

Ansteifen und Erstarren von Zement und Beton

Von Gerd Wischers, Düsseldorf *)

Übersicht

Der gewünschte Übergang vom flüssigen in den festen Zustand läuft bei Zement und Beton stets in den drei nacheinander folgenden Phasen Ansteifen, Erstarren und Erhärten ab. Für die Beurteilung des Ansteifens und Erstarrens von Zement gibt es zwei seit langem genormte Prüfverfahren. Demgegenüber gibt es kein genormtes oder allgemein anerkanntes Prüfverfahren für das Ansteifen und Erstarren von Beton, obwohl hierfür in der Praxis ein Bedürfnis vorliegt.

Für ein optimales Ansteifen und Erstarren des Zements ist ein auf die jeweilige Reaktionsfähigkeit der Hauptbestandteile des Betons abgestimmtes Sulfatangebot erforderlich, und zwar sowohl hinsichtlich der Menge des Sulfats als auch der Löslichkeit der verwendeten Sulfatmodifikationen. Ein im Zementwerk optimal abgestimmter Zement liefert auch gute Frischbetoneigenschaften, sofern die anderen Einflußgrößen auf das Ansteifen und Erstarren des Betons beachtet werden. Das gilt vor allem für die Frischbetontemperatur sowie die Intensität und Dauer des Mischens beim Anmachen und Transport. Probleme können auch Stoffe hervorrufen, die in die chemisch-mineralogischen Reaktionen des Zements in den ersten Stunden nach dem Anmachen stärker eingreifen, wie bestimmte Betonzusätze.

1. Einleitung

Das Herstellen von Beton kann man vereinfacht als das systematische Verkleben einer Vielzahl von einzelnen, unterschiedlich großen Zuschlagkörnern darstellen. Der Kleber, der die einzelnen Körner im flüssigen Zustand umhüllt, ist der Zementleim, also das frische Gemisch aus Zement und Wasser. Aus ihm entsteht mit der Zeit durch die chemisch-mineralogischen Reaktionen des Zements mit dem Wasser der feste, sogenannte Zementstein, der die Zuschlagkörner fest und dauerhaft miteinander verbindet. Die Zustandsänderung des Klebers von flüssig nach fest ist somit gewünscht und ein kennzeichnendes Merkmal. Sie geschieht nicht schlagartig, sondern der nach dem Anmachen zunächst dünnflüssige Leim wird

*) Erweiterte Fassung eines Vortrags auf dem Deutschen Betontag 1981 am 14. Mai in Hamburg

nach einer gewissen Zeit dickflüssig und steifer, er erstarrt dann und wird schließlich fest. Ansteifen, Erstarren und Erhärten des Zementleims und Betons liegen in der Natur der Sache, und sie treten in dieser Reihenfolge bei jeder Betonherstellung in einem mehr oder weniger steuerbaren zeitlichen Ablauf auf.

Wenn dieser zeitliche Ablauf früher oder später als erwartet eintritt, dann kann dies bei der Betonherstellung oder -verarbeitung zu Schwierigkeiten führen. Ein frühzeitiges Ansteifen schafft Probleme, wenn eine lange Verarbeitungszeit mit möglichst gleichbleibender Konsistenz vorausgesetzt wird, wie das bei Transportbeton und Pumpbeton beinahe die Regel ist. Umgekehrt kann ein später als erwarteter Erstarrungsbeginn Schwierigkeiten beim Gleitschalungsbau oder bei Spritzbeton hervorrufen.

Innerhalb der letzten zwei bis drei Jahrzehnte hat in allen Bereichen des Betonbaus – vom Erstellen der Schalung über das Verlegen der Bewehrung bis zum Herstellen und Einbauen des Betons – ein großer technischer Fortschritt stattgefunden, der insbesondere mit zunehmendem Maschineneinsatz zur Rationalisierung und damit zu größerer Wirtschaftlichkeit geführt hat. So ist beispielsweise der Anteil des Transportbetons in den beiden letzten Jahrzehnten von wenigen Prozenten auf nahezu die Hälfte der Betonherstellung angestiegen. Diese technologische Entwicklung war mit Anforderungen an Betoneigenschaften verbunden, die zuvor von untergeordneter Bedeutung waren. Das gilt allgemein für alle Frischbetoneigenschaften und im besonderen für das Ansteifen und Erstarren.

Anfang der siebziger Jahre wurde daher ein umfangreiches Schwerpunktprogramm über das Ansteifen und Erstarren von Zement und Beton im Forschungsinstitut der Zementindustrie aufgenommen, das sich zunächst auf Grundlagenforschung im Bereich der chemisch-mineralogischen Reaktionen nach dem Anmachen des Zements beschränkte, das dann um Einflüsse der Zementherstellung erweitert wurde und in das seit knapp zwei Jahren auch Fragen der Zementverarbeitung, des Einflusses von Zusatzstoffen und Zusatzmitteln sowie der Betonherstellung und -verarbeitung einbezogen wurden. Finanziell ist ein Teil dieser Untersuchungen von der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen unterstützt worden, der auch an dieser Stelle gedankt sei.

Über wichtige Teilergebnisse ist die Fachwelt bereits mehrfach unterrichtet worden [1 bis 7], weitere Veröffentlichungen sind vorgesehen [8]. Dem nachfolgenden Beitrag liegt die Absicht zugrunde, dem Zementanwender einen gedrängten Überblick über den bisherigen Stand der Kenntnisse zu vermitteln.

2. Meß- und Prüfverfahren

Aussagen über den zeitlichen Ablauf des Ansteifens und Erstarrens erhält man, indem man die rheologischen Veränderungen des Zementleims oder Betons mit der Zeit registriert oder – der besseren Anschaulichkeit halber – über der Zeit aufträgt. Dabei wird nachfolgend stets die Viskosität im übertragenen Sinne als rheologische Kenngröße verwendet, obwohl die Meßverfahren zum Teil nicht oder nur indirekt die Zähigkeit erfassen. Zudem ist es problema-

tisch, für andere flüssige Stoffe entwickelte und bewährte Verfahren auf Zementleim und Frischbeton zu übertragen, weil es sich dabei nicht um makroskopisch homogene Flüssigkeiten handelt, sondern um Feststoff-Wasser-Suspensionen, die zudem chemisch-mineralogisch miteinander reagieren und deren Reaktion durch das Meßverfahren selbst stark beeinflußt wird. Besonders große Vorbehalte bestehen dabei gegen Meßverfahren, die ununterbrochen hohe Schergeschwindigkeiten erzeugen, wie z. B. schnell laufende Rotationsviskosimeter, weil dadurch im Gegensatz zu ruhendem oder nur sehr wenig bewegtem Zementleim oder Frischbeton die chemische Reaktion stark angeregt, ein gewisser Abrieb von den Zement- und Zuschlagkörnern erzeugt und eine sich sonst in der flüssigen Phase ausbildende Gefügestruktur von kristallinen Hydratationsprodukten fortwährend zerstört wird.

Für ein Meß- und Prüfverfahren bieten sich grundsätzlich zwei verschiedene Vorgehensweisen an, nämlich entweder das Messen der Zeit, in der eine definierte Viskositätsänderung eingetreten ist, oder das Messen der Viskositätsänderung zu festgelegten Zeiten nach dem Anmachen des Leims oder Betons.

2.1 Meß- und Prüfverfahren für Zement

Das in DIN 1164 Teil 5 beschriebene Prüfverfahren zur Bestimmung der Erstarrungszeiten entspricht dem erstgenannten Meßprinzip, d. h. gemessen werden die Zeiten, in denen definierte Viskositätsänderungen eintreten. Das Prüfverfahren wurde von dem französi-



Bild 1
Nadelgerät nach Vicat
zur Bestimmung der
Normsteife und der
Erstarrungszeiten

schen Zementforscher L.J. Vicat vor 150 Jahren entwickelt und erstmals 1828 in der zweiten Auflage seiner berühmten Abhandlung über Versuche zur Entwicklung hydraulischer Wasserkalke beschrieben. Kernstück dieses Prüfverfahrens ist das Nadelgerät, siehe Bild 1, mit dem festgestellt werden kann, ob der Zementleim eine definierte Viskosität besitzt. Das Vicat-Verfahren ist seit Jahrzehnten Bestandteil aller maßgebenden Zementnormen der Welt, und es ist auch für eine Aufnahme in die derzeit in Ausarbeitung befindliche Euro-Zementnorm vorgesehen.

