

Beton mit hohem Frost- und Tausalzwiderstand

Von Justus Bonzel, Düsseldorf

Übersicht

Von Bauteilen, die im durchfeuchteten Zustand häufig Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt sind (z. B. im Wasserbau), wird hoher Frostwiderstand gefordert, von Bauteilen, die häufig mit Tausalzen in Berührung kommen (z. B. bei der Beseitigung von Schnee und Eis auf Verkehrswegen), hoher Frost-Tausalz-Widerstand. Da einfache, auf die praktischen Verhältnisse übertragbare Prüfverfahren nicht zur Verfügung stehen, müssen zur Gewährleistung dieser Eigenschaften Richtlinien für die Zusammensetzung, Herstellung und Nachbehandlung des Betons beachtet werden.

Die Zuschlagstoffe müssen frostbeständig und weitgehend frei von lehmigen, tonigen und glimmerhaltigen Bestandteilen sein.

Ein im gemäßigten Klima frostbeständiger Beton erfordert wasserundurchlässigen Zementstein. Der W/Z-Wert sollte etwa 0,55 und bei ausreichendem LP-Gehalt 0,70 nicht überschreiten. Beton mit hohem Tausalzwiderstand erfordert stets einen auf die Feinmörtelmenge abgestimmten Gehalt an feinen Luftporen und eine Beschränkung des Mehlkorngehaltes. Auch im Spätherbst fachgerecht hergestellter Straßenbeton erfährt im ersten Winter praktisch keine störenden Abwitterungen, wenn er bis zur ersten Tausalzbeanspruchung bereits eine hohe Festigkeit erreicht hat und wenigstens einen Teil seines herstellungsbedingten Überschußwassers abgeben konnte.

Betonwaren mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand erfordern einen erhöhten Zementgehalt, einen möglichst kleinen W/Z-Wert und eine Begrenzung des Mehlkorngehaltes auf die Mindestwerte.

Durch ein Imprägnieren mit verdünntem Leinölfirnis oder mit Epoxyharzlösung kann der Tausalzwiderstand von jungem Beton und von Betonwaren noch vergrößert und die Lebensdauer alter, ohne ausreichendem LP-Gehalt hergestellter Betondecken verlängert werden.

1. Allgemeines

Neben den eigentlichen Gebrauchseigenschaften, wie z. B. ausreichende Druckfestigkeit und Wasserundurchlässigkeit, wird von Bauteilen, die im Freien eingebaut werden, Witterungsbeständigkeit verlangt. Die erforderliche Widerstandsfähigkeit des Betons gegen Witterungseinflüsse hängt von dem während der Nutzung

sich einstellenden Feuchtigkeitszustand des Betons und den klimatischen Bedingungen der Umgebung ab. Beton für Bauteile und Bauwerke des Wasserbaues muß im allgemeinen frostbeständig sein, d. h. im durchfeuchteten Zustand der Einwirkung von Temperaturen unter dem Gefrierpunkt des Wassers widerstehen.

Zur Beseitigung von Schnee und Glätteis werden vor allem Straßen und in den letzten Jahren manchmal auch Gehwege im Winter mit Tausalzen gestreut. Starke Frost-Tausalz-Beanspruchungen führten dann verschiedentlich zu Abwitterungen an der Oberfläche des unmittelbar mit dem Salz in Berührung kommenden Betons. In jüngerer Zeit wird daher von Betonfahrbahnen und manchmal auch von Betonwaren für Verkehrswege hoher Frost-Tausalz-Widerstand gefordert.

2. Entstehen der Schäden

2.1 Frosteinwirkung

Frostschäden, deren Entstehung ein physikalischer Vorgang ist, treten unter folgenden Bedingungen auf:

- a) wenn auf Beton, in dem ein bestimmter Grad der Wasser-sättigung vorliegt, Temperaturen unter dem Gefrierpunkt des Wassers einwirken,
- b) wenn für die Raumvergrößerung des Wassers beim Gefrieren kein Ausweichraum vorhanden ist, in den das bei der nach und nach erfolgenden Eisbildung noch nicht gefrorene Wasser entweichen kann.

Beim Gefrieren dehnt sich Wasser um $\frac{1}{11}$ seines Volumens aus. Wird diese Raumvergrößerung behindert, so entsteht ein hydraulischer Druck und ein Kristallisationsdruck des wachsenden Eises [1 bis 3]. Hinzu kommen die Beanspruchungen aus Änderungen von Temperatur und Feuchtigkeit (Temperatur- und Schwindspannungen). Zerstörungen treten am nicht frostbeständigen Beton in der Regel erst nach mehreren Frost-Tau-Wechseln auf. Über die beim Gefrieren möglichen Spannungen siehe u. a. [4, 5].

Bei Beton kann die Ursache nicht ausreichenden Frostwiderstandes im Zuschlag, im Zementstein oder in der Verbindung zwischen beiden liegen. Der Zuschlag kann nicht frostbeständiges Gestein oder den Frostwiderstand des Betons herabsetzende Feinstoffe (z. B. Glimmer) enthalten. Auch die an groben Zuschlägen anhaftenden Feinstoffe (Lehm, Ton) und die sich bei weichem Beton vorwiegend unter groben Zuschlägen bildenden Wassersäcke setzen den Frostwiderstand des Betons herab. Im Zementstein friert nur das Wasser der größeren Poren (Kapillarporen), nicht aber das der feinsten Poren (Gelporen).

In der Regel beginnen Frostschäden bei Beton nahe der Oberfläche. Die Oberfläche nicht frostbeständigen Betons wittert weitgehend gleichmäßig ab, wenn der Feinmörtel nicht ausreichenden Frostwiderstand besitzt. Liegt jedoch die Ursache im Zuschlag (nicht frostbeständiges Gestein, Verschmutzung usw.), so zeigen

sich in der Regel zunächst örtliche Ab- oder Aussprengungen mit strahlenförmigen Rissen und bei hohem Gehalt nicht frostbeständigen Zuschlags grobe Netzkrisse.

2.2 Tausalzeinwirkung

Bereits vor mehr als 25 Jahren befaßte man sich mit der Tausalzeinwirkung auf Beton, da schon damals zur Beseitigung von Glatt-eis auf Straßen Tausalze gestreut wurden, Bild 1 zeigt eine Betonstraße ohne, Bild 2 eine mit Tausalzschäden. Tausalzabwitterungen waren selbst bei der Verwendung der chemisch nicht betonangreifenden Salze CaCl_2 und NaCl insbesondere von amerikanischen Betonstraßen schon früher bekannt geworden [6]. Ihrer Entstehungsursache wurde seitdem häufig nachgegangen, siehe



Bild 1 Betonstraße ohne Tausalzschäden



Bild 2 Betonstraße mit Tausalzschäden

u. a. [6 bis 13]. Bei Versuchen im Laboratorium ließen sich Tausalzabwitterungen reproduzieren. Der Beton witterte aber auch oberflächlich ab, wenn er bei Temperaturen über 0°C häufig mit starken CaCl_2 -Lösungen durchtränkt wurde und wieder austrocknete oder wenn auf ihm eine Eisschicht mit Salz aufgetaut wurde, die durch eine Folie vom Beton getrennt war [7, 9, 10]. Die Abwitterung dürfte beim ersten Versuch wohl überwiegend auf ein Auskristallisieren des Salzes und beim zweiten Versuch vorwiegend auf die plötzliche Abkühlung des feuchten Betons zurückzuführen sein.

Auch bei Frost-Tausalz-Einwirkungen entsteht durch das Gefrieren der Betonfeuchtigkeit ein hydraulischer Druck bzw. der Kristallisationsdruck des wachsenden Eises. Hinzu kommen Temperatur- und Schwindspannungen. Teilweise wird angenommen, daß osmotische Vorgänge [11], die auf die mit wachsender Schicht-

tiefe abnehmende Salzkonzentration des Porenwassers zurückzuführen sind, und der Druck auskristallisierender Salze wesentlich an der Schadensentstehung beteiligt sind. Als Ursache wird auch der große Wärmeentzug aus der Betondecke beim plötzlichen Tauen des Eises angesehen, der größere Temperaturspannungen vor allem in der obersten Schicht und ein Gefrieren des Wassers auch in tieferen Schichten und in feineren Poren zur Folge hat [12]. Nach neueren, noch nicht veröffentlichten amerikanischen Versuchen sollen Tausalzabwitterungen vorwiegend darauf zurückzuführen sein, daß infolge der mit der Schichttiefe abnehmenden Salzkonzentration zunächst die etwas tiefer liegenden Schichten gefrieren und daß die oberste Schicht beim Gefrieren durch den dabei entstehenden hydraulischen Druck von der bereits vorher gefrorenen Schicht abgedrückt wird.

Früher wurde auch eine chemische Schädigung des Betons durch Tausalze für möglich gehalten, und zwar nicht nur bei den chemisch betonangreifenden Salzen, wie z. B. $MgCl_2$, sondern auch bei den nicht betonangreifenden Salzen, wie $CaCl_2$ und $NaCl$. Heute wird angenommen, daß die Entstehung von Tausalzabwitterungen bei Verwendung von Streusalzen, die dem Vorläufigen Merkblatt [14] entsprechen, nicht auf chemische Vorgänge zurückzuführen ist. $MgCl_2$ ist zwar in größerer Menge und bei langer Einwirkung betonangreifend (vgl. DIN 4030), nach bisherigen Erfahrungen wird aber das chemische Angriffsvermögen – vermutlich wegen der geringen Lösungsmenge – unter den Verhältnissen auf der Straße nicht wirksam. Für eine Nichtbeteiligung chemischer Vorgänge spricht ferner die Tatsache, daß auch andere, chemisch nicht betonangreifende Auftaustoffe, wie z. B. Harnstoffe oder ein Gemisch aus Isopropylalkohol und Äthylenglykol, beim Tauen von Eis zu gleichen Oberflächenschäden auf Beton führen wie Tausalze [11].

Trotz zahlreicher Untersuchungen und Überlegungen ist die Entstehung der Tausalzabwitterung noch nicht vollständig geklärt. Vermutlich sind verschiedene Vorgänge daran beteiligt, deren Zusammenwirken noch weitgehend ungeklärt ist. Es wird angenommen, daß es sich um einen physikalischen Angriff handelt, der u. a. von den Witterungsverhältnissen und der Art und Häufigkeit der Temperaturwechsel abhängt, nicht zuletzt aber auch von Aufbau, Güte, Beschaffenheit und Grad der Durchfeuchtung des Betons (vgl. Abschnitt 3.5).

Von Einfluß sind auch Salzart und -menge. Nach dem Vorläufigen Merkblatt [14] können verwendet werden:

- a) Vergälltes Stein- oder Siedesalz ($NaCl$),
- b) Verarbeitungsrückstände von Kalirohsalzen (vorwiegend $NaCl$ mit anderen Bestandteilen),
- c) Chlormagnesium ($MgCl_2$),
- d) Chlorcalcium ($CaCl_2$),
- e) Mischungen aus a, c und d.

Bei Verarbeitungsrückständen von Kalirohsalzen ist jedoch auf den Sulfatgehalt zu achten, Abfallsalze aus der weiterverarbeiten-

den Industrie werden im allgemeinen als nicht geeignet angesehen. Das billige und meist verwendete NaCl wirkt etwa bis zu Temperaturen von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, MgCl_2 und insbesondere CaCl_2 noch bei tieferen Temperaturen [15]. Die Streumenge sollte im allgemeinen 10 bis 20 g/m^2 betragen, 40 g/m^2 jedoch nicht überschreiten. Salzlösungen sind bei einer Konzentration von 2 bis 4 % am schädlichsten, siehe u. a. [11]. Während das Streuen von Tausalzen im allgemeinen zu einer weitgehend gleichmäßigen Abwitterung der Oberfläche nicht tausalzbeständigen Betons führt, können länger einwirkende Tausalzlösungen zunächst kraterförmige Ausprägungen zur Folge haben [16, 17].

