

# Zusätze für Beton

Gekürzte Bearbeitung eines Berichtes des ACI Committee 212<sup>1)</sup>

Von Kurt Walz, Düsseldorf

## Übersicht

Als Zusätze werden nach der ASTM Definition C 125 alle Stoffe, außer Wasser, Zuschlag und Zement, verstanden, die einen Bestandteil des Betons bilden und der Mischung unmittelbar vor oder während des Mischens zugesetzt werden<sup>2)</sup>. Diesem Bericht des Komitees gingen 1944 und 1954 zwei Fassungen voraus [1, 2]; eine Neubearbeitung war angezeigt, u. a. weil auch Verflüssiger und Erstarrungsverzögerer inzwischen größere Bedeutung erlangten [3].

In diesem Bericht sind die Zusätze nach ihrer stofflichen Zusammensetzung oder nach ihrer Wirkung in 15 Gruppen zusammengefaßt:

1. Erstarrungs- und Erhärtungsbeschleuniger,
2. Verflüssiger und Verzögerer,
3. Zusätze zum Einpressen und Vergießen,
4. luftporenbildende Zusätze,
5. luftabführende Zusätze,
6. gasbildende Zusätze,
7. quellende Zusätze,
8. fein aufgeteilte mineralische Zusätze,
9. Zusätze zur Dichtung gegen Feuchtigkeit und zur Verminderung der Durchlässigkeit,
10. Haftzusätze,
11. chemische Zusätze zur Verminderung des Alkali-Zuschlag-treibens,
12. korrosionsverhindernde Zusätze,
13. pilz-, keim- und insektenwidrige Zusätze,
14. ausflockende Zusätze und
15. Farbzusätze.

<sup>1)</sup> ACI Committee 212: Admixtures for concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 60 (1963) S. 1481/1524.

<sup>2)</sup> In Deutschland ist es üblich, zwischen Zusatzstoffen und Zusatzmitteln zu unterscheiden. Als Zusatzstoffe gelten Stoffe, die — pulverförmig oder suspendiert zugesetzt — in erster Linie als Volumenbestandteil wirken; sie können auch chemisch mit dem Zement reagieren (z. B. puzzolanartige Stoffe). — Zusatzmittel verändern durch chemische oder physikalische Wirkung die Betoneigenschaften; ihr Einfluß als Stoffraumkomponente ist ohne Bedeutung.

*Besitzt ein Zusatz Eigenschaften, die zu mehr als einer Gruppe gehören, so ist er in jener Gruppe aufgeführt, die seinem wesentlichsten Merkmal entspricht. Ein besonderer Abschnitt über Zusätze zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit wurde nicht aufgenommen; diese Wirkung wird von Fall zu Fall behandelt.*

*Der Bericht stützt sich auf umfangreiche, vorwiegend amerikanische Literatur (97 Quellen) und zieht alle einschlägigen amerikanischen Normen an<sup>3)</sup>.*

## **Einleitung und wirtschaftliche Gesichtspunkte**

Zusätze können zu bestimmten wünschenswerten Eigenschaften von Mörtel und Beton beitragen, die auf andere Weise nicht oder nicht so wirtschaftlich zu erreichen sind. Es kann jedoch auch der Fall sein, daß die angestrebten Eigenschaften wirtschaftlicher durch eine Änderung der Betonzusammensetzung als durch Zusätze erreicht werden. Zusätze sind kein Ersatz für gute Betontechnik. Sie sollten daher nur nach sachgemäßer Beurteilung ihrer Wirkung und unter Berücksichtigung der in Frage kommenden Betonmischung und der beabsichtigten Anwendungsbedingungen benutzt werden. Bei der Verwendung von Zusätzen ist zu beachten,

daß eine Änderung des Zementtyps, der Zementmenge oder eine angepaßte Korn- oder Mischungszusammensetzung angebracht sein kann,

daß sich viele Zusätze auf mehr als eine Betoneigenschaft auswirken und auf wichtige Eigenschaften manchmal auch nachteilig,

daß die Wirkung einiger Zusätze sich mit dem Wasser- und Zementgehalt, der Kornzusammensetzung sowie der Mischart und -dauer ändern kann,

daß die spezifische Wirkung bei einigen Zusätzen je nach Art, Menge und Zementeigenschaften verschieden ist und

daß einige spezifische Auswirkungen eines Zusatzes ohne eine Prüfung nicht genau vorausgesagt werden können.

Ein Zusatz kann die Kosten für den Beton erhöhen oder senken. Die angestrebten Eigenschaften können manchmal, mindestens zu einem gewissen Grad, auf andere Weise oder durch andere Zusätze ebenfalls erreicht werden. Bei einer Beurteilung der Wirtschaftlichkeit müssen eine gegebenenfalls mögliche Minderung der Ausführungskosten durch den Zusatz und der durch die Handhabung entstehende Mehraufwand berücksichtigt werden.

---

<sup>3)</sup> Die häufig vorkommenden Abkürzungen ASTM und ACI bedeuten: American Society for Testing and Materials bzw. American Concrete Institute.

## 1. Erstarrungs- und Erhärtungsbeschleuniger

### 1.1 Allgemeines

Beschleuniger sollen die Frühfestigkeit des Betons erhöhen oder seine Erstarrungszeit verkürzen oder auch beides zugleich bewirken. Oft erlauben Beschleuniger einen günstigeren Arbeitsablauf.

Mit der rascheren Entwicklung der Frühfestigkeit sind verbunden: früheres Entschalen, verkürzte Nachbehandlungsdauer, raschere Benutzung einer Konstruktion oder einer Ausbesserung und keine oder geringe Verzögerungen der Festigkeitsentwicklung durch niedrigere Temperaturen.

Zu den Vorteilen einer kürzeren Erstarrungszeit gehören: frühere Bearbeitungsmöglichkeit der Oberfläche, geringerer oder kürzer wirkender Schalungsdruck und wirksameres Abdichten von Leckstellen.

Zu den Bestandteilen von Beschleunigern zählen einige lösliche Chloride, Carbonate, Silicate, Fluorsilicate und Hydroxyde [4], ebenso einige organische Verbindungen, wie z. B. Triäthanolamin [5, 6]. Allgemeine Verwendung fanden lösliche Chloride, insbesondere Calciumchlorid [7, 8, 9] und, in weit geringerem Ausmaß, Triäthanolamin. Einige andere Stoffe eignen sich nur zum Anmachen von sogenannten „Schnellbindern“. Mit Ausnahme von Calciumchlorid erlauben die über andere Beschleuniger vorliegenden Erkenntnisse nur eine knappe Erörterung.

Triäthanolamin wird in verhältnismäßig geringen Mengen, meist in Verbindung mit anderen Stoffen, benutzt. Auf Zinnchlorür, Eisendichlorid und Natriumthiosulfat [10] wird in Abschnitt 12 eingegangen.

In verschiedenem Maße kann die Erstarrungszeit von Portlandzement auch durch Zusatz von 5 bis 20 % Tonerdezement verkürzt werden [11, 12], ebenso die des Tonerdezements durch Zumischen von Kalk oder Portlandzement. Doch fällt die Druckfestigkeit von Tonerdezement-Portlandzement-Gemischen nach einem Tag im allgemeinen wesentlich geringer aus als mit einem der beiden Zemente allein. Schwinden und Quellen solcher Gemische sind größer, und die Beständigkeit kann mangelhaft sein [13].

Das „Impfen“ des Portlandzement-Betons mit 2 Gew.-% fein gemahlenem, vollständig hydratisiertem Portlandzement (bezogen auf das Zementgewicht) ist in seiner Wirkung etwa einem Calciumchlorid-Zusatz von 2 % gleichwertig. Damit soll auch eine noch um 20 bis 25 % höhere 90 Tage-Festigkeit erhalten und das Schwinden beim Austrocknen des Betons nicht größer werden [14, 15]. Die Wirkungen eines Impf- und Calciumchloridzusatzes sollen sich addieren.

Mit unverdünnten Beschleunigern ergeben sich Erstarrungszeiten von 15 bis 30 sec. Bei fertig angebotenen Trockenmörteln mit Beschleunigern liegt der Erstarrungsbeginn bei 1 bis 4 min und das Erstarrungsende bei 3 bis 10 min. Die Endfestigkeit dieser Mörtel fällt gewöhnlich weit kleiner aus als ohne Beschleuniger.

Die allgemein für Beton benutzten Beschleuniger sollten den Anforderungen der ASTM Standard C 494 „Vorläufige Bestimmungen für chemische Betonzusätze, Typ C“ und Calciumchlorid denen der ASTM Standard D 98 „Vorläufige Bestimmungen für Calciumchlorid“ genügen.

## 1.2 Calciumchlorid

Schuppenförmiges Calciumchlorid steht nach der ASTM Standard D 98 als Typ 1 mit mindestens 77 %  $\text{CaCl}_2$  und als Typ 2 (Schuppen, Kügelchen oder granuliert) mit mindestens 94 %  $\text{CaCl}_2$  zur Verfügung. Es kann im allgemeinen in einer Menge bis zu 2 % des Zementgewichts zuverlässig benutzt werden [7, 16]. Größere Mengen können schädlich sein und bringen auch, von seltenen Fällen abgesehen, nur mäßige zusätzliche Vorteile.

Die Vorteile eines Calciumchloridzusatzes treten bei Betontemperaturen unter 21 °C gewöhnlich ausgeprägter hervor. Bei hohen Temperaturen können die Endfestigkeit, besonders die Biegefestigkeit, vermindert und das Schwinden sowie die Rißbildung gefördert werden. Laboratoriumsversuche ließen erkennen, daß nach ein bis sieben Tagen und Lagerung bei 4,5 °C die Zunahme der Druckfestigkeit durch 2 % Calciumchlorid im Bereich von 28 bis 70  $\text{kp/cm}^2$  liegt und ähnlich der bei 21 °C ist. Die Festigkeitszunahme erreicht gewöhnlich nach ein bis drei Tagen ein Maximum, um dann im allgemeinen nachzulassen. Nach einem Jahr ist mit den meisten Zementen noch eine etwas gesteigerte Festigkeit verblieben; die spezifische Wirkung des Calciumchlorids ist jedoch bei verschiedenen Zementen unterschiedlich.

Die Biegefestigkeit von feucht behandeltem Beton wird nach ein und drei Tagen durch den Zusatz von 1 bis 2 %  $\text{CaCl}_2$  erhöht (bei 21 °C um 40 bis 90 % nach einem Tag bzw. um 5 bis 35 % nach drei Tagen); sie fällt jedoch nach 28 Tagen oder in noch höherem Alter kleiner aus [7, 16].

Für die Beschleunigung des Erstarrens und Erhärtens bei kaltem Wetter ist meist ein Zusatz von 1 % ausreichend, sofern noch ein Schutz gegen Frost vorgesehen ist [17].

Die vorausgehenden Erörterungen gelten für Portlandzement. Für Hochofenzement oder Mischzemente reichen die Unterlagen für irgendwelche Folgerungen nicht aus.

Als weitere Auswirkungen eines Calciumchloridzusatzes ergeben sich: eine geringe Verbesserung der Verarbeitbarkeit, eine Zunahme des Luftgehalts, aber auch des mittleren Porendurchmessers im LP-Beton<sup>4)</sup> sowie mit manchen Zementen ein früheres Versteifen und demgemäß eine Verminderung des Wasserabsondorns. Das Schwinden wird, wenn auch nicht in allen Fällen, erhöht. (Unterschiede bei den Untersuchungen können auch

<sup>4)</sup> Anmerkung: Der Frostwiderstand wird bei Verwendung eines LP-Zusatzmittels um so größer, je kleiner der mittlere Porendurchmesser ist (siehe auch unter 4.1, 5. Absatz).

durch verschiedenartige Nachbehandlung verursacht worden sein.) Die Wärmeentwicklung wird in der ersten Zeit beachtlich gesteigert, was bei Bauwerken, bei denen Temperaturunterschiede im Beton bedeutsam sind, berücksichtigt werden muß. Die insgesamt frei werdende Wärme wird nicht merkbar verändert. Calciumchlorid kann in warmem Beton (z. B. bei heißem Wetter) zu so raschem Versteifen führen, daß das Einbringen und Bearbeiten des Frischbetons behindert wird.

