

6 1637

# Betonstraßen und Tausalzeinwirkung

Von Kurt Walz und Rupert Springenschmid, Düsseldorf

## Übersicht

*Zur Vermeidung von Abwitterungen auf Betonfahrbahnen, die im Winter mit Tausalzen bestreut werden, hat sich nach vielen Laboratoriumsuntersuchungen und dem Verhalten langjähriger Beobachtungsstrecken die Verwendung von luftporenbildenden Zusatzmitteln als sichere Maßnahme erwiesen.*

*Die Wirkungsweise der Luftporen ist hinreichend geklärt. Sie verhindern, daß Sprengkräfte durch das in den Kapillarporen des Betons gefrierende Wasser und durch die Salzlösung entstehen. Die Abwitterung durch Tausalze ist auf sehr komplexe physikalische sowie chemisch-physikalische Vorgänge und zum geringsten Teil — wenn überhaupt — auf einen rein chemischen Angriff zurückzuführen.*

*Vorschriftsmäßiger Straßenbeton mit ausreichendem Tausalzwiderstand erfordert für deutsche Verhältnisse einen Mindestluftgehalt im Meßgerät von 3,5%. Der Luftgehalt muß sorgfältig eingestellt, zuverlässig eingehalten und laufend überwacht werden. Der durch ein LP-Zusatzmittel entstehende Luftgehalt ist von der Mischungszusammensetzung und von äußeren Einflüssen (u. a. Temperatur) abhängig. Nur durch Vorversuche und laufende Messung des Luftgehalts kann festgestellt werden, wie groß die Zusatzmenge zur Einhaltung des vorgeesehenen Luftgehalts von Fall zu Fall sein muß.*

## 1. Einführung

Auf Betonstraßen oder Betonbelägen kann an der Oberfläche der Mörtel an einzelnen Stellen oder großflächig abwittern, wenn Tausalze bei der Winterwartung gestreut werden. Da man über die Entstehung solcher Schäden und über ihre Verhinderung immer wieder sehr unterschiedlichen Auffassungen begegnet, sei im folgenden eine gedrängte Darstellung des Sachverhaltes gebracht. Es ist nicht möglich, alle hier zur Verfügung stehenden Unterlagen im einzelnen zu nennen, denn es ist kaum auf einem Gebiet der Betontechnologie soviel untersucht worden wie hier. Dazu wird auf die bis 1954 reichende Literaturbearbeitung unter [1], S. 58/94, und unter [22] sowie auf spätere nordamerikanische und schwedische Veröffentlichungen verwiesen. (Im folgenden werden nur einige neuere Untersuchungen, die zu einzelnen Fragen besonders kennzeichnende Ergebnisse lieferten, direkt angezogen.)

Seit etwa 1938 haben in den Vereinigten Staaten Betontechnologen, Chemiker und Physiker die Wirkung von Tausalzen auf Straßenbeton und die Verhinderung der durch Tausalze verursachten Abwitterungen untersucht. Ausgang waren Beobachtun-

gen an einigen Betonstraßen, bei denen durch die Winterwartung mit Tausalzen auffallenderweise keine oder nur eine unbedeutende Abwitterung an der Straßenoberfläche auftrat. Man fand bei näherer Untersuchung, daß der Beton dieser Decken zahlreiche, feinste Luftporen im Feinmörtel enthielt, die zufällig durch natürliche oder künstliche Fremdstoffe des Zements erzeugt wurden. So widersinnig es zunächst erschien, daß gerade Luftporen den Widerstand des Betons erhöhten, so überzeugend waren doch die Beweise dafür, die die wissenschaftliche Erklärung, Versuche im Laboratorium und das Verhalten von Versuchsstrecken nach und nach lieferten. Die Folge war, daß Luftporenbildner schon vor 20 Jahren im amerikanischen Betonstraßenbau weitgehend verwendet wurden. Eine vom Highway Research Board (Washington) vor etwa 2 Jahren bei allen 51 Highway Departments angestellte Umfrage [2] ergab, daß nunmehr 50 Straßenbauverwaltungen der einzelnen Bundesstaaten LP-Beton für Straßen verwenden.

In Deutschland wurde die Verwendung luftporenbildender Zusatzmittel („LP-Zusatzmittel“) 1953 durch ein Merkblatt der Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen gefördert [3]. In der Praxis wurde der darin als notwendig angegebene Luftgehalt jedoch oft gar nicht nachgeprüft und wahrscheinlich auch häufig unterschritten.

Auch wenn die Befahrbarkeit der Decke durch das Abwittern selten in störendem Maße leidet, so regen die Abwitterungen doch immer wieder dazu an, Theorien und Abhilfemaßnahmen von mehr oder weniger zufälligen Beobachtungen abzuleiten, die aber meist an den eigentlichen Zusammenhängen vorbeigehen. Da fundierte Erkenntnisse aus zahlreichen exakten Untersuchungen zur Verfügung stehen, sollte man sich allerorts von diesen leiten lassen und den daraus entwickelten Stand der Technik zur Verhinderung von Tausalzschäden ernstlich beachten:

*Will man Tausalzschäden bei Betonfahrbahnen verhindern, so ist dies in einfacher Weise mit Sicherheit nur möglich, wenn der Beton mit einem ausreichenden Gehalt sehr kleiner, fein verteilter, künstlich erzeugter Luftporen hergestellt wird.*

## **2. Frost- und Tausalzbeständigkeit**

### **2.1 Frost**

Für Verkehrsflächen wird je nach Beanspruchung durch den Verkehr heute Beton mit einer Güte zwischen B 300 und B 450 verlangt (Würfeldruckfestigkeit nach 28 Tagen). Beton in diesem Gütebereich ist in unserem Klima *frostbeständig*, wenn

an oder nahe der oberen Fläche keine ausfrierenden Zuschlagkörper (z. B. aus stark wassersaugendem Gestein) anstehen, eine wasserreiche, dicke Schlammeschicht an der Oberfläche vermieden wird und

– bei jungem Beton – vor der ersten Frosteinwirkung einmal trockene Witterung herrschte, um die von der Herstellung noch vorhandene, praktisch vollständige Wassersättigung zu unterbrechen.

## 2.2 Tausalze

Um Schneeglätte oder Glatteis auf der Straßenoberfläche zum Schmelzen zu bringen, abzustumpfen oder vorsorglich zu verhindern, wird in zunehmendem Maße das gegenüber Beton chemisch neutrale Steinsalz (Natriumchlorid) oder seltener das teurere, unter diesen Umständen ebenfalls chemisch nicht angreifende Calciumchlorid in Form von feinem Gekörn verwendet<sup>1)</sup>.

Der Vorgang, der zur Abwitterung einer Betondecke durch wiederholtes Aufstreuen von Tausalzen führt, ist noch nicht vollständig geklärt. Feststeht, daß es sich um physikalische und chemisch-physikalische Wirkungen handelt und daß ein Beton, der in unserem Klima frostbeständig ist (siehe unter 2.1), bei Tausalzeinwirkung trotzdem abwittern kann.