3. Bedeutung und Wirkungsweise der Luftporen

3.1 Allgemeines

Der Porenraum des Betons setzt sich zusammen aus Poren des Zementsteins und des Zuschlags. Im Zementstein unterscheidet man Gelporen, deren Wasser in der Regel nicht gefriert, Kapillarporen, deren Wasser je nach Salzgehalt und Porengröße unterschiedlich schnell gefriert und mit deren Zunahme die Beständigkeit des Betons abnimmt, und Luftporen. Durch Bluten, Schrumpfen und unvollständige Verdichtung entstehen bevorzugt um größere Zuschlagkörner filmartige oder linsen- oder spaltenförmige Hohlräume, die bei wassergesättigtem Beton mit Wasser gefüllt sind und die Beständigkeit des Betons stark verringern.

Durch Zufall erkannte man in den USA die Bedeutung sehr feiner kugeligter Luftporen, da mit verschiedenem Zement, aber sonst gleich hergestellter Beton bei gleicher Beanspruchung in einem Falle tausalzbeständig war, im anderen nicht. Inzwischen liegen umfangreiche, bis über 30 Jahre alte Erfahrungen insbesondere aus den USA vor [7, 9, 10, 12, 13, 16 bis 23], die in Deutschland 1953 zum Vorläufigen Merkblatt für die Verwendung von luftporenbildenden Zusatzstoffen zu Straßenbeton [24] und zu den Richtlinien für die Prüfung von LPV- und LP-Mitteln [25] führten. Danach kann Beton durch die Zugabe eines Luftporenbildners, der im Frischbeton feine, gleichmäßig verteilte Luftporen in ausreichender Menge erzeugt, frost- und tausalzbeständig werden. Für deutsche Verhältnisse darf der Gesamtluftgehalt von Straßenbeton im Tagesmittel $3,5\%$ und als Einzelwert 3% nicht unterschreiten [26].

3.2 Einfluß der Luftporen auf den Frostwiderstand

Die künstlich erzeugten Luftporen sind kugelförmig, aber von unterschiedlicher Größe. Ihr Durchmesser schwankt etwa zwischen $2\text{ }\mu\text{m}$ und mehreren Millimetern. Von Frost-Tau-Versuchen und mikroskopischen Untersuchungen am erhärteten Beton ist bekannt, daß der Frost- und Tausalz-Widerstand des Betons mit wachsender Zahl und abnehmendem Durchmesser der Luftporen zunimmt, siehe u. a. Literaturübersicht in [13, 27, 28]. Grundsätzlich erhöhen nur die sehr feinen Luftporen, die sich beim Durchfeuchten des Betons nicht oder nur unvollständig mit Wasser füllen und das mit Wasser gefüllte Kapillarporensystem unterbrechen, den Frost- und Tausalz-Widerstand. Der Gesamtluftgehalt, der sich sowohl

aus vielen kleinen als auch aus wenigen großen Poren zusammensetzen kann, ist daher nicht ohne weiteres allein ein Maß für den Frost- und Tausalz-Widerstand des Betons. Bei bekannter Zusammensetzung und Herstellung des Betons und ausreichender Zugabe eines geeigneten LP-Zusatzmittels kann jedoch recht zuverlässig vom Gesamtluftgehalt auf den Gehalt an feinsten Poren und den Grad des Frost- oder Tausalz-Widerstandes geschlossen werden. Dies ist auch praktisch von Bedeutung, weil am Frischbeton nur der Gesamtluftgehalt nachprüfbar ist (vgl. Abschnitt 6.3).

Noch zuverlässiger kann der Einfluß der Luftporen auf die Frost- und Tausalz-Beständigkeit mit am erhärteten Beton ermittelten Kennwerten, z. B. dem Abstandsfaktor, der spezifischen Oberfläche oder der Anzahl der Luftporen je Raumeinheit und dem Teilluftgehalt (nur kleine Poren), beurteilt werden (vgl. Abschnitt 6.3). Der Abstandsfaktor, der statistisch errechnete Mittelwert der Abstände zwischen den entferntesten Punkten des Zementsteins und den Rändern der Luftporen, erwies sich nach amerikanischen Versuchen als Kennwert mit der größten Aussagekraft. Da kleinere Luftporen eine größere spezifische Oberfläche haben und bei gleichem Gesamtluftgehalt auch in größerer Menge und in kleinerem Abstand vorliegen als größere Luftporen, berücksichtigt auch die spezifische Oberfläche die Größe und Verteilung der Luftporen. Der Teilluftgehalt L_{300} , der Gehalt an kleinen Luftporen bis 0,3 mm (300 μm), umfaßt im allgemeinen zwar höchstens die Hälfte des Gesamtluftgehaltes des Luftporenbetons, aber rund 99 % der Anzahl aller Luftporen. Bei neueren Versuchen [27] stand der Frostwiderstand des Betons in enger Beziehung zum Teilluftgehalt L_{300} , zum Porenverhältnis aus Teilluftgehalt L_{300} und Wasseraufnahme (vgl. Tafel 1) und bei Betonen sehr unterschiedlicher Festigkeit zum Widerstandskennwert aus Porenverhältnis und einer Festigkeitsgröße (vgl. Tafel 2, Zeile 6). Bei Laboratoriumsversuchen wird der Frostwiderstand des Betons häufig auch mit der Abnahme der Biegezugfestigkeit oder des E-Moduls bei einer bestimmten Anzahl von Frost-Tau-Wechseln beurteilt (vgl. auch Abschnitt 6.1).

Tafel 1 gibt Ergebnisse von Untersuchungen einiger Straßenbetone und auch das praktische Verhalten der mit Tausalzen gestreuten Betonstraßen wieder. Überschneidungen waren in den verschiedenen Schadensgruppen (vgl. Zeilen 1 bis 5) schon deshalb möglich, weil vielleicht einige Straßen nur wenig gestreut wurden und gleichstarke Beanspruchung nicht vorausgesetzt werden kann.

Im Forschungsinstitut der Zementindustrie wurden in den letzten Jahren zahlreiche Betonproben aus abgewitterten jüngeren Betonstraßen untersucht. Der Gesamtluftgehalt des Betons lag zwischen 0,6 und 3,1 %, der Gehalt an Poren bis 0,3 mm (L_{300}) zwischen 0,04 und 0,6 % und der Abstandsfaktor zwischen 0,3 und 2,5 mm. Alle Betone besaßen nicht genügend feine Luftporen.

Bei Frost-Tausalz-Beanspruchungen und sehr starken Frostbeanspruchungen sind die Luftporenkennwerte das entscheidende Kriterium für die Beständigkeit. Nach den bisherigen Erfahrungen widersteht Beton auch sehr starken Frost- und Frost-Tausalz-Beanspruchungen in Deutschland ausreichend, wenn die Bedingungen der Tafel 2 erfüllt sind. Dabei sind die Grenzen der Anwendbarkeit (vgl. Spalte d) zu beachten.

Tafel 1 Ergebnisse von Untersuchungen an Straßenbetonen [27]
 Zementgehalt: 300 bis 360 kg/m³; W/Z-Wert: 0,42 bis 0,48;
 Alter: vorwiegend 1,5 bis 3,5 Jahre;
 Tausalzeinwirkung: vorwiegend im letzten halben Jahr

Zeile	Abwitterung der Straße durch Frost-Tausalzeinwirkung	Gesamtluftgehalt des Betons	Abstandsfaktor	Spezif. Oberfläche der Luftporen je cm ³ Beton	Teilluftgehalt L ₃₀₀ des Betons	Porenverhältnis*) $P = (L_{300}/A) \cdot 100$
		%	mm	cm ² /cm ³	%	—
a	b	c	d	e	f	g
1	sehr stark	0,60 bis 2,4	1,43 bis 0,87	64 bis 95	0,04 bis 0,12	0,3 bis 1,0
2	stark	1,3 bis 2,0	1,09 bis 0,91	66 bis 95	0,10 bis 0,19	0,8 bis 1,8
3	mittel	1,1 bis 2,2	1,01 bis 0,32	74 bis 300	0,17 bis 0,55	1,4 bis 3,1
4	schwach	2,0	0,44	168	0,45	4,4
5	keine	2,2 bis 6,1	0,46 bis 0,23	132 bis 217	0,50 bis 2,06	4,1 bis 17,2

*) A = Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck in Raum-%

Tafel 2 Luftporenkennwerte (Richtwerte) für Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand unter deutschen Verhältnissen

Zeile	Kennwerte*)	Anforderungen	Anwendbarkeit
a	b	c	d
1	Gesamtluftgehalt des Betons	i. M. mind. 3,5 % Einzelwerte mind. 3 %	für Betone üblicher Zusammensetzung (d. h. 30 mm Zuschlaggrößtkorn und Mehlkorngehalt von 350 bis 400 kg/m ³) mit geeignetem LP-Mittel
2	Teilluftgehalt L ₃₀₀ des Betons (Poren bis 0,3 mm ϕ)	mind. 1,5 %	für Betone üblicher Zusammensetzung (d. h. mit 30 mm Zuschlaggrößtkorn und Mehlkorngehalt von 350 bis 400 kg/m ³)
3	Spezifische Oberfläche der Luftporen je cm ³ Beton	mind. 200 cm ² /cm ³	
4	Anzahl der Luftporen je cm ³ Beton	mind. etwa 150 000	
5	Porenverhältnis $p = (L_{300}/A) \cdot 100$	mind. 10	
6	Widerstandskennwert $W_B = (L_{300}/A) \cdot 100 \cdot B$	mind. etwa 350	
7	Abstandsfaktor	höchstens 0,2 mm	für alle Betone

*) A = Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck in Raum-%

B = Biegezugfestigkeit in kp/cm²

Im Einzelfall werden zur Beurteilung von Abwitterungen am erhärteten Beton nicht alle Kennwerte der Tafel 2 bestimmt, in Deutschland im allgemeinen nur der Gesamtluftgehalt, der Teilluftgehalt L_{300} und der Abstandsfaktor, vgl. Tafel 2. Bei der Betonherstellung wird nur der Gesamtluftgehalt des Frischbetons überwacht, vgl. Abschnitt 6.3. Er darf für tausalzbeständigen Beton üblicher Zusammensetzung im Tagesmittel 3,5 % und als Einzelwert 3 % nicht unterschreiten [26]. Die für den Gesamtluftgehalt genannten Grenzwerte gelten nur für Beton üblicher Zusammensetzung, d. h. für Beton mit rund 30 mm Zuschlaggrößtkorn und einem Mehlkorngesamtgehalt von 350 bis 400 kg/m³. Da die Luftporen nur den Feinmörtel des Betons frost-tausalz-beständig machen, benötigt Beton mit kleinerem Zuschlaggrößtkorn, d. h. in der Regel mit größerer Mehlkorngesamtmenge, mehr Luftporen als Beton mit 30 mm Größtkorn. In Tafel 3 ist der für deutsche Verhältnisse erforderliche Gesamtluftgehalt in Abhängigkeit von Zuschlaggrößtkorn, Mehlkorngesamtgehalt und Feinmörtelmenge angegeben. Als Feinmörtel wurde dabei die Summe aus Zement, Feinststoffen bis 0,2 mm Korngröße und Wasser angesehen. Bei Festlegung des für andere Betonzusammensetzungen als in Tafel 3 erforderlichen Gesamtluftgehaltes ist von der jeweils vorhandenen Feinmörtelmenge auszugehen.