Der Calciumchloridzusatz steigert eine Alkali-Zuschlagreaktion (Zertreiben des Betons); diese Auswirkung ist jedoch belanglos, wenn einer Umsetzung durch Zement mit niederem Alkaligehalt oder Puzzolanzusatz begegnet wird.

Durch Zusatz von Calciumchlorid wird der Widerstand gegen Sulfateinwirkung vermindert sowie in mäßigen Grenzen der gegen Frost-Tau-Wechsel in höherem Alter des Betons. Der Widerstand gegen Erosion und Abschleifen wird, insbesondere im frühen Alter, bedeutsam erhöht.

Es wurde nicht gefunden [18], daß Calciumchlorid das Rosten üblicher Bewehrung fördert, sofern eine angemessene Betonüberdeckung vorhanden ist. Doch sollte von einer Calciumchlorid-Verwendung dort abgesehen werden, wo Streustrom (vagabundierender Strom) vorkommen kann [8, 19], und auch bei Spannbeton wegen einer möglichen Spannungsrißkorrosion [20, 21, 22, 23]. Die Korrosion einbetonierter, galvanisierter Metalle oder Formen kann verstärkt werden; auch sollen in Beton mit Calciumchlorid verschiedenartige Metalle (wie elektrische Leitungsrohre aus Al-Legierung und Stahlbewehrung) vermieden werden [24]; siehe auch unter Abschnitt 12.

Calciumchlorid kann für Beton, der anfänglich niederen oder Frosttemperaturen ausgesetzt wird, besonders zuträglich sein, wenn es nach den Empfehlungen der ACI Standard 604-56 [17] beim Winterbau benutzt wird. Es bewirkt in der ersten Zeit eine stärkere Wärmeentwicklung und beschleunigt das Erstarren; der Gefrierpunkt des Wassers wird jedoch nicht wesentlich herabgesetzt. (Stoffe, die den Gefrierpunkt des Wassers im Beton wirksam senken, sind nicht bekannt.)

Calciumchlorid sollte der Betonmischung möglichst gelöst zugegeben werden; dabei wird zweckmäßig das Calciumchlorid in das Wasser gegeben, weil sich bei umgekehrtem Vorgehen auf dem Salz ein schwer löslicher Überzug bildet.

### **1.3 Verwendung von Beschleunigern für Betonwaren**

Eine rasche Festigkeitsentwicklung durch Zugabe von Beschleunigern verkürzt die Zeit für die Nachbehandlung, vermindert bei kaltem Wetter die Verzögerung der Erhärtung und die Zeit bis zum vollen Aushärten. Bei warmem Wetter sollen Beschleuniger mit Vorsicht benutzt werden, damit ein zu rasches Erstarren vermieden wird. Viele Werke wenden daher während der Sommermonate nur eine Wärmebehandlung und im Winter diese zusammen mit einem Beschleuniger an.

## 2. Verflüssiger und Verzögerer

### 2.1 Allgemeines

Gewisse organische Verbindungen oder Gemische dieser Verbindungen mit anorganischen Stoffen werden zugesetzt, um den Anmachwasser-Anspruch des Betons zu vermindern oder sein Erstarren zu verzögern. Die Verwendung solcher Zusätze wirkt sich im allgemeinen in erhöhter Festigkeit und Undurchlässigkeit aus und bei Zusätzen, die eine angemessene Menge Luftporen bilden, in einer verbesserten Beständigkeit gegen Frost-Tau-Wechsel. Der Festigkeitsgewinn ist häufig größer, als dies dem verminderten Wasserzementwert entspricht.

Die Zusätze, die im allgemeinen hierfür verfügbar sind, gehören zu den vier Stoffgruppen:

1. Ligninsulfonsäuren und ihre Salze,
2. Abwandlungen und Abkömmlinge der Ligninsulfonsäuren und ihre Salze,
3. hydroxylierte Carbonsäuren und ihre Salze und
4. Abwandlungen und Abkömmlinge der hydroxylierten Carbonsäuren und ihre Salze.

In die Gruppen 1 und 3 fallen wassereinsparende, verzögernde Zusätze und in die Gruppen 2 und 4 wassereinsparende Zusätze mit Stoffen, die das Erhärten in verschiedenem Maße beschleunigen oder verzögern; diese Zusätze können auch einen Luftporenbildner enthalten. Manchmal werden neben Zusätzen aus diesen vier Hauptgruppen noch andere Verbindungen eingesetzt [4]; über ihre Eigenschaften und derzeitige Anwendung liegen keine ausreichenden Erfahrungen vor.

Ligninsulfonate stehen als Calcium-, Natrium- oder Ammoniumsalze zur Verfügung; mit ihnen kann bei Temperaturen von 18 bis 38 °C die Erstarrungszeit um 30 bis 60 % verlängert werden. Durch übliche Zusatzmengen dieser Ligninsulfonat-Verzögerer werden 2 bis 6 % Luft in den Beton eingeführt; auch Luftmengen von 6 bis 10 % wurden schon festgestellt. Nötigenfalls kann die Luftporenbildung durch luftabführende Zusätze vermindert werden (siehe Abschnitt 5). Die Bildung von Luftporen durch die Ligninsulfonate hängt auch von der Zusammensetzung des Zements ab. Ligninsulfonatverzögerer ermöglichen es, unter sonst gleichen Verhältnissen Beton mit einem um 5 bis 10 % verminderten Wassergehalt herzustellen. Die Druckfestigkeit ist nach zwei oder drei Tagen gewöhnlich gleich groß oder größer als beim gleichen Beton ohne Zusatz; nach 28 Tagen oder später kann sie um 10 bis 20 % größer ausfallen.

Hydroxylierte carbonsaure Salze wirken verflüssigend und verzögernd, aber nicht luftporenbildend. Bei einem Zusatz, der die Erstarrungszeit um 30 % verzögert, kann der Wassergehalt um 5 bis 8 % gesenkt werden; das Wasserabsondern nimmt zu. Nach 24 Stunden bleibt die Druckfestigkeit noch zurück, fällt aber schon nach drei Tagen um 10 bis 20 % größer aus. Die Biegefestigkeit wird ebenfalls größer, aber nicht im gleichen Maße wie die Druckfestigkeit.

Ligninsulfonsaure Salze, carbonsaure Salze und Abwandlungen oder Abkömmlinge von ihnen können mit anderen Chemikalien, die Luft einführen, das Erstarren ändern oder die Festigkeitsentwicklung beeinflussen, jeweils gemischt oder verbunden werden. Calciumchlorid, neutralisierte Holzharze und Alkyl-Arylsulfonate sind Beispiele für derartige Beigaben. Auf Beton mit gleichem Luftgehalt bezogen, wird mit solchen Zusätzen gewöhnlich eine Wassereinsparung von 5 bis 10 % und nach mehr als zwei Tagen eine um 10 bis 20 % höhere Druckfestigkeit als bei Beton ohne Zusatz erzielt.

Die Zusätze der Gruppen 1 und 2 mit Stoffen auf Ligninsulfonsäure-Basis vermindern, abhängig von der Luftertragung, das Wasserabsondern und Schrumpfen des Betons. Die Zusätze aller vier Gruppen erhöhen die luftporenbildende Wirkung eines besonders zugegebenen LP-Zusatzmittels.

## 2.2 Handhabung

Wassereinsparende Zusätze, Verzögerer, wassereinsparende Verzögerer und wassereinsparende Beschleuniger sollen den Anforderungen der ASTM Standard C 494 genügen. Wenn keine ausreichende Erfahrung mit dem Zusatz vorliegt, sollen der Anwendung Versuche, die den Baustellenverhältnissen angeglichen sind, vorausgehen. Bei der Beurteilung soll der Einfluß auf alle jene Eigenschaften beachtet werden, die beim Beton ohne den Zusatz wesentlich wären.

Der Zusatz soll nicht vor der Zugabe des Mischwassers mit dem Zement in Berührung kommen (im übrigen siehe Abschnitt 1). Eine Unverträglichkeit mehrerer solcher Zusätze beim vorherigen Zusammenmischen oder beim Zusammenführen in Wasser bedeutet noch nicht, daß nicht jeder Zusatz, für sich der Mischung zugegeben, voll wirksam wäre.

## 2.3 Verwendung

*Verflüssiger* werden angewendet, um eine bestimmte Festigkeit mit geringerem Zementgehalt oder eine weichere Konsistenz bei gleichbleibendem Wasser- und Zementgehalt zu erzielen. Auch die Eigenschaften von Beton, der sperrige oder ungünstig abgestufte Zuschlagstoffe — oder beides — aufweist, können verbessert werden. Verflüssiger können ferner beim Pumpen des Betons oder bei Trichterschüttung von Nutzen sein.

*Verzögerer* dienen in erster Linie dazu, den Beton während des ganzen Einbaus verformbar zu halten, damit Risse infolge Durchbiegens der Schalung sowie Arbeitsfugen vermieden werden. Sie können außerdem eine rasche Wärmeentwicklung im Beton und damit verbundene Mängel durch hohe Temperatur mindern.

Die spezifische Wirkung der wassereinsparenden Verzögerer ändert sich mit dem Zement, dem Wasserzementwert, der Temperatur der Mischung und der Umgebung sowie mit anderen örtlichen Bedingungen. Daher wird allgemein empfohlen, die Zusatzmenge auf die jeweiligen Baustellenverhältnisse abzustimmen. Die Einstellung eines luftporenbildenden Verzögerers auf

eine gleichermaßen passende Erstarrungsverzögerung und Luftporenbildung wird nicht möglich sein. Eine unter Umständen nötig werdende Heraufsetzung der Zugabemenge zur Einhaltung des geforderten Luftgehalts könnte zu einer übermäßigen Verzögerung des Erstarrens führen und diese wiederum zu einem lange hinausgeschobenen Wasserabsondern und Nachbearbeiten.

### **3. Zusätze zum Einpressen und Vergießen**

Für Zementsuspensionen zum Einpressen und Vergießen sind Verzögerer besonders zweckdienlich, wenn die ausgepreßten Bohrlöcher wieder aufzubohren sind, das Verpressen über längere Zeit anhält, die Suspension über weite Strecken gepumpt werden muß oder wenn in der Tiefe heißes Wasser angetroffen wird.

Zementsuspensionen und solche mit Puzzolanen werden häufig zum Dichten von Ölbohrungen benutzt, wobei die Suspension mehrere Stunden bei erhöhten Temperaturen und erhöhten Drücken flüssig bleiben soll. Bei tiefen Ölbohrungen können die Temperaturen bis 200 °C und die Drücke bis 1260 kp/cm<sup>2</sup> reichen. Besondere Ölbohrzemente ohne Verzögerer oder mit solchen sind dazu verfügbar.

Beim Dichten von Ölbohrungen oder bei einigen anderen Verpreßarbeiten werden manchmal Zusätze verwendet, um die rasche Wasserabgabe der Zementsuspension an die durchfahrenen Schichten zu verhindern. Einige Stoffe, die zu diesem Zwecke vorgeschlagen werden [25], sind Gele, Tone, vorgelatinierte Stärke und Methylcellulose (Colloresin). Stoffe, wie Bentonit [25], werden benutzt, um das Gewicht der Suspension herabzusetzen, andere, wie Baryt und Eisenfeilspäne, um es zu erhöhen. Um das Absetzen der schweren Bestandteile zu verhindern, können solchen Suspensionen Verdicker, z. B. natürliche, gummiartige Harze, zugesetzt werden.

Andere Zusätze, wie Gasbildner, Beschleuniger usw., werden bei Verpreßarbeiten besonderer Art verwendet; sie werden in anderen Abschnitten beschrieben.

