

Neuere Untersuchungen über den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton

Von Justus Bonzel und Eberhard Siebel, Düsseldorf

Übersicht

Von Bauteilen, die im durchfeuchteten Zustand bei gleichzeitiger Einwirkung von Auftaumitteln häufig Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt werden wie z. B. Bauteile des Verkehrsbaues, wird hoher Frost-Tausalz-Widerstand gefordert. Anstelle von direkten Nachweisprüfungen enthalten die einschlägigen Betonbestimmungen, wie z. B. die DIN 1045 und die TV Beton 72, zur Sicherung des Frost-Tausalz-Widerstandes Anforderungen an Zusammensetzung, Herstellung und Einbau solchen Betons. Diese Festlegungen basieren auf umfangreichen und langjährigen Versuchs- und praktischen Erfahrungen des In- und des Auslandes. Abgesehen von Betonwaren aus erdfeuchtem Beton ist für hohen Frost-Tausalz-Widerstand von Betonbauteilen stets ein sachgerechter Luftporenbeton vorgeschrieben.

Zur Klärung weiterer Fragen, die teilweise im Zusammenhang mit den Ende der 60er Jahre vermehrt festgestellten Frost-Tausalz-Schäden an Brückenkappen stehen, führt das Forschungsinstitut der Zementindustrie seit 1972 umfangreiche Untersuchungen durch. Damit sollten insbesondere die Verfahren für die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes und ihre Aussagekraft verbessert und der Einfluß anderer Betonzusätze als Luftporenbildner auf den Frost-Tausalz-Widerstand sowie die Luftporenkennwerte von LP-Beton weiter untersucht werden.

Nach diesen Untersuchungen sind sowohl das Eintauchverfahren in 3%ige NaCl-Lösung als auch das Salzaufstreuverfahren und die dazugehörigen Verfahren zur quantitativen Beschreibung des Frost-Tausalz-Widerstandes geeignet. Zur Zeit kann mit ihnen jedoch nur die Größenordnung des Betonverhaltens beurteilt werden. Beton mit Dichtungsmitteln wies dabei keinen hohen Frost-Tausalz-Widerstand auf. Über die Bedeutung und für die Bestimmung der Luftporenkennwerte ergaben sich zusätzliche Erkenntnisse.

1. Einleitung

Beton, der im Freien eingebaut und Witterungseinflüssen ausgesetzt wird, muß im erhärteten Zustand neben den eigentlichen Gebrauchseigenschaften, wie z. B. eine bestimmte Festigkeit, auch einen ausreichenden Widerstand gegen Witterungseinflüsse auf-

weisen. Der im Einzelfall erforderliche Grad der Widerstandsfähigkeit hängt von dem während der Nutzung sich einstellenden Feuchtigkeitszustand des Betons, von den klimatischen Bedingungen der Bauteilumgebung und davon ab, ob Auftaumittel, wie z. B. Tausalze, mit dem Beton in Berührung kommen werden. In unserem Klima müssen daher Betonbauteile des Wasserbaues in der Regel einen hohen Frostwiderstand und Betonbauteile des Straßenbaues, die mit einem Auftaumittel beaufschlagt werden, einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand aufweisen.

2. Stand der Erkenntnisse

2.1 Frost- und Tausalzeinwirkungen

Frosteinwirkungen auf Beton können auftreten, wenn durchfeuchteter Beton Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes von Wasser ausgesetzt wird. Sie werden vorwiegend dadurch verursacht, daß sich Wasser beim Gefrieren um $\frac{1}{11}$ seines Volumens ausdehnt. Dabei kann im Beton ein hydraulischer Druck bzw. ein Kristallisationsdruck des Eises entstehen. Dazu kommen Temperaturspannungen. Die Frosteinwirkung führt zu starker Beanspruchung des Betons, wenn der Beton stark durchfeuchtet ist und im Beton häufig große und schroffe Temperaturwechsel auftreten.

Bei der Frost-Tausalzeinwirkung kommt zur vorher geschilderten Frosteinwirkung die gleichzeitige Einwirkung von Tausalzen oder anderen Auftaumitteln hinzu, die Art und Größe der Beanspruchung im Beton wesentlich verändern. Der genaue Vorgang bei der Entstehung von Frost-Tausalz-Schäden ist noch nicht vollständig geklärt; bekannt ist jedoch, daß Frost-Tausalzeinwirkungen üblichen Beton in der Regel sehr viel stärker beanspruchen als Frosteinwirkungen in unserem Klima. Diese besonders starke Beanspruchung kann durch den Temperaturschock bedingt sein, der bei Anwendung von Auftaumitteln durch das rasche Tauen und den dadurch verursachten plötzlichen Wärmeentzug in den oberen Zonen entsteht und der größere Druckdifferenzen in verschiedenen großen Poren zur Folge haben soll, siehe u. a. [1]. Weiter können, wegen der im Beton mit zunehmendem Abstand von der Betonoberfläche abnehmenden Salzkonzentration, osmotische Vorgänge und ein voraussetzendes Einfrieren von tieferen Schichten beteiligt sein. Eine chemische Schädigung des Betons durch Tausalze ist nicht anzunehmen, wenn das Tausalz die Anforderungen des entsprechenden Merkblattes [2] erfüllt.

2.2 Beton mit hohem Frostwiderstand

Die Erkenntnisse und Erfahrungen aus Untersuchungen und Praxis über Beton mit hohem Frostwiderstand liegen der DIN 1045 „Beton- und Stahlbetonbau; Bemessung und Ausführung“ (Ausgabe Januar 1972) zugrunde. Erforderlich ist ein wasserundurchlässiger Beton nach DIN 1045, Abschnitt 6.5.7, mit frostbeständigem Zuschlag, einem W/Z-Wert von höchstens 0,60 und einem nicht zu hohen Mehlkorngesamt. Die größte Wassereindringtiefe nach DIN 1048 Blatt 1 „Prüfverfahren für Beton; Frischbeton, Festbeton gesondert hergestellter Probekörper“ (Ausgabe Januar 1972) darf 5 cm nicht

überschreiten. Der Beton muß praktisch vollständig verdichtet und zur Erlangung eines möglichst hohen Hydratationsgrades ausreichend lange feuchtgehalten werden, wie z. B. mit einem Nachbehandlungsfilm oder mit einer Feucht-Nachbehandlung.

Beton mit hohem Frostwiderstand darf auch mit einem W/Z-Wert bis zu höchstens 0,70 hergestellt werden, wenn er einen durch luftporenbildende Zusatzmittel erzeugten und auf die Feinmörtelmenge abgestimmten ausreichenden Gehalt an Mikroluftporen aufweist (siehe auch Abschnitt 2.4).

2.3 Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand

Über Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand liegen umfangreiche und langjährige Versuchs- und praktische Erfahrungen des In- und des Auslandes vor, siehe u. a. [3 bis 9], die ihren Niederschlag in DIN 1045 und in den TV Beton [10] gefunden haben. Der Beton muß die Anforderungen für Beton mit hohem Frostwiderstand ($W/Z\text{-Wert} \leq 0,60$) erfüllen (siehe Abschnitt 2.2) und einen ausreichenden, auf die Feinmörtelmenge abgestimmten Gehalt an Mikroporen aufweisen (siehe Abschnitt 2.4). Die Mikroluftporen, die durch Zugabe eines luftporenbildenden Betonzusatzmittels erzeugt werden, dienen als Ausweichraum zum Abbau des beim Gefrieren des Wassers entstehenden hydraulischen Druckes. Für den Beton dürfen nur Betonzusatzmittel verwendet werden, die die Anforderungen der „Prüfzeichen-Richtlinien“ [11] erfüllen, überwacht werden und ein Prüfzeichen des Instituts für Bautechnik besitzen und deren Wirksamkeit geprüft wird. Nach [10] dürfen der Mehlkorngehalt des Betons 400 kg/m^3 und der Zuschlaganteil bis 1 mm bei Zuschlaggemischen 0/32 mm 18 Gew.-% und bei Zuschlaggemischen 0/16 mm 22 Gew.-% nicht überschreiten. Da diese Begrenzung des Mehlkorngehaltes und des Zuschlaganteils bis 1 mm mit vielen Zuschlagvorkommen ohne aufwendige Maßnahmen nicht einhaltbar und andererseits in dieser Form technisch nicht erforderlich ist, wird diese Festlegung geändert werden. Voraussichtlich werden daher in der Neufassung der TV Beton für Beton mit 16 und mit 32 mm Größtkorn der Mehlkorngehalt auf höchstens 450 kg/m^3 Beton, der Zuschlaganteil bis 1 mm auf höchstens 27 Gew.-% und der Zuschlaganteil bis 2 mm auf höchstens 30 Gew.-% begrenzt werden. Diese Änderungen sollten auch schon vor Einführung der neuen TV Beton zugrunde gelegt werden.

Muß mit häufigen und schroffen Frost-Tau-Wechseln gerechnet werden, was bei Bauteilen, auf die außer Frost auch Tausalze oder andere Auftaumittel einwirken, in der Regel der Fall ist, so sollte über die Festlegungen von DIN 1045 hinaus ein W/Z-Wert von 0,50 nicht überschritten werden.

Für Fließbeton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand gelten diese Ausführungen sinngemäß, siehe u. a. [12]; hierfür wurde der W/Z-Wert allgemein auf höchstens 0,50 begrenzt [13]. Diesem Fließbeton müssen ein Fließmittel und ein luftporenbildendes Betonzusatzmittel zugegeben werden. Beide Betonzusatzmittel müssen miteinander verträglich und wirksam sein, die Wirksamkeit dieser Zusatzmittel-Kombination muß vor Beginn der Bauausführung nachgewiesen worden sein.

Auf erdfeucht hergestellten Beton können die Anforderungen an den Luftgehalt von Luftporenbeton (siehe Abschnitt 2.4) nicht übertragen werden, da ein angemessen hoher Luftgehalt bei diesem Beton mit luftporenbildenden Betonzusatzmitteln in der Regel nicht erreichbar oder, wenn er vorhanden ist, nicht mehr ein Kennwert für einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand ist, weil dieser Beton dann meist einen höheren Gehalt an Verdichtungs-poren aufweist. In erdfeuchtem Beton können Mikroporen mit Hilfe von luftporenbildenden Betonzusatzmitteln nur mit großem Aufwand und nur in geringer Menge erzeugt werden. Sie beeinflussen zwar auch dann den Frost-Tausalz-Widerstand günstig, können aber am Frischbeton praktisch nicht nachgeprüft werden. Aus Untersuchungen und praktischen Erfahrungen ist jedoch bekannt, daß Betonwaren aus erdfeuchtem Beton bei richtiger Zusammensetzung und Herstellung auch ohne Zugabe eines luftporenbildenden Betonzusatzmittels und den sonst geforderten Luftgehalt mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand hergestellt werden können. Bei solchem Beton müssen eine möglichst hohe Festigkeit, ein möglichst niedriger W/Z-Wert (kleiner als 0,40), ein etwas erhöhter Zementgehalt bei nicht zu hohem Mehlkorngesamtgehalt, eine Zuschlagkorngesamtzusammensetzung im günstigen Sieblinienbereich, praktisch vollständige Verdichtung und ein mehrtägiger Schutz gegen Austrocknen angestrebt werden. Siehe u. a. [14, 15].

2.4 Luftporenkennwerte

Luftporen sind als Ausweichraum für den Abbau des beim Gefrieren des Wassers entstehenden hydraulischen Druckes, d. h. zur Erzielung eines hohen Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton, nur wirksam, wenn sie an allen Stellen des Zementsteins bzw. des Feinmörtels vorhanden sind und auch bei durchfeuchtetem Beton normalerweise nicht mit Wasser gefüllt sind. Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand muß daher ein luftporenbildendes Betonzusatzmittel zugegeben werden, das in den Beton Mikroporen in ausreichender Menge, im Zementstein bzw. im Feinmörtel gleichmäßig verteilt, einführt.

Unter dieser Voraussetzung kann bei sachgerechtem Herstellen üblichen Luftporenbetons der Luftgehalt des Frischbetons als Kennwert für das Vorhandensein eines ausreichenden Gehalts an Mikroporen angesehen werden. Daher enthalten die entsprechenden Bestimmungen zahlreicher Länder anstelle von Anforderungen für den Gehalt an Mikroporen nur Anforderungen für den Luftgehalt, der unmittelbar am Frischbeton z. B. mit dem Druckausgleichsverfahren (siehe DIN 1048 Blatt 1) nachgeprüft werden kann. Für Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand dürfen in der Bundesrepublik Deutschland bei der Prüfung am Frischbeton die Luftgehalte der Tafel 1 nicht unterschritten werden, siehe u. a. DIN 1045 und [10]. Die Anforderungen an den Luftgehalt sind in den entsprechenden Bestimmungen wegen der einfacheren Handhabung in Abhängigkeit vom Zuschlaggrößtkorn angegeben. Da diese Zuordnung auf einem Zusammenhang zwischen Feinmörtelmenge und Zuschlaggrößtkorn beruht, der oft gegeben ist, aber nicht immer vorausgesetzt werden kann (siehe z. B. Abschnitt 2.3 mit der voraussichtlichen Änderung der TV Beton), werden die Anforder-

rungen an den Luftgehalt von Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand in Zukunft voraussichtlich in Abhängigkeit vom Mehlkorngelalt des Betons angegeben werden, siehe u. a. Tafel 2 und [16]. – Die erforderliche Zugabemenge von Betonzusatzmitteln muß im Rahmen der Eignungsprüfung bestimmt werden, der Luftgehalt des Frischbetons muß während der Bauausführung laufend geprüft werden.

Tafel 1 Frischbeton-Luftgehalt von LP-Beton in Abhängigkeit vom ZuschlaggröÙtkorn

ZuschlaggröÙtkorn mm	Mindest-Luftgehalt Vol.-%	
	Einzelwert	Mittelwert
63	2,5	3,0
32	3,0	3,5
16	3,5	4,0
8	4,5	5,0
4	5,5	6,0
2	6,5	7,5
1	8,0	9,0

Tafel 2 Frischbeton-Luftgehalt von LP-Beton in Abhängigkeit vom Mehlkorngelalt

Mehlkorngelalt bei der Eignungsprüfung kg/m ³	Mindest-Luftgehalt Vol.-%	
	Einzelwert	Mittelwert
350 bis 400	3,0	3,5
401 bis 450	3,5	4,0
451 bis 500	4,0	4,5
501 bis 550	4,5	5,0
551 bis 600	5,0	5,5
601 bis 650	5,5	6,0
651 bis 700	5,5	6,5
701 bis 750	6,0	7,0
751 bis 800	6,5	7,5
801 bis 850	7,0	8,0
851 bis 900	7,5	8,5
901 bis 950	8,0	9,0

Bei üblichem Luftporenbeton reicht die Feststellung des Luftgehaltes des Frischbetons im allgemeinen für die Beurteilung aus, ob ein für hohen Frost-Tausalz-Widerstand ausreichender Gehalt an Mikroporen vorhanden ist. Noch zuverlässiger ist eine Beurteilung jedoch mit Luftporenkennwerten, wie z. B. dem Abstandsfaktor oder dem Mikroluftporengehalt (Teilluftporengehalt), die allerdings nur am erhärteten Beton bestimmt werden können. Der Abstandsfaktor ist ein aus einem idealisierten Porensystem abgeleiteter Kennwert für den Abstand eines Punktes des Zementsteins von der nächsten Luftpore, siehe u. a. [6, 17]. Als Mikroluftporengehalt wird in der Regel der Gehalt an Mikroporen bis zu 0,3 mm Durchmesser zur Beurteilung herangezogen, der als L 300 bezeich-

net wird. In der Bundesrepublik Deutschland darf für Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand der Abstandsfaktor 0,20 mm nicht überschreiten und der Mikroluftporengehalt L 300 bei Beton mit 32 mm Zuschlaggrößtkorn 1,5 Vol.-% nicht unterschreiten.

Die Luftporenkennwerte werden in der Bundesrepublik Deutschland mit dem Meßlinienverfahren nach Rosival in Anlehnung an ASTM C 457-71 T bestimmt, siehe [6, 7, 18, 19]. Für diese Bestimmung wurde im Forschungsinstitut der Zementindustrie ein neues Meßgerät entwickelt, siehe Bild 1 und [19]. Da die Bestimmung der Luftporenkennwerte nur am erhärteten Beton möglich und sehr aufwendig ist, sollte ihre Anwendung auf die Wirksamkeitsprüfung [18] und auf Zweifelsfälle beschränkt bleiben.

2.5 Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton

Für die Beurteilung von Stoffeigenschaften wird in der Regel angestrebt, die jeweilige Stoffeigenschaft mit einem geeigneten Prüfverfahren und darauf bezogenen Anforderungen zu kennzeichnen und nachprüfbar zu machen wie z. B. für die Druckfestigkeit. Ein solches Prüfverfahren muß reproduzierbare Ergebnisse liefern und eine Beurteilung des Stoffverhaltens unter den jeweiligen Bedingungen der Praxis ermöglichen. Für einen Vergleich mit Anforderungen sind dabei in der Regel quantitative Ergebnisse notwendig. Da es auch für die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton wünschenswert ist, ein entsprechendes Prüfverfahren zu haben, wurde dafür in der Vergangenheit eine Vielzahl von Prüfverfahren untersucht, die hier nicht alle erörtert werden können, siehe u. a. [5, 7, 20 bis 27]. Bei den Verfahren mit Frost-Tausalz-Einwirkungen wurden als Auftaumittel vorwiegend verwendet:

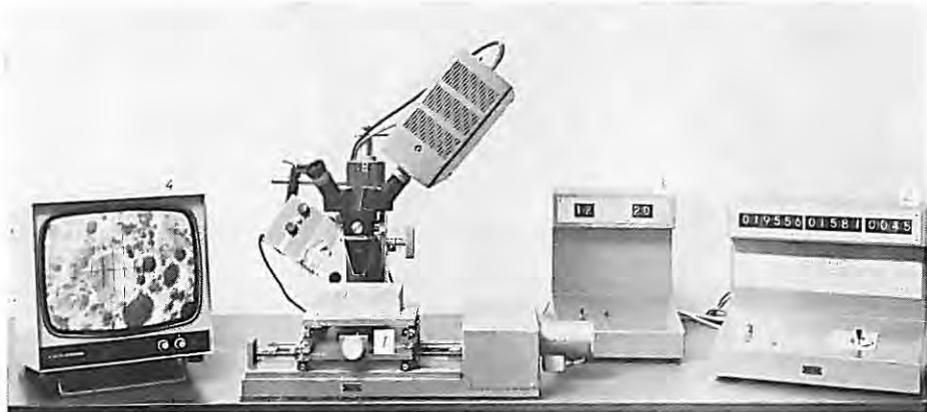


Bild 1 Gerät zur Bestimmung der Luftporenkennwerte

- (1) Meßtisch mit Mikroskop, Fernsehkamera und Beleuchtungseinrichtung
- (2) Steuer- und Anzeigerät
- (3) Klassiergerät
- (4) Fernsehgerät

- 1) gesättigte Tausalzlösungen,
- 2) nichtgesättigte Tausalzlösungen und
- 3) Aufstreuen von Tausalz, so daß mit dem aufgetauten Wasser nichtgesättigte Tausalzlösungen entstanden.