In den USA und Schweden wird für tausalzbeständigen Beton üblicher Zusammensetzung ein Mindestluftgehalt von 4 bis 5 % verlangt [29, 30, 31].

3.3 Beeinflussung der Luftporenbildung

Über die Beeinflussung der Luftporenbildung liegen zahlreiche Untersuchungen vor, siehe u. a. [7, 9, 10, 13, 16, 18, 19, 20, 22, 32] und die dort angegebene Literatur. Der sich einstellende Gesamtluftgehalt des Betons ist insbesondere abhängig von Art und Menge des Luftporenbildners, von Zusammensetzung und Feinheit des Zements, von Zusammensetzung und Konsistenz des Betons, von Betontemperatur und Mischdauer.

Mit wachsender Menge des LP-Mittels, das im allgemeinen in Abhängigkeit von der Zementmenge zugegeben wird, nimmt im üblichen Bereich der Gesamtluftgehalt des Betons zu. Pulverförmige Mittel sollten mit dem Zement, flüssige möglichst mit dem Anmachwasser zugegeben werden. Größere Zusatzmengen können den Gesamtluftgehalt von steifem Straßenbeton etwa bis zu 50 % [10] erhöhen, von weichem Beton je nach LP-Mittel deutlich mehr. In den USA werden LP-Mittel nicht nur am Mischer zugegeben, sondern teilweise auch dem Zement zugemahlen. LP-Zemente haben jedoch den Nachteil, daß die Zugabemenge des LP-Mittels nur mit dem Zementgehalt gesteuert werden kann.

Betone aus verschiedenen Zementen ergeben bei gleichem LP-Mittel-Zusatz unterschiedliche Luftgehalte. Eine Abhängigkeit von bestimmten Zementeigenschaften konnte bisher nicht gefunden werden [22, 33].

Ein besonders hoher Gehalt an Zement, Zusatzstoffen, Farbzusätzen und Mehlsand bis 0,2 mm wirkt der Luftporenbildung entgegen. Ein bestimmter Gehalt an Sand 0,2/1 mm, vor allem

Tafel 3 Gesamtluftgehalt für Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand unter deutschen Verhältnissen

Zeile	Kennwerte der Betonzusammensetzung	Mörtel bzw. Beton mit einem Zuschlaggrößtkorn von														Straßenbeton nach den Richtlinien für Betonfahr- bahnen mit 30 mm Zuschlaggrößtkorn	
		0,2 mm		7 mm		15 mm		30 mm		50 mm		70 mm		o	p		
		c	d	e	f	g	h	i	k	l	m	n					
a	b																
1	Mehrkorngehalt in kg/m ³ (Zement + Feinststoffe bis 0,2 mm)	—	550	500	475	425	400	350	350	300	325	275	400	350			
2	Wassergehalt l/m ³	—	bis 210		bis 190		bis 170		bis 155		bis 145		bis 165				
3	Feinnörtelmenge (Mehlkorn + Wasser) in Stoffraum-%	—	39	38	35	33	30	29	27	26	25	24	30			28	
4	Einzelwerte mind.	10,4	4,0	4,0	3,5	3,5	3,0	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
5	Mittelwerte mind.	12,1	5,0	4,5	4,5	4,0	3,5	3,5	3,0	3,0	3,0	3,0	3,5	3,0	3,5	3,5	3,5
6	Gesamtluft- gehalt des Betons in %	—	13,8	5,5	5,0	4,5	4,0	4,0	4,0	4,0	3,5	3,5	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
7	—	—	15,5	6,0	5,5	5,0	4,5	4,5	4,5	4,0	4,0	4,0	4,5	4,0	4,5	4,5	4,5

der Körner um 0,5 mm, ist der Luftporenbildung förderlich. Ein höherer, angemessener Luftgehalt entsteht bzw. bleibt erhalten am besten in knapp weichem bis weichem Beton mit nicht zu hohem Mehlkorngesamtgehalt; in erdfeuchtem Beton ist dies schwieriger. Beton mit zu hohem Mehlkorngesamtgehalt (Zement, Zusatzstoffe, Farbzusätze, Mehlsand) ergibt mit Luftporen einen federnden, nicht mehr gut verarbeitbaren Beton („Gummibeton“). Für die Entstehung der Luftporen reicht bei erdfeuchtem Beton offenbar in der Regel der Wassergehalt nicht aus.

Überwiegend ergaben niedrigere Betontemperatur und etwas längeres und intensiveres Mischen größere Luftgehalte. Der Gesamtluftgehalt vermindert sich allerdings wieder bei übermäßig langem und intensivem Mischen. Bei steifem Straßenbeton hatte die doppelte Mischzeit (etwa 4 min) eine unerhebliche, die dreifache Mischzeit (etwa 6 min) eine deutliche Verringerung des Luftgehaltes (rd. 1,1 %) zur Folge [10]. Durch Rütteln wird der Luftgehalt der obersten Schicht von Straßenbeton, die der Tausalzeinwirkung besonders ausgesetzt ist, nicht nachteilig verändert. Wird jedoch Luftporenbeton in kleinen Probekörperformen mit Innenrüttlern verdichtet, so vermindert sich der Gesamtluftgehalt dieses kleinen Betonprobekörpers deutlich.

Die Luftporenbildung ist also von verschiedenen, sich teilweise überlagernden Einflußgrößen abhängig. Daher ist in jedem Einzelfall eine Eignungsprüfung zur Festlegung der für einen bestimmten Luftgehalt erforderlichen Zusatzmenge notwendig. Da sich einige Bedingungen, wie z. B. Betontemperatur, Feinsandgehalt, Konsistenz, auf der Baustelle ändern können, muß während der Bauausführung der Gesamtluftgehalt des Betons laufend geprüft und gegebenenfalls die Zugabemenge des LP-Mittels geändert werden.

3.4 Nebenwirkung von Luftporen

Die Luftporenbildner verbessern nicht nur den Widerstand gegen Frost- und Tausalzbeanspruchungen, sondern können wie die übrigen Betonzusatzmittel auch andere Betoneigenschaften verändern [7, 9, 10, 13, 18 bis 22, 32, 34, 35, 36]. Auch aus diesen Gründen sind stets Eignungsprüfungen erforderlich [34].

Das Erstarren wird im allgemeinen nicht wesentlich verändert. Durch die Zugabe von LP-Mitteln werden die Verarbeitbarkeit und das Zusammenhaltevermögen des Betons deutlich verbessert und das Wasserabsondern verringert. Bei etwa gleicher Betonkonsistenz und einer Vergrößerung des Luftgehaltes durch das LP-Mittel um 2 bis 4 % können je nach Mittel etwa 3 bis 7 % der Anmachwassermenge eingespart werden [36]. Die Wassereinsparung beträgt bei einem Gesamtwassergehalt von etwa 150 l/m³ für 1 % feiner Luftporen etwa 2,5 bis 3,5 l/m³, vgl. auch [26]. Eine noch größere Wassereinsparung ergibt sich, wenn wegen der besseren Verarbeitbarkeit gleichzeitig der Sandgehalt verringert wird. Dabei können 1 % feiner Luftporen etwa 10 bis 15 kg Mehlkorn je m³ Beton ersetzen.

Die Druckfestigkeit des Betons kann unter sonst gleichen Verhältnissen etwa bis zu 15 % geringer ausfallen als beim Nullbeton [18, 36], die Biegezugfestigkeit wird meist etwas weniger ver-

ändert. Die Festigkeit nimmt aber im allgemeinen nur wenig oder nicht ab, wenn die durch die Zugabe von Luftporenbildnern mögliche Sand- und Wassereinsparung genutzt wird. Im Vergleich zum Nullbeton etwa gleicher Festigkeit verändern die kleinen Luftporen die Wasseraufnahme, die feuchtigkeits- und die temperaturbedingten *Raumänderungen*, die Abnutzbarkeit, die Biegeelastizität, die Bruchdehnung, die Härte und die Dauerfestigkeit des Betons sowie bei Stahlbeton die Haftung und den Korrosionsschutz des Stahls im Beton nicht nachteilig [10, 13, 22, 29, 35, 36].

4. Beton mit hohem Frostwiderstand

4.1 Junger Beton

Für die Dauer der Winterschutzmaßnahmen ist von Bedeutung, wann junger Beton ein erstmaliges, auch länger anhaltendes Durchfrieren ohne Schaden übersteht. Nach den deutschen Winterbaurichtlinien [37] kann ein nicht zu wasserreicher und nicht zu zementarmer Beton ein erstmaliges Durchfrieren ohne Schaden ertragen, wenn er eine Würfeldruckfestigkeit von 50 kp/cm² erreicht hat oder wenn die Betontemperatur nach Einbau des Betons wenigstens 3 Tage mehr als 10 °C betrug. Als nicht zu zementarm und nicht zu wasserreich wird ein Beton mit einem Zementgehalt von ≥ 270 kg/m³ und einem Wasserzementwert von $\leq 0,60$ angesehen.

Die RILEM-Winterbaurichtlinien [38] berücksichtigen, daß die für das Erreichen eines ausreichenden Hydratationsgrades bzw. einer Druckfestigkeit von 50 kp/cm² erforderliche Erhärtungszeit vorwiegend von Zement, Wasserzementwert und Betontemperatur abhängt. Aus entsprechenden Kurven kann die Erhärtungszeit in Abhängigkeit von den vorhergenannten Größen abgelesen werden (vgl. Bild 3). Dabei werden die Zemente nach ihrer Hydratationswärme, die während der ersten drei Tage bei 5 °C-Lagerung entwickelt wird, in Gruppen verschiedener Anfangserhärtung unterteilt.

Diese Bedingungen genügen jedoch nicht, wenn Beton wiederholt gefriert und auftauft, d. h. wenn er wiederholten Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt wird.

4.2 Erhärteter Beton

Hoher Frostwiderstand wird von Beton gefordert, der im durchfeuchteten Zustand häufigen Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt wird. Vorwiegend handelt es sich um Betonbauteile des Wasserbaus, des Tiefbaus und des Brückenbaus. Zur Anwendung kommen dabei in erster Linie Betone der Güten B 225 und B 300. Für deutsche Verhältnisse wird hoher Frostwiderstand erreicht, wenn bei Herstellung des Betons folgendes beachtet wird.

