

Untersuchungsdurchführung und Ergebnisse

Einfluss der Nachbehandlung auf die Dichtigkeit und Druckfestigkeit von Beton

Stefan Kubens, Erich Zellhuber, Kai Rabald und Robin Heidel, München

Die Dichtigkeit der aus nur wenigen Zentimetern bestehenden Betondeckung übt einen wesentlichen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit eines bewehrten Betonbauteils aus. Die Dichtigkeit des oberflächennahen Betons ist stark abhängig von Qualität und Dauer der Nachbehandlung [1, 2]. Sowohl an Probekörpern im Betonlabor der Münchner Baustoff-Prüfungs GmbH als auch an Bauteilen auf der Baustelle Allianz Arena in München [3] wurden Untersuchungen durchgeführt, um den Einfluss der Nachbehandlung auf Dichtigkeit und Druckfestigkeit des Betons zu ermitteln [4]. Über Durchführung und Ergebnisse wird berichtet.

1 Versuchsdurchführung

Ein Messverfahren zur Beurteilung der oberflächennahen Betondichtigkeit ist das Torrent-Verfahren [5, 6]. Das Gerät basiert auf einem Messverfahren, welches Schonlin und Hilsdorf im Mai 1987 auf einer ACI-Konferenz vorgestellt haben [7]. Das Torrent-Verfahren ist noch nicht standardisiert. Mit der Messung der Gaspermeabilität besteht – unabhängig davon, mit welchem Verfahren die Durchlässigkeit des Kapillarporensystems gemessen wird – die Möglichkeit, die indirekte Baustoffeigenschaft Dichtigkeit qualitativ zu beurteilen.

Zur Überprüfung der Nachbehandlung am Bauteil wurde im Rahmen einer Studienarbeit [4] im Betonlabor der Münchner Baustoff-Prüfungs GmbH auf der Baustelle Allianz Arena ein Prüfprogramm aufgestellt und abgearbeitet. Die Zusammensetzung der untersuchten Betone ist in Tafel 1 aufgeführt.

Der Einfluss der Nachbehandlung auf die Permeabilität wurde an Laborprobekörpern und an Bauteilen festgestellt. Der Beton für die Probekörper und das jeweilige Bauteil stammten aus demselben Mischerfahrzeug. Die Laborprobekörper wurden in Stahlscha-

lungen hergestellt und hatten die Abmessungen 150 mm x 150 mm x 150 mm. Alle Probekörper wurden gleichlang verdichtet, zweimal 22 Sekunden.

Die Nachbehandlungsvarianten sahen wie folgt aus:

Nachbehandlung am Probekörper: Nach dem Ausschalen Belassen der Probekörper im Wasserbad ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) bis zum jeweiligen Prüfaller (max. 7 d). Entnahme der Probekörper rd. 3 h vor Permeabilitätsmessung zur Reduzierung des Feuchtigkeitseinflusses. Permeabilitätsmessung nach 2 d, 3 d, 7 d, 28 d.

Keine Nachbehandlung am Probekörper: Nach Ausschalen Belassen der Probekörper in Laboratmosphäre ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}/65\text{ }^{\circ}\text{r.F.}$) bis zum jeweiligen Prüfaller. Permeabilitätsmessung nach 2 d, 3 d, 7 d, 28 d.

Nachbehandlung am Bauteil: Belassen der Stützen in der Schalung bzw. Umhüllung mit Folie (Bild 1) bis zum jeweiligen Prüfaller (max. 7 d). Nach der Messung wurden die Schaltafeln wieder montiert bzw. die Folien wieder angeklebt. Permeabilitätsmessung nach 2 d, 3 d, 7 d, 28 d.

Keine Nachbehandlung am Bauteil: Nach Ausschalen keine Nachbehandlungsmaßnahmen an Teilflächen (50 cm x 50 cm). Permeabilitätsmessung nach 2 d, 3 d, 7 d, 28 d.

Die Autoren:

Stefan Kubens studierte Bauingenieurwesen an der Bauhaus-Universität Weimar mit dem Schwerpunkt Baustoffe und Sanierung am F.A. Finger Institut für Baustoffkunde. Nach dem Abschluss seiner Diplomarbeit am Technion, Haifa, bei Prof. Arnon Bentur ist er seit 2002 als Betontechnologe für die Münchner Baustoff-Prüfungs GmbH tätig.

