

Einfluß der Zusatzmenge von Betonverflüssigern auf die Festigkeitsentwicklung

Von Kurt Walz und Hans Mathieu, Düsseldorf

Übersicht

Das ungenügende Erhärten von Betonmischungen, denen ein Verflüssiger zugesetzt worden war, wird in der Praxis oft auf eine zu große Zusatzmenge zurückgeführt. Die vorliegenden Untersuchungen sind ein Beitrag zur Frage, ob und inwieweit solcher Beton noch nach-erhärtert und welche Festigkeit dabei im Vergleich zu Beton mit „normaler“ Zusatzmenge entsteht.

Sieben handelsübliche Verflüssiger wurden in normaler, 2facher und 3facher Zusatzmenge Mörtelmischungen aus Portlandzement und Hochofenzement zugegeben.

Im ganzen gesehen zeigte sich dabei, daß die Festigkeit nach drei Tagen durch den 2- und 3fachen Zusatz zum Teil erheblich vermindert wurde. Mit zunehmendem Alter stieg die Erhärtung jedoch kräftig an, so daß nach 28 Tagen zum Teil eine höhere und im Mittel etwa die gleiche Festigkeit erreicht worden ist wie bei den Mischungen mit normaler Zusatzmenge. Die Festigkeit blieb jedoch dauernd zurück, wenn der Verflüssiger bei 2- oder 3facher Zusatzmenge stark luftporenbildend wirkte.

Der Einfluß einer überhöhten Zusatzmenge war sowohl beim Portlandzement wie auch beim Hochofenzement entsprechend erkennbar, jedoch verschieden groß.

Zu ähnlichen Feststellungen führten Versuche in den USA mit zehn verflüssigenden Verzögerern und einer 4fachen Zusatzmenge. Ein Fall aus der Praxis zeigt, daß auch schon eine geringe Änderung innerhalb der normengemäßen Zusammensetzung eines Zements (SO_2 -Gehalt) das Erstarren des Betons mit einem Verflüssiger verändern kann.

1. Einleitung

Betonverflüssiger (auch BV-Zusatzmittel oder Plastifizierungsmittel genannt; englisch „plasticisers“ oder „water-reducing admixtures“; französisch „plastifiants“) werden beim Mischen dem Beton in geringer Menge zugesetzt. Durch wirkungsvolle Verflüssiger wird für eine bestimmte Konsistenz eine kleinere Wassermenge benötigt als beim gleichen Beton ohne Verflüssiger. Infolge des verminderten Wasserbedarfs entsteht bei etwa gleichbleibendem Zementgehalt ein Beton mit kleinerem Wasserzementwert und entsprechend höherer Festigkeit. (Die Wasserein-

sparung bei Beton liegt meistens zwischen 5 und 20%. Die Erhöhung der Druckfestigkeit beträgt etwa 5 bis 20%.)

In der Bundesrepublik müssen derartige Verflüssiger amtlich zugelassen sein, wenn sie Beton für tragende Bauteile zugesetzt werden. Die für die Zulassung erforderliche Prüfung ist im einzelnen in Prüfrichtlinien festgelegt [1]. Durch die Prüfung wird die größte Zusatzmenge festgelegt, bei der die Raumbeständigkeit des Zements, seine Erstarrungsverhältnisse und das Schwinden nicht störend verändert werden. Für Portlandzement und Hochofenzement sind die Höchstmengen u. U. verschieden. Mit einer vom Hersteller anzugebenden „mittleren“ Zusatzmenge muß bei der Zulassungsprüfung jeweils an Betonen mit 240 kg und 300 kg Portlandzement und Hochofenzement je m³ nachgewiesen werden, daß durch den Verflüssiger im Vergleich zu den entsprechenden Betonen ohne den Verflüssiger (0-Beton) im Mittel eine Wassereinsparung von mindestens 5% und eine Steigerung der Druckfestigkeit von mindestens 8% erreicht werden. Die Bedingungen, die für die Anwendung eines Verflüssigers gelten, sind im zugehörigen amtlichen Zulassungsbescheid aufgeführt (u. a. Durchführung einer Eignungsprüfung nach DIN 1048 mit der vorgesehenen Betonmischung zur Ermittlung der jeweils zweckmäßigen Zusatzmenge).

Die Wirkung eines Verflüssigers hängt auch vom Zement ab [2]. Außerdem kann ein Verflüssiger mehr oder weniger stark verzögern [3].

Der geringere Wasserbedarf des Betons ist auf die Verminderung der Oberflächenspannung des Wassers und auf die dispergierende Wirkung der Verflüssiger zurückzuführen. Die Ursache für eine manchmal beobachtbare Verzögerung des Erstarrens oder auch des Erhärtens in den ersten Tagen ist noch wenig geklärt. Sie dürfte aber – ebenso wie bei den stofflich oft verwandten eigentlichen Verzögerern – auf eine anfänglich gehemmte oder etwas anders verlaufende Hydratation des Zements zurückzuführen sein.

Um einer Verzögerung des Erstarrens und Erhärtens entgegenzuwirken, enthielten Verflüssiger früher oft Calciumchlorid oder andere chloridhaltige, die Erhärtung beschleunigende Bestandteile. Die Beimengung von chloridhaltigen Zusätzen zu Verflüssigern ist mehr und mehr zurückgegangen, weil solche Verflüssiger für Spannbetonkonstruktionen nicht mehr verwendet werden dürfen.

Wiederholt wurde in den letzten Jahren bei Zusatz eines Verflüssigers beobachtet, daß innerhalb eines Bauteils einzelne Stellen sehr langsam erstarrten und auch nach 1 Tag oder 2 Tagen in der Erhärtung noch stark zurückblieben. Als Erklärung wurde meist angenommen, daß eine zu große und daher fehlerhafte Zusatzmenge des Verflüssigers zu einzelnen Mischungen diese Störung verursachte. Aus verschiedenen Gründen wurde nicht abgewartet, ob eine ausreichende Nacherhärtung später nicht doch noch einsetzte, weil z. B. schon eine hohe Frühfestigkeit nötig war oder weil bei einer endgültigen Minderfestigkeit die Behebung des Mangels sehr schwierig gewesen wäre. Der Beton wurde daher meistens wieder entfernt, solange dies noch mit verhältnismäßig wenig Umständen möglich war. (Eine Nach-

erhärtung hätte vor allem zur Voraussetzung, daß der Beton längere Zeit feuchtgehalten würde, um die weitere Hydratation des Zements nicht durch Auströcknung zu unterbrechen.)