Hierfür sind mehrere, sehr komplexe Vorgänge verantwortlich zu machen: Tausalze, die bekanntlich den Gefrierpunkt des Wassers stark herabsetzen – darauf beruht ihre Wirkung –, entziehen die Schmelzwärme der Eisschicht sowie dem Beton und kühlen dabei die gefrorene oder mit ihrer Temperatur nahe dem Gefrierpunkt liegende Betonoberfläche rasch weiter ab (Abschreckeffekt). Dies ist mit Temperaturspannungen, deren Größe vom Gefüge, von der Wärmedehnzahl und dem Elastizitätsmodul des Betons abhängt, verbunden.

Außerdem gefriert dadurch aber auch das im Beton noch in den feinsten Poren vorhandene, bis dahin flüssig gebliebene Wasser. (Der Gefrierpunkt dieses Wassers in den feinsten Kapillarporen liegt wegen der großen Oberflächenkräfte und der im Wasser gelösten Stoffe – Kalkhydrat, Alkalien aus dem Zement, Tausalze vorausgegangener Streuungen – tiefer als der Gefrierpunkt gewöhnlichen Wassers. Der Gefrierpunkt eines Teils des Wassers im Kapillarsystem liegt außerdem tiefer, weil das bereits in den größeren Kapillarporen gebildete Eis das in den feineren Kapillarporen noch nicht gefrorene Wasser unter Druck setzt.) Wenn daher das noch nicht gefrorene Kapillarwasser durch das Streuen von Tausalzen plötzlich weiter abgekühlt wird und ebenfalls gefriert, entstehen sprunghaft zusätzliche, starke Spannungen.

Diese beiden Vorgänge können nach mehr oder weniger häufiger Wiederholung zu Lockerungen oder Absprengungen an der Deckenoberfläche führen.

Die Beanspruchung wird offenbar durch osmotische und Kristallisations-Vorgänge noch verstärkt. Im Beton mit seinen halbdurchlässigen Porenwänden kann beim Eindringen von Wasser in Poren, in denen sich von vorausgegangenen Streuungen schon Salz befindet, beim dann einsetzenden Konzentrationsausgleich (Osmose) ebenfalls ein Druck entstehen. Durch Abkühlung konzentrierter Salzlösung im Beton oder Wechsel zwischen Durchtränken und Trocknen kann es in den Poren andererseits zum

<sup>1)</sup> Magnesiumchlorid, das in [4] auch als Tausalz genannt ist, wird hier nicht erwähnt, weil es auch durch eine rein chemische Wirkung den Zementstein zerstört und weil noch nicht hinreichend geklärt ist, ob schon allein dadurch bei häufiger Anwendung als Tausalz im Laufe der Zeit Schäden zu erwarten sind.

Auskristallisieren von Salz kommen, was ebenfalls Sprengkräfte hervorruft. (Es ist – wie schwedische Untersuchungen zeigten [5] – nicht erforderlich, daß auf dem Beton eine Eisschicht aufgetaut wird. Abwittern trat auch durch Calciumchloridlösungen ein, wenn der Beton in der Lösung häufigen Frostwechseln zwischen Zimmertemperatur und  $-25^{\circ}\text{C}$  ausgesetzt wurde; ein parallel hierzu durchgeführtes Gefrieren in reinem Wasser führte dabei zu keinem nennenswerten Abwittern. – Ebenso wurde ein Abwittern und Abschalen erhalten, siehe [1], S. 15, wenn eine starke Calciumchloridlösung in häufigem Wechsel zwischen Durchfeuchten und Trocknen auf die Betonoberfläche einwirkte.)

Die Schädigung des Betons durch die Winterwartung mit Tausalzen dürfte weitgehend abhängen von der herrschenden Temperatur und dem Verhältnis von Salzmenge zu Eis, vom Salzgehalt der Poren aus vorausgegangenen Streuungen, vom Anteil des Porenraums, der sich vor dem Gefrieren und der Salzstreuung unter natürlichen Bedingungen mit Wasser vollgesaugt hat, sowie von der Häufigkeit der Salzstreuung und des zwischenzeitlichen Abtrocknens der Betonoberfläche. Aus praktischen Beobachtungen ergibt sich auch, daß gleicher Beton, der z. B. dauernd im Schatten liegt und daher zwischendurch nicht austrocknet, im allgemeinen mehr gefährdet ist, weil er sich zunehmend mehr mit Wasser sättigt. Solcher Beton wird von Frost mit Tausalzeinwirkung in weitgehend wassersattem Zustand öfter getroffen als ein wegen seiner Lage häufig austrocknender Beton, der dann auch bei Schneefall oder Bildung von Glatteis nicht immer wassersatt sein wird.

Es ist unwahrscheinlich, daß die Bildung von Doppelsalzen aus den Zementphasen und dem Chlorid, also eine chemische Umsetzung, maßgeblich am Zerstörungsvorgang beteiligt ist. Wäre dies der Fall, dann könnten Luftporen nicht diesen hervorragenden Schutz abgeben. Auch Harnstoff, der zweifellos keine chemisch schädliche Wirkung auf Beton auszuüben vermag, lieferte beim Auftauen von Eisschichten im Laboratorium [6, 7] gleichartige Abwitterungen an der Betonoberfläche wie Calciumchlorid.

Im Grunde führt sowohl die Tausalzeinwirkung als auch das Gefrieren ohne Tausalze zu inneren Druckspannungen. Beim Gefrieren mit gleichzeitiger Tausalzeinwirkung treten jedoch noch weitere, ebenfalls wie gefrierendes Wasser wirkende Kräfte auf, so daß Beton bei Frost-Tausalzeinwirkung mehr beansprucht wird als durch das in den Poren gefrierende Wasser allein. Da beim Gefrieren mit und ohne Tausalzeinwirkung der gleiche Mechanismus der Zerstörung vorliegt, wird auch die günstige Wirkung der Luftporen bei Tausalzeinwirkung verständlich.

### **3. Wirkungsweise der Luftporen und Luftgehalt**

#### **3.1 Wirkungsweise**

Normaler, gut verdichteter Frischbeton enthält in der Regel etwa 0,5 bis 1,5% natürliche Luftporen. Diese vereinzelt vorhandenen Poren sind überwiegend mit dem bloßen Auge er-

kennbar (Durchmesser bis zu mehreren Millimetern). Sie entstehen, weil beim üblichen Verdichten eingemischte oder im lose geschütteten Beton eingeschlossene Luft nicht restlos entweicht. Diese verhältnismäßig großen Poren spielen für das Verhalten des Betons gegenüber Frost und Tausalzen keine wesentliche Rolle.