Erich Zellhuber ist Prüfstellenleiter der Münchner Baustoff-Prüfungs GmbH und seit mehr als 30 Jahren als Betontechnologe und Berater im Münchner Raum bekannt. Erich Zellhuber und Stefan Kubens waren auf den Baustellen Allianz Arena, Parkgarage, U-Bahn und Stadionbrücken für den Bereich Betontechnologie zuständig.

Kai Rabald studiert zurzeit Bauingenieurwesen an der Bauhaus-Universität Weimar in der Vertiefungsrichtung Baustoffe und Sanierung. Für seine erste Studienarbeit war er mehrere Monate im Betonlabor der Allianz Arena mit Torrent-Tests beschäftigt.

Robin Heidel studierte Bauingenieurwesen mit Schwerpunkt Bauproduktion und Bauwirtschaft an der Universität Dortmund. Er ist Mitarbeiter am Institut für Baumanagement (IQ-Bau) an der Bergischen Universität Wuppertal und betreut zurzeit ein Forschungsprojekt zur Weiterentwicklung eines integrativen Managementsystems in Kooperation mit der Alpine Bau Deutschland GmbH.

Tafel 1: Zusammensetzung von Betonen der Allianz Arena München und der Parkgarage [3] für das Versuchsprogramm

Beton		A	B	C
Betonfestigkeitsklasse		C35/45	C45/55	C30/37
Ausbreitmaß	mm	420	400	430
Zementart und Festigkeitsklasse		CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 R
Zementgehalt z	kg/m ³	420	460	370
Wassergehalt w	kg/m ³	210	205	185
Wasserzementwert w/z		0,50	0,45	0,50
Gesteinskörnung				
Sieblinie		A16/B16	A16/B16	A16/B16
Gehalt	kg/m ³	1755	1722	1866
Betonzusatzmittel				
Art		BV	FM	BV
Gehalt	M.-% v.z	0,3	1,0	0,3



Bild 1: Nachbehandlung am Bauteil, in Folie eingeschlagene Stützen
Quelle: Betonlabor

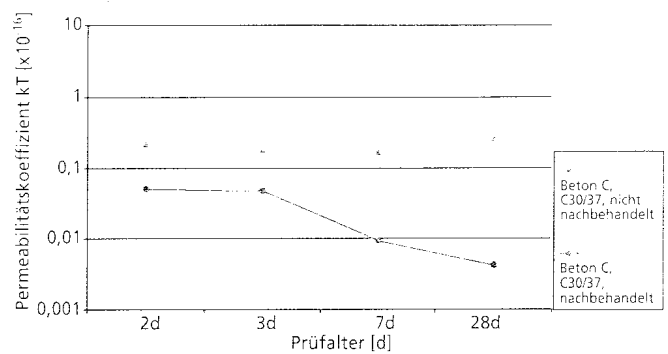


Bild 2: Einfluss der Nachbehandlung auf den Permeabilitätskoeffizienten kT am Beispiel des Betons C unter Laborbedingungen

2 Ergebnisse der Bestimmung der Dichtigkeit

Die Dichtigkeit der Betone wurde nach 2 d, 3 d, 7 d und 28 d bestimmt. Der Datensatz einer Torrentmessung enthält drei Parameter, den Permeabilitätskoeffizienten, den elektrischen Widerstand der Messfläche und die Eindringtiefe des Vakuums. Die Eindringtiefe des Vakuums wird vom Messgerät automatisch aus dem Permeabilitätskoeffizienten berechnet. Mit steigendem Permeabilitätskoeffizienten erhöht sich die Durchlässigkeit des Betons gegenüber Gasen, ein sinkender Permeabilitätskoeffizient zeigt einen dichter werdenden Beton an.

Ein steigender elektrischer Widerstand an der Messstelle zeigt eine Verringerung des Feuchtegehalts im Beton an, z.B. aufgrund von Verdunstung und Hydratation. Die Messung des elektrischen Widerstands an Bauteilen im Freien ist besonders wichtig, da an feuchten Messstellen deutlich geringere Permeabilitätskoeffizienten als an trockenen Messstellen gemessen werden können. Durch ein Nomogramm [8] wird der Einfluss der Feuchte abgemindert.

Die in diesem Beitrag diskutierten Ergebnisse wurden weitgehend an trockenen Messstellen gewonnen, was sich darin niederschlägt, dass der elektrische Widerstand meist sehr hoch lag (Tafel 2). Der Einfluss der Feuchte kann daher vernachlässigt werden.