Bild 2 erläutert das Meßprinzip dieses Verfahrens. Zunächst wird aus Zement und Wasser ein steifer Zementleim mit einer definierten Ausgangsviskosität V_0 hergestellt. Das Prüfverfahren gibt also keinen festgelegten Wasserzementwert vor, sondern eine bestimmte Viskosität. Der dafür erforderlich Wasserezusatz muß zunächst durch Versuche ermittelt werden; er gibt den Wasserbedarf für das Einstellen der Normsteife an. Da auch die Intensität des Mischens die Viskosität des Zementleims beeinflusst, schreibt die deutsche Zementnorm eine bestimmte Mischmaschine und Mischzeit vor. Die Ausgangsviskosität V_0 (Normsteife) wird durch Eindringen eines

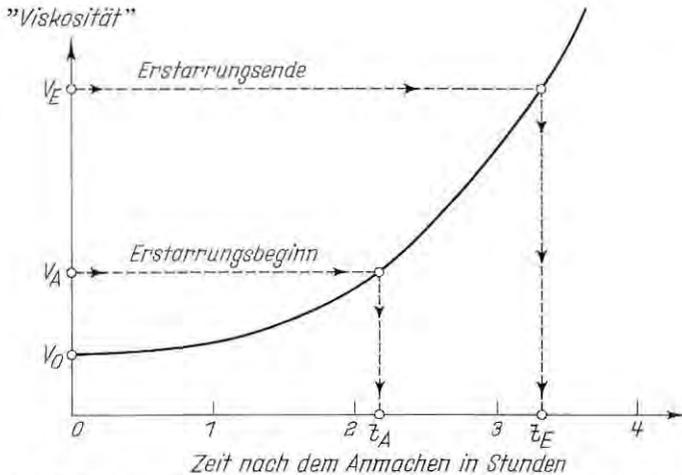


Bild 2 Meßprinzip zur Bestimmung der Erstarrungszeiten nach DIN 1164 Teil 5

Tauchstabs in den Zementleim überprüft. Wenn die Nadel im Nadelgerät mit einer bestimmten Belastung in den Zementleim nur noch ein bestimmtes Maß eindringt, so besitzt der Leim die Viskosität V_A , und man bezeichnet die Zeit vom Anmachen bis zum Erreichen dieser Viskosität als den Erstarrensbeginn t_A . Dringt die Nadel nicht mehr in den Leim ein, so entspricht dies der Viskosität V_E , und die zugehörige Zeit ist das Erstarrensende t_E .

Anhand der Prüfung nach Vicat lassen sich Ansteifen, Erstarren und Erhärten von Zement definieren, wie das in Bild 3 dargestellt ist. Als Ansteifen bezeichnet man die Zunahme des Viskosität – also die Abnahme der Fließfähigkeit – von der Ausgangsviskosität bis zum Be-

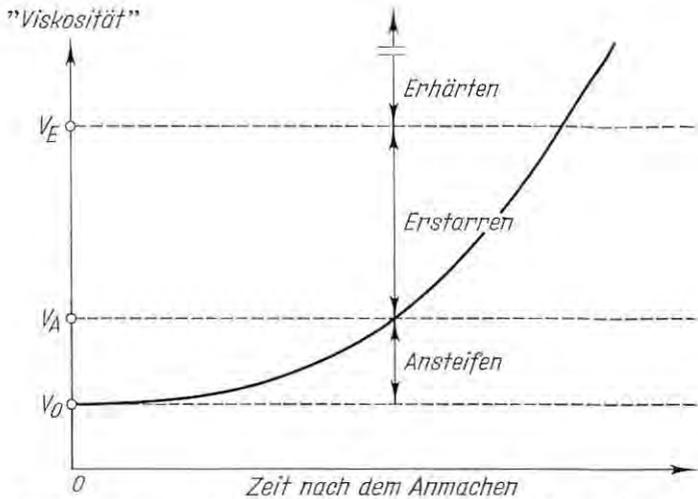


Bild 3 Definition von Ansteifen, Erstarren und Erhärten von Zement bei einer Prüfung der Erstarrungszeiten nach DIN 1164

ginn des Erstarrens. Daran schließen sich zeitlich die Phase des Erstarrens und dann die des Erhärtens an.

Ebenso wie die meisten anderen Zementnormen der Welt [9] schreibt die DIN 1164 vor, daß das Erstarren von Zement bei der Prüfung nach Vicat nicht vor einer Stunde beginnen darf. Diese Festlegung bietet damit einen hinreichenden Schutz vor unliebsamen Überraschungen durch frühzeitiges Erstarren für alle Betonarbeiten, bei denen der Zeitraum zwischen Mischen und Ende der Verarbeitung unter 30 Minuten liegt, wie das früher allgemein und wie das auch heute noch häufig der Fall ist.

Für weitergehende Aussagen über das Ansteifen und Erstarren von Frischbeton eignet sich das Verfahren nach Vicat nur bedingt. Die damit gewonnenen Ergebnisse lassen sich nicht direkt auf die Praxis übertragen, weil bei dieser Prüfung der Wassergehalt des Zementleims viel niedriger ist als im üblichen Beton und weil der Zementleim in Ruhe bei 20°C lagert, während beispielsweise bei Transportbeton oft andere Temperaturen herrschen und der Beton meist ständig bewegt wird.

Als Folge der bedeutenden Weiterentwicklung der Betontechnik in den letzten Jahrzehnten, die unter anderem durch rationellere Verfahren zum Herstellen, Transportieren, Fördern, Einbauen und Verdichten des Betons gekennzeichnet ist, werden des öfteren subtilere Anforderungen an die Eigenschaften des Frischbetons gestellt, für deren Beurteilung das Verfahren nach Vicat weder gedacht noch ausreichend ist. Das wurde erstmals Mitte der 50er Jahre durch die Entwicklung des Spannbetons mit nachträglichem Verbund offenkundig, als für die Beurteilung der rheologischen Eigenschaften des Einpreßmörtels ein empfindliches Prüfverfahren erforderlich wurde, das auch Aussagen über das Ansteifen gestattete.

Bild 4 zeigt das Eintauchgerät nach DIN 4227 Teil 5 für die Ermittlung des Fließvermögens von Einpreßmörtel, das seinerzeit am Otto-Graf-Institut entwickelt worden ist [10]. Die Viskosität des Zementleims wird indirekt durch die Zeit ermittelt, die der Tauchkörper benötigt, um durch das mit Zementleim gefüllte, senkrecht ausgetotete Standrohr zu sinken.



Bild 4
Eintauchgerät nach
Walz für die Ermittlung
des Fließvermögens
von Einpreßmörtel

Bild 5 gibt schematisch das Meßprinzip für diesen Eintauchversuch an. Im Gegensatz zum Vicat-Verfahren wird hierbei nicht die Zeit gemessen, in der eine bestimmte Zunahme der Viskosität eintritt, sondern es wird zu festgelegten Zeiten die Viskositätsänderung ermittelt. Gemessen wird also nach festgelegten Zeiten t_1 , t_2 usw. die dann vorhandene Viskosität V_1 , V_2 usw. Auch bei diesem Prüfverfahren ist bei einem gegebenen Zement durch Vorversuche der Wasserzusatz – gegebenenfalls mit Zusatzmitteln – zu bestimmen, der für eine definierte Ausgangsviskosität V_0 erforderlich ist. Allerdings handelt es sich dabei um eine den praktischen Bedürfnissen angepaßte, gut fließfähige Viskosität mit einem Wasserzementwert in der Größenordnung von 0,40.

Die Fließfähigkeit ist um so größer, je schneller der Tauchkörper die Meßstrecke zurücklegt. DIN 4227 Teil 5 schreibt vor, daß die Ausgangsviskosität V_0 einer Tauchzeit von mindestens 30 Sekunden entsprechen muß und daß die Tauchzeit 30 Minuten später höchstens auf 80 Sekunden ansteigen darf. Die Festlegung berücksichtigt, daß jeder Zementleim innerhalb der ersten 30 Minuten ansteift

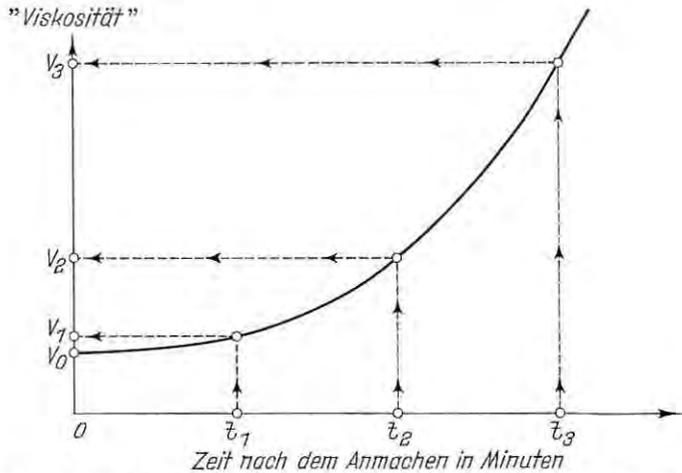


Bild 5 Meßprinzip für die Ermittlung des Fließvermögens von Einpreßmörtel nach DIN 4227 Teil 5

[11], und zwar gar nicht so wenig, wie das in dem zulässigen Anstieg der Tauchzeit um mehr als das Doppelte zum Ausdruck kommt.

Für das Ansteifen und Erstarren von Zement gibt es also zwei seit längerem genormte Prüfverfahren mit Anforderungen an diese Eigenschaften, nämlich das Vicat-Verfahren und das Einpreßmörtel-Prüfverfahren.

Im letzten Jahrzehnt sind zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen über den Einfluß des Zements auf die rheologischen Eigenschaften von Zementleim veröffentlicht worden, z. B. [12 bis 15], und es sind auch Vorschläge für andere Prüfverfahren gemacht worden [16 und 17]. Im Gegensatz zu den beiden genormten Verfahren wird dabei keine Ausgangsviskosität V_0 eingestellt, sondern ein konstanter Wasserzementwert, was je nach Zusammensetzung und Mahlfineinheit des Zements zu recht unterschiedlichen Ausgangsviskositäten führen kann und unter diesem Gesichtspunkt problematisch ist. Entsprechend dem Einpreßmörtel-Prüfverfahren wird allgemein das zweite Meßprinzip bevorzugt, d. h. das Messen der Viskositätsänderung nach vorgegebenen Zeiten.