Durch Frost-Tauversuche und mikroskopische Untersuchungen am erhärteten Beton<sup>2)</sup> stellte man fest [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14], daß die Beständigkeit des Betons mit der Zahl und dem Kleinerwerden des Durchmessers der künstlich erzeugten Luftporen sowie mit dem Gesamtluftgehalt zunahm. Als kennzeichnende Größen stellten sich der Abstandsfaktor und die spezifische Oberfläche der Luftporen heraus. Der Abstandsfaktor ist annähernd der Mittelwert der Abstände der von den Rändern der nächstliegenden Luftporen am weitesten entfernten Punkte des Zementsteins. Je kleiner er ist, desto größer fällt der Frost- und Tausalzwiderstand aus. Betone mit ausreichender Beständigkeit haben einen Abstandsfaktor von höchstens 0,1 bis 0,2 mm.

Bei gleichem Luftgehalt ist deshalb eine geringe Zahl größerer Poren bei weitem nicht so wirkungsvoll wie eine große Zahl kleinerer Poren. Die besonders wirksamen Poren haben Durchmesser von höchstens 0,2 mm. Mit guten LP-Zusatzmitteln entstehen Poren, deren Durchmesser vorwiegend unterhalb dieser Grenze liegen.

Die Luftporen füllen sich bei Durchfeuchten des Betons nicht mit Wasser und unterbrechen dadurch das mit Wasser gefüllte oder sich vollsaugende Kapillarsystem im Zementstein. Gefriert nun das Wasser in einem Zementstein mit vielen kleinen Luftporen oder wirken die anderen unter 2.2 beschriebenen Sprengkräfte, so steigen der Preßdruck im Zementstein und die dadurch hervorgerufene Dehnung des Betons nicht oder nur wenig an, weil Wasser in die luftgefüllten Poren entweichen kann. Der luftdurchsetzte Zementstein unterliegt daher keinem inneren Sprengdruck und zertreibt das Betongefüge nicht, siehe Bild 1 [15]. Beim Auftauen wird das Wasser durch die zusammengepreßte Porenluft wieder in die Kapillarporen zurückgedrückt und auch durch die Kapillarkräfte infolge Raumverminderung des schmelzenden Eises zurückgesaugt.

### 3.2 Luftgehalt

Am frischen Straßenbeton können nur der Luftgehalt und nicht die Porenzahl, die spezifische Oberfläche oder der Abstandsfaktor gemessen werden. Werden luftporenbildende Zusatzmittel verwendet, die die amtliche Prüfung bestanden haben, dann kann jedoch vorausgesetzt werden, daß mit dem erforderlichen Mindestluftgehalt (siehe auch unter 4.1) auch eine ausreichend große Zahl feiner Luftporen vorhanden ist.

Durch ein geeignetes (zugelassenes) LP-Zusatzmittel entstehen die wirksamen, sehr kleinen Poren, während die im Beton ohne

<sup>2)</sup> An Schlifren des erhärteten Betons werden mit Hilfe eines Mikroskopes und zwischengeschalteter Meß- und Zählleinrichtung der Luftgehalt sowie die Porenzahl, -größe und -verteilung bestimmt. (Über eine solche, elektronisch registrierende Einrichtung verfügt in Deutschland z. B. das Forschungsinstitut der Zementindustrie.)

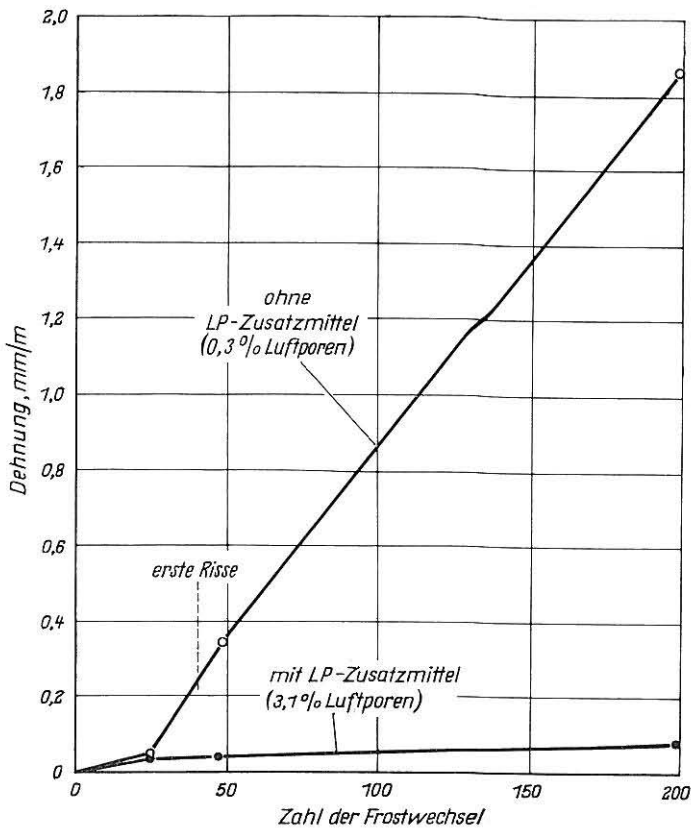


Bild 1 Dehnung von durchfeuchteten Betonprismen 10 cm · 10 cm · 56 cm ohne und mit künstlichen Luftporen durch Frost-Tau-Wechsel [15]

LP-Zusatzmittel vorhandenen, natürlichen, unwirksamen Luftporen nicht mehr oder nur in kleiner Menge auftreten. Zur Beurteilung der Schutzwirkung eines LP-Zusatzmittels kann also vom gesamten Luftgehalt des LP-Betons ausgegangen werden.

Da die Luftporen den Zementstein schützen müssen, hängt der für einen Beton erforderliche Luftgehalt (Raum-%) im Grunde vom Volumen des Zementleims (Zementsteins) im Beton ab. Beton mit einem Größtkorn von z. B. 30 mm enthält weniger Zementleim als Beton mit einem Größtkorn von nur 15 mm, der deshalb einen höheren LP-Gehalt erfordert, um den gleichen Frostwiderstand wie der Beton mit 30 mm Größtkorn zu erreichen. Zur Vereinfachung legt man hiernach den LP-Gehalt in Abhängigkeit vom Größtkorn des Betons fest.

Für Straßenbeton mit stetigem Kornaufbau und üblicher Konsistenz ist unter deutschen Verhältnissen (Klima und Tausalzmenge) ein Porengehalt des Betons nach dem Mischen von mindestens 3,5% erforderlich. (In den Grenzen der für Straßenbeton vorgeschriebenen Zusammensetzung beträgt dann der Luftgehalt im Zementleim rd. 13%.) In den USA [16, 17] und in

Schweden [18] setzt man den Luftgehalt höher an; dort wird für den Beton ein Mindestluftgehalt von 4 bis 5% empfohlen. (Über den Luftgehalt des Betons nach dem Einbau siehe unter 5.2.)

### 3.3 Festbeton-Eigenschaften

Durch den Gehalt an Luftporen werden die Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit des Betons nicht oder nur unwesentlich vermindert, sofern bei gleichbleibendem Zementgehalt der Wasserzusatz herabgesetzt wird. Dies ist möglich, weil die Luftporen die Verarbeitbarkeit des Betons verbessern; siehe auch unter 5.1.