2.1 Einfluss der Nachbehandlung auf den Permeabilitätskoeffizienten

Der Permeabilitätskoeffizient nicht nachbehandelter Betone unter Labor- und Baustellenbedingungen lag nach 28 d im Mittel zwischen 0,1 und 1,0. Nach [8] ist dieser Beton als nur mittelmäßig einzustufen. Der Permeabilitätskoeffizient nachbehandelter Betone (Laborbedingungen) lag nach 28 d zwischen 0,001 und 0,01. Teilweise ist die Dichtigkeit am trockenen Bauteil so gut, dass die Nachweisgrenze des Torrent-Geräts erreicht wurde. Nach [8] ist dieser Beton als sehr gut zu bezeichnen.

Ein gutes Beispiel für den unterschiedlichen Verlauf des Permeabilitätskoeffizienten bei nachbehandelten und nicht nachbehandelten Betonen ist der Beton C (Bild 2). Unter Laborbedingungen zeigen die Betone A (C35/45) und C (C30/37) eine Verbesserung

des Permeabilitätskoeffizienten aufgrund der siebentägigen Nachbehandlung um den Faktor 70 bis 100. Unter Baustellenbedingungen zeigen die gleichen Betone eine Verbesserung des Permeabilitätskoeffizienten um den Faktor 6 bis 20.

Eine Sonderstellung nimmt der Beton B (C45/55) ein. Sowohl unter Labor- und Baustellenbedingungen als auch an nicht nachbehandelten und nachbehandelten Betonen wurden im Mittel Permeabilitätskoeffizienten von 0,001 bis 0,002 gemessen. Offensichtlich wirkt sich der hohe Zementgehalt (460 kg/m³ CEM I 42,5R) in Verbindung mit einem geringen w/z-Wert (0,45) und dem Einsatz eines hochwirksamen Fließmittels so positiv auf das Betongefüge aus, dass mit dem Torrent-Tester nur marginale Unterschiede zwischen nicht nachbehandeltem Beton und nachbehandeltem Beton sichtbar wurden.

2.2 Einfluss der Druckfestigkeitsklasse auf den Permeabilitätskoeffizienten

Der Permeabilitätskoeffizient der drei Druckfestigkeitsklassen wurde nach 2 d, 3 d, 7 d und 28 d bestimmt. Zur Veranschaulichung dient die Messreihe „Nachbehandelte Pro-

Tafel 2: Torrentwerte nach 28 Tagen

Beton (Festigkeitsklasse)			A (C35/45)			B (C45/55)			C (C30/37)		
			kT ¹⁾	el. W. ²⁾ [kΩcm]	E.-tiefe ³⁾ [mm]	kT ¹⁾	el. W. ²⁾ [kΩcm]	E.-tiefe ³⁾ [mm]	kT ¹⁾	el. W. ²⁾ [kΩcm]	E.-tiefe ³⁾ [mm]
Nachbehandelt	Laborbedingungen	Einzelwerte	0,003	999,0	3,5	0,001	999,0	2,0	0,006	999,0	5,3
			0,005	999,0	4,8	0,004	999,0	4,2	0,004	999,0	4,2
		Mittelwert	0,002	999,0	3,3	0,001	999,0	1,8	0,003	999,0	4,0
	Baustellenbedingungen	Einzelwerte	0,003	999,0	3,9	0,002	999,0	2,7	0,004	999,0	4,5
			0,008	11,0	6,2	0,001	13,0	1,5	0,015	999,0	8,3
		Mittelwert	0,086	11,0	20,0	0,001	13,0	1,5	0,027	999,0	11,2
Nicht nachbehandelt	Laborbedingungen	Einzelwerte	0,050	11,0	15,2	0,001	11,0	1,5	0,019	999,0	9,4
			0,048	11,0	13,8	0,001	12,3	1,5	0,020	999,0	9,6
		Mittelwert	0,344	999,0	39,9	0,003	999,0	3,7	0,287	999,0	36,5
	Baustellenbedingungen	Einzelwerte	0,265	999,0	35,1	0,001	999,0	1,5	0,084	999,0	19,8
			0,318	999,0	38,4	0,001	999,0	1,5	0,435	999,0	45,0
		Mittelwert	0,091	999,0	20,6	0,001	9,5	1,5	0,059	999,0	16,5
Baustellenbedingungen	Einzelwerte	0,316	12,0	39,3	0,003	10,0	4,0	0,075	999,0	18,6	
		0,437	10,0	45,0	0,001	14,0	2,2	0,020	999,0	9,6	
	Mittelwert	0,281	340,3	35,0	0,002	11,2	2,6	0,051	999,0	14,9	

¹⁾ Permeabilitätskoeffizient kT; ²⁾ elektrischer Widerstand; ³⁾ Eindringtiefe des Vakuums