Um festzustellen, wie sich überhöhte Zusatzmengen amtlich zugelassener, deutscher Verflüssiger grundsätzlich auf die Festigkeitsentwicklung auswirken, wurden auf Anregung des Deutschen Beton-Vereins die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen im Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf angestellt. Nach Abschluß dieser Arbeiten wurden ähnliche Untersuchungen mit verflüssigenden Verzögerern veröffentlicht (Bericht zur 40. Jahrestagung des Highway Research Board in Washington, Januar 1961). Sie werden am Schluß unter 3., ebenso wie ein in Nordamerika vor kurzem im Fachschrifttum bekanntgegebener Schadensfall (Abschnitt 4), kurz besprochen.

2. Untersuchungen mit verschiedenen Verflüssigern und gesteigerter Zusatzmenge

2.1 Versuchsdurchführung

Verflüssiger

Von den benutzten, in der Praxis häufig anzutreffenden sieben Verflüssigern waren die Verflüssiger N und A pulverförmig und C, R, B, P sowie M flüssig. Jeder Verflüssiger wurde in der im amtlichen Zulassungsbescheid aufgeführten höchstzulässigen Menge zugegeben (normale Zusatzmenge), ferner in der 2- und 3fachen Menge.

Zement

Bei der Prüfung der beiden benutzten Zemente nach DIN 1164, nämlich des Portlandzements M (PZ 275) und des Hochofenzements R (HOZ 275), wurden u. a. folgende Eigenschaften festgestellt:

| | PZ M | HOZ R |
|--------------------------------|------------------------|------------------------|
| Rückstand auf Prüfsieb 0,09 mm | 5,4 % | 1,5 % |
| Erstarrungsbeginn nach | 3 h 45 min | 6 h 05 min |
| Erstarrungsende nach | 5 h 45 min | 8 h 00 min |
| Ausbreitmaß bei $w = 0,60$ | 18,6 cm | 19,6 cm |
| Biegezugfestigkeit nach | | |
| 3 Tagen | 44 kp/cm ² | 42 kp/cm ² |
| 7 Tagen | 59 kp/cm ² | 62 kp/cm ² |
| 28 Tagen | 70 kp/cm ² | 83 kp/cm ² |
| Druckfestigkeit nach | | |
| 3 Tagen | 229 kp/cm ² | 193 kp/cm ² |
| 7 Tagen | 325 kp/cm ² | 282 kp/cm ² |
| 28 Tagen | 423 kp/cm ² | 412 kp/cm ² |

Der Hochofenzement wies einen Hüttensandgehalt von rd. 80 % auf.

Die Zemente unterschieden sich hinsichtlich der einzelnen Eigenschaften, die bei diesen Untersuchungen Bedeutung haben können, durch die größere Mahlfineinheit des Hochofenzements R, durch dessen späteres Erstarren und durch die etwas weichere Konsistenz des mit gleichem Wasserzementwert ($w = 0,60$) hergestellten Mörtels.

Zusammensetzung der Mischungen

Alle Untersuchungen wurden mit Mörtel nach DIN 1164 durchgeführt (44 Mischungen). Der Mörtel ohne Zusatzmittel (0-Mi-

schung) bestand aus 1,00 Gew.-T. Zement + 3,00 Gew.-T. gemischtkörnigem Sand 0/1,2 mm (Normensand) + 0,60 Gew.-T. Wasser.

Die verschiedenen Mengen der einzelnen Zusatzmittel sind in Gew.-% des Zements ausgedrückt. (Bei den flüssigen Zusatzmitteln wurde die Flüssigkeitsmenge, sofern sie im Zulassungsbescheid in cm³ angegeben war, mit dem spezifischen Gewicht des Verflüssigers auf Gew.-% umgerechnet.)

Eine Übersicht mit den Eigenschaften der frischen Mörtel findet sich in Tafel 1 für den Mörtel mit Portlandzement M und in Tafel 2 für den Mörtel mit Hochofenzement R.

In Spalte 1 sind die Verflüssiger und in Spalte 2 die Zusatzmengen in Gew.-% angegeben (0-Mischungen ohne Verflüssiger, normale, 2fache und 3fache Menge). Als „normale“ Zusatzmenge wurde die nach dem Zulassungsbescheid höchstzulässige Menge gewählt (für Mischungen mit Hochofenzement zum Teil kleiner). Spalte 3 weist das Ausbreitmaß (Konsistenzmaß) und Spalte 4 den Wasserzementwert (Wasserzusatz) aus, der nötig war, um mit den verschiedenen Mengen an Verflüssigern etwa das gleiche Ausbreitmaß wie bei der 0-Mischung zu erreichen (Ausbreitmaß