Nach bisherigen Untersuchungen, siehe u. a. [20], ergeben 3- bis etwa 5%ige Tausalzlösungen sowie das Aufstreuen entsprechender Tausalzmengen auf eine Eisschicht bei Beton ohne hohen Frost-Tausalz-Widerstand ein kontinuierliches Abwittern und ein Maximum an Frost-Tausalz-Schäden. Gesättigte Tausalzlösungen können beim gleichen Prüfobjekt sowohl sehr geringes Abwittern als auch sich vorher nicht abzeichnende und plötzlich auftretende große Sprengschäden zur Folge haben. Wegen dieses diskontinuierlichen und im allgemeinen mit der Praxis nicht übereinstimmenden Verhaltens werden Verfahren mit gesättigten Tausalzlösungen als nicht geeignet zur Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton angesehen.

Bei den Frostprüfverfahren mit nichtgesättigter Tausalzlösung werden die Probekörper meist wie folgt behandelt:

- a) Einfrieren würfelförmiger Prüfkörper in 3- bis etwa 5%iger Tausalzlösung, Auftauen bei 20 °C und oftmalige Wiederholung des Frost-Tau-Wechsels.
- b) Aufbringen einer etwa 5 mm dicken Schicht 3- bis etwa 5%iger Tausalzlösung auf die Prüffläche plattenförmiger Prüfkörper, Einfrieren der Prüfkörper, Auftauen bei 20 °C und oftmalige Wiederholung des Frost-Tau-Wechsels.
- c) Aufbringen einer etwa 5 mm dicken Wasserschicht auf die Prüffläche plattenförmiger Prüfkörper, Einfrieren der Prüfkörper, Aufstreuen von Tausalz auf die Prüffläche, Auftauen bei 20 °C und oftmalige Wiederholung.

Nach bisherigen Feststellungen ist die Beanspruchung beim Prüfverfahren a) stärker als bei den Verfahren b) und c). Während das Verfahren b) zunächst vorwiegend tiefere Abwitterungen an einzelnen Stellen zur Folge hat, führt das Verfahren c) in der Regel von Anfang an zu einer gleichmäßigen, fortschreitenden Abwitterung auf der gesamten Prüffläche, siehe u. a. [7].

Alle diese Frost-Tausalz-Prüfungen wiesen wegen des noch nicht genügend festgelegten Prüfvorganges, insbesondere der Prüfeinrichtung, noch nennenswerte Prüfstreuungen auf. Die Abwitterung des Betons wird vorwiegend nur qualitativ durch augenscheinlichen Vergleich mit einer Abwitterungsskala beurteilt. Aus diesen Gründen können für solche Verfahren zur Zeit quantitative Beurteilungskriterien noch nicht festgelegt werden und kann man mit ihren Ergebnissen bisher nur eine Aussage über die Größenordnung des Betonverhaltens machen.

3. Untersuchungen

3.1 Art und Zweck

Vorwiegend ausgelöst durch die Fragen aus der Praxis geht das Forschungsinstitut der Zementindustrie in Ergänzung zu den frü-

heren Untersuchungen und zum bisherigen Stand der Erkenntnisse seit 1972 folgenden Fragen durch Versuche weiter nach:

3.1.1 Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes

Die Prüfverfahren sollten weiter verbessert werden. Insbesondere sollte versucht werden, Verfahren für eine quantitative Beurteilung der Prüfergebnisse zu entwickeln und zu erproben.

3.1.2 Einfluß der Betonzusammensetzung auf den Frost-Tausalz-Widerstand

Ende der 60er und Anfang der 70er Jahre traten häufiger Frost-Tausalz-Schäden an Brückenkappen und an ähnlichen Betonbauteilen auf. Als Schadensursachen waren meist nicht sachgerechte Ausführung und nicht genügende Berücksichtigung der im Betonstraßenbau für hohen Frost-Tausalz-Widerstand vorliegenden Erfahrungen festzustellen. Da aber für die Herstellung solcher Bauteile meist andere Betone und andere Einbauverfahren als im Betonstraßenbau angewendet werden, wurde untersucht, ob auch Beton mit W/Z-Werten bis zu 0,60 und mit weicherer Konsistenz als im Betonstraßenbau üblich bei sachgerechter Herstellung einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand aufweist und ob auch dafür die für Luftporenbeton in den Bestimmungen geforderten Luftgehalte ausreichend sind. Aus gegebenem Anlaß, siehe u. a. [28, 29], wurde bei diesen Versuchen auch der Frage nachgegangen, ob bei Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand die in den Bestimmungen dafür geforderte Zugabe von luftporenbildenden Betonzusatzmitteln ohne Nachteil für den Beton durch die Zugabe von Dichtungsmitteln oder anderen Zusätzen ersetzt werden kann.

3.1.3 Bestimmung und Bedeutung der Luftporenkennwerte

Da für luftporenbildende Betonzusatzmittel die Bestimmung von Luftporenkennwerten am erhärteten Beton im Rahmen der Wirksamkeitsprüfung vorgeschrieben ist [11, 18], wird diese Prüfung in der Bundesrepublik Deutschland seit einiger Zeit von mehreren Prüfstellen durchgeführt. Aus diesem Grunde erwies es sich als notwendig, das Bestimmungsverfahren zur Herabsetzung von Streuungen genauer festzulegen und damit seine Anwendung mehr zu vereinheitlichen. Gleichzeitig sollte versucht werden, das Bestimmungsverfahren zu vereinfachen und weniger aufwendig zu machen. Darüber hinaus wurden Vergleichsbetrachtungen zwischen verschiedenen Luftporenkennwerten angestellt, um mehr über Bedeutung und Zusammenhang dieser Kennwerte zu erfahren und möglichst die Anzahl der zu bestimmenden Kennwerte verringern zu können.

3.2 Umfang und Durchführung

3.2.1 Betonausgangsstoffe

Die meisten Versuche wurden mit einem Portlandzement Z 350 F mittlerer Beschaffenheit (Zement B) durchgeführt. Insgesamt wurden in die Versuche jedoch 11 Zemente verschiedener Art, Festig-

Tafel 3 Eigenschaften der Zemente

Bez.	Art und Festigkeitsklasse	Mahlfeinheit (Blaine) cm ² /g	Erstarrungsbeginn ende		Wasseranspruch Gew.-%	2 Tage- Druckfestigkeit ^{*)}	7 Tage-	28 Tage-	Klinkerphasen nach Bogue Gew.-%				Hütten-sand-gehalt Gew.-%
			Stunden						C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
G ^{**)}	PZ 350 F	2970	2,5	5,0	28,0	25		49	55	15	12	8	
B	PZ 350 F	2830	4,1	5,6	26,0	21		48	57	15	9	9	
b	PZ 450 F	3240	2,8	4,8	27,5	27		55	63	12	9	10	
O	HOZ 350 L	4260	3,8	5,8	28,0		29	48					71
M	HOZ 350 L	4110	4,3	6,4	30,0		33	47					66
R	HOZ 350 L	4050	3,8	5,8	30,5		29	48					64
N	HOZ 350 L	3370	3,7	5,2	26,5		31	50					60
m	HOZ 450 L	3500	3,2	4,7	29,0	18		60					41
r	HOZ 450 L	4020	2,5	4,3	29,0	21		56					36
P	PZ 350 F hydrophob.	3860	2,7	4,3	30,0	26		46	61	11	13	6	
A	PZ 350 F hydrophob.	3320	2,8	4,7	27,0	22		54	56	17	10	9	

*) Aus kp/cm² im Verhältnis 10:1 umgerechnet und auf ganze Zahlen gerundet

**) Gemisch aus 3 Straßenbauzementen PZ 350 F

keitsklasse, Zusammensetzung und Eigenschaften einbezogen. Ihre wichtigsten Kenndaten sind in Tafel 3 zusammengestellt.

Als Zuschlag wurde Rheinkiessand der Korngruppen 0/2 mm, 2/8 mm, 8/16 mm und 16/32 mm aus dem Raum Düsseldorf, Quarzmehl 0/0,25 und Quarzsand 1/2 mm aus dem Raum Köln und Basaltspiltt der Korngruppen 8/12 mm, 12/18 mm und 18/25 mm verwendet. Für einige Mörtelversuche wurde die Korngruppe 2/4 mm aus der Korngruppe 2/8 mm abgeseibt. Der Zuschlag entsprach nach Angaben des Herstellers und nach augenscheinlicher Beurteilung DIN 4226 Blatt 1. Der Rheinkiessand der Korngruppen oberhalb von 4 mm wurde im Rahmen anderer Untersuchungen [30] nach DIN 4226 Blatt 3, Abschnitt 3.5.1, auf Frostwiderstand gegen starke Frosteinwirkungen (Einfrieren unter Wasser) geprüft. Dabei lag der Durchgang durch das nächstkleinere Prüfsieb zwischen 0,1 und 1,0 Gew.-%. Der Betonzuschlag wies damit einen hohen Widerstand gegen starke Frosteinwirkungen auf.

Als Betonzusätze wurden Betonzusatzmittel verschiedener Art und stofflicher Basis verwendet, und zwar 5 Luftporenbildner, 5 Dich-

Tafel 4 Angaben über die Betonzusatzmittel

Art	Bezeichnung	Lieferzustand	Vom Hersteller	
			angegebene Basis	empfohlene Zusatzmenge cm ³ /kg Zement bzw. g/kg Zement
Luftporenbildner	LM	flüssig	Vinsol-Resin	0,5 bis 1,0
	LMS	flüssig	Vinsol-Resin	0,3 bis 0,8
	LH	flüssig	Arylalkylsulfonate und Polyglykoläther	0,3 bis 0,8
	LT	flüssig	Vinsol-Resin	0,3 bis 0,5
	LC	flüssig	Vinsol-Resin	0,3 bis 0,8
Dichtungsmittel	DA	pulverförmig	Metallstearat (hydrophob.)	20
	DS	pulverförmig	Metallstearat (hydrophob.)	10
	DC	pulverförmig	Fettsäureester (hydrophob.)	20
	DW	flüssig	Ligninsulfonat	10
	DT	flüssig	Ligninsulfonat	5 bis 7
Fließmittel	SH	flüssig	Sulfonierte Melamin-Formaldehyd-kondensationsprodukte	15
	SL	flüssig	Kohlhydrate und organische Säuren	10 bis 12
Sonderzusatzmittel	LJ	pulverförmig	imprägniertes Perlit	
	LK	pulverförmig	Kunststoff-Hohlkugeln	

tungsmittel und 2 Fließmittel. Einige orientierende Versuche wurden auch mit 2 Sonderzusatzmitteln durchgeführt, mit denen im Beton ebenfalls ein Ausweichraum für den Abbau des beim Gefrieren des Wassers entstehenden hydraulischen Druckes erzeugt werden soll. Weitere Angaben über die Betonzusatzmittel enthält Tafel 4.

3.2.2 *Betonzusammensetzung*

Mit den Ausgangsstoffen nach Abschnitt 3.2.1 wurden die Betone der Serie 1 (Tafel 5a), die Betone der Serie 2 (Tafel 5b) und die Mörtel der Serie 3 (Tafel 5c) hergestellt. Einbezogen wurden Betone ohne Zusatzmittel sowie Betone mit luftporenbildenden Zusatzmitteln (Luftporenbeton), mit Dichtungsmitteln, mit Fließmitteln, mit Fließmitteln und Luftporenbildnern und mit Sonderzusatzmitteln.

Serie 1 (Tafel 5a):

Die Betone der Serie 1 wurden auf Straßenbeton ausgerichtet. Sie wiesen mit Ausnahme der Fließbetone eine Frischbetonkonsistenz im Bereich K 1/Anfang K 2 (Verdichtungsmaß nach DIN 1048 Blatt 1 mindestens 1,20) auf und enthielten als Zuschlag ein Gemisch aus Rheinkiessand 0/8 mm und Basaltsplitt 8/25 mm mit einer Kornzusammensetzung etwa in der Mitte des Sieblinienbereichs A/B 32 nach DIN 1045, Bild 3. Der Zementgehalt lag insgesamt zwischen 270 und 360 kg/m³, der Mehlkorngehalt insgesamt zwischen 350 und 470 kg/m³ und der W/Z-Wert insgesamt zwischen 0,37 und 0,56. Bei der Zusammensetzung der Betone der Serie 1 wurde von Straßenbeton der Festigkeitsklasse Bn 350 nach TV Beton 72 [10] ausgegangen, d. h. von Luftporenbetonen, wie sie in Zeile 1 der Tafel 5a wiedergegeben sind (5 Betone). Bei den Luftporenbetonen der Zeile 2 (4 Betone) wurde mit Hilfe einer etwas größeren Zugabe an Luftporenbildnern ein etwas größerer Gesamtluftgehalt des Frischbetons angestrebt und die übrige Betonzusammensetzung auf etwa gleiche Frischbetonkonsistenz und 28 Tage-Druckfestigkeit wie beim Beton in Zeile 1 abgestimmt. Der Luftporenbeton in Zeile 3 unterschied sich vom Beton in Zeile 1 im wesentlichen durch eine doppelt so lange Mischzeit, einen etwas größeren Gesamtluftporengehalt und eine etwas geringere 28 Tage-Druckfestigkeit.

Bei den Nullbetonen der Zeile 4 (3 Betone) wurde etwa gleiche Frischbetonkonsistenz und etwa gleiche 28 Tage-Druckfestigkeit, bei den Nullbetonen der Zeile 5 (2 Betone) etwa gleiche Frischbetonkonsistenz und etwa gleicher W/Z-Wert wie bei den Luftporenbetonen der Zeile 1 angestrebt. Der Nullbeton der Zeile 6 ist der Ausgangsbeton für den Fließbeton nach Zeile 7. Die Fließbetone der Zeile 8 (2 Betone) entsprachen dem Fließbeton der Zeile 7, erhielten davon abweichend jedoch einen Luftporenbildner und wiesen einen Gesamtluftporengehalt von etwa 5 % sowie einen etwas geringeren W/Z-Wert auf, damit eine etwa gleiche 28 Tage-Druckfestigkeit erwartet werden konnte. Beim Beton der Zeile 9 (2 Betone ohne Luftporenbildner) wurde der Fließmittelzusatz nur zur Verminderung des W/Z-Wertes und zur Erhöhung der Druckfestigkeit genutzt.

82 Tafel 5a Zusammensetzung und Eigenschaften der Betone der Serie 1
(Rheinkiesand 0/8 mm und Basaltsplitt 8/25 mm; Sieblinie A/B 32)

Zeile	Betonart	Zement (Tafel 3)	Zusatz- mittel (Tafel 4)	Zement- gehalt kg/m ³	Mehlkorn- gehalt kg/m ³	Wasser- zement- wert	Ver- dichtungs- maß	Frischbeton		28 Tage-	
								Luft- gehalt Vol.-%	Roh- dichte kg/dm ³	Roh- dichte kg/dm ³	Druck- festigkeit*) N/mm ²
1	Luftporenbeton	G, B	LM, LS, LT	300 bis 330	347 bis 386	0,43 bis 0,45	1,26 bis 1,34	3,3 bis 3,7	2,49 bis 2,51	2,47 bis 2,51	43 bis 49
2	Luftporenbeton	B	LS, LT	340 bis 350	378 bis 402	0,40 bis 0,42	1,29 bis 1,34	4,0 bis 4,6	2,47 bis 2,49	2,45 bis 2,51	44 bis 55
3	Luftporenbeton	B	LH	340	395	0,43	1,23	4,3	2,47	2,47	41
4	Nullbeton	G, B	—	270 bis 300	364 bis 387	0,50 bis 0,56	1,24 bis 1,26	0,4 bis 0,8	2,56 bis 2,57	2,55 bis 2,57	50 bis 56
5	Nullbeton	G, B	—	340	395 bis 406	0,43 bis 0,44	1,32 bis 1,36	0,8 bis 0,9	2,56 bis 2,57	2,56 bis 2,58	60 bis 61
6	Nullbeton	B	—	350	464	0,51	40**)	0,4	2,55	2,55	47
7	Fließbeton	B	SL	350	464	0,51	52**)	1,1	2,51	2,51	49
8	Fließbeton mit Luftporenbildner	B	SL, SH	360	473	0,48	50 bis 56**)	5,0	2,40	2,43 bis 2,44	47 bis 49
9	Beton mit Fließmittel	B	SH	340	379	0,37 bis 0,38	1,30 bis 1,41	1,0 bis 1,1	2,57 bis 2,58	2,56 bis 2,58	67 bis 69
10	Beton mit Dichtungsmittel	G, B	DW, DA, DS	270 bis 300	371 bis 373	0,49 bis 0,55	1,21 bis 1,28	0,7 bis 1,5	2,54 bis 2,57	2,54 bis 2,57	47 bis 59
11	Beton mit Dichtungsmittel	B	DA, DS, DT	340	378 bis 382	0,43	1,28 bis 1,31	0,7 bis 1,1	2,54 bis 2,56	2,54 bis 2,57	56 bis 67
12	Beton mit hydrophob. Zement	P, A	—	280	368 bis 376	0,56	1,20 bis 1,30	0,7 bis 0,9	2,55	2,55 bis 2,57	50 bis 56
13	Beton mit hydrophob. Zement	P, A	—	350	388 bis 391	0,43	1,27 bis 1,40	0,9 bis 1,1	2,55 bis 2,59	2,55 bis 2,58	61 bis 73

*) Aus kp/cm² im Verhältnis 10:1 umgerechnet und auf ganze Zahlen gerundet

***) Ausbreitmaß nach DIN 1048 Blatt 1

Bei den Betonen mit Dichtungsmitteln der Zeile 10 (6 Betone) und bei den Betonen mit hydrophobiertem Zement der Zeile 12 (2 Betone) wurden etwa gleiche Frischbetonkonsistenz und etwa gleiche 28 Tage-Druckfestigkeit, bei den Betonen mit Dichtungsmitteln der Zeile 11 (4 Betone) und bei den Betonen mit hydrophobiertem Zement der Zeile 13 (2 Betone) wurden etwa gleiche Frischbetonkonsistenz und etwa gleicher W/Z-Wert wie beim Luftporenbeton der Zeile 1 angestrebt.

Serie 2 (Tafel 5b):

Die Serie 2 wurde mehr auf Beton für andere durch Frost-Tausalz-Einwirkungen beanspruchte Bauteile abgestimmt. Diese Betone unterscheiden sich von den Betonen der Serie 1 insbesondere dadurch, daß auch ein W/Z-Wert von 0,60, eine Frischbetonkonsistenz im Bereich K 2/K 3 und Rheinkies sand 0/32 mm mit einer Kornzusammensetzung in der Mitte sowohl des Sieblinienbereichs A/B 32 als auch des Sieblinienbereichs B/C 32 nach DIN 1045, Bild 3, verwendet wurden. Außerdem wurde bei diesen Versuchen dem Einfluß der Zementart und der Vorlagerung der Betonprüfkörper vor der Frost-Tausalz-Einwirkung weiter nachgegangen. Insgesamt lag der Zementgehalt zwischen 270 und 350 kg/m³, der Mehlkorngehalt zwischen 370 und 440 kg/m³ und der W/Z-Wert zwischen 0,40 und 0,60.