2.2 Meß- und Prüfverfahren für Beton

Im Gegensatz zur Prüfung am Zement gibt es für Beton bislang noch kein genormtes oder allgemein anerkanntes Prüfverfahren für das Ansteifen und Erstarren, obwohl hierfür bei der häufigen Verwendung von Transportbeton, Pumpbeton und verzögernden Zusatzmitteln ein Bedarf vorliegt [18]. Die Praxis hilft sich im Einzelfall zwar dadurch, daß sie die Konsistenz von Betonen, deren Ansteifen und Erstarren geprüft werden soll, in bestimmten Zeitabständen – z. B. alle Viertelstunde – erneut mit einem der genormten oder gebräuchlichen Konsistenzmeßverfahren prüft. Jedoch gehen bereits die Auffassungen darüber auseinander, ob und welche Ausgangs-

konsistenz der Beton für diese Prüfung haben soll, welche Abnahme der Konsistenz (z. B. des Ausbreitmaßes) innerhalb von 30 Minuten normal ist, ob diese Abnahme von der Ausgangskonsistenz abhängig gemacht werden muß, ob der Beton in der Prüfzeit ruhig lagern oder bewegt werden sollte, wie der Erstarrungsbeginn von Beton zu definieren ist, ob und wie die Einflüsse von Temperatur, Zusatzmitteln und Zusatzstoffen zu prüfen und zu beurteilen sind u. v. a. m.

3. Mechanismen des Ansteifens, Erstarrens und Erhärtens von Zement

Vor der chemisch-mineralogischen Reaktion des Zements mit dem Anmachwasser ist die Viskosität des Zementleims im wesentlichen von der Dicke der Wasserschicht zwischen den einzelnen Zementkörnern abhängig, d. h. die Fließfähigkeit nimmt mit zunehmender Wasserschichtdicke ebenfalls zu [12 bis 15]. Mit dem gleichen Zement entstehen durch einen höheren Wasserzementwert dickere Wasserschichten und dadurch ein dünnflüssigerer Zementleim. Sehr feine Zemente benötigen wegen ihrer großen spezifischen Oberfläche für die gleiche Wasserschichtdicke und damit die gleiche Viskosität mehr Anmachwasser als grobe Zemente.

Beim Herstellen von Beton muß das Anmachwasser nicht nur den Zement, sondern auch die Zuschlagkörner mit einer gleichdicken Wasserschicht umhüllen, so daß in die Berechnung der Wasserschichtdicke zwischen den Zementkörnern auch das Mischungsverhältnis und die spezifische Oberfläche des Zuschlaggemisches eingehen. Bei durchschnittlicher Betonzusammensetzung errechnet sich für steifplastischen Beton eine durchschnittliche Wasserschichtdicke zwischen den einzelnen Körnern von etwas mehr als $2\ \mu\text{m}$ (tausendstel Millimeter). Eine Schichtdicke von weniger als $4\ \mu\text{m}$ liefert bereits einen sehr weichen bis flüssigen Beton, so daß im üblichen Beton stets Zementleime mit Wasserschichtdicken zwischen 2 und $4\ \mu\text{m}$ vorliegen. Kleine Änderungen der Wasserschichtdicken bewirken daher bereits relativ große Änderungen der Viskosität.

3.1 Chemische Reaktionen des Zements mit dem Anmachwasser

Sofort mit der Wasserzugabe beginnt auch die chemische Reaktion des Zements mit dem Anmachwasser. Dabei lösen sich die Zementkörner nicht in Wasser auf, wie beispielsweise Zucker in Kaffee, sondern es reagiert in den ersten Sekunden und Minuten lediglich eine dünne oberflächennahe Schicht der Zementkörner mit dem Wasser. Der Menge nach sind das nur etwa 2 bis 5 % des gesamten Zements, und zwar ist die sofort reagierende Menge um so größer, je reaktionsfreudiger der Zement ist, je feiner er gemahlen ist und je höher die Temperatur der Zement-Wasser-Suspension ist.

Bild 6 gibt die wesentlichen chemischen Reaktionen eines Klinkers mit mittlerer Reaktionsfähigkeit in den ersten Minuten, Stunden und Tagen wieder [1, 2]. Danach verminderte sich der C_3A -Gehalt (Tricalciumaluminatgehalt) des Klinkers in den ersten fünf Minuten nach dem Anmachen von ursprünglich 11,4 auf knapp 10,0 Gew.-%,

d. h. es reagierten rd. 1,5 Gew.-% C_3A (oberer Teil des Diagramms). In den nachfolgenden 4 bis 6 Stunden trat eine Art Ruheperiode ein, in der praktisch kein weiteres C_3A reagierte; erst danach setzte die Hydratation des C_3A wieder ein.

Der untere Teil des Diagramms enthält Angaben zur Hydratation des C_3S (Tricalciumsilicat), das mit knapp 70 Gew.-% für das Erhärten wichtigste Klinkermineral. In den ersten beiden Stunden nach dem Anmachen war praktisch keine Reaktion feststellbar, danach setzte eine deutliche Hydratation ein, die mit einer entsprechenden Neubildung von Calciumhydroxid $Ca(OH)_2$ in der ursprünglich mit Anmachwasser gefüllten Schicht zwischen den Klinkerkörnern verbunden war.

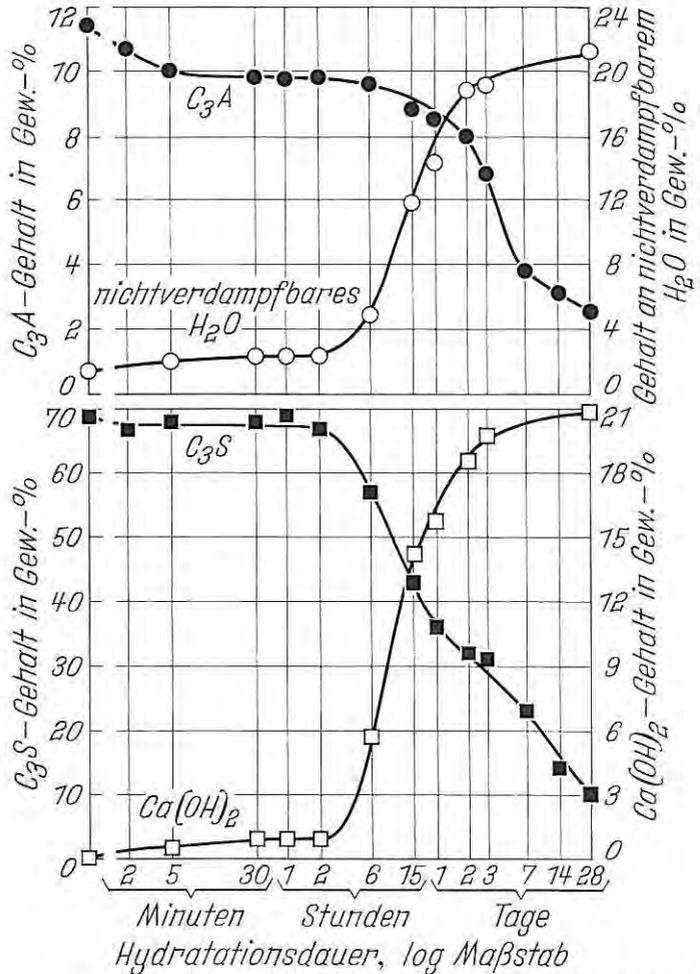


Bild 6 Änderung der Gehalte an C_3A , C_3S , $Ca(OH)_2$ und nichtverdampfbarem Wasser bei der Hydratation von Klinker mit und ohne Sulfatzusatz

In den ersten beiden Stunden reagierte also praktisch nur das C_3A , und zwar unabhängig davon, ob dem angemachten Klinker Gips zugesetzt worden war oder nicht. Ohne Gips erstarrte das Klinker-Wasser-Gemisch nach 5 bis 10 Minuten, mit Gips (entsprechend 3,5 Gew.-% SO_3) begann das Erstarren erst nach rd. 2 Stunden.

Da diese durch den Gipszusatz bewirkte Verzögerung des Erstarrens nicht auf eine Hemmung der chemischen Reaktion zurückzuführen ist, kommt als Ursache nur eine Einwirkung auf das Gefüge in Betracht, das von den ersten Hydratationsprodukten in dem wassergefüllten Zwischenraum zwischen den Zementkörnern gebildet wird. Der zeitliche Ablauf der Hydratation der verschiedenen Klinkerminerale und deren mengenmäßiger Anteil im Zement legen zudem den Schluß nahe, daß das Ansteifen praktisch ausschließlich von den Reaktionen des Tricalciumaluminats und dem zugesetzten Sulfat bestimmt wird, daß in das Erstarren jedoch auch das Tricalciumsilicat merklich eingreift und daß für das Erhärten weitestgehend das Silicat maßgebend ist.

Der Anteil des C_3A , der in den ersten Minuten reagiert, kann bei verschiedenen Klinkern unterschiedlich sein. Er liegt im allgemeinen zwischen 0,4 und 1,6 Gew.-%, kann jedoch auch Werte unter 0,3 oder über 2,0 Gew.-% annehmen [6, 7]. Der in den ersten Minuten reagierende Anteil des C_3A nimmt mit steigender Mahlfineinheit und Temperatur zu, er ist bei hohen C_3A -Gehalten größer als bei kleinen, er wird jedoch am stärksten von der Reaktionsfähigkeit des C_3A (abhängig von der chemischen Zusammensetzung und den Brennbedingungen) bestimmt.