Tafel 1 Eigenschaften des Frischmörtels mit PZ M

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------|--------------------|----------------|------------------|--------------|------------------------------|
| Verflüssiger | Zusatzmenge Gew.-% | Ausbreitmaß cm | Wasserzementwert | Luftgehalt % | Rohwichte kp/dm ³ |
| — | 0 | 18,6 | 0,60 | 2,0 | 2,227 |
| N 1*) | 0,70 | 18,0 | 0,56 | 4,3 | 2,204 |
| N 2*) | 1,40 | 18,1 | 0,55 | 4,1 | 2,207 |
| N 3*) | 2,10 | 18,6 | 0,54 | 4,0 | 2,215 |
| A 1 | 1,00 | 18,0 | 0,56 | 3,2 | 2,223 |
| A 2 | 2,00 | 18,6 | 0,56 | 3,5 | 2,223 |
| A 3 | 3,00 | 18,2 | 0,55 | 5,4 | 2,180 |
| C 1 | 0,38 | 18,4 | 0,59 | 3,9 | 2,203 |
| C 2 | 0,75 | 18,6 | 0,58 | 5,2 | 2,170 |
| C 3 | 1,13 | 18,2 | 0,56 | 8,6 | 2,114 |
| R 1 | 0,30 | 18,8 | 0,59 | 2,8 | 2,227 |
| R 2 | 0,60 | 18,4 | 0,57 | 3,3 | 2,222 |
| R 3 | 0,90 | 18,3 | 0,56 | 4,5 | 2,184 |
| B 1 | 0,19 | 18,4 | 0,58 | 2,8 | 2,219 |
| B 2 | 0,39 | 18,2 | 0,57 | 3,4 | 2,212 |
| B 3 | 0,58 | 18,4 | 0,56 | 3,9 | 2,198 |
| P 1 | 0,42 | 18,1 | 0,58 | 3,2 | 2,218 |
| P 2 | 0,83 | 18,6 | 0,57 | 3,4 | 2,214 |
| P 3 | 1,25 | 18,8 | 0,56 | 4,3 | 2,192 |
| M 1 | 0,35 | 18,4 | 0,58 | 4,0 | 2,202 |
| M 2 | 0,70 | 18,3 | 0,57 | 4,1 | 2,188 |
| M 3 | 1,05 | 18,2 | 0,56 | 4,2 | 2,184 |

*) 1 = normale, 2 = 2fache, 3 = 3fache Zusatzmenge

Tafel 2 Eigenschaften des Frischmörtels mit HOZ R

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------|--------------------|----------------|-------------------|--------------|------------------------------|
| Verflüssiger | Zusatzmenge Gew.-% | Ausbreitmaß cm | Wasserelementwert | Luftgehalt % | Rohwichte kp/dm ³ |
| — | 0 | 19,6 cm | 0,60 | 2,0 | 2,215 |
| N 1*) | 0,60 | 19,8 | 0,55 | 4,4 | 2,191 |
| N 2*) | 1,20 | 19,2 | 0,52 | 4,3 | 2,204 |
| N 3*) | 1,80 | 19,2 | 0,52 | 5,1 | 2,174 |
| A 1 | 0,50 | 19,2 | 0,56 | 3,4 | 2,219 |
| A 2 | 1,00 | 19,8 | 0,56 | 3,9 | 2,215 |
| A 3 | 1,50 | 19,8 | 0,55 | 4,8 | 2,198 |
| C 1 | 0,38 | 19,3 | 0,58 | 5,3 | 2,160 |
| C 2 | 0,75 | 19,8 | 0,56 | 11,0 | 2,000 |
| C 3 | 1,13 | 19,7 | 0,54 | 16,0 | 1,920 |
| R 1 | 0,30 | 19,9 | 0,58 | 3,8 | 2,171 |
| R 2 | 0,60 | 19,3 | 0,52 | 4,8 | 2,196 |
| R 3 | 0,90 | 19,3 | 0,51 | 6,4 | 2,168 |
| B 1 | 0,19 | 19,5 | 0,57 | 3,3 | 2,185 |
| B 2 | 0,39 | 19,8 | 0,53 | 4,1 | 2,196 |
| B 3 | 0,58 | 19,8 | 0,51 | 5,5 | 2,164 |
| P 1 | 0,42 | 19,9 | 0,57 | 3,0 | 2,226 |
| P 2 | 0,83 | 19,2 | 0,55 | 4,5 | 2,191 |
| P 3 | 1,25 | 19,7 | 0,54 | 4,8 | 2,179 |
| M 1 | 0,35 | 19,6 | 0,57 | 3,8 | 2,190 |
| M 2 | 0,70 | 19,6 | 0,55 | 3,6 | 2,195 |
| M 3 | 1,05 | 19,6 | 0,54 | 4,6 | 2,167 |

*) 1 = normale, 2 = 2fache, 3 = 3fache Zusatzmenge

beim Mörtel mit Portlandzement im Mittel rd. 18,6 cm und mit Hochofenzement rd. 19,6 cm).

Der Wasserelementwert w konnte, abhängig vom Verflüssiger, von der Zusatzmenge und dem Zement mehr oder weniger stark herabgesetzt werden; siehe auch die Bilder 1 und 2. Als Mittel aus allen Mörteln ergab sich der Wasserelementwert bei

| | |
|------------------------------------|----------|
| der 0-Mischung | zu 0,60, |
| der normalen Zusatzmenge | zu 0,57, |
| der 2fachen Zusatzmenge | zu 0,55, |
| der 3fachen Zusatzmenge | zu 0,54. |

Luftporenbildung

An der Verminderung des Wasserelementwerts kann auch der durch den Verflüssiger erhöhte Luftgehalt beteiligt sein.

Da die Mischdauer in dem langsam laufenden Kollermischer nach DIN 1164 2 min betrug, kann man annehmen, daß eine gegebenenfalls vorhandene Neigung einzelner Verflüssiger, Luftporen zu bilden, durch diese milde Mischwirkung eher zurückgehalten, keinesfalls aber besonders gefördert wurde.