Durch einen Luftgehalt von 3,5% bis 4,5% wird die Biegeelastizität sowie die Bruchdehnung nicht deutlich verändert [19, 20] und die Dauerfestigkeit des Betons nicht nachteilig beeinflusst [21]. Die Luftporen wirken sich auch auf die Raumänderungen des Betons durch Feuchtigkeits- oder Temperaturwechsel nicht merkbar aus [22].

Unter sonst gleichen Verhältnissen ist bei etwa gleicher Festigkeit der Abnutzungswiderstand des LP-Betons gleich groß wie der des Betons ohne künstliche Luftporen [16].

## 4. Praktische Erfahrungen mit LP-Straßenbeton

### 4.1 Schäden

Immer wieder konnte festgestellt werden, daß andere als LP-Zusatzmittel oder nicht amtlich zugelassene LP-Zusatzmittel für tausalzbeanspruchten Straßenbeton verwendet wurden. Bei amtlich zugelassenen LP-Zusatzmitteln hat man durch die bei der Zulassungsprüfung bestandene Frostprüfung die Gewähr, daß das LP-Zusatzmittel im Vergleich zum O-Beton den Widerstand des Betons gegen Frost-Tauwechsel und damit auch gegen die Tausalzeinwirkung grundsätzlich erhöht und in den untersuchten Grenzen keine schädliche Wirkung auf andere Betoneigenschaften ausübt. Aber selbst auf Strecken, wo amtlich zugelassene LP-Zusatzmittel verwendet wurden – wie dies seit 1953 mit der Einführung des „Vorläufigen Merkblatts“ [3] geschehen sollte –, sind Abwitterungen aufgetreten. Soweit nachprüfbar, wurde häufig die Zugabemenge nicht so gewählt, daß bei der im Zulassungsbescheid vorgeschriebenen, vorausgehenden Eignungsprüfung des Betons der erforderliche Mindestluftgehalt von 3,5% erreicht worden ist. Vielfach wurde lediglich eine mittlere, im Prospekt der Lieferfirma empfohlene Zusatzmenge ohne Nachprüfung des entstandenen Luftgehalts zugegeben. Es wurde auch beobachtet, daß die Eignungsprüfung ohne ein LP-Zusatzmittel durchgeführt und ein „Zusatzmittel“ erst auf der Baustelle zugesetzt wurde. Da dann durch die Zugabe des LP-Zusatzmittels ein Absinken der Festigkeit gegenüber der Festigkeit der Eignungsprüfung befürchtet wurde, hielt man auch aus diesem Grunde die Zugabemenge klein. Häufig wollte man gegen Tausalzschäden etwas unternehmen, aber doch nicht mit aller Konsequenz, die hier nun einmal nötig ist, um den Erfolg zu sichern.

Abwitterungen können unabhängig von Güte und Alter des Betons der Fahrbahndecke auftreten; bei Beton hoher Güte allerdings meist nicht so ausgeprägt, weil eine volle oder weit-

gehende Wassersättigung bei ihm weniger häufig ist, wie auch bei altem Beton, dessen Oberfläche durch Öl und Gummibtrieb gedichtet wurde.

Abwitterungen traten auch hin und wieder auf Standspuren auf. Für diese ist Beton B 300 vorgeschrieben. Bei hoher Normenfestigkeit des Straßenbauzements kann B 300 schon mit einem verhältnismäßig geringen Zementgehalt und hohem Wasserzementwert erzielt werden. Die Folge ist, daß sich dieser Beton rascher und häufiger mit Wasser vollsaugt als der Deckenbeton. Oft war der Beton der Standspuren mit bis zu 4% Eisenoxidschwarz eingefärbt, das in dieser Menge die Luftporenbildung schon stark hemmt (siehe 5.1). Das LP-Zusatzmittel wurde auch hier meistens nicht auf den erforderlichen Luftgehalt abgestimmt und dieser bei der Ausführung nicht nachgeprüft. Ein Schutz der Standspur durch ausreichenden Luftgehalt ist auf diese Weise nicht erreicht worden, obwohl er dort besonders wichtig ist, da der Beton der Standspur durch das abfließende und bei Schneematsch sich stauende Schmelzwasser eher noch stärker und nachhaltiger durchfeuchtet wird als der Beton der Fahrspur. Die Folge waren Abwitterungen durch abgeschleuderte Tausalze auch auf der Standspur. Der Beton der Standspur soll daher mindestens den gleichen Luftporengehalt wie der Fahrbahndeckenbeton aufweisen.

Den angeführten Ausführungsmängeln dürfte in Zukunft dadurch mehr Einhalt geboten werden, daß in der neuen Ausgabe der „Richtlinien für den Bau von Betonfahrbahnen“ auf der Baustelle täglich mindestens eine zweimalige Prüfung des Luftporengehaltes verlangt wird, außerdem immer dann, wenn ein veränderter Einfluß der Mischungszusammensetzung und der Baustellenverhältnisse anzunehmen ist (siehe auch Abschnitt 5).

## 4.2 Versuchsstrecken und deutsche Erfahrungen

Hier sei das Ergebnis nur einiger der bekanntesten langjährigen Versuchsstrecken erwähnt. Schon kurz nach der Veröffentlichung der ersten Untersuchungen über die Schutzwirkung der Luftporen ist im Jahre 1940 im Staate Michigan eine 12,3 km lange Versuchsstrecke gebaut worden [23]. Die Strecke enthielt Abschnitte ohne und solche mit LP-Beton. Der Luftgehalt von 3 bis 4% entstand durch Verwendung von 2 verschiedenen LP-Zusatzmitteln. Die vergleichbaren Abschnitte dieser Versuchsstrecke wurden zunächst einer besonders starken Tausalzstreuung ausgesetzt.

Nach 2 Wintern zeigte sich bereits, daß der Beton ohne Luftporen erheblich abwitterte, während der mit Luftporen ohne Veränderung geblieben war. Nach diesem Ergebnis wurden schon ab 1943 für alle Betonstraßen im Staate Michigan LP-Zusatzmittel vorgeschrieben. Die erhöhte Tausalzstreuung wurde daraufhin eingestellt und die Straße in den folgenden Jahren wie üblich – für unsere Verhältnisse sehr ausgiebig – im Winter mit Salz bestreut. Nach 20jähriger Liegedauer war der Befund sinngemäß ähnlich wie nach 2 Jahren.

Drei weitere Versuchsstrecken wurden im Rahmen der „Long-Time Study“ gebaut. Von diesen ist die 1942 fertiggestellte, 4,2 km lange Strecke in Allentown im Staate New York besonders aufschlußreich, weil sie kalten Wintern mit vielen Tausalzstreu-





Bild 2 Im Herbst 1942 gebaute „Long-Time Study“-Versuchsstrecke bei New York (Allentown, N. Y., Route 17); hergestellt aus mäßig steifem Beton mit rd. 365 kg PZ/m<sup>2</sup>; Wasserzementwert rd. 0,42. — Vordere Fahrbahn ohne LP-Zusatzmittel (Luftgehalt 0,5 %) durch Tausalze stark angegriffen; hintere Fahrbahn mit LP-Zement (Luftgehalt 4,1 %) ohne Veränderung (Foto PCA, Chicago)

ungen ausgesetzt ist. Ein Bericht nach 15jähriger Liegedauer stammt aus dem Jahre 1958 [24]. Die Strecke wurde in Abschnitten aus 21 sehr unterschiedlich zusammengesetzten Zementen gebaut. 6 dieser Zemente erhielten außerdem ein LP-Zusatzmittel. Alle Abschnitte ohne LP-Zemente lassen mehr oder weniger starke Abwitterungen erkennen, während alle Abschnitte mit LP-Zementen ohne Abwitterung geblieben sind. Ein Beispiel für den jüngsten Zustand gibt Bild 2.

