekörperhöhen ab 150 mm in der Größenordnung unbelasteter Proben bzw. im Bereich der reinen Eigenfeuchteabgabe. Bei Probenhöhen unter 150 mm nimmt die Wasserdampf-abgabe der salzbelasteten Proben gegenüber salzfreien Proben aus den zuvor genannten Gründen ab.

Sowohl die aufgenommene Menge an reinem Wasser als auch die aufgenommene Menge an Natriumchlorid-lösung sinkt mit zunehmender Probekörperhöhe, Bild 10, links. Ab der Probenhöhe von 200 mm sind die Unterschiede in der Aufnahme mit zunehmender Probenhöhe vernachlässigbar gering. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass im Wasser gelöste eindringende Salze sich im Hinblick auf die Lösungsaufnahme sowie die Feuchteabgabe in den Innenraum grundsätzlich günstig auswirken.

5 Zusammenfassung

Das Eindringen von drückendem und nicht drückendem Wasser in Beton wird durch die Selbstabdichtung gebremst. Versuche mittels H^1 Kernspinresonanz an Mörtelprismen zeigen, dass das Maß der Selbstabdichtung davon abhängig ist, wie viel Wasser in den Gelporenraum der Zementsteinmatrix umgelagert wird bzw. vorhanden ist. Mit Zunahme des hydrostatischen Drucks wird einerseits das Eindringen des Wassers beschleunigt, andererseits erreicht gleichzeitig mehr Wasser den Gelporenraum, was zu verstärkter Selbstabdichtung führt. Mit zunehmender Druckhöhe wird demnach die selbstabdichtende Wirkung, d. h. die Abweichung vom Eindringverhalten proportional zur Wurzel der Zeit, ausgeprägter.

Versuche an Zylindern aus WU-Beton, die über 500 Tage einseitig mit drückendem Wasser beaufschlagt wurden, während sie an der andere Stirnfläche austrockneten, zeigten, dass sowohl die Eindringtiefe als auch die Menge

des aufgenommenen Wassers durch die Selbstabdichtung des Betons begrenzt wird. Der Wasserdruck führt zwar zunächst zu einem schnelleren Eindringen des Wassers in den Beton, andererseits wird mit zunehmender Druckhöhe ein höherer Sättigungsgrad erreicht und damit die selbstabdichtende Wirkung infolge eines schnelleren Umverteils des Wassers in die Gelporenraum beschleunigt. Sobald die kapillare Eindringfront die Austrocknungsfront erreicht, d. h. Kapillar- und Austrocknungsbereich nach [2] sich überschneiden, wird eine verstärkte Wasseraufnahme beobachtet, die mit einer zunehmenden Wasserdampfabgabe an den Innenraum korreliert. Mit zunehmender Probenhöhe wird diese Überschneidung zu einem späteren Zeitpunkt erreicht. Ab einer Probekörperhöhe von 200 mm ist nach einem Zeitraum von 500 Tagen im Versuch die abgegebene Feuchtemenge an der Innenseite infolge des Feuchtetransports durch den Beton vernachlässigbar gering ($< 10 \text{ g/m}^2\text{d}$). Eine zeitlich verzögerte Erhöhung der Feuchteabgabe an der Oberseite scheint unwahrscheinlich, da die Probekörper selbst bei einer Druckbeaufschlagung von 5 bar kontinuierlich trockener werden. Demzufolge kann davon ausgegangen werden, dass der Feuchtetransport durch Bauteile mit einer Dicke von mindestens 200 mm auch bei der Wirkung einer Druckwassersäule von 50 m vernachlässigbar gering ist.

Ist ein Bauteil einer drückenden Salzlösung ausgesetzt, wird das Eindringen der Salzlösung ebenfalls durch die Selbstabdichtung reduziert. Infolge der veränderten physikalischen Eigenschaften von Salzlösungen ist die Eindringgeschwindigkeit im Vergleich zu Wasser geringer. Im Versuch mit 3,3 M.-% NaCl-Lösung wurden insgesamt geringere Wassermengen aufgenommen und weiter transportiert, was auf eine günstige Wirkung von Salz hindeutet. Im Vergleich zum Einfluss der Druckhöhe des anstehenden Wassers beim Eindringen in den Beton kommt dem Einfluss der Salze eine geringe Bedeutung zu.

Dank

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Ein Dank gilt ebenso Herrn Dr.-Ing. M. Krus und seinem Team für die Unterstützung bei den NMR-Messungen, die am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen durchgeführt wurden.

Literatur

- [1] DAfStb-Richtlinie „Wasserundurchlässige Bauteile aus Beton“ (WU-Richtlinie), Ausgabe November 2003.
- [2] Beddoe, R. E. und Springenschmid, R.: Feuchtetransport durch Bauteile aus Beton. Beton- und Stahlbetonbau 94 (1999), Heft 4, S. 158–166.
- [3] Eifert, H., Beddoe, R. E. und Springenschmid, R.: Feuchtetransport in wu-Bauteilen unter baupraktischen Bedingungen. beton 2 (2002) S. 80–81.
- [4] Wiens, U. und Alfes, Chr.: Feuchtetransport in Bauteilen aus wasserundurchlässigem Beton – Grundlagen und Praxisbetrachtungen. Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007), Heft 6, S. 380–387.
- [5] Positionspapier des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton zur DAfStb-Richtlinie „Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton“ – Feuchtetransport durch WU-Konstruktionen. Beton- und Stahlbetonbau 101 (2006), Heft 11, S. 923–925.
- [6] Schäper, M. und Kreye, J.: Die kritischen Randbedingungen einer Innenbeschichtung Weißer Wannen. Beton- und Stahlbetonbau 98 (2003), Heft 1, S. 30–41
- [7] Rucker, P., Beddoe, R. E. und Schießl, P.: Wasser- und Salzhalt im Gefüge zementgebundener Baustoffe – Modellierung der auftretenden Mechanismen. Beton- und Stahlbetonbau 101 (2006), Heft 6, S. 402–412
- [8] Krus, M., Hansen, K. K. and Künzel, H. M.: Porosity and Liquid Absorption of Cement Paste, Materials and Structures 30 (1997), pp. 394–398.
- [9] Rucker, P., Krus, M. und Holm, A.: Einsatz einer kombinierten Messmethode zur Untersuchung von Salztransportvorgängen. Bauphysik 25 (2003) Heft 5, S. 296–302.
- [10] Rucker, P. and Beddoe, R. E.: Effect of Moisture Content of Concrete on Water Uptake, submitted to Cem. Concr. Res. April, 2007.



Dipl.-Ing. Petra Rucker
concrete concepts
Ingenieurgesellschaft mbH
Brandes – Lay – Rucker
Fraunhoferstraße 30b
80469 München
rucker@concrete-concepts.eu



Dr. Robin E. Beddoe
cbm – Centrum Baustoffe
und Materialprüfung
Technische Universität München
Baumbachstraße 7
81245 München
beddoe@cbm.bv.tum.de

Michael Schäper
Jörn Kreye

Kein kritischer Wasserdampfdurchtritt in WU-Betonkonstruktionen

Betonkonstruktionen in Grundwasser gemäß WU-Richtlinie dürfen auf der Innenseite keine Nässe zeigen. Eine hochwertige Nutzung Weißer Wannen verlangt nun zusätzlich eine Begrenzung des Wasserdampfdurchtritts. Die Untersuchungen [3] der Verfasser hatten gezeigt, dass es für rissfreien Beton, unter Wasserdruck bis 5 bar, mit $w/z \leq 0,6$, $h \geq 20$ cm und nicht zu geringer Ausgangsfeuchte zu keinem Feuchtestau hinter wasserdampfdichten Innenbeschichtungen kommt, dort also keine Osmose-Schädigung droht.

Die nachstehend zunächst vorgestellten Feuchteprofile von Bohrkernen aus seit Jahrzehnten grundwasserberührten Konstruktionen bestätigen dies: Es sind mit und ohne Innenbeschichtung keinerlei Feuchtekonzentrationen in der inneren Hälfte der von außen grundwasserberührten Bodenplatten, hergestellt aus Beton mit hohem Wassereindringwiderstand, festzustellen. Die präsentierten neuen Laboruntersuchungen mit Messungen des Wasserdampfdurchtritts an Zylindern zeigen nun weiter, dass mit den vorgenannten, in [3] herausgearbeiteten Bedingungen, selbst bei außen anstehender 50 m-Wassersäule nur wenig Wasserdampf die Konstruktion durchdringt. Bei druckloser Wasserberührung (Fußbad) wurde kein Wasserdampfdurchtritt gemessen.

No Crucial Water Vapour Penetration through Constructions, made of Concrete of High Resistance against Water Penetration
Concrete constructions in groundwater in accordance with the WU-guideline are not allowed to show wetness on the inside. A high-quality using of such underground-concrete-constructions requires additionally a limitation of the penetrated water vapour. The investigations [3] of the authors had shown that it does not come to any agglomeration of humidity behind a coating on the inner surface of a concrete-construction in groundwater under the following conditions: crack-free concrete, water pressure up to 5 bar, $w/z \leq 0,6$, $h \geq 20$ cm and not too dry concrete. Thus there is no threat of osmosis damage.

The presented humidity profiles in drill cores, taken of constructions, which are in touch with groundwater since decades, confirm this: There is neither with nor without an interior coating any humidity concentration in the internal half of the groundwater-affected base plates detectable. This on the condition that the concrete is of high resistance against water penetration. In the presented new laboratory tests the penetration of water-vapour through concrete cylinders, obeying the aforementioned concrete quality conditions, is measured for water pressure on one side: With 5 bar water pressure only a small range of water vapour penetrates, under atmospheric pressure (foot bath) there is no water vapour penetration registered.

1 Ziel

Die WU-Richtlinie [1] enthält Regelungen und Anforderungen zur Begrenzung des Feuchtetransports in flüssiger Form. Es muss das Ziel erreicht werden, dass kein Wasser durch Kapillartransport die der Beaufschlagung abgewandte Seite nass werden lässt. Dies wird sichergestellt durch die Forderung einer bestimmten Betonqualität bei empfohlener Bauteildicke. Weiter gehende Regelungen über Feuchtetransport anderer Arten und Ursachen, die ebenfalls eine raumseitige Feuchteabgabe zur Folge haben, enthält die Richtlinie nicht. Wenn ein trockenes Raumklima gefordert werden würde, hätten entsprechende raumklimatische Maßnahmen zu erfolgen.