Der mit einem Meßgerät von 750 cm³ Fassungsraum ermittelte Luftgehalt der Mörtel ist in den Spalten 5 der Tafeln 1 und 2

Mischungen mit p Z M

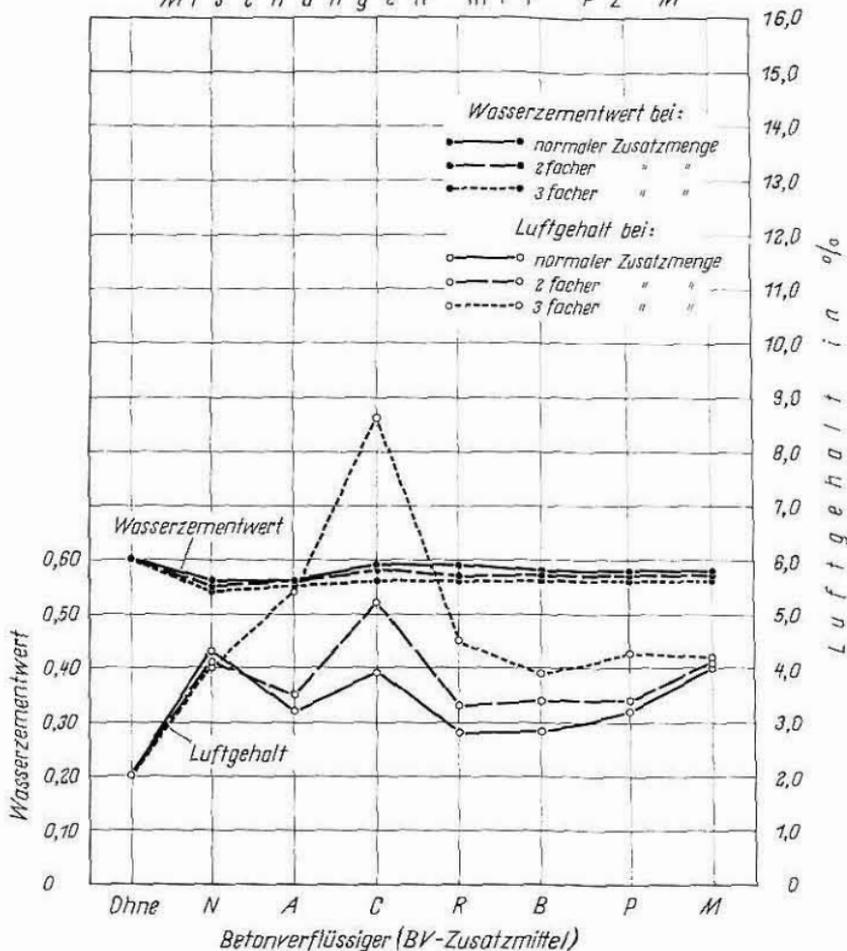


Bild 1 Wasserzementwert und Luftgehalt des Frischmörtels mit PZ M und normalen, 2fachen und 3fachen Zusatzmengen von Betonverflüssigern

aufgeführt. Das in Bild 3 wiedergegebene Meßgerät arbeitet nach dem Druckausgleichsverfahren. (Der Mörtel wurde in zwei Schichten in den Meßbehälter eingefüllt und jede Schicht durch je 20 leichte Stampfstöße verdichtet.)

Die beiden Mörtel ohne Verflüssiger entstanden mit einem Luftgehalt von 2,0 %. Demgegenüber wiesen die Mörtel mit den Verflüssigern immer einen höheren Luftgehalt auf; siehe dazu die Bilder 1 und 2.

Die Erhöhung des Luftgehalts gegenüber den Mörteln ohne Verflüssiger betrug ohne die Mörtel mit dem Verflüssiger C bei

| | |
|--------------------------|--------------------|
| der normalen Zusatzmenge | rd. 1 % bis 2,5 %, |
| der 2fachen Zusatzmenge | rd. 1,5 % bis 3 %, |
| der 3fachen Zusatzmenge | rd. 2 % bis 4,5 %. |

Bemerkenswert ist, daß mit zunehmender Zusatzmenge der beiden Verflüssiger N und M der Luftgehalt nicht oder nur unbedeutend anstieg.

Am stärksten luftporenbildend wirkte der Verflüssiger C, insbesondere im Mörtel mit dem Hochofenzement. Der Luftgehalt erreichte mit diesem Verflüssiger

| durch | beim Mörtel mit | |
|---------------------|------------------|------------------|
| | Portlandzement M | Hochofenzement R |
| normale Zusatzmenge | 3,9 % | 5,3 % |
| 2fache Zusatzmenge | 5,2 % | 11,0 % |
| 3fache Zusatzmenge | 8,6 % | 16,0 % |

Ein hoher Luftgehalt wirkt sich festigkeitsmindernd aus, wenn auf der anderen Seite nicht eine entsprechend große Wassereinsparung möglich wird [2]. Die Wassereinsparung war jedoch mit dem Verflüssiger C im ganzen nicht größer als mit den anderen Verflüssigern, die weniger Luftporen erzeugt hatten.