### **4. Luftporenbildende Zusätze**

#### **4.1 Auswirkung der Lufteintragung**

Der Nutzen einer Luftporenbildung ist in vielen Aufsätzen dargestellt worden [26, 27, 28]. Die Erfahrung bewies die überlegene Beständigkeit des Betons mit künstlichen Luftporen (LP-Betons). Dieser sollte immer gefordert werden, wo strenge Witterungsverhältnisse herrschen und Natrium- oder Calciumchlorid bei der Winterwartung auf Straßendecken einwirkt. LP-Beton mit einer großen Zahl sehr kleiner Luftporen ist gegen Frosteinwirkung um ein Vielfaches widerstandsfähiger als sonst gleicher Beton ohne Luftporen. Zur Erzielung größter Beständigkeit sollte der LP-Beton dicht und undurchlässig zusammengesetzt und sorgfältig eingebracht, geschützt, fertig bearbeitet und nachbehandelt werden.

LP-Zusatzmittel verändern sowohl die Eigenschaften des frischen als auch die des erhärteten Betons. Der LP-Beton ist bedeutend plastischer und besser verarbeitbar, da er wenig zum Entmischen und Wasserabsondern neigt. Die Beständigkeit des erhärteten LP-Betons wird durch größere Gleichmäßigkeit, verminderte Wasseraufnahme und Durchlässigkeit sowie durch die Vermeidung schwacher Zonen im oberen Teil der Betonierschichten zusätzlich verbessert. Diese Auswirkungen beruhen auf einer Veränderung der Eigenschaften des Betons durch die große Zahl kleiner Luftporen im Zementleim. Der Schutz gegen Schädigung durch Gefrieren und Tauen ist bei gleichem Luftgehalt um so größer, je größer die Zahl der Poren in der Raumeinheit des Zementleims ist. Dies bedeutet, daß die Poren um so wirkungsvoller sind, je näher sie zusammenliegen [29, 30, 31]. Der Zementleim im Beton ist normalerweise gegen Zerfriren geschützt, wenn der Abstandsfaktor des Luftporensystems, nach ASTM Standard C 475 bestimmt, höchstens 0,2 mm beträgt. Unter gewissen Bedingungen kann ein kleinerer Abstandsfaktor als 0,2 mm erforderlich werden [32].

Luftgehalt und Porenverteilung werden von vielen Faktoren beeinflusst [30]. Zu den wichtigsten gehören: Art und Menge des LP-Zusatzmittels, Art und Mengenverhältnis der Betonbestandteile, Art und Dauer des Mischens, Konsistenz sowie Verdichtungsart und -grad beim Einbauen des Betons.

Die Verwendung eines LP-Zusatzmittels enthebt nicht von der Notwendigkeit, den Wasserzementwert zu beachten. Wenn der Wasserzementwert erhöht wird, nehmen die durchschnittliche Größe der Luftporen, ihr Abstand sowie der Anteil des gefrierbaren Wassers im Beton zu; damit vermindert sich unter sonst gleichen Verhältnissen der Frostwiderstand des Betons.

Bei Laboratoriumsuntersuchungen mit Frost-Tau-Wechseln wurde gefunden, daß die Beständigkeit des Betons durch Luftverlust beim Rütteln nicht nachteilig beeinflusst wird, sofern der Beton ursprünglich ein angemessenes Luftporensystem aufwies. Mutmaßlich trifft dies auch für den Frostwiderstand unter den Bedingungen der Praxis zu.

Obwohl eine Lufteintragung die Verarbeitbarkeit und Beständigkeit verbessert, kann die Festigkeit dadurch zurückgehen. Im Bereich der üblicherweise benutzten Luftgehalte fällt die Festigkeit etwa proportional der eingetragenen Luftmenge kleiner aus. Für die meisten der Witterung ausgesetzten Betonbauwerke ist eine geringe Minderung der Festigkeit unbedeutend gegenüber dem Vorteil der wesentlich verbesserten Frostbeständigkeit. Die Minderung der Druckfestigkeit wird selten 15 %, die der Biegefestigkeit selten 10 % überschreiten. Diese Werte gelten für eine gleichgehaltene Zementmenge und eine infolge der besseren Verarbeitbarkeit beim LP-Beton angängige Verminderung des Sand- und Wassergehalts.

Die obige Darstellung bezieht sich auf mäßige Luftgehalte mit gewöhnlich nicht mehr als 13 % Luft im Mörtelanteil. Bei einigen Betonanwendungen, besonders für Betonformsteine, werden weit größere Luftmengen angewendet, um leichte Erzeugnisse mit überragender Wärmedämmung zu schaffen (siehe Abschnitt 4.6).

## 4.2 Lufteintragende Stoffe

Viele Stoffe, einschließlich natürlicher Holzharze, Fette und Öle, sind zum Herstellen von LP-Zusätzen verwendbar. Diese Stoffe sind gewöhnlich wasserunlöslich und müssen chemisch aufbereitet werden, bevor sie als Zusätze geeignet sind. Da nicht alle diese Stoffe die erwünschte Luftporen-Struktur liefern, sollen LP-Zusätze den Anforderungen der ASTM Standard C 260 „Bestimmungen für lufteintragende Zusätze für Beton“ entsprechen. Eine Übereinstimmung mit diesen Bestimmungen bietet die Gewähr, daß ein luftporenbildender Zusatz vorliegt, der eine wesentliche Verbesserung der Frostbeständigkeit bewirkt und keine der wesentlichen Betoneigenschaften (z. B. Festigkeit, Raumänderungen) ernstlich verschlechtert.

## 4.3 Lufteintragende Zusätze zum Zement

LP-Beton kann auch unter Verwendung eines luftporenbildenden Zements hergestellt werden. Ein LP-Zement ist ein Zement, dem ein oder mehrere Zusätze (siehe ASTM Standard C 219) bei der Herstellung zugemahlen werden. Für LP-Zement ist zu fordern, daß er der ASTM Standard C 175 „Bestimmung für lufteintragenden Portlandzement“ genügt.

## 4.4 Aufbereitung des LP-Belons

Zur Zeit werden beide Verfahren (4.2 und 4.3) ausgiebig benutzt, und beide verhelfen zu einem verbesserten Beton. Die Zugabe des LP-Zusatzes am Mischer ist vorzuziehen, weil der Luftgehalt in engen Grenzen eingestellt oder leicht geändert werden kann, wenn es die Ausführung verlangt. LP-Zement mag vorgezogen werden, weil seine Verwendung bequem ist und doch einige Gewähr für erhöhte Beständigkeit bietet, auch wenn Geräte zum Messen des sich einstellenden Luftgehaltes fehlen. In jedem Falle sollte die ACI Standard 613-54: „Ausführungsbestimmung für das Aufstellen der Mischungsverhältnisse für Beton“ [33] befolgt werden. Unabhängig davon, nach welcher der beiden Möglichkeiten die Luft eingetragen wird, sollten alle Stoff- und Verarbeitungsverhältnisse der Mischungen so gleichmäßig wie möglich eingehalten werden, damit der Luftgehalt gleichbleibend und innerhalb der vorgeschriebenen Grenzen entsteht. Der Luftgehalt sollte nach den Empfehlungen des ACI Komitees 611 „ACI-Handbuch der Betonüberwachung“ geprüft und überwacht werden [34]. Besondere Aufmerksamkeit sollte einer ungewöhnlich hohen Zusatzmenge geschenkt werden, die oft bei Beton mit frühhochfestem Portlandzement (Typ III), Portland-Puzzolan-Zementen, Flugasche, feinen mineralischen Zusätzen, wie natürlichen Puzzolanen oder Farbzusätzen (z. B. unbehandeltem Ruß), nötig wird. Manche LP-Zusätze vertragen ein vorheriges Zusammenmischen mit anderen Zusätzen nicht und sind daher getrennt der Mischung zuzuführen.

Luftgehalt, Abstandsfaktor und andere bedeutsame Kennwerte des Luftporen-Systems können am erhärteten Beton nach verschiedenen Verfahren mikroskopisch bestimmt werden. Die am meisten benutzten sind das Leitlinien- und das abgewandelte

Punkt-Zähl-Verfahren, die in der ASTM Standard C 457 beschrieben sind. Mit diesen Verfahren kann Bauwerksbeton untersucht werden [30; Teil 4]. Bei Voruntersuchungen über die Zusammensetzung des Betons erlauben sie ein sichereres Urteil, ob ein Beton mit ausreichendem Frostwiderstand zu erwarten ist [31].

#### 4.5 Verwendung von LP-Zusätzen zu Betonwaren

Umstritten ist die Frage, ob man auch bei Beton-Mauersteinen LP-Zusätze verwenden soll [35, 36, 37]. Zum Teil wird für übliche Fertigungsverfahren angenommen, daß mit einem Zusatz eine bessere Verdichtung und eine geringere Abnutzung der Formen erreicht werden. Das Aussehen der Mauersteine könne verbessert, ein Abbrechen der Kanten vermindert und der Stein mit schärferen Ecken und Kanten hergestellt werden.

Da es ungewiß ist, ob Luftporen in derartig trockenen Betonmischungen für Mauersteine überhaupt entstehen, nimmt man zum Teil an, daß diese Vorteile nicht auf eine Porenbildung, sondern auf eine mit diesem Zusatzmitteltyp verbundene Oberflächenglättung zurückzuführen sind. Andere schreiben eine verbesserte Steinherstellung der Verwendung von LP-Zement zu, während wieder andere ein LP-Zusatzmittel benutzen, das wahrscheinlich nur mittels Luftporenbildung an der Steinfläche wirken kann.

Ebenfalls zufriedenstellend äußerten sich die Hersteller von gegossenen Betonwaren und Rohren über LP-Zusatzmittel. Bei plastischem Beton besteht kein Zweifel, daß Luft eingeführt wird und daß sich damit die bei üblichen Betonen zu erwartenden Vorteile einstellen. Wo sehr steife Mischungen verarbeitet werden, gilt wahrscheinlich ähnliches wie für Beton-Mauersteine.

Frischbeton aus Leicht-Zuschlagstoffen ist meist etwas spröde („kurz“), daher wirken künstlich eingeführte Luftporen in diesem Beton besonders vorteilhaft. Allgemein erweisen sich LP-Zusätze bei jeder Art von Beton als nützlich, am meisten jedoch in sperrigen Gemischen mit fehlendem Feinkorn.

Zweckmäßig wird der LP-Zusatz am Mischer zugegeben, weil zum Erreichen des Optimums gewöhnlich verschieden große Zusatzmengen für verschiedenartige Erzeugnisse oder Fertigungsverfahren notwendig sind. Die günstigste Zusatzmenge muß in jedem Einzelfall durch Versuch bestimmt werden. Dabei sollen hohe Luftgehalte, durch die die Festigkeit stark absinkt, vermieden werden.

#### 4.6 Porenbeton

In Porenbeton<sup>5)</sup> wird der Zuschlagstoff ganz oder zum Teil durch Luft- oder Gasblasen ersetzt [38]. Betone dieser Art [39] können in zwei allgemeine Hauptgruppen, die Gasbetone und die Schaumbetone, unterteilt werden. Beide entstehen durch Zusätze. (Der Gasbeton wird später unter Abschnitt 6 behandelt werden.)

<sup>5)</sup> Anmerkung: Umfangreiche deutsche Feststellungen siehe u. a.: Graf, O.: Gasbeton, Schaumbeton, Leichtkalkbeton. Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1949. — Reinsdorf, S.: Leichtbeton, Bd. II (Porenbetone). VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1963.

Für Konstruktions-Schaumbeton kann man 30 bis 60 Raum-% und für Dämmbeton 70 bis 85 Raum-% Luft einführen. Die Luft kann durch rasches Rühren der mit LP-Zusatzmitteln versehenen Mischung eingeführt werden. Die Zusatzmittelmengen (z. B. Natrium-Laurylsulfat, Alkyl-Arylsulfonate, gewisse Seifen, Harze oder andere Mittel) muß wesentlich größer sein als jene für gewöhnlichen LP-Beton. Bei einem anderen Verfahren wird der Schaum getrennt hergestellt und dann der Zementsuspension im Mischer an Stelle des üblichen Zuschlags zugesetzt. Schaummittel hierfür gehören, wie die durch hydrolysiertes Abfalleiweiß stabilisierten Luftschäume, zum Typ der Löschmittel für Benzinbrände.