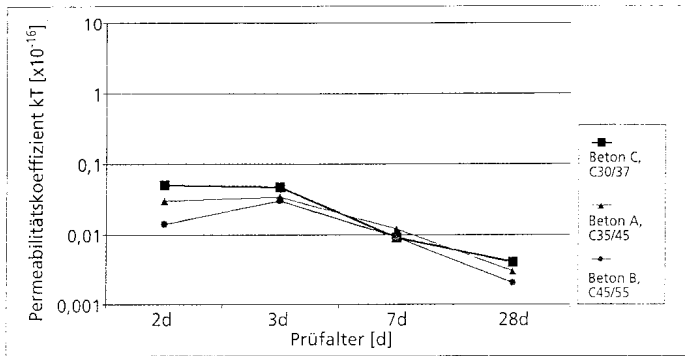


Bild 3: Einfluss der Druckfestigkeitsklasse auf den Permeabilitätskoeffizienten k_T am Beispiel nachbehandelter Probekörper unter Laborbedingungen

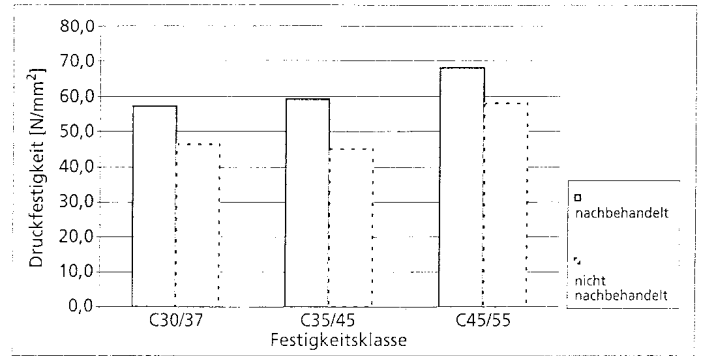


Bild 4: Einfluss der Nachbehandlung auf die Druckfestigkeiten nach 28 Tagen

bekörper unter Laborbedingungen“ (Bild 3). Der Rückgang des Permeabilitätskoeffizienten nach drei Tagen fällt aufgrund der fortschreitenden Hydratation für alle Betone konstant gleichmäßig aus.

Die Unterschiede im Permeabilitätskoeffizienten zwischen den einzelnen Druckfestigkeitsklassen sind zwei Tage nach Herstellung noch deutlich sichtbar, nach 28 Tagen jedoch äußerst gering. Der C30/37 erreicht nach 28 d einen Koeffizienten von 0,004, der C45/55 liegt bei 0,002, dazwischen liegt der C35/45 mit 0,003. Diese geringen Werte indizieren einen äußerst dichten Beton [8].

Bemerkenswert ist der geringe Unterschied zwischen dem C30/37 und dem C45/55 (s. Bild 3). Dies bedeutet, dass mit einem Beton C30/37 ein ebenso dichtes und langlebiges Bauteil hergestellt werden kann wie mit einem C45/55. Der Einfluss der Druckfestigkeitsklasse auf den Permeabilitätskoeffizienten ist unter Laborbedingungen bei ausreichender Nachbehandlung sehr gering.

3 Einfluss der Nachbehandlung auf die 28d-Druckfestigkeit

Zur Bestimmung des Einflusses der Nachbehandlung auf die Druckfestigkeit nach 28 d wurden nachbehandelte Probekörper 7 Tage unter Wasser gelagert, danach unter Laboratmosphäre (20 °C/65 % r. F.). Nicht nachbehandelte Probekörper wurden nach dem Ausschalen bis zum Prüfalter in Laboratmosphäre

gelagert. Die nach 28 Tagen ermittelten Druckfestigkeiten der nachbehandelten und nicht nachbehandelten Betone A, B und C sind in Tafel 3 aufgelistet sowie in Bild 4 dargestellt. Die nachbehandelten Betone erzielen nach 28 d sehr hohe Festigkeiten. An nicht nachbehandelten Betonen wurden spürbar niedrigere Festigkeiten ermittelt. Fehlende Nachbehandlung führte zu einem Verlust in den Festigkeiten zu späten Prüfterminen von 15 % bis 22 %. Das Erreichen der Druckfestigkeitsklasse C35/45 und C45/55 wäre an nicht nachbehandelten Betonen zumindest fraglich.