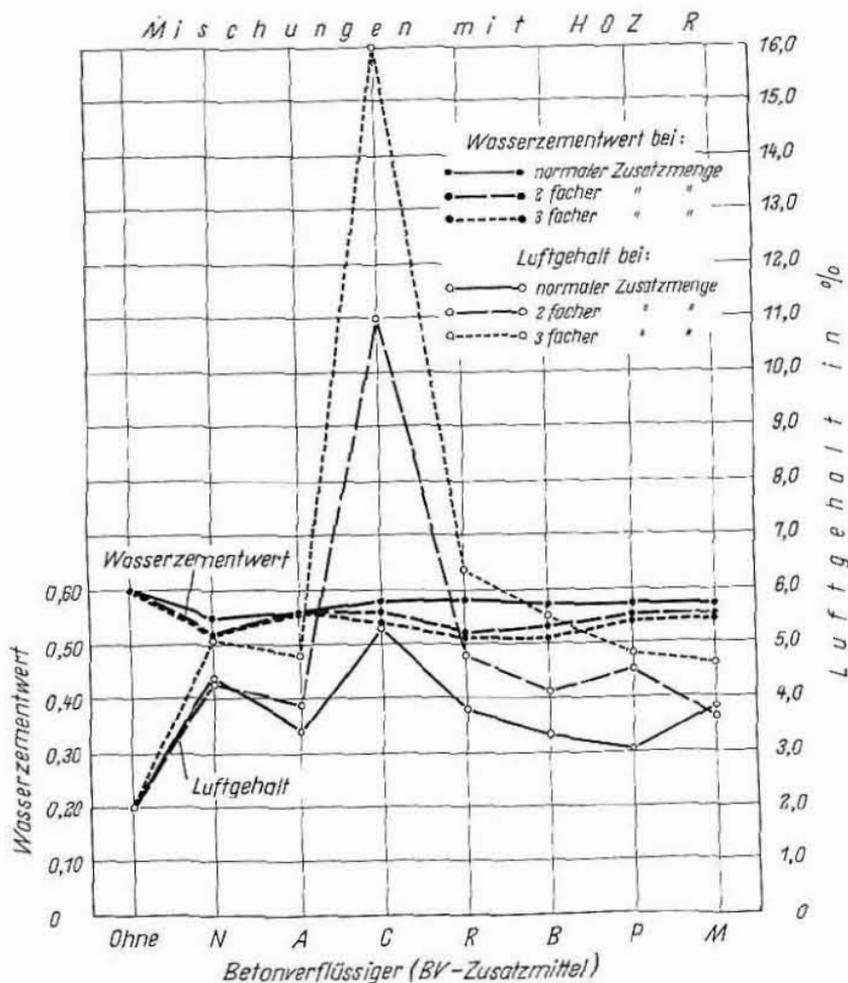


Bild 2 Wasserzementwert und Luftgehalt des Frischmörtels mit HOZ R und normalen, 2fachen und 3fachen Zusatzmengen von Betonverflüssigern

Eine Übersicht über den bei den einzelnen Mischungen entstandenen Wasserzementwert und Luftporengehalt vermitteln die Bilder 1 und 2.

Ein hoher Luftgehalt wirkte sich nach Spalte 6 der Tafeln 1 und 2, trotz kleineren Wasserzementwerts, auch in einer deutlich kleineren Rohwichte des Frischmörtels aus.

Probekörper

Die in Stahlformen gemäß DIN 1164 hergestellten Prismen 4 cm x 4 cm x 16 cm lagerten bei 18 bis 21 °C zunächst einen Tag in feuchtigkeitsgesättigter Luft, dann bis zur Prüfung auf Biegezug- und Druckfestigkeit unter Wasser.

2.2 Festigkeiten der Mörtel

Die Tafeln 3 und 4 enthalten in den Spalten 3 bis 5 die Mittelwerte der Biegezugfestigkeiten aus 3 Prüfungen und in den Spalten 6 bis 8 die Mittelwerte der Druckfestigkeiten (6 Prüfungen) jeweils für die 3, 7 und 28 Tage alten Mörtelprismen. In den Klammern sind die Festigkeiten in % der entsprechenden Festigkeiten des Mörtels ohne Verflüssiger (100 %) angegeben.

Zeichnerisch sind die Ergebnisse der Festigkeitsprüfung in den Bildern 4 und 6 für die Biegezugfestigkeit und in den Bildern 5 und 7 für die Druckfestigkeit so dargestellt, daß man für die einzelnen Altersstufen einfach erkennen kann, welche Festigkeiten bei den Mörteln mit den Verflüssigern im Vergleich zur 0-Mischung (gestrichelte, horizontale Linien) erhalten wurden.

2.3 Einfluß der Zusatzmenge auf die Festigkeit im Alter von 28 Tagen

Zunächst soll herausgestellt werden, welchen Einfluß die Verflüssiger auf die maßgebliche Biegezug- und Druckfestigkeit nach 28 Tagen im Vergleich zur 0-Mischung hatten. Auf die Festigkeitsentwicklung in jüngerem Alter wird unter 2.4 eingegangen.

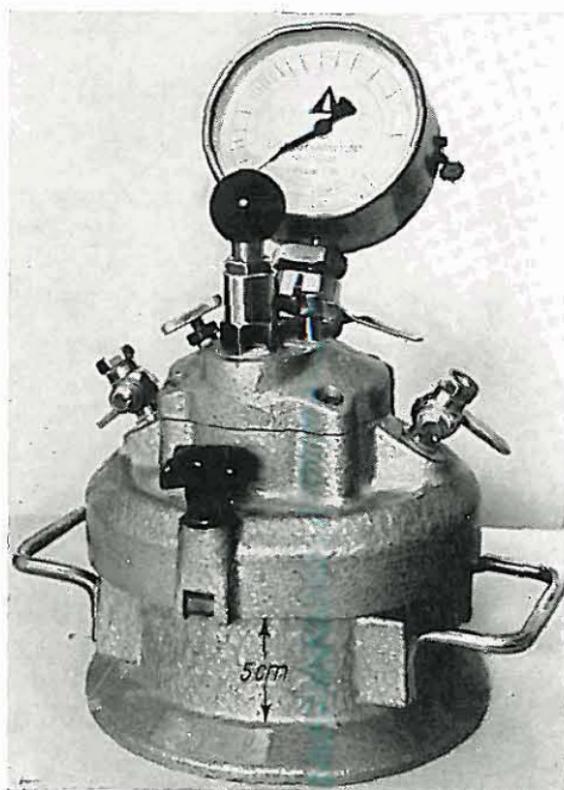


Bild 3 Lufthaltungsprüfer nach dem Druckausgleichsverfahren mit 750 cm³ Fassungsraum für Mörtel