Die Betone der Zeilen 1 bis 8 wurden mit Portlandzement Z 350 F hergestellt. Beim Beton der Zeile 1 (7 Betone) wurde üblicher Luftporenbeton mit einer Frischbetonkonsistenz vorwiegend in der oberen Hälfte von K 2 und einer 28 Tage-Druckfestigkeit oberhalb von 35 N/mm²*) angestrebt. Der Beton der Zeile 2 (8 Betone) sollte sich durch einen höheren Luftgehalt und der Beton der Zeile 3 (3 Betone) durch eine höhere 28 Tage-Druckfestigkeit vom Beton der Zeile 1 unterscheiden. Der Beton der Zeile 4 weist einen größeren W/Z-Wert (0,60), eine weichere Konsistenz (K 3) und einen höheren Luftgehalt als Beton der Zeile 1 auf. Die Betone der Zeilen 5 und 6 wurden mit Dichtungsmitteln hergestellt, sie unterscheiden sich durch ihren W/Z-Wert. Bei Herstellung der Betone der Zeilen 7 und 8 (2 Betone) wurden die Sonderzusatzmittel nach Tafel 3 verwendet. Mit diesen Betonen wurden nur orientierende Versuche durchgeführt.

Mit Portlandzement Z 450 F und W/Z-Werten von 0,50 und 0,60 wurden die Luftporenbetone der Zeilen 9 (3 Betone) und 10 (3 Betone) hergestellt.

Bei den Betonen der Zeilen 11 bis 19 wurde Hochofenzement Z 350 L verwendet. Die Betone der Zeilen 11 bis 15 weisen einen W/Z-Wert von 0,40 bis 0,45 und, abgesehen vom Beton der Zeile 12 (4 Betone), der mit Konsistenz K 1 hergestellt wurde, überwiegend die Konsistenz K 2 auf. Die Betone der Zeilen 13 (3 Betone), 14 (5 Betone) und 15 (3 Betone) unterscheiden sich durch einen unterschiedlich hohen Luftgehalt. Die Betone der Zeilen 16 (2 Betone)

*) Aus kp/cm² im Verhältnis 10:1 umgerechnet und auf ganze Zahlen gerundet.

Tafel 5b Zusammensetzung und Eigenschaften der Betone der Serie 2 (Rheinkiessand 0/32 mm)

Zeile	Betonart	Zement (Tafel 3)	Zusatz- mittel (Tafel 4)	Zuschlag- korn- zusammen- setzung	Zement- gehalt kg/m ³	Mehlkorn- gehalt kg/m ³	Wasser- zement- wert	Ver- dichtungs- maß	Frischbeton		28 Tage-	
									Luft- gehalt Vol.-%	Roh- dichte kg/dm ³	Roh- dichte kg/dm ³	Druck- festigkeit*) N/mm ²
1	Luftporenbeton	B	LM, LT LS	A/B 32 B/C 32	290 bis 340	373 bis 434	0,50 bis 0,53	1,10 bis 1,17	3,0 bis 4,5	2,30 bis 2,35	2,31 bis 2,37	36 bis 46
2	Luftporenbeton	B	LT, LS	A/B 32 B/C 32	300 bis 340	377 bis 434	0,47 bis 0,51	1,10 bis 1,18	5,1 bis 6,6	2,26 bis 2,31	2,25 bis 2,31	31 bis 43
3	Luftporenbeton	B	LS	A/B 32	350	409 bis 413	0,45	1,10 bis 1,16	2,7 bis 4,2	2,34 bis 2,38	2,31 bis 2,36	46 bis 56
4	Luftporenbeton	B	LS	B/C 32	300	395	0,60	1,05	7,0	2,22	2,22	34
5	Beton mit Dichtungsmittel	B	DC, DA	A/B 32	350	395	0,45	1,08 bis 1,10	0,8	2,41 bis 2,43	2,40 bis 2,43	56 bis 62
6	Beton mit Dichtungsmittel	B	DS	A/B 32	270	368	0,60	1,12	1,1	2,38	2,36	38
			DC, DS	B/C 32	300	435	0,60	1,06	2,2	2,35 bis 2,38	2,34 bis 2,36	41 bis 47
7	Beton mit Sonderzusatzmittel	B	LJ	A/B 32	300	376	0,50	1,20	3,3	2,37	2,36	44
8	Beton mit Sonderzusatzmittel	B	LK	A/B 32	350	413	0,45	1,14 bis 1,15	1,1 bis 1,3	2,40 bis 2,41	2,40	57 bis 60
9	Luftporenbeton	b	LS	A/B 32 B/C 32	320 bis 340	377 bis 429	0,50	1,05 bis 1,15	4,8 bis 5,8	2,29 bis 2,30	2,24 bis 2,31	40 bis 42
10	Luftporenbeton	b	LS	B/C 32	290	381	0,60	1,02 bis 1,05	4,4 bis 4,9	2,30	2,25 bis 2,29	33 bis 37
11	Nullbeton	R	—	A/B 32	350	407	0,45	1,19	1,2	2,41	2,40	52

Tafel 5b (Fortsetzung)

Zeile	Betonart	Zement (Tafel 3)	Zusatz- mittel (Tafel 4)	Zuschlag- korn- zusammen- setzung	Zement- gehalt kg/m ³	Mehlkorn- gehalt kg/m ³	Wasser- zement- wert	Ver- dichtungs- maß	Frischbeton		28 Tage-	
									Luft- gehalt Vol.-%	Roh- dichte kg/dm ³	Roh- dichte kg/dm ³	Druck- festigkeit*) N/mm ²
12	Luftporenbeton	R, O	LS	A/B 32 B/C 32	350	409 bis 440	0,40 bis 0,45	1,31 bis 1,37	3,0 bis 4,0	2,33 bis 2,39	2,34 bis 2,38	46 bis 56
13	Luftporenbeton	R	LS	A/B 32	350	407	0,45	1,19 bis 1,21	1,9 bis 2,6	2,37 bis 2,39	2,37 bis 2,38	42 bis 47
14	Luftporenbeton	R, O M	LS, LC	A/B 32	350	404 bis 407	0,45	1,06 bis 1,24	4,0 bis 5,0	2,30 bis 2,33	2,28 bis 2,32	36 bis 41
15	Luftporenbeton	R, O	LS, LC	A/B 32	330	385	0,45	1,10 bis 1,18	5,7 bis 6,6	2,27 bis 2,30	2,27 bis 2,28	34 bis 38
16	Luftporenbeton	R	LS	A/B 32 B/C 32	350	403 bis 443	0,50	1,04 bis 1,11	2,9 bis 4,0	2,31 bis 2,33	2,31 bis 2,35	36 bis 43
17	Luftporenbeton	R	LS	B/C 32	300	393	0,60	1,04	6,1	2,32	2,28	31
18	Beton mit Dichtungsmittel	R, O	DC, DA, DS	A/B 32	350	396	0,45	1,12 bis 1,14	0,9 bis 1,2	2,39 bis 2,41	2,40 bis 2,41	54 bis 58
19	Beton mit Dichtungsmittel	R, O	DC, DA, DS	B/C 32	300	436	0,60	1,06 bis 1,07	2,1 bis 2,5	2,33 bis 2,34	2,30 bis 2,31	40 bis 41
20	Luftporenbeton	r, m	LS	A/B 32 B/C 32	350	439	0,45	1,13 bis 1,20	4,1 bis 5,1	2,31 bis 2,34	2,28 bis 2,34	42 bis 59
21	Nullbeton mit hydrophob. Zement	P	—	A/B 32	320	394	0,52	1,20	1,5	2,39	2,38	46

und 17 erhielten mit 0,50 bzw. 0,60 einen etwas größeren W/Z-Wert und eine Konsistenz K 3. Die Betone der Zeilen 18 und 19 wurden mit einem Dichtungsmittel hergestellt, und zwar mit W/Z-Werten von 0,45 und 0,60.

Die Betone der Zeile 20 (4 Betone) unterscheiden sich vom Beton der Zeile 14 im wesentlichen durch die Verwendung von Hochofenzement Z 450 L, der auch einen geringeren Hüttensandgehalt enthält. Mit dem Beton der Zeile 21, einem Beton ohne Zusatzmittel, jedoch mit hydrophobiertem Zement, wurde nur ein orientierender Versuch durchgeführt.

Serie 3 (Tafel 5c):

Die Serie 3 umfaßt einige Zementmörtel, wie sie z. B. zu Ausbesserungsarbeiten im Straßenbau zur Anwendung kommen. Sie wurden mit einem luftporenbildenden Zusatzmittel hergestellt und weisen ein Zuschlaggrößtkorn von 2 oder 4 mm und einen unterschiedlichen W/Z-Wert auf. Über den Frost-Tausalz-Widerstand dieser Mörtel wurden einige orientierende Untersuchungen durchgeführt.

3.2.3 Herstellung und Frischbetoneigenschaften

Die Betonausgangsstoffe wurden gewichtsmäßig zugegeben, pulverförmige Zusatzmittel mit dem Zement und flüssige Zusatzmittel (ausgenommen die Fließmittel) mit dem Zugabewasser des Betons. Der Beton wurde nach Zugabe aller Ausgangsstoffe (ausgenommen das Fließmittel) in einem Teller-Mischer mit guter Mischwirkung rd. 2 min gemischt. Bei Beton mit Fließmitteln wurde danach das Fließmittel zugegeben und der Beton nochmals rd. 3 min gemischt. Die Frischbetontemperatur lag insgesamt zwischen 18 und 22 °C. — Die Frischbetonrohddichte — bestimmt mit dem 8 l-Topf des Luftgehaltprüfgeräts —, die Frischbetonkonsistenz — geprüft mit dem Verdichtungsversuch und beim Fließbeton mit dem Ausbreitversuch nach DIN 1048 Blatt 1 — und der Luftgehalt L_d des Frischbetons — ermittelt nach dem Druckausgleichverfahren mit dem 8 l-Luftgehaltprüfgerät — gehen aus den Tafeln 5a, 5b und 5c hervor.

Für die Prüfung der Druckfestigkeit wurden 20 cm-Würfel und für die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes 10 cm-Würfel und Platten 30 cm x 30 cm x 8 cm in Stahlformen mit Aufsatzkasten in Anlehnung an DIN 1048 Blatt 1 hergestellt. Der Beton wurde unter Stochern in die Formen eingefüllt und auf einem Rütteltisch (Schwingungszahl rd. 3000/min, Schwingungsbreite rd. 1 mm) je nach Probekörperart und Frischbetonkonsistenz 5 bis 60 s verdichtet. Auf die Herstelloberseite der Platten (Prüfffläche) wurde nach Abziehen des überstehenden Betons ein Besenstrich mit einem Kunststoffbesen (Faserdurchmesser rd. 1,5 mm) aufgebracht.

3.2.4 Lagerung und Prüfung

Die Prüfkörper lagerten bis zum Entformen im Alter von 1 Tag unter feuchten Tüchern, danach bis zum 8. Tag unter Wasser und anschließend im Klimaraum mit 65 % relativer Luftfeuchtigkeit stets bei rd. 20 °C. Die 20 cm-Würfel wurden im Alter von 28 Tagen auf Druckfestigkeit geprüft.

Tafel 5c Zusammensetzung und Eigenschaften der Luftporenmörtel (Serie 3)

Zeile	Zement (Tafel 3)	Rheinsand Größtkorn mm	Zusatz- mittel (Tafel 4)	Zement- gehalt kg/m ³	Mehlkorn- gehalt kg/m ³	Wasser- zement- wert	Verdichtungs- maß	Frischmörtel		28 Tage-	
								Luftgehalt Vol.-%	Rohdichte kg/dm ³	Rohdichte kg/dm ³	Druck- festigkeit*) N/mm ²
1	B	2	LS	600	770 bis 789	0,40	1,15 bis 1,25	8,3 bis 9,4	2,15 bis 2,17	2,12 bis 2,15	46 bis 53
2	B	2	LS	479	672	0,50	1,06	9,9	2,11	2,09	37
3	B	4	LS	490	625	0,45	1,06 bis 1,1	7,6 bis 8,9	2,27 bis 2,31	2,14 bis 2,18	47 bis 51

*) Aus kp/cm² im Verhältnis 10:1 umgerechnet und auf ganze Zahlen gerundet

Mit der Frost-Tausalz-Prüfung wurde in der Regel im Betonalter von 56 Tagen begonnen, in einigen Fällen auch im Alter von 3 Monaten und von 1,5 Jahren. — Von einigen Betonen lagerten Prüfkörper, deren Frost-Tausalz-Prüfung im Alter von 56 Tagen begann, auch 28, 48 und 55 Tage feucht (1 Tag unter feuchten Tüchern und anschließend unter Wasser) und anschließend in der noch verbleibenden Zeit bei 65 % relativer Luftfeuchtigkeit und 20 °C.

Der Frost-Tausalz-Widerstand wurde nach den beiden folgenden Verfahren geprüft.

3.2.4.1 Eintauchverfahren

Je Betonart wurden zwei 10 cm-Würfel einen Tag vor Beginn der Frosteinwirkung in einem Messingbehälter (12 cm x 34 cm Grundfläche und 14 cm Höhe) ganz in 3%ige NaCl-Lösung eingelagert. Ein Tag nach Beginn dieser Einlagerung wurde der Messingbehälter mit den beiden 10 cm-Würfeln und der Salzlösung rd. 15,5 Stunden in einer Frostkammer einer Temperatur von rd. -15 °C ausgesetzt und anschließend rd. 8,5 Stunden in Wasser von rd. 20 °C gelagert. Der Temperaturverlauf in der Mitte eines 10 cm-Würfels und rd. 1 mm unterhalb einer Würfelaußenfläche während eines Frost-Tau-Wechsels, gemessen mit Thermoelementen, geht aus Bild 2 hervor. Dieser Frost-Tau-Wechsel wurde in der Regel 100mal durchgeführt. Die Salzlösung wurde nach jeweils 10 Frost-Tau-Wechseln erneuert. Nach 10, 20, 30, 50, 70 und 100 Frost-Tau-Wechseln wurden die Würfel nach der Wasserlagerung augenscheinlich beurteilt und wurde ihr Gewichtsverlust (abgefrorene Bestandteile) ermittelt.

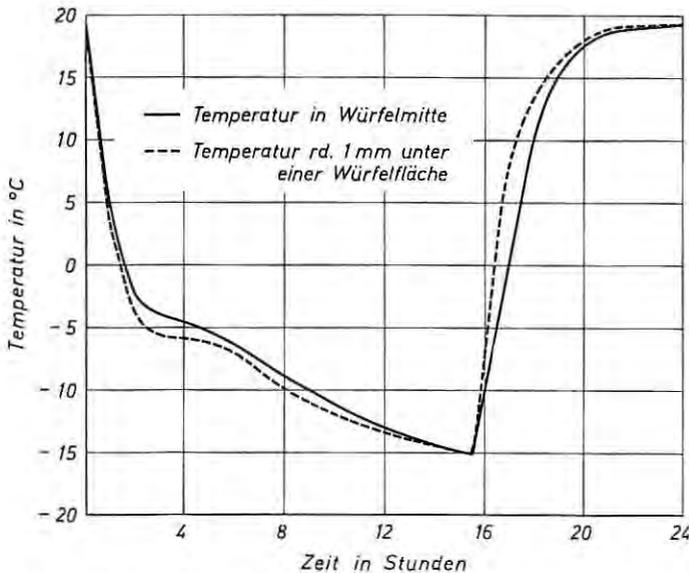


Bild 2 Temperaturverlauf während eines Frost-Tau-Wechsels beim Eintauchverfahren

In wenigen Zusatzversuchen wurden einige Betone auch mit einem modifizierten Eintauchverfahren geprüft, bei dem im wesentlichen die 3%ige NaCl-Lösung durch eine gesättigte NaCl-Lösung ersetzt wurde.

3.2.4.2 Salzaufstreuverfahren

Etwa 6 Tage vor Beginn der Frost-Tau-Prüfung wurde auf die Seitenflächen der Platten 30 cm x 30 cm x 8 cm ein Rahmen aus rd. 50 mm hohem Messingblech mit einem Epoxidharzkleber so aufgeklebt, daß der Messingrahmen die Prüffläche der Betonplatte rd. 20 mm überragte (siehe Bild 3). Der zwischen Rahmen und Betonplatte verbliebene Spalt wurde mit Epoxidharz abgedichtet. Rund 1 Tag nach Anbringen des Rahmens wurde auf die Prüffläche der Betonplatte eine etwa 3 mm dicke Wasserschicht aufgebracht, die während der folgenden 5 Tage – soweit nötig – immer wieder auf etwa 3 mm ergänzt wurde. Fünf Tage nach erstem Aufbringen der etwa 3 mm dicken Wasserschicht wurden die Betonplatten mit der Wasserschicht rd. 15,5 Stunden in einer Frostkammer einer Temperatur von rd. $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ausgesetzt. Anschließend wurden rd. 8 g NaCl auf die gefrorene Eisschicht jeder Betonplatte gleichmäßig verteilt aufgestreut, diese Salzmenge bildete mit der eingefrorenen Wasserschicht nach dem Auftauen eine rd. 3%ige NaCl-Lösung. Die Betonplatten blieben nach dem Aufstreuen des Salzes noch rd. eine Stunde in der Frostkammer bei rd. $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ und lagerten anschließend zum Auftauen rd. 7,5 Stunden an der Luft bei rd. $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Bild 3
Platte mit aufgesetztem
Messingrahmen und
eingefrorener Wasser-
schicht

Der Temperaturverlauf an der Prüffläche und in der Mitte einer Platte (in 4 cm Tiefe) während eines Frost-Tau-Wechsels, gemessen mit Thermoelementen, geht aus Bild 4 hervor. Der Frost-Tau-Wechsel mit Salzaufstreuen wurde in der Regel 100mal durchgeführt. Unmittelbar vor jedem neuen Frost-Tau-Wechsel wurde die Salzlösung von der Platte abgetupft und eine neue 3 mm dicke Wasserschicht aufgebracht. Zur Veränderung des Einflusses des Temperaturschocks beim Auftauen durch das Salzaufstreuen wurden einige Betone in wenigen Zusatzversuchen auch mit einem modifi-

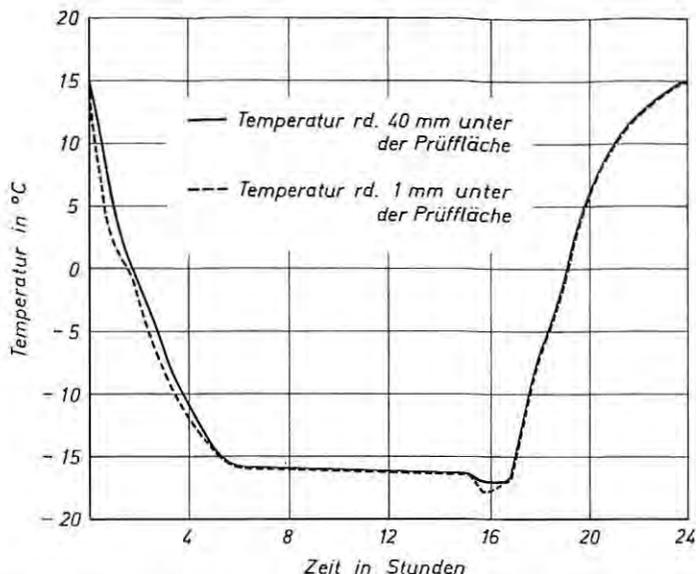


Bild 4 Temperaturverlauf während eines Frost-Tau-Wechsels beim Salzaufstreuverfahren

zierten Salzaufstreuverfahren geprüft, bei dem die Platten nicht bei -15°C , sondern bei rd. -5°C eingefroren wurden.