In Deutschland lieferte u. a. ein Versuchsabschnitt auf der Bundesstraße B 6 von Hannover nach Hildesheim einen überzeugenden Beweis für die günstige Wirkung eines angemessenen Luftgehaltes. Dort wurde 1951 der Beton verschiedener Deckenfelder mit LP-Zusatzmitteln versehen. Während die Deckenfelder aus LP-Beton unverändert blieben, ist die Fahrbahn aus Beton ohne LP-Zusatzmittel in bekannter Weise narbig geworden. Die Bilder 3 a und 3 b zeigen links ein Feld aus LP-Beton, rechts die anschließende Strecke ohne LP-Zusatzmittel nach 6 Jahren und gelegentlichen Streuungen mit Natriumchlorid bei der üblichen Winterwartung.

## 5. Zusammensetzung des LP-Betons, Mischen, Verarbeiten und Überwachen

### 5.1 Zusammensetzung

Die Bildung von Luftporen im Frischbeton hängt nicht nur vom LP-Zusatzmittel und von der Zusatzmenge ab, sondern wird auch stark von der Konsistenz, dem Feinsandgehalt, der Temperatur des Betons und etwas – nicht immer gleichartig – von der Ze-

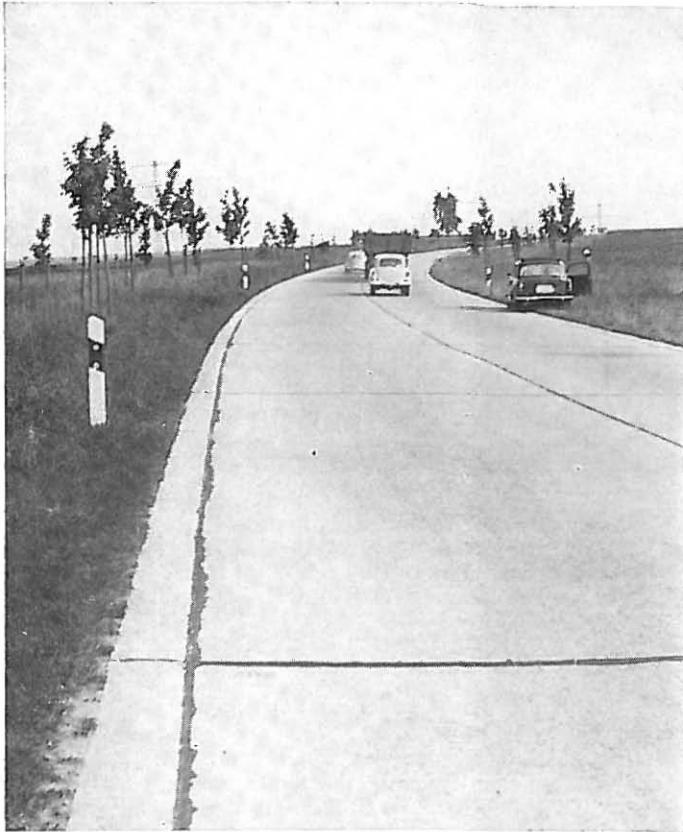


Bild 3a Versuchsabschnitt auf der Bundesstraße B 6 Hannover—Hildesheim nach 6jähriger Liegedauer; Deckenfelder aus LP-Beton; Zementgehalt 350 kg/m<sup>3</sup>; Wassercementwert 0,38 (Foto Streit)

mentmarke und der Mahlfeinheit des Zementes sowie vom Zementgehalt und der Menge mehlfeiner Zusatzstoffe (z. B. Farbzusätze, Gesteinsmehl) beeinflusst. Im einzelnen sei dazu folgendes erläutert:

Zunehmender *Wassergehalt* fördert die Luftporenentwicklung. Dies ist der Grund, weshalb in den USA, wo weicherer Straßenbeton – mit entsprechend niedrigerer Festigkeit – eingebaut wird, hohe Luftporengehalte leichter erzielt werden als in den steiferen Straßenbetonen in Deutschland.

Die feineren Fraktionen eines *Zuschlaggemisches*, insbesondere Feinsand im Bereich von 0,2 bis 0,6 mm Durchmesser, regen die Luftporenentwicklung beim Mischen stark an. Doch soll der Gehalt an Feinsand trotzdem möglichst niedrig gehalten werden, weil ein hoher Feinsandanteil einen größeren Wasseranspruch bewirkt. Zuschlaggemische mit hohem Sandgehalt, der meist auch einen erhöhten Gehalt an Mehlkorn zur Folge hat,

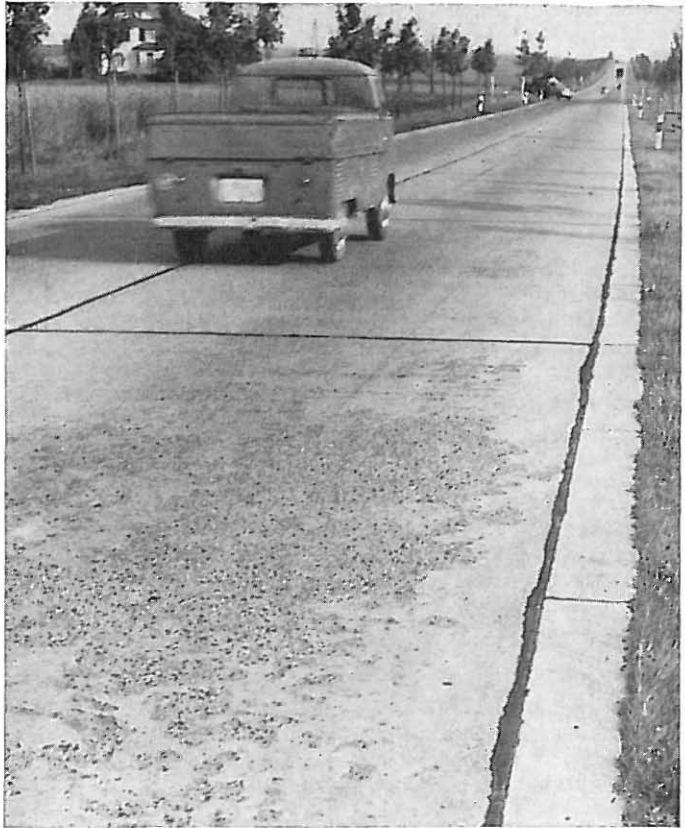


Bild 3b Versuchsabschnitt auf der Bundesstraße B 6 Hannover—Hildesheim nach 6jähriger Liegedauer; Deckenfelder aus Beton ohne LP-Zusatzmittel; Zementgehalt  $350 \text{ kg/m}^3$ ; Wasserzementwert 0,43 (Foto Streit)

können gemeinsam mit den Luftporen außerdem zu einem zähen, federnden Beton führen (siehe unter 5.2).