Tafel 4 Festigkeiten des Mörtels mit HOZ R in kp/cm²

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--------------|--------------------|-------------------------|-------------|-------------|----------------------|--------------|--------------|
| Verflüssiger | Zusatzmenge Gew.-% | Biegezugfestigkeit nach | | | Druckfestigkeit nach | | |
| | | 3 Tagen | 7 Tagen | 28 Tagen | 3 Tagen | 7 Tagen | 28 Tagen |
| — | 0 | 42 (100) | 62 (100) | 83 (100) | 193 (100) | 282 (100) | 412 (100) |
| N 1') | 0,60 | 38 (90) | 61 (98) | 77 (93) | 165 (85) | 283 (100) | 422 (102) |
| N 2') | 1,20 | 19 (45) | 56 (90) | 82 (99) | 66 (34) | 282 (100) | 455 (110) |
| N 3') | 1,80 | — (—) | 38 (61) | 73 (88) | — (—) | 206 (73) | 388 (94) |
| A 1 | 0,50 | 51 (121) | 70 (113) | 90 (109) | 239 (124) | 308 (109) | 482 (117) |
| A 2 | 1,00 | 42 (100) | 65 (105) | 86 (104) | 207 (107) | 291 (103) | 432 (105) |
| A 3 | 1,50 | 38 (90) | 60 (97) | 83 (100) | 158 (82) | 280 (99) | 428 (104) |
| C 1 | 0,38 | 35 (83) | 50 (81) | 74 (89) | 161 (83) | 237 (84) | 353 (86) |
| C 2 | 0,75 | 32 (76) | 44 (71) | 57 (69) | 121 (63) | 184 (65) | 270 (66) |
| C 3 | 1,13 | 29 (69) | 43 (69) | 52 (63) | 103 (53) | 164 (58) | 235 (57) |
| R 1 | 0,30 | 35 (83) | 61 (98) | 78 (94) | 158 (82) | 273 (97) | 416 (101) |
| R 2 | 0,60 | 33 (79) | 60 (97) | 81 (98) | 144 (75) | 284 (101) | 429 (104) |
| R 3 | 0,90 | 26 (62) | 54 (87) | 76 (92) | 110 (57) | 274 (97) | 436 (106) |
| B 1 | 0,19 | 35 (83) | 70 (113) | 88 (106) | 171 (89) | 321 (114) | 440 (107) |
| B 2 | 0,39 | 36 (86) | 60 (97) | 82 (99) | 152 (79) | 289 (102) | 431 (105) |
| B 3 | 0,58 | 30 (71) | 58 (94) | 79 (95) | 130 (67) | 281 (100) | 441 (107) |
| P 1 | 0,42 | 34 (81) | 57 (92) | 81 (98) | 157 (81) | 271 (96) | 408 (99) |
| P 2 | 0,83 | 35 (83) | 64 (103) | 77 (93) | 164 (85) | 290 (103) | 413 (100) |
| P 3 | 1,25 | 40 (95) | 63 (102) | 82 (99) | 173 (90) | 279 (99) | 420 (102) |
| M 1 | 0,35 | 38 (90) | 65 (105) | 80 (96) | 179 (93) | 291 (103) | 411 (100) |
| M 2 | 0,70 | 37 (88) | 63 (102) | 82 (99) | 175 (91) | 281 (100) | 412 (100) |
| M 3 | 1,05 | 42 (100) | 67 (108) | 89 (107) | 173 (90) | 295 (105) | 427 (104) |

*) 1 = normale, 2 = 2fache, 3 = 3fache Zusatzmenge

Tafel 3 Festigkeiten des Mörtels mit PZ M in kp/cm^2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--------------|--------------------|-------------------------|-------------|-------------|----------------------|--------------|--------------|
| Verflüssiger | Zusatzmenge Gew.-% | Biegezugfestigkeit nach | | | Druckfestigkeit nach | | |
| | | 3 Tagen | 7 Tagen | 28 Tagen | 3 Tagen | 7 Tagen | 28 Tagen |
| — | | 44 (100) | 59 (100) | 70 (100) | 229 (100) | 325 (100) | 423 (100) |
| N 1') | 0,70 | 50 (114) | 62 (105) | 74 (106) | 254 (111) | 356 (110) | 446 (105) |
| N 2') | 1,40 | 32 (73) | 57 (97) | 71 (101) | 160 (70) | 346 (106) | 464 (110) |
| N 3') | 2,10 | 5 (11) | 41 (69) | 67 (96) | 11 (5) | 223 (69) | 442 (104) |
| A 1 | 1,00 | 47 (107) | 64 (108) | 74 (106) | 253 (110) | 387 (119) | 464 (110) |
| A 2 | 2,00 | 45 (102) | 60 (102) | 73 (104) | 235 (102) | 354 (109) | 451 (107) |
| A 3 | 3,00 | 38 (86) | 57 (97) | 71 (101) | 195 (85) | 333 (102) | 438 (103) |
| C 1 | 0,38 | 42 (95) | 53 (90) | 69 (99) | 217 (95) | 302 (93) | 401 (95) |
| C 2 | 0,75 | 40 (91) | 55 (93) | 64 (91) | 182 (79) | 291 (90) | 346 (82) |
| C 3 | 1,13 | 35 (80) | 45 (76) | 55 (79) | 144 (63) | 214 (66) | 278 (66) |
| R 1 | 0,30 | 45 (102) | 56 (95) | 74 (106) | 228 (99) | 320 (98) | 432 (102) |
| R 2 | 0,60 | 46 (105) | 60 (102) | 72 (103) | 228 (99) | 339 (104) | 447 (106) |
| R 3 | 0,90 | 42 (95) | 55 (93) | 72 (103) | 204 (89) | 326 (100) | 435 (103) |
| B 1 | 0,19 | 49 (112) | 59 (100) | 72 (103) | 248 (108) | 341 (105) | 441 (104) |
| B 2 | 0,39 | 47 (107) | 62 (105) | 76 (109) | 231 (101) | 348 (107) | 452 (107) |
| B 3 | 0,58 | 44 (100) | 58 (98) | 75 (107) | 234 (102) | 334 (103) | 456 (108) |
| P 1 | 0,42 | 46 (105) | 55 (93) | 70 (100) | 254 (111) | 338 (104) | 445 (105) |
| P 2 | 0,83 | 45 (102) | 59 (100) | 72 (103) | 236 (103) | 334 (103) | 442 (104) |
| P 3 | 1,25 | 45 (102) | 55 (93) | 68 (97) | 227 (99) | 310 (95) | 411 (97) |
| M 1 | 0,35 | 45 (102) | 58 (98) | 71 (101) | 233 (102) | 330 (102) | 413 (98) |
| M 2 | 0,70 | 44 (100) | 55 (93) | 71 (101) | 226 (99) | 319 (98) | 423 (100) |
| M 3 | 1,05 | 45 (102) | 54 (92) | 72 (103) | 233 (102) | 308 (95) | 403 (95) |

*) 1 = normale, 2 = 2fache, 3 = 3fache Zusatzmenge

Mischungen mit dem Portlandzement M

Die Darstellung in den Bildern 4 und 5 läßt erkennen, daß sich die einzelnen Verflüssiger bei gleicher Zusatzmenge im 28 Tage alten Mörtel etwa ähnlich auf die Biegezug- und Druckfestigkeit auswirkten.