Alle Betonplatten wurden nach jedem Frost-Tau-Wechsel augenscheinlich auf Veränderungen geprüft und nach 100 Frost-Tau-Wechseln mit Hilfe einer augenscheinlichen Beurteilung aufgrund der abgewitterten Bestandteile und der Beschaffenheit der Prüffläche unter Berücksichtigung der Zuschlagkornzusammensetzung und der Ausgangs-Mörtelschichtdicke an der Prüffläche je nach Zustand in folgende Beurteilungsgrade eingestuft:

- 0 vorwiegend keine Veränderung der Prüffläche, höchstens vereinzelte dünne Abwitterungen,
- 1 vorwiegend Abwittern der Zementhaut und des Feinstmörtels,
- 2 vorwiegend Zuschlagkorn bis 2 mm sichtbar und Abwittern des Feinstmörtels bis zu einer Tiefe von etwa 2 mm,
- 3 vorwiegend Kuppen von Zuschlagkörnern mit 4 bis 10 mm Durchmesser sichtbar und Abwittern des Mörtels bis zu einer Tiefe von etwa 3 mm,
- 4 vorwiegend Kuppen von Zuschlagkörnern mit 10 bis 16 mm Durchmesser sichtbar und Abwittern bis zu einer Tiefe von etwa 5 mm,
- 5 größerer Zuschlag sichtbar und teilweise freigelegt oder herausgelöst, Abwittern auf eine Tiefe von mehr als 5 mm.

Da im Laufe der Untersuchungen deutlich wurde, daß eine nur qualitative augenscheinliche Beurteilung der Abwitterung nicht befriedigt, wurde bei einigen Betonplatten untersucht, ob eines der

folgenden Meßverfahren für eine quantitative Bestimmung der volumemäßigen Abwitterung geeignet ist.

a) 12 Punkte-Meßverfahren:

Bei diesem Meßverfahren wurde die Abwitterungstiefe nach 10, 20, 30, 50, 70 und 100 Frost-Tau-Wechseln mit einer Tiefenlehre und mit Hilfe einer Schablone, die bei jeder Messung an den dafür vorgesehenen und markierten Stellen des Messingrahmens genau aufgesetzt wurde, an 12 über die Prüffläche der Betonplatte gleichmäßig verteilten Stellen auf 0,1 mm gemessen (siehe Bild 5). Um bei der begrenzten Anzahl der Meßpunkte die Messung eines zufällig über seine Umgebung herausragenden Zuschlagkorns auszuschließen, war die Tiefenlehre in einer Richtung in begrenztem Maße beweglich und wurde an jeder Meßstelle die größte auf einer Meßstrecke von rd. 1 cm erfassbare Abwitterungstiefe gemessen. Als Abwitterungstiefe der Platte wurde der Mittelwert aus den Ergebnissen der 12 Meßstellen angegeben.



Bild 5
Meßeinrichtung für das
12 Punkte-Meßverfahren

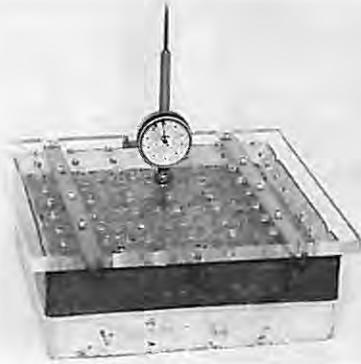
b) 56 Punkte-Meßverfahren:

Bei diesem Meßverfahren (modifiziertes Verfahren nach W. Zapf) wurde die Abwitterungstiefe nach 10, 20, 30, 50, 70 und 100 Frost-Tau-Wechseln mit einer Meßuhr und mit Hilfe einer Schablone an 56 über die Prüffläche der Betonplatte gleichmäßig verteilten Stellen auf 0,01 mm gemessen (siehe Bild 6). Als Schablone wurde bei diesem Verfahren eine auf den Messingrahmen der Betonplatte stets gleich aufgesetzte und arretierte Plexiglasscheibe mit 56 Bohr-löchern verwendet, in die die Meßuhr ohne Spiel stets gleich eingesetzt wurde. Als Abwitterungstiefe der Platte wurde der Mittelwert aus den Ergebnissen der 56 Meßstellen angegeben.

3.2.5 Bestimmung der Luftporenkennwerte

Außer dem Luftgehalt L_d des Frischbetons (siehe Abschnitt 3.2.3) wurden Luftporenkennwerte durch mikroskopisches Auszählen der kugeligen und annähernd kugeligen Luftporen mit einem Durchmesser bis zu 4 mm am erhärteten Beton nach dem Meßlinien-

Bild 6
Meßeinrichtung für das
56 Punkte-Meßverfahren



verfahren, siehe u. a. [6, 18], bestimmt. Aus der Mitte der Betonplatten 30 cm x 30 cm x 8 cm wurden nach der Frost-Tausalz-Prüfung zwei etwa 15 cm breite, 8 cm hohe und 4 cm dicke Betonscheiben naß so herausgesägt, daß die für das Auszählen der Poren vorgesehenen Seitenflächen (etwa 15 cm x 8 cm) senkrecht zur Herstelloberfläche der Platten verliefen. Die Prüfflächen der beiden herausgesägten Betonscheiben wurden naß geschliffen und poliert. Die Luftporen wurden in den oberen 2,5 cm der Prüffläche der Betonscheibe mit der Prüfeinrichtung nach Bild 1 ausgezählt, und zwar auf parallelen Meßlinien, die 4 mm voneinander entfernt waren und deren oberste von der beanspruchten Fläche der Betonplatte einen Abstand von 1 mm hatte. Die gesamte Meßstrecke betrug je Prüffläche der Betonscheibe 1 m, je Betonscheibe 2 m und je Betonplatte 4 m. Beim Auszählen auf der Meßlinie wurden die Summe der Feststoffstrecken, die Summe der Kugelporensehnenstrecken und die Anzahl der Kugelporen bestimmt. Außerdem wurden die Kugelporensehnen zur Erfassung der Porengrößenverteilung je nach Größe in 28 Porenklassen eingeteilt. Folgende Luftporenkennwerte wurden daraus mit Hilfe statistischer Verfahren [31] errechnet:

- der Luftporengehalt L_0 in Vol.-% (Anteil aller kugeligen und annähernd kugeligen Luftporen bis zu einem Durchmesser von rd. 4 mm),
- die Mikroluftporengehalte L_{50} , L_{100} , L_{200} , L_{300} , L_{400} , L_{500} und L_{1000} in Vol.-% (Anteil aller kugeligen und annähernd kugeligen Luftporen bis zu einem Durchmesser von 50, 100, 200, 300, 400, 500 bzw. 1000 μm) und
- der Abstandsfaktor AF in mm (ein aus einem idealisierten Porensystem abgeleiteter Kennwert für den Abstand eines Punktes des Zementsteins von der nächsten Luftpore).

3.3 Versuchsergebnisse und statistische Auswertung

Die Rohdichte und die Druckfestigkeit der im Alter von 28 Tagen untersuchten Betone bzw. Mörtel gehen aus den Tafeln 5a, 5b und 5c hervor. Insgesamt lag die Rohdichte zwischen 2,09 und 2,58 kg/m^3

und die Druckfestigkeit zwischen 31 und 73 N/mm²*). Ein Überblick über die bisher vorliegenden Ergebnisse der Prüfungen des Frost-Tausalz-Widerstandes und der Luftporenkennwerte gibt Tafel 6a für die Betone der Tafel 5a, Tafel 6b für die Betone der Tafel 5b und Tafel 6c für die Mörtel der Tafel 5c. Die entsprechenden Ergebnisse der einzelnen Betone sind in den graphischen Darstellungen des Abschnittes 4 enthalten. Über die Ergebnisse der bisher noch nicht abgeschlossenen Prüfungen – dies betrifft vorwiegend Betone der Tafel 5b – wird zu einem späteren Zeitpunkt berichtet.

Für die Erörterung der Versuchsergebnisse wurden die bisher vorliegenden Ergebnisse auf Lochkarten übertragen und mit Hilfe der BMD-Programme [32] auf einer Großrechenanlage statistisch ausgewertet. Dabei wurden mit Hilfe des Programms BMD 05 D Versuchsergebnisse gegeneinander aufgetragen und mit Hilfe des Programms BMD 02 R multiple lineare Regressionen der Versuchsergebnisse errechnet.

4. Erörterung der Versuchsergebnisse

4.1 Prüfungen des Frost-Tausalz-Widerstandes

4.1.1 Eintauchverfahren

In Bild 7 sind die bisher vorliegenden Einzelergebnisse der im Alter von 56 Tagen begonnenen Prüfung mit dem Eintauchverfahren (3%ige NaCl-Lösung) aufgetragen, und zwar der Gewichtsverlust infolge Frost-Tausalz-Einwirkung in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel für verschiedene Betone. Der Gewichtsverlust nimmt mit wachsender Zahl an Frost-Tau-Wechseln je nach Beton unterschiedlich, stets aber kontinuierlich zu. Der Gewichtsverlust lag bei Prüfbeginn im Alter von 56 Tagen nach 50 Frost-Tau-Wechseln insgesamt zwischen 0,1 und 26 Gew.-% und nach 100 Frost-Tau-Wechseln insgesamt zwischen 0,2 und 43 Gew.-%, siehe auch Tafeln 6a, 6b und 6c. Die zur weitergehenden Erfassung der Zusammenhänge teilweise durchgeführten Prüfungen im Betonalter von 1,5 Jahren führten in der Regel zu etwas größeren Gewichtsverlusten. Das Eintauchverfahren differenzierte die untersuchten Betone sehr gut. Bei Betonen, die nach bisherigen Erfahrungen in Labor und Praxis einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand aufweisen, überschritt der Gewichtsverlust bei Prüfung mit diesem Verfahren und Prüfbeginn im Alter von 56 Tagen nach 50 Frost-Tau-Wechseln nicht etwa 3 Gew.-% und nach 100 Frost-Tau-Wechseln nicht etwa 5 Gew.-%.

Wie bereits bei früheren Versuchen erwies sich das Eintauchverfahren mit gesättigter NaCl-Lösung als nicht brauchbar. Dabei blieben Betonproben ohne ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand lange Zeit (z. B. bis zu 50 Frost-Tau-Wechseln) weitgehend unversehrt und zerfielen anschließend innerhalb weniger Frost-Tau-Wechsel, siehe Bild 8. Die Verfahren mit gesättigter NaCl-Lösung können diskontinuierliche Beanspruchung und Ergebnisse zur Folge haben, die zur Beurteilung des Betons nicht geeignet sind und keinen Aufschluß über sein Verhalten unter praktischer Beanspruchung geben.

*) Aus kp/cm² im Verhältnis 10:1 umgerechnet und auf ganze Zahlen gerundet.

78 Tafel 6a Luftporenkennwerte und Ergebnisse der Frost-Tausalz-Prüfung (Betonen der Serie 1)

Betonen nach Tafel 5a Zeile Nr.		Luftporenkennwerte					Eintauchverfahren						Salzaufstreuverfahren			
		L _a	Vol.-%			AF	Gewichtsverlust in %						Abwitterungstiefe in mm 12 Punkte-Messung			augen- scheinliche Beurteilung
			L 300	L 200	L 100		56 Tagen			1,5 Jahren			1,5 Jahren			
							Prüfbeginn im Alter von									
							Anzahl der Frost-Tau-Wechsel									
					20	50	100	20	50	100	20	50	100	100		
1	Luftporenbeton	3,8 bis 4,6	2,0 bis 2,5	1,6 bis 2,0	0,8 bis 1,1	0,11 bis 0,15	0,0 bis 0,2	0,1 bis 0,5	0,3 bis 0,7	0,2 bis 0,3	0,3 bis 0,5	0,5 bis 1,0				0 bis 1
2	Luftporenbeton	4,5 bis 4,7	2,7 bis 3,0	2,2 bis 2,4	1,1	0,11 bis 0,13	0,1 bis 0,2	0,1 bis 0,3	0,2 bis 0,5	0,1 bis 0,5	0,1 bis 0,7	0,2 bis 1,1	0,3 bis 0,8	1,0 bis 1,1	1,7 bis 2,0	0 bis 1
3	Luftporenbeton	5,5	3,8	3,2	1,6	0,09	0,1	0,3	0,5	1,3	2,0	2,6				2
4	Nullbeton	0,7 bis 1,6	0,3 bis 0,5	0,2 bis 0,4	0,1 bis 0,2	0,30 bis 0,41	6,8 bis 8,7	16,9 bis 25,7	27,1 bis 39,9	3,5 bis 4,6	14,8 bis 21,3	38,5 bis 57,5				3 bis 5
5	Nullbeton	0,9 bis 1,0	0,3 bis 0,4	0,2	0,1 bis 0,2	0,32 bis 0,44	1,1 bis 3,3	5,9 bis 7,8	11,5 bis 13,8	3,6 bis 4,1	10,4 bis 11,1	16,8 bis 20,3				2 bis 3
6	Nullbeton	0,9	0,3	0,2	0,1	0,38	6,8	15,2	24,8							5
7	Fließbeton	1,3	0,6	0,5	0,4	0,23	11,1	26,0	42,6							5
8	Fließbeton mit LP	4,6 bis 6,3	2,1 bis 2,5	1,3 bis 1,6	0,5 bis 0,8	0,16 bis 0,19	0,1 bis 0,4	0,1 bis 0,6	0,2 bis 0,7	0,8 bis 2,2	1,1 bis 3,1	1,3 bis 3,7	0,7 bis 0,9	1,2 bis 1,3	1,5 bis 1,6	1
10	Beton mit Dichtungsmittel	1,5 bis 2,1	0,4 bis 0,8	0,4 bis 0,7	0,2 bis 0,3	0,24 bis 0,32	1,1 bis 8,2	3,9 bis 20,8	9,7 bis 33,9	1,6 bis 13,4	5,0 bis 56,8	8,5 bis 74,3	2,2*)	3,1*)	3,7*)	3 bis 5
11	Beton mit Dichtungsmittel	1,4 bis 1,5	0,5	0,4	0,2 bis 0,3	0,24 bis 0,30	1,3 bis 5,3	4,0 bis 10,6	9,0 bis 30,9	2,8 bis 8,4	7,9 bis 18,6	13,9 bis 25,9	1,6 bis 2,0	2,0 bis 2,9	2,8 bis 4,0	4

*) Ergebnisse eines Betons, dessen Gewichtsverlust bei der Prüfung mit dem Eintauchverfahren nahe der oberen Grenze des dafür in Zeile 10 angegebenen Bereichs lag

Tafel 6b Luftporenkennwerte und Ergebnisse der Frost-Tausalz-Prüfung (Betonen der Serie 2)

Betonen nach Tafel 5b Zeile Nr.		Luftporenkennwerte					Eintauchverfahren						Salzaufstreuverfahren												augenscheinl. Beurteilung
		L _a	L 300	L 200	L 100	AF	Gewichtsverlust in %						Abwitterungstiefe in mm												
							56 Tagen			1,5 Jahren			12 Punkte-Messung				56 Punkte-Messung								
		Vol.-%					mm			Prüfbeginn im Alter von															
										Anzahl der Frost-Tau-Wechsel															
					20	50	100	20	50	100	20	50	100	20	50	100	20	50	100	20	50	100	20	50	100
1	Luftporenbeton	3,2 bis 6,4	1,5 bis 3,4	1,0 bis 2,3	0,5 bis 1,0	0,12 bis 0,21	0,2 bis 0,4	0,3 bis 0,7	0,5 bis 1,0	0,2 bis 0,8	0,4 bis 1,3	0,5 bis 1,9				0,9 bis 1,1	1,4 bis 1,6	1,9 bis 2,0							1 bis 2
2	Luftporenbeton	4,4 bis 7,7	2,6 bis 4,2	1,7 bis 3,2	0,9 bis 1,5	0,09 bis 0,14	0,1 bis 0,3	0,2 bis 0,5	0,3 bis 0,8	0,1 bis 1,0	0,3 bis 1,6	0,6 bis 2,1				0,8 bis 1,2	1,2 bis 1,6	1,5 bis 2,2							1 bis 3
3	Luftporenbeton						0,2 bis 0,9	0,3 bis 1,4	0,4 bis 2,0				0,1 bis 0,9	0,2 bis 1,2	0,3 bis 1,4				0,2 bis 0,5	0,2 bis 0,5	0,2 bis 0,6				0 bis 2
4	Luftporenbeton	8,2	2,2	1,5	0,6	0,18	0,6	1,0	1,5	1,1	2,7	4,4				1,1	1,5	1,8							2
6a	Beton mit Dichtungsmittel	2,0	0,6	0,5	0,3	0,29	3,7	11,1	30,6	15,0	39,1	64,8													5
7	Beton mit Sonder- zusatzmittel	2,7	1,5	1,1	0,5	0,17	0,6	1,2	1,8	1,3	2,3	3,5	1,0	1,3	1,8	1,1	1,5	1,8				0,5	0,7	0,9	2
8	Beton mit Sonder- zusatzmittel						3,6	7,2					0,4	0,7					0,2	0,4					
		1,9	0,9	0,8	0,6	0,13	1,1	2,3					0,5	0,8					0,4	0,6					
9	Luftporenbeton	4,4 bis 7,1	1,8 bis 3,1	1,1 bis 2,4	0,5 bis 1,5	0,11 bis 0,20	0,2	0,3	0,5	0,4 bis 0,5	0,9	1,1 bis 1,3	0,8 bis 1,0	1,2	1,4 bis 1,7	1,3	1,6	1,8	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	1,0	2
10	Luftporenbeton	3,9 bis 4,9	1,7 bis 2,0	1,5	0,7	0,17	0,1 bis 0,5	0,4 bis 1,1	0,5 bis 1,7	0,8 bis 1,3	1,2 bis 2,1	1,6 bis 2,8	0,7 bis 1,0	1,1 bis 1,5	1,5 bis 1,9	1,0 bis 1,4	1,3 bis 1,8	1,8 bis 2,4				0,7 bis 0,8	1,0 bis 1,1	1,3	2 bis 3

08 Tafel 6c Luftporenkennwerte und Ergebnisse der Frost-Tausalz-Prüfung (Mörtel der Serie 3)

Mörtel nach Tafel 5c Zeile Nr.	Luftporen- kennwerte		Eintauchverfahren Gewichtsverlust in %				Salzaufstreuverfahren Abwiltungstiefe in mm									augen- schein- liche Be- urteilung
	L _a	AF	56 Tagen		1,5 Jahren		12 Punkte-Messung				56 Punkte-Messung					
			Prüfbeginn im Alter von				56 Tagen		1,5 Jahren		1,5 Jahren			56 Tagen		
	Vol.-%	mm	20	50	20	50	20	50	20	50	100	20	50	100	50	
			Anzahl der Frost-Tau-Wechsel													
1	6,7 bis 10,3	0,11 bis 0,12	0,1 bis 0,2	0,1 bis 0,3	0,2 bis 0,3	0,2 bis 0,3	0,3 bis 0,7	0,5 bis 0,9	0,3 bis 1,0	0,5 bis 1,2	1,3	0,4 bis 0,7	0,4 bis 0,8	0,8	1	
2	10,5	0,10	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,7	1,0		0,5	0,7		1	
3	6,4 bis 7,1	0,09 bis 0,10	0,1	0,2	0,1 bis 0,2	0,3	0,2 bis 0,4	0,5 bis 0,8	0,4 bis 0,7	0,5 bis 0,9		0,4	0,5		1	