Das zur Erstarrungsregelung zugesetzte Calciumsulfat geht ebenfalls unmittelbar nach dem Anmachen teilweise in Lösung, so daß die Lösung in den ersten Stunden vor allem Calcium, Aluminat und Sulfat enthält. Ob bzw. bis zu welchem Grade die Lösung an Sulfationen gesättigt ist, hängt zwar auch von der zugesetzten Menge Calciumsulfat ab, wird jedoch stärker von der zugesetzten Calciumsulfat-Modifikation bestimmt. Natürlicher Anhydrit (wasserfreies Calciumsulfat) hat eine geringe Lösungsgeschwindigkeit, Gips (Dihydrat und damit wasserreichstes Calciumsulfat) weist eine mittlere Lösungsgeschwindigkeit auf, und nur Halbhydrat (teilweise entwässertes Gips) besitzt eine hohe Lösungsgeschwindigkeit. Der zu bestimmten Zeiten in Lösung gehende Sulfatgehalt läßt sich daher durch die Höhe des Sulfatzusatzes und insbesondere durch entsprechende Mischungen von Anhydrit und Halbhydrat steuern.

3.2 Hydratationsprodukte und Entwicklung eines Gefüges

Die spontan mit dem Wasser reagierende Oberflächenschicht der einzelnen Zementkörner wandelt das Anmachwasser in eine übersättigte Lösung mit einem pH-Wert über 12, aus der dann Hydratationsprodukte auskristallisieren. Welche Kristalle entstehen, wo sie entstehen und wie schnell sie auskristallisieren, das hängt vor allem von der Zusammensetzung der übersättigten Lösung ab. Zeitpunkt, Art, Ort und Menge der auskristallisierenden Hydratationsprodukte sind in erster Linie dafür verantwortlich, welchen Verlauf das Ansteifen und Erstarren des Zementleims nehmen.

Wie bereits in Abschnitt 3.1 erwähnt, geht das zugesetzte Calciumsulfat nach dem Anmachen ebenfalls teilweise in Lösung, so daß damit die Bildung von Calcium-Aluminat-Sulfat-Hydrat-Kristallen möglich ist. Je nach Sulfatangebot in der Lösung kann ein sulfatreiches Calciumaluminathydrat entstehen, das chemisch-mineralogisch dem Ettringit entspricht, jedoch auch Trisulfat genannt wird, oder es entsteht ein sulfatarmes Calciumaluminathydrat, das als Monosulfat bezeichnet wird.

Bei einem gegebenen Klinker bzw. einer gegebenen Zusammensetzung aus Klinker und anderen Hauptbestandteilen des Zements liegen hinsichtlich des Ansteifens und Erstarrens optimale Verhältnisse vor, wenn zu jedem Zeitpunkt nach dem Anmachen das in Lösung befindliche Sulfat gerade so groß ist, daß sich mit dem in Lösung gegangenen Aluminat nur Ettringit (Trisulfat) bildet. Bild 7 ist eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme (REM-Aufnahme) von Zementleim 30 Minuten nach dem Anmachen, bei dem das in Lösung gegangene Sulfat optimal auf den in den ersten Minuten reagierenden C_3A -Anteil des Zements abgestimmt ist. Der in das Bild eingezeichnete Maßstab von $2\ \mu\text{m}$ entspricht der durchschnittlichen Dicke der Wasserschicht zwischen den festen Bestandteilen (Zement und Zuschlag) in steifplastischem Beton unmittelbar nach dem Anmachen (vgl. Abschn. 3). Auf den Zementkörnern hat sich ein Belag aus sehr kleinen Ettringit-Kristallen niedergeschlagen. Die Zementkörner mit diesem feinen Kristallfilz auf ihrer Oberfläche sind weiterhin leicht gegeneinander verschiebbar. Allerdings ist mit dem Entstehen dieses Filzbelages ein gewisses Ansteifen unvermeidbar verbunden, weil die Dicke der Wasserschicht zwischen den Zementkörnern etwas vermindert und die Zementkornoberfläche rauher wird. Bei sehr feinen Zementen, wie z. B. PZ 55, oder bei Ze-

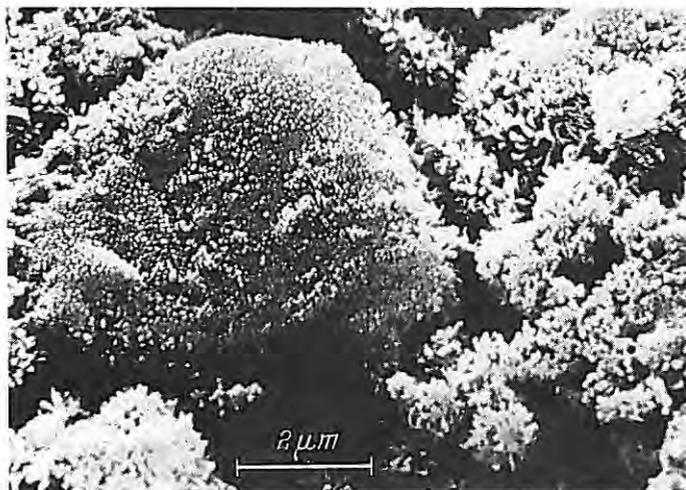


Bild 7 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Zementleims 30 Minuten nach dem Anmachen, bei dem das in Lösung gegangene Sulfat auf den in den ersten Minuten reagierenden C_3A -Anteil des Zements abgestimmt ist

menten mit reaktionsfreudigem C_3A ist der Filzbelag etwas dicker und folglich das Ansteifen etwas stärker.

Reicht das Sulfatangebot in der Lösung für die Bildung von Trisulfat nicht aus, dann bildet sich Monosulfat oder bei noch geringerem Sulfatangebot Calciumaluminathydrat. Bild 8 ist eine REM-Aufnahme von Zementleim 30 Minuten nach dem Anmachen, bei dem das Sulfatangebot in der Lösung viel zu klein war. Statt des feinen Filzbelages auf den Zementkörnern haben sich in den mit Wasser gefüllten Räumen zwischen den Zementkörnern grobe, flächige Kristalle aus Calciumaluminathydrat und Monosulfat in einem kartenhausähnlichen Gefüge gebildet. Dieser Zementleim wies dadurch schnelles Erstarren auf, war also nicht normgerecht.

Wird zementfein gemahlener Klinker ohne Sulfatzusatz angemacht, dann tritt ein Erstarren nach wenigen Minuten ein. Solcher Zement ist nicht normgerecht. Da der Zementleim für die Prüfung des Erstarrens früher in einem Gefäß mit einem Löffel angemacht wurde, bezeichnet man solchen während des Anmachens erstarrenden Zement als „Löffelbinder“, in der englischen Sprache als „flash set“ oder „quick set“. Wird der Klinker mit einem geringen, deutlich unter dem optimalen Gehalt liegenden Sulfatzusatz angemacht, dann bildet sich in Abhängigkeit von den stöchiometrischen Bedingungen teilweise Trisulfat und teilweise Monosulfat. Je nach dem mengenmäßigen Anteil dieser beiden Hydratationsprodukte kann dieser Zement frühes Erstarren vor einer Stunde aufweisen (nicht normgerecht) oder auch einen Erstarrungsbeginn nach einer Stunde, allerdings dann meist mit einem deutlich ausgeprägten Früh ansteifen.

Übersteigt das Sulfatangebot in der Lösung die für die Bildung von Trisulfat erforderliche Menge, dann fällt aus der an Sulfat übersät-



Bild 8 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Zementleims 30 Minuten nach dem Anmachen, bei dem ein zu niedriges Sulfatangebot zur Bildung von Monosulfat und damit schnellem Erstarren geführt hatte

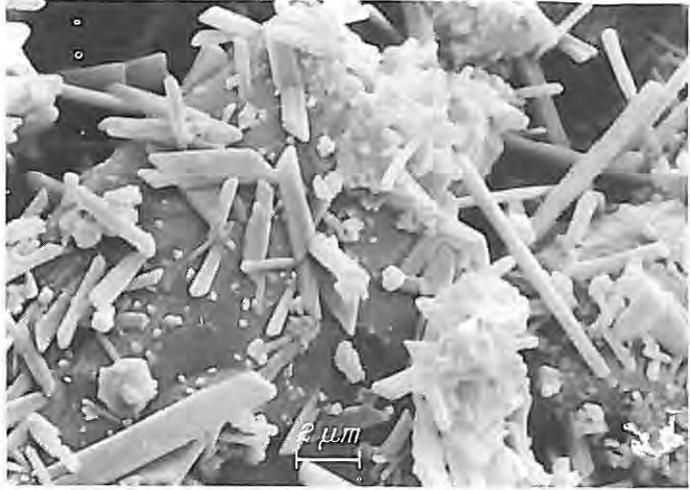


Bild 9 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Zementleims 30 Minuten nach dem Anmachen, bei dem ein zu großes Sulfatangebot zur Bildung von Sekundärgips und damit frühzeitigem Ansteifen geführt hatte

tigten Lösung Trisulfat und zusätzlich Sekundärgips aus. Bild 9 ist eine REM-Aufnahme von Zementleim 30 Minuten nach dem Anmachen, bei dem das Sulfatangebot in der Lösung zu groß war. Dadurch haben sich grobe, nadelförmige Kristalle aus Sekundärgips gebildet, die zu starkem vorzeitigem Ansteifen führten.