Bei normaler Zusatzmenge war die Biegezugfestigkeit nach 28 Tagen mit 3 Verflüssigern (N, A, R) im Mittel um 6% und die Druckfestigkeit mit 4 Verflüssigern (N, A, B, P) im Mittel ebenfalls um 6% größer entstanden als ohne Verflüssiger (siehe auch die Tafeln 3 und 4). Die Festigkeiten der Mörtel mit den anderen Verflüssigern waren nicht wesentlich angestiegen oder wie die Druckfestigkeit der Mörtel mit den Verflüssiger C und M sogar etwas abgefallen. Hieran dürfte beim Mörtel mit dem Verflüssiger C auch der bereits verhältnismäßig hohe Luftgehalt von 5,3% beteiligt sein. Mit 2- und 3facher Zusatzmenge war der verschiedenartige Einfluß der einzelnen Verflüssiger ausgeprägter und auch anders gerichtet. Stuft man die 7 Verflüssiger in 3 Gruppen ein, je nachdem, ob sie gegenüber der 0-Mischung zu einer merkbaren Festigkeitssteigerung führten (etwa $\geq +6\%$) oder praktisch keine hervortretende Wirkung hatten (etwa $\pm 5\%$) oder die Festigkeit deutlich verminderten (etwa $\leq -6\%$) ein, so ergibt sich gemittelt folgende Übersicht:

Veränderung der 28 Tage-Biegezugfestigkeit

| Zusatzmenge | Steigerung | geringe Wirkung | Minderung |
|-------------|--------------|-----------------------|-----------|
| normal | + 6% (N,A,R) | + 1% (C,B,P,M) | (—) |
| 2fach | + 9% (B) | + 2% (N,A,R,P,M) | — 9% (C) |
| 3fach | + 7% (B) | $\pm 0\%$ (N,A,R,P,M) | —21% (C) |

Veränderung der 28 Tage-Druckfestigkeit

| Zusatzmenge | Steigerung | geringe Wirkung | Minderung |
|-------------|----------------|-----------------------|-----------|
| normal | + 10% (A) | + 2% (N,C,R,B,P,M) | (—) |
| 2fach | + 8% (N,A,R,B) | + 3% (P,M) | —18% (C) |
| 3fach | + 8% (B) | $\pm 0\%$ (N,A,R,P,M) | —34% (C) |

Wenn auch durch diese Einteilung die unterschiedliche Wirkung einzelner Verflüssiger etwas verwischt wird, so läßt diese, aus den Bildern 4 und 5 bzw. der Tafel 3 abgeleitete Einteilung doch erkennen, daß mit der normalen, aber auch mit der 2fachen oder 3fachen Zusatzmenge der eine oder andere Verflüssiger die Festigkeit nach 28 Tagen um 6 bis 10% steigerte, einige andere sie wenig veränderten und daß die Festigkeit nur durch den Verflüssiger C mit zunehmender Zusatzmenge stark vermindert wurde. Der Luftgehalt des Mörtels stieg durch den Verflüssiger C von 3,9% mit normaler Zusatzmenge auf 5,2% bei 2facher und auf 8,6% bei 3facher Zusatzmenge an.

Mischungen mit Hochofenzement R

Wenn die Darstellungen der Bilder 1 und 2 verglichen werden, so erkennt man, daß die Auswirkung der einzelnen Verflüssiger