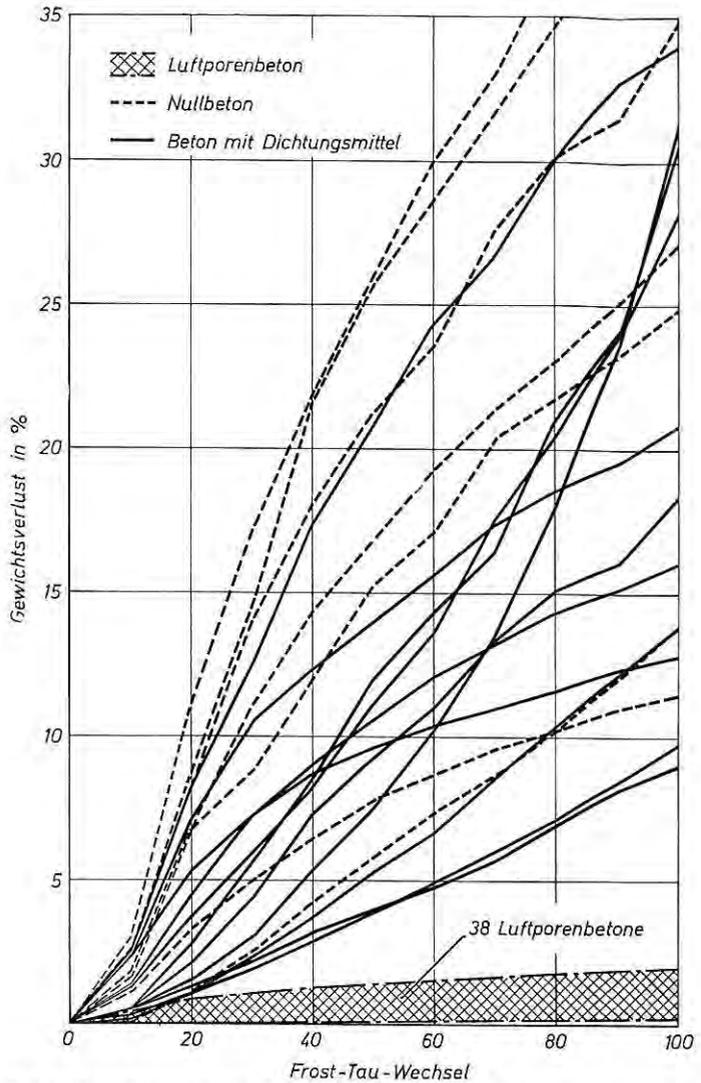


Bild 7 Gewichtsverlust von Betonen unterschiedlicher Zusammensetzung bei Frost-Tausalz-Prüfung mit dem Eintauchverfahren (Prüfbeginn im Alter von 56 Tagen)

4.1.2 Salzaufstreuverfahren

Der Beurteilungsgrad aufgrund augenscheinlicher Beurteilung der im Alter von 56 Tagen mit dem Salzaufstreuverfahren geprüften Betonplatten lag für Betone, denen aufgrund ihrer Zusammensetzung ein hoher Frost-Tausalz-Widerstand zuzuschreiben ist, vorwiegend zwischen 0 und 2 und nur in wenigen Fällen bei 3 und für die übrigen Betone durchweg zwischen 3 und 5 (siehe auch Tafeln 6a, 6b und 6c). Mit der augenscheinlichen Beurteilung allein

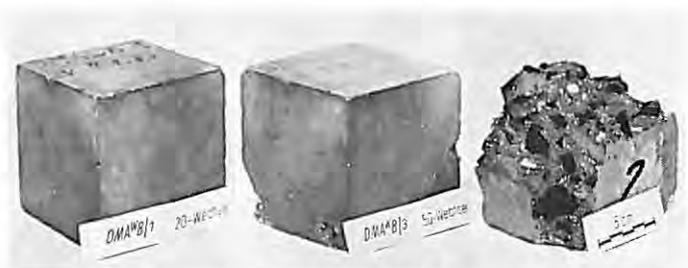


Bild 8 Betonwürfel nach 20 (links), 50 (Mitte) und 63 (rechts) Frost-Tau-Wechseln in gesättigter NaCl-Lösung

können allerdings sandreiche und grobkornarme Betone sowie Betone mit dickerer Feinmörtelschicht an der Oberfläche u. U. zu günstig beurteilt werden, weil der Massenverlust durch Abwittern auf den im Vergleich zur Praxis kleinen Prüfflächen augenscheinlich nicht erkannt wird, wenn die obere Zone gleichmäßig und ebenbleibend abwittert. Es ist daher notwendig, den Massenverlust durch Abwittern möglichst mit Meßverfahren zu bestimmen.

Da die Messung der Abwitterungstiefe jedoch erst zu einem späteren Zeitpunkt aufgenommen wurde, und zwar zunächst mit dem 12 Punkte-Meßverfahren und noch später mit dem 56 Punkte-Meßverfahren, liegen für diese Bestimmungen nur wenige Ergebnisse vor, und zwar vorwiegend für das 12 Punkte-Meßverfahren bei Prüfung im Betonalter von 1,5 Jahren. Aus diesem Grunde sind in Bild 9 nur für diese sicherlich zu ungünstigen Voraussetzungen Meßergebnisse aufgetragen. Die Abwitterungstiefe nahm je nach Beton unterschiedlich, stets aber kontinuierlich mit wachsender Zahl an Frost-Tau-Wechseln zu. Für gemessene Betone, die erfahrungsgemäß als Betone mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand gelten, lag die Abwitterungstiefe nach 100 Frost-Tau-Wechseln, gemessen mit dem 12 Punkte-Meßverfahren, bei Prüfung im Betonalter von 56 Tagen zwischen 0,3 und 1,9 mm und bei Prüfung im Betonalter von 1,5 Jahren zwischen 1,3 und 2,4 mm, für alle übrigen gemessenen Betone bei Prüfung im Betonalter von 1,5 Jahren zwischen 2,8 und 4,0 mm. Wenn auch diese Versuchsergebnisse für eine genauere Kennzeichnung des Betons mit dem Salzaufstreuverfahren noch nicht ausreichen, so zeichnet sich doch ab, daß für Betone mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand bei Prüfung im Betonalter von 56 Tagen mit 100 Frost-Tau-Wechseln der Beurteilungsgrad aufgrund augenscheinlicher Beurteilung höchstens 2 und die Abwitterungstiefe je nach Meßverfahren höchstens 2,0 bzw. 2,5 mm betragen sollte.

In Bild 10 sind Ergebnisse der mit dem 12 Punkte-Meßverfahren und der mit dem 56 Punkte-Meßverfahren ermittelten Abwitterungstiefe gegeneinander aufgetragen. Diese Darstellung macht deutlich, daß das 12 Punkte-Meßverfahren zu etwas größeren Abwitterungstiefen führt und etwas besser differenziert als das 56 Punkte-Meßverfahren. Für die gleichen Betone ergaben sich mit dem 12 Punkte-Meßverfahren Abwitterungstiefen bis zu etwa 4,0 mm und mit dem 56 Punkte-Meßverfahren Abwitterungstiefen bis zu etwa 2,3 mm.

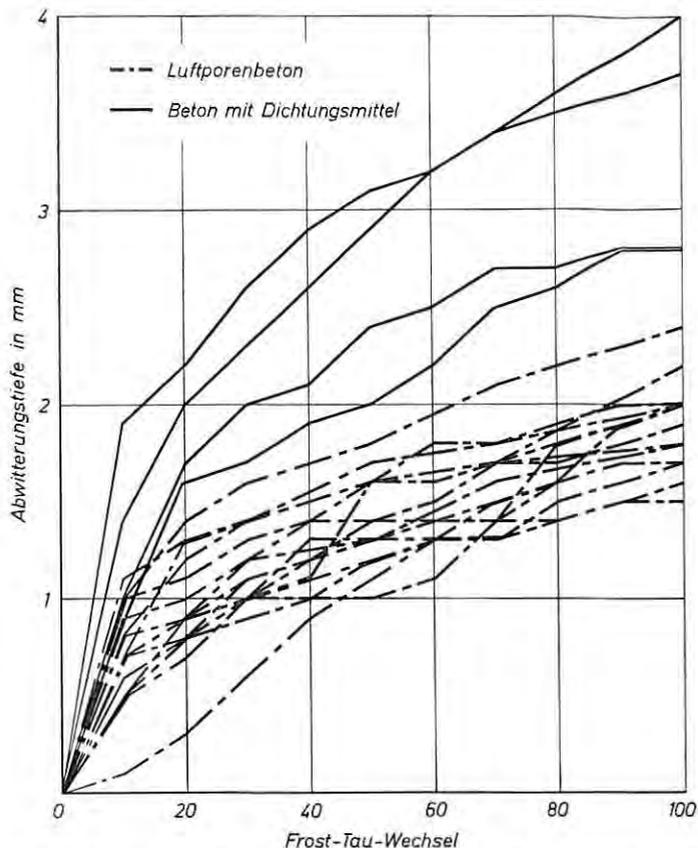


Bild 9 Abwitterungstiefe von Betonen unterschiedlicher Zusammensetzung bei Frost-Tausalz-Prüfung mit dem Salzaufstreuverfahren, bestimmt mit der 12 Punkte-Messung (Prüfbeginn im Alter von 1,5 Jahren)

Das 56 Punkte-Meßverfahren ist bei manueller Durchführung aufwendiger als das 12 Punkte-Meßverfahren. Es kann im Gegensatz zum 12 Punkte-Meßverfahren aber automatisiert werden, und es müßte auch besser reproduzierbar sein. Für eine Entscheidung, welchem der beiden Meßverfahren der Vorzug zu geben ist, sind noch mehr Versuchsergebnisse erforderlich.

Die Zusatzversuche zum Salzaufstreuverfahren, bei denen die Betonplatten zur Veränderung des Einflusses des Temperaturschocks nur bei -5°C eingefroren wurden, ergaben bei Betonplatten ohne ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand zu Anfang eine etwas stärkere Abwitterung als das Einfrieren bei -15°C . Diese Unterschiede waren jedoch spätestens nach 20 Frost-Tau-Wechseln nicht mehr vorhanden. Dieses Verfahren mit -5°C Frosttemperatur ist als Prüfverfahren weniger geeignet, weil Ungleichmäßigkeiten beim Salzaufstreuen und Schwankungen der Temperatur sich hier stärker auswirken und die Reproduzierbarkeit in Frage stellen.

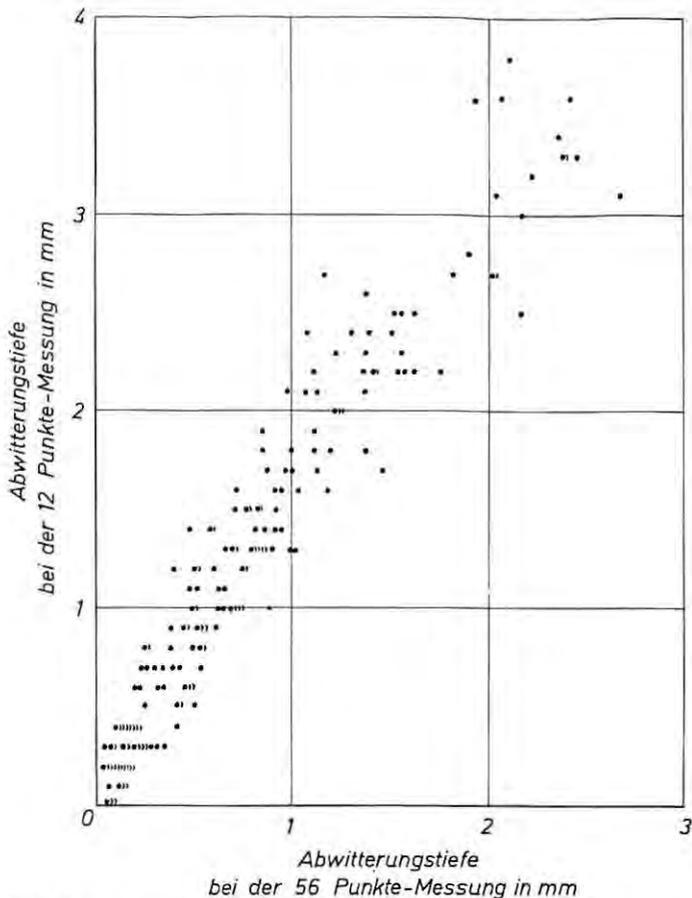


Bild 10 Abwitterungstiefe bei Frost-Tausalz-Prüfung mit dem Salzaufstreuverfahren, bestimmt mit der 12 Punkte-Messung und der 56 Punkte-Messung

4.1.3 Vergleich der Prüfverfahren für den Frost-Tausalz-Widerstand

Die Versuchsergebnisse bestätigen die frühere Feststellung, daß das Eintauchverfahren mit 3%iger NaCl-Lösung und das Salzaufstreuverfahren mit einer Einfriertemperatur von -15°C für die Prüfung des Betonverhaltens gegenüber Frost-Tausalz-Einwirkungen geeignet sind. Bei beiden Prüfverfahren nahm die Abwitterung kontinuierlich (stetig) mit der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel zu. Betone, die nach praktischen Erfahrungen aufgrund ihrer Zusammensetzung als Betone mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand gelten, verhielten sich bei beiden Verfahren deutlich besser als Betone, die erfahrungsgemäß keinen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand aufweisen. Die Abstufung der Ergebnisse zwischen verschiedenen Betonen war bei den Verfahren jedoch unterschiedlich. Wie auch aus den Tafeln 6a, 6b und 6c sowie aus den Bildern

7 und 9 hervorgeht, differenzierte das Eintauchverfahren wesentlich besser als das Salzaufstreuverfahren. Die Unterschiede des Verhaltens gegenüber Frost-Tausalz-Einwirkungen zwischen Betonen mit erfahrungsgemäß hohem und solchen mit erfahrungsgemäß nicht ausreichendem Frost-Tausalz-Widerstand waren insgesamt beim Eintauchverfahren deutlich ausgeprägter als beim Salzaufstreuverfahren.

Das Eintauchverfahren wird in der Regel (siehe auch Abschnitt 2.5) als das stärker beanspruchende Verfahren angesehen, u. a. weil die dabei geprüften Probekörper während der Frost-Tau-Wechsel nicht austrocknen können. Es kommt hinzu, daß sie durch das Einfrieren der sie allseitig umgebenden mindestens 1 cm dicken Wasserschicht von oben nach unten sowie von außen nach innen und durch den sich dabei bildenden Eismantel möglicherweise zusätzlich einem Flüssigkeitsdruck ausgesetzt und mechanisch beansprucht werden. Inwieweit dies zutrifft, ist mit den bisherigen Untersuchungen jedoch noch nicht genügend geklärt. Es muß auch noch untersucht werden, ob beim Salzaufstreuverfahren die oberflächennahen Schichten durch ein möglicherweise etwas weniger tiefes Eindringen der NaCl-Lösung in den Beton und die Wirkung des Temperaturschocks nicht doch stärker beansprucht werden können als beim Eintauchverfahren. Nach bisherigen Untersuchungsergebnissen (siehe auch Abschnitt 4.2) ist es nicht auszuschließen, daß sich dabei auch Dichtigkeitsunterschiede an sich dichter Betone auswirken und daß Luftporenbetone durch das Eintauchverfahren etwas begünstigt werden. Mit den noch ausstehenden Untersuchungen soll auch den Fragen weiter nachgegangen werden, welches Verfahren praxisnäher und welches Verfahren besser reproduzierbar ist.

4.1.4 Bedeutung der Frost-Tausalz-Prüfung

Die bisher erhaltenen Prüfergebnisse (siehe Tafeln 6a, 6b und 6c sowie Bilder 7 und 9) und die Ausführungen der Abschnitte 4.1.1 bis 4.1.3 machen deutlich, daß der Frost-Tausalz-Widerstand von Beton grundsätzlich eine prüfbare und mit Zahlenwerten beschreibbare Eigenschaft ist und daß mit den angewendeten Prüfverfahren Betone mit und ohne hohen Frost-Tausalz-Widerstand unterschieden werden können. Dadurch drängt sich der berechtigte Wunsch auf, den hohen Frost-Tausalz-Widerstand von Beton allgemeingültig durch Zahlenwerte zu beschreiben und zu begrenzen, die auf eines der beiden Prüfverfahren bezogen sind. Nach dem derzeitigen Erkenntnisstand ist dies leider immer noch nicht möglich. Unabhängig davon, daß dafür für das Salzaufstreuverfahren noch zu wenig Meßwerte vorliegen und die noch ausstehenden Versuchsergebnisse abgewartet werden müssen, ist auch zu berücksichtigen, daß die eigentliche Frost-Tausalz-Prüfung – besonders der Befrostungsvorgang in den Frostkammern oder Frosttrühen – noch nicht genügend festgelegt ist. Vergleichsversuche in verschiedenen Frosteinrichtungen führten zu erheblichen Versuchsstreuungen, die allgemeingültige Grenzwerte in Frage stellen, und bestätigten damit die Ergebnisse der zahlreichen bereits vor vielen Jahren in den USA durchgeführten Untersuchungen. Eine befrie-

digende Reproduzierbarkeit konnte bisher nur erreicht werden, wenn die Versuche mit derselben Befrostungseinrichtung und bei nahezu gleicher Belegung durchgeführt wurden. Aus diesen Gründen können für diese Prüfverfahren allgemeingültige quantitative Abnahmebedingungen noch nicht festgelegt werden und kann damit zur Zeit nur die Größenordnung des Betonverhaltens beurteilt werden.

4.2 Einfluß der Betonzusammensetzung auf den Frost-Tausalz-Widerstand

4.2.1 Luftporenbeton

Hoher Frost-Tausalz-Widerstand erfordert nach dem derzeitigen Erkenntnisstand (siehe auch Abschnitt 2) einen sachgerechten Luftporenbeton. Wie aus den Tafeln 6a und 6b sowie aus den Bildern 7 und 9 hervorgeht, verhielt sich dieser Luftporenbeton sowohl bei Prüfung mit dem Eintauchverfahren (3%ige NaCl-Lösung) als auch bei Prüfung mit dem Salzaufstreuverfahren (-15°C) gut und deutlich besser als alle anderen untersuchten Betone. Bei den im Betonalter von 56 Tagen bisher geprüften Probekörpern aus Luftporenbeton betrug der Gewichtsverlust (Eintauchverfahren) nach 100 Frost-Tau-Wechseln höchstens 2,0 Gew.-% und die Abwitterungstiefe (Salzaufstreuverfahren) nach 100 Frost-Tau-Wechseln höchstens 1,9 mm (12 Punkte-Messung) bzw. höchstens 0,6 mm (56 Punkte-Messung). Der entsprechende, aber nicht sehr zuverlässige Beurteilungsgrad aufgrund augenscheinlicher Beurteilung der Prüffläche der Betonplatten (Begründung siehe Abschnitt 4.1.3) lag vorwiegend zwischen 0 und 2 und erreichte nur in einzelnen Fällen 3. Bei der Prüfung in sehr spätem Alter von 1,5 Jahren fielen die entsprechenden Ergebnisse trotz der extrem ungünstigen Voraussetzungen nur etwas größer aus. Aber auch dann überschritt nach 100 Frost-Tau-Wechseln der Gewichtsverlust (Eintauchverfahren) — abgesehen von einer Ausnahme mit 4,4 — nicht 2,8 Gew.-%, der Beurteilungsgrad aufgrund augenscheinlicher Beurteilung der Platten nicht 3 und die Abwitterungstiefe (Salzaufstreuverfahren) nicht 2,4 mm (12 Punkte-Messung) bzw. nicht 1,3 mm (56 Punkte-Messung).