4.2.1 Zement

Aus zahlreichen Untersuchungen ist bekannt, daß sich Betone, die zwar mit verschiedenen Zementen, aber sonst gleich hergestellt und behandelt werden, bei häufigen Frost-Tau-Wechseln etwas

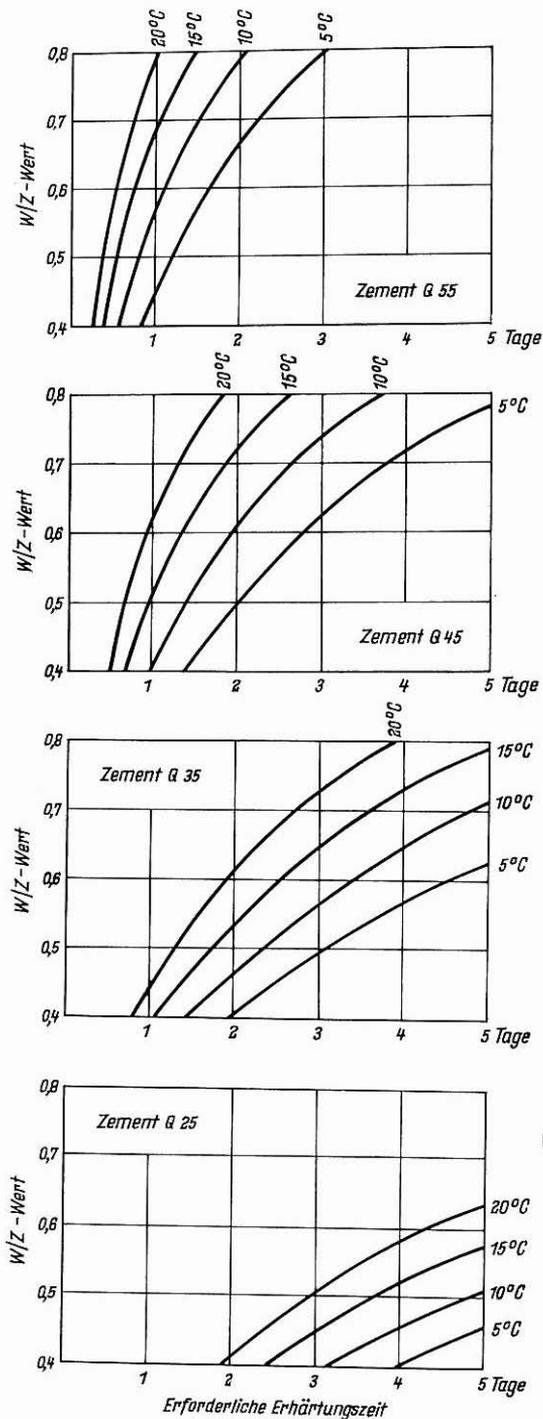


Bild 3 Erforderliche Erhärtungszeit zum Erreichen der Gefrierbeständigkeit in Abhängigkeit von Zement, W/Z-Wert und Betontemperatur nach den RILEM-Richtlinien [38]

Hydratationswärme (Lösungswärme) bei 5 °C nach 3 Tagen:

Q 55 > 50 cal/g

Q 45 40 bis 50 cal/g

Q 35 30 bis 40 cal/g

Q 25 20 bis 30 cal/g

unterschiedlich verhalten können. Als Gründe können hierfür verschiedene Ursachen in Frage kommen. Teilweise wird angenommen, daß die chemische Zusammensetzung, die Mahlfeinheit und das Alter des Zements den Frostwiderstand des Betons beeinflussen [39] und daß die Zugabe von Zusatzstoffen ihn herabsetzen kann [17, 40]. Die Untersuchungen gestatten jedoch keine eindeutigen und praktisch nutzbaren Folgerungen, weil u. a. gleicher Hydratationsgrad sowie gleicher Gehalt und gleiche Aufteilung der Kapillarporen meist nicht vorausgesetzt werden können und teilweise Luftporenbildner zugegeben wurden.

Nach Untersuchungen von K. Walz [33] ist ein unterschiedliches Verhalten der Zemente in erster Linie darauf zurückzuführen, daß einige Zemente bereits von sich aus — möglicherweise durch ihre Mahlhilfen — feine Luftporen in den Beton einführen und dadurch seinen Frostwiderstand erhöhen. Ausgesprochene LP-Zemente werden in Deutschland nicht hergestellt, vgl. Abschnitt 3.3.

4.2.2 Zuschlagstoff

Die Zuschlagstoffe müssen frost- und wetterbeständig sein. Im allgemeinen ist diese Forderung bei üblichen Betonzuschlagstoffen, wie z. B. aus Kiessand, wenig saugendem Naturgestein [41] oder Hochofenschlacke, erfüllt. Bei Zuschlag aus gebrochenem Naturgestein kann Frostbeständigkeit in der Regel vorausgesetzt werden, wenn das Gestein im durchfeuchteten Zustand eine Druckfestigkeit von 1500 kp/cm² und mehr aufweist. Aber auch Gestein mit etwas geringerer Druckfestigkeit im durchfeuchteten Zustand kann frostbeständig sein.

Kann ausreichende Frostbeständigkeit des Zuschlags nicht ohne weiteres erwartet werden, wie z. B. bei kreidigen oder mergeligen Körnern oder wenig festem, saugendem Kalkstein oder Sandstein, so ist der Zuschlag nach DIN 4226 zu untersuchen. Nach DIN 4226 soll der Anteil an nicht frostbeständigen Teilen bei Korngruppen bis 7 mm 10 Gew.-% und bei Korngruppen über 7 mm 5 Gew.-% nicht überschreiten. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, daß bis zu diesen Mengen nicht frostbeständiger Anteile lediglich die Betonfestigkeit nach 50 Frost-Tau-Wechseln nicht kleiner ausfiel [42], daß aber bereits einzelne nicht frostbeständige Körner Aussprengungen an Betonflächen zur Folge haben können. Daher sollte im Wasser- und Straßenbau nur Zuschlag aus frostbeständigem Gestein verwendet werden.

Die Betonzuschlagstoffe sollen weitgehend frei von lehmigen, tonigen und glimmerhaltigen Bestandteilen sein, da diese Bestandteile teilweise selbst nicht frostbeständig sind und in größerer Menge, insbesondere am Grobkorn anhaftend oder als Klumpen, den Frostwiderstand des Betons herabsetzen [43].

Sehr glatte, dichte Zuschlagkörner können bei wasserreichem Beton einen Wasserfilm um sich bilden und auch dadurch die Haftung zwischen Zementstein und Kornoberfläche und den Frostwiderstand des Betons vermindern.

4.2.3 Betonzusammensetzung

Beton mit hohem Frostwiderstand erfordert außer frostbeständigem Zuschlag einen Zementstein mit hohem Frostwiderstand. Bei

Frostbeanspruchungen im gemäßigten Klima ist ein praktisch wasserundurchlässiger Zementstein ausreichend. Im allgemeinen sollte daher für Beton mit hohem Frostwiderstand ein Wasserzementwert von etwa 0,55 nicht wesentlich überschritten werden [44, 45]. Bei einem Mindestzementgehalt von 300 kg/m³ ergibt sich dann zwangsläufig (Wassergehalt 165 l/m³) mindestens ein Beton der Güte B 300, der ja erfahrungsgemäß auch frostbeständig ist.

Im Wasserbau ist aber häufig, insbesondere bei massigen Bauteilen, aus statischen Gründen nur ein Beton der Güte B 225 erforderlich, der in der Regel mit einem Wasserzementwert von etwa 0,65 bis 0,70 hergestellt wird. Dieser B 225 ist wie alle Betone mit größerem Wasserzementwert (bis etwa 0,70) bei starken Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchungen im allgemeinen nur ausreichend frostbeständig, wenn dem Frischbeton geeignete [34] Luftporenbildner in ausreichender Menge, d. h. für einen ausreichenden LP-Gehalt im Beton, zugegeben werden. Der Gesamtluftgehalt des Betons ist auf die Feinmörtelmenge abzustimmen (vgl. Tafel 3). Für deutsche Klimaverhältnisse erfordert Beton mit einem Zuschlaggrößtkorn von 30 mm dann einen mittleren Luftgehalt von mindestens 3,5 %.

Sehr weiche und wasserreiche Betone neigen zum Entmischen und Wasserabsondern. Dadurch entstehen feinemörtelreiche Stellen und besonders an den dem Frost ausgesetzten Betonflächen und unter größeren Zuschlagkörnern schwache und porenreiche Stellen mit geringerem Frostwiderstand. Es ist daher möglichst ein schwachplastischer Rüttelbeton herzustellen. Um bei angemessenen Zementgehalten den Wasseranspruch gering zu halten, sollte die Kornzusammensetzung des Zuschlags im besonders guten Bereich der Sieblinienbilder der DIN 1045 oder DIN 1047 liegen. Zum Vermeiden von Wasserabsondern und Entmischen und für gute Verarbeitbarkeit des Betons ist ein Mindestgehalt an Mehlkorn (Zement und Feinststoffe bis 0,2 mm) erforderlich. Der Mehlkorngehalt ist jedoch auf das notwendige Maß zu beschränken und sollte nicht übermäßig erhöht werden, da sonst mehr Wasser benötigt und der Frostwiderstand des Betons herabgesetzt wird [45, 46, 47]. Die Größt- und die Mindestwerte des Mehlkorngehalts sind für Beton üblicher Zusammensetzung in Abhängigkeit vom Zuschlaggrößtkorn in Tafel 3 (Zeile 1) angegeben.

Die Zugabe von geeigneten Zusatzstoffen, wie z. B. Trass oder Gesteinsmehl, ist angezeigt und führt zur Verbesserung der Betoneigenschaften, wenn im Beton der Mindestgehalt an Mehlkorn noch nicht vorhanden ist [47, 48]. Von den Betonzusatzmitteln können zur Verbesserung des Frostwiderstandes nur Luftporenbildner (LP) mit gültigem Prüfbescheid des Prüfausschusses für Betonzusatzmittel im Länder-Sachverständigenausschuß empfohlen werden. Luftporenbildende Betonverflüssiger (LPV), die in den neuen Richtlinien [34] nicht mehr gesondert aufgeführt sind, erzeugen im Beton im allgemeinen keinen ausreichend großen Luftgehalt.

4.2.4 Betonherstellung und Einbau

Bei der Betonherstellung sind alle Maßnahmen für hochwertigen Beton zu beachten, insbesondere über getrennte Korngruppen

– auch die Verwendung von werkgemischtem Kiessand ist möglich – und gewichtsmäßige Zugabe der Zuschläge, Berücksichtigung der Oberflächenfeuchtigkeit sowie gleichmäßiges und wirkungsvolles Mischen (vgl. auch DIN 1045 und DIN 1047). Fördern und Einbringen sind auf die Konsistenz des Betons abzustimmen, damit er sich dabei nicht entmischt. Der Beton ist vollständig zu verdichten, möglichst durch Rütteln. Zu langes Rütteln mit Außenrüttlern oder mit nahe der Schalung eingesetzten Innenrüttlern kann an der Schalung eine wasser- und feinemörtelreiche Schicht mit geringerem Frostwiderstand zur Folge haben. Luftporenbeton sollte bei Herstellung von Prüfkörpern nicht mit Innenrüttlern verdichtet werden.

Beton mit hohem Frostwiderstand erfordert einen hohen Hydrationsgrad. Daher ist der Beton wenigstens 7, besser 14 Tage feucht zu halten. Bei langsam erhärtenden Zementen ist eine längere Feuchthaltung als bei schnell erhärtenden Zementen notwendig, bei niederen Temperaturen eine längere als bei höheren.

5. Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand

5.1 Allgemeines

Tausalzbeständiger Beton wird dort gefordert, wo Schnee und Eis auf Betonflächen durch Tausalze entfernt werden. Fast ausschließlich handelt es sich dabei um Verkehrswege, die aus Sicherheitsgründen von Schnee und Eis freigehalten werden, oder um Bauten und Bauteile für Verkehrswege, die dabei mit Tausalzen oder Tausalzlösungen in Berührung kommen. Von der Betonart her sind dabei Betonfahrbahnen und Brückenbauteile von Betonwaren für Verkehrswege, wie z. B. Gehwegplatten, Bordsteine, Betonpflastersteine und Leiteinrichtungen aus Beton, zu unterscheiden. Während für Betonfahrbahnen und für Brückenbauteile vorwiegend ein mäßig steifer bis knapp weicher Rüttelbeton verwendet wird, werden Betonwaren für Verkehrswege in der Regel aus erdfeuchtem Beton hergestellt. In jüngerer Zeit werden häufig auch begangene Betonflächen von Wasserbauwerken, wie z. B. bei Schleusen, im Winter mit Tausalzen gestreut. Dabei handelt es sich oft nur um einen Beton der Güte B 225 (vgl. dazu Abschnitt 5.2.1).