Kein kritischer Wasserdampfdurchtritt in WU-Betonkonstruktionen

Für eine hochwertige Nutzung Weißer Wannen wird die Zusatzforderung eines begrenzten Wasserdampfdurchtrittes erhoben. Dies z. B.

- für die Lagerung empfindlicher Güter, oder
- für von Hinterfeuchtung bedrohte Chloridschutzbeschichtungen in Tiefgaragen, damit diese keine Osmoseblasen bilden.

Die Hinterfeuchtungsgefahr von Beschichtungen untersuchten die Autoren dieses Aufsatzes in [3]. Es wurden dort mantelabgedichtete Zylinder mit Durchmesser 100 mm auf der einen Stirnseite mit 5 bar Wasserdruck beaufschlagt und auf der anderen Stirnseite mit der dampfdichten Kopfbeschichtung versehen. Die Prüfung erfolgte über das Spalten der Versuchskörper einer der parallelen Versuchsreihen zum jeweiligen Untersuchungszeitpunkt und der Feuchtemessung mittels Darren. Die ermittelten Feuchteprofile zeigten an, dass bei Einhaltung der Bedingungen

*Wassersäule ≤ 50 m $w/z \leq 0,60$ $h \geq 20$ cm
normalfeuchter Beton*

nach zwei Jahren Versuchsbeobachtung keinerlei Hinterfeuchtung einer dampfdichten Innenbeschichtung aufgetreten war.

Dagegen steht die Aussage von *Fechner* [5], der den Stand der bauphysikalischen Simulationsprogramme von WU-Betonkonstruktions-Beanspruchungen wiedergebend, vor Hinterfeuchtungsschäden dichter Innenoberflächen warnt und ggf. aufwändige belüftete aufgeständerte Fußböden empfiehlt. Die Rechenansätze verschiedener Forscher würden untereinander befriedigende Übereinstimmung für die Bestimmung des Wasser- und Wasserdampfdurchtritts von WU-Bauteilen zeigen. Seine entsprechenden Ergebnisgrafiken weisen aus:

- Der stationäre Feuchteaustritt auf der Innenseite einer 20 cm dicken, von außen mit Wasserdruck bis 10 m beanspruchten Platte liege bei 10 bis 18 g/(m² · d).
- Eine 50 cm dicke WU-Platte mit 2,5 m Wasserdruck von außen sei nach fünf Jahren auch schon ohne Innenbeschichtung stationär so weit durchfeuchtet, dass bis in 48 cm Tiefe ein Anstieg des Feuchtegehalts festzustellen sei und bis etwa zur Hälfte eine Wassersättigung eingetreten sei.

Dass unter den in [3] erarbeiteten Bedingungen keine Hinterfeuchtungsgefahr einer Innenbeschichtung besteht, lässt jedoch, obigen Rechenansätzen widersprechend, erwarten, dass nur ein geringer Feuchtedurchtritt durch eine innen *nicht* beschichtete Konstruktion stattfindet. Dieses letztere wird in der hier vorgestellten Untersuchung näher quantifiziert:

- Zum einen werden die Ergebnisse der Messung von Feuchteprofilen von Bohrkernen aus seit Jahrzehnten grundwasserberührten Bodenplatten Weißer Wannen mit und ohne Innenbeschichtung vorgestellt.
- Zum anderen wird im Labor der Feuchtedurchtritt von auf der Außenseite unter 50 m Wassersäule stehenden Betonen gemessen, die innen nicht beschichtet sind.

2 Feuchteprofile von Bohrkernen aus grundwasserberührten Betonbodenplatten

2.1 Konzept der Bohrkernnahme

Vier grundwasserberührte, Jahrzehnte alte Betonbodenplatten in Tiefgaragen werden von innen angebohrt, um die Feuchteverteilung in denselben festzustellen. Es wird damit ein zusätzlicher Beweisstrang dafür aufgebaut, dass in Betonkonstruktionen gemäß WU-Richtlinie keine kritischen, Schäden auslösenden Feuchtezustände existieren.

Die untersuchten Bodenplatten differieren

- im Alter: 11 bis 31 Jahre
- in der Dicke: 16 bis 30 cm
- in der Betongüte: planmäßig B 300 bis B 35, effektiv in-between für alle C35/45
- in der Beschichtung bzw. Imprägnierung der inneren Oberfläche.

Übereinstimmend befinden sich die Betonbodenplatten in Tiefgaragen im Rhein-Main-Gebiet und sind zeitweise im Jahr grundwasserberührt, ansonsten herrscht eine hohe Bodenfeuchte.

Es wurden je Tiefgarage an zwei Untersuchungsstellen je zwei Bohrkern entnommen [6]:

- Je einer dieser beiden wurde noch vor Ort gespalten und einer ersten Wägung unterzogen. An den gewonnenen Scheiben wurden dann der Feuchtegehalt durch Darren

sowie die atmosphärische Wasseraufnahme bis zur Porensättigung bestimmt.

- An dem jeweils zweiten Bohrkern wurde im Labor die Druckfestigkeit geprüft.

Eine Wasseraufnahme der Bohrkern durch das Nassbohren wurde zuvor im Labor quantifiziert. Dies geschah anhand von Tauchversuchen mit Kernen verschiedener Qualität, mit jeweiliger zeitabhängiger Messung der Feuchteaufnahme [6]. Die notwendige Feuchtegehaltskorrektur war aber wegen der angetroffenen hervorragenden Betonqualitäten sehr gering:

In den oberen 3 cm der Kerne mussten Abzüge von 0,3 M-% gemacht werden, in 15 cm Tiefe von 0,1 M-%.

2.2 Rechnerische Eck-Feuchtegehalte im Vergleich zu den Ist-Feuchtegehalten

Die nachstehenden Näherungsformeln für Eck-Feuchtegehalte nach Darren wurden in [3] abgeleitet:

- Sättigungsfeuchte nach atmosphärischer Wasserlagerung:

$$f_{\text{satt, atmosphärisch}} = (w - z \cdot 0,25 \cdot m + LP) \cdot 100 / \rho_{\text{trocken}} \text{ [M-%]} \quad (1)$$

- Kernfeuchte bei gedachter Versiegelung des frischen Betons:

$$f_{\text{Kernfeuchte}} = (w - z \cdot 0,25 \cdot m) \cdot 100 / \rho_{\text{trocken}} \text{ [M-%]} \quad (2)$$

- Minimale Feuchte von in trocken-warmer Luft gelagertem Beton:

$$\min f_{\text{lufttrocken}} = z (0,4 - 0,25) \cdot m \cdot 100 / \rho_{\text{trocken}} \text{ [M-%]} \quad (3)$$

Für das Spektrum an Vorgabewerten, das den angetroffenen Betonen zuordenbar ist, ergeben sich die Eck-Feuchtegehalte in Tabelle 1. Diese sind dort dem Spektrum der Ist-Werte gegenübergestellt. Bereits im Vergleich dieser Werte wird deutlich, dass die Ist-Feuchtegehalte sich im Bereich der normalen Ausgleichsfeuchte (zwischen Kernfeuchte und minimaler Feuchte nach Klimatrocknung) befinden.

2.3 Beurteilung der vorgefundenen Feuchteverteilungen

Die vorgefundenen Feuchteprofile werden in den Bildern 1 bis 4 nicht als absolute Feuchtegehalte in M-% dargestellt, sondern über den vorgefundenen Sättigungsgrad: Es wird der prozentuale Grad des Erreichens der nach atmosphärischer Wasserlagerung sich einstellenden Sättigungsfeuchte angegeben. Die Eckwerte dieses Sättigungsgrades enthält Tabelle 1:

- Werte oberhalb 84% bedeuten kapillar eingelagertes, von außen eingedrungenes Wasser.
- Werte zwischen ca. 36% und 84% stellen den Bereich der Ausgleichsfeuchte von Beton im normalen Innen- bis Außenklima dar. Da es sich bei den Bodenplatten um Außenbauteile handelt, ist eher die obere Hälfte dieses Wertebereichs zu erwarten.

Mit dieser Darstellung werden Betone mit unterschiedlichen absoluten Porositäten, die sich z. B. in Abhängigkeit

Bewertung der gemessenen Feuchtegehalte nach Darren						
Rechnerische Eckwerte			Ist-Werte Bodenplatte der Tiefgarage			
			A	B	C	D
w/z	0,60	0,55	–	–	–	–
Druckfestigkeit [N/mm ²]	–	–	59	51	60	63
w [kg/m ³]	220	190	–	–	–	–
r _{tr} [kg/m ³]	2,100	2,200	2,207	2,156	2,163	2,219
LP [l/m ³]	25	20	–	–	–	–
Alter [a]	–	–	11	16	31	11
Hydratationsgrad m	0,95	0,95	–	–	–	–
f _{satt, atm.} [M-%]	)¹ 7,5 (100%)	5,8 (100%)	Sättigungsfeuchte ermittelt im Labor:			
f _{Kernfeuchte} [M-%]	)¹ 6,3 (84%)	4,9 (84%)	Feuchte im Bauteil			
min _{luft trocken} [M-%]	)¹ 2,5 (33%)	2,2 (39%)	4,3–5,5	3,7–6,5	5,5–6,2	4,7–5,3

)¹ runde Klammer = Sättigungsgrad

Tabelle 1. Rechnerische Eckwerte zu den erzielten Feuchtegehalten nach Darren

Table 1. Theoretical benchmarks to the obtained humidity contents after oven drying