4 Zusammenfassung

Im Betonlabor der Münchner Baustoff-Prüfungs GmbH und auf den Baustellen Allianz Arena und Parkgarage wurde der Einfluss der Nachbehandlung auf Festbetonparameter untersucht. Dies geschah an hierfür hergestellten Probekörpern und am Bauteil. Zusammenfassend lässt sich sagen:

Nachbehandelte Betone erreichen eine vielfach höhere Dichtigkeit als nicht nachbehandelte Betone, unter Baustellenbedingungen betrug der Faktor 6 bis 20, unter Laborbedingungen waren nachbehandelte Betone um das 70- bis 100-fache dichter als nicht nachbehandelte Betone.

Bei gleichem Nachbehandlungsaufwand kann ein Beton der Druckfestigkeitsklasse C30/37 genauso dicht werden wie ein Beton der Druckfestigkeitsklasse C45/55.

Der Einfluss der Nachbehandlung auf die dauerhaftigkeitsrelevante Eigenschaft Gaspermeabilität (Permeabilitätskoeffizient k_T) ist deutlich höher als der Einfluss der Nachbehandlung auf die Druckfestigkeit nach 28 Tagen.

Literatur

- [1] Kubens, S.; Bentur A.: Durability of concretes in hot climates – Properties of concrete cover with respect to Performance Concept. Research Report/Diploma thesis, Collaborative Research: Technion- Israel Institute of Technology Haifa – F.A. Finger Institut für Baustoffkunde, Bauhaus Universität Weimar, 2002
- [2] Bentur, A.; Wasserman, R.; Kubens, S.: Non destructive air permeability tests to assess the performance of the concrete cover. Tagungsbericht – Band 2 zur 15. Internationalen Baustofftagung ibausil, 24.–27.09.2003, F.A. Finger Institut für Baustoffkunde, Bauhaus Universität Weimar
- [3] Heidel, R.; Kubens, S.; Zellhuber, E.: Bau des Fußballstadions Allianz Arena in München. beton 54 (2004) H. 12, S. 594–596
- [4] Rabald, K.: Güteüberwachung und Nachbehandlung auf der Allianz Arena. Studienarbeit an der Bauhaus Universität Weimar, F.A. Finger Institut für Baustoffkunde, Kooperation Alpine Bau Deutschland GmbH – Bauhaus Universität Weimar, 2004
- [5] Torrent, R.; Frenzer, G.: A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the covercrete. International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-C/E), Berlin 26.–28.09.1995
- [6] Torrent, R. J.: Non-Destructive Methods to Evaluate the Concrete Cover. State-of-the-Art Report (First Draft), RILEM TC NEC, 11/2001
- [7] Schonlin, K.; Hilsdorf, H.: Evaluation of the Effectiveness of Curing of Concrete Structures. Proceedings ACI-Conference “Concrete Durability, Katherine and Bryant International Conference”, Mai 1987, S. 207–226
- [8] Proceq: Bedienungsanleitung TORRENT Permeability Tester. Proceq SA, Zürich 2001

Tafel 3: Rohdichte und Druckfestigkeit der Betone nach 28 Tagen

Beton (Festigkeitsklasse)		A (C35/45)			B (C45/55)			C (C30/37)		
		Rohdichte	Druckfestigkeit		Rohdichte	Druckfestigkeit		Rohdichte	Druckfestigkeit	
		[kg/dm ³]	$f_{c, \text{cube, dry}}$ [N/mm ²]	$0,92 f_{c, \text{cube, dry}}$ [N/mm ²]	[kg/dm ³]	$f_{c, \text{cube, dry}}$ [N/mm ²]	$0,92 f_{c, \text{cube, dry}}$ [N/mm ²]	[kg/dm ³]	$f_{c, \text{cube, dry}}$ [N/mm ²]	$0,92 f_{c, \text{cube, dry}}$ [N/mm ²]
Nachbehandelt	Einzelwerte	2,40	67,1	61,7	2,40	73,5	67,6	2,38	60,9	56,0
		2,39	62,3	57,3	2,41	73,0	67,2	2,38	61,7	56,8
		2,39	63,9	58,7	2,42	75,0	69,0	2,38	63,7	58,6
	Mittelwert	2,39	64,4	59,3	2,41	73,8	67,9	2,38	62,1	57,1
Nicht nachbehandelt	Einzelwerte	2,37	50,4	46,4	2,39	63,8	58,7	2,36	51,5	47,4
		2,36	48,5	44,6	2,40	65,3	60,1	2,35	51,9	47,7
		2,36	49,9	45,9	2,40	62,6	57,6	2,34	49,3	45,3
	Mittelwert	2,37	49,6	45,7	2,40	63,9	58,8	2,35	50,9	46,8