Der Frost-Tausalz-Widerstand des Luftporenbetons war meist etwas größer, wenn unter sonst gleichen Bedingungen die Festigkeit größer oder der Wasserzementwert kleiner war. Aber auch Betone der Festigkeitsklasse Bn 250 und Betone mit einem W/Z-Wert von 0,60 weisen danach einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand auf, wenn der Beton sachgerecht hergestellt wird und einen ausreichenden Luftgehalt, bestimmt am Frischbeton, aufweist. Im Bereich geringer und mittlerer Luftgehalte (etwa 3 bis 6%) fiel der Frost-Tausalz-Widerstand des Luftporenbetons unter sonst weitgehend gleichen Bedingungen mit zunehmendem Luftgehalt des Frischbetons meist etwas größer aus, im Bereich hoher Luftgehalte des Frischbetons jedoch nicht mehr. Aber auch Luftporenbetone mit einem Luftgehalt des Frischbetons von 2,7% ($W/Z = 0,45$) und von 3,0% ($W/Z = 0,53$) wiesen bei üblichen Feinmörtelgehalten einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand auf. Für den Luftporenbeton mit $W/Z = 0,60$ und einem Luftgehalt des Frischbetons von 3,0 bis 3,5% stehen die Ergebnisse noch aus.

Vorliegende Teilergebnisse der später angesetzten noch nicht abgeschlossenen Versuche mit verschiedenen Zementen weisen darauf hin (siehe dazu auch [22]), daß der Frost-Tausalz-Widerstand von Beton mit hüttensandreicherem Hochofenzement (Hüttensandgehalt größer als 60 Gew.-%) mit Hilfe von Luftporenbildenden Zusatzmitteln unter sonst gleichen Verhältnissen nicht in gleicher Weise verbessert werden kann wie der Frost-Tausalz-Widerstand von Beton mit Portlandzement. Die Prüfflächen von solchem Hochofenzement-Beton witterten bei Frost-Tausalz-Einwirkungen trotz eines ausreichenden Gehaltes an Mikroluftporen stärker ab, wenn der zu Beginn der Frostprüfung 56 Tage alte Beton vor der Frost-Tausalz-Prüfung nach der Feuchtlagerung 7 Tage an Raumluft austrocknen konnte. Bei Verwendung eines hüttensandarmen Hochofenzements (Hüttensandgehalt kleiner als 40 Gew.-%) traten diese Abwitterungen nicht auf und ergab sich ein Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand.

Wie aus Tafel 6a, Zeilen 4 und 5, hervorgeht, wiesen die den Luftporenbetonen der Zeilen 1 und 2 von Tafel 6a zuzuordnenden Nullbetone bei Prüfung mit dem Eintauchverfahren (3%ige NaCl-Lösung) um ein Vielfaches größere Gewichtsverluste als die Luftporenbetone auf. Bei Prüfbeginn im Betonalter von 56 Tagen betrug die Gewichtsverluste nach 100 Frost-Tau-Wechseln für den Nullbeton etwa gleichen W/Z-Wertes 12 bis 14 Gew.-% und für den Nullbeton etwa gleicher Festigkeit 27 bis 40 Gew.-%. Besonders bemerkenswert ist aber auch, daß der entsprechende Gewichtsverlust des Nullbetons bei Prüfung im Betonalter von 1,5 Jahren im Gegensatz zu dem des Luftporenbetons erheblich größer ausfiel als bei Prüfung im Betonalter von 56 Tagen. Alle untersuchten Nullbetone — sie hatten teilweise zwar eine hohe 28 Tage-Druckfestigkeit, aber stets einen W/Z-Wert von über 0,40 — wiesen keinen hohen Frost-Tausalz-Widerstand auf.

Die Beschaffenheit der durch 100 Frost-Tau-Wechsel mit dem Eintauchverfahren geprüften 10 cm-Würfel und mit dem Salzaufstreuverfahren geprüften Betonplatten geht aus den Bildern 11 bis 14 hervor.

4.2.2 *Fließbeton*

Die Ergebnisse der Zeilen 6 bis 8 von Tafel 6a bestätigten die bereits früher getroffene Feststellung, siehe u. a. [12] und [13], daß vom Fließbeton nur ein hoher Frost-Tausalz-Widerstand erwartet werden kann, wenn der Fließbeton außer dem Fließmittel ein Luftporenbildendes Zusatzmittel enthält und einen ausreichenden Gehalt an Mikroluftporen aufweist. Bei Prüfung mit dem Eintauchverfahren im Alter von 56 Tagen betrug der Gewichtsverlust nach 100 Frost-Tau-Wechseln für den Fließbeton mit ausreichendem Luftgehalt höchstens 0,7 Gew.-%, für den Fließbeton ohne Luftporenbildner 43 Gew.-% und für den Ausgangsbeton des Fließbetons (ohne Luftporenbildner) 25 Gew.-%. Der Beurteilungsgrad aufgrund augenscheinlicher Beurteilung der Betonplatten (Salzaufstreuverfahren) betrug nach 100 Frost-Tau-Wechseln beim Fließbeton mit ausreichendem Luftgehalt 1, beim Fließbeton (ohne Luftporenbildner) 5 und beim Ausgangsbeton des Fließbetons (ohne Luft-



Beton mit Luftporenbildner LMS



Nullbeton



Beton mit Dichtungsmittel DS



Beton mit Dichtungsmittel DA

Bild 11 Betone mit etwa gleichem Wasserzementwert nach 100 Frost-Tau-Wechseln mit dem Eintauchverfahren (Prüfbeginn im Alter von 56 Tagen)

porenbildner) 5. Von diesen drei Betonen wies nur der Fließbeton mit ausreichendem Luftgehalt (Tafel 6a, Zeile 8) einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand auf. Sowohl der Fließbeton ohne Luftporenbildner (Tafel 6a, Zeile 7) als auch der Ausgangsbeton des Fließbetons (Tafel 6a, Zeile 6) besaßen keinen hohen Frost-Tausalz-Widerstand. Bemerkenswert ist dabei allerdings noch, daß der Frost-Tausalz-Widerstand des Fließbetons ohne Luftporenbildner trotz praktisch gleicher Druckfestigkeit bei Prüfung mit dem Eintauchverfahren noch etwas geringer war als der des zugehörigen Ausgangsbetons (ohne Luftporenbildner).

Die Beschaffenheit der durch 100 Frost-Tau-Wechsel mit dem Eintauchverfahren geprüften 10 cm-Würfel und mit dem Salzaufstreufverfahren geprüften Betonplatten geht aus den Bildern 15 und 16 hervor.

4.2.3 Beton mit anderen Zusätzen

Die bisher vorliegenden Ergebnisse über Beton mit anderen Zusätzen gehen aus den Tafeln 6a, Zeilen 10 und 11, und 6b, Zeilen 6 bis 8, sowie aus den Bildern 7, 9, 11, 12, 13, 14, 17 und 18 hervor.



Beton mit Luftporenbildner LMS



Nullbeton



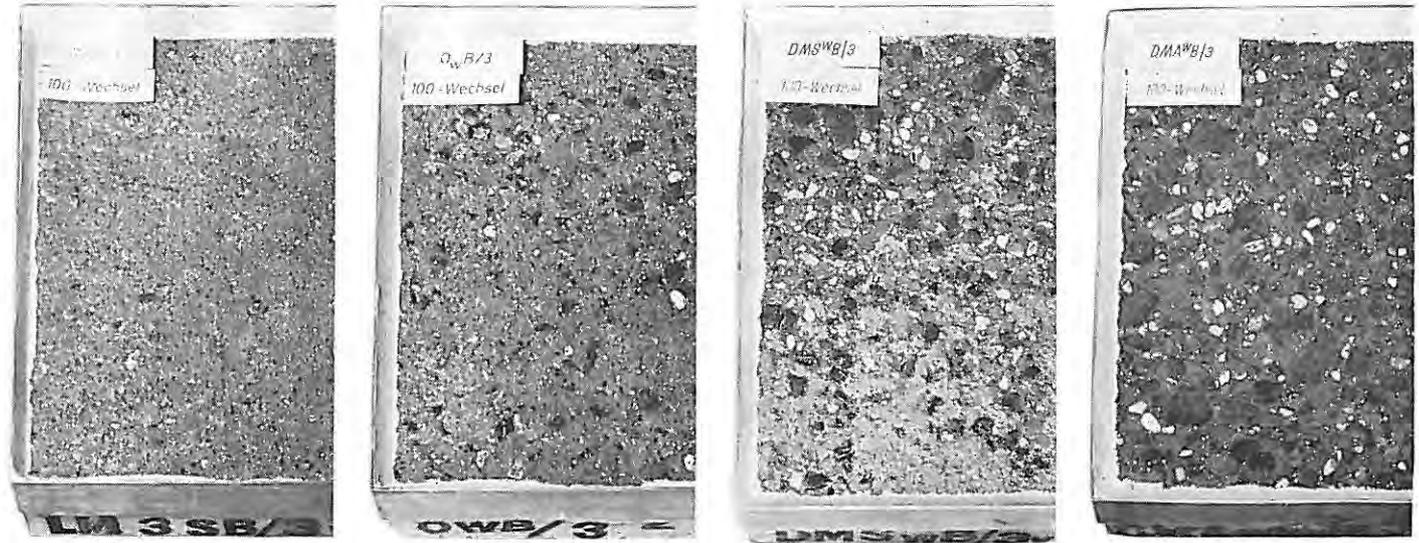
Beton mit Dichtungsmittel DS



Beton mit Dichtungsmittel DW

Bild 12 Betone mit etwa gleicher 28 Tage-Druckfestigkeit nach 100 Frost-Tau-Wechseln mit dem Eintauchverfahren (Prüfbeginn im Alter von 56 Tagen)

Bei Prüfung der Betone mit Dichtungsmitteln im Betonalter von 56 Tagen lag der Gewichtsverlust (Eintauchverfahren) nach 100 Frost-Tau-Wechseln insgesamt zwischen 9 und 34 Gew.-% und der Beurteilungsgrad aufgrund augenscheinlicher Beurteilung (Salzaufstreuverfahren) nach 100 Frost-Tau-Wechseln zwischen 3 und 5. Ein Vergleich dieser Werte mit den Ergebnissen der Luftporenbetone zeigt, daß selbst die kleineren Gewichtsverluste der Betone mit Dichtungsmitteln bereits ein Vielfaches der größeren Gewichtsverluste der Luftporenbetone ausmachen, siehe u. a. Tafel 6a und Bild 7. Auch die Beurteilungsgrade aufgrund augenscheinlicher Beurteilung und — soweit Ergebnisse bereits vorliegen — die gemessenen Abwitterungstiefen des Salzaufstreuverfahrens waren bei den Versuchen mit Dichtungsmitteln deutlich größer als bei den Luftporenbetonen, siehe Tafel 6a und Bild 9. Alle Betone mit Dichtungsmitteln wiesen keinen hohen Frost-Tausalz-Widerstand auf. Aus Tafel 6a, Zeilen 10 und 11, sowie aus Bild 7 geht jedoch hervor, daß die Abwitterungsergebnisse der Betone mit Dichtungsmitteln sich über einen weiten Bereich erstrecken. In der Regel zeigten Betone mit kleinerem W/Z-Wert ein besseres Ergebnis als Betone mit größerem W/Z-Wert und Betone mit dem



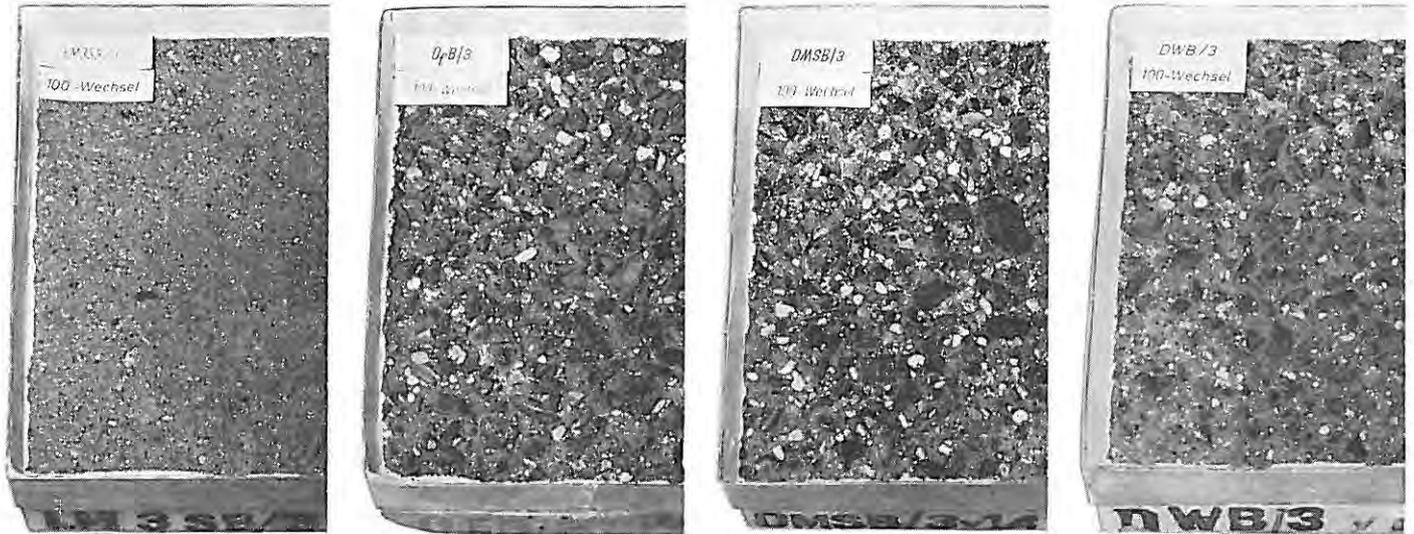
Beton mit Luftporenbildner LMS

Nullbeton

Beton mit Dichtungsmittel DS

Beton mit Dichtungsmittel DA

Bild 13 Betone mit etwa gleichem Wassermenge-Wert nach 100 Frost-Tau-Wechseln mit dem Salzaufstreuverfahren (Prüfbeginn im Alter von 56 Tagen) – jeweils linke Plattenhälfte



Beton mit Luftporenbildner LMS

Nullbeton

Beton mit Dichtungsmittel DS

Beton mit Dichtungsmittel DW

Bild 14 Betone mit etwa gleicher 28 Tage-Druckfestigkeit nach 100 Frost-Tau-Wechseln mit dem Salzaufstreuverfahren (Prüfbeginn im Alter von 56 Tagen) – jeweils linke Plattenhälfte

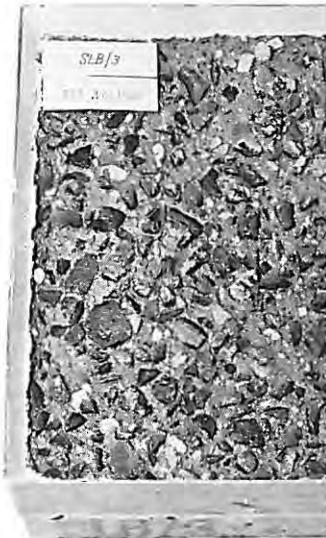


Fließbeton



Fließbeton mit Luftporen

Bild 15 Betone mit etwa gleichem Wasserzementwert nach 100 Frost-Tau-Wechseln mit dem Eintauchverfahren (Prüfbeginn im Alter von 56 Tagen)



Fließbeton



Fließbeton mit Luftporen

Bild 16 Betone mit etwa gleichem Wasserzementwert nach 100 Frost-Tau-Wechseln mit dem Salzaufstreuverfahren (Prüfbeginn im Alter von 56 Tagen) – jeweils linke Plattenhälfte

hydrophobierenden Dichtungsmittel DS ein besseres Ergebnis als Betone mit anderen hydrophobierenden Dichtungsmitteln oder mit anders wirkenden Dichtungsmitteln.