Tiefgarage A, Bürogebäudekomplex in Mannheim

Alter 11 Jahre

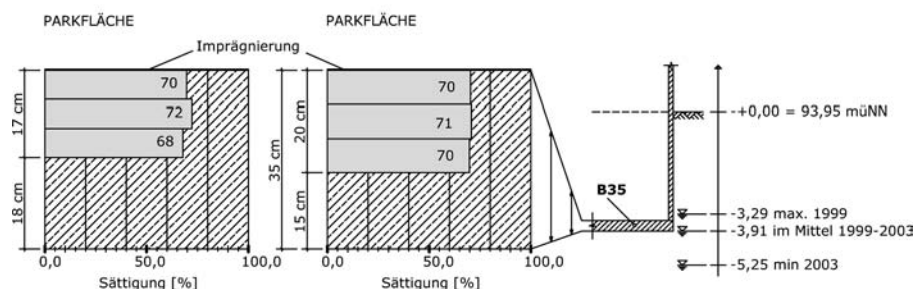


Bild 1. Feuchteprofil in der Bodenplatte der Tiefgarage A

Fig. 1. Humidity profile in the base plate of the underground parking A

Tiefgarage B, Bürogebäudekomplex in Frankfurt-Niederrad

Alter 16 Jahre

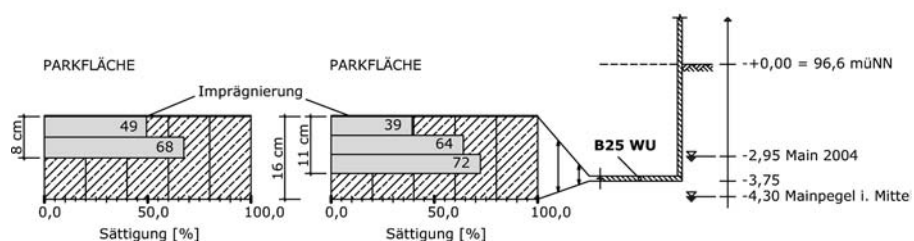


Bild 2. Feuchteprofil in der Bodenplatte der Tiefgarage B

Fig. 2. Humidity profile in the base plate of the underground parking B

vom Zementsteingehalt ergeben, für die Auswertung vergleichbar. Die Bilder 1 bis 4 geben die entsprechenden Profile der angetroffenen Sättigungsgrade wieder:

Tiefgarage A eines Bürogebäudekomplexes in der Innenstadt Mannheims (Bild 1):

Die im Bild 1 dargestellte, durch drei dreiecksförmig das Bauwerk umgebende Grundwasserpegel abgesicherte Grundwassersituation stellt für die Bodenplatte zeitweise im Jahr die „Fußbadlagerung“ dar, ansonsten herrscht eine hohe Bodenfeuchte.

In die Tiefgarage hinein dringt das Außenklima vor. Auf den Parkflächen ist die 35 cm dicke Bodenplatte ge-

gen eindringende Chloride nur durch eine Imprägnierung geschützt.

Über die obere Hälfte der Bodenplattendicke ist der gemessene Feuchtegehalt konstant. Der vorliegende Sättigungsgrad von im Mittel ca. 70% liegt im erwarteten Spektrum der Ausgleichsfeuchten.

Tiefgarage B eines Bürokomplexes in Frankfurt-Niederrad (Bild 2):

Aus den Bestandsunterlagen geht hervor, dass diese nur 16 cm dicke Bodenplatte auf einer Kies-Feinplanung gegründet ist, statische Gründungen erfolgen auf Streifen- und Einzelfundamenten.

Tiefgarage C, Bürogebäudekomplex in Frankfurt-Niederrad

Alter 31 Jahre

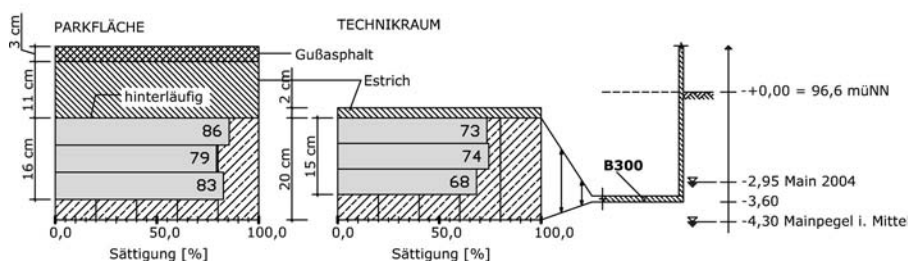


Bild 3. Feuchteprofil in der Bodenplatte der Tiefgarage C
Fig. 3. Humidity profile in the base plate of the underground parking C

Tiefgarage D, Bürogebäudekomplex in Frankfurt-Niederrad

Alter 11 Jahre, Tiefgarage beheizt

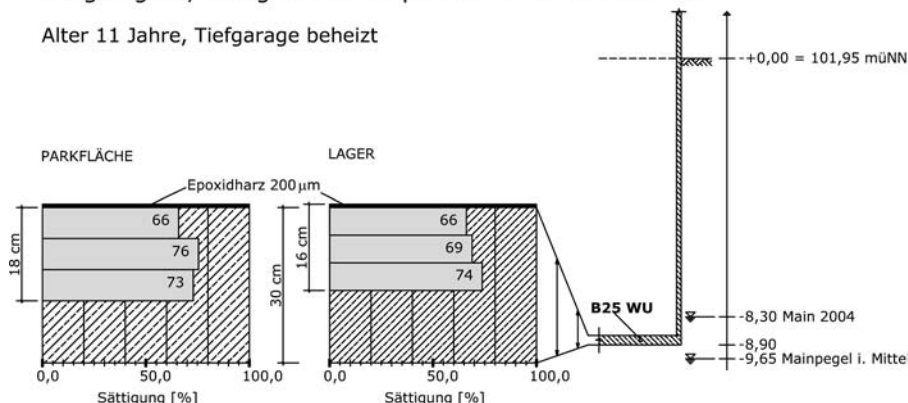


Bild 4. Feuchteprofil in der Bodenplatte der Tiefgarage D
Fig. 4. Humidity profile in the base plate of the underground parking D

Die Grundwassersituation wird durch die unmittelbare Nähe des Main, also von dessen Pegelstand bestimmt. Die entsprechenden Pegellinien sind in Bild 2 vermerkt. Auch hier ist von einer Fußbadlagerung/hohen Erdfeuchte-Situation der Bodenplatte auszugehen.

Leider liegt auch hier nur eine Imprägnierung der Oberfläche vor. Der Bauherr wurde auf das Fehlen der Chloridschutzbeschichtung hingewiesen.

Das Feuchteprofil zeigt auf den obersten 7 cm einen deutlichen Austrocknungsbereich. In der Tiefe, gemessen bis 11 cm von den 16 cm Dicke, liegt die mögliche Ausgleichsfeuchte eines nach außen hin orientierten Bauteils vor.

Tiefgarage C im Erdgeschoss eines anderen Bürokomplexes in Frankfurt-Niederrad (Bild 3):

Diese ist mit 31 Jahren die älteste der untersuchten Tiefgaragen.

Einer der beiden Untersuchungsbohrkerne stammt aus dem Parkbereich. Es liegt dort ein 14 cm dicker Aufbau aus Estrich und Gussasphalt auf der 20 cm dicken Betonbodenplatte vor. Dieser Aufbau hatte keinen Verbund zum Beton, er ist also hinterläufig gegen das von den Fahrzeugen eingetragene Wasser. Der zweite Untersuchungsbohrkern stammt aus einem separaten Technikraum mit dünnem Verbundestrich.

Der auch hier maßgebende Mainpegel ist im Bild 3 eingefügt, es liegt eine ähnlich feuchte Bodensituation vor wie für die Tiefgarage B.

Das Feuchteprofil im Technikraum stellt wieder eine zu erwartende Ausgleichsfeuchte dar. Das Feuchteprofil aus dem Parkbereich zeigt aber eine Erhöhung an: Die

Feuchtwerte reichen bis an die Grenze zur Sättigungsfeuchte, und dies auch an der Plattenoberseite. Die Erklärung liegt auf der Hand. Es liegt hier eine der klassischen Schadenssituationen in Parkhäusern vor: Der Soll-Verbundestrich liegt tatsächlich *nicht* im Verbund und wird damit tückisch hinterläufig. Nicht nur, dass eingedrungene Feuchte aus dem Parkhausinneren verweilt und in den Beton eindringt, sondern auch und vor allem ist dieses Wasser Träger von Chloriden, die durch Reinigung nicht weggewaschen werden können, sondern sich von Winter zu Winter – von oben unbemerkt – addieren.

Auch hier gibt es also keine Hinweise auf kritische, von unten kommende Feuchtedurchtritte.

Tiefgarage D ist die eines sehr großen, gestaffelten Bürokomplexes in Frankfurt-Niederrad (Bild 4):

Die Bodenplatte ist 30 cm dick und epoxidharzbeschichtet. Das Parkhaus ist beheizt. Ein Kern wurde aus dem Parkbereich entnommen, ein anderer aus einem gesperren Flächenbereich, in dem Büromöbel gelagert sind.

Auch für diese Bodenplatte liegt die durch den Main bestimmte Bodensituation vor.

Die Feuchtwerte im Bild 4 liegen im Spektrum der Ausgleichsfeuchte – unter Berücksichtigung der Austrocknungsbehinderung durch die Epoxidharzbeschichtung. Die absoluten Feuchtegehalte liegen bei ca. 5 M-%.

