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, $w/z \le 0.6$, $h \ge 20$ 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 registrated.

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,
- 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 $\leq 50 \text{ m}$ $w/z \leq 0,60$ $h \geq 20 \text{ cm}$ 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 inzwischen 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 Bohrkerne 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 Bohrkerne 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:

$$f_{\text{satt, atmosphärisch}} = (w - z \cdot 0.25 \cdot m + LP) \cdot 100/\rho_{\text{trocken}} [M^{-0/0}]$$
 (1)

Kernfeuchte bei gedachter Versiegelung des frischen Betons:

$$f_{Kernfeuchte} = (w - z \cdot 0.25 \cdot m) \cdot 100/\rho_{trocken} [M^{-0/0}]$$
(2)

 Minimale Feuchte von in trocken-warmer Luft gelagertem Beton:

$$min~f_{lufttrocken} = z~(0.4-0.25) \cdot m~100/\rho_{trocken}~[M\mbox{-}\%] ~~(3) \label{eq:flufttrocken}$$

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 Innenbis 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	В	С	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	_	_	_	_	
			Sättigungsfeuchte ermittelt im Labor:				
$f_{\text{satt, atm.}} [M^{-0/0}]$	7,5 (100%)	5,8 (100%)	6,7	8,4	7,5	6,8	
$f_{Kernfeuchte}$ [M- 0 / $_{0}$]) ¹	6,3 (84%)	4,9 (84%)	Feuchte im Bauteil				
minf _{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	

^{)&}lt;sup>1</sup> 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

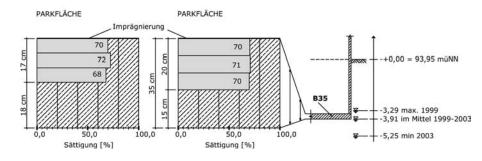


Bild 1. Feuchteprofil in der Bodenplatte der Tiefgarage A Fig. 1. Humidity profile in the base plate of the underground parking A

Tiefgarage B, Bürogebäudekomplex in Frankfurt-Niederrad

Alter 16 Jahre

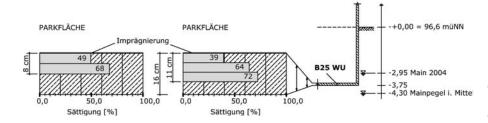


Bild 2. Feuchteprofil in der Bodenplatte der Tiefgarage B Fig. 2. Humidity profile in the base plate of the underground parking B

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 gegen 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 Streifenund Einzelfundamenten.

Tiefgarage C, Bürogebäudekomplex in Frankfurt-Niederrad Alter 31 Jahre

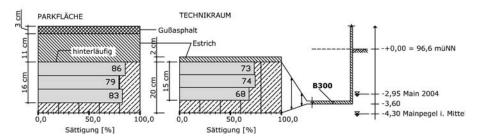


Bild 3. Feuchteprofil in der Bodenplatte der Tiefgarage C Fig. 3. Humidity profile in the base plate of the underground parking C

Tiefgarage D, Bürogebäudekomplex in Frankfurt-Niederrad

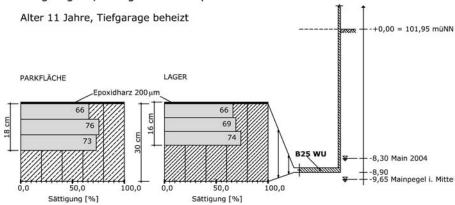


Bild 4. Feuchteprofil in der Bodenplatte der Tiefgarage D Fig. 4. Humidity profile in the base plate of the underground parking D

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 Feuchtewerte 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 gesperrten Flächenbereich, in dem Büromöbel gelagert sind.

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

Die Feuchtewerte 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 hervorragen-

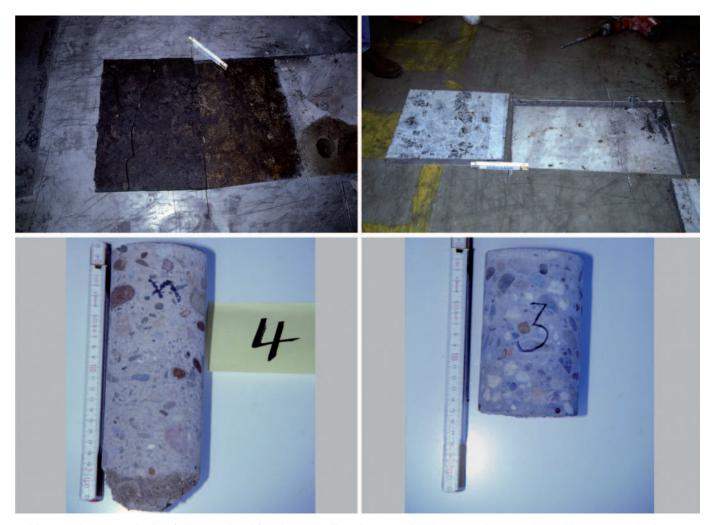


Bild 5. Links: Der Schadensfall einer durchfeuchteten erdberührten Bodenplatte; Rechts: Ein benachbarter Bauabschnitt mit höherer Betonqualität ist schadensfrei.