Zur Verdeutlichung dieser Aussage ist in den Bildern 17 und 18 der Gewichtsverlust (Eintauchverfahren) unmittelbar vergleichbarer Betone aufgetragen, die sich lediglich durch das Zusatzmittel unterscheiden. Dabei wiesen die Nullbetone und die Betone mit Dichtungsmitteln des Bildes 17 etwa gleichen W/Z-Wert und die Null-

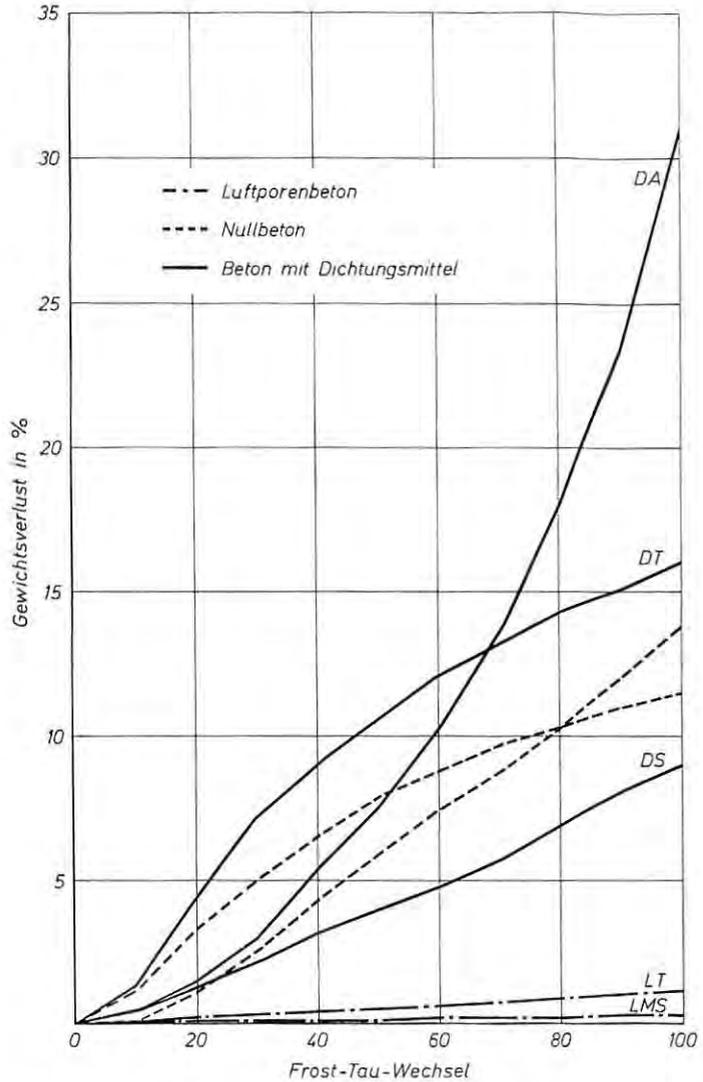


Bild 17 Gewichtsverlust von Betonen mit etwa gleichem Wasserzementwert (W/Z etwa 0,44) und unterschiedlichen Zusatzmitteln (Tafel 4) bei Frost-Tausalz-Prüfung mit dem Eintauchverfahren (Prüfbeginn im Alter von 56 Tagen)

betone und die Betone mit Dichtungsmitteln des Bildes 18 etwa gleiche 28 Tage-Druckfestigkeit wie die dazugehörigen Luftporenbetone auf. Bei gleichem W/Z-Wert (siehe Bild 17) verhielt sich der Beton mit dem hydrophobierenden Dichtungsmittel DS zwar etwas besser als die entsprechenden Nullbetone und deutlich besser als der Beton mit dem nichthydrophobierenden Dichtungsmittel DT und der Beton mit dem hydrophobierenden Dichtungsmittel DA,

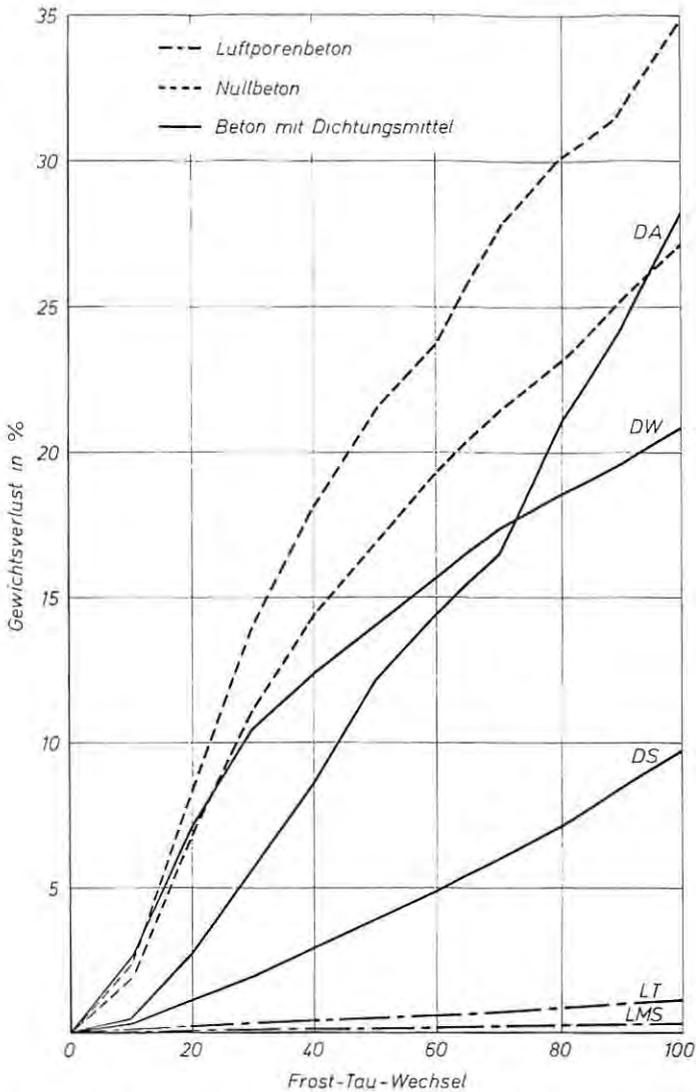


Bild 18 Gewichtsverlust von Betonen mit etwa gleicher 28 Tage-Druckfestigkeit (β_{w28} etwa 50 N/mm²) und unterschiedlichen Zusatzmitteln (Tafel 4) bei Frost-Tausalz-Prüfung mit dem Eintauchverfahren (Prüfbeginn im Alter von 56 Tagen)

aber deutlich schlechter als die Luftporenbetone. Bei etwa gleicher 28 Tage-Druckfestigkeit verhielt sich der Beton mit dem hydrophobierenden Dichtungsmittel DS zwar viel besser als der Beton mit dem hydrophobierenden Dichtungsmittel DA, der Beton mit dem nichthydrophobierenden Dichtungsmittel DW und die dazugehörigen Nullbetone, aber ebenfalls deutlich schlechter als die Luftporenbetone. Geht man davon aus, daß die Dichtungsmittel DT

und DW praktisch Betonverflüssiger sind und daß die damit hergestellten Betone (Beton mit dem Dichtungsmittel DT in Bild 17, Beton mit dem Dichtungsmittel DW in Bild 18) unter den Bedingungen in den Bildern 17 und 18 (gleicher W/Z-Wert bzw. gleiche Festigkeit) bei Vergleich mit den übrigen Betonen ebenfalls als Nullbetone betrachtet werden können, so kann aus den Versuchen für die Betone mit Dichtungsmitteln im Grunde genommen keine verbessernde Wirkung auf den Frost-Tausalz-Widerstand abgeleitet werden. Eine Ausnahme macht hier nur der Beton mit Dichtungsmittel DS bei einem W/Z-Wert von 0,55 (Bild 18). Aber auch die Betone mit Dichtungsmittel DS wiesen keinen hohen Frost-Tausalz-Widerstand auf, da ihre Abwitterung bei Prüfung sowohl mit dem Eintauchverfahren als auch mit dem Salzaufstreuverfahren bereits zu groß war.

Die Beschaffenheit der durch 100 Frost-Tau-Wechsel mit dem Eintauchverfahren geprüften 10 cm-Würfel und mit dem Salzaufstreuverfahren geprüften Platten aus Beton mit Dichtungsmitteln geht aus den Bildern 11 bis 14 hervor.

Die lediglich orientierenden Versuche mit den Betonen der Zeilen 7 und 8 von Tafel 5b deuten an (siehe auch Tafel 6b, Zeilen 7 und 8), daß mit den Sonderzusatzmitteln LJ und LK, die ebenfalls Mikroporen bzw. zusammendrückbare kleine Hohlkugeln in den Beton einführen, bei ausreichendem Abstandsfaktor ein Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand hergestellt werden kann. Zur endgültigen Klärung ihrer Eignung sind jedoch weitere Versuche erforderlich.

4.2.4 Luftporenmörtel

Die Ergebnisse der lediglich orientierenden Frost-Tausalz-Versuche mit Luftporenmörteln, wie sie z. B. für Ausbesserungs- oder Verstärkungsarbeiten im Straßen- oder Brückenbau verwendet werden, gehen aus Tafel 6c hervor. Insgesamt lag der Luftgehalt des Frischmörtels zwischen 7,6 und 9,9 % und die 28 Tage-Druckfestigkeit zwischen 37 und 53 N/mm² *). Nach 50 Frost-Tau-Wechseln lag der Gewichtsverlust bei Prüfung mit dem Eintauchverfahren (3%ige NaCl-Lösung) zwischen 0,1 und 0,3 Gew.-%, der Beurteilungsgrad der Platten aufgrund augenscheinlicher Beurteilung bei 1 und die Abwitterungstiefe bei Prüfung mit dem Salzaufstreuverfahren zwischen 0,5 und 1,2 mm (12 Punkte-Messung) bzw. zwischen 0,4 und 0,8 mm (56 Punkte-Messung). Alle untersuchten Luftporenmörtel besaßen einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand.

4.3 Luftporenkennwerte

4.3.1 Zusammenhang zwischen Frost-Tausalz-Widerstand und Abstandsfaktor

In Abschnitt 4.2.1 ist festgestellt worden, daß alle untersuchten Luftporenbetone bei Prüfung sowohl mit dem Eintauchverfahren (3%ige NaCl-Lösung) als auch mit dem Salzaufstreuverfahren einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand aufwiesen, wenn die Mindestanforderungen an den Luftgehalt des Frischbetons nicht unter-

*) Aus kp/cm² im Verhältnis 10:1 umgerechnet und auf ganze Zahlen gerundet.

schritten wurden. In Bild 19 ist nun der Gewichtsverlust nach 100 Frost-Tau-Wechseln (Eintauchverfahren) in Abhängigkeit vom Abstandsfaktor für alle untersuchten Betone (soweit Ergebnisse vorliegen) aufgetragen. Die Ergebnisse machen deutlich, daß alle untersuchten Betone mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand einen kleineren Abstandsfaktor als 0,25 mm hatten, d. h. sachgerechte Luftporenbetone waren, und daß der in der Bundesrepublik Deutschland für den Abstandsfaktor festgelegte Höchstwert von 0,20 mm richtig gewählt ist, da Betone mit einem Abstandsfaktor von 0,25 mm bereits einen nicht ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand aufweisen können.

4.3.2 Vergleich der unterschiedlichen Luftporenkennwerte

Zur Beurteilung der Bedeutung und der Aussagekraft der meist-herausgestellten Luftporenkennwerte wurden sie systematisch miteinander verglichen. Dabei ergab sich, daß der Luftgehalt des Frischbetons L_d im allgemeinen etwas geringer war als der mikroskopisch am Festbeton bestimmte Luftgehalt L_a , bei dessen Bestimmung nur kugelige und annähernd kugelige Poren mit einem Durchmesser bis zu etwa 4 mm (siehe Abschn. 4.3.3) berücksichtigt wurden. Dieser Unterschied könnte auf Verdichtungsunterschiede im Luftporentopf und in den Betonplatten, aus denen die untersuchten Festbetonproben stammten, sowie darauf zurückzuführen sein, daß bei Prüfung des Luftgehalts des Festbetons die nahe der Herstellungsoberseite liegende, porenangereicherte Schicht einbezogen worden ist und daß bei der Luftgehaltsbestimmung am Frischbeton einige Poren mit Wasser gefüllt waren. Der Zusammen-

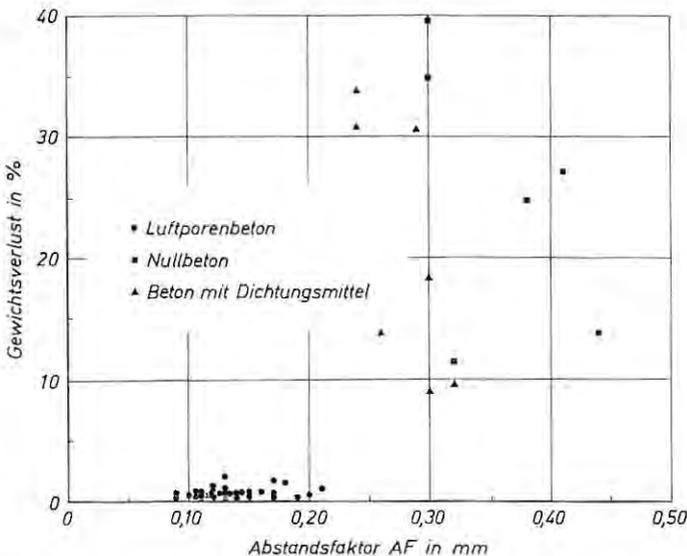


Bild 19 Gewichtsverlust bei Frost-Tausalz-Prüfung mit dem Eintauchverfahren in Abhängigkeit vom Abstandsfaktor AF für Betone unterschiedlicher Zusammensetzung

hang zwischen Luftgehalt des Frischbetons L_d und Luftgehalt des Festbetons L_o läßt sich für die untersuchten Betone mit 32 mm Zuschlaggrößtkorn bei einem Bestimmtheitsmaß von $B = 0,83$ mit folgender Regressionsgeraden darstellen:

$$L_d = 0,841 \cdot L_o + 0,17$$

Für eine möglichst frühzeitige Beurteilung des jeweils hergestellten Betons ist es von besonderer Bedeutung, ob ein Luftporenbeton mit einem für hohen Frost-Tausalz-Widerstand mindestens geforderten Luftgehalt des Frischbetons einen nicht zu großen Abstands faktor AF in Abhängigkeit vom Luftgehalt des Frischbetons L_d für alle untersuchten Betone (soweit Ergebnisse vorliegen) aufgetragen. Diese Darstellung macht deutlich, daß Betone mit 32 mm Zuschlaggrößtkorn nur bei einem Luftgehalt des Frischbetons L_d von mindestens 3,0% einen ausreichend kleinen Abstands faktor AF, d. h. einen ausreichend großen Gehalt an Mikroporen, aufweisen. Der für hohen Frost-Tausalz-Widerstand festgelegte Grenzwert des Abstands faktors von 0,20 mm wurde nur in einem Fall geringfügig überschritten, und zwar bei einem nicht ausreichend verdichteten Beton mit einem Zuschlaggemisch etwa in der Mitte des Sieblinienbereiches B/C 32. Aus den Ergebnissen des Bildes 20 kann abgeleitet werden, daß bei Einhaltung der in den Betonbestimmungen für den Luftgehalt des Frischbetons festgelegten Anforderungen der größtzulässige Abstands faktor nicht überschritten und der erforderliche Gehalt an Mikroporen nicht unterschritten wird. Der Luftgehalt des Frischbetons ist für den Mikroluftporengehalt allerdings nur dann ein ausreichender Beurteilungsmaßstab, wenn auch

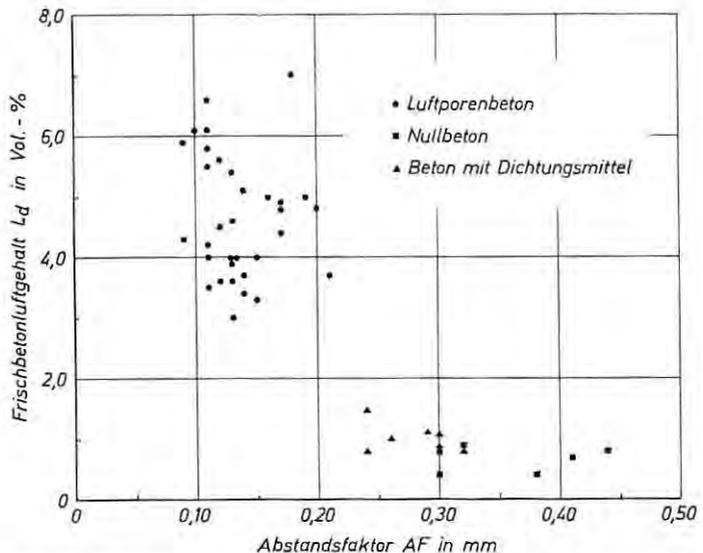


Bild 20 Abstands faktor AF in Abhängigkeit vom Luftgehalt des Frischbetons L_d für Betone unterschiedlicher Zusammensetzung

der Beton im Luftporentopf praktisch vollständig verdichtet wird. Sehr nachteilig kann es sich auswirken, wenn der Beton zur Nachprüfung des Frischbetonluftgehaltes nur wenig und zur Nachprüfung der Festigkeit sehr stark verdichtet wird. Diese Hinweise über das Verdichten sind besonders auch bei Fließbeton zu beachten. Es ist nicht ausreichend, den Fließbeton nur in den Luftporentopf einzufüllen. Er muß im Luftporentopf durch intensives Stochern oder leichtes Rütteln verdichtet werden.

Da verschiedentlich auch der Teilluftgehalt des Betons, d. h. der Mikroluftporengehalt (der Gehalt an kleinen Poren bis zu einer bestimmten Größe), für eine Beurteilung des Frost-Tausalz-Widerstandes herangezogen wird, wurde auch der Zusammenhang zwischen Abstandsfaktor und Mikroluftporengehalt betrachtet. In diese Betrachtung wurden die Mikroluftporengehalte L 300 (Gehalt aller Mikroluftporen bis 300 μm), L 200 (Gehalt aller Mikroluftporen bis 200 μm) und L 100 (Gehalt aller Mikroluftporen bis 100 μm) einbezogen. Der Zusammenhang zwischen Abstandsfaktor AF und dem bei uns gebräuchlichen Mikroluftporengehalt L 300 ist für alle untersuchten Betone (soweit Ergebnisse vorliegen) und für im Forschungsinstitut der Zementindustrie durchgeführte Routineuntersuchungen in Bild 21 aufgetragen.

Aus der Darstellung geht hervor, daß im allgemeinen ein Abstandsfaktor AF von 0,20 mm nicht überschritten wurde, wenn der Mikroluftporengehalt L 300 beim Beton mit 32 mm Zuschlaggrößtkorn mindestens 1,5 % betrug. Ein Vergleich des Abstandsfaktors mit den anderen Mikroluftporengehalten ergab, daß die Korrelation zwischen Abstandsfaktor und Mikroluftporengehalt L 200 bzw. L 100

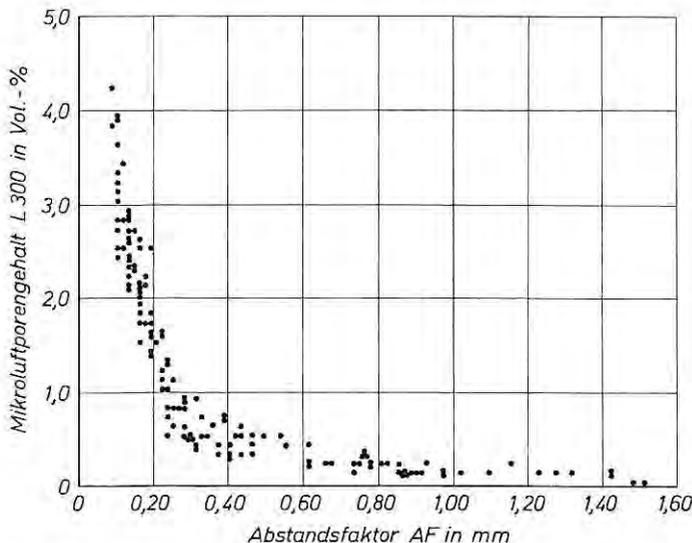


Bild 21 Abstandsfaktor AF in Abhängigkeit vom Mikroluftporengehalt L 300 für Betone unterschiedlicher Zusammensetzung (mit und ohne Luftporenbildner)

ebenso gut ist wie zwischen Abstandsfaktor und Mikroluftporengehalt L 300. Der Zusammenhang zwischen Abstandsfaktor AF und den Mikroluftporengehalten L 300, L 200 und L 100 läßt sich durch folgende Regressionskurven darstellen (B = Bestimmtheitsmaß):

$$L\ 300 = \frac{0,381}{AF} - 0,38 \quad B = 0,94$$

$$L\ 200 = \frac{0,299}{AF} - 0,37 \quad B = 0,94$$

$$L\ 100 = \frac{0,148}{AF} - 0,20 \quad B = 0,95$$

4.3.3 Einflüsse bei der Bestimmung der Luftporenkennwerte des Festbetons

Der in der Bundesrepublik Deutschland für Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand festgelegte Grenzwert des Abstandsfaktors von 0,20 mm beruht u. a. darauf, daß auf einer Meßstrecke von 4 m mit einer rd. 150fachen Vergrößerung kugelige und annähernd kugelige Poren mit einer Sehnenlänge auf der Meßlinie von rd. 0,005 mm bis zu 4 mm ausgezählt werden.