Der Garant für die Dichtheit der untersuchten Bodenplatten sind die gemäß Tabelle 1 vorgefundenen hervorragenden

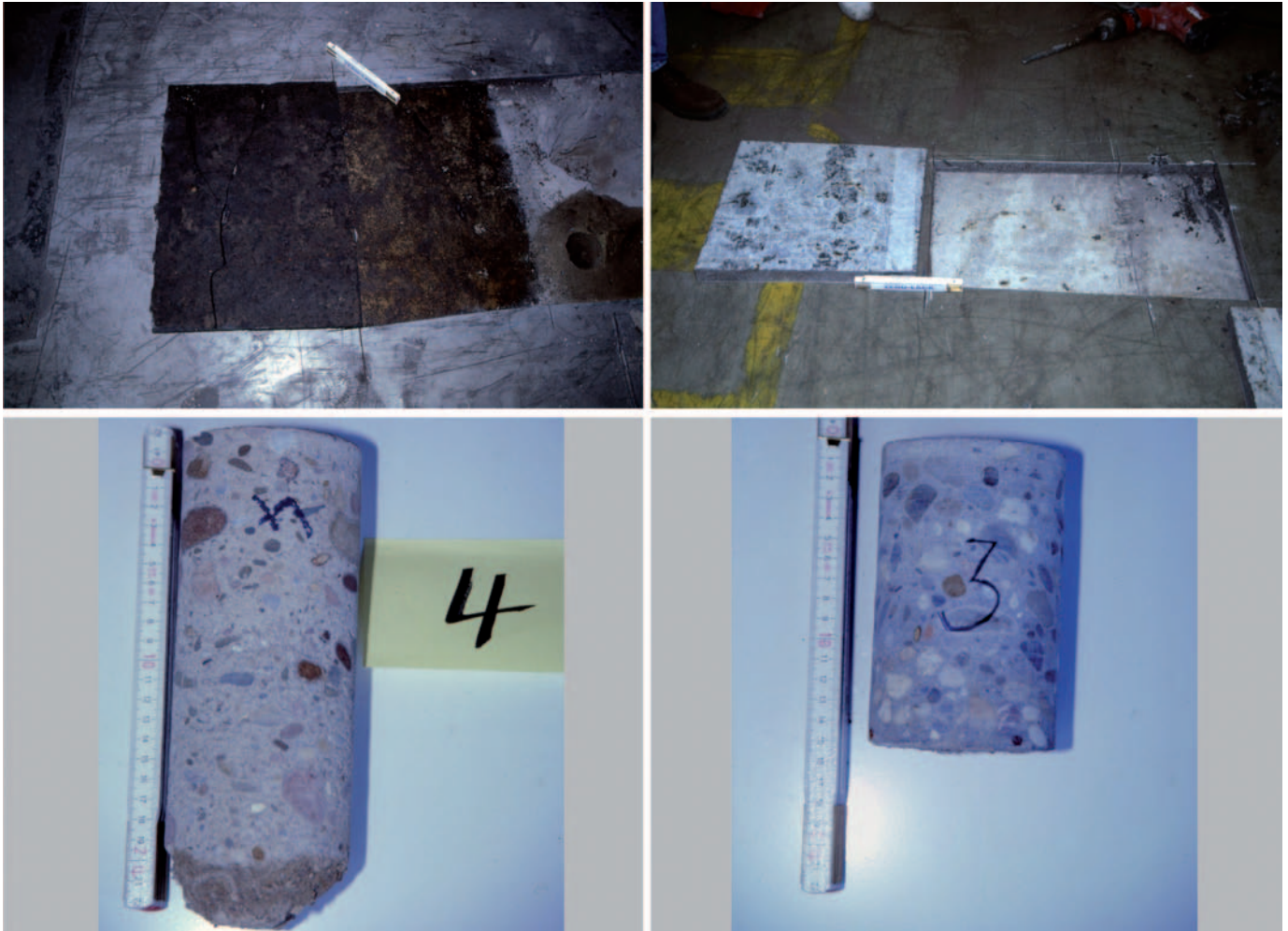


Bild 5. Links: Der Schadensfall einer durchfeuchteten erdberührten Bodenplatte; Rechts: Ein benachbarter Bauabschnitt mit höherer Betonqualität ist schadensfrei.

Fig. 5. Left: The damage case of a soaked earthtouched base plate; Right: A neighbouring section with better concrete quality is damage-free

den Betondruckfestigkeiten. Hierauf weist auch ein von den Autoren untersuchter *Schadensfall* hin:

Bild 5 zeigt Bohrkern aus der 24 cm dicken, erdberührten Bodenplatte des großflächigen Warenlagers im *Bauwerk E* in Frankfurt/Main, Hanauer Landstraße. Schon das Aussehen des mit Nr. 4 bezeichneten Kerns zeigt an, dass er keine WU-Qualität besitzt. Tatsächlich brachte es eine nachträgliche Epoxidharzbeschichtung des verbundlos seit mehr als 20 Jahren aufliegenden Gussasphaltestrichs

Jahrzehnte alte grundwasserberührte Bodenplatten aus hochwertigem Beton sind nicht durchfeuchtet.

zutage (Bild 5): Oberhalb des Bohrkerns 4 (Beton aus 1957, Feuchtegehalt in Kernmitte 7,7 M-%, also bei der Sättigungfeuchte, Festigkeit 28 N/mm²) ist die Gussasphaltunterseite nass und modrig. Die Epoxidharzbeschichtung zeigte kurz nach Aufbringen über feinen Gussasphaltrissen Osmoseblasen als eigentlichen Schadensmelder. Der beschichtete Gussasphalt oberhalb des Kerns 3 (Beton aus 1987, Feuchtegehalt in Kernmitte: 5,4 M-%, Festigkeit 60 N/mm²) liegt trocken und schadensfrei.

3 Messung des Wasserdampfdurchtritts durch nackten WU-Beton

3.1 Das Konzept der Laborversuche

Übernommen wurde die Versuchsanordnung aus [3], wonach zur Simulation einer wasserbeaufschlagten Betonplatte mantelbeschichtete Zylinder auf der einen Stirnseite mit Wasserdruck beansprucht werden (Bild 6c). Die Messung des Feuchtedurchtritts zu Zwischenzeitpunkten durch Spalten der Zylinder von parallelen Versuchskörperreihen und Feuchtegehaltsmessung – das Messprinzip in [3] – wird hier jedoch nach 110 Tagen vorgenommen. In der anderen der hier zwei parallelen Versuchskörperreihen wird kontinuierlich der Wasserdampfdurchtritt geprüft. Für diese Messung wurde die Münchener Methodik [4] aufgegriffen: Kieselgelkugeln in einem geschlossenen Behälter auf der wasserabgewandten Seite sorgen, bei Labortemperatur von ca. 20 °C, für eine relative Feuchtigkeit von nur ca. 3%. Zu jedem Messzeitpunkt wird die Gewichtszunahme der Kugeln als Feuchtedurchtritt gemessen und die Kugeln werden erneuert. Die extreme Lufttrockenheit durch das Kieselgel lässt alle Er-

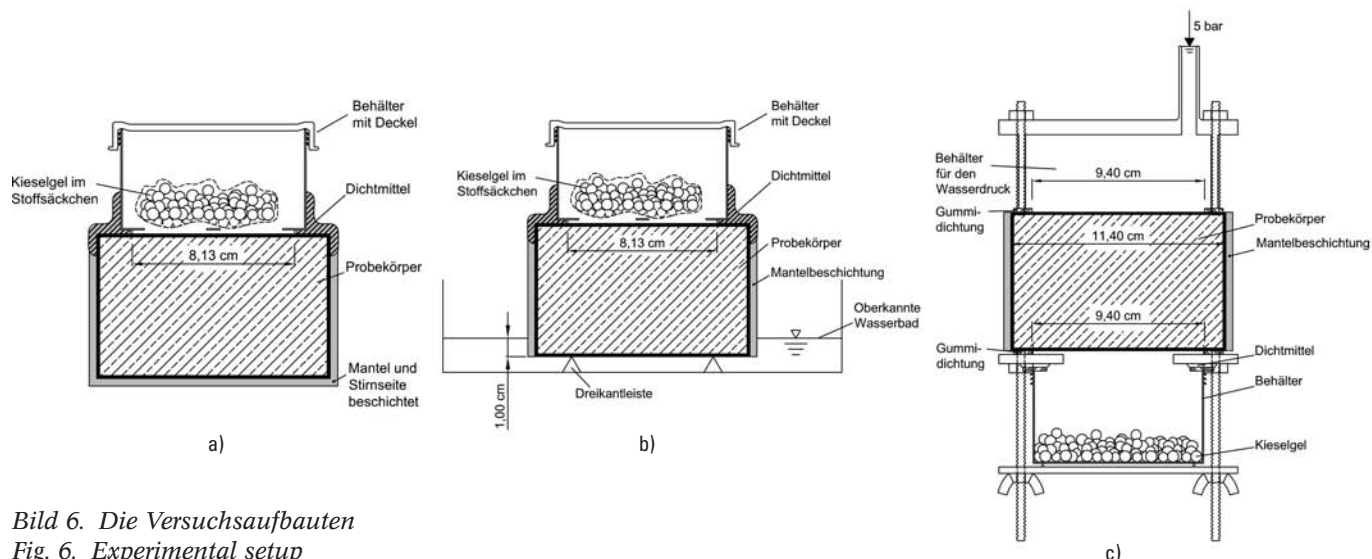


Bild 6. Die Versuchsaufbauten
Fig. 6. Experimental setup

Tabelle 2. Daten des Betons der Versuchszylinder
Table 2. Concrete data of the test cylinders

Zusammensetzung	Zement CEM I 32,5 R	$z = 367 \text{ kg/m}^3$
	Größtkorn der Oberheinkörnung	$= 8 \text{ mm}$
	Wasser	$w = 220 \text{ kg/m}^3$
	Wasserzementwert	$w/z = 0,60$
Frischbeton	LP-Gehalt	$LP = 1,5 \text{ M-}\%$
	Ausbreitmaß	$a = 46 \text{ cm}$
Festbeton	Festbetontrockenrohddichte	$\rho_{tr} = 2165 \text{ kg/m}^3$
	Druckfestigkeit	$f_{c, \text{cube } 150, \text{nass}, 28d} = 35,5 \text{ N/mm}^2$
	Eindringtiefe e bei Wasserdurchlässigkeitsprüfung nach DIN 1048	$e = 23 \text{ mm}$
	Sättigungsfeuchte im Versuch, Alter 170 d	
	- atmosphärisch	$f_{\text{satt, atm}} = 7,2 \text{ M-}\%$
	- 150 bar-Normversuch	$f_{\text{satt, 150 bar}} = 8,3 \text{ M-}\%$
	Sättigungsfeuchte rechnerisch, $m = 0,85$	
	- atmosphärisch	$f_{\text{satt, atm}} = 7,3 \text{ M-}\%$
	- im 150 bar-Normversuch	$f_{\text{satt, 150 bar}} = 8,1 \text{ M-}\%$

gebnisse von Wasserdampfdurchtritten auf der sicheren Seite liegen.