Das Sulfatangebot in der Lösung muß also auf die in der ersten Zeit nach dem Anmachen reagierenden Anteile des Zements abgestimmt sein. Es darf nicht zu klein sein, weil sich dann ein kartenhausähnliches Gefüge aus Monosulfat bilden kann, das vorzeitiges Erstarren oder Ansteifen hervorrufen kann, und es darf nicht zu groß sein, weil sich dann grobe, nadelförmige Kristalle aus Sekundärgips bilden, die ebenfalls zu einem Ansteifen führen können. Bei der Zementherstellung dienen sowohl die absolute Menge des Sulfats als auch die sehr unterschiedliche Lösungsgeschwindigkeit der verschiedenen Sulfatmodifikationen als Steuerungs- und Regelungsgrößen.

3.3 Optimierung des Sulfatangebots [6, 7]

Ergebnisse von Untersuchungen zur Optimierung des Sulfatangebots gibt Bild 10 wieder. Der absolute Sulfatgehalt wurde dabei mit 3,5 Gew.-% SO_3 konstantgehalten (gleichartige Versuche mit anderen SO_3 -Gehalten sind für ein absolutes Optimum erforderlich). Gewählt wurde für die Optimierung ein Steuerungsmechanismus durch die unterschiedliche Lösungsgeschwindigkeit der beiden sich jeweils zu 100 % ergänzenden Sulfatträger aus Halbhydrat und Anhydrit, der auf der Abszisse aufgetragen ist. Gemessen wurde der Erstarrungsbeginn nach Vicat, der auf der Ordinate aufgetragen ist. Untersucht wurden Zemente aus den Klinkern I und II. Beide hatten einen praktisch gleich großen C_3A -Gehalt von etwa 8,5 Gew.-%, je-

doch war aufgrund der Rohstoff- und Brennbedingungen die in den ersten beiden Stunden in Lösung gehende C_3A -Menge bei Klinker II mit $\Delta C_3A = 1,5$ Gew.-% praktisch doppelt so groß wie bei Klinker I mit $\Delta C_3A = 0,7$ Gew.-%.

Folglich benötigte Klinker II ein höheres Sulfatangebot kurz nach dem Anmachen, d. h. einen höheren Anteil an Halbhydrat mit hoher Lösungsgeschwindigkeit. Das Optimum bei einem Gesamtsulfatgehalt von 3,5 Gew.-% SO_3 ergab sich für Klinker II bei einer Mischung aus 50 Gew.-% Halbhydrat und 50 Gew.-% Anhydrit. Demgegenüber ergab sich für Klinker I mit dem reaktionsträgeren C_3A bei gleichem Gesamtsulfatgehalt ein Optimum mit nur 10 Gew.-% Halbhydrat und folglich 90 Gew.-% Anhydrit. Beide Optima sind nicht sehr scharf ausgeprägt, d. h. ein Abweichen von den optimalen Werten um etwa 10 Gew.-% bedeutete keine wesentliche Verkürzung des Erstarrungsbeginns. Ein Zement, der hinsichtlich des Sulfatzusatzes auf ein möglichst spätes Erstarren optimal abgestimmt ist, weist im allgemeinen auch kein ausgeprägtes Frühhansteifen auf und liefert im Beton gute Frischbetoneigenschaften, sofern die üb-

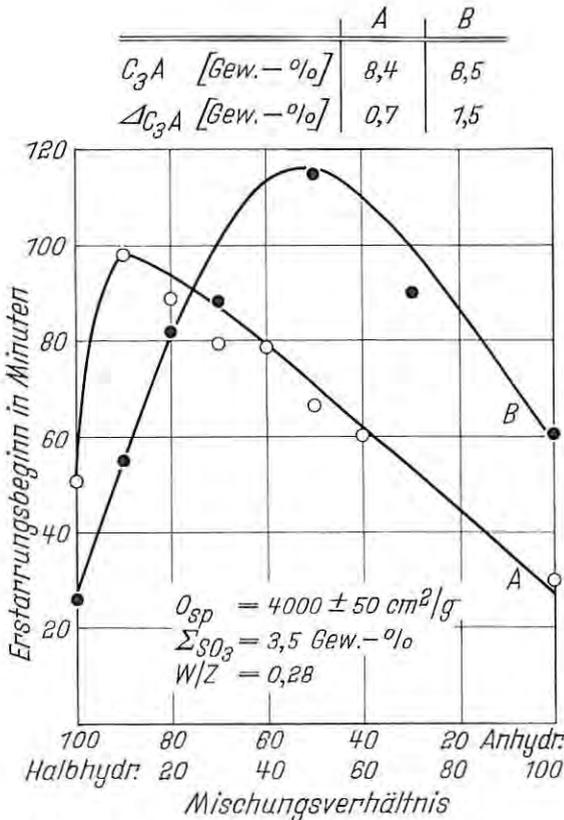


Bild 10 Optimierung des Sulfatangebots durch Mischungen aus Halbhydrat und Anhydrit für einen möglichst späten Erstarrungsbeginn

rigen Einflüsse auf das Ansteifen und Erstarren von Beton beachtet werden (vgl. Abschn. 4).

Die wissenschaftlichen Grundlagen für eine Optimierung des Sulfatzusatzes im Zement sind das Ergebnis intensiver Untersuchungen im Forschungsinstitut der Zementindustrie und erst zwei bis drei Jahre bekannt. Inzwischen haben solche Optimierungsverfahren Eingang in die Tagespraxis der Zementwerke gefunden. Jedoch sind auch in der Vergangenheit in aller Regel Zemente ausgeliefert worden, die kein frühzeitiges Ansteifen aufwiesen. Zu ihrer Herstellung blieb dem Zementchemiker allerdings nichts anderes übrig, als sich durch mitunter leidvolle Erfahrung an eine solche Optimierung heranzutasten.

4. Ansteifen und Erstarren von Beton

Zwar ist es auch im Beton letztendlich immer der Zement, der das Ansteifen, Erstarren und Erhärten bewirkt, aber neben den Eigenschaften des Zements üben auch Zusätze, Temperatur, Zusammensetzung, Herstellung, Transport und Verarbeitung des Frischbetons auf dessen Ansteifen und Erstarren einen erheblichen Einfluß aus. Wird das nicht beachtet, so können Schwierigkeiten durch ein frühzeitiges Ansteifen und Erstarren des Betons auftreten, obwohl der verwendete Zement in dieser Hinsicht optimiert war. Größeren Einfluß auf das Ansteifen und Erstarren von Beton üben vor allem die Frischbetontemperatur sowie die Intensität und Dauer des Mischens beim Anmachen und Transport aus, ferner ein Zusatz von Stoffen, die in die chemisch-mineralogischen Reaktionen des Zements in den ersten Stunden nach dem Anmachen stärker eingreifen [19 bis 22].

4.1 Einfluß höherer Frischbetontemperaturen

Höhere Temperaturen erhöhen im allgemeinen die Geschwindigkeit von chemischen Reaktionen, was zum Beispiel bei der Wärmebehandlung des Betons mit Erfolg genutzt wird. Erhöhte Frischbetontemperaturen erhöhen den Anteil des Zements, der in den ersten Minuten mit dem Wasser reagiert. Dadurch wird immer und bei allen Zementen der Anteil des unvermeidbaren, anfänglichen Ansteifens erhöht, und der erhöhte chemisch-mineralogische Umsatz hat auch immer bei allen Zementen zur Folge, daß der Erstarrungsbeginn bei + 30 °C deutlich früher eintritt als bei + 20 °C.

Während mit ansteigender Frischbetontemperatur der mit dem Wasser in den ersten Minuten reagierende Anteil des C_3A deutlich ansteigt, steigt mit höherer Temperatur die Lösungsgeschwindigkeit des Sulfats weniger stark an. Bei hohen Frischbetontemperaturen steht somit einem erhöhten, gelösten C_3A -Anteil ein nicht ausreichendes Sulfatangebot gegenüber, was entsprechend den Ausführungen in Abschn. 3.2 zu vorzeitigem Ansteifen und Erstarren führen kann. Dies gilt auch für Zemente, die bei + 20 °C hinsichtlich des Sulfatzusatzes optimiert sind. Es ist zwar grundsätzlich möglich, den Sulfatzusatz eines Zements auch für eine höhere Temperatur zu optimieren, aber dann besteht die Gefahr eines zu hohen Sul-

fatangebots und damit eines Ansteifens durch Sekundärgipsbildung bei niedrigeren Temperaturen.