Das Gewicht der Schaumbetone ohne mineralische Zuschlagstoffe kann zwischen  $320 \text{ kg/m}^3$  und  $1760 \text{ kg/m}^3$  liegen (mit üblichen Zuschlagstoffen noch höher). Der leichteste Beton ist gerade so fest, daß er noch formhaltend verarbeitet werden kann; er dient zur Wärmedämmung. Einige der schwereren Betone weisen genügend Festigkeit für konstruktive Teile, z. B. Wohnungswände, auf.

Vergleicht man normal nachbehandelte Schaumbetonblöcke mit einer Rohdichte von rd.  $640 \text{ kg/m}^3$  mit gleichschweren, im Autoklav gehärteten, so weist der dampfgehärtete Beton bessere Dämmeigenschaften, zwei- bis dreimal so hohe Festigkeiten und nur  $1/4$ - bis  $1/6$ mal so große Raumänderungen beim Austrocknen und Durchfeuchten auf [40]. Solche verminderten Raumänderungen sind bei Schaumbeton besonders erwünscht, weil er keine Zuschlagstoffe enthält, die Raumänderungen behindern.

Für dampfgehärtete Erzeugnisse mit Rohdichten von 480 bis  $720 \text{ kg/m}^3$  werden Druckfestigkeiten von 21 bis  $70 \text{ kp/cm}^2$  genannt, während mit 1120 bis  $1440 \text{ kg/m}^3$  Festigkeiten zwischen 210 und  $700 \text{ kp/cm}^2$  erreicht werden können.

Die Wärmeleitfähigkeit bewegt sich zwischen  $0,10 \text{ kcal/mh } ^\circ\text{C}$  (Rohdichte  $480 \text{ kg/m}^3$ ) und  $0,37$  bis  $0,43 \text{ kcal/mh } ^\circ\text{C}$  (Rohdichte  $1440 \text{ kg/m}^3$ ).

Ein Härten im Autoklav erlaubt den Zusatz sehr großer Mengen mehlfeyner, kieselsäurehaltiger Stoffe. (Ein Versuchsbeton aus 1 Stoffraumteil Zement und 2 Stoffraumteilen Flugasche wurde mit einer genügenden Schaummengen auf einen Hohlraumgehalt von 50 % gebracht.)

Sogenannter „feinkornfreier“ Beton ist durch LP-Zusätze mit einem Luftgehalt von 20 bis 30 % hergestellt worden [41]; in der Wirkung ersetzt die eingeführte Luft den feinen Zuschlag. Hierfür sind verschiedene Grobzuschlagstoffe geeignet; die Gewichte solcher Betone können zwischen  $1680$  und  $1920 \text{ kg/m}^3$  und die Druckfestigkeiten zwischen 14 und  $70 \text{ kp/cm}^2$  liegen.

#### **4.7 Luftporenbildende Zusätze für Beton aus leichten Zuschlagstoffen**

Zur Zeit ist es üblich, allen Arten von Leichtbetonen LP-Zusatzmittel zuzusetzen, und zwar nicht nur den Dämm- und Füllbetonen aus geblähtem Perlit und Vermiculit, sondern auch dem Konstruktionsleichtbeton aus geblähtem Schiefertone, Ton, Ton-

schiefer oder geblähter Schlacke. Die künstlich eingeführte Luft verbessert die Verarbeitbarkeit und den Zusammenhalt, vermindert das Wasserabsondern und erhöht die Frostbeständigkeit. Luftporen in optimaler Menge erhöhen die Druckfestigkeit von Magerbeton.

Dämmbeton aus Perlit und Vermiculit enthält gewöhnlich 20 bis 35 % Luft. Ein derartiger Luftgehalt vermindert wesentlich die Rohdichte und Druckfestigkeit des Betons. Die dazu erforderliche Zusatzmenge ist gewöhnlich 10mal so groß wie die, die zur Erlangung der Frostbeständigkeit von gewöhnlichem Beton erforderlich ist. Durch den hohen Luftgehalt wird der Wasseranspruch sehr stark vermindert, die Gemische sind beweglicher als übliche Betone und erfordern zur Verdichtung kein Rütteln und als Bearbeitung nur ein Abziehen. Das Optimum beim Einbauen wird für Beton mit einem Setzmaß von 12,5 bis 20 cm erhalten. Ohne eingeführte Luft ist Beton mit Vermiculit oder Perlit schwierig zu verarbeiten; auch liegen dann der Wassergehalt und die Rohdichte verhältnismäßig hoch und die Wärmedämmung nicht so günstig.

Zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit von Konstruktionsbeton aus leichten Zuschlägen ist es wegen der zum Teil ungünstigen Kornform der feineren Leichtzuschläge meist erforderlich, künstliche Luftporen einzuführen. Bei Beton mit mehr als 335 kg Zement in 1 m<sup>3</sup> ist dies nicht immer nötig; aber in vielen Fällen werden auch bei diesem Beton das Einbringen und abschließende Bearbeiten durch Luftporen noch erleichtert.

In Fällen, in denen der Beton strengen Witterungseinflüssen ausgesetzt ist, sollte die Zusatzmenge auf das Minimum, das für den Frostwiderstand erforderlich ist, begrenzt und sonst soweit auf die Verarbeitbarkeit abgestimmt werden, als die Festigkeit dabei nicht übermäßig gemindert wird.

## **5. Luftabführende Zusätze**

Es hat Fälle gegeben [42], bei denen Zuschlagstoffe in plastischem Beton Gase freisetzen oder zu einer übermäßigen Luftbildung beitragen. Dieser Vorgang machte einen Zusatz nötig, der das Übermaß an Luft oder an anderem Gas abführte. Manchmal ist es auch erwünscht, einen Teil der eingeführten Luft aus einer Betonmischung zu entfernen. Hierfür wurden Verbindungen wie Tributylphosphat, Dibutylphthalat, wasserunlösliche Alkohole und wasserunlösliche Carbon- und Borsäureester vorgeschlagen, ebenso Silicone. Tributylphosphat ist jedoch der am meisten verwendete Stoff.

## **6. Gasbildende Zusätze**

### **6.1 Verwendung gasbildender Zusätze gegen Absetzen und Wasserabsondern**

Absetzen und Wasserabsondern frisch gemischten Betons rühren vom Sedimentieren der festen Bestandteile in der Mischung her. Damit ist manchmal ein Wasserverlust durch die Schalung oder

in den angrenzenden Untergrund verbunden. Das Ausmaß des Absetzens und Wasserabsonderns ist von vielen Faktoren abhängig.

Starkes Absetzen und Wasserabsondern können zu unerwünschten Eigenschaften des erhärteten Betons oder Mörtels führen, wie zum Beispiel zu minderwertigem Gefüge, Schlämmeschichten und Hohlräumen an der unteren Fläche von Schalungen, unter Aussparungen, unter der Bewehrung oder unter anderen eingesetzten Teilen. Dadurch kann die Haftung vermindert und die Wasserdichtigkeit, Gleichmäßigkeit sowie Festigkeit des Betons und Mörtels herabgesetzt sein. Manchmal werden dann teure Arbeiten zur Behebung der Mängel erforderlich.

Dem Mörtel oder Beton zugemischtes Aluminiumpulver setzt sich mit den Hydroxyden im frischen Zementleim um und bildet kleine, das ganze Gefüge durchsetzende Wasserstoffbläschen [43, 44]. Andere Metalle, wie Magnesium und Zink, reagieren ebenso mit den Alkalien des Zements, jedoch hat nur Aluminium eine weitgehende Anwendung für Beton gefunden. Geschwindigkeit und Ausmaß der Reaktion hängen von der Art und Menge des Al-Pulvers, der Feinheit und Zusammensetzung des Zements, der Temperatur, dem Mischungsverhältnis und anderen Faktoren ab. Gewöhnlich wird das unpolierte Pulver bevorzugt, obgleich poliertes Pulver dann vorteilhaft sein kann, wenn eine langsame Reaktion erwünscht ist. Die zugesetzten Mengen liegen im allgemeinen zwischen 0,005 bis 0,02 % des Zementgewichts. Größere Mengen können zur Herstellung von Porenbeton mit mäßiger Festigkeit angewendet werden.

Wegen der im allgemeinen sehr geringen Zusatzmengen (etwa 1 Teelöffel je Sack Zement) und der Neigung des Pulvers, auf dem Anmachwasser zu schwimmen, wird es im allgemeinen mit Feinsand, Zement, Puzzolan oder mit verzögernden Verflüssigern vermischt zugesetzt.

Der freiwerdende Wasserstoff verursacht bei richtigem Vorgehen ein geringes Aufblähen des frisch gemischten Betons oder Mörtels und vermindert oder verhindert so ein Absetzen. Durch behinderte Ausdehnung werden ohne übermäßiges Absinken der Festigkeit die Haftung am Bewehrungsstahl und die Wirksamkeit des Ausgießens von Spalten erhöht. Die Anwendung von Al-Pulver ist besonders beim Untergießen von Maschinen oder Ausfüllen von Hohlräumen unter horizontalen Flächen nützlich. Al-Pulver wird auch bei Spannbeton zum Auspressen der Spanglieder mit nachträglichem Verbund benutzt. Zu viel Al-Pulver kann andererseits zur Anreicherung von Gasporen unter horizontalen Flächen führen und so den Anschluß beeinträchtigen. Die Festigkeit hängt in starkem Maße davon ab, wie weit die Ausdehnung behindert wird. Daher ist es wichtig, daß die abschließende Fläche dicht ist. (Al-Pulver oder andere gasbildende Zusätze im Vergußmörtel oder Beton können das Schwinden durch Austrocknen oder durch Carbonatisation nach dem Erhärten nicht verhindern.) Bei heißem Wetter kann der Wasserstoff rasch freigesetzt werden und sich verflüchtigen und bei kaltem Wetter nicht rasch genug vor dem Erstarren der Mischung entstehen.

Eine verzögerte Gasbildung nach dem Erstarren kann je nach Ablauf, Gasmenge und Behinderung der Ausdehnung schädlich sein oder auch nicht.

Die Geschwindigkeit der Gasentwicklung wird durch Zusatz von Alkalien gesteigert (siehe Abschnitt 6.2). Bei normaler Temperatur setzt die Reaktion unmittelbar mit dem Mischen ein und kann sich über 1½ bis 4 Stunden fortsetzen. Bei Temperaturen über 32 °C kann die Reaktion innerhalb von 30 min beendet sein; das Absetzen hält aber dann noch an, bis der Beton oder Vergußmörtel endgültig erstarrt ist. Bei 4,5 °C ist für gleiches Aufblähen etwa zweimal so viel Aluminium erforderlich wie bei 21 °C.

## **6.2 Verwendung gasbildender Zusätze zu Betonwaren**

Durch größere Zusatzmengen von Aluminium (als unter 6.1 angegeben) kann Leichtbeton erzeugt werden. Manchmal werden Alkalien, wie Natriumhydroxyd, Kalkhydrat oder Trinatriumphosphat, zugesetzt, um die Gasbildung zu beschleunigen. Wenn die Reaktion so gesteuert wird, daß das Gas zur richtigen Zeit und in passender Menge entsteht, nimmt das Gemisch beträchtlich an Raum zu. Es hat sich auch als wünschenswert erwiesen, manche Typen von Luftporenbildnern oder andere Stoffe, wie benzoesaures Natrium, zuzusetzen, um die Gasporen zu stabilisieren, ihr Zusammenfließen und ein Entmischen sowie eine Schichtbildung zu verhindern. Durch Änderung der Zugabemenge des Gasbildners und sorgfältige Beachtung anderer Faktoren, wie Temperatur und Gleichmäßigkeit des Zements, wird es möglich, Betone sehr unterschiedlicher Dichte herzustellen. Solche Betone entstehen mit oder ohne Zuschlagstoffe. Um jedoch eine unerwünschte Entmischung zu vermeiden, sollte als grober Anteil nur ein leichter Zuschlag verwendet werden.