Die Zylinder wurden aus Balken $15 \times 15 \times 70 \text{ cm}$ herausgebohrt [7]. Die Daten des für alle Versuchskörper gleichen Betons enthält Tabelle 2. Die Zusammensetzung wurde so gewählt, dass ein besonders zementleimreicher Beton vorliegt, der die Ergebnisse insofern auf die sichere Seite bringt, als allein der Zementstein permeabel ist und nicht die Körnung: Es wird dichter Rheinquarz mit einem Größtkorn von nur 8 mm verwendet. Mit $w/z = 0,6$ wird der Anforderung an Beton mit hohem Wassereindringwiderstand nach DIN FB 100 entsprochen, wie er gemäß [1] und [2] für zahlreiche WU-Konstruktionen in Frage kommt.

Die durch Versuche bestimmte Sättigungsfeuchte des 170 Tage alten Festbetons aus Tabelle 2 bestätigt sich rechnerisch nach Gl. (1):

Dem Alter 170 d entsprechend wird $m = 0,85$ angesetzt:

nach Gl. (1):

$$f_{\text{satt, atmosphärisch}} = (220 - 367 \cdot 0,25 \cdot 0,85 + 15) \cdot 100/2165 = 7,3 \text{ M-}\%$$

$$f_{\text{satt, im 150 bar-Normversuch}} = (220 - 367 \cdot 0,25 \cdot 0,76 \cdot 0,85 + 15) \cdot 100/2165 = 8,1 \text{ M-}\%$$

Die gewählten Zylinderhöhen, bzw. die entsprechenden Dicken der simulierten WU-Betonplatten markieren mit

$$\begin{aligned} h &= 20,0 \text{ cm} \\ h &= 13,5 \text{ cm} \\ h &= 7,5 \text{ cm} \end{aligned}$$

den unteren Saum der zulässigen Bauteildicken nach [1] und [2] und liegen darunter.

Als weiterer Parameter wurde die Eigenfeuchte bei Versuchsbeginn variiert: In den Versuchen in [3] waren im Bereich einer kritischen Starteigenfeuchte von ca. 2 bis

4 M-% (ermittelt durch Darren) massive spontane Wasserundichtheiten festgestellt worden. Die Starteigenfeuchte wurde im Mittel der Probekörper eingestellt zu

6 M-% (ermittelt durch Darren)
3,8 M-% (ermittelt durch Darren)

Zum Vergleich: Für den untersuchten Beton berechnet sich die Kernfeuchte mit Gl. (2) zu $f_{\text{Kernfeuchte}} = 6,6 \text{ M-%}$ und die minimale durch Lufttrocknung erzielbare Feuchte mit Gl. (3) zu $\min f_{\text{Lufttrocken}} = 2,2 \text{ M-%}$. Die Eigenfeuchten wurden durch unterschiedliche Vorlagerung nach der Herstellung erzielt [7]:

Hohe Starteigenfeuchte: 7d Wasser, 21d 20 °C/77% r.F.
Niedrige Starteigenfeuchte: 7d Wasser, 28d 36 °C/20% r.F.

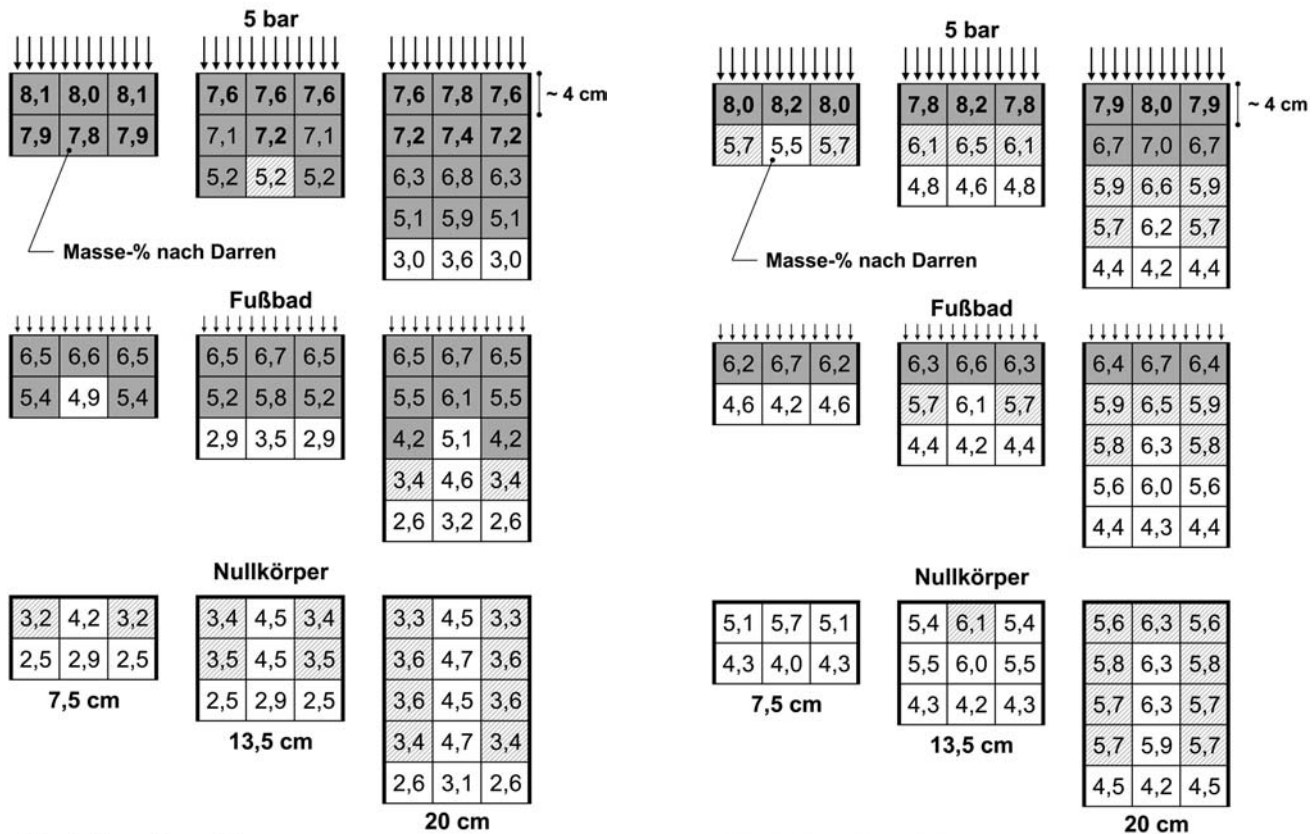
Um keine Trocknungsgradienten in Richtung des Wassertransports zu erhalten und zur Trocknungsbeschleunigung, wurde die Mantelbeschichtung der Zylinder erst nach dieser Vorlagerung aufgebracht, bei der Vorlagerung wurden die beiden Stirnseiten durch Folien geschlossen.

Bei der Trocknung zur Erzielung der niedrigen Starteigenfeuchte wird sicher wegen der hohen Temperaturen die Hydratation der noch jungen Betone zunächst beschleunigt, dann aber in der Außenzone des Zylinders gebremst. Durch die spätere Feuchtezufuhr ist eine Nachhydratation zu erwarten.

Zum Ende dieser Vorlagerung, also zum Start des Wasserdruckversuchs, stellten sich die in Bild 7 (jeweils unten) dargestellten, durch einen radialen Gradienten gekennzeichneten Verteilungen des Feuchtegehalts in den Zylindern dar. Die Nennfeuchtegehalte von 6 und 3,8 M-% lagen jeweils als Mittel über die Probekörper vor.

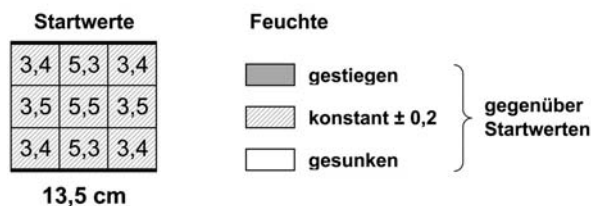
- Die hohe eingestellte Eigenfeuchte entspricht etwa derjenigen einer Neubau-WU-Konstruktion bei Beendigung der Wasserhaltung, also beim Start der Wasserbeanspruchung von außen.
- Die niedrige Start-Eigenfeuchte liegt im Bereich der kritischen Eigenfeuchte, es wird ein ungünstiger, in der Praxis zu vermeidender Startzustand dargestellt.

Der *Wasserdruck* auf die eine Stirnseite der Versuchszylinder wurde wie folgt variiert:



Starteigenfeuchte

i. M. 3,8 M-%



Starteigenfeuchte

i. M. 6,0 M-%



Bild 7. Feuchtegehalte in den Zylindern nach 110 d Prüfdauer
Fig. 7. Humidity contents in the test cylinders after 110 days of testing period

- 5 bar
- Fußbadlagerung
- Nullkörper ohne Wasserberührung, die entsprechende Stirnseite wurde versiegelt

Jede der 18 Parameterkombinationen von Dicke (drei Varianten), Wasserdruck (drei Varianten) und Starteigenfeuchte (zwei Varianten) wurde mit drei Probekörpern abgedeckt, was zu einer Gesamtzahl von 54 Prüfzylindern führte. Diese Zahl wurde verdoppelt, um die Zylinder der parallelen Versuchskörperreihe nach dem Ablauf von 110 d zur zusätzlichen Feuchtegehaltmessung spalten zu können.

3.2 Die Startphase der Laborversuche

Für das Spalten der Zylinder einer der beiden parallelen Versuchskörperreihen zur Feuchtegehaltmessung nach 110 d wurde die Technik gegenüber [3] verfeinert: Es wurde auch in radialer Richtung eine Feuchtegehaltssdifferenzierung ermöglicht [7].