Angestrebt wird daher in der Zementtechnik eine Optimierung des Sulfatzusatzes im Zement bei oder geringfügig über + 20 °C. Da das Optimum nicht scharf ausgeprägt ist, siehe Bild 10, ist dann trotz des unterschiedlichen Einflusses der Temperatur auf das In-Lösung-Gehen von C_3A und Sulfat nicht zu befürchten, daß vorzeitiges Ansteifen und Erstarren auftritt, sofern die Frischbetontemperatur + 30 °C nicht überschreitet. Die Betonnorm DIN 1045 schreibt daher in Abschnitt 9.4.1 verbindlich vor, daß auch bei heißer Witterung die Frischbetontemperatur bei der Entladung 30 °C nicht überschreiten darf. Diese Anforderung ist im Hochsommer bei lang anhaltender heißer Witterung nur schwer einzuhalten. Andererseits sind die dem Verfasser bekannt gewordenen Fälle von größeren Schwierigkeiten durch vorzeitiges, starkes Ansteifen von Beton in den meisten Fällen in Verbindung mit höheren Frischbetontemperaturen aufgetreten. In dem vor wenigen Monaten erschienenen Erfahrungsbericht aus der Praxis [18] wird denn auch für das Betonieren bei heißem Wetter neben der Wahl eines Zements mit spätem Erstarrungsbeginn und geringem Wasseranspruch das Herabsetzen der Frischbeton-Anfangstemperatur durch Verwendung möglichst kühler Ausgangsstoffe sowie das Verschieben des Betonierens auf die kühleren Tageszeiten, u. U. Betonieren bei Nacht, empfohlen.

4.2 Einfluß der Dauer und Intensität des Mischens

Auf das Ansteifen und Erstarren des Betons übt das Mischen einen erheblichen Einfluß aus; das gilt sowohl für die Dauer und Intensität beim Anmachen als auch während eines längeren Transports.

Auch bei einem hinsichtlich des Sulfatzusatzes optimal abgestimmten Zement ist nicht auszuschließen, daß in den ersten Minuten nach dem Anmachen das in Lösung gehende Sulfat etwas voraneilt und dadurch spontan grobe Kristalle aus Sekundärgips ausfallen, die ein vorzeitiges Ansteifen bewirken können. Dieses Ansteifen kann von allein wieder zurückgehen, wenn dieser Gips sich wieder löst, um mit dem dann in Lösung gegangenen C_3A Trisulfat zu bilden. Dieser Vorgang wird als „falsches Erstarren“ (englisch „false set“) bezeichnet und läßt sich durch intensives, ausreichend langes Mischen beim Anmachen verhindern. Um die für das Ansteifen und Erstarren so entscheidenden, chemisch-mineralogischen Anfangsreaktionen des hydratisierenden Zements zuverlässig unter Kontrolle zu bekommen, sollte jeder Beton, von dem günstige Frischbetoneigenschaften über einen längeren Zeitraum gefordert werden, beim Anmachen nach Zugabe aller Ausgangsstoffe mindestens 1 Minute, besser 2 Minuten, intensiv durchgemischt werden. Insofern bedürfen die Darlegungen in DIN 1045, Abschn. 9.3.1, einer Korrektur, daß der Beton nämlich nicht nur so lange gemischt werden muß, bis ein gleichmäßiges Gemisch entstanden ist (u. U. nur 30 Sekunden), sondern die Mischdauer muß sich auch nach der Reaktionszeit der spontan in Lösung gehenden Anteile des C_3A und des Sulfats richten. Gleiche Überlegungen gelten entsprechend für werkgemischten Transportbeton und insbesondere für fahrzeuggemischten Transportbeton.

Wie aus vielen Untersuchungen hervorgeht, siehe u. a. [19] und das darin aufgeführte Schrifttum, ist für Beton, für den eine längere Verarbeitungszeit gefordert wird, ein fortwährendes, intensives Mischen nach dem Anmachen nicht angebracht, weil dadurch das Ansteifen und Erstarren sehr beschleunigt wird. Durch fortwährendes, intensives Mischen wird nämlich die feine Kristallschicht aus Trisulfat, die sich bei hinsichtlich des Sulfatzusatzes optimal abgestimmtem Zement auf den Zementkörnern gebildet hat, mechanisch abgerieben. Es reagiert dann weiteres C_3A , für das die Lösung kein adäquates Sulfatangebot mehr enthält, so daß die Bildung von Monosulfat und ein dadurch bedingtes Ansteifen begünstigt werden. Für die Praxis führt das zu der auch schon in [19] niedergelegten Empfehlung, Transportbeton beim Anmachen intensiv und ausreichend lange zu mischen, während der Fahrt und bei Wartezeiten auf der Baustelle hingegen nur langsam oder gar nicht zu bewegen. Natürlich muß dieser Beton vor der Auslieferung dann noch einmal kräftig durchgemischt werden, was auch in der Betonnorm DIN 1045 vorgeschrieben ist und heutiger Praxis entspricht.

Sowohl höhere Frischbetontemperaturen als auch ein fortwährendes, intensives Mischen wirken beide in die gleiche Richtung, nämlich zu einem Überangebot an gelöstem C_3A im Verhältnis zu dem in Lösung befindlichen Sulfat, was zur Bildung von Monosulfat und dadurch zu vorzeitigem Ansteifen führen kann. Durch ein fortwährendes, intensives Mischen an heißen Sommertagen kann ein frühzeitiges Ansteifen des Betons daher begünstigt oder sogar erst bewirkt werden.

4.3 Einfluß von Betonzusätzen

Einen sehr großen Einfluß auf das Ansteifen und Erstarren des Betons können Betonzusatzmittel und Betonzusatzstoffe ausüben, und zwar insbesondere jene, die in die Anfangsreaktionen des Zements mit dem Anmachwasser chemisch-mineralogisch stärker eingreifen [8, 21].

Bei den Betonzusatzmitteln ist zu unterscheiden zwischen den überwiegend physikalisch wirkenden Mitteln, wie z. B. viele Verflüssiger und Luftporenbildner, und den überwiegend chemisch-mineralogisch wirkenden Mitteln, wie z. B. Beschleuniger und Verzögerer. Dabei stellt die zuverlässige Beherrschung der stark in den Chemismus der Hydratation eingreifenden Mittel sowohl für den Zusatzmittelhersteller als auch für den Anwender eine recht schwierige Aufgabe dar. Das gilt vor allem für die Verzögerer. Denn sie müssen im Prinzip vier verschiedenartige Aufgaben lösen, nämlich erstens dürfen während der gesamten Verzögerungszeit außer dem spontan reagierenden C_3A keine weiteren nennenswerten Mengen C_3A in Lösung gehen, zweitens darf sich während der Verzögerungszeit weder Monosulfat noch Sekundärgips bilden, drittens darf während der Verzögerungszeit keine Rekrystallisation der zunächst sehr kleinen Ettringit-Kristalle auf der Oberfläche der Zementkörner zu großen Ettringit-Kristallen stattfinden, was sonst das normale Erstarren maßgeblich hervorruft, und viertens muß während der Verzögerungszeit der Hydratationsbeginn des C_3S weitgehend unterbunden werden.

Bild 11 zeigt den Einfluß von drei verschiedenen, verzögernden Wirkstoffen auf den Erstarrungsbeginn von Zement, der stets aus dem gleichen Klinker und mit dem gleichen Gesamtsulfatgehalt hergestellt worden war, dessen Sulfatträger sich jedoch in den Anteilen von Halbhydrat und Anhydrit unterschied. Ohne Zusatzmittel wies der Zement einen optimal langen Erstarrungsbeginn von 2 Stunden und 15 Minuten mit einem Sulfatträgerzusatz von 40 Gew.-% Halbhydrat und entsprechend 60 Gew.-% Anhydrit auf. Der Erstarrungsbeginn lag andererseits stets über 2 Stunden, wenn der Halbhydratanteil zwischen 40 und 80 Gew.-% lag, 0,2 Gew.-% Zucker bewirkten bei einem Zement mit 80 Gew.-% Halbhydrat einen

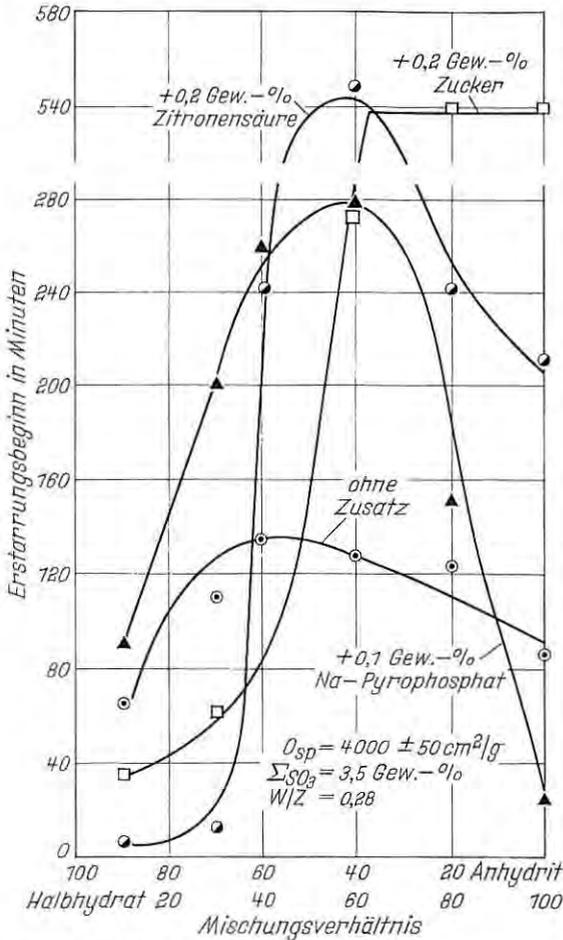


Bild 11 Einfluß von drei verschiedenen, verzögernden Wirkstoffen auf den Erstarrungsbeginn von Zement, der aus dem gleichen Klinker mit dem gleichen Gesamtsulfatgehalt aus verschiedenen Anteilen von Halbhydrat und Anhydrit hergestellt worden war

verzögerten Erstarrungsbeginn von rd. 9 Stunden. Bei einem Halbhydratanteil von 40 Gew.-% bewirkte der gleiche Zuckerzusatz jedoch keine Verzögerung, sondern eine Beschleunigung des Erstarrungsbeginns auf 1 Stunde und 20 Minuten.