Sehr fein gemahlene Zemente und mehlfeine Zusatzstoffe wiederum beeinträchtigen die Luftporenentwicklung, ebenso zunehmender Zementgehalt.

Beim Entwurf der Betonmischung (Eignungsprüfung) zum Nachweis der Festigkeit und Verarbeitbarkeit ist zu berücksichtigen, daß künstliche Luftporen den Beton etwas beweglicher und geschmeidiger machen. Für Beton mit einem LP-Zusatzmittel können bei nicht zu steifem Beton weniger Sand 0/7 mm (je 1 % Luft etwa 1 % absolut)<sup>3)</sup> und insgesamt ein kleinerer Wassergehalt vorgesehen werden, als dies für sonst gleichen Beton ohne künstliche Luftporen (O-Beton) zu gleicher Verarbeitbar-

<sup>3)</sup> Die Sieblinie des Zuschlaggemisches soll also bei einem Luftporengehalt von 3,5 % bei 7 mm um rd. 3,5 % gesenkt werden, z. B. von 50 auf 46,5 % (entsprechend bei 1 mm um rd. 1,5 %).

keit notwendig wäre. Im Durchschnitt ersetzt in dieser Hinsicht 1% Luftporen etwa 3,5 l Wasser je m<sup>3</sup> Beton, so daß dadurch im großen und ganzen für Beton mit 3,5% Luftporen gegenüber einem sonst gleichen O-Beton der Wassergehalt etwa um 12 l je m<sup>3</sup> Beton vermindert werden kann.

Wird so vorgegangen, so tritt bei gleich gehaltenem Zementgehalt Z (kg/m<sup>3</sup>) durch den erhöhten, künstlich erzeugten Porengehalt kein oder nur ein geringer Festigkeitsrückgang gegenüber O-Beton ein, der im allgemeinen selbst schon etwa 1,5% natürliche Luftporen enthält. Die Festigkeit entsteht etwa gleich groß, wenn der Wert  $(W + L)/Z$  des LP-Betons nicht oder nicht wesentlich größer als der  $W/Z$ -Wert des O-Betons wird, wobei als Luftgehalt L des LP-Betons nur die durch die künstlichen Luftporen erhöhte Luftmenge einzubeziehen ist (also z. B.  $3,5 - 1,5 = 2,0\%$ ).

Zur Beurteilung der ungefähr zu erwartenden Druckfestigkeit muß für LP-Beton also in der Beziehung zwischen Wasserzementwert  $w$  und Betondruckfestigkeit [25] anstelle des Wasserzementwerts  $w = W/Z$  der (Wasser + Luft)zementwert  $(W + L)/Z$  eingeführt werden. Errechnen sich für 1 m<sup>3</sup> des O-Betons 350 kg Zement und 145 l Gesamtwasser ( $W/Z = 145/350 = 0,41$ ), so wird die Druckfestigkeit des entsprechenden LP-Betons gleicher Verarbeitbarkeit mit einem um  $3,5 - 1,5 = 2,0\%$  (20 l) erhöhten Luftgehalt von einem wirksamen (Wasser + Luft)zementwert von etwa  $(W + L)/Z = (145 - 12 + 20)/350 = 0,44$  bestimmt.

Dieser LP-Beton würde wahrscheinlich nur eine unbedeutend kleinere Festigkeit liefern als der im Zementgehalt gleiche O-Beton. (Der Wasserzementwert von 0,41 des O-Betons könnte beim LP-Beton nötigenfalls durch eine Erhöhung seines Zementgehaltes eingestellt werden.)

## 5.2 Mischen und Verarbeiten

Mischzeiten von mehr als 1½ min ergeben bei steifem Straßenbeton im allgemeinen nur wenig höhere Luftgehalte. Kleinere Luftgehalte entstehen unter sonst gleichen Verhältnissen mit zunehmender Betontemperatur und umgekehrt.

Wird das Abgleichen der Deckenoberfläche bei zähem LP-Frischbeton erschwert, so kann dem durch eine raschere Hin- und Herbewegung der Abgleichbohle oder durch eine rüttelnde Abgleichbohle begegnet werden. (Zweckmäßiger ist es jedoch, dann den Sand- oder Feinsandgehalt zu vermindern.)

Häufig wird die Frage gestellt, ob ein LP-Beton in der Fahrbahndecke nach dem Befördern und Verdichten nicht weniger Luft enthält als der Beton im LP-Meßgerät (siehe unter 6.). Das kann im allgemeinen zutreffen; man muß dazu jedoch beachten, daß aus dem Beton, der nach dem Schütten in der Schalung gerüttelt wird, zunächst nur die größeren, weniger wirksamen Luftporen entweichen. Die durch starke Oberflächenkräfte im Zementleim gehaltenen, kleineren Poren steigen dagegen bei der üblichen Verdichtung des Straßenbetons nicht oder nur sehr langsam an die Oberfläche, und es würde sehr lange dauern, bis auch sie aus der obersten Zone ausgetreten sind [1]. Wenn also ungünstigenfalls der Beton in der unteren Zone einer Decke mehr entlüftet wird und der Deckenbeton insgesamt etwas

weniger Luftporen enthält als der im Meßgerät verdichtete, so bedeutet dies noch nicht, daß die Tausalzbeständigkeit der Fahrbahndecke wesentlich vermindert ist. Durch mikroskopische Untersuchungen ist ferner nachgewiesen worden [11], daß sich die verbleibenden Poren beim Rütteln zerteilen. Die Porenzahl wird dadurch, trotz kleineren Luftgehaltes, also größer und die spezifische Wirkung des Luftgehaltes günstiger, weil ein kleinerer Abstandsfaktor entsteht.

### **5.3 Überwachen des Luftgehaltes und Nachbehandeln**

Bei jeder möglichen Veränderung (siehe unter 5.1 und 5.2) muß der Luftgehalt geprüft und nötigenfalls durch Änderung der Zusatzmenge wieder richtig eingestellt werden, damit die Mindestgrenze von 3,5 % nicht unterschritten oder eine die Festigkeit merkbar beeinträchtigende größere Erhöhung des Luftgehaltes behoben wird.

Werden Nachbehandlungsfilme an Stelle einer feuchten Abdeckung verwendet, so beeinträchtigt dies gegenüber einer Feuchtbehandlung die Tausalzbeständigkeit des LP-Betons nicht. Man kann eher annehmen, daß Beton, der erst im Spätherbst hergestellt wurde, unter einem Nachbehandlungsfilm bei einer bald folgenden Tausalzeinwirkung weniger Wasser enthält als ein feucht nachbehandelter Beton (siehe auch unter 2.1 und 2.2, ferner unter 7. und [18]).