Die ermittelte Feuchteverteilung für die Zylinder zeigt Bild 7. Dargestellt sind die verschieden hohen zylindrischen Probekörper mit ihren lokal unterschiedlichen Feuchtegehalten. Das Ergebnis dieser Analyse entspricht dem aller in [3] dokumentierten Vorversuche:

- Die Wassereindringung mit vollständiger Porensättigung ist bei den feuchten Zylindern größer als im drei Tage dauernden 5 bar-Wassereindringversuch nach DIN 1048 ($e = 23$ mm gemäß Tabelle 2). Dies nicht nur wegen der längeren Einwirkungszeit, sondern vor allem wegen der geringeren Starteigenfeuchte als im Normversuch, bei welchem die Probekörper bis zur Druckprüfung wassergelagert sind.
- Die Wassereindringung mit vollständiger Porensättigung ($f \geq 7,2$ M-% gemäß Tabelle 2) ist aber auch hier in der Tiefe begrenzt:
 - Bei den Probekörpern mit hoher Starteigenfeuchte liegt eine vollständige Porensättigung bis etwa 4 cm vor. Damit ist auch der Probekörper mit $h = 7,5$ cm dicht gegenüber flüssigem Wasser.
 - Bei den Zylindern mit niedriger Starteigenfeuchte hingegen liegt die Tiefe der Porensättigung bis etwa 8 cm. Damit durchfeuchtet der Probekörper mit $h = 7,5$ cm vollständig; hier tritt Wasser in Form von Nässe auf der Rückseite aus, der Fall, den die WU-Richtlinie durch die Vorgabe einer Mindestkonstruktionsdicke ausschließen will.

3.3 Analyse der Abgabe der Trocknungsfeuchte der Nullkörper

In Bild 8 ist die gemessene Abgabe der Trocknungsfeuchte dargestellt vor dem Hintergrund der Rechenwerte für das gebundene und freie Wasser. Diesen Rechenwerten liegen die folgenden Ansätze zugrunde:

- Versuchsstart mit dem Anfangsreifegrad (Hydratationsgrad) m_o :
chemisch gebundenes Wasser:
 $w_{\text{chem}} = z \cdot 0,25 \cdot m_o$ [kg/m³] mit z nach Tabelle 2

physikalisch gebundenes Wasser:
 $w_{\text{phys}} = z \cdot (0,4 - 0,25) \cdot m_o$ [kg/m³]

freies, noch austrockenbares Wasser bei dem nach der Vorlagerung gemessenem Feuchtegehalt f_o :

$$w_{\text{frei}} = \rho_{\text{tr}} \cdot f_o - w_{\text{phys}} \text{ [kg/m}^3\text{]} \\ \text{mit der Trockenrohddichte } \rho_{\text{tr}} \text{ nach Tabelle 2}$$

- Beliebiger Zeitpunkt mit dem Zwischen-Hydratationsgrad m_t :

verbleibendes freies Wasser:

$$w_{\text{frei, t}} = \rho_{\text{tr}} \cdot f_o - z \cdot (0,4 - 0,25) \cdot m_t - z \cdot 0,25 \cdot (m_t - m_o) \\ \text{[kg/m}^3\text{]}$$

Die in Bild 8 dargestellten Geraden mit den rechnerischen Wasseranteilen wurden mit diesen Gleichungen bei folgenden Vorgaben ermittelt:

$f_o = 6$ M-%	hohe Starteigenfeuchte
$m_o = 0,75$	zugehörige Startreife
$f_o = 3,8$ M-%	niedrige Starteigenfeuchte
$m_o = 0,80$	zugehörige Startreife
$m_t = 0,90$	Reife für den Zeitpunkt der letzten hier ausgewerteten Messung

Der Bezug dieser Werte in [kg/m³] auf das tatsächliche Probenvolumen der 7,5 cm hohen Probe des Durchmessers 11,4 cm, führt zu der dargestellten Einheit [g].

Eingefügt ist in Bild 8 nun die bei den Nullkörpern kontinuierlich gemessene absolute Wasserabgabe in [g] als Summenkurve und die Wasserabgabe in [g/d]; jeweils sind links die Messwerte für die Probekörper mit niedriger Starteigenfeuchte bei Versuchsbeginn und rechts jene für entsprechend hohe Starteigenfeuchte dargestellt.

Deutlich ist in den gemessenen Summenkurven für das letzte Messjahr ein nahezu linear ansteigender Verlauf zu erkennen. Die in Bild 8 eingetragenen Rechenwerte zeigen aber an, dass bei den Zylindern mit der niedrigen Starteigenfeuchte die Messwerte der Feuchteabgabe schon seit dem Prüfalter 500 d größer sind, als die Menge des überhaupt vorhandenen freien, austrockenbaren Wassers. Der linear steigende Anteil muss also einen systematischen Messfehler darstellen. Offensichtlich führen Imperfektionen bei der Abdichtung, z. B. zwischen Kieselgellkappe und Probekörper, dazu, dass neben der aufzufangenden Probekörperfeuchte beständig auch ein geringer Anteil an Raumluftfeuchtigkeit in die Kappen eindringen kann. Die in Bild 8 dargestellte korrigierte Kurve für diesen Probekörper, eliminiert diesen linear ansteigenden Anteil (Messfehler) zugunsten eines konstanten Verlaufes. Die zugehörige Korrekturdifferenz von 25 mg/d wird im Weiteren bei allen Messergebnisdarstellungen in Abzug gebracht.

Ins Auge fällt die Tatsache, dass für beide Starteigenfeuchten die Austrocknungskurven für die Zylinder aller drei Höhen 7,5 cm, 13,5 und 20 cm nahezu identisch sind. Dies bestätigt das *Beddoe-Springenschmid*-Arbeitsmodell [4], wonach nur eine ca. 7,5 cm tiefe Schicht einer Platte, und das ist hier die Höhe des kleinsten Zylinders, ihre Eigenfeuchte abgibt.

3.4 Der Feuchtedurchtritt über die Versuchsdauer von 3,5 Jahren

Die Messergebnisse des Wasserdampfdurchtritts, mit der in Bild 6 dargestellten Methode erzielt, zeigten innerhalb

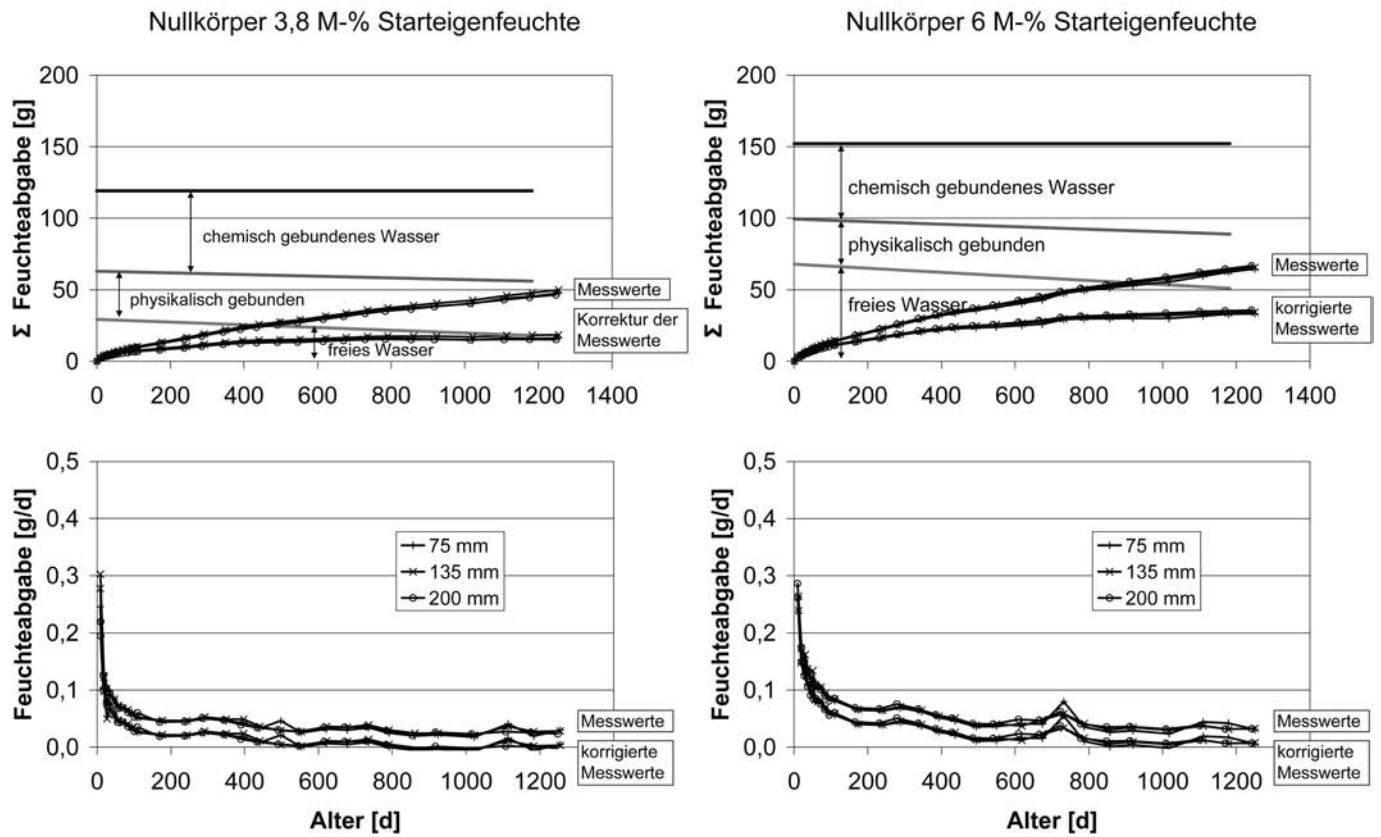


Bild 8. Analyse und Korrektur der Eigenfeuchteabgabe der Nullkörper
 Fig. 8. Analysis and correction of the emitted self-humidity of the zero-samples

einer Reihe der jeweils drei gleichen Probekörper unvermeidbare Prüfstreuungen. Beispiele sind als Bild 9 eingefügt. Im Weiteren wird als Messwert jeweils der erzielte Mittelwert einer Parametervariation angegeben. Der gemessene, vom Messfehler nach Abschn. 3.3 befreite Wasserdampfdurchtritt in [g] ist in Bild 10 für die drei Zylinderhöhen wiedergegeben. Jeweils ist links die Messung an den anfangs trockenen und rechts an den anfangs feuchten Zylindern wiedergegeben.

Bild 11 bezieht diesen Feuchtedurchtritt auf die Zeit und auf die Querschnittsfläche der Probekörper. Wie aus Bild 6 ersichtlich, kann an den Stirnseiten sowohl die Wasserdruckbeaufschlagung mit 5 bar als auch die Dampfdurchtrittsmessung aus versuchstechnischen Gründen nicht an dem vollen Durchmesser des Betonzylinders vorgenommen werden. Die untersuchten Transportvorgänge laufen jedoch so langsam ab, dass die Querschnittsreduzierungen an den Ein- und Austrittsflächen nicht zu Strömungswiderständen im Sinne der Strömungslehre führen können. Daher wird hier ein rein eindimensionaler Feuchtetransport über den Probenquerschnitt unterstellt. Nach einer vollständigen Klärung der Feuchtetransportmechanismen könnte diese Annahme überprüft werden.