Unregelmäßig geformte bizarre Poren sollen nicht einbezogen werden, weil für diese Hohlräume die Bestimmungsvoraussetzungen nicht erfüllt sind und weil sich dadurch die Reproduzierbarkeit des Bestimmungsverfahrens verschlechtern würde, siehe auch [6, 33]. Durch eine Einbeziehung dieser bizarren Poren wäre auch eine bessere Übereinstimmung zwischen dem am Frischbeton und dem am Festbeton bestimmten Luftgehalt nicht zu erwarten, weil die bizarren Poren teilweise im Frischbeton mit Wasser gefüllt oder teilweise erst beim Heraussägen bzw. Schleifen der Festbetonprobe entstanden sein können. Da die der Bestimmung der Luftporenkennwerte zugrunde liegende Porenverteilungswahrscheinlichkeit vom Ergebnis des Auszählens beeinflußt wird, kann der Abstandsfaktor durch eine zusätzliche Erfassung der bizarren Poren vergrößert werden. Die Erfassung der bizarren Poren wird daher in der Regel die Aussagekraft des Abstandsfaktors als Maß für den wirksamen Mikroluftporengehalt verschlechtern.

Für eine gute Reproduzierbarkeit bei der Bestimmung der Luftporenkennwerte und damit auch für eine gleichmäßige Aussage ist stets eine etwa gleiche Vergrößerung der zu untersuchenden Betonfläche anzustreben. Aus diesem Grunde wird im Forschungsinstitut der Zementindustrie seit rd. 15 Jahren dafür ein Stereomikroskop mit 144facher Vergrößerung angewendet. Entsprechende Vergleichsversuche ergaben, daß eine Verringerung der Vergrößerung von 144fach auf 72fach eine Vergrößerung des Abstandsfaktors um etwa 0,01 bis 0,03 mm zur Folge hat, siehe auch [33]. Zur Erleichterung des Auszählens der Poren wird teilweise die betreffende Betonfläche mit Hilfe einer Fernsehkamera auf einen Monitor übertragen. Der sich dabei ergebende Nachteil, daß dann für das Auszählen kein Stereobild und im allgemeinen auch kein Farbbild zur Verfügung stehen, kann durch eine entsprechend größere Vergrößerung ausgeglichen werden. Vergleichsversuche ergaben für

Beton mit einem Luftgehalt bis zu 6% keine signifikanten Unterschiede zwischen Ergebnissen, die mit Stereomikroskop und 144-facher Vergrößerung ermittelt wurden, und solchen, bei denen die Betonfläche mit rd. 190-facher Vergrößerung auf einen Fernsehschirm übertragen wurde. In den Wirksamkeitsprüfrichtlinien [18] oder in einer für diese Bestimmung gesondert aufgestellten Richt-

Tafel 7 Regressionsgeraden für Luftporengehalte des Festbetons L_a und Abstandsfaktoren AF bei verschiedenen großen Meßstrecken (Bezugsstrecke 4 m) und dazugehörige Bestimmtheitsmaße

Meßstrecke m	Luftporengehalt des Festbetons Vol.-%		Abstandsfaktor mm	
	Regressionsgerade	Bestimmtheitsmaß	Regressionsgerade	Bestimmtheitsmaß
1,0	$L_a = 0,956 L_a(1\text{ m}) + 0,21$	0,94	$AF = 0,867 AF(1\text{ m}) + 0,024$	0,90
2,0	$L_a = 0,972 L_a(2\text{ m}) + 0,11$	0,98	$AF = 0,976 AF(2\text{ m}) + 0,005$	0,98
2,5	$L_a = 0,993 L_a(2,5\text{ m}) + 0,03$	0,99	$AF = 0,991 AF(2,5\text{ m}) + 0,001$	0,99
3,0	$L_a = 1,003 L_a(3\text{ m}) - 0,01$	0,99	$AF = 0,994 AF(3\text{ m})$	0,99

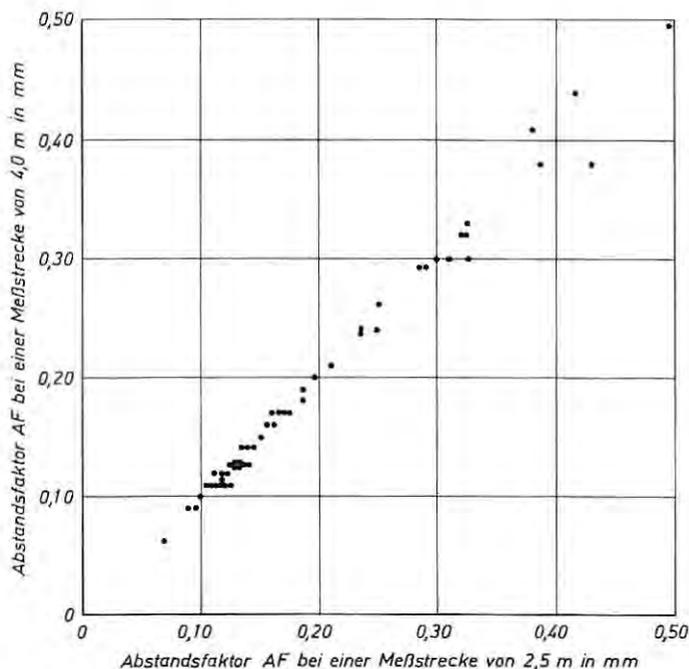


Bild 22 Zusammenhang zwischen den Abstandsfaktoren AF bei Meßstrecken von 4,0 m und 2,5 m für Betone unterschiedlicher Zusammensetzung (mit und ohne Luftporenbildner)

linie müssen diese Zusammenhänge berücksichtigt und vereinheitlicht werden.

Zur Vereinfachung der Bestimmung der Luftporenkennwerte wurde die auszuzählende Meßstrecke in den Wirksamkeitsprüfrichtlinien [18] von 4 m auf 2,40 m ermäßigt, siehe hierzu auch [33]. Aus diesem Grunde wurde auch die Frage untersucht, ob dies ohne Verschlechterung der Reproduzierbarkeit möglich ist. Bei diesen Untersuchungen wurde die Gesamtstrecke von 4 m in einzelne Meßabschnitte zerlegt, so daß die Luftporenkennwerte der 4 m-Strecke und der Teilstrecken 1 m, 2 m, 2,5 m und 3 m bestimmt werden konnten. Für den Abstandsfaktor AF und den Luftgehalt L_a des Festbetons wurden lineare Regressionen zwischen Ergebnissen der Teilstrecken und der 4 m-Strecke errechnet. Die Ergebnisse sind in Tafel 7 zusammengestellt. Sie zeigen, daß die für die Teilstrecken von 2,5 m oder von 3 m gewonnenen Ergebnisse sehr gut mit den Ergebnissen der 4 m-Strecke übereinstimmen und daß auch die 2 m-Meßstrecke noch genügend genaue Ergebnisse liefert. Dies geht auch aus Bild 22 hervor, in dem die bei einer Meßstrecke von 4 m und bei einer Teilstrecke von 2,5 m ermittelten Abstandsfaktoren gegeneinander aufgetragen sind.

5. Zusammenfassung und Folgerungen

Die im Forschungsinstitut der Zementindustrie über den Frost-Tausalz-Widerstand durchgeführten Untersuchungen, die insbesondere die Art der Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes, den Einfluß der Betonzusammensetzung und die Bestimmung sowie die Bedeutung der Luftporenkennwerte betreffen, ergaben folgendes:

5.1 Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes

5.1.1 Für die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton sind das Eintauchverfahren in 3%ige NaCl-Lösung (Abschnitt 3.2.4.1) und das Salzaufstreuverfahren (Abschnitt 3.2.4.2) geeignet. Prüfverfahren, die mit gesättigter NaCl-Lösung arbeiten, haben sich dagegen als nicht brauchbar erwiesen.

5.1.2 Für beide Prüfverfahren wurden Bestimmungsverfahren entwickelt, mit denen der jeweils vorhandene Frost-Tausalz-Widerstand quantitativ erfaßt und beschrieben werden kann. Eine befriedigende Reproduzierbarkeit konnte bisher jedoch nur erreicht werden, wenn die Versuche mit derselben Versuchseinrichtung und mit nahezu gleicher Belegung der Frostkammern durchgeführt wurden. Daher können für diese Prüfverfahren allgemeingültige quantitative Beurteilungskriterien noch nicht festgelegt und kann damit zur Zeit nur die Größenordnung des Betonverhaltens erfaßt werden.

5.2 Einfluß der Betonzusammensetzung

5.2.1 Sachgerechter Luftporenbeton verhielt sich sowohl bei Prüfung mit dem Eintauchverfahren als auch bei Prüfung mit dem Salzaufstreuverfahren gut und deutlich besser als alle anderen untersuchten Betone. Der Frost-Tausalz-Widerstand üblichen Luftporenbetons war größer, wenn der Wasserzementwert unter sonst

gleichen Bedingungen kleiner war. Jedoch wiesen auch Luftporenbetone der Festigkeitsklasse B_n 250 und Luftporenbetone mit einem W/Z-Wert von 0,60 einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand auf.

5.2.2 Die dem Luftporenbeton zuzuordnenden Nullbetone wiesen sowohl bei Prüfung mit dem Eintauchverfahren als auch bei Prüfung mit dem Salzaufstreuverfahren keinen hohen Frost-Tausalz-Widerstand auf. Der Frost-Tausalz-Widerstand war jedoch beim Nullbeton, der gleichen W/Z-Wert wie der Luftporenbeton aufwies, deutlich größer als beim Nullbeton, der etwa gleiche 28 Tage-Druckfestigkeit wie der LP-Beton hatte.

5.2.3 Vorliegende Teilergebnisse der noch nicht abgeschlossenen Versuche weisen darauf hin, daß Luftporenbeton mit hüttensandreicherem Hochofenzement (Hüttensandgehalt > 60 Gew.-%) trotz eines ausreichenden Mikroluftporengehaltes einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand nicht aufweist.

5.2.4 Von Fließbeton kann ein hoher Frost-Tausalz-Widerstand nur erwartet werden, wenn der Fließbeton einen ausreichenden Gehalt an Mikroluftporen besitzt.

5.2.5 Alle untersuchten Betone mit einem Dichtungsmittel wiesen sowohl bei Prüfung mit dem Eintauchverfahren als auch bei Prüfung mit dem Salzaufstreuverfahren keinen hohen Frost-Tausalz-Widerstand auf. Betone mit hydrophobierendem Dichtungsmittel verhielten sich jedoch teilweise etwas besser als Betone mit nicht-hydrophobierendem Dichtungsmittel sowie bei größerem W/Z-Wert (0,55) teilweise besser und bei kleinem W/Z-Wert (0,43) etwa gleich oder schlechter als Nullbetone gleichen W/Z-Wertes.

5.2.6 Auch sachgerechte Zementmörtel haben bei ausreichendem Gehalt an Mikroporen einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand.

5.3 Bedeutung und Bestimmung der Luftporenkennwerte

5.3.1 Mit den am Festbeton ermittelten Luftporenkennwerten kann das Vorhandensein eines ausreichenden Gehaltes an Mikroluftporen beurteilt werden. Bei Prüfung sowohl mit dem Eintauchverfahren als auch mit dem Salzaufstreuverfahren wiesen Betone einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand auf, deren Abstandsfaktor 0,20 mm nicht überschritt.

5.3.2 Der Luftgehalt des Frischbetons L_d war bei diesen Versuchen im allgemeinen etwas kleiner als der Luftgehalt des Festbetons L_a . Ihr Zusammenhang läßt sich für Beton mit 32 mm-Zuschlaggrößtkorn bei einem Bestimmtheitsmaß von $B = 0,83$ durch die Gleichung $L_d = 0,841 \cdot L_a + 0,17$ darstellen.

5.3.3 Beton mit einem für hohen Frost-Tausalz-Widerstand mindestens geforderten Luftgehalt des Frischbetons wies – abgesehen von einer Ausnahme bei einem nicht ausreichend verdichteten Beton – stets einen Abstandsfaktor von höchstens 0,20 mm auf. Der Luftgehalt des Frischbetons ist jedoch nur dann ein Maß für den Mikroluftporengehalt des Luftporenbetons, wenn der Beton für die Prüfung des Frischbeton-Luftgehaltes ausreichend verdichtet worden ist. Dies gilt besonders auch für Fließbeton.

5.3.4 Ein ausreichender Gehalt an Mikroporen kann auch mit den Mikroluftporengehalten L 300, L 200 oder L 100 beurteilt werden. Der Zusammenhang mit dem Abstandsfaktor AF war bei den Mikroluftporengehalten L 200 und L 100 ebenso gut wie bei dem Mikroluftporengehalt L 300.

5.3.5 Für die Bestimmung der Luftporenkennwerte erwies sich eine Meßstrecke von 2,40 m als ausreichend; die Vergrößerung der zu untersuchenden Betonflächen muß noch einheitlich festgelegt werden. Unregelmäßig geformte Poren und größere Poren als 4 mm sollten nicht mit ausgezählt werden, da sie das Ergebnis verändern und die Aussagekraft des Ergebnisses verschlechtern können.

SCHRIFTTUM

- [1] Setzer, M. J.: Einfluß des Wassergehaltes auf die Eigenschaften des erhärteten Betons. Thermodynamische Modelle. Habilitationsschrift TU München, 1976.
- [2] Merkblatt für Maßnahmen gegen Winterglätte auf Straßen (Ausgabe 1969). Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Köln.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Bonzel, J.: Beton mit hohem Frost- und Tausalzwiderstand. beton 15 (1965) H. 11, S. 469/474, und H. 12, S. 509/515; ebenso Betontechnische Berichte 1965, Beton-Verlag, Düsseldorf 1966, S. 185/216.
- [6] Schäfer, A.: Frostwiderstand und Porengefüge des Betons. Beziehungen und Prüfverfahren. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 167, Berlin 1965, S. 3/57.
- [7] Walz, K., und H. Helms-Derfert: Luftporenkennwerte von Betonfahrbahndecken — Einfluß auf das Abwilttern durch Tausalze. beton 16 (1966) H. 4, S. 155/159; ebenso Betontechnische Berichte 1966, Beton-Verlag, Düsseldorf 1967, S. 75/87.
- [8] Blümel, O. W., und R. Springenschmid: Grundlagen und Praxis der Herstellung und Überwachung von Luftporenbeton. Berichte des 1. Europäischen Symposiums für Betonfahrbahnen, Vol. 1, Cembureau, Paris 1968.
- [9] Bonzel, J.: Beton mit hohem Frost- und Tausalzwiderstand. Berichte des 2. Europäischen Symposiums über Betonstraßen, Bern, Juni 1973, Vol. 1; ebenso Betonwerk + Fertigteil-Technik 39 (1973) H. 12, S. 888/894.
- [10] Technische Vorschriften und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton, Ausgabe 1972 (TV Beton 72). Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn.
- [11] Richtlinien für die Zuteilung von Prüfzeichen für Betonzusatzmittel (Fassung März 1973). Mitteilungen des Instituts für Bautechnik 4 (1973) Nr. 3, S. 86/88.
- [12] Bonzel, J., und E. Siebel: Fließbeton und seine Anwendungsmöglichkeiten. beton 24 (1974) H. 1, S. 20/24, und H. 2, S. 59/63; ebenso Betontechnische Berichte 1974, Beton-Verlag, Düsseldorf 1975, S. 21/44.

- [13] Richtlinien für die Herstellung und Verarbeitung von Fließbeton (Fassung Mai 1974). beton 24 (1974) H. 9, S. 342/344; ebenso Betontechnische Berichte 1974, Beton-Verlag, Düsseldorf 1975, S. 143/149.
- [14] 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 1965, Beton-Verlag, Düsseldorf 1966, S. 161/184.
- [15] Nischer, P.: Herstellung und Überwachung von Luftporenbeton bei Betonsteinen. Betonwerk + Fertigteil-Technik 40 (1974) H. 12, S. 761/765.
- [16] Merkblatt für die Verwendung von Luftporenbildnern für Beton. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Köln (in Vorbereitung).
- [17] Manns, W.: Bemerkungen zum Abstandsfaktor als Kennwert für den Frostwiderstand von Beton. beton 20 (1970) H. 6, S. 253/255; ebenso Betontechnische Berichte 1970, Beton-Verlag, Düsseldorf 1971, S. 89/94.
- [18] Richtlinien für die Prüfung der Wirksamkeit von Betonzusatzmitteln (Fassung Oktober 1974) und Erläuterungen von K. Walz. Mitteilungen des Instituts für Bautechnik 6 (1975) Nr. 7, S. 10/14 und S. 19/20.
- [19] Lusche, M.: Ein neues Gerät zur Bestimmung von Luftporenkennwerten am erhärteten Beton. Materialprüfung 16 (1974) Nr. 4, S. 106/109.
- [20] Verbeck, E. J., und P. Klieger: Studies of salt scaling of concrete. Highway Research Board Bulletin 150, Washington D.C. 1957, S. 1/13.
- [21] Dobrolubov, G., und B. Romer: Schnellmethode zur Bestimmung der Frost- oder Frost-Tausalz-Beständigkeit von Beton nach dem DR-Verfahren. Betonstraßen, Mitteilungsblatt der Betonstraßen A.G. Wildegg, Nr. 88/89, Juli/Oktober 1971.
- [22] Kop, A. R., und P. E. Vogelaar: Vorst-do oizontschade aan betonoppervlakken. Cement 27 (1975) H. 4, S. 141/147.
- [23] RILEM RECOMMENDATION „Method of freeze-thaw testing of concrete“. RC 5/75-1379 (R2); Mai 1975.
- [24] ONORM B 3306. Prüfung der Frost-Tausalz-Beständigkeit von Betonoberflächen. Mai 1973.
- [25] Bisher nicht veröffentlichte Ergebnisse eines Ringversuchs verschiedener Prüfstellen.
- [26] Wersé, H. P.: Prüfung des Frost- und Tausalz-Widerstandes des Betons von Brückenkappen. Betonwerk+Fertigteil-Technik 42 (1976) H. 1, S. 24/28, und H. 2, S. 93/96.
- [27] Schubert, P., und H. P. Lühr: Zur Prüfung von Betonwaren für den Straßenbau auf Frost- und Tausalz-Widerstand. Betonwerk+Fertigteil-Technik 42 (1976) H. 11, S. 546/550, und H. 12, S. 604/608.
- [28] Depke, S. M.: Hydrophobierter Beton. Betonwerk + Fertigteil-Technik 38 (1972) H. 3, S. 148/153.
- [29] Horstschäfer, H.-J.: Neuere Erkenntnisse über Dichtungsmittel. Haus der Technik, Vortragsveröffentlichungen, H. 352, Vulkan-Verlag Dr. W. Classen, Essen 1975, S. 34/40.
- [30] Bonzel, J., und J. Dahms: Zur Prüfung des Frostwiderstandes von Betonzuschlag. beton 26 (1976) H. 5, S. 172/175, und H. 6, S. 206/211; ebenso Betontechnische Berichte 1976, Beton-Verlag, Düsseldorf 1977, S. 79/106.
- [31] ASTM C 457-71. Standard Recommended Practice for microscopical determination of air-void content and parameters of the air-void system in hardened concrete.
- [32] Dixon, W. J. (Ed.): BMD – Biomedical computer programs. 2. Aufl., University of California Press, Berkeley/Los Angeles 1968.
- [33] Sommer, H.: Zur mikroskopischen Ermittlung der Luftporenkennwerte an erhärtetem Straßenbeton. Dissertation TU Wien 1975.