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 Bohrkerne 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 Sättigungsfeuchte, 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 Feuchtigkeitsgehaltsmessung - das Messprinzip in [3] - wird hier jedoch nach 110 Tagen vorgenommen. In der anderen der hier zwei parallelen Versuchsköperreihen 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-

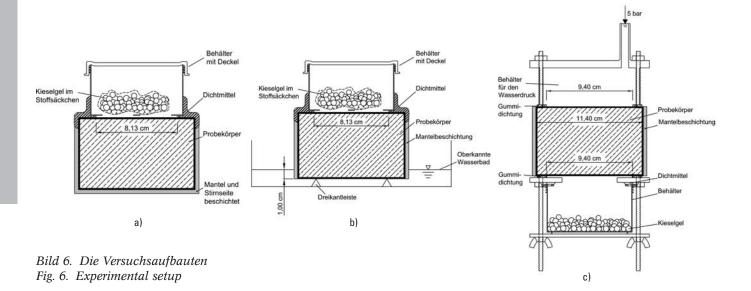


Tabelle 2. Daten des Betons der Versuchszylinder Table 2. Concrete data of the test cylinders

Zusammensetzung	Zement CEM I 32,5 R	$z = 367 \text{ kg/m}^3$	
	Größtkorn der Oberrheinkörnung	= 8 mm	
	Wasser	$w = 220 \text{ kg/m}^3$	
	Wasserzementwert	w/z = 0,60	
Frischbeton	LP-Gehalt	LP = 1,5 M-%	
	Ausbreitmaß	a = 46 cm	
Festbeton	Festbetontrockenrohdichte	$\rho_{tr}=2165~kg/m^3$	
	Druckfestigkeit	$f_{c, \text{ cube } 150, \text{ nass, } 28d} = 35.5 \text{ N/mm}^2$	
	Eindringtiefe e bei Wasserdurchlässigkeitsprüfung nach DIN 1048	e = 23 mm	
	Sättigungsfeuchte im Versuch, Alter 170 d – atmosphärisch – 150 bar-Normversuch	$f_{satt, atm} = 7.2 \text{ M}-\%$ $f_{satt, 150 \text{ bar}} = 8.3 \text{ M}-\%$	
	Sättigungsfeuchte rechnerisch, m = 0,85 - atmosphärisch - im 150 bar-Normversuch	$f_{satt, atm} = 7.3 \text{ M}-\%$ $f_{satt, 150 \text{ bar}} = 8.1 \text{ M}-\%$	

gebnisse von Wasserdampfdurchtritten auf der sicheren Seite liegen.

Die Zylinder wurden aus Balken $15 \times 15 \times 70$ 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):

$$\begin{array}{l} f_{satt,\;atmosph\ddot{a}risch} = \\ (220-367\cdot0,\!25\cdot0,\!85+15)\cdot100/2165 = 7,\!3~M\text{-}\% \end{array}$$

f_{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

h = 20.0 cmh = 13,5 cmh = 7.5 cm

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_{Kernfeuchte} = 6,6 M-% und die minimale durch Lufttrocknung erzielbare Feuchte mit Gl. (3) zu min f_{lufttrocken} = 2,2 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:

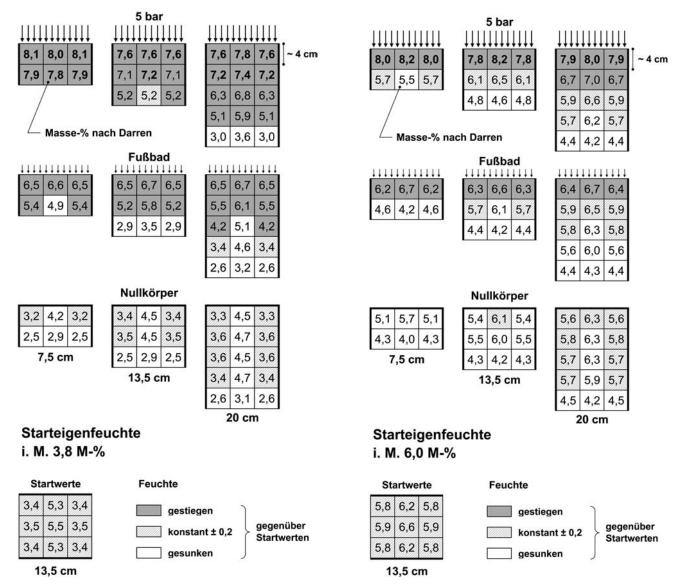


Bild 7. Feuchtegehalte in den Zylindern nach 110 d Prüfdauer

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 Feuchtegehaltsmessung spalten zu können.

3.2 Die Startphase der Laborversuche

Für das Spalten der Zylinder einer der beiden parallelen Versuchskörperreihen zur Feuchtegehaltsmessung nach 110 d wurde die Technik gegenüber [3] verfeinert: Es wurde auch in radialer Richtung eine Feuchtegehaltsdifferenzierung 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 ≥ 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:

 $w_{chem} = z \cdot 0.25 \cdot m_o [kg/m^3]$ mit z nach Tabelle 2

physikalisch gebundenes Wasser:

$$w_{phys} = z \cdot (0.4 - 0.25) \cdot m_o [kg/m^3]$$

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

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

- Beliebiger Zeitpunkt mit dem Zwischen-Hydratationsgrad m_t:

verbleibendes freies Wasser:

$$\begin{array}{ll} w_{frei,\,t} \, = \, \rho_{tr} \cdot f_o - z \cdot (0.4 - 0.25) \cdot m_t - z \cdot 0.25 \cdot (m_t - m_o) \\ [kg/m^3] \end{array}$$

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

 $f_0 = 6 \text{ M} - \%$ hohe Starteigenfeuchte $m_0 = 0.75$ zugehörige Startreife $f_0 = 3.8 \text{ M} - \%$ niedrige Starteigenfeuchte $m_0 = 0.80$ 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 Kieselgelkappe 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

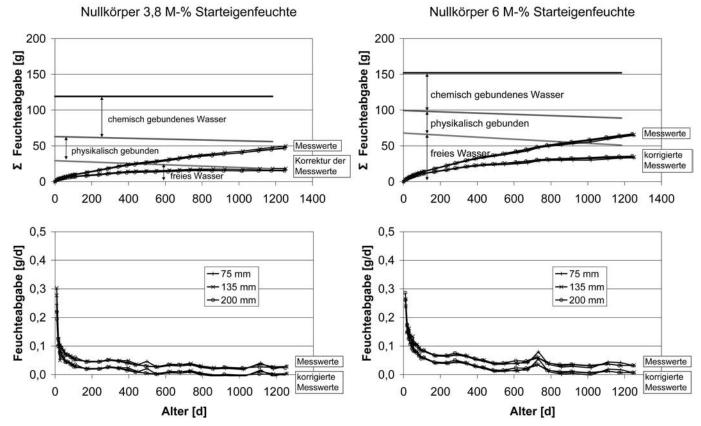


Bild 8. Analyse und Korrektur der Eigenfeuchteabgabe der Nullkörper Fig. 8. Analysis and correction of the emitted self-humidity of the zero-samples