In Tabelle 3, als letzte Abstraktion, ist der effektive Feuchtedurchtritt der Zylinder mit der baustellengerechten höheren Starteigenfeuchte, als Mittelwert des letzten Versuchsjahres, unter Abzug der Eigenfeuchteabgabe wiedergegeben. Da die in Abschn. 3.3 beschriebene Korrektur

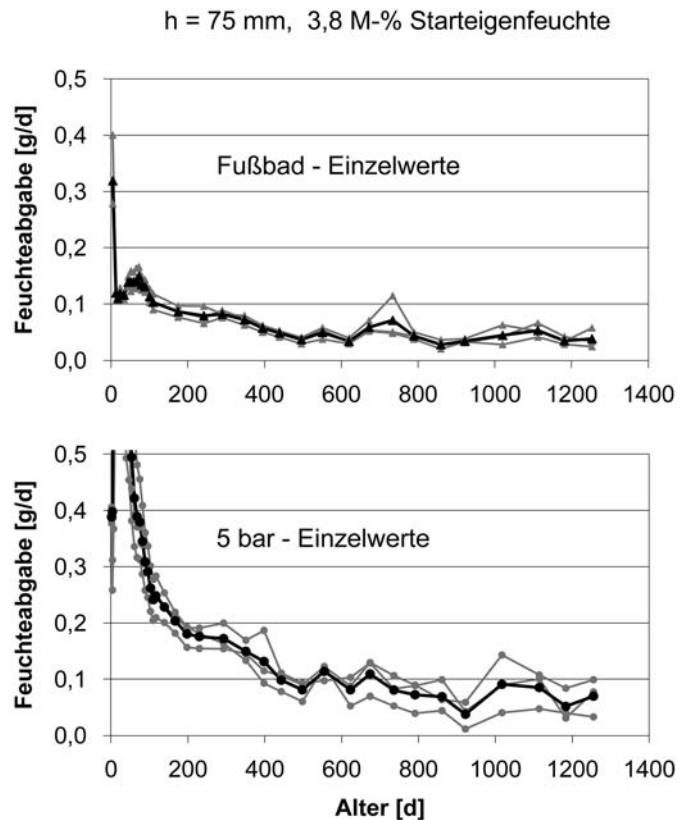


Bild 9. Die Streuung der gemessenen Feuchtedurchgangswerte
 Fig. 9. Dispersion of the measured humidity penetration

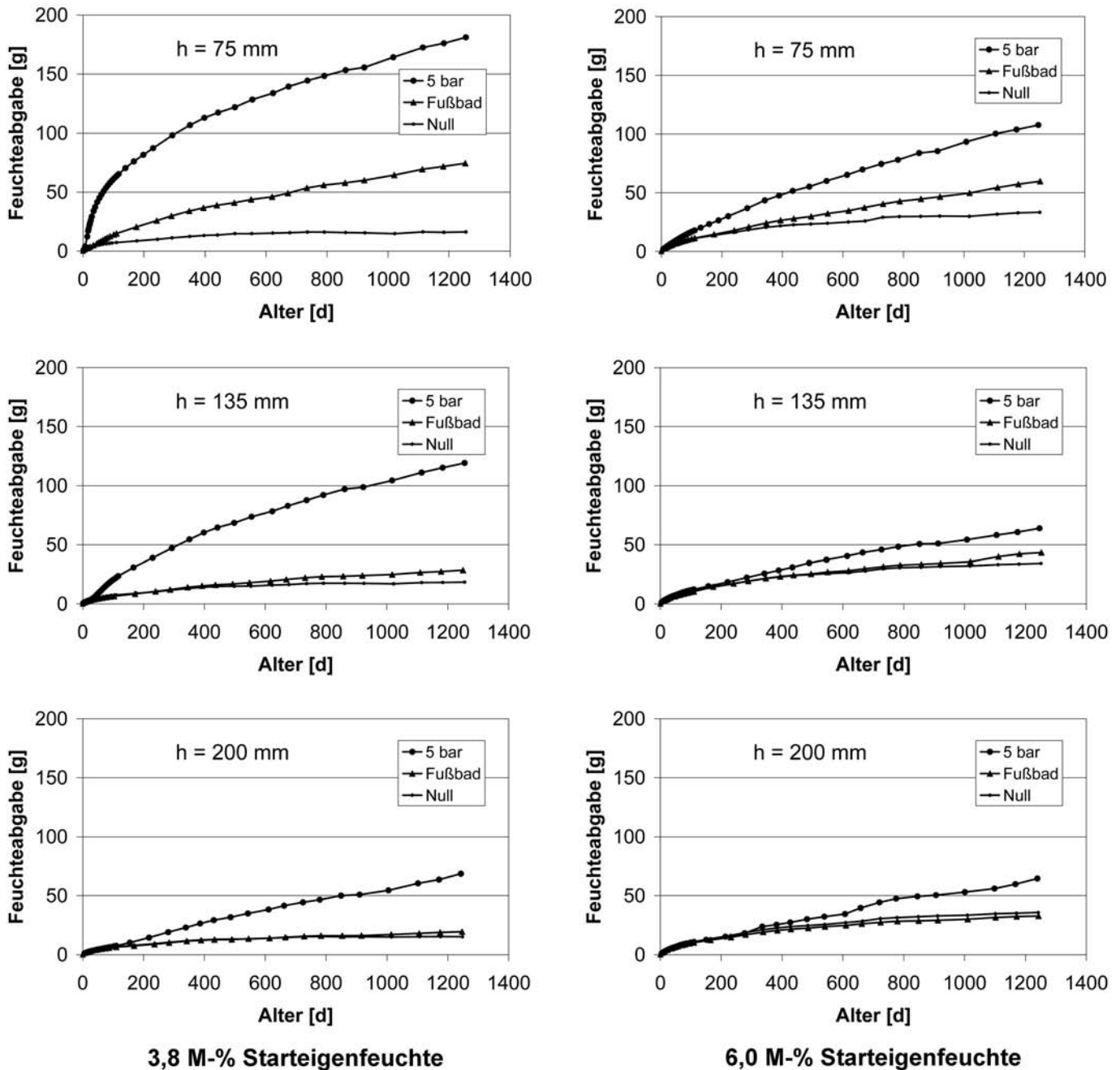


Bild 10. Alle gemessenen, nach Bild 8 korrigierten, Feuchtedurchgangswerte
 Fig. 10. All measured, according to fig. 8 corrected, humidity penetrations

der Messwerte gleichermaßen Proben und Nullkörper betrifft, sind die hier dargestellten Werte unabhängig von dieser Korrektur.

Folgende Fakten springen bei der Auswertung der Bilder 10 und 11 sowie der Tabelle 3 ins Auge:

- Die Eigenfeuchteabgabe einer Weißen Wanne im ersten Jahr muss durchgestanden werden.
- Der Feuchtedurchtritt durch die Zylinder im nach 3 1/2 Jahren noch laufenden Versuch hatte sich nach ca. 2 1/2 Jahren - abgesehen von einer gewissen weiteren Eigenfeuchteabgabe der Proben mit der höheren Starteigenfeuchte - als nahezu stationär eingestellt.
- Bei allen Zylindern mit 50 m Wassersäule, auch dem ungünstigsten mit h = 7,5 cm-Probekörper mit niedriger Starteigenfeuchte, liegt der stationäre Feuchtedurchtritt im Bereich von weniger als 7 g/(m² · d)

- Die Betonzylinder mit der niedrigen Starteigenfeuchte liefern anfänglich deutlich höhere Werte, dichten sich im Laufe der Zeit aber nahezu vollständig selber ab. Die Begründung dieses Phänomens der Selbstabdichtung wird in [8] mit einer Umstrukturierung des Wassers in den Gelporen und einem Quellvorgang der Gelstruktur erklärt.

- Bei den 20 cm hohen Zylindern mit der baustellengerichteten höheren Starteigenfeuchte findet bei Fußbadlagerung stationär, nach Abklingen der Trocknungsfeuchte, kein Wasserdampfdurchtritt statt.

Dies entspricht dem *Beddoe-Springschmid*-Arbeitsmodell, nach dem bei der Dicke > (7 + 8) cm genau dies zu erwarten ist:

- Die ca. 7 cm tiefe Wassereindringzone überschneidet sich nicht mit der ca. 8 cm tiefen Austrocknungszone.