5.2 Betonfahrbahnen

Für die Herstellung von Betonfahrbahnen sind die Richtlinien für den Bau von Betonfahrbahnen und bei Autobahnen darüber hinaus die Hinweise für ihre Anwendung [26] maßgebend. Betonfahrbahnen werden im allgemeinen aus einem mäßig steifen Rüttelbeton der Güte B 400 und nur bei geringerer Belastung aus Beton der Güten B 350 oder B 300 hergestellt. Diese Betone weisen bereits einen ausreichenden Frostwiderstand auf, bei Tausalzbeanspruchungen sind jedoch weitere Maßnahmen erforderlich (vgl. Abschnitte 5.2.1 bis 5.2.3).

5.2.1 Betonzusammensetzung

Für Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzung sind auch die Hinweise über frostbeständigen Beton (vgl. Abschnitt 4.2) zu be-

achten. Allgemein dürfen für Betonfahrbahnen nur Zemente nach DIN 1164 und für Bundesfernstraßen nur nach dem Allgemeinen Runderlaß Straßenbau 9/1965 des Bundesministers für Verkehr zugelassene Zemente verwendet werden. In der Regel wird Zement der Güteklasse Z 275 verarbeitet. Die Verwendung von Zement höherer Güte, die zur Abkürzung der Verkehrssperre und bei Herstellung im Spätherbst sinnvoll und zweckmäßig sein kann, soll allerdings nach den Hinweisen für die Anwendung der Richtlinien [26] auf Ausnahmefälle beschränkt bleiben.

Anforderungen und Richtwerte für die Betonzusammensetzung nach den Richtlinien für Betonfahrbahnen [26] sind für Beton mit 30 mm Größtkorn in Tafel 4 zusammengestellt. Da bei Frost-Tausalz-Einwirkungen bevorzugt die feimörtelreichen Schichten an der Fahrbahnoberfläche abwittern, sollte die Feimörtelmenge so klein wie möglich gehalten werden. Dies bedeutet, daß Wasser- und Mehlkorngelalt möglichst auf das Mindestmaß (vgl. Tafel 4) zu beschränken sind und daß der Gehalt an feinen Luftporen bei Festlegung des Mehlkorn- und des Wassergehaltes zu berücksichtigen ist (vgl. Abschnitt 3.4). Die obere Begrenzung des Mehlkorngehaltes hat zur Folge, daß bei Beton der Güte B 400 der Anteil 0/0,2 mm ohne Zement nur etwa 2 Gew.-% des Gesamtzuschlags betragen darf und daß für die Kornzusammensetzung des Zuschlages wenigstens im Bereich bis 0,2 mm nur die untere Hälfte des günstigsten Sieblinienbereiches ausgenutzt werden kann (vgl. Bild 4).

Beton für Betonfahrbahnen sind zur Erreichung der Tausalzbeständigkeit ausreichende Mengen eines geeigneten Luftporenbildners (LP) zuzugeben (vgl. Abschnitt 4.2.3 und [26]). Die erforderliche Zugabemenge des LP-Mittels ist in einer Eignungsprüfung zu ermitteln. Der Gesamtluftgehalt des Betons soll als Einzel-

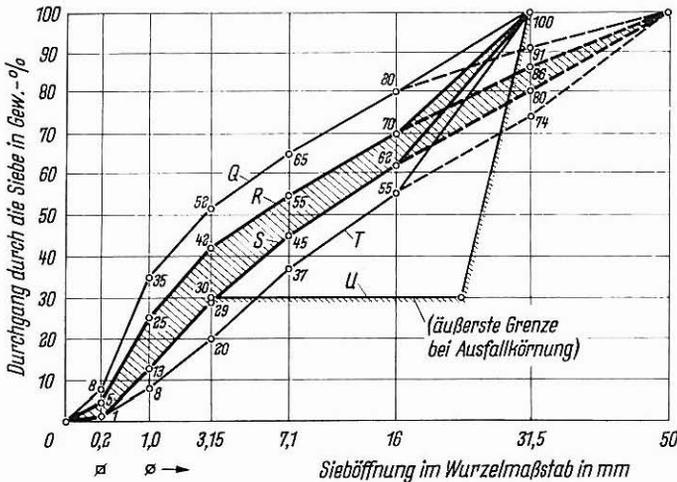


Bild 4 Grenzsieblinien für Betonzuschlagstoffe nach den Richtlinien für Betonfahrbahnen [26]

Tafel 4 Anforderungen und Richtwerte für Beton von Betonfahrbahnen [26]

Lfd. Nr.	Straßengruppe Verkehrsbelastung	Deckendicke	Mindestfestigkeiten nach 28 Tagen		Gesamtluftgehalt mindestens		Richtwerte für		Mehlkorngehalt*)	Sieblinienbereich**) (vgl. Bild 3)	Erforderliche Korngruppen***)
			Druck	Biegezug	Einzelwert	Tagesmittel	W/Z-Wert	Zementgehalt			
		cm	kp/cm ²	kp/cm ²	%	%	-	kg/m ³	kg/m ³		mm
1	I sehr schwer	22 bis 24	400	55	3	3,5	≤ 0,45	350	≤ 350 ≤ 400	untere Hälfte des günstigen Bereichs	0/3
2	II schwer	20 bis 22	400	55	3	3,5	≤ 0,45	350	≤ 350 ≤ 400		3/7 7/15 15/30
3	III mittel	18	350	45	3	3,5	≤ 0,50	325	≤ 350 ≤ 400	günstig	0,3 3/7 7/30
4	IV leicht	16	300	40	3	3,5	≤ 0,55	300	≤ 350 ≤ 400	für Oberbeton günstig, sonst auch oberhalb	0/7 7/30

*) Zement + Feinststoffe bis 0,2 mm

**) die Sieblinie darf tiefer liegen, wenn auch dann der Beton vollständig verdichtet wird

***) für die Straßengruppen III und IV darf werkgemischter Kiessand verwendet werden

wert 3 % und als Tagesmittel 3,5 % nicht unterschreiten. Er ist während der Bauausführung wenigstens dreimal täglich mit dem Druckausgleichsverfahren [24] nachzuprüfen.

Da die Grenzen des Mehlkorngehaltes vom Zuschlaggrößtkorn und der für Tausalzbeständigkeit erforderliche Gesamtluftgehalt von der Feinmörtelmenge abhängen, sind für Betone mit größerem oder kleinerem Zuschlaggrößtkorn als 30 mm die Mindestluftgehalte der Tafel 3 erforderlich. Als Feinmörtel wurde dabei der Anteil aus Mehlkorn (Zement und Feinststoffe 0/0,2 mm) und Wasser betrachtet. Auch wenn für den im Spätherbst hergestellten Beton (vgl. Abschnitt 5.2.2) besonders ungünstige Verhältnisse, z. B. dauernd nasses Wetter und sehr niedrige Temperaturen bis zur ersten Tausalz-Streuung, zu erwarten sind, empfehlen sich etwas höhere Luftgehalte, aber auch die Verwendung eines Zementes Z 475.

Für Beton der Güte B 225 mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand, wie z. B. bei Wasserbauwerken, ist der Gesamtluftgehalt gegebenenfalls auf die größere Feinmörtelmenge abzustimmen (vgl. Tafel 3).

5.2.2 *Nachbehandlung*

Betonfahrbahnen sollen im allgemeinen feucht nachbehandelt werden [26]. Da Nachbehandlungsfilme [48] eine begrenzte Austrocknung gestatten und vielleicht zu Anfang das Eindringen der Tausalzlösung in den Beton etwas behindern, kann es jedoch bei im Spätherbst hergestelltem Beton zweckmäßig sein, sie anstelle der Feuchtnachbehandlung zu verwenden [26, 50, 51]. Nach den Hinweisen für die Anwendung der Richtlinien [26] kann diese Erkenntnis allerdings im allgemeinen wohl nicht genutzt werden.

Nach neueren Untersuchungen [16] sind an fachgerecht hergestelltem hochwertigem Straßenbeton, der im Spätherbst eingebaut und bald darauf durch Frost-Tausalz-Wechsel beansprucht wird, auch im ersten Winter praktisch keine störenden Abwitterungen zu erwarten, wenn der Beton bis zur ersten Tausalzbeanspruchung eine hohe Druckfestigkeit erreicht hat und wenigstens einen Teil seines herstellungsbedingten Überschußwassers abgeben konnte. Der untersuchte Straßenbeton hatte einen LP-Gehalt von 3,5 % und mit 0,40 einen verhältnismäßig kleinen W/Z-Wert, er erreichte bis zum Beginn der Frost- und Tausalz-Beanspruchung (Lagerung bei 5 °C, 14 Tage feucht und 28 Tage bei rd. 90 % rel. Luftfeuchte) eine Druckfestigkeit von 482 kp/cm². Auch die unter noch ungünstigeren Bedingungen, wie z. B. sehr starke Frost-Tausalz-Beanspruchung nach dauernd nassem Wetter und niedriger Temperatur, an jungem Beton vielleicht möglichen geringen Abwitterungen können durch ein Imprägnieren vermieden werden (vgl. auch Abschnitte 5.2.1 und 5.2.3).

5.2.3 *Imprägnieren von Betonoberflächen*

Unter Imprägnieren versteht man eine Behandlung, bei der die Imprägnierflüssigkeit in den Beton eindringt und die Poren der oberen Zone weitgehend versiegelt oder wasserabweisend macht. Das Imprägnieren darf die Griffigkeit der Betonoberfläche nicht

herabsetzen. Ein Beschichten, bei dem lediglich ein Film auf der Betonoberfläche entsteht, sollte vermieden werden.

Bereits um 1950 wurden in Deutschland im Laboratorium und auf der Straße Imprägnierversuche, u. a. mit Mineralöl-Benzin-Gemischen, Teerölpräparaten, Teerpechemulsionen, wasserlöslichen Fluaten, wasserabweisenden Wachsen in organischen Lösungs-



Bild 5 Junger Laborbeton ($W/Z = 0,40$, 3,5% Luftporen und Epoxyharz-Imprägnierung) nach 90 Frost-Tausalz-Wechseln (Zementhaut erhalten) [16]



Bild 6 Junger Laborbeton ($W/Z = 0,40$ und 3,5% Luftporen, ohne Imprägnierung) nach 90 Frost-Tausalz-Wechseln (Abwitterung des Feinmörtels) [16]

mitteln und Siliconen, durchgeführt [7, 9, 10, 18, 52]. Diese Imprägnierungen waren meist nicht sehr wirksam, eine begrenzte Verbesserung des Frost-Tausalz-Widerstandes des Betons ergab sich damals bei drei- bis viermaligem Auftrag von Mineralöl-Benzin-Gemischen, Teerölpräparaten oder Siliconen. Umfangreiche Versuche mit insgesamt 85 Imprägniermitteln, von denen sich allerdings nur wenige als geeignet erwiesen, wurden in den USA durchgeführt [53]. Nach amerikanischen und neueren deutschen Versuchen [16, 53 bis 62] ist von Imprägnierungen mit Mineralöl-Benzin-Gemischen oder mit Siliconen als Betonzusatz eine wesentliche Schutzwirkung gegen Frost-Tausalz-Beanspruchungen nicht zu erwarten. Das Imprägnieren mit verdünntem und unverdünntem Leinölfirnis oder mit Lösungen geeigneter Kunstharze, wie z. B. Epoxyharze, schützte jedoch jungen LP-Beton selbst bei einer sehr starken Laboratoriumsbeanspruchung (90 schroffe Frost-Tausalz-Wechsel) vor nahezu jeglichem Abwittern, vgl. Bilder 5 und 6 [16]. Diese Feststellungen werden durch die zur Zeit im Laboratorium und auf der Straße laufenden Versuche des Otto-Graf-Instituts Stuttgart noch erweitert. Auch der Einfluß der Imprägnierung auf die Griffigkeit der Decke soll dabei mit untersucht werden.