Bei gleichem Klinker und gleichem Gesamtsulfatgehalt können somit bereits geringe Verschiebungen der Lösungsgeschwindigkeit des Sulfatträgers, die sich beim Erstarren eines zusatzmittelfreien Zements praktisch nicht bemerkbar machen, die Wirkung von verzögernden Zusatzmitteln in das Gegenteil umkehren. Da sich mit höherer Temperatur das Verhältnis von in Lösung gehendem C_3A zu in Lösung gehendem Sulfat verschiebt, ist auch verständlich, warum des öfteren die Wirkung eines Verzögerers bei ansteigender Frischbetontemperatur plötzlich umschlägt und schnelles Erstarren auftritt.

Daher reichen für eine zuverlässige Beurteilung eines durch Zusatzmittel erstarrungsverzögerten Betons Eignungsprüfungen im Labor bei 20 °C bei weitem nicht aus; aussagekräftige Eignungsprüfungen müssen dabei sowohl den Einfluß der Temperatur als auch der Dauer und Intensität des Mischens mit berücksichtigen. Außer einer solchen erweiterten Eignungsprüfung sind für die zielsichere Herstellung eines durch Zusatzmittel erstarrungsverzögerten Betons neben den in der Betonnorm DIN 1045 vorgeschriebenen Eigenüberwachungs- bzw. Güteprüfungen häufigere Prüfungen hinsichtlich der Verträglichkeit und Wirksamkeit des Zusatzmittels erforderlich. Solche zusätzlichen Prüfungen sind immer dann notwendig, wenn sich relativ geringe Schwankungen der Ausgangsstoffe oder der Herstellbedingungen des Betons stark auf die Betoneigenschaften auswirken. Das ist beispielsweise bei der Verwendung von luftporenbildenden Zusatzmitteln der Fall. Daher schreiben die vom Bundesminister für Verkehr eingeführten zusätzlichen Technischen Vorschriften und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton, Ausgabe 1978 (ZTV Beton 78), [23] sowie das von der Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen herausgegebene Merkblatt für die Verwendung von Luftporenbildnern für Beton, Ausgabe 1980, [24] vor, daß Messungen des Luftgehalts des Frischbetons an der Einbaustelle stündlich durchzuführen sind. In Analogie hierzu hält es der Verfasser für dringend geboten, auch bei der Verwendung von verzögernden Zusatzmitteln während der Betonherstellung deren Verträglichkeit und Wirksamkeit mit den übrigen Ausgangsstoffen unter den gegebenen Herstellbedingungen häufiger zu überprüfen.

Betonzusatzstoffe können das Ansteifen und Erstarren des Betons ebenfalls deutlich beeinflussen, wenn sie aus Stoffen bestehen oder Stoffe enthalten, die in die nach dem Anmachen des Betons ablaufenden chemisch-mineralogischen Reaktionen merklich eingreifen. Hydraulische und latent-hydraulische Betonzusatzstoffe, wie z. B. Hüttensand, können beispielsweise Aluminat an die Lösung abgeben. Das Sulfat in der Flugasche ist im allgemeinen nicht in die glasigen Kugeln eingebunden, sondern liegt als auf den Kugeln aufgedampftes Alkali- und/oder Calciumsulfat mit großer Lösungsgeschwindigkeit vor. Ferner kann die in der Flugasche fein verteilt vorliegende Kohle bestimmte Stoffe, die sonst in den Erstarrungsmechanismus eingreifen würden, adsorptiv binden.

Zwar kann die Verwendung von relativ billigen Betonzusatzstoffen, die in die Erhärtung durch hydraulische, latent-hydraulische oder puzzolanische Reaktionen fördernd eingreifen, die Kosten für Beton bestimmter Festigkeit vermindern [25], jedoch stehen der Wirtschaftlichkeit eines solchen Vorgehens eine Reihe von technischen Nachteilen gegenüber. Vergleicht man die Herstellung eines Bindemittelgemisches aus Zement und Betonzusatzstoff im Betonmischer mit der Herstellung eines Zements aus den gleichen Ausgangsstoffen in einem Zementwerk, dann weist die vorgeschaltete werkmäßige Herstellung bedeutsame technische Vorteile auf, die insbesondere das Risiko hinsichtlich Unregelmäßigkeiten beim Ansteifen, Erstarren und Erhärten des Betons stark vermindern. Im Betonwerk entsteht das Bindemittelgemisch erst zum Zeitpunkt seiner Verwendung durch bloße Steuerung (Dosierung) ohne Möglichkeit einer Rückkopplung des Herstellprozesses (Regelung). Eine Prüfung des jeweiligen Bindemittelgemisches vor seiner Verwendung ist dadurch nicht möglich. Im Zementwerk wird das Bindemittel bei dessen Herstellung und vor seiner Auslieferung und Verwendung laufend überwacht, und die dabei anfallenden Prüfergebnisse führen über eine Rückkopplung zur Regelung des Herstellprozesses. Eine Abstimmung des Sulfatangebots auf das unmittelbar nach dem Anmachen in Lösung gehende Aluminat des gesamten Bindemittels ist damit praktisch nur im Zementwerk möglich, weil ein erst beim Herstellen des Betons entstehendes Bindemittelgemisch für Prüfungen am Bindemittel selbst nicht zur Verfügung steht. Bedenklicher noch ist die Tatsache, daß das Bindemittel im Betonmischer chargenweise entsteht, während im Zementwerk die unvermeidbaren Schwankungen der Ausgangsstoffe, z. B. im Sulfat- oder Kohlegehalt einer Flugasche, durch den großen Massenstrom praktisch ausgeglichen werden. Insofern sind die Vorüberlegungen in [25] doch sehr theoretischer Natur, wenn zunächst darauf hingewiesen wird, daß die maßgebenden Eigenschaften eines flugaschehaltigen Betons auch von der Wechselwirkung zwischen einem bestimmten Zement und einer bestimmten Flugasche abhängen, und wenn es dann als ausreichend angesehen wird, wenn möglichst immer Zement aus demselben Zementwerk und Flugasche desselben Kraftwerks verwendet werden.

Werden bei der Betonherstellung neben Zement sowohl Betonzusatzstoffe als auch Betonzusatzmittel verwendet, die beide in die chemisch-mineralogischen Reaktionen beim Ansteifen, Erstarren und Erhärten eingreifen, dann sind nach Auffassung des Verfassers die Vorgänge so komplex, daß das normale Betonwerk für eine sichere Beherrschung des Ansteifens, Erstarrens und Erhärtens von Beton überfordert ist. Dieser Feststellung steht nicht entgegen, daß in der Praxis häufig dennoch so verfahren wird, ohne daß in der Regel größere Schwierigkeiten oder Schäden auftreten. Größere Schwierigkeiten mit unregelmäßigem Ansteifen und Erstarren sind allgemein nicht häufig, d. h. es handelt sich um ein statistisches Problem. So wie im Straßenverkehr das Nichtbeachten der Höchstgeschwindigkeit nicht zwingend zu einem Verkehrsunfall führt, so führt auch das Nichtbeachten der vorgenannten Gegebenheiten nicht zwingend zu einem Schaden durch Frühansteifen. Dennoch sind in den letzten Jahren einige spektakuläre Schadensfälle durch frühzeitiges Ansteifen und Erstarren aufgetreten, weil die heutigen

Erkenntnisse nicht bekannt waren oder anscheinend nicht ausreichend beachtet worden sind, so daß das Gesamtrisiko nach und nach immer weiter vergrößert worden ist.

5. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

5.1 Durch den Wandel in der Betontechnik, insbesondere durch die heute weit verbreitete Verwendung von Transportbeton und Pumpbeton, haben alle Frischbetoneigenschaften eine Bedeutung erlangt, die sie vor einigen Jahrzehnten noch nicht besaßen. Das gilt vor allem für das Ansteifen und Erstarren, jedoch auch für die Verarbeitbarkeit und die Pumpbarkeit.

5.2 Durch den gewünschten Übergang vom flüssigen in den festen Zustand werden jeder Zementleim und Beton eine gewisse Zeit nach dem Anmachen erst dickflüssiger (Ansteifen), dann erstarren sie, und schließlich werden sie fest (Erhärten). Ansteifen, Erstarren und Erhärten liegen in der Natur der Sache, sie treten daher auch immer auf, so daß sich das technische Problem nur auf die Steuerung des zeitlichen Ablaufs dieser Vorgänge beschränkt.

5.3 Für die Beurteilung des Ansteifens und Erstarrens von Zement gibt es zwei seit langem genormte Prüfverfahren in DIN 1164 und DIN 4227 Teil 5. Demgegenüber gibt es kein genormtes oder allgemein anerkanntes Prüfverfahren für das Ansteifen und Erstarren von Beton. In der Praxis beurteilt man diese Vorgänge durch die Veränderung der Konsistenz mit der Zeit, z. B. durch die Abnahme des Ausbreitmaßes nach DIN 1048 mit der Zeit.