Das Verfahren ist nicht nur für Betonwaren anwendbar, sondern auch für manche Ortbetone oder Mörtel, z. B. für dämmende Schüttungen, bei denen Risse durch die hohe Trockenschwindung unbedenklich sind. Für diesen Zweck sind etwa 0,6 kg Aluminiumpulver je m<sup>3</sup> Beton erforderlich.

Während mit den erwähnten Metallpulvern Wasserstoffbläschen gebildet werden, entstehen durch das Einmischen von Wasserstoffsuperoxyd und Chlorkalk Sauerstoffbläschen.

Im allgemeinen entsprechen die Eigenschaften des Gasbetons jenen von Schaumbeton gleicher Rohdichte (siehe 4.6).

## **7. Quellende Zusätze**

Quellende Stoffe finden sich gewöhnlich in quellenden oder sog. schwindfreien Zementen. Da diese Stoffe aber auch als Zusätze benutzt werden, ist hier eine kurze Beschreibung angebracht.

Während der Hydratation quellen solche Stoffe selbst oder setzen sich unter Quellen mit anderen Bestandteilen des Betons um. Das Quellen kann von gleicher Größe wie das Schwinden oder auch größer sein. Für die Anwendung sind das Ausmaß und der

Zeitablauf des Quellens äußerst wichtig; um zufriedenstellende Ergebnisse zu erhalten, müssen beide beherrscht werden.

Bei nicht behindertem Beton darf das Quellen erst einsetzen, wenn der Beton eine ausreichende Zugfestigkeit erreicht hat und nicht zerrieben werden kann. Wird das Quellen durch Einspannung behindert, so muß der Beton fest genug sein, um die auftretenden Druckspannungen aufnehmen zu können. Es ist berichtet worden, daß eine Behinderung des Quellens in einer Richtung auch in den beiden anderen, rechtwinklig dazu liegenden Richtungen einen gewissen Druck erzeugt [45]. Vergießen, Ausbessern, schwindrißfreier Beton und selbstspannender Beton verlangen ein zeitlich und in der Größe gut abgestimmtes Quellen. Berichte befassen sich mit den folgenden quellenden Stoffen:

7.1 Fein zerteiltes oder gekörntes Eisen mit Chemikalien, die das Oxydieren des Eisens fördern, werden zur Herstellung quellender oder schwindfreier Mörtel oder Betone verwendet. Es entsteht ein Quellen durch Zunahme des Festraums, wenn das Eisen durch Zutritt von Luft und Feuchtigkeit in Eisenoxyde überführt wird. Das Quellen wird durch die Menge des oxydierenden Katalysators beeinflusst. Es wurde gefunden, daß niedriger Wasserzementwert, gutes Verdichten und Nachbehandeln geeignet waren, ein fortschreitendes Oxydieren und Quellen zu verhindern, das sonst bei nachträglichem Durchfeuchten einsetzen würde. Größere Zusatzmengen sollten nur dort verwendet werden, wo zum Beispiel Vergußmörtel abgeschlossen ist oder die freie Fläche mit einem Film, Zementmörtel oder Beton versiegelt oder abgedeckt wird.

7.2 Durch Brennen eines Gemisches aus Gips, Bauxit und Kalkstein ist in Frankreich ein Sulfataluminat-Zement hergestellt worden, der mit Portlandzement vermischt wird [46]. Die Zusatzmengen, bezogen auf den Portlandzement, liegen zwischen 9 und 25 Gew.-%. Der Anteil der ebenfalls zugesetzten, granulierten Hochofenschlacke beträgt im Gemisch 15 bis 20 %. Der zeitliche Ablauf des Quellens hängt vom Schlackenanteil sowie der Feinheit der Schlacke und des Sulfataluminatzements ab. Der Quellvorgang wird durch Beendigung des Feuchthaltens unterbrochen.

7.3 Bei einem russischen selbstspannenden Zement aus Portlandzement, Baugips und Tonerdezement wird das Quellen über eine hydrothermale Nachbehandlung geregelt [47, 48].

7.4 Neuerdings wurde in den USA über ein wasserfreies Sulfataluminat berichtet, das mit Portlandzement gemischt zum Quellen führt [45, 49]. Das Quellen kann sowohl für schwindfreien Zement als auch für Zement eingestellt werden, der bei Behinderung des Quellens eine Selbstspannung bis  $84 \text{ kp/cm}^2$  erzeugt. Der Vorgang wird durch die Besonderheiten des Portlandzements, den Wasserzementwert und die Bedingungen bei der Nachbehandlung beeinflusst.

7.5 Auch über selbstspannende Betone durch Treiben des Periklases (Magnesiumoxyds) im Zement oder eines Periklaszusatzes

zum Zement liegt ein Bericht vor [50]. Die Hydratation des Magnesiumoxyds wird durch Dampfbehandlung beschleunigt und geregelt.

## 8. Fein zerteilte mineralische Zusätze

### 8.1 Allgemeines

Feine mineralische Zusätze können in die drei Gruppen inert, puzzolanisch und zementartig eingeteilt werden. Sie beeinflussen die physikalischen Eigenschaften des Frischbetons und dienen auch zur Verbesserung mangelhafter Kornzusammensetzung. Viele Mischungen erhalten wegen der erforderlichen Verarbeitbarkeit und Plastizität des Betons einen höheren Zementgehalt als für die Festigkeit nötig ist. Ein Teil des überschüssigen Zements kann durch mineralische Feinmehle ersetzt werden. Bei dieser Anwendung ist die chemische Eigenart des Zusatzes zweitrangig.

Puzzolanisch oder zementartig wirkende Zusätze tragen zur Festigkeitsentwicklung bei und können daher einen Teil des Zements ersetzen. Sie verändern auch die physikalischen und chemischen Eigenschaften des erhärteten Betons.

### 8.2 Arten

*Chemisch verhältnismäßig unwirksame Stoffe* sind z. B. gemahlener Quarz, gemahlener Kalkstein, Bentonit, Kalkhydrat und Kalk.

*Zementartige Stoffe* sind: Naturzemente, hydraulische Kalke, Schlackenbinder (Gemische aus Hochofenschlacke und Kalk) und granuliert Hochofenschlacken (Hüttensand).

*Puzzolan* ist nach ASTM Standard C 219 gekennzeichnet als „ein kieselsäurehaltiger oder kieselsäure- und tonerhaltiger Stoff“, dem an sich geringe oder keine zementähnliche Wirkung zukommt, der jedoch fein zerteilt in Gegenwart von Wasser mit Calciumhydroxyd bei gewöhnlichen Temperaturen reagiert und zementartige Verbindungen bildet. Beispiele für Puzzolane sind Flugasche, vulkanisches Glas, Diatomeenerde und einige rohe oder erhitzte Tone und Schiefertone.

Eine Zusammenfassung von Versuchsergebnissen und Eigenschaften dieser Stoffe sowie deren Anwendung lieferte Meissner [51].

*Vorschriften.* Naturzement: ASTM Standard C 10 und Bundesvorschrift SS-C-185a; hydraulischer Kalk: ASTM Standard C 141; Schlackenbinder: ASTM Standard C 358 und Bundesvorschrift SS-C-218a; rohe und gebrannte, natürliche Puzzolane: ASTM Standard C 402; Flugasche: ASTM Standard C 350 (Flugasche als Puzzolan oder als Feinmehl wirkend).

### 8.3 Wirkung auf den Frischbeton

Fehlt in Mischungen das „Feinste“ – insbesondere solches bis 0,07 mm Korngröße –, so werden durch einen Zusatz von Mineralmehl die Verarbeitbarkeit verbessert, das Wasserabsondern vermindert und die Festigkeit erhöht. Je größer die spezi-

fische Oberfläche des Zusatzes ist, desto weniger wird davon für eine bestimmte Verbesserung der Verarbeitbarkeit benötigt. Eine zweckentsprechende Zusatzmenge bedingt keinen höheren Wassergehalt der Mischung, und das Schwinden und die Wasseraufnahme werden nicht wesentlich verändert.

Eine Zugabe von Mineralmehl zu Mischungen mit ausreichendem Mehlkorn, wie z. B. zementreiche Mischungen, verschlechtert bei gegebenem Wassergehalt im allgemeinen die Verarbeitbarkeit, sofern nicht mehr Wasser zugesetzt wird. Dieses vergrößert dann jedoch das Schwinden und die Wasseraufnahme und senkt die Festigkeit.

Von den verschiedenen Faktoren, die das Wasserabsondern und den Plastizitätsgrad bestimmen, ist das Verhältnis der Oberfläche der festen Bestandteile zum Wassergehalt der wichtigste [52]. In einer Mischung, in der dieses Verhältnis klein ist, erscheint der Feinmörtel dünn und wässrig; die Feinmörtelschicht zwischen den Zuschlagkörnern ist ebenfalls dünn; dem Beton mangelt es daher an Plastizität, und er neigt zum Entmischen [53]. Ein kleines Verhältnis bedeutet nach dem Kriterium von Weymouth auch eine stark gestörte Kornfolge [54]. Das durch ein kleines Verhältnis von Oberfläche zu Wasser bedingte, verhältnismäßig starke Wasserabsondern führt auch zu unterbrechenden Wasserschichten unter den Zuschlagkörnern.

Die Aufgabe der Mineralmehle — und danach sind sie auszuwählen — ist es also, bei möglichst kleinem Wasseranspruch das Volumen des Feinmörtels zu erhöhen. Die Form der Körner des Gesteinsmehls soll daher günstig und die Oberfläche des Gesteinsmehls auch nicht zu groß sein. Ob der Feinmörtel einer Mischung verbessert werden kann oder nicht, hängt von verschiedenen Größen ab (Wasser + Luftgehalt; Wasserzementwert und Feinmörtelgehalt; Beziehungen sind auf S. 139/143 im Bericht von 1954 [2] erörtert worden).

#### 8.4 Mengenverhältnis

Meist wird entweder das Gewicht oder der Stoffraum des Zusatzes ebenso groß sein wie der Teil Portlandzement, der dadurch ersetzt wird. Die Zusatzmenge wird demgegenüber jedoch größer, wenn man auf ein Optimum von Eigenschaften und auf größte Wirtschaftlichkeit abstimmt. Von einigen Stoffen, insbesondere von jenen mit größter Feinheit, werden — auf das Zementgewicht bezogen — 5 bis 15 %, von anderen 15 bis 30 % zugegeben. Der Anteil von Puzzolanen oder zementartigen Stoffen kann jedoch auch größer sein als der des Portlandzements im Gemisch. Nach den Empfehlungen, die für die Verwendung von Flugasche in Konstruktionsbeton mit

224	280	336 kg Portlandzement/m <sup>3</sup>
gegeben wurden [55], können, um gleichwertige Festigkeit und Verarbeitbarkeit zu erlangen,		
43	38	32 kg Portlandzement
weggelassen werden, wenn dafür		
68...79	57...61	45 kg Flugasche

zugesetzt werden. Im allgemeinen werden zu solchen Mischungen rd. 10 l weniger Wasser je m<sup>3</sup> Beton benötigt. Dies wird auf die runde Gestalt der Flugaschekörnchen und ihre glatte, dichte Oberfläche zurückgeführt. Viele andere Puzzolane weichen hiervon ab und erhöhen gegenüber Beton ohne Zusatz den Wasseranspruch; dadurch können wiederum die Wasseraufnahme, das Schwinden und die Wasserdurchlässigkeit des Betons erhöht werden.