Das Imprägnieren mit verdünntem Leinölfirnis oder mit einer Epoxyharzlösung ist daher eine Möglichkeit, um die Lebensdauer alter, ohne ausreichenden LP-Gehalt hergestellter Betondecken zu verlängern und um jungem, im Spätherbst hergestelltem LP-Beton im ersten Winter einen zusätzlichen Schutz gegen sehr starke Tausalzbeanspruchungen zu geben. Epoxyharzlösungen wurden in der Regel einmal bei 20 °C in einer Menge von rd. 180 bis 200 g/m² aufgebracht. Bei Leinölimprägnierungen wurde bisher vorwiegend Leinölfirnis (vgl. DIN 55 932), der rasch trocknet und in etwa einem Tag aushärtet, zweimal im Abstand von 1 Tag mit je etwa 0,11/m² aufgetragen. Zum besseren Eindringen in den Beton soll er möglichst auf etwa 80 °C erwärmt und beim ersten Aufbringen z. B. mit Terpentinöl, Testbenzin, Schwerbenzin oder Petroleum 1:1 verdünnt werden. Bei den vorher genannten Versuchen [16] wurde am ersten Tag ein mit Terpentinöl verdünnter Leinölfirnis in einer Menge von 90 g/m² und einen Tag später der unverdünnte Leinölfirnis in einer Menge von 70 g/m² aufgebracht.

Das Eindringen der Imprägnierflüssigkeit setzt eine abgetrocknete Betonfläche voraus. Bei den vorher genannten Versuchen [16] war jedoch noch ein einwandfreies Imprägnieren auch bei Platten möglich, die bis zum Imprägnieren 14 Tage unter nassen Tüchern und 28 Tage bei 90 % relativer Luftfeuchtigkeit lagerten und einen Tag vor dem Imprägnieren nochmals entsprechend 0,5 mm Niederschlagshöhe befeuchtet wurden. Alte Betonoberflächen müssen vor dem Imprägnieren gereinigt werden, ihre Imprägnierung muß jedoch in gewissen Zeitabständen erneuert werden.

5.3 Betonwaren

Nach dem strengen Winter 1962/63 wurde vorwiegend in einigen Städten auch über Tausalzabwitterungen an Betonwaren, wie z. B. Gehwegplatten und Bordsteinen, geklagt (vgl. Bild 7). Dies dürfte



Bild 7 Eingebaute Gehwegplatten mit und ohne Tausalzschäden

darauf zurückzuführen sein, daß in diesem Winter auch mehr Gehwege als früher in stärkerem Maße mit Tausalzen gestreut und längere Zeit nicht vollständig von Salzlösung und Schneematsch befreit wurden. Eine spätere Nachprüfung ergab, daß in den jeweiligen Städten insgesamt doch nur ein kleiner Anteil und oft nur Gehwegplatten einzelner Hersteller Tausalzabwitterungen aufwiesen. Unmittelbar neben geschädigten waren auch nicht geschädigte Platten anzutreffen (vgl. Bild 7), die sowohl Tausalzen als auch allgemein den gleichen Beanspruchungen ausgesetzt waren wie die geschädigten Platten.

Die Untersuchung einiger Platten ergab, daß die Tausalzschäden vorwiegend auf nicht geeignete Betonzusammensetzung und vielleicht auch auf unzureichende Nachbehandlung zurückzuführen waren. Der Beton war teilweise zu sandreich und wies in einigen Fällen einen zu hohen Mehlkorngesamtgehalt auf (oft über 700, teilweise über 1000 kg/m³). Dies konnte besonders bei Vorsatzschichten festgestellt werden, die mit staubreichem Basaltbrechsand als Zuschlag hergestellt worden waren. Bei zu hohem Mehlkorngesamtgehalt entsteht an der Lauffläche eine feinstmörtelreiche, weniger dichte und stark saugende Schicht, die Frost-Tausalz-Einwirkungen nicht ausreichend widersteht. Stärkeres Saugen kann auch durch frühzeitiges Austrocknen, d. h. unzureichende Nachbehandlung, verursacht werden.

Bei neueren Versuchen [63] an Gehwegplatten aus verschiedenen zusammengesetzten Betonen überstanden im Betonwerk aus erdfeuchtem Beton mit 7 mm Größtkorn in einer neuzeitlichen Stampfmaschine hergestellte Platten 60 scharfe Frost-Tausalz-Wechsel ohne wesentliche Veränderung, wenn der Zementgehalt mindestens bei 450 kg/m³, der W/Z-Wert etwa bei 0,40 (höchstens bei 0,45), der Mehlkorngesamtgehalt (Zement und Feinststoffe bis 0,2 mm)

zwischen 500 und 550 kg/m³ und die Kornzusammensetzung des Zuschlags im günstigen Bereich lag.

Platten aus ungünstiger zusammengesetzten, mehlkornreicheren Mischungen erwiesen sich nur dann als ausreichend tausalzwiderstandsfähig, wenn der Zementgehalt noch auf 580 kg/m³ erhöht und der W/Z-Wert auf 0,37 erniedrigt wurde. Luftporen konnten in den erdfeucht angemachten, mehlkornreichen Vorsatzmischungen nur durch besonderes Vorgehen in geringem Maße erzeugt werden. Dabei wurde der reichlich bemessene LP-Zusatz zunächst mit einem Teil des Zements, dem Grobsand und dem gesamten Zugabewasser im Zwangsmischer 2 Minuten lang vorgemischt. Durch den geringen Anteil kleiner kugelförmiger Luftporen, der allerdings nur mikroskopisch am erhärteten Beton nachweisbar war, wurde der Frost-Tausalz-Widerstand etwas verbessert.

Sowohl die Feststellungen über Umfang und Auftreten von Abwitterungen an verlegten Betonwaren als auch die Ergebnisse der neueren Versuche an Gehwegplatten [63] lassen vermuten, daß Betonwaren für Verkehrswege, die aus erdfeuchtem Beton hoher Festigkeit hergestellt werden, bei richtiger Zusammensetzung und Herstellung ohne zusätzliche Maßnahmen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand besitzen. Bei Herstellung von Betonwaren mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand sollte daher folgendes berücksichtigt werden:

- a) Betonwaren mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand erfordern einen möglichst kleinen W/Z-Wert (etwa $\leq 0,40$) und im allgemeinen einen erhöhten Zementgehalt (etwa ≥ 450 kg/m³).
- b) Im Beton sind in der Regel etwa folgende Anteile an Mehlkorn (Zement und Feinststoffe bis 0,2 mm) erforderlich:

600 kg/m³ bei einem Größtkorn von 3 mm

500 kg/m³ bei einem Größtkorn von 7 mm

425 kg/m³ bei einem Größtkorn von 15 mm

350 kg/m³ bei einem Größtkorn von 30 mm

Diese Mengen sollten auf keinen Fall um mehr als 50 kg/m³ überschritten werden. Eine Unterschreitung ist zweckmäßig, wenn die Herstellungsart es gestattet und dabei ein Beton mit geschlossenem Gefüge entsteht.

Diese Empfehlungen sollten besonders bei Vorsatzschichten beachtet werden. Brechsande mit hohem Staubanteil können daher nur in geringer Menge verwendet werden. Der Gehalt an Farbzusätzen ist auf ein Minimum zu begrenzen.

- c) Die Kornzusammensetzung des Gesamtzuschlags sollte im besonders guten Bereich der Grenzsieblinien der DIN 1045 liegen. Wegen der oberen Begrenzung des Mehlkorngehaltes kann jedoch der besonders gute Sieblinienbereich wenigstens beim Zuschlag bis 0,2 mm nicht bis zur oberen Grenzsieblinie ausgenutzt werden.
- d) Der Beton ist vollständig zu verdichten und wenigstens 7 Tage vor stärkerem Austrocknen zu schützen.

Eine Verbesserung des Tausalz widerstandes durch künstliche Luftporen kommt im allgemeinen bei üblichen Betonwaren nicht in Betracht, da die Betonwaren wegen des sofortigen Entschalens in der Regel aus erdfeuchtem Beton hergestellt werden und da sich künstliche Luftporen in erdfeuchtem Beton nur durch besondere Maßnahmen in geringem Maße erzeugen lassen.

Hoher Frost-Tausalz-Widerstand kann auch bei Betonwaren für eine begrenzte Zeit durch ein Imprägnieren (siehe Abschnitt 5.2.3) erreicht werden. Eine Imprägnierung bedeutet jedoch eine betriebliche Erschwernis für die Betonwarenherstellung und dürfte daher für Betonwaren nur in besonderen Fällen zur Anwendung kommen [63].

6. Prüfung der Frost- und Tausalzbeständigkeit

6.1 Frost-Tau-Wechsel-Verfahren

Der Frostwiderstand des Betons wurde meist mit Frost-Tau-Wechsel-Verfahren geprüft, in Deutschland vorwiegend mit Frost-Tau-Wechseln zwischen einer Wasserlagerung bei etwa 15 und 20 °C und einer Luftlagerung bei etwa -15 °C [25, 34, 64, 65, 66]. Dabei wird die Frostwirkung auf den Beton nach Augenschein, am Gewichtsverlust, an der Längen- oder Volumenänderung oder an der Veränderung der Druckfestigkeit, der Biegezugfestigkeit oder des dynamischen E-Moduls beurteilt, siehe u. a. [21, 27, 34]. Das Ergebnis von Frost-Tau-Wechsel-Versuchen ist in weitem Maße von den Einzelbedingungen des Verfahrens abhängig, wie z. B. Feuchtigkeitszustand der Proben beim Einfrieren, Geschwindigkeit des Einfrierens und Belegung und Ausbildung der Frostkammer [64]. Die Frostbeanspruchung ist bei schnellem Einfrieren unter Wasser am größten und nimmt in folgender Reihenfolge ab: Langsames Einfrieren unter Wasser, schnelles Einfrieren vorher wassergelagerter Probekörper in Luft, langsames Einfrieren vorher wassergelagerter Probekörper in Luft [67]. Bei Frost-Tau-Wechseln nach ASTM-C-291 (schnelles Einfrieren vorher wassergelagerter Probekörper in Luft bei -18 °C) war die Frosteinwirkung deutlich stärker, wenn die wassergesättigten Betonprobekörper in Kunststoff-Folien verpackt wurden [27].

Frost-Tau-Wechsel-Versuche haben sich für eine vergleichende Beurteilung verschiedener Betone bewährt, wenn die Versuche stets unter den gleichen Bedingungen durchgeführt wurden. Die Ergebnisse von Frost-Tau-Wechsel-Versuchen aus verschiedenen Instituten können daher häufig nicht ohne weiteres miteinander verglichen werden. Die Frost-Tau-Wechsel-Versuche gestatten im allgemeinen keine Aussage über den Frostwiderstandsgrad des jeweiligen Betons für bestimmte praktische Verhältnisse. Jedoch wird ein Beton, der beim Versuch vielen, scharfen Frost-Tau-Wechseln ausreichend widerstanden hat, immer auch einen für die in Deutschland vorherrschenden Klimaverhältnisse ausreichenden Frostwiderstand aufweisen.