5.4 Die spontan mit dem Wasser reagierende Oberflächenschicht der einzelnen Zementkörner wandelt das Anmachwasser in eine übersättigte Lösung, aus der dann Hydratationsprodukte auskristallisieren. Zeitpunkt, Art, Ort und Menge der auskristallisierenden Hydratationsprodukte sind dafür maßgeblich, welchen Verlauf das Ansteifen und Erstarren des Zementleims nimmt.

5.5 Das Sulfatangebot in der Lösung muß auf die nach dem Anmachen reagierenden Anteile des Zements, vor allem auf die spontan reagierenden Anteile der Aluminatverbindungen, abgestimmt sein. Sowohl ein deutlich zu kleines als auch ein deutlich zu großes Sulfatangebot in der Lösung können zu frühzeitigem Ansteifen und Erstarren führen. Zur Steuerung und Regelung des Ansteifens und Erstarrens von Zement eignen sich insbesondere Mischungen aus Sulfatträgern mit unterschiedlicher Lösungsgeschwindigkeit.

5.6 Im Frischbeton üben neben dem Zement auch bestimmte Zusätze, höhere Temperaturen, die Zusammensetzung, die Herstellung und die Verarbeitung einen erheblichen Einfluß auf das Ansteifen und Erstarren aus. Wird das nicht beachtet, so können Schwierigkeiten auftreten, obwohl der verwendete Zement hinsichtlich des Ansteifens- und Erstarrungsverhaltens optimiert war.

5.7 Höhere Frischbetontemperaturen bewirken bei allen Zementen eine Zunahme des unvermeidbaren, anfänglichen Ansteifens und eine Abnahme des Erstarrungsbeginns. Die Betonnorm DIN 1045 begrenzt daher selbst bei heißer Witterung die Frischbetontemperatur bei der Entladung auf + 30 °C.

5.8 Für eine möglichst lange Verarbeitungszeit sollte der Beton nach dem Anmachen mindestens 1 Minute nach Zugabe aller Bestandteile, besser 2 Minuten, intensiv gemischt werden. Anschließend sollte der Beton bis zur Verarbeitung möglichst wenig bewegt werden.

5.9 Betonzusatzmittel, die in die chemisch-mineralogischen Reaktionen des Zements in den ersten Stunden nach dem Anmachen stärker eingreifen, wie z. B. Verzögerer, können durch relativ geringe Schwankungen der Ausgangsstoffe oder der Herstellbedingungen, die sich bei einem zusatzmittelfreien Beton praktisch nicht auswirken, in ihrer Wirkung umschlagen. Neben einer erweiterten Eignungsprüfung, die alle für den speziellen Anwendungsfall vorliegenden Herstellbedingungen gebührend berücksichtigt, ist daher auch während der Betonherstellung eine häufigere Überprüfung der Verträglichkeit und Wirksamkeit solcher Zusatzmittel mit den Ausgangsstoffen unter den gegebenen Herstellbedingungen erforderlich.

5.10 Betonzusatzstoffe können das Ansteifen und Erstarren des Betons ebenfalls deutlich beeinflussen, wenn sie aus Stoffen bestehen oder Stoffe enthalten, die in die chemisch-mineralogischen Reaktionen merklich eingreifen. Da das Bindemittelgemisch aus Zement und Zusatzstoff dann erst während der Betonherstellung im Betonmischer entsteht, besteht keine Möglichkeit einer Regelung des Sulfatzusatzes auf das nach dem Anmachen in Lösung gehende Aluminat. Eine Risikominderung hinsichtlich des Ansteifens, Erstarrens und Erhärtens von Beton und eine Verringerung der Festigkeitsstreuungen ist praktisch nur bei einer werkmäßigen Herstellung des Bindemittels möglich, weil es vor seiner Verwendung einer laufenden Überwachung unterliegt und weil die Ergebnisse dieser laufenden Überwachung die Grundlage für die Regelung des Herstellprozesses darstellen.

SCHRIFTTUM

- [1] Locher, F. W., W. Richartz und S. Sprung: Erstarren von Zement, Teil I: Reaktion und Gefügeentwicklung. Zement-Kalk-Gips 29 (1976) H. 10, S. 435/442.
- [2] Verein Deutscher Zementwerke e. V., Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf: Erstarren und Erhärten. Tätigkeitsbericht 1975-78, S. 38/48.
- [3] Richartz, W.: Das Erstarren des Zements. Vortrag auf der Technisch-wissenschaftlichen Zement-Tagung '79 am 3. Oktober in Düsseldorf.
- [4] Sylla, H.-M.: Einfluß der Klinkerherstellung auf das Erstarren des Zements. Vortrag auf der Technisch-wissenschaftlichen Zement-Tagung '79 am 3. Oktober in Düsseldorf.
- [5] Sprung, S.: Einfluß des Mahlens und Lagerns auf das Erstarren des Zements. Vortrag auf der Technisch-wissenschaftlichen Zement-Tagung '79 am 3. Oktober in Düsseldorf.
- [6] Locher, F. W., W. Richartz und S. Sprung: Erstarren von Zement, Teil II: Einfluß des Calciumsulfatzusatzes. Zement-Kalk-Gips 33 (1980) H. 6, S. 271/277.
- [7] Verein Deutscher Zementwerke e. V., Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf: Erstarren und Erhärten. Tätigkeitsbericht 1978-81, S. 61/67.

- [8] Richartz, W.: Beeinflussung des Erstarrungsverhaltens durch Zusatzmittel. Vortrag auf der Technisch-wissenschaftlichen Zement-Tagung '81 am 24. September in Nürnberg.
- [9] Wischers, G.: Zur Normung von Zement. beton 21 (1971), H. 4, S. 147/150, H. 5, S. 193/197, und H.6, S. 241/245; ebenso Betontechnische Berichte 1971, Beton-Verlag, Düsseldorf 1972, S. 55/88.
- [10] Walz, K.: Anforderungen an Einpreßmörtel für Spannbetonglieder und Prüfung der Eigenschaften. Der Bau und die Bauindustrie 8 (1955) H. 16, S. 486/489.
- [11] Walz, K., und H. Mathieu: Der Einfluß des Zements auf die Eigenschaften von Zementsuspensionen zum Auspressen von Hohlräumen. beton 11 (1961) H. 6, S. 411/420; ebenso Betontechnische Berichte 1961, Beton-Verlag, Düsseldorf 1962, S. 177/198.
- [12] Flatten, H.: Untersuchungen über das Fließverhalten von Zementleim. Dissertation, TH Aachen 1973.
- [13] Wesche, K., und W. vom Berg: Rheologische Eigenschaften von Zementleim und Frischbeton. beton 23 (1973) H. 1, S. 21/27; ebenso Betontechnische Berichte 1973, Beton-Verlag, Düsseldorf 1974, S. 21/40.
- [14] Bombled, J.P.: General Report on the topic: Influence of properties of cement on workability and segregation. RILEM-Seminar „Fresh Concrete, Important Properties and their Measurement“, Leeds 1973.
- [15] Rendchen, K.: Einfluß verschiedener Zemente auf das Fließverhalten und die Stabilität von Zementsuspensionen. beton 26 (1976) H. 9, S. 321/325; ebenso Betontechnische Berichte 1976, Beton-Verlag, Düsseldorf 1977, S. 123/133.
- [16] Maultzsch, M., und U. Meinhold: Ansteifen von Beton – Möglichkeiten der Prüfung. VDB-Information 13/79.
- [17] Lewandowski, R., und G. Walter: Verhalten des Zements in der Frischbetonphase. Bauwirtschaft 35 (1981) H. 4, S. 78/83.
- [18] Wandschneider, R., und R. Pick: Transportbeton aus Abnehmersicht, Anforderungen und Erfahrungen. Beton- und Stahlbetonbau 76 (1981) H. 3, S. 58/62.
- [19] Wischers, G.: Einfluß langen Mischens oder Lagerns auf die Beton-eigenschaften. beton 13 (1963) H. 1, S. 23/30, und H. 2, S. 86/90; ebenso Betontechnische Berichte 1963, Beton-Verlag, Düsseldorf 1964, S. 21/52.
- [20] Previte, R.W.: Concrete Slump Loss. Proc. Amer. Concrete Inst. 74 (1977) Nr. 8, S. 361/367.
- [21] Meyer, L. M., und W. F. Perenchio: Theory of concrete slump loss related to use of chemical admixtures. Research and Development Bulletin RD 069.01 T, Portland Cement Association, Skokie/Ill. 1980.
- [22] Lewandowski, R., und G. Woller: Zum Ansteifungsverhalten von Zement und Beton. Betonwerk + Fertigteil-Technik 47 (1981) H. 5, S. 266/272, und H. 6, S 341/348.
- [23] Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton, Ausgabe 1978 (ZTV Beton 78). Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn.
- [24] Merkblatt für die Verwendung von Luftporenbildnern für Beton, Ausgabe 1980. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Arbeitsgruppe Betonstraßen, Köln.
- [25] vom Berg, W.: Kostenorientierter Betonentwurf für flugaschehaltige Betone. Betonwerk + Fertigteil-Technik 47 (1981) H. 7, S. 401/407.