Bei dem in Europa für massige Konstruktionen angewandten Triefverfahren wird granuliert Hochofenschlacke mit Wasser gemahlen und dem Beton als Schlämme zugesetzt. Das Bindemittel der Bort-Staumauer (660 000 m<sup>3</sup> Beton) bestand aus 68,5 % naß vermahlener Schlacke, 30 % Portlandzement und 1,5 % Natriumchlorid.

Einige Anhaltspunkte für angemessene Zusatzmengen zementartiger Stoffe oder von Puzzolanen ergeben sich aus den Vorschriften für Mischzemente. Demnach enthalten

Portland-Hochofenschlackenzement<sup>4)</sup>

25...65 % Schlacke (ASTM Standard und Federal Spec.)

Portland-Puzzolanement

15...35 % Puzzolan (Fed. Spec.)

15...50 % Puzzolan (ASTM Standard)

Zu Portland-Puzzolanement können verwendet werden: Tone, Schiefertone, Diatomeen-Erde, Tuffe, vulkanische Aschen und bimsartige Stoffe, entweder roh oder gebrannt, sowie Flugasche.

## 8.5 Auswirkung auf die Festigkeit

Im allgemeinen wird durch einen Zusatz von Mineralmehlen die Festigkeit magerer Mischungen erhöht und die von zementreichen gemindert. Der Beitrag der puzzolanischen oder zementartigen Zusätze zur Festigkeitsentwicklung ist im allgemeinen verhältnismäßig gering. Unter günstigen Erhärtungsbedingungen kann die Festigkeit in höherem Alter größer ausfallen als mit Portlandzement allein, obwohl mit verschiedenen Zusätzen sehr unterschiedliche Ergebnisse zu erwarten sind. In jedem Falle muß die Feuchtbehandlung verlängert werden, damit die mit der Mischung mögliche Festigkeit sich entwickeln kann.

## 8.6 Auswirkung auf den Sulfatwiderstand

Puzzolane oder zementartige Stoffe sind zu Bauten verwendet worden, die Seewasser oder anderem sulfathaltigem Wasser ausgesetzt sind [56]. Als übliche Mengenanteile (Gewicht oder Stoffraum) gelten dabei: 1 Teil Puzzolan auf 5 Teile Portlandzement bis 1 Teil Puzzolan auf 2 Teile Portlandzement. Da diese Zusätze gewöhnlich ein kleineres spezifisches Gewicht als Portlandzement aufweisen, ergibt sich bei gleicher Gewichtszugabe eine verhält-

<sup>4)</sup> Anmerkung: In Deutschland HOZ entsprechend.

nismäßig größere Stoffraummenge. Puzzolane verbessern den Widerstand des Betons aus nicht sulfatwiderstandsfähigem Zement im Meerwasser, in sulfathaltigem Grundwasser und in sauren, natürlichen Wässern. Die Verbesserung wirkt sich bei zementarmem Beton verhältnismäßig stärker aus. Zusammen mit sulfatwiderstandsfähigem Portlandzement erhöht ein Puzzolanzusatz den Sulfatwiderstand des Betons nicht. Wenn chemisch aktive Aluminiumverbindungen im Puzzolan vorhanden sind, kann sogar die Widerstandsfähigkeit dadurch vermindert werden [57, 58].

### 8.7 Auswirkung auf den Temperaturanstieg

Puzzolane und zementartige Zusätze sind bei großen Wasserbauwerken benutzt worden, um den Portlandzementanteil und damit die Hydratationswärme sowie die Temperaturerhöhung herabzusetzen. Die Zugabemengen entsprechen im allgemeinen denen zur Erhöhung des Sulfatwiderstands.

### 8.8 Auswirkung auf die Alkali-Zuschlag-Reaktion

Die Verwendung von Puzzolan zur Unterbindung übermäßigen Treibens wurde 1947 vorgeschlagen [59]. Jedoch gibt es nur einige wenige Beispiele, bei denen ein Puzzolanzusatz zu einem Beton aus alkaliempfindlichem Zuschlag und stark alkalihaltigem Zement benutzt wurde, um dem erwarteten Treiben entgegenzuwirken. (Angaben über das Verhalten dieser Ausführungen stehen dem Komitee nicht zur Verfügung.)

Die Alkali-Zuschlag-Reaktion beruht auf dem Zusammenwirken von Alkalien mit gewissen kiesel-sauren Bestandteilen des Zuschlags. Die Reaktionsprodukte können durch übermäßigen Druck zur Ribbildung und zu allgemeinem Zerfall des Betons führen [60 bis 67]. Als Alkaligehalt des Zements wird hier die Summe von  $\text{Na}_2\text{O}$  und  $\text{K}_2\text{O}$ , als  $\text{Na}_2\text{O}$  ausgedrückt, verstanden ( $\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{K}_2\text{O}$ ). Als 1940 diese Schadensart von Stanton erstmals beschrieben wurde [68, 69], bot sich als Abhilfemaßnahme nur die Verwendung von Zement mit niederem Alkaligehalt oder die Vermeidung reagierender Zuschlagstoffe. Bis heute haben praktische Erfahrungen und Feststellungen über das Verhalten von Beton aus Zement mit niederem Alkaligehalt und empfindlichen Zuschlägen keine Hinweise geliefert, daß eine übermäßige Ausdehnung zu erwarten ist. Jedoch wies eine beträchtliche Zahl von Laboratoriumsuntersuchungen aus, daß übermäßiges Treiben unter bestimmten äußeren Einwirkungen auch unter diesen Verhältnissen möglich wird [59, 70]. Ebenfalls durch Laboratoriumsversuche wurde die günstige Wirkung eines Zusatzes bestimmter natürlicher oder künstlicher Puzzolane nachgewiesen; andere Puzzolane haben jedoch wenig gewirkt. Daher muß die Eignung einzelner Puzzolane durch einen Versuch beurteilt werden. Im allgemeinen wird ein beschleunigtes Versuchsverfahren benutzt, um den Grad der Verminderung der Mörteldehnung zu bestimmen [71].

Durch die folgenden drei Gruppen von Puzzolanen wurde die Dehnung bedeutsam vermindert: 1. Amorphe, kieselige oder kie-

selige und tonerdehaltige Stoffe, einschließlich einiger Opale oder opalhaltiger Gesteine, bestimmte vulkanische Gläser, Diatomeenerde, gebrannte Kaolin-Tone und einige Flugaschen. — 2. Gebrannte Montmorillonit-Tone mit austauschbarem Kation-Calcium (Brenntemperatur 540 ... 980 °C, jedoch nur so hoch, daß die kristalline Struktur erhalten bleibt). — 3. Zusammensetzungen aus den beiden Gruppen, einschließlich kieseligem Schiefertone (z. B. gewisse kieselige Schiefertone und veränderte Bimsstoffe als Gemische von Montmorillonit-Ton und vulkanischem Glas) [72].

Die Menge geeigneten Puzzolans ist je nach Zuschlag und Alkali-gehalt des Zements verschieden. Ein ausreichender Schutz sollte im allgemeinen durch Zugaben von 20 bis 35 % des Zementgewichts erhalten werden. Diese Anteile mindern gewöhnlich die physikalischen Eigenschaften des Betons, wie Festigkeit und Verarbeitbarkeit, nicht. Gewisse fein zerteilte, stark opalhaltige Stoffe (z. B. gewisse Diatomeen-Erden und opaline Schiefer) können auch schon in Mengen von 15 % und weniger das Treiben verhindern. Bei Zusatzmengen von 10 % und weniger können bestimmte Puzzolane die Dehnung des Betons aus empfindlichen Zuschlägen und Zement mit hohem Alkaligehalt erhöhen. Vermutlich erzeugt dann die Umsetzung eines Teils der Alkalien mit dem Puzzolan ein Verhältnis zwischen reagierender Kieselsäure und verfügbaren Alkalien, das näher an das Optimum für die Bildung des treibenden Alkali-Silikatgels heranrückt.

## **9. Zusätze zur Dichtung gegen Feuchtigkeit und zur Verminderung der Durchlässigkeit**

Werden zweckentsprechend zusammengesetzte Betonmischungen mit besonderer Sorgfalt eingebaut, so ist der Beton in einem Bauwerk im allgemeinen dicht. Die Verwendung solcher Zusätze ist zur Behebung von Mängeln der Mischung oder zur Erleichterung der Arbeit befürwortet worden. Die Frischbetoneigenschaften können dadurch günstig beeinflußt werden, wie z. B. auch durch die Erzeugung von Luftporen. Ausdrücke wie „Feuchtigkeitsdichtung“ oder „Wasserdichtung“ lassen den Schluß zu, daß ein Wassereindringen in trockenen Beton oder ein Durchfließen durch nicht wassersatten Beton vollständig verhindert wird. Doch wurde nicht gefunden, daß die Zusätze diese Wirkung haben; die Bezeichnungen bedeuten also, daß das Wassereindringen oder -durchtreten vermindert wird.

### **9.1 Zusätze zur „Feuchtigkeits- oder Wasserabdichtung“**

Zu diesen gehören Seifen, Butylstearat und gewisse Petroleum-erzeugnisse [73 bis 78]. Die Seifen umfassen Salze der Fettsäuren, gewöhnlich Calcium- oder Ammoniumstearat oder -oleat. Mit Ausnahme von Butylstearat tragen sie in den Beton beim Mischen Luft ein. Unter den Petroleum-erzeugnissen finden sich Mineralöle, Asphaltemulsionen und bestimmte Verschnitt-Asphalte. Solche Zusätze können das Eindringen von Regen in die sichtbaren Poren von Mauersteinen aus erdfeucht hergestelltem Beton und auch das Eindringen der Feuchtigkeit in die Mikroporen

trockenen Betons vermindern. Versuche lieferten jedoch keinen Hinweis auf eine vergleichbare Wirkung hinsichtlich der Feuchtigkeitsbewegung durch einen nicht wassergesättigten Beton, sofern der Beton keinen Feinmörtel mit verhältnismäßig hoher Porosität enthielt. (Hohe Porosität rührt von einem niederen Zementgehalt und entsprechend hohen Wasserzementwert, mangelnder Nachbehandlung oder beidem her.) Weist der Beton eine ausreichend geringe Porosität auf (wie bei einem Wasserzementwert von höchstens 0,60 und nach sachgemäßer Nachbehandlung), so ergeben Zusätze zur Feuchtigkeitsdichtung keine merkbare Verbesserung. Der Bauforschungs-Verwaltungsrat berichtete [79], daß nach Meinung der Mehrheit von 61 befragten Beobachtern Zusätze zur Feuchtigkeitsdichtung nicht „wirksam oder brauchbar zur Beeinflussung der Feuchtigkeitswanderung durch Decken auf dem Untergrund sind“. Ein besonderer Beirat folgte auf Grund von Versuchen über die Feuchtigkeitsbewegung durch nicht wassergesättigte Betonplatten: Das Komitee findet keine ausreichenden Unterlagen, um die Wirksamkeit irgendeines Zusatzes zur Minderung der Feuchtigkeitsbewegung durch Platten auf dem Untergrund soweit zu bestätigen, daß die sonst erforderliche Dampfsperre oder Kornsperrschicht oder beides entfallen kann.

## 9.2 Zusätze zur Verminderung der Wasserdurchlässigkeit

Die oben besprochenen Zusätze setzen die Wasserdurchlässigkeitsziffer von wassergesättigtem Beton nicht herab. Jedoch wird die Durchlässigkeit von Mischungen mit verhältnismäßig geringem Zementgehalt des Feinmörtels durch richtig zugemessene Mineralmehle vermindert. Wenn diese Wirkung erzielt wurde, ging gewöhnlich eine Verminderung des Wasseranspruchs des Frischbetons und damit der Porosität voraus.

Wassereinsparende Zusätze sollten die Gesamtporosität etwas herabsetzen, doch gibt es keine hinreichenden Feststellungen darüber, daß die Durchlässigkeit damit wesentlich vermindert wird. Beschleuniger, wie Calciumchlorid, verstärken den Hydrationsablauf und vermindern so die Zeit, die für eine Mischung nötig ist, um einen bestimmten Grad der ihr eigenen, endgültigen Undurchlässigkeit zu erreichen.