## **6. Messen des Luftgehaltes; Herstellen von Würfeln und Balken**

### **6.1 Messen**

Der Luftporengehalt wird bei der Eignungsprüfung und der Bauausführung am einfachsten mit Hilfe eines Geräts geprüft, das nach dem Druck-Ausgleichsverfahren arbeitet, Bild 4 [3]. Der im Drucktopf des Geräts<sup>4)</sup> verdichtete Frischbeton wird einem Überdruck ausgesetzt und dabei der Luftgehalt aus der Verminderung des Betonvolumens infolge Zusammendrückens der Porenluft gemessen. Der Luftgehalt wird direkt in % an einer Skala (Manometer oder Wasserstandsglas) abgelesen. Für jede Prüfung sind 2 Messungen durchzuführen und daraus der Mittelwert zu bilden.

Voraussetzung für eine zutreffende Messung ist die praktisch vollständige Verdichtung des Frischbetons im Drucktopf, weil sonst luftgefüllte Strukturhohlräume verbleiben. Die darin enthaltene, unwirksame Luft würde im abgelesenen Luftgehalt mit erfaßt werden und einen größeren Gehalt an wirksamen Luftporen vortäuschen.

Der Beton im Drucktopf wird durch ausgiebiges Stampfen und Aufstoßen des Drucktopfes oder Rütteln auf einem Rütteltisch verdichtet. Auf der Baustelle kann das Meßgefäß auch auf den Rüttelbalken des Fertigers gestellt werden. Rüttelzeiten von 1 Minute reichen auch bei steifem Beton im allgemeinen zur praktisch vollständigen Verdichtung aus. (Diese erkennt man daran, daß nur noch einzelne, größere Luftblasen austreten.) Zu kräf-

<sup>4)</sup> Solche Geräte werden in Deutschland z. B. vom Chem. Laboratorium für Tonindustrie, Goslar/Harz, von der Firma Fey, Pfungstadt/Hessen, und von der Firma Klees (Geräte der Soiltest Inc., Chicago), Düren, vertrieben.

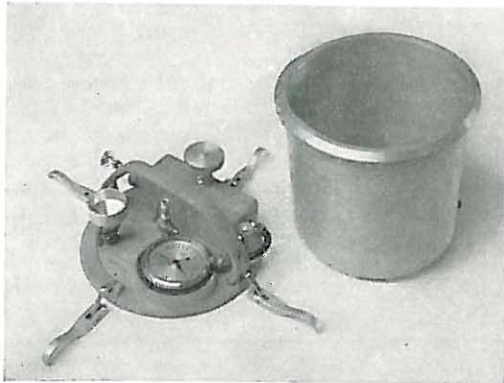


Bild 4 Geräte zur Prüfung des Luftgehalts im Beton nach dem Druck-Ausgleichsverfahrens (Oben: Ablesung am Wasserstandsglas, Inhalt des Drucktopfes rd. 5 l. Unten: Ablesung am Manometer, Druckkammer und Luftpumpe im Deckel eingebaut, Inhalt des Drucktopfes rd. 7 l)

tiges und zu langes Rütteln über das zur Verdichtung erforderliche Maß hinaus vermindert auch den Gehalt an feinen, besonders wirksamen Luftporen. Innenrüttler dürfen nicht in den Drucktopf zum Verdichten eingeführt werden, weil sie in dem kleinen Gefäß zu stark entlüften.

## 6.2 Probewürfel und Balken

Beim Herstellen und Verdichten von Würfeln und Balken der Eignungs- und Güteprüfung ist das gleiche zu beachten wie bei der Füllung des Meßtopfes. Der in den Würfel- und Balken-

formen verdichtete LP-Beton soll keine größere Rohdichte (Raumgewicht in  $\text{kg}/\text{dm}^3$ ) aufweisen als der Beton im Drucktopf des Meßgerätes.

## 7. Streuen der Tausalze

Tausalze sollen erst gestreut werden, wenn die Betondecke mehrere Monate alt ist oder wenigstens vorher einmal trockener Witterung ausgesetzt war. Wird eine junge Decke, die seit ihrer Herstellung noch nicht austrocknen konnte, im ersten Winter mit Tausalzen bestreut, so sind die Kapillarporen noch weitgehend mit Wasser gefüllt. Die Sprengkräfte treten dann stärker auf als bei der Decke, die zuvor einmal austrocknen konnte und sich dann auch durch Niederschläge im allgemeinen nicht mehr so stark mit Wasser vollsaugt (siehe auch unter 2.2). Dieses Verhalten wurde durch Versuche bestätigt [7, 18].

Große Salzmengen und häufige Streuungen verstärken die schädliche Einwirkung. Daher soll das Salz durch die Streugeräte möglichst gleichmäßig verteilt werden; eine Streuung von Hand ist auf Ausnahmen zu beschränken [4].

In Deutschland liegen die Streusalzmengen im allgemeinen zwischen 20 und 40  $\text{g}/\text{m}^2$  je Streuung. Obwohl diese gegenüber den in den USA auf den Ausfallstraßen der Städte benutzten Mengen (bis 1  $\text{kg}/\text{m}^2$  und mehr) gering sind, stellten sich auch in Deutschland bei Beton mit ungenügendem Luftgehalt oder älterem Beton, der damals noch ohne LP-Zusatzmittel hergestellt wurde, Abwitterungen ein. Man kann allgemein nicht damit rechnen, daß Beton ohne den Mindestgehalt an künstlichen Luftporen auch bei mäßigen Streuungen *auf die Dauer* ohne Abwitterung bleibt. Die Salzmenge soll auch deshalb möglichst gering gehalten werden, weil wir in Deutschland mit dem Mindestluftgehalt von 3,5% (einschließlich der unwirksamen Luft im Zuschlaggestein) schon an der unteren Grenze für einen Schutz liegen.

## 8. Zusammenfassung

Nach den seit 25 Jahren vorwiegend in Nord-Amerika, aber auch in Deutschland und Schweden, durch Laboratoriumsuntersuchungen und Großversuche sowie durch Beobachtung alter, aus LP-Beton hergestellter Betonfahrbahnen gewonnenen Erkenntnissen kann folgendes festgestellt werden:

**8.1** Natriumchlorid oder Calciumchlorid als Tausalze verursachen wesentlich stärkere Spannungen und Lockerungen im Betongefüge als das Gefrieren des Wassers in den Kapillarporen allein.

**8.2** Ein Abwittern an der Fahrbahnfläche durch Tausalzeinwirkung kann mit Sicherheit verhindert werden, wenn der Beton eine ausreichende Anzahl künstlich erzeugter, fein verteilter Luftporen enthält.

**8.3** Der heute in Deutschland übliche Straßenbeton ist bei Verwendung amtlich zugelassener LP-Zusatzmittel im allgemeinen ausreichend tausalzbeständig, wenn die Menge des LP-Zusatzmittels so bemessen wird, daß der Frischbeton im Meßgerät einen Luftgehalt von mindestens 3,5% aufweist.

**8.4** Biegeelastizität, Bruchdehnung, Schwinden, Wärmedehnung und Abnutzungswiderstand des Betons werden durch einen Luftgehalt von 3,5 bis 4,5% praktisch nicht verändert.

**8.5** Die Luftporen verbessern die Verarbeitbarkeit des Betons. Der Wassergehalt  $W$  des Betons und der Gehalt an Sand bis 7 mm können daher gegenüber etwa gleich verarbeitbarem Beton ohne künstliche Luftporen verringert werden.

**8.6** Die Festigkeit des LP-Betons wird bei gleich gehaltenem Zementgehalt  $Z$  trotz des größeren Luftgehaltes  $L$  dann im allgemeinen praktisch nicht nennenswert vermindert, wenn der Verhältniswert  $(W + L)/Z$  nur wenig größer ist als der Wasserzementwert  $W/Z$  des entsprechenden O-Betons.

**8.7** Die Luftporenbildung steigt im allgemeinen mit der Menge des LP-Zusatzmittels, dem Feinsandanteil im Zuschlaggemisch und dem Wassergehalt (weichere Konsistenz), sie sinkt mit zunehmendem Gehalt an mehlfinen Stoffen (Zement, Mehlsand, Farbzusätze) und steigender Temperatur des Frischbetons. Die Zementmarke beeinflusst die Luftporenbildung ebenfalls.

**8.8** Der Luftporengehalt muß daher bei der Eignungsprüfung für jeden Beton sorgfältig eingestellt und laufend überwacht werden.

**8.9** Junger LP-Beton soll mit Tausalzen erst bestreut werden, wenn er nach einer sachgemäßen Nachbehandlung bei trockener Witterung vorher einmal austrocknen konnte.

#### SCHRIFTTUM:

- [1] Walz, K.: Der Einfluß luftporenbildender Zusatzmittel auf die Eigenschaften von Beton, insbesondere auf die Tausalzbeständigkeit von Straßenbeton. Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Neue Folge, Heft 20, Bielefeld 1956.
- [2] Highway Research Board: Application of concrete admixtures in highway construction: Results of a survey by the committee on chemical additions and admixtures for concrete. Highway Research Abstracts 31 (1961) No. 5, S. 25/30.
- [3] Vorläufiges Merkblatt für die Verwendung von luftporenbildenden Zusatzstoffen zu Straßenbeton. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Köln 1953.
- [4] Merkblatt für Maßnahmen gegen Winterglätte auf Straßen. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Köln 1955.
- [5] Hallberg, S., und H. Arnfelt: Salta ej på cementbetong! Svenska Väg-föreningens Tidskrift 28 (1941) H. 10, S. 260/262. — Arnfelt, H.: Skador på betongvägar uppkomna genom saltbehandling vintertid. (Schäden auf Betonstraßen durch Salzstreuungen im Winter). Statens Väginstitut, Mitt. 66, Stockholm 1943.
- [6] Timms, A. G.: Resistance of concrete surfaces to scaling action of ice-removal agents. Highway Research Board, Bulletin 128, Washington 1956, S. 20/50.
- [7] Grieb, W. E., G. Werner and D. O. Woolf: Resistance of concrete surfaces to scaling by de-icing agents. Public Roads 32 (1962) Nr. 3, S. 64/73.
- [8] Powers, T. C.: Void spacing as a basis for producing air-entrained concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 50 (1953/54) S. 742/760.
- [9] Fears, F. K.: Correlation between concrete durability and air-void characteristics. Highway Research Board, Bulletin 196, Washington 1958, S. 17/28.



- [10] Mielenz, R. C., V. E. Wolkodoff, J. E. Backstrom and H. L. Flack: Origin, evolution, and effects of the air void system in concrete. Part 1 — Entrained air in unhardened concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 55 (1958/1959) S. 507/517.
- [11] Backstrom, J. E., R. W. Burrows, R. C. Mielenz and V. E. Wolkodoff: Origin, evolution, and effects of the air void system in concrete. Part 2 — Influence of type and amount of air-entraining agent. Proc. Amer. Concr. Inst. 55 (1958/1959) S. 261/272.
- [12] Backstrom, J. E., R. W. Burrows, R. C. Mielenz and V. E. Wolkodoff: Origin, evolution, and effects of the air void system in concrete. Part 3 — Influence of water-cement ratio and compaction. Proc. Amer. Concr. Inst. 55 (1958/1959) S. 359/375.
- [13] Mielenz, R. C., V. E. Wolkodoff, J. E. Backstrom and R. W. Burrows: Origin, evolution, and effects of the air void system in concrete. Part 4 — The air void system in job concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 55 (1958/1959) S. 507/517.
- [14] Report on cooperative freezing-and-thawing tests of concrete. Highway Research Board, Special Report 47, Washington 1959. — Siehe auch hierüber: Schäfer, A: Vergleichende amerikanische Untersuchungen über 4 Verfahren der Frost-Tau-Wechsel-Prüfung an Beton. beton 12 (1962) H. 7, S. 314/318.
- [15] Walz, K., und G. Weil: Feststellungen über den Einfluß luftporenbildender Zusatzmittel. Der Bauingenieur 30 (1955) H. 1, S. 15/20.
- [16] Lerch, W.: Basic principles of air-entrained concrete. Portland Cement Association, Chicago 1960.
- [17] ACI Standard: Specifications for concrete pavements and concrete bases (ACI 617-58). Proc. Amer. Concr. Inst. 55 (1958/59) S. 53/81.
- [18] Bergström, S. G.: Deterioration of concrete pavements due to salting in winter-time. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Applied Studies No. 3 (1959).
- [19] Albrecht, W.: Einfluß von Luftporenbildnern und Farbstoffen auf die Formänderung, Härte und Festigkeit von Straßenbeton. Straße und Autobahn 10 (1959) H. 11, S. 429/434.
- [20] Highway Research Board; Current Road Problems: Use of air-entrained concrete in pavements and bridges. Bericht No. 13-2R, Washington 1957.
- [21] Antrim, J. de C., und J. F. McLaughlin: Fatigue study of air-entrained concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 55 (1958/59) S. 1173/1182.
- [22] Walz, K: Luftporenbildende Betonzusatzmittel, Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 123, Verlag von Wilh. Ernst und Sohn, Berlin 1956.
- [23] Rhodes, C. C., and E. A. Finney: Final report on durability project Michigan Test Road. Proc. Highway Research Board 39 (1960) S. 217/309.
- [24] Jackson, F. H.: Long-time study of cement performance in concrete. Chapter 11 — Report on the condition of three test pavements after 15 years of service. Proc. Amer. Concr. Inst. 54 (1957/58) S. 1017/1032.
- [25] Walz, K.: Anleitung für die Zusammensetzung und Herstellung von Beton mit bestimmten Eigenschaften. Verlag von Wilh. Ernst und Sohn, Berlin 1958.