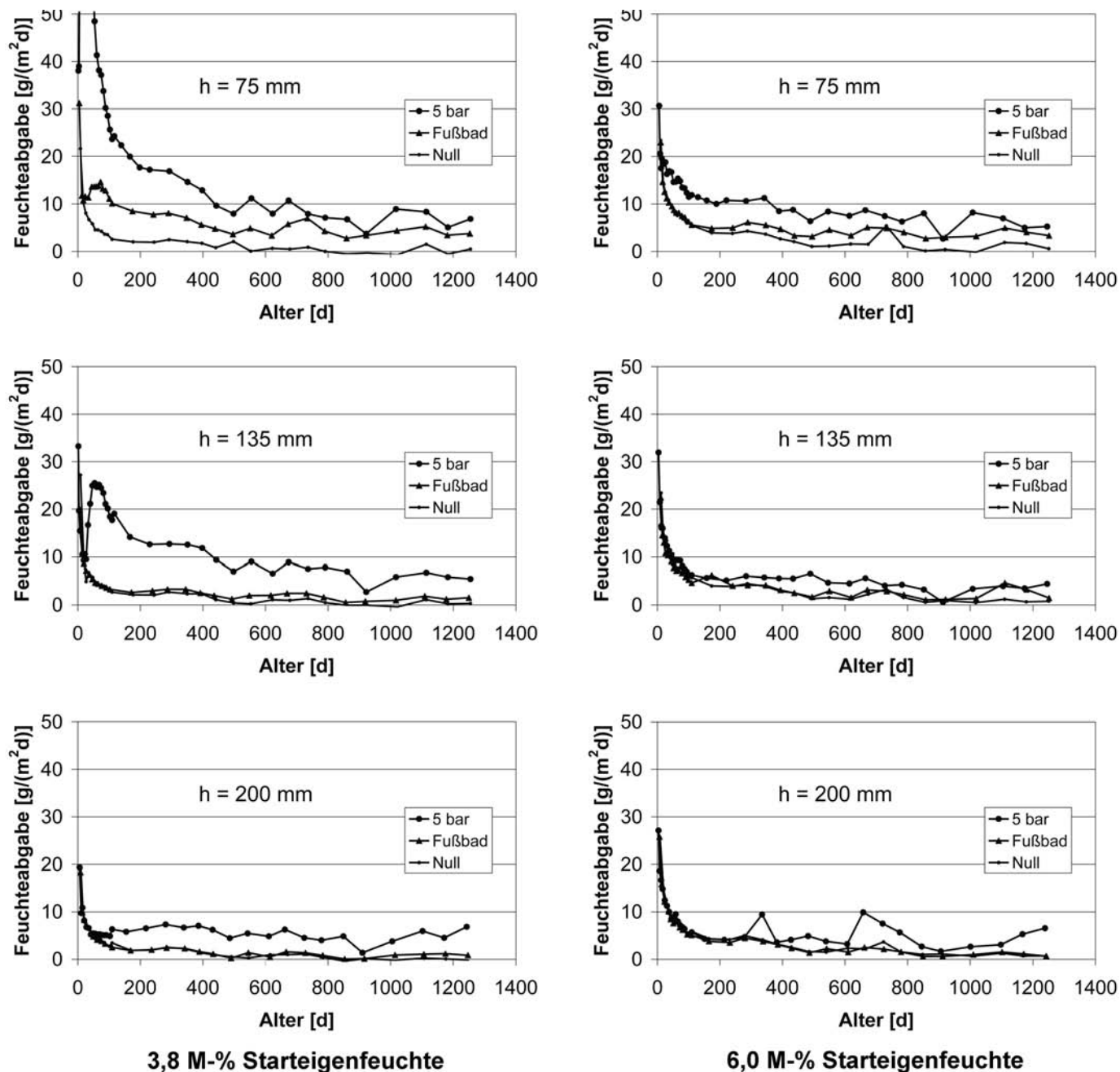


Bild 11. Feuchtedurchgangswerte aus Bild 10, umgerechnet in $[g/(m^2 \cdot d)]$
 Fig. 11. Humidity penetration values from fig. 10, converted into $[g/(m^2 \cdot d)]$

- Dies ist aber der Fall bei den Zylinderhöhen von 13,5 und 7,5 cm, die auch einen entsprechenden Dampfdurchtritt bei Fußbadlagerung aufweisen.
- Bei den 20 cm hohen Zylindern mit der baustellengerichteten höheren Starteigenfeuchte sinken die Werte im Mittel des letzten Messjahres unter $3 g/(m^2 \cdot d)$ (siehe Tabelle 3).

*Hinterfeuchtungsgefahr von Innenbeschichtungen
 Weißer Wannen ist bei guter Betonqualität
 nicht gegeben.*

Wohlgermerkt, die in Tabelle 3 für die WU-relevante Bauteildicke von 20 cm angegebenen Feuchtedurchgangswerte

von $0,1$ bis $2,9 g/(m^2 \cdot d)$ beziehen sich auf die für die Praxis überzogenen Parameter

- 50 m Wassersäule
- 3% r.F. im Bauwerksinneren

4 Zusammenfassung

In den vorgelegten Untersuchungen wird doppelt ausgewiesen, dass wasserdruckbeanspruchte, rissfreie Betonkonstruktionen nach WU-Richtlinie nicht nur auf der Innenseite keine Nässe zeigen, sondern auch keinen oder nur einen geringen Wasserdampfdurchtritt aufweisen:

- 1) In den untersuchten 11 bis 31 Jahre alten Tiefgaragen zeigen die grundwasserberührten WU-Bodenplatten in ihrer Mittelebene die normale Ausgleichsfeuchte von nach außen gewandten Bauteilen.

Tabelle 3. Ist-Wasserdampfdurchtritt der Proben mit baustellengerechter Starteigenfeuchte
Table 3. The actual water vapour penetration for the samples with a moderate start humidity

Bauteilhöhe [cm]	Wasserdruck	Wasserdampfdurchtritt im Mittel des letzten Versuchs- jahres, unter Abzug der Eigenfeuchteabgabe
		g/(m ² · d)
7,5	Fußbad 5 bar	2,9
		5,1
13,5	Fußbad 5 bar	1,6
		2,5
20,0	Fußbad 5 bar	0,1
		2,9

2) Im Versuch liegt bei einer 20 cm dicken Konstruktion aus Beton mit $w/z = 0,6$ und baustellengerechter Starteigenfeuchte, mit einer relativen Luftfeuchte auf der Innenseite von nur 3%, bei außen anstehendem Wasser folgender Feuchtedurchtritt vor:

- mit atmosphärischem Druck ein Feuchtedurchtritt von $0 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$
- bei 5 bar Wasserdruck ein Feuchtedurchtritt von $3 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$

Rechnet man ungeachtet der extremen Prüfbedingungen mit dem letztgenannten Wert beispielhaft den Feuchteeintrag einer 24 m^2 großen, außenseitig wasserberührten Wandfläche eines Kellerraumes, so führt dies auf

24 m^2 WU-Bauteilfläche, mit $3 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$: $72 \text{ g}/\text{d}$.

Nutzungsbedingt wird i. d. R. ein Vielfaches dieser Feuchtemengen eingetragen:

Topfpflanze, mittelgroß:	10 g/h	240 g/d
Mensch, leichte Aktivität:	40 g/h	960 g/d
Mensch, Trimmrad:	300 g/h	

3) Bereits in den Versuchen aus [3] war nachgewiesen worden, dass der Feuchtedurchgang der Konstruktion nach 2) bei Anordnung einer Dampfbremse auf der Innenseite nicht zu einer Hinterfeuchtung dieser Dampfbremse führt.

Diese Ergebnisse bedeuten für die hochwertige Nutzung einer intakten Weißen Wanne, dass eine normale Raumlüftung ausreichend ist. Wichtig ist die Vermeidung der Taupunktsituation auf der Wandinnenseite (Wände von außen mit Wärmedämmung vorsehen).

Die hochwertige Nutzung Weißer Wannen erfordert bei Einhaltung der festgestellten Qualitätsbedingungen keine zusätzlichen Dampfsperren.

Für Tiefgaragen in Weißer Wannen bedeuten die Ergebnisse, dass die Oberfläche der Bodenplatte risikolos durch eine OS-8-Beschichtung bei geeigneter Grundierung geschützt werden kann und zur Verhinderung von Chlorideintragung muss.

Für nicht sinnvoll und sogar schadensträchtig halten die Autoren die Maßnahme eines zusätzlichen „Sicherheits“-Bitumendickschichtauftrags aus KMB auf die Betonaußenwände. Die Wasserdichtheit der Weißen Wanne beruht nämlich im Wesentlichen auf zwei Phänomenen:

- A) Durch Wasserberührung dichtet ein Quellen der Gelstruktur den Betonquerschnitt ab, sofern der Beton eine ausreichend dichte Grundstruktur hat ($w/z \leq 0,6$).
- B) Ein Quellen der Makro-Struktur des wassergelagerten Bauteils verspannt die Konstruktion und vermeidet Schwindrisse.

Durch die gut gemeinte zusätzliche Beschichtung von außen werden diese Phänomene verschont:

- Die Wände trocknen aus und schwinden verstärkt, die Bodenplatte aber nicht, so dass sich in den Wänden vertikale Schwindrisse auf tun können – und, eine echte schwarze Wanne liegt nicht vor.

Literatur

- [1] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Richtlinie Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton (WU-Richtlinie). Beuth Verlag, Berlin und Köln, 2003.
- [2] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Erläuterungen zur DAfStb-Richtlinie Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton. Heft 555 DAfStb, Beuth Verlag, Berlin und Köln, 2006.
- [3] Schäper M. und Kreye, J.: Die kritischen Randbedingungen einer Innenbeschichtung Weißer Wannen. Beton- und Stahlbetonbau 98 (2003), Heft 1, S. 30–41.
- [4] Beddoe, R. und Springenschmid, R.: Feuchte-transport durch Bauteile aus Beton. Beton- und Stahlbetonbau 94 (1999), S. 158–166.
- [5] Fechner, O.: Wassertransport durch WU-Beton – Vermeidung von Feuchteschäden. Beton- und Stahlbetonbau 98 (2003), Heft 1, S. 42–51.
- [6] Wientzek, M.: WU-Bauwerke aus Beton – Feuchteprofile mit der Zeit, im Labor und am Bauwerk. Diplomarbeit im Labor für Massivbau, Fachhochschule Wiesbaden, 2005.
- [7] Kühn, M. und Hofmeister, I.: Simulation des Wasserdampfdurchtritts in einer Weißen Wanne – Messungen an Betonzyklindern unterschiedlicher Dicke und Eigenfeuchte. Diplomarbeit im Labor für Massivbau, Fachhochschule Wiesbaden, 2004.
- [8] Rucker, P., Beddoe, R. und Schießl, P.: Wasser- und Salzgehalt im Gefüge zementgebundener Baustoffe – Modellierung der auftretenden Mechanismen. Beton- und Stahlbetonbau 101 (2006), Heft 6, S. 402–412.



Prof. Dr.-Ing. Michael Schäper
schaeper@fab.fh-wiesbaden.de



Dipl.-Ing. Jörn Kreye
kreye@fab.fh-wiesbaden.de

Fachhochschule Wiesbaden und
Materialprüfamf für Bauwesen MPA Wiesbaden
Kurt-Schumacher-Ring 18
65197 Wiesbaden



PERMATON[®]

WATER**PROOF** ENGINEERING

www.permaton.de

Heidelberger Beton GmbH

Berliner Straße 10
69120 Heidelberg

www.heidelberger-beton.de



**HEIDELBERGER
BETON**

HEIDELBERGCEMENT Group