## 10. Haftzusätze

Haftzusätze sind wässrige Emulsionen organischer Stoffe, die mit Zement oder Mörtel vermischt auf alte Betonflächen vor dem Anbetonieren aufgetragen werden oder die der anzubetonierenden Mischung selbst zugegeben werden. Durch die Veränderung der Eigenschaften des angetragenen Betons sollen die Haftung erhöht und die Haftspannungen vermindert werden. Diese Stoffe wurden auch beim Ansetzen von Zementfarben und beim Auftragen von Zementstuck als brauchbar befunden.

Die üblicherweise benutzten Haftzusätze werden aus Naturgummi, synthetischem Gummi oder aus einem der zahlreichen organischen Polymere oder Copolymere hergestellt. Die Polymere um-

fassen Polyvinylchlorid, Polyvinylacetat, Acrylate und Butadien-Styrol-Copolymer.

Bei den Haftzusätzen unterscheidet man zwei Gruppen: wiederemulgierbare und nicht wiederemulgierbare Zusätze. Die letzteren sind wasserbeständig und daher für die Verwendung im Freien oder in feuchter Umgebung besser geeignet. Je nach den Verhältnissen muß dem Verhalten eines Haftzusatzes auf feuchtem Beton oder dem Vermögen, die einmal entwickelte Festigkeit in Gegenwart von Wasser zu behalten, besondere Beachtung geschenkt werden.

Diese Emulsionen werden der Mischung in einer Menge von 5 bis 20 %, bezogen auf das Zementgewicht, zugesetzt; die Menge ist abhängig von der Art der Mischung und den Baustellenverhältnissen. Haftzusätze tragen gewöhnlich Luft ein und ergeben eine klebrige Konsistenz der Mörtelmischungen. Sie werden nur auf sauberen, gesunden Flächen wirksam, da die Haftung nur so groß sein kann wie die Festigkeit des Untergrunds.

### **11. Chemische Zusätze zur Verminderung des Alkali-Zuschlag-Treibens**

Geringe Zusatzmengen gewisser chemischer Stoffe können geeignet sein, die Dehnung herabzusetzen [80, 81]. Nach Laboratoriumsuntersuchungen fand sich eine auffallende Verminderung der Dehnung durch einen Zusatz von 1 % Lithiumsalzen (bezogen auf das Zementgewicht) und durch etwa 2 bis 7 % gewisser Bariumsalze. Eine etwas verminderte Dehnung wurde auch mit bestimmten lufteintragenden Eiweißstoffen sowie mit einigen verzögernden Verflüssigern erhalten. Die mitgeteilten Ergebnisse sind beschränkt, und weitere Arbeit ist noch erforderlich.

### **12. Korrosionsverhindernde Zusätze**

Cushman und Gardener [82] stellen fest, daß Beton einen ausreichenden Schutz für den eingebetteten Stahl abgibt. Eine Ausnahme bilden jene Fälle, wo einziehendes oder durchsickerndes Wasser das freie Alkali in Form von Kalk und Calciumhydroxyd auswäscht. Nach Cushman [83] sollten die schwach löslichen Chromate theoretisch den besten Korrosionsschutz abgeben. Jedoch wirkten Anstriche mit Chrompigmenten und irgendwelchen löslichen Verunreinigungen korrosionsfördernd. Die technische Literatur gibt allerdings wenig Auskunft über die Anwendung von korrosionsverhindernden Zusätzen im Beton.

Lewis, Mason und Brereton [84] berichten in einer Arbeit über das nach Dougill patentierte Verfahren [85]. Nach diesem wird benzoesaures Natrium dem Stahlbeton zugesetzt (2 % im Anmachwasser oder 10 %ige Zementschlämme als Anstrich für die Bewehrung). Durch chemische Analyse wurde gefunden, daß das benzoesaure Natrium nach 5 Jahren noch im Beton erhalten war (bei 2 % Zusatz noch 1,3 % nachweisbar). Kondo, Takeda und Hideshima [19] stellen in zusatzfreiem Beton, der Wechsel- oder Gleichstrom ausgesetzt war, eine sehr geringe, dagegen im Beton mit Chlorid eine starke Korrosion des Stahls fest. Ein Zu-

satzmittel, das Calciumligninsulfonat enthielt, verminderte die Korrosion im chloridhaltigen Beton.

Bei Laboratoriumsuntersuchungen hat Calciumchlorid die Korrosion von wärmebehandeltem Beton beschleunigt. Doch fanden Arber und Vivian [10], daß gewisse erhärtungsbeschleunigende Verbindungen, die ein oxydierbares Ion enthielten, wie Zinnchlorid, Eisen-2-chlorid und Natriumthiosulfat, weniger Korrosion verursachen als Calciumchlorid. Natriumnitrit wurde von Moskvin und Alekseyev als korrosionsverhindernder Zusatz für dampfgehärtete Betonteile untersucht [86]. Sie führen an, daß die schützende Alkalität durch die Behandlung im gespannten Dampf beträchtlich vermindert wird, insbesondere wenn kieselsäurehaltige Zusätze im Beton sind; 2 oder 3 % Natriumnitrit (bezogen auf das Zementgewicht) waren unter diesen Bedingungen ein wirksamer Inhibitor. Nach Sarapin [87] verhinderten bei Lagerungsversuchen 2 % Natriumnitrit die Stahlkorrosion im Beton mit Calciumchlorid. Jedoch wurden auch Stimmen gegen die Verwendung von Inhibitoren laut [88, 89].

### 13. Pilz-, keim- und insektenwidrige Zusätze

Es ist angeregt worden, solche Stoffe nötigenfalls mit dem Zement zu vermahlen oder ihm zuzusetzen. Zu solchen Stoffen gehören mehrfach halogenierte Phenole [90, 91], Dieldrin-Emulsion [92] und Kupferverbindungen [93, 94].

### 14. Ausflockende Zusätze

Für bestimmte synthetische Polyelectrolyte wird angegeben, daß sie die Geschwindigkeit des Wasserabsonderns von Zementleim zwar erhöhen, daß sie jedoch das Wasserabsondern insgesamt vermindern. Damit sollen Zementleime und Mörtel zäher („länger“) gemacht sowie die Grünfestigkeit und der Zusammenhalt von Mörtel erhöht werden [95, 96].

### 15. Farbzusätze

Die Anforderungen an geeignete Farbzusätze schließen ein: Farbbeständigkeit im Sonnenlicht, Alkalibeständigkeit, keine ungünstige Wirkung auf das Erstarren und die Festigkeitsentwicklung und Farbbeständigkeit bei Härtung im gespannten Dampf. Wegen der Beständigkeit unter den verschiedenen Einwirkungen wird auf Payne verwiesen [97].

Der Abschnitt enthält noch Ausführungen über Farbpigmente, deren Herkunft, Verarbeitung und Wirkung auf einzelne Betoneigenschaften (z. B. verminderte Luftporenbildung durch Ruß) sowie über das Verhalten bei Dampfhärtung (Verfärbung von Eisenoxydfarben; Puzzolanwirkung bei Farben mit kieseligen Stoffen).

## SCHRIFTTUM:\*)

- [1] ACI Committee 212: Admixtures for concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 41 (1944/45) S. 73/88.
- [2] ACI Committee 212: Admixtures for concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 51 (1954/55) S. 113/146.
- [3] Symposium on effect of water-reducing admixtures and set-retarding admixtures on properties of concrete. ASTM Special Technical Publication No. 266, 1960.
- [4] Steinour, H. H.: Concrete mix water — how impure can it be? Journal of the PCA Research and Development Laboratories 2 (1960) No. 3, S. 32/50; ebenso PCA Research Department, Bulletin 119, 1960.
- [5] Newman, E. S., R. L. Blaine, C. H. Jumper und G. L. Kalousek: Effects of added materials on some properties of hydrating portland cement clinkers. U.S. National Bureau of Standards, Journal of Research 30 (1943) S. 281.
- [6] Forbrich, L. R.: The effect of various reagents on the heat liberation characteristics of portland cement. Proc. Amer. Concr. Inst. 37 (1940/41) S. 161/185.
- [7] Shideler, J. J.: Calcium chloride in concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 48 (1951/52) S. 537/560.
- [8] Calcium chloride in concrete. Highway Research Board, Bibliography No. 13, 1952.
- [9] Rapp, P.: Effect of calcium chloride on portland cements and concretes. Proc. Highway Research Board 14 (1934) S. 341/381.
- [10] Arber, M. G., und H. E. Vivian: Inhibition of the corrosion of steel embedded in mortar. Australian Journal of Applied Science (Melbourne) 12 (1961) S. 339/347.
- [11] High alumina cements. Building Research Digest (Garston, England) No. 27, 1951.
- [12] Robson, T. D.: Characteristics and applications of mixtures of portland cement and high-alumina cements. Chemistry and Industry (London), Jan. 1952.
- [13] Feret, L., und M. Venuat: The effect on shrinkage and swelling of mixing different cements to obtain rapid set. Revue des Matériaux de Construction (Paris) No. 496, 1957, S. 1/10.
- [14] Duriez, M., und R. Lezy: New possibilities for ensuring the rapid hardening of cements, mortars, and concretes. Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics (Paris), Annales No. 9, 1956, S. 138.
- [15] Balazs, G., J. Kelemen und J. Kilian: New method for accelerating the hardening of concrete. Epitoayag (Budapest) 10 (1958) S. 326/331. — Zusammenfassung in Proc. Amer. Concr. Inst. 57 (1960/61) S. 239.
- [16] McCall, J. T., und R. J. Claus: Effect of pellet and flake forms of calcium chloride in concrete. Highway Research Board, Bulletin 75, 1953.

\*) Anmerkung zu den Abkürzungen: Es bedeutet

ACI: American Concrete Institute,

ASTM: American Society for Testing and Materials,

PCA: Portland Cement Association,

RILEM: Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions.

- [17] ACI Committee 604: Recommended practice for winter concreting (ACI 604-56). Proc. Amer. Concr. Inst 52 (1955/56) S. 1025/1048.
- [18] Vollmer, H. C.: Effects of calcium chloride on concrete. Proc. Highway Research Board 27 (1947) S. 189/196.
- [19] Kondo, Y., A. Takeda und S. Hideshima: Effect of admixtures on electrolytic corrosion of steel bars in reinforced concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 56 (1959/60) S. 299/312.
- [20] Veitz, R. I. Stroitelnaya Promyshlennost 32 (1954) No. 9, S. 23/25.
- [21] Evans, R. H.: Effects of calcium chloride on prestressing steel and X-rays for anchorage lengths. Proceedings World Prestressed Conference, San Francisco 1957.
- [22] Godfrey, H. T.: Corrosion tests on prestressed concrete wire and strand. Prestressed Concrete Institute, Journal 5 (1960), S. 45, 48/51.
- [23] Monfore, G. E., und G. J. Verbeck: Corrosion of prestressed wire in concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 57 (1960/61) S. 491/516.
- [24] Wright, T. E.: An unusual case of corrosion of aluminium conduit in concrete. The Engineering Journal 38 (1955) S. 1357.
- [25] Hansen, W. C.: Oil well cements. Proceedings of the Third International Symposium on the Chemistry of Cement, London 1952, S. 598/632 (Cement and Concrete Association).
- [26] Entrained air in concrete. Proc. Amer. Concr. Inst 42 (1945/46) S. 601/700.
- [27] Blanks, R. F., und W. A. Cordon: Practices, experiences, and tests with air-entraining agents in making durable concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 45 (1948/49) S. 469/488.
- [28] Use of air-entraining concrete in pavements and bridges. Highway Research Board, Current Road Problems No. 13-R, 1950.
- [29] Powers, T. C.: The air requirement of frost resistant concrete. Proc. Highway Research Board 29 (1949) S. 184/202.
- [30] Mielenz, R. C., V. E. Wolkodoff, J. E. Backstrom, R. W. Burrows und H. L. Flack: Origin, evolution, and effects of the air void system in concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 55 (1958/59). Part 1: Entrained air in unhardened concrete. S. 95/122. — Part 2: Influence of type and amount of air-entraining agent. S. 261/272. — Part 3: Influence of water-cement ratio and compaction. S. 359/376. — Part 4: The air void system in job concrete. S. 507/518.
- [31] Powers, T. C.: Void spacing as a basis for producing air-entrained concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 50 (1953/54) S. 741/760.
- [32] Powers, T. C.: Discussion of „Effect of frost resistance in building materials“. RILEM Bulletin (Paris) 1 (1958) No. 43/44.
- [33] ACI Committee 613: Recommended practice for selecting proportions for concrete (ACI 613-54). Proc. Amer. Concr. Inst. 51 (1954/55) S. 49/64.
- [34] ACI Committee 311 (611): ACI Manual of Concrete Inspection. American Concrete Institute. 4. Aufl. Detroit 1961.
- [35] Kuenning, W. H., und C. C. Carlson: Effect of variations in curing and drying on the physical properties of concrete masonry units. PCA Research and Development Laboratories, Development Department Bulletin D 13, 1956.
- [36] Kennedy, H., und E. M. Brickett: The application of air-entraining agents in concrete and products. Pit and Quarry 38 (1945/46) No. 9, S. 144.
- [37] Farmer, H. G.: Air-entraining portland cement in concrete block. Rock Products 48 (1945) No. 1, S. 209.