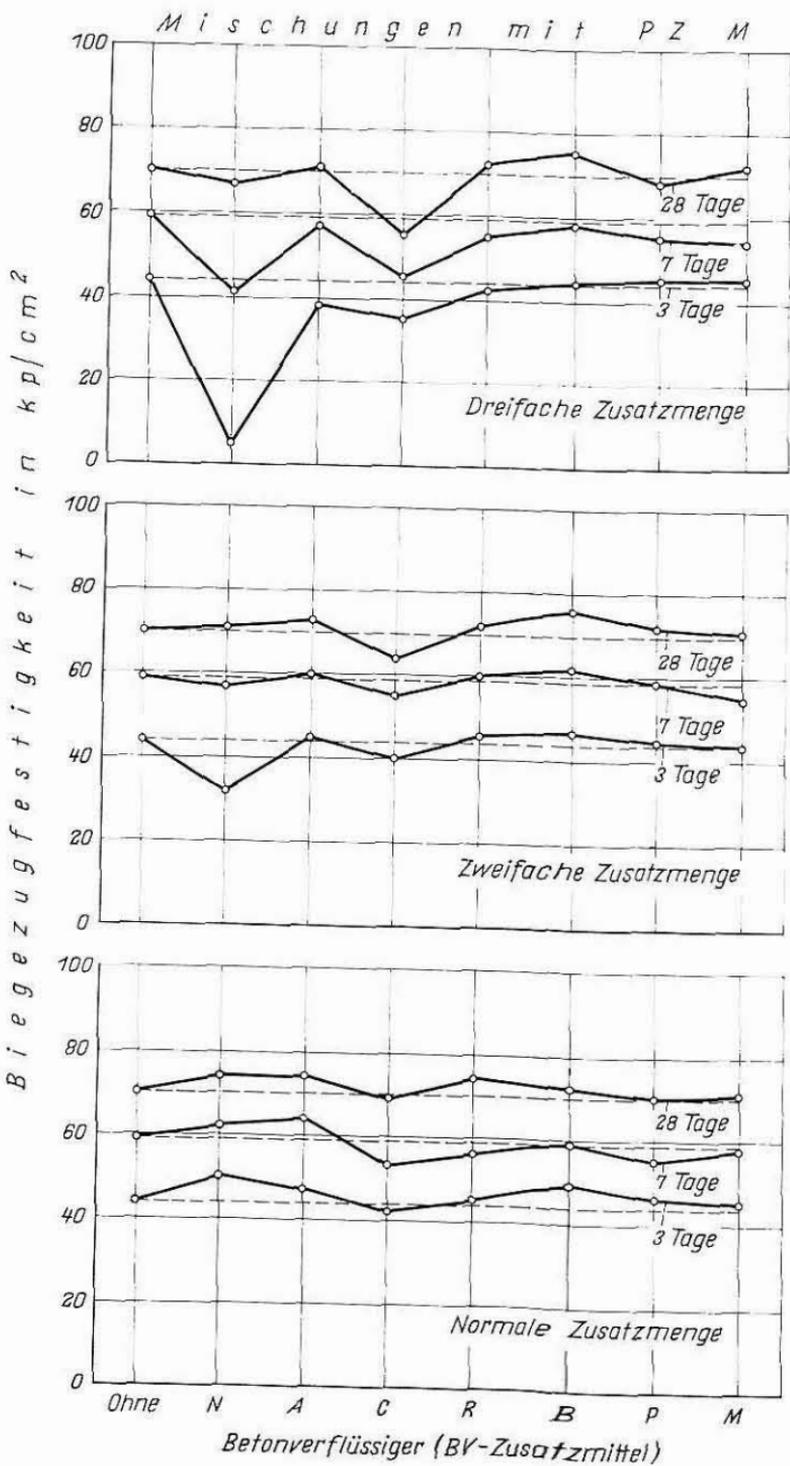


Bild 4 Biegezugfestigkeit nach 3, 7 und 28 Tagen der Mischungen mit PZ M und normalen, 2fachen und 3fachen Zusatzmengen von Betonverflüssigern

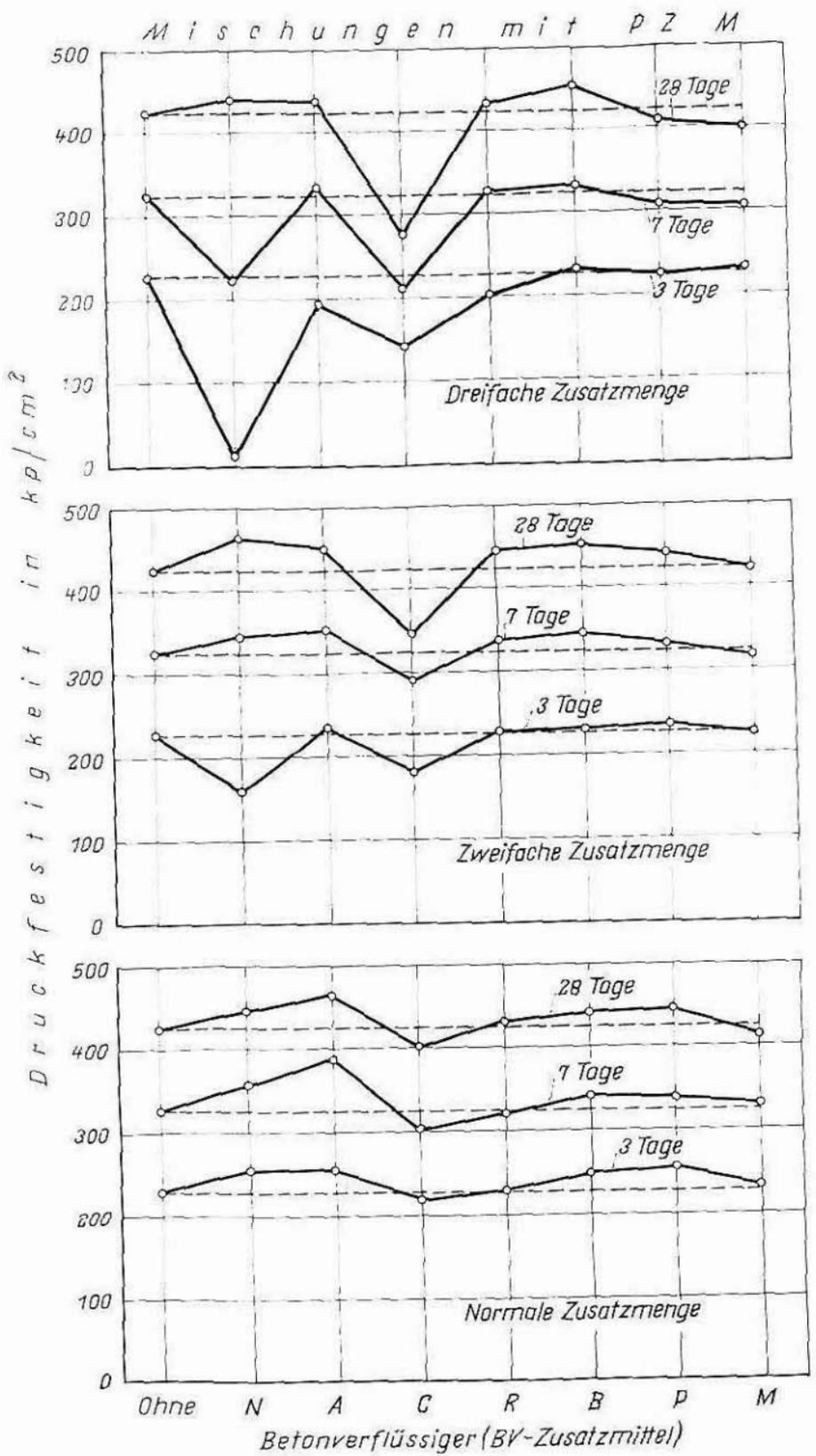


Bild 5 Druckfestigkeit nach 3, 7 und 28 Tagen der Mischungen mit p Z M und normalen, 2fachen und 3fachen Zusatzmengen von Betonverflüssigern