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

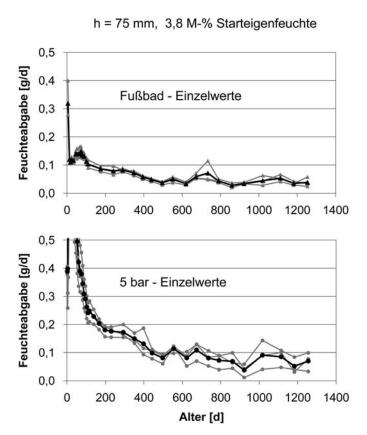


Bild 9. Die Streuung der gemessenen Feuchtedurchgangswerte

Fig. 9. Dispersion of the measured humidity penetration

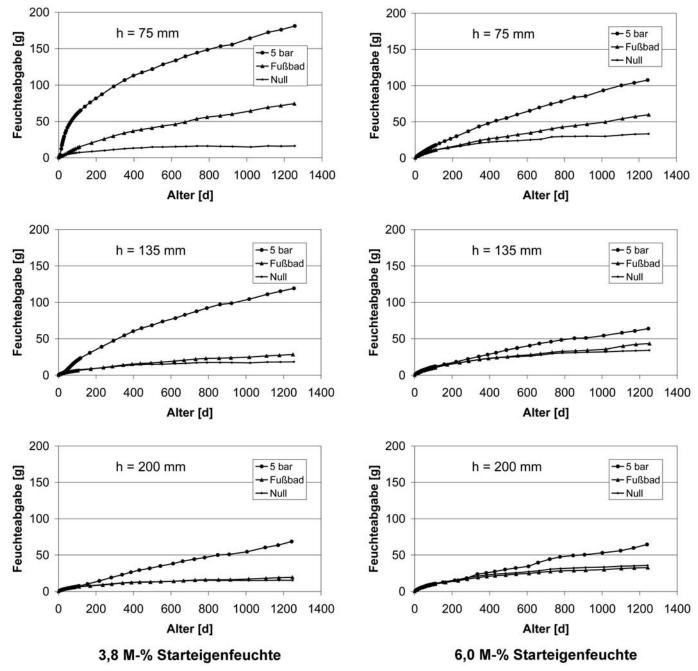


Bild 10. Alle gemessenen, nach Bild 8 korrigierten, Feuchtedurchgangswerte Fig. 10. All measured, according to fig. 8 corrected, humidity penetrations

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 ½
 Jahren noch laufenden Versuch hatte sich nach ca.

 ½ 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/(m $^2 \cdot$ 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 baustellengerechten 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.

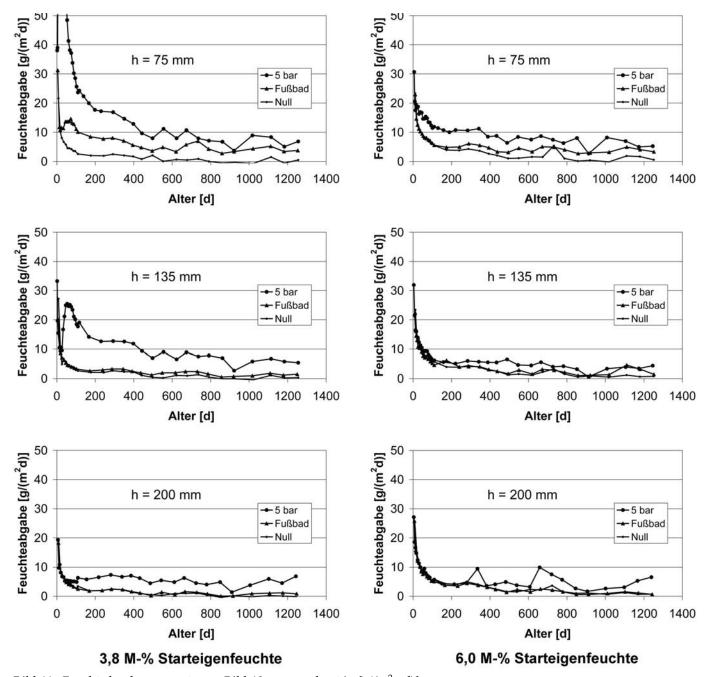


Bild 11. Feuchtedurchgangswerte aus Bild 10, umgerechnet in $[g/(m^2 \cdot d)]$ Fig. 11. Humidity penetration values from fig. 10, converted into $[g/(m^2 \cdot d)]$

- 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 baustellengerechten 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.

Wohlgemerkt, die in Tabelle 3 für die WU-relevante Bauteildicke von 20 cm angegebenen Feuchtedurchgangswer-

te 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	Wasserdruck	Wasserdampfdurchtritt im Mittel des letzten Versuchs- jahres, unter Abzug der Eigenfeuchteabgabe
[cm]		$g/(m^2 \cdot d)$
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 g/($m^2 \cdot d$)
 - bei 5 bar Wasserdruck ein Feuchtedurchtritt von $3 \text{ g/(m}^2 \cdot d)$

Rechnet man ungeachtet der extremen Prüfbedingungen mit dem letztgenannten Wert beispielhaft den Feuchteeintrag einer 24 m² großen, außenseitig wasserberührten Wandfläche eines Kellerraumes, so führt dies auf

24 m² WU-Bauteilfläche, mit $3 g/(m^2 \cdot d)$: 72 g/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 Weißen 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 $(w/z \le 0,6)$.
- 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 Phänome verschenkt:

 Die Wände trocknen aus und schwinden verstärkt, die Bodenplatte aber nicht, so dass sich in den Wänden vertikale Schwindrisse auftun 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-Richtline 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.: Feuchtetransport 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 Betonzylindern 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 Materialprüfamt für Bauwesen MPA Wiesbaden Kurt-Schumacher-Ring 18 65197 Wiesbaden