- [38] Aerated concrete. Building Research Station Digest (Garston, England). Part 1: No. 28, 1951. — Part 2: No. 29, 1951.
- [39] Valore, R. C., Jr.: Cellular concretes. Proc. Amer. Concr. Inst. 50 (1953/54). Part 1: S. 773/796. — Part 2: S. 817/836.
- [40] Dilnot, S.: Cellular calcium silicate products. Rock Products 55 (1952) No. 10, S. 110/116.
- [41] Valore, R. C., Jr., und W. C. Green: Air replaces sand in „No Fines“ concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 47 (1950/51) S. 833/848.
- [42] Macnaughton, M. F., und J. B. Herbich: Accidental air in concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 51 (1954/55) S. 273/284.
- [43] Menzel, C. A.: Some factors influencing the strength of concrete containing admixtures of powdered aluminium. Proc. Amer. Concr. Inst. 39 (1942/43) S. 165/184.
- [44] Shideler, J. J.: The use of aluminium powder to produce non-setting concrete. U.S. Bureau of Reclamation, Engineering Laboratories, Report chemical prestressing. Proc. Amer. Concr. Inst. 58 (1961) S. 59/82.
- [45] Klein, A., T. Karby und M. Polivka: Properties of an expansive cement for chemical prestressing. Proc. Amer. Concr. Inst. 58 (1961) S. 59/82.
- [46] Lafuma, H.: Expansive cements. Proceedings of the Third International Symposium on the Chemistry of Cement, London 1952, S. 581/597 (Cement and Concrete Association).
- [47] Mikhailov, V. V.: New developments in self-stressed concrete. University of California, Proceedings of the Conference on Prestressed Concrete, Berkeley 1957, S. 25—1/25—12.
- [48] Mikhailov, V. V.: Stressing cement and the mechanism of self-stressing concrete regulation. National Bureau of Standards, Proceedings of the Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement, V. II, 1960, S. 927/955.
- [49] Klein, A., und G. E. Troxell: Studies of calcium sulfoaluminate admixtures for expansive cements. Proc. ASTM 58 (1958) S. 986/1008.
- [50] Slatanoff, V., und N. Djabaroff: The self-stressing of concretes by the hydration of periclase. Revue des Matériaux de Construction (Paris) No. 1961, S. 30/33. — Zusammenfassung in Building Science Abstracts 35 (1962) No. 2, S. 37.
- [51] Meissner, H. S.: Mineral admixtures. Significance of tests and properties of concrete and concrete aggregates. ASTM Special Technical Publication No. 169, 1955, S. 375/387.
- [52] Powers, T. C.: The bleeding of portland cement paste, mortar and concrete treated as a special case of sedimentation. PCA Research Laboratory, Bulletin 2, 1939.
- [53] Williams, G. M.: Admixtures and workability of concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 27 (1930/31) S. 647/653.
- [54] Weymouth, C.A.G.: A study of fine aggregates in freshly mixed mortars and concretes. Proc. ASTM 38 (1938) Part 2, S. 354/393.
- [55] Lovewell, C. E., und G. W. Washa: Proportioning concrete mixtures using fly ash. Proc. Amer. Concr. Inst. 54 (1957/58) S. 1093/1101.
- [56] Symposium on use of pozzolanic materials in mortars and concrete ASTM Special Technical Publication No. 99, 1949.
- [57] Polivka, M., und E. H. Brown: Influence of various factors on sulfate resistance of concrete containing pozzolan. Proc. ASTM 58 (1958) S. 1077/1099.

- [58] Eitel, W.: Recent investigations of the system lime-alumina-calcium sulfate-water and its importance in building research problems. Proc. Amer. Concr. Inst. 53 (1956/57) S. 679/698.
- [59] Hanna, W. C.: Unfavorable chemical reactions of aggregate in concrete and a suggested corrective. Proc. ASTM 47 (1947) S. 986/1009.
- [60] Meissner, H. S.: Cracking in concrete due to expansive reaction between aggregate and high-alkali cement as evidenced in Parker Dam. Proc. Amer. Concr. Inst. 37 (1940/41) S. 549/568.
- [61] Kammer, H. A., und R. W. Carlson: Investigation of causes of delayed expansion of concrete in Buck hydroelectric plant. Proc. Amer. Concr. Inst. 37 (1940/41) S. 665/672.
- [62] Tremper, B.: Evidence in Washington of deterioration of concrete through reactions between aggregates and high-alkali cements. Proc. Amer. Concr. Inst. 37 (1940/41) S. 673/688.
- [63] Coombs, H. A.: Expansion of concrete due to reaction between andesitic aggregate and cement. American Journal of Science 240 (1942) S. 288.
- [64] Blanks, R. F.: Notes on the effect of alkalis in portland cement on the durability of concrete. Proc. ASTM 43 (1943) S. 199/208.
- [65] Studies in cement-aggregate reaction. Australian Council for Scientific and Industrial Research, Bulletins 1-20, 1947-1952.
- [66] Halstead, W. J., u. a.: The alkali-aggregate reaction in concrete. Highway Research Board, Research Report No. 18-C, 1958.
- [67] Lerch, W., u. a.: Chemical reactions of aggregates in concrete-identification of deleteriously reactive aggregates and recommended practices for their use in concrete. Highway Research Board, Special Report No. 31, 1958.
- [68] Stanton, T. E.: Influence of cement and aggregate on concrete expansion. Engineering News-Record 124 (1940) S. 171.
- [69] Stanton, T. E.: Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. Proc. ASCE 66 (1940) S. 1781.
- [70] Woolf, D. O.: Reaction of aggregate with low alkali cement. Public Roads, V. 27, Aug. 1952, S. 50.
- [71] Method of test for effectiveness of mineral admixtures in preventing excessive expansion of concrete due to the alkali-aggregate reaction. ASTM Standard C 441-62 T.
- [72] Mielenz, R. C., L. P. Witte und O. J. Glantz: Effect of calcination on natural pozzolans. Symposium on use of pozzolanic materials in mortars and concrete. ASTM Special Technical Publication No. 99, 1949, S. 43/92.
- [73] Dunagan, W. M., und G. C. Ernst: A study of the permeability of a few integrally water-proofed concretes. Proc. ASTM 34 (1934) Part 1, S. 383/392.
- [74] Walker, C. G.: Discussion of "Proposed specification for cast stone". Proc. Amer. Concr. Inst. 38 (1941/42) S. 316-1/316-8.
- [75] White, A. H., und J. H. Bateman: Soaps as integral water-proofings for concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 22 (1925/26) S. 535/559.
- [76] Dogra, R. N., I. S. Uppal und B. P. Kapur: Water-proofing cement-sand mortar. Part 1: The integral use of soap. Indian Concrete Journal (Bombay) 31 (1957) S. 9.
- [77] Dogra, R. N., und I. S. Uppal: Water-proofing cement-sand mortar. Part 2: The use of sand treated with soap. Indian Concrete Journal (Bombay) 31 (1957) S. 56.
- [78] Uppal, I. S., und S. R. Bahadur: Water-proofing cement-sand mortar. Part 3: Effect of pretreatment of sand on permeability of cement mortar and concrete. Indian Concrete Journal (Bombay) 32 (1958) S. 55.

- [79] Effectiveness of concrete admixtures in controlling the transmission of moisture through slabs-on-ground. Building Research Advisory Board, Report No. 14 (National Research Council Publication 596) July 1958.
- [80] McCoy, W. J., und A. G. Caldwell: New approach to inhibiting alkali-aggregate expansion. Proc. Amer. Concr. Inst. 47 (1950/51) S. 693/708.
- [81] Hansen, W. C.: Inhibiting alkali-aggregate reaction with barium salts. Proc. Amer. Concr. Inst. 56 (1959/60) S. 881/883.
- [82] Cushman, A. S., und H. A. Gardener: The corrosion and preservation of iron and steel. McGraw-Hill Book Co., New York 1910.
- [83] Cushman, A. S.: The preservation of iron and steel. Engineering (London) 87 (1909) S. 742.
- [84] Lewis, J. I. M., C. E. Mason und D. Brereton: Sodium benzoate in concrete. Civil Engineering and Public Works Review (London) 51 (1956) S. 881/882.
- [85] Dougill, G., British Patent No. 706 319.
- [86] Moskvina, V. M., und S. N. Alekseyev: Methods for increasing the resistance to corrosion of reinforcement in reinforced concrete structural members. Beton i Zhelezobeton (Moskau) (1957) Nr. 1, S. 28/29.
- [87] Sarapin, I. G.: Corrosion of wire reinforcement in concrete containing calcium chloride. Promyshlennoye Stroitel'stvo (Moskau) 36 (1958) Nr. 12, S. 21/23.
- [88] Interim recommendations by the National Building Research Institute to reduce the corrosion of reinforcing steel in concrete. South African Institution of Civil Engineers (Johannesburg), Transactions 7 (1957) S. 248/250.
- [89] Evans, U. R.: The corrosion and oxidation of metals: Scientific principles and practical applications. Edward Arnold Ltd., 1960, S. 307.
- [90] Anti-bacterial cement effective in 9-year test. Science Newsletter 60 (1951) No. 3, S. 34.
- [91] Levowitz, L. D.: Anti-bacterial cement gives longer lasting floors. Food Engineering 24 (1952) Juni, S. 57/60 und 134/135.
- [92] Gay, F. J., und A. H. Wetherly: The termite proofing of concrete. Constructional Review (Sydney) 32 (1959) No. 9, S. 26. — Zusammenfassung in Proc. Amer. Concr. Inst. 56 (1959/60) S. 904.
- [93] Young, R. S., und H. L. Talbot: Copper-containing cements inhibiting footborne diseases. South African Mining Engineering Journal (Johannesburg) 56 (1945) S. 475/477. — Zusammenfassung in Building Science Abstracts (Garston, England) 18 (1945) No. 1197.
- [94] Robinson, R. F., und C. R. Austin: Effect of copper-bearing concrete on molds. Industrial and Engineering Chemistry 43 (1951) S. 2077/2082.
- [95] Bruere, G. M., und J. K. McGowan: Synthetic polyelectrolytes as concrete admixtures. Australian Journal of Applied Science (Melbourne) 9 (1958) S. 127/140.
- [96] Vivian, H. E.: Some chemical additions and admixtures in cement paste and concrete. National Bureau of Standards, Proceedings of the Fourth International Symposium on Chemistry of Cement, V. II, 1960, S. 909.
- [97] Payne, H. F.: Organic coating technology. V. II, John Wiley and Sons, 1961.