

## Ergebnisse eines Forschungsprojekts

# Nachbehandlung von Beton

Frank Jacobs, Wildegg, Schweiz

Durch ein von der TFB AG in Wildegg, Schweiz, im Auftrag des Bundesamts für Straßen (ASTRA) durchgeführtes Forschungsprojekt sollte geklärt werden, ob das Konzept zur Nachbehandlung in der EN 13670, das auf der Festigkeitsentwicklung des Betons basiert, auch den Dauerhaftigkeitsanforderungen genügend Rechnung trägt. Zwei Betone mit CEM I-Zement und CEM III/B-Zement wurden einerseits konstanten Temperaturen und Luftfeuchten im Labor, andererseits unterschiedlichen Temperaturen und Luftfeuchten im Freien ausgesetzt. Die Prüfkörper wurden während unterschiedlich langer Zeiträume unter Folie oder in Wasser gelagert oder mit Nachbehandlungsmittel besprüht, und es wurde an der Schalung eine wasserabführende Schalungsbahn angebracht. Einige Versuchsergebnisse werden in dem Beitrag erläutert, Folgerungen aus den Erkenntnissen des Forschungsprojekts im Vergleich mit den Normanforderungen gezogen und Empfehlungen ausgesprochen.

### 1 Einleitung

In den vergangenen Jahrzehnten ist erkannt worden, dass bei Bauwerken aus Stahlbeton die häufigsten Schäden durch eine ungenügende Dauerhaftigkeit und nicht durch eine ungenügende Festigkeit verursacht wurden. Die Qualität und die Dicke der Betondeckung der Bewehrung bestimmen in den meisten Fällen die Dauerhaftigkeit der Bauwerke gegenüber dem heute dominierenden Schadensmechanismus der Bewehrungskorrosion. In der EN 206-1 [1] bzw. in der Schweiz in der SN EN 206-1 [2] ist geregelt, wie das Betonwerk die Qualität des hergestellten Betons im Rahmen des Konformitätsnachweises nachzuweisen hat. In der EN 206-1 sind nicht nur Anforderungen an die Betonzusammensetzung sondern auch an Festbetoneigenschaften gestellt. Letztere müssen an separat hergestellten und zumeist an bis zu 28 Tage in Wasser bei 20 °C gelagerten Prüfkörpern bestimmt werden.

Die Eigenschaften der Betondeckung hängen jedoch nicht nur von der Betonzusammensetzung, sondern auch vom Einbau, den Umgebungstemperaturen und von der Nachbehandlung auf der Baustelle ab. Die auf die Baustelle gelieferte Betonqualität darf durch den Einbau und die praktizierte Nachbehandlung nicht wesentlich verschlechtert werden. In der Norm EN 13670 [3] (in der Schweiz SIA 262, [4]) sind detailliertere Vor-

gaben für die Nachbehandlungsdauer von Beton enthalten. Diese Vorgaben orientieren sich an der Festigkeitsentwicklung und den Umgebungstemperaturen.

Mit einem Forschungsprojekt sollte im Auftrag des Bundesamts für Straßen (ASTRA) geklärt werden, ob das Konzept zur Nachbehandlung in der EN 13670, das nur auf der Festigkeitsentwicklung basiert, auch den Dauerhaftigkeitsanforderungen genügend Rechnung trägt. Dabei wurde unter Nachbehandlung nur der Schutz vor Austrocknung verstanden. Ein Teil der Untersuchungsergebnisse wird im Folgenden beschrieben.

### 2 Nachbehandlung gemäß EN 13670

In EN 13670 werden je nach vorgesehener Beanspruchung des Betons vier Nachbehandlungsklassen unterschieden (Tafel 1). Betone, die der Nachbehandlungsklasse 1 zugeordnet werden, z.B. Betone der Expositions-klasse XC1, müssen mindestens einen halben Tag nachbehandelt werden. Die Nachbehandlungsklassen 2, 3 und 4 sind von der Festigkeitsentwicklung des Betons abhängig. So soll ein Beton der Nachbehandlungsklasse 2 mindestens so lange nachbehandelt werden, bis 35 % der spezifizierten charakteristischen Druckfestigkeit nach 28 Tagen erreicht sind. Hierunter fiel z.B. ein Beton, der der Expositions-klasse XC2 zugeordnet wird. Die Nachbehandlungsklasse 3 könnte z.B.

bei einem Beton für eine bewitterte Fassade (XC4), die Nachbehandlungsklasse 4 für einen Beton mit Widerstand gegen Frost und Taumittel (XF4) gefordert werden.

Alternativ zu diesem Konzept wird in EN 13670 die Nachbehandlungsdauer in Tagen in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur des Betons und seiner Festigkeitsentwicklung angegeben (Tafel 2). Diese wird durch das Verhältnis  $r$  der mittleren Druckfestigkeit nach 2 Tagen  $f_{cm,2}$  zur mittleren Druckfestigkeit nach 28 Tagen  $f_{cm,28}$  beschrieben. Die Festigkeitsentwicklung wird in drei Gruppen „schnell“, „mittel“ und „langsam“ unterteilt. Bei einer sehr langsamen Entwicklung der Betonfestigkeit ( $r < 0,15$ ) sollten in den bautechnischen Unterlagen besondere Anforderungen an die Dauer der Nachbehandlung angegeben werden. Die Festigkeitsentwicklung ist vom Betonwerk entweder im Rahmen der Erstprüfung zu ermitteln oder beruht auf bekanntem Verhalten von Beton vergleichbarer Zusammensetzung.

#### Der Autor:

**Dipl.-Geol. Dr. sc. techn. Frank Jacobs** studierte Geologie/Paläontologie an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen/Nürnberg. Von 1988 bis 1993 arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand am Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion der ETH Zürich, wo er 1994 promovierte. Heute ist Frank Jacobs als Technischer Berater an der Technischen Forschung und Beratung für Zement und Beton (TFB) in Wildegg/Schweiz vor allem im Bereich Betontechnologie, Dauerhaftigkeit und Umwelteigenschaften von Zement und Beton tätig und ist auch in nationalen und internationalen Arbeitsausschüssen engagiert.

Tafel 1: Nachbehandlungsklassen und Nachbehandlungsdauer nach EN 13670

Nachbehandlungsklasse		1	2	3	4
Dauer	h	12 <sup>1)</sup>	–	–	–
Dauer definiert als Anteil der charakteristischen Festigkeit	%	–	35	50	70

<sup>1)</sup> Sofern das Erstarren nicht länger als 5 Stunden dauert und die Betontemperatur an der Oberfläche mindestens 5 °C beträgt.

**Tafel 2: Mindestnachbehandlungsdauer in Tagen in Abhängigkeit von der Festigkeitsentwicklung des Betons, der Temperatur und der Nachbehandlungsklasse nach EN 13670**

Festigkeitsentwicklung des Betons		schnell			mittel			langsam		
		r ≥ 0,50			0,50 > r ≥ 0,30			0,30 > r ≥ 0,15		
Nachbehandlungsklasse		2	3	4	2	3	4	2	3	4
Oberflächentemperatur des Betons t [°C]	t ≥ 25	1,0	1,5	3	1,5	2,5	5	2,5	3,5	6
	25 > t ≥ 15	1,0	2,0	5	2,5	4	9	5	7	12
	15 > t ≥ 10	1,5	2,5	7	4	7	13	8	12	21
	10 > t ≥ 5 <sup>2)</sup>	2,0	3,5	9	5	9	18	11	18	30

<sup>1)</sup> Bei mehr als 5 h Verarbeitbarkeitszeit ist die Nachbehandlungsdauer angemessen zu verlängern.

<sup>2)</sup> Bei Temperaturen unter 5 °C ist die Nachbehandlungsdauer um die Zeitspanne zu verlängern, während der die Temperatur unter 5 °C lag.

### 3 Versuchsdurchführung

Es wurden Betone mit zwei sehr unterschiedlich schnell reagierenden Zementen (CEM I und CEM III/B) bei einem w/z-Wert von 0,45 untersucht. Die Betonzusammensetzungen sind in Tafel 3 aufgeführt. Als Probekörper wurden Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm verwendet. Sie dienten sowohl als Probekörper zur Druckfestigkeits- und zur Luftpermeabilitätsbestimmung als auch zur Entnahme von Bohrkernen zur Bestimmung der anderen Festbetoneigenschaften. Würden die Bohrkern aus Probekörpern mit einer deutlich abweichenden Geometrie zu den Würfeln für die Druckfestigkeit gezogen werden, würde dies zu einem zusätzlichen Einfluss führen, da es von der Geo-

metrie abhängt, welche Temperaturen sich im Beton entwickeln und wie die Austrocknung verläuft. Der Carbonatisierungswiderstand wurde an Prismen der Abmessung 120 mm x 120 mm x 360 mm ermittelt.

Die Festbetonprüfungen wurden gemäß den Angaben in Tafel 4 durchgeführt. Die Ergebnisse der Festbetoneigenschaften stellen Einzelwerte (Druckfestigkeit) oder Mittelwerte (Dauerhaftigkeitseigenschaften) dar. Die Anzahl an Probekörpern bei den Dauerhaftigkeitseigenschaften wurde gemäß SIA 262/1 [4] gewählt. Die Messung der Luftpermeabilität erfolgte an zwei geschalteten Seitenflächen pro Würfel; aus den zwei Messwerten wurde der geometrische Mittelwert gebildet. Bei der Prüfung des Chloridwiderstands

**Tafel 3: Zusammensetzung der Betone**

Betonsorte		A	B	A mit LP
Zementart und Festigkeitsklasse		CEM I 42,5 N	CEM III/B 32,5 R	CEM 42,5 N
Zementgehalt	kg/m <sup>3</sup>	320		
Wassergehalt	kg/m <sup>3</sup>	144		
w/z		0,45		
Gesteinskörnung	M.-%	0/12:12; 0/4:24; 4/8:8; 8/16:24; 16/32:32		
Betonzusatzmittel				
FM	M.-% v. z.	0,10	0,40	0,25
LP	M.-% v. z.	–	–	0,15

**Tafel 4: Festbetonprüfungen und Anforderungen gemäß EN 206-1 (Grenzwert für Mittelwert beim Konformitätsnachweis) bzw. SIA 262/1 für die Luftpermeabilität**

Prüfung	Prüfnorm	Anforderung
Druckfestigkeit	EN 12390-3 [5]	C30/37
Carbonatisierungswiderstand	SIA 262/1, Anhang I	< 5,0 mm/a <sup>0,5</sup>
Chloridwiderstand	SIA 262/1, Anhang B	< 10 · 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s
Wasserleitfähigkeit	SIA 262/1, Anhang A	< 10 g/m <sup>2</sup> · h
Frost-Tausalz-Widerstand	SIA 262/1, Anhang C	max. 200 g/m <sup>2</sup> bzw. 600 g/m <sup>2</sup>
Luftpermeabilität	SIA 262/1, Anhang E	≤ 0,5 · 10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup>

und der Wasserleitfähigkeit sind gemäß SIA 262/1 die äußersten 5 mm bis 10 mm abzuschneiden und der darunter befindliche Beton zu prüfen. Da die Nachbehandlung insbesondere die äußerste Betonschicht beeinflusst, wurde bei manchen Prüfungen diese äußerste Schicht nicht abgeschnitten.

Die Probekörper wurden bei verschiedenen Temperaturen und Luftfeuchten gelagert. Mit den Lagerungen 1 und 2 wurde untersucht, ob und ggf. inwieweit sich zwischen den konstanten Klimata (Lagerung 1) und den variablen Klimata im Freien (Lagerung 2) ähnliche bzw. unterschiedliche Erkenntnisse ergeben:

- Lagerung 1 bei konstanten Temperaturen und Luftfeuchten im Labor
  - Lagerung 2 bei unterschiedlichen Temperaturen und Luftfeuchten im Freien
- Folgende Nachbehandlungsarten wurden geprüft:

- Unter Folie während unterschiedlich langer Zeiträume
- In Wasser während unterschiedlich langer Zeiträume
- Schalungseinlage (Zemdrain MD); die Nachbehandlung war nach dem Ausschalen nach einem Tag beendet.
- Nachbehandlungsmittel (paraffinhaltiges Nachbehandlungsmittel mit 150 g/m<sup>2</sup> Auftragsmenge; zur Kontrolle der Auftragsmenge wurde die Sprühflasche jeweils vor und nach dem Auftrag gewogen)

Die Länge der Nachbehandlung (unter Folie oder in Wasser) wurde auf die in Tafel 2 aufgeführten Anforderungen abgestimmt. Bei Lagerung 1 wurde die Wasserlagerung mit einbezogen, da dies erfahrungsgemäß die beste Nachbehandlung darstellt. Dies ermöglichte einen Vergleich der Auswirkung der Folien- und Wasserlagerung. Da eine Lagerung unter Wasser im Regelfall auf Baustellen nicht möglich ist, wurde diese Art der Nachbehandlung bei der Lagerung 2 weggelassen. Die Probekörper für die Frost-Tausalz-Widerstands-, die Chloridwiderstands- und die Wasserleitfähigkeitsprüfung wurden immer vor dem Start sieben Tage unter Wasser bei 20 °C gelagert [4]. Dauerte die Nachbehandlung länger als 21 Tage (selten 28 Tage), wurde somit die Prüfung nicht im Alter von 28 Tagen, sondern erst nach 35 Tagen gestartet.

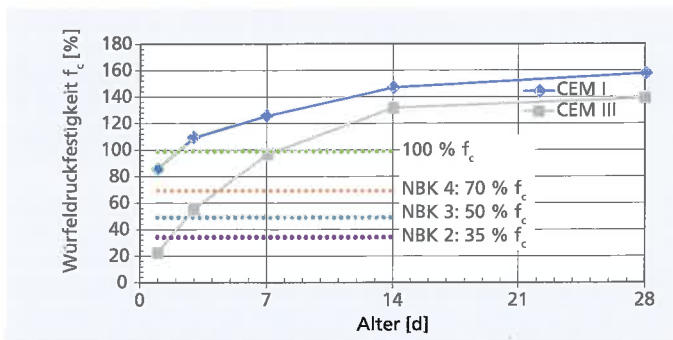
### 4 Versuchsergebnisse

#### 4.1 Lagerung 1

Für die Untersuchungen bei Lagerung 1 wurden nur die Betonsorten A und B hergestellt. Die Lagerung erfolgte bei 20 °C und 60 % r.F. bzw. 6 °C und 80 % r.F. Dies entspricht typischen mittleren Klimata im Sommer und im Frühjahr bzw. Herbst im Schweizer Mittelland.

In Bild 1 ist die Entwicklung der Druckfestigkeit mit der Zeit bei 20 °C Lagerung unter Folie dargestellt. Der Beton A (CEM I) erreichte nach einem Tag bereits mehr als 70 % der charakteristischen Druckfestigkeit, beim Beton mit CEM III/B dauerte dies ca. vier Tage.

Vergleicht man die Druckfestigkeitsentwicklungen und die daraus resultierenden



**Bild 1:** Würfeldruckfestigkeit der Betonsorten A (CEM I) und B (CEM III/B) in Abhängigkeit von der Zeit bei 20 °C Lagerung unter Folie im Labor ( $f_c$ : charakteristische Würfeldruckfestigkeit von 37 N/mm<sup>2</sup>)

Nachbehandlungsdauern gemäß Tafel 1 und 2, zeigen sich deutliche Unterschiede (Tafel 5). Wird die zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit als Basis für die Dauer der Nachbehandlung genommen, sind sehr viel kürzere Nachbehandlungsdauern als die in der Norm geforderten möglich.

Die nachfolgenden Ergebnisse sind in Abhängigkeit von der Dauer der Nachbehandlung dargestellt. Wurden Schalungseinlagen oder Nachbehandlungsmittel verwendet, sind die Ergebnisse mit dem Alter von einem Tag dargestellt, da das Nachbehandlungsmittel einen Tag nach der Herstellung auf die Schalflächen aufgetragen wurde oder die Nachbehandlung mit der Schalungseinlage einen Tag nach der Herstellung (mit dem Ausschalen) beendet wurde.

Beim Chloridmigrationskoeffizienten ergab sich der bekannte, sehr ausgeprägte Einfluss der Zementart. Beton mit CEM I weist einen deutlich höheren Chloridmigrationskoeffizienten (schlechteren Widerstand gegenüber eindringenden Chloriden) als Beton mit CEM III/B auf (Bild 2). Der Einfluss der Nachbehandlungsart und -dauer auf

den Chloridmigrationskoeffizienten war bei der 20 °C-Lagerung klarer erkennbar

als bei der 6 °C-Lagerung. Sowohl die Schalungseinlage als auch das Nachbehandlungsmittel waren sehr effektiv (nicht dargestellt). Bei einer kurzen Nachbehandlungsdauer wurde bei der Prüfung an Prüfkörpern ohne Randbeton ein zumeist niedrigerer Chloridmigrationskoeffizient als bei der Prüfung von Prüfkörpern mit 5 mm bis 10 mm Randbeton ermittelt. Bei einer längeren Nachbehandlung war der Einfluss mit/ohne Randbeton uneinheitlich und lag im Bereich der Prüfstreuung.

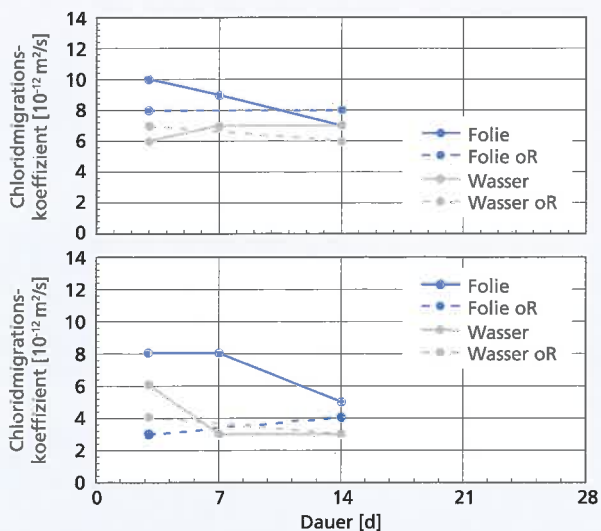
Die Zementart hatte erwartungsgemäß auch einen deutlichen Einfluss auf den Carbonatisierungskoeffizienten (Bild 3). Beton A (CEM I) wies auch ohne Nachbehandlung einen geringeren Carbonatisierungskoeffizienten, d.h. größeren Widerstand gegenüber der Carbonatisierung, als Beton B (CEM III/B) auf, auch bei bester Nachbehandlung. Bei beiden Betonen wirkte sich eine längere Nachbehandlung zumeist positiv auf den Carbonatisierungskoeffizienten

**Tafel 5:** Erforderliche Nachbehandlungsdauer für die Betone A und B bei Lagerung bei 20 °C (In Klammern sind die nach Tafel 1 geforderten prozentualen Mindestanteile der charakteristischen Druckfestigkeit eingetragen.)

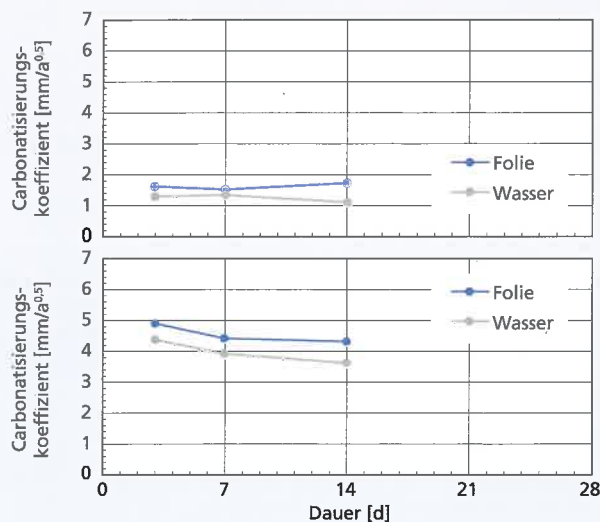
Nachbehandlungsklasse	Nachbehandlungsdauer [d] nach	
	Tafel 1	Tafel 2
<b>Beton A (CEM I)</b>		
2	< 1 (35 %)	1
3	< 1 (50 %)	2
4	< 1 (70 %)	5
<b>Beton B (CEM III/B)</b>		
2	2 (35 %)	5
3	3 (50 %)	7
4	4 (70 %)	12

aus. Eine Lagerung unter Wasser wirkte sich ebenfalls positiv aus. Sowohl die Schalungseinlage als auch das Nachbehandlungsmittel führten bei Beton B (CEM III/B) zu einem niedrigen Carbonatisierungskoeffizienten, bei Beton A (CEM I) jedoch nicht.

Bei der Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands hatte der Beton A (CEM I) bei 6 °C Lagerungstemperatur, unabhängig von der Nachbehandlung, einen hohen Widerstand (Bild 4); bei der Lagerung bei 20 °C wurde dies nur bei der Normlagerung (28 Tage unter Wasser) oder der Schalungseinlage erreicht. Beton B (CEM III/B) wies bei der Lagerung bei 20 °C ebenfalls nur bei der Normlagerung und bei der Schalungseinlage einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand auf (Bild 5). Mit dem Nachbehandlungsmittel wurde bei beiden Betonen eine geringere Abwitterung (in etwa mittlerer Frost-Tausalz-Widerstand) als bei den Lagerungen unter Folie oder bis zu sieben Tage im Wasser

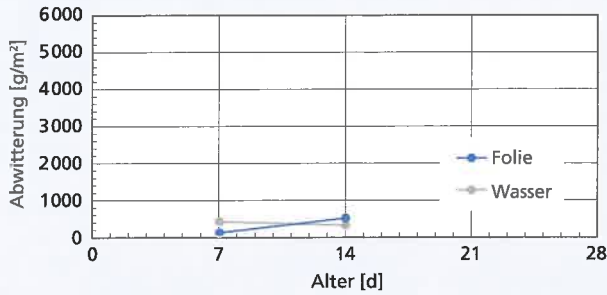


**Bild 2:** Chloridmigrationskoeffizient der Betonsorten A mit CEM I (oben) und B mit CEM III/B (unten) bei einer Lagerungstemperatur von 6 °C und der Nachbehandlung bei Laborlagerung (oR = ohne Randbeton)

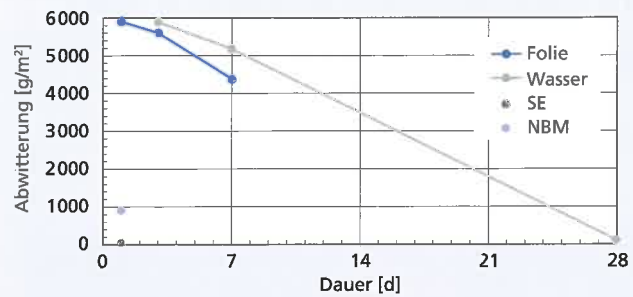


**Bild 3:** Carbonatisierungskoeffizient der Betonsorten A (CEM I) (oben) und B (CEM III/B) (unten) bei einer Lagerungstemperatur von 6 °C und unterschiedlicher Nachbehandlungsart und -dauer bei Laborlagerung





**Bild 4:** Abgewitterte Menge bei der Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands der Betonsorten A mit CEM I bei unterschiedlicher Nachbehandlungsart und einer Lagerungstemperatur von 6 °C im Labor



**Bild 5:** Abgewitterte Menge bei der Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands der Betonsorte B (CEM III/B) bei einer Lagerungstemperatur von 20 °C und unterschiedlicher Nachbehandlungsart und -dauer bei Laborlagerung (SE: Schalungseinlage; NBM: Nachbehandlungsmittel)

erreicht. Bei Beton B (CEM III/B) war der Einfluss der Lagerungstemperatur erkennbar, wenngleich auch deutlich weniger ausgeprägt als bei Beton A (CEM I).

## 4.2 Lagerung 2

Für die Untersuchungen bei der Lagerung 2 wurden die Betonsorten A (CEM I) und B (CEM III/B) sowie die Betonsorte A mit Luftporenbildner hergestellt. Drei Lagerungstemperaturen wurden angestrebt:

I: max. ca. 10 °C, effektiv 3 °C...25 °C, Ø 12 °C

II: ca. 15 °C, effektiv 6 °C...23 °C, Ø 13 °C

III: ca. 20 °C, effektiv 14 °C...33 °C, Ø 23 °C

Nach dem Ende der Nachbehandlung wurden die Proben weiter im Freien gelagert. Beton A (CEM I) erreichte bei jedem Prüfalter die höchste und Beton A (CEM I) mit LP die niedrigste Druckfestigkeit. Der Einfluss der Lagerungsart ist im Vergleich zur Laborlagerung weniger ausgeprägt.

Die Zementart weist den größten Einfluss auf den Chloridmigrationskoeffizienten auf. Weder die Lagerungsart noch die Nachbehandlungsdauer hatten einen klaren Einfluss auf den Chloridmigrationskoeffizienten bei Beton B (Bild 6) und den Betonen A (mit/ohne Luftporenbildner). Das Nachbehandlungsmittel zeigte vor allem beim Beton B (CEM III/B) und teilweise bei beiden Betonen A (CEM I mit/ohne Luftporenbildner) einen positiven Einfluss (Bild 6). Der Beton mit künstlich eingeführten Luftporen wies

die höchsten Chloridmigrationskoeffizienten (niedrigsten Widerstand gegen eindringende Chloride) auf.

Bei der Frost-Tausalz-Prüfung wies Beton B (CEM III/B) eine hohe Abwitterung im Vergleich zu Beton A (CEM I) auf. Künstlich eingeführte Luftporen (Beton A (CEM I) mit LP) führten erwartungsgemäß zu einer geringen Abwitterung (Bild 7). Das Nachbehandlungsmittel bewirkte nur bei Beton B (CEM III/B) eine deutliche Reduzierung der abgewitterten Menge (erhöhte den Frost-Tausalz-Widerstand). Die Nachbehandlungsdauer oder die Lagerungsart wirkten sich uneinheitlich auf die abgewitterte Menge aus: Bei Beton A (CEM I) und Beton B (CEM III/B) wurden tendenziell bei der Lagerung III die höchsten Abwitterungsmengen erhalten. Bei Beton A (CEM I) mit LP zeigte sich kaum ein Einfluss der Nachbehandlungsdauer auf die Abwitterung. Das Nachbehandlungsmittel hatte bei der höheren Lagerungstemperatur keinen und bei der niedrigeren Lagerungstemperatur einen positiven Einfluss auf die Abwitterung.

## 4.3 Ergebnisüberblick

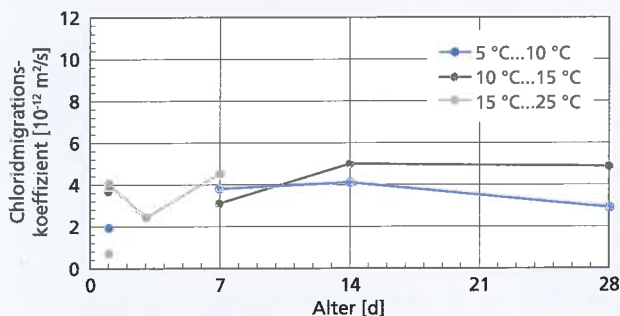
Zwischen den Lagerungen im Labor bei konstanten Klimata (Temperatur, Luftfeuchtigkeit) und im Freien bei variablen Klimata zeigten sich teilweise erhebliche Unterschiede bei den Einflüssen auf die Festbetoneigenschaften. Bager [6] lagerte Betonprüfkörper

während 25 Jahren im Freien und im Labor und fand auch, dass die Betone bei der Außenlagerung deutlich abweichende Ergebnisse von den im Labor gelagerten aufwiesen. Während bei der Laborlagerung der Einfluss der Zementart und der Lagerungstemperatur stark ausgeprägt war, war bei der Lagerung im Freien nur noch der Einfluss der Zementart stark ausgeprägt. Dies wird auf verschiedene Ursachen zurückgeführt. Bei der Lagerung im Freien konnte eine Kondensation von Luftfeuchtigkeit auftreten, und es konnte regnen; zudem wurden nicht so niedrige Temperaturen (minimaler Mittelwert ca. 12 °C) wie im Labor (ca. 6 °C) erreicht, weshalb temperaturbedingte Effekte weniger ausgeprägt auftraten.

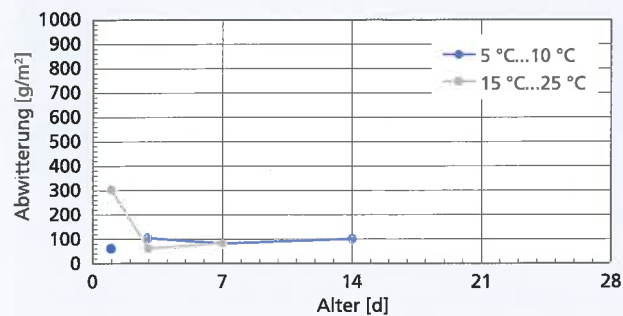
Eine Lagerung unter Wasser, die nur bei der Laborlagerung untersucht wurde, führte zu einer Verbesserung der Festbetoneigenschaften im Vergleich zu einer Lagerung unter Folie.

Durch die Schalungseinlage wurden die Betoneigenschaften zumeist klar verbessert. Die durch die Schalungseinlage verursachte Verdichtung des Randbetons bewirkte auch ohne eine weitere Nachbehandlung nach dem Ausschalen nach einem Tag eine deutliche Verbesserung der Betonqualität. Dies stimmt z.B. mit den Ergebnissen von Torrent et al. [7] überein.

Das verwendete Nachbehandlungsmittel führte nur teilweise zu den gewünschten



**Bild 6:** Einfluss der Nachbehandlung (unter Folie bzw. Nachbehandlungsmittel (NBM) = Punkte bei 1 d) der Betonsorte B (CEM III/B) und der Lagerungstemperatur auf den Chloridmigrationskoeffizienten



**Bild 7:** Einfluss der Nachbehandlung (unter Folie bzw. Nachbehandlungsmittel (NBM) = Punkte bei 1 d) der Betonsorte A (CEM I) mit LP und der Lagerungstemperatur auf die Abwitterung bei der Frost-Tausalz-Prüfung

**Tafel 6: Empfohlene Nachbehandlungsdauer für Oberflächentemperaturen des Betons zwischen 5 °C und 25 °C für eine Nutzungsdauer des Bauteils von 50 Jahren**

Betoneigenschaften gemäß Konformitätsnachweis [2]	Nachbehandlungsdauer [d] für Betone der Expositionsclassen	
	XC4, XD1, XF2 <sup>1)</sup> , XF4 <sup>1)</sup>	XC4, XD3, XF2 <sup>1)</sup> , XF4 <sup>1)</sup>
Carbonatisierungswiderstand		
≤ 2,5 mm/a <sup>0,5</sup>	3	
≤ 4,0 mm/a <sup>0,5</sup>	7	
Chloridwiderstand		
≤ 5,0 · 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s		5
≤ 8,0 · 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s		7

<sup>1)</sup> Frost-Tausalz-Widerstand durch Verwendung von Luftporenbildner erreicht

Festbetoneigenschaften. Martin [8] fand vergleichbare Ergebnisse bei Untersuchungen in Südafrika; insbesondere bei winterlichen Verhältnissen mit Regen führten die Nachbehandlungsmittel zu einer Verschlechterung der Betoneigenschaften, da diese die Feuchtigkeitsaufnahme bei Regen verhinderten. Wird der Randbeton abgeschnitten, wie es bei der Prüfung des Chloridwiderstands und der Wasserleitfähigkeit nach SIA 262/1 [4] vorgeschrieben ist, führt dies zumeist zu besseren Eigenschaften. Der Effekt ist umso deutlicher, desto schlechter die Nachbehandlung ist.

## 5 Folgerungen und Empfehlungen

### 5.1 Folgerungen

Bei zukünftigen Untersuchungen ist zu beachten, dass Ergebnisse von Prüfungen im Labor (konstantes Klima) eventuell nicht einfach auf das Verhalten von Beton im Freien übertragen werden können. Bei Modellierungen der Dauerhaftigkeit sollten die Temperatureinflüsse beachtet werden.

Die im Anhang F der EN 13670 (Tafel 2) angegebenen Nachbehandlungsdauern, die auf der Druckfestigkeitsentwicklung basieren, sind bei den untersuchten Nachbehandlungsklassen 3 und 4 nicht immer ausreichend, um die gleichen Eigenschaften zu erreichen, die vom Betonwerk beim Konformitätsnachweis nach SN EN 206-1 [2] gefordert werden. Die angegebenen, fixen Nachbehandlungsdauern sind bei Lagerungstemperaturen von weniger als 20 °C zumeist ausreichend, die vom Betonwerk beim Konformitätsnachweis nach EN 206-1 gefordert werden, bei höheren Lagerungstemperaturen jedoch nicht generell geeignet. Das in Tafel 2 enthaltene Konzept ist nicht immer ausreichend, jedoch besser als dasjenige nach Tafel 1 geeignet.

Zusätzlich ist festzuhalten, dass einzelne Betoneigenschaften nicht zwangsläufig ungenügend sind, sofern die Nachbehandlungsdauern kürzer als diejenigen nach den Normvorgaben waren.

Bei der Verwendung des Nachbehandlungsmittels, das jeweils erst kurz (< 1 Tag) vor der Prüfung entfernt wurde, wurden die angestrebten Eigenschaften (Kriterien gemäß Konformitätsnachweis der SN EN 206-1) nicht immer erreicht.

Die Verwendung einer jeweils neuen Schalungseinlage (und keiner weiteren Nachbehandlung nach dem Ausschalen nach einem Tag) führte immer zu den angestrebten Eigenschaften; einschränkend ist anzumerken, dass mit der Schalungseinlage nur wenige Untersuchungen durchgeführt wurden.

Es wird keine Möglichkeit gesehen, über die Druckfestigkeit(sentwicklung) die Nachbehandlungsdauer, unabhängig von der Betonzusammensetzung, festzulegen, wie dies in den Normen enthalten ist.

### 5.2 Empfehlungen

Tafel 6 enthält Empfehlungen für die Nachbehandlungsdauer in Abhängigkeit von den Expositionsclassen und den damit geforderten Betoneigenschaften sowie vom Carbonatisierungswiderstand und dem Chloridwiderstand gemäß Tafel 4. Die notwendige Nachbehandlungsdauer wurde aufgrund der hier vorgestellten Ergebnisse vorgeschlagen [9]. Mit weiteren Untersuchungen (Lagerungsbedingungen, andere Zementarten und Betonzusammensetzungen usw.) sind die Vorschläge zu überprüfen. Die spezifizierten Carbonatisierungs- und Chloridwiderstände wurden aus folgenden Gründen gewählt:

■ Der maximale Carbonatisierungswiderstand von 2,5 mm/a<sup>0,5</sup> entspricht der Hälfte des Grenzwerts vom Konformitätsnachweis [2], und der maximale Carbonatisierungswiderstand von 4 mm/a<sup>0,5</sup> wurde gewählt, da dies einerseits aufgrund der Prüfstreuung anzustreben ist, um den Grenzwert vom Konformitätsnachweis zuverlässig einzuhalten und andererseits Praxiserfahrungen (Lunk [10]) dies bestätigen.

Der maximale Chloridwiderstand von  $5,0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  entspricht der Hälfte des Grenzwerts [2], und der maximale Chloridwiderstand von  $8,0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  wurde gewählt, da dies aufgrund der Prüfstreuung anzustreben ist, um den Grenzwert vom Konformitätsnachweis zuverlässig einzuhalten.

Die Untersuchungen zeigten, dass bei Beton mit künstlich eingeführten Luftporen die Nachbehandlung nur einen geringen Einfluss auf den Frost-Tausalz-Widerstand hat; bei Beton, mit dem ohne LP ein hoher Frost-Tausalz-Widerstand erzielt werden soll (XF4), konnte dies nur nach Normlagerung ([4] bis Prüfalter 28 Tage unter Wasser) erreicht werden. Da eine Nachbehandlungsdauer von 28 Tagen unter Wasser praxisfremd ist, werden für einen solchen Beton keine Angaben in Tafel 6 gemacht. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig.

Falls eine ungebrauchte Schalungseinlage verwendet wird, könnte gemäß den wenigen vorliegenden Ergebnissen die Nachbehandlung im Alter von einem Tag beendet werden. Diese Angaben sind mit weiteren Untersuchungen zu überprüfen. Alternativ könnte auch prüftechnisch während der Nachbehandlung die notwendige Dauer ermittelt werden. Hier kommt es sehr auf die richtige Wahl des Prüfverfahrens an, wie die hier dargestellten Ergebnisse und auch die u.a. von Hilsdorf et al. [11] zeigten.

## Literatur

- [1] EN 206-1:2001-07 „Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität“
- [2] SN EN 206-1:2000 „Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität“
- [3] EN 13670:2009 „Ausführung von Tragwerken aus Beton“
- [4] SIA 262/1:2013-08 „Betonbau – Ergänzende Festlegungen“. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
- [5] EN 12390-3:2009-07 „Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern“
- [6] Bager, D. H.: 25 years exposure – durability and mechanical properties. 17. Ibausil, Weimar, 23.–26.9.2003, S. 939–950
- [7] Torrent, R.; Griesser, A.; Moro, F.; Jacobs, F.: Technical-economical consequences of the use of Controlled Permeable Formwork, Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III: 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR-3, 3.–5. September 2012, Cape Town, South Africa, S. 1330–1335
- [8] Martin, M.: The Influence of Curing Techniques and Chemical Admixtures on the Properties of Concrete. Master Thesis, University of Cape Town, South Africa, 2012
- [9] Jacobs, F.: Wirksamkeit und Prüfung der Nachbehandlungsmethoden von Beton. VSSBericht 665, auf [www.tfb.ch/herunterladbar](http://www.tfb.ch/herunterladbar)
- [10] Lunk, P.: Praktische Erfahrungen mit den neuen Betonnormen. 19. Holcim Betontagung 24.9.2013
- [11] Hilsdorf, H. K.; Schönlin, K.; Tauscher, F.: Dauerhaftigkeit von Beton. Schlussbericht zum Forschungsauftrag 3114 der Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V., Beton Verlag, Düsseldorf 1997