Für die Prüfung des *Tausalz widerstandes* haben sich Frost-Tau-Wechsel-Versuche z. B. zwischen + 20 und - 15 °C bewährt, bei

denen auf der Oberseite der Betonplatten eine Tausalzlösung eingefroren wird oder eine Wasserschicht, die anschließend mit Salz getaut wird, siehe u. a. [16].

Die Frostbeständigkeit von *Einpreßmörtel* für Spannkäule in jungem Alter wird mit dem Dilatometerverfahren beurteilt [68]. Probekörper aus Einpreßmörtel, die bei 5 °C feucht gelagert wurden, dürfen im Alter von 3 Tagen bei einmaligem Gefrieren an Luft von -20 °C keine Volumenvergrößerung zeigen. Nach bisherigen Erfahrungen kann diese Forderung nur bei Zugabe von Einpreßhilfen erfüllt werden.

Außer den erwähnten gibt es noch eine Reihe abgewandelter Frost-Prüfverfahren, bei denen teilweise versucht wurde, die Beanspruchungen mehr den praktischen Verhältnissen anzupassen. Diese Verfahren sind teilweise für Beton nicht geeignet, teilweise wurde ihre Übertragbarkeit auf die praktischen Verhältnisse nicht genügend erprobt, Übersicht siehe [64].

6.2 Sonstige Beurteilungsverfahren

Der Frostwiderstand des Betons wird häufig mit anderen Kennwerten des Betons beurteilt, wie z. B. Betonzusammensetzung, Dichtigkeitsgrad, Gesamtluftgehalt, Teilluftgehalt, Abstandsfaktor, Wasseraufnahme und S-Wert. Unter Sättigungswert (S-Wert) wird das Verhältnis zwischen Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck und Wasseraufnahme bei einem Druck von 150 atü verstanden, vgl. DIN 52 113. Mit der Wasseraufnahme und dem S-Wert allein kann der Frostwiderstand des Betons jedoch nicht ausreichend beurteilt werden, siehe u. a. [23, 27, 64, 65, 66].

Der Gesamtluftgehalt des Frischbetons kann zwar mit der Stoffraumrechnung [45, 69] bestimmt werden, bei LP-Beton ist jedoch die Überwachung des Luftgehalts mit direkten Prüfverfahren, wie z. B. Druckausgleichs-, Verdrängungs- oder Ausschüttelverfahren, zweckmäßig [18, 24, 70, 71]. Allgemein wird der Luftgehalt auf der Baustelle bevorzugt mit dem Druckausgleichsverfahren geprüft. Es ist bei Beton jeder Konsistenz bis herab zum mäßig steifen Rüttelbeton ohne weiteres anwendbar. Bei sehr wenig verformbarem und sehr grobkornreichem Frischbeton können sich allerdings Abweichungen ergeben, wenn nicht vorher grobe Körner ausgelesen werden. Ganz allgemein gilt, daß der Verdichtungsgrad des Betons im LP-Gerät mit dem des eingebauten Betons bzw. des Betons der Festigkeitsproben übereinstimmen muß. Daher ist auch der Beton im LP-Gerät stets vollständig zu verdichten.

Am erhärteten Beton können die Luftporenkennwerte, über deren Bedeutung in Abschnitt 3.2 berichtet wurde, mikroskopisch mit dem Meßlinienverfahren [27, 70] ermittelt werden.

7. Zusammenfassung

Für Beton, der im durchfeuchteten Zustand häufigen Frost-Tau-Wechseln oder zusätzlich, wie bei Verkehrswegen, Tausalzbeanspruchungen ausgesetzt wird, ist folgendes zu beachten:

7.1 Die Zuschlagstoffe müssen frostbeständig und weitgehend frei von lehmigen, tonigen und glimmerhaltigen Bestandteilen sein. Schon geringe Mengen nicht frostbeständiger Anteile können zu Aussprengungen an Betonflächen führen.

Der Mehlkorngelalt (Zement und Feinststoffe bis 0,2 mm) sollte auf die Mindestmenge beschränkt werden (siehe Tafel 3) und bei Beton mit 30 mm Größtkorn im allgemeinen zwischen 350 und 400 kg/m³ liegen.

7.2 Unter durchschnittlichen deutschen Witterungsverhältnissen ist dann vollständig verdichteter Beton mit wasserundurchlässigem Zementstein praktisch ausreichend frostbeständig. Der Wasserzementwert sollte im allgemeinen etwa 0,55 und bei ausreichender Zugabe eines geeigneten Luftporenbildners 0,70 nicht überschreiten.

7.3 Der Gehalt an kleinen Luftporen muß dann für Beton mit einem Größtkorn von 7 mm mindestens 4,5 %, von 15 mm mindestens 4,0 %, von 30 mm mindestens 3,5 % und von 50 mm mindestens 3,0 % betragen (siehe Tafel 3). Da die für einen bestimmten Luftgehalt erforderliche LP-Mittel-Zugabe von verschiedenen Einflüssen (vgl. Abschnitt 3.3) abhängt und da Luftporenbildner auch andere Eigenschaften des Betons verändern können, ist stets eine Eignungsprüfung erforderlich. Der Gesamtluftgehalt von LP-Beton ist auf der Baustelle laufend zu überwachen.

7.4 Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand erfordert unbedingt eine Beschränkung des Mehlkorngelaltes und stets einen auf die Feinmörtelmenge abgestimmten Gehalt an kleinen Luftporen (siehe Tafel 3). Der Gesamtluftgehalt des Frischbetons mit 30 mm Größtkorn darf für Betonfahrbahnen im Tagesmittel 3,5 % und als Einzelwert 3 % nicht unterschreiten. Der durch die Luftporen gegebene Grad der Tausalzbeständigkeit des erhärteten Betons kann mit mikroskopisch ermittelbaren Luftporenkennwerten, wie z. B. Abstands faktor, Porengröße und -verteilung, beurteilt werden.

7.5 Auch junger, im Spätherbst hergestellter hochwertiger Straßenbeton erfährt durch scharfe Tausalzbeanspruchungen im ersten Winter praktisch keine störenden Abwitterungen, wenn er bis zur ersten Tausalzbeanspruchung bereits eine hohe Festigkeit (hoher Hydratationsgrad) erreicht hat und wenigstens einen Teil seines herstellungsbedingten Überschußwassers abgeben konnte. Bei einem Versuch auf der Straße verhielt sich eine junge Betondecke mit Nachbehandlungsfilmen besser als eine feucht nachbehandelte junge Betondecke.

7.6 Betonwaren mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand erfordern einen erhöhten Zementgehalt (etwa ≥ 450 kg/m³), einen möglichst kleinen W/Z-Wert (etwa $\leq 0,40$), eine Begrenzung des Mehlkorngelaltes (Zement und Feinststoffe bis 0,2 mm) auf die Mindestmenge, eine Kornzusammensetzung des Zuschlags im besonders guten Bereich, vollständige Verdichtung und ausreichende Nachbehandlung.

7.7. Durch ein Imprägnieren mit verdünntem Leinölfirnis oder mit Epöxyharzlösungen können auch geringfügige Abwitterungen, die sich bei scharfer Tausalzbeanspruchung von sehr jungem Beton im ersten Winter einstellen können, vermieden werden. Das Imprägnieren kann auch den Tausalzwiderstand von Betonwaren erhöhen und die Lebensdauer alter, ohne ausreichenden LP-Gehalt hergestellter Betondecken verlängern.

SCHRIFTTUM :

- [1] Powers, T. C.: A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 41 (1944/45) S. 245/272.
- [2] Powers, T. C.: Basic considerations pertaining to freezing-and-thawing tests. Proc. Amer. Soc. Test. Mat. 55 (1955) S. 1132/1155.
- [3] Powers, T. C.: Resistance of concrete to frost at early ages. Proc. RILEM Symposium on Winter Concreting Kopenhagen, Session C (1956), S. 1/47.
- [4] Lehmann, H., S. Traustel und W. Ohnemüller: Der Spannungszustand in einem gleichmäßig porösen, mit Wasser getränkten Körper beim fortschreitenden Gefrieren. Tonindustrie-Zeitung 84 (1960) H. 9, S. 219/222.
- [5] Kübler, H.: Theoretische Spannungen beim Gefrieren von Straßen, Baufundamenten und Seen. Der Bauingenieur 38 (1963) H. 9, S. 358/360.
- [6] Walz, K.: Die Einwirkungen von Streusalzen auf Beton. Straßenbau-Jahrbuch 1939/1940, S. 231/244.
- [7] Walz, K.: Über Feststellungen mit Auftausalzen und den Schutz der Betonfahrbahndecken. Zement-Kalk-Gips 6 (1953) H. 1, S. 8/14.
- [8] Flister, E.: Über Tausalze, ihre chemischen und physikalischen Einflüsse auf Beton. Zement-Kalk-Gips 6 (1953) H. 4, S. 105/112.
- [9] Walz, K.: Untersuchungen über die Einwirkung von Tausalzen auf Beton und den Schutz von Betonfahrbahndecken. Fortschritte im Betonstraßenbau. Schriftenreihe der Arbeitsgruppe Betonstraßen der Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Köln 1954, H. 5, S. 41/44.
- [10] Walz, K.: Der Einfluß luftporenbildender Zusatzmittel auf die Eigenschaften von Beton, insbesondere auf die Tausalzbeständigkeit von Straßenbeton. Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Neue Folge, H. 20, Bielefeld 1956.
- [11] Verbeck, G. J., und P. Klieger: Studies of salt scaling of concrete. Highway Research Board, Bulletin 150, Washington 1957, S. 1/13.
- [12] Hartmann, E.: Über die Wirkung von Frost und Tausalzen auf Beton ohne und mit luftporenbildenden Zusatzmitteln. Zement-Kalk-Gips 10 (1957) H. 7, S. 265/281, und H. 8, S. 314/323.

- [13] Walz, K., und R. Springenschmid: Betonstraßen und Tausalzeinwirkung. beton 12 (1962) H. 11, S. 507/512; ebenso Betontechnische Berichte 1962. Beton-Verlag, Düsseldorf 1963, S. 159/175.
- [14] Vorläufiges Merkblatt für Auftausalze gegen Winterglätte auf Straßen. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Köln 1963.
- [15] Schaible, L.: Erläuterungen zum Vorläufigen Merkblatt über Auftausalze gegen Winterglätte auf Straßen. Straßen- und Tiefbau 18 (1964) H. 10, S. 1106/1119.
- [16] Walz, K., und H. Helms-Derfert: Schutz von jungem Straßenbeton gegen Tausalzeinwirkung. beton 15 (1965) H. 4, S. 155/159, und H. 5, S. 201/205; ebenso Betontechnische Berichte 1965. Beton-Verlag, Düsseldorf 1966, S. 73/97.
- [17] Schimmlowitz, P., und B. Henk: Zur Frage des Einflusses von Luftporengehalt und Zementart auf die Beständigkeit von Straßenbeton. Dyckerhoff Zement, Technisch-Wissenschaftliche Mitteilungen (1964) Nr. 1.
- [18] Walz, K.: Schutz der Betonfahrbahndecken gegen Zerstörung durch Streusalze. Straßen und Autobahn 1 (1950) H. 9, S. 1/5.
- [19] Walz, K.: Feststellungen beim Einbau von Straßenbeton mit luftporenbildenden Zusatzstoffen. Straße und Autobahn 4 (1953) H. 6, S. 175/179, und H. 7, S. 233/237.
- [20] Keil, F.: Luftporenbeton. Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 11. Bauverlag, Wiesbaden 1953, und Zement-Kalk-Gips 6 (1953) H. 5. S. 137/151.
- [21] Walz, K., und G. Weil: Feststellungen über den Einfluß luftporenbildender Zusatzmittel auf die Festigkeit und die dynamische Elastizitätszahl von Beton bei Frostwechseln. Der Bauingenieur 30 (1955) H. 1, S. 15/20.
- [22] Walz, K.: Luftporenbildende Betonzusatzmittel. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 123, Berlin 1956.
- [23] Walz, K.: Witterungsbeständigkeit von Beton. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 127, Berlin 1957.
- [24] Vorläufiges Merkblatt für die Verwendung von luftporenbildenden Zusatzstoffen zu Straßenbeton. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Köln 1953.
- [25] Walz, K.: Prüfrichtlinien für die Zulassung von Betonzusatzmitteln. Bundesbaublatt 3 (1954) H. 9, S. 420/425.
- [26] Richtlinien für den Bau von Betonfahrbahnen. 4. Ausg., Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Köln 1963, und Hinweise für ihre Anwendung beim Bau der Bundesautobahnen und Bundesstraßen und Einföhrungserlaß, Ausgabe 1965.
- [27] Schäfer, A.: Frostwiderstand und Porengefüge des Betons. Beziehungen und Prüfverfahren. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 167, Berlin 1965, S. 3/57.
- [28] Walz, K.: Zusätze für Beton. beton 14 (1964) H. 5, S. 209/213, und H. 6, S. 250/255; ebenso Betontechnische Berichte 1964. Beton-Verlag, Düsseldorf 1965, S. 97/125.
- [29] Lerch, W.: Basic principles of air-entrained concrete. Portland Cement Association, Chicago 1960.
- [30] Specifications for concrete pavements and concrete bases (ACI-Standard 617-58). Proc. Amer. Concr. Inst. 55 (1958/59) S. 53/81.
- [31] Bergström, S. G.: Deterioration of concrete pavements due to salting in winter-time. Swedish Cement and Concrete Institute, Applied Studies No. 3, Stockholm 1959.

- [32] Benz, G. H.: Ober den Einfluß von Pigmenten und LP-Stoffen auf die Befüßung von Straßenbeton. *Straße und Autobahn* 12 (1961) H. 6, S. 202/205.
- [33] Walz, K.: Ober den Einfluß des Zements auf den Widerstand des Betons gegen häufiges Durchfrieren. *beton* 10 (1960) H. 4, S. 164/169; ebenso *Betontechnische Berichte* 1960. Beton-Verlag, Düsseldorf 1961, S. 9/22.
- [34] Vorläufige Richtlinien für die Prüfung von Betonzusatzmitteln zur Erteilung von Prüfzeichen und Erläuterungen von W. Albrecht. *Bauwirtschaft* 19 (1965) H. 6. S. 149/156; ebenso *Betonstein-Zeitung* 31 (1965) H. 2, S. 61/66.
- [35] Albrecht, W.: Einfluß von Luftporenbildnern und Farbstoffen auf die Formänderung, Härte und Festigkeit von Straßenbeton. *Straße und Autobahn* 10 (1959) H. 11, S. 429/434.
- [36] Albrecht, W., und U. Mannherz: Eigenschaften von Betonzusatzmitteln. *Betonstein-Zeitung* 29 (1963) H. 6, S. 281/296.
- [37] Hinweise für die Vorbereitung und Durchführung von Winterarbeiten im Hochbau. Fassung 1957, herausgegeben vom Bundesminister für Wohnungsbau.
- [38] RILEM-Richtlinien für das Betonieren im Winter. Mit einem Vorwort von R. K. Metzner und A. Meyer. *beton* 14 (1964) H. 10, S. 411/427.
- [39] Albrecht, W.: Neuere Erkenntnisse über die Eigenschaften der Zemente. *Zement-Kalk-Gips* 18 (1965) H. 1, S. 1/12, H. 2, S. 67/77, und H. 3, S. 145/148.
- [40] Czernin, W.: Zur Frage der Frostbeständigkeit der Zemente. *Zeitschrift des Österr. Ing.- und Archit.-Vereins* 101 (1956) H. 13/14, S. 141/145.
- [41] Verbeck, G., und R. Landgreen: *Influence of physical characteristics of aggregates on frost resistance of concrete*. *Proc. Amer. Soc. Test. Mat.* 60 (1960) S. 1063/1079 (Referat in *Zement-Kalk-Gips* 17 (1964) H. 1, S. 28/32).
- [42] Walz, K.: *Die Prüfung von Kies und Splitt für Straßenbeton*. *Die Betonstraße* 14 (1939) H. 11, S. 215/221, und H. 12, S. 229/234.
- [43] Walz, K.: Ober die Beständigkeit des Betons. *Wasser- und Wegebau-Zeitschrift* 38 (1940) H. 17/18, S. 99/102, und H. 19, S. 107/110.
- [44] Wischers, G.: Physikalische Eigenschaften des Zementsteins. *beton* 11 (1961) H. 7, S. 481/486; ebenso *Betontechnische Berichte* 1961. Beton-Verlag, Düsseldorf 1962, S. 199/213.
- [45] Anleitung für die Zusammensetzung und Herstellung von Beton mit bestimmten Eigenschaften mit Erläuterungen von K. Walz. *Beton- und Stahlbetonbau* 53 (1959) H. 6, S. 163/169. (Sonderdruck 2. Aufl., Verlag von Wilh. Ernst & Sohn, Berlin 1963.)
- [46] Schulze, W.: Der Einfluß des Feinstkorns auf die Eigenschaften des Betons. *beton* 10 (1960) H. 2, S. 45/52.
- [47] Bonzel, J.: Zur Frage eines Traßzusatzes bei Beton. *beton* 10 (1960) H. 9, S. 435/436; ebenso *Betontechnische Berichte* 1960. Beton-Verlag, Düsseldorf 1961, S. 101/105.
- [48] Walz, K.: Der Einfluß von Zusatzstoffen auf Straßenbeton. *Die Betonstraße* 16 (1941) H. 11, S. 161/169, und H. 12, S. 186/198.
- [49] Vorläufiges Merkblatt für die Prüfung und Beurteilung von flüssigen Nachbehandlungsmitteln für Straßenbeton. *Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen*, Köln 1963.

- [50] Grieb, W. E.: Resistance of concrete surface to scaling by de-icing agents. *Public Roads* 31 (1962) H. 8, S. 64/73.
- [51] Bloem, L. D.: Factors affecting freezing and thawing resistance of chert gravel concrete. *Highway Research Record* Nr. 18, Washington 1963, S. 48/60.
- [52] Keil, F.: Einfluß von Chlorcalcium als Tausalz auf Beton mit Anstrichen und Zusätzen. *Fortschritte im Betonstraßenbau*. Schriftenreihe der Arbeitsgruppe Betonstraßen der Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Köln 1954, H. 5, S. 45/47.
- [53] ACI-Committee 201: Durability of concrete in service. *Proc. Amer. Concr. Inst.* 59 (1962) H. 12, S. 1771/1820. Deutsche Bearbeitung; Walz, K.: Die Beständigkeit von Beton unter Gebrauchsbeanspruchung. *beton* 13 (1963) H. 6, S. 279/286, und H. 7, S. 331/338; ebenso *Betontechnische Berichte* 1963. Beton-Verlag, Düsseldorf 1964, S. 85/125.
- [54] Timms, A. G.: Resistance of concrete surfaces to scaling action of ice removal agents. *Highway Research Board, Bull.* 128, Washington 1956, S. 20/50.
- [55] Cahn, H. L., and R. V. Mackey jr.: Extending concrete highway durability and light reflectance with silicones. *Amer. Soc. Test. Mat., Bull.* 235, Philadelphia 1959, S. 37/42. Deutsche Bearbeitung: Erhöhung der Beständigkeit und des Lichtreflexionsvermögens von Betonstraßen. Straßen- und Tiefbau, Beilage Licht und Farbe im Bauwesen, 3 (1960) H. 4, S. 28.
- [56] Mardulier, F. J.: Scaling resistance of concrete improved through silicones. *Highway Research Board, Bull.* 197, Washington 1958, S. 1/12.
- [57] Britton, H. R.: New York state's experience in use of silicones. *Highway Research Board, Bull.* 197, Washington 1958, S. 13/23.
- [58] Hüssel, D. J. T.: Freeze-thaw and scaling tests on silicone-treated concrete. *Highway Research Record* Nr. 18, Washington 1963, S. 13/32.
- [59] Klieger, P., und W. Perenchio: Silicone influence on concrete resistance to freeze-thaw and de-icer damage. *Highway Research Record* Nr. 18, Washington 1963, S. 33/47.
- [60] Grieb, W. E.: Silicones as admixtures for concrete. *Highway Research Record* Nr. 18, Washington 1963, S. 1/11.
- [61] Grieb, W. E., und R. Appleton: Effect of linseed oil coatings on resistance of concrete to scaling. *Public Roads* 33 (1964) H. 1, S. 1/5.
- [62] Smith, P.: Observations on protective surface coatings for exposed or asphalt-surfaced concrete. *Highway Research Board, Bull.* 323, Washington 1962, S. 72/96.
- [63] Walz, K., und A. Schäfer: Untersuchungen über den Frost-Tausalz-Widerstand von Gehwegplatten aus Beton. *beton* 15 (1965) H. 10, S. 429/437; ebenso *Betontechnische Berichte*, Beton-Verlag, Düsseldorf 1966, S. 161/184.
- [64] Hartmann, E.: Frostprüfverfahren von Beton. *beton* 14 (1964) H. 12, S. 543/549.
- [65] Walz, K.: Prüfung des Widerstands von Beton gegen mechanische Abnutzung, gegen Witterungseinflüsse und gegen angreifende Flüssigkeiten. *Handbuch der Werkstoffprüfung*, 3. Bd., Nichtmetallische Baustoffe. 2. Aufl., Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1957, S. 460/465.
- [66] Hummel, A., und K. Charisius: *Baustoffprüfungen*. 3. Aufl., Werner-Verlag, Düsseldorf 1957, S. 188/190 und S. 304/307.

- [67] Schäfer, A.: Vergleichende amerikanische Untersuchungen über 4 Verfahren der Frost-Tau-Wechsel-Prüfung an Beton. beton 12 (1962) H. 7, S. 314/318; ebenso Betontechnische Berichte 1962. Beton-Verlag, Düsseldorf 1963, S. 93/104.
- [68] Vorläufige Richtlinien für das Einpressen von Zementmörtel in Spannkahäle, Fassung Juli 1957. Bestimmungen des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton. 7. Aufl., Verlag von Wilh. Ernst & Sohn, Berlin 1960, S. 262/267.
- [69] Hummel, A.: Das Beton-ABC. 12. Aufl., Verlag von Wilh. Ernst & Sohn, Berlin 1959, S. 142.
- [70] Schäfer, A.: Die Bestimmung des Luftporengehalts im Beton. beton 13 (1963) H. 8, S. 383/386; ebenso Betontechnische Berichte 1963. Beton-Verlag, Düsseldorf 1964, S. 127/136.
- [71] Grieb, W. E.: The AE 55 indicator used for determining air content of concrete. Public Roads 29 (1957) Nr. 9, S. 206/207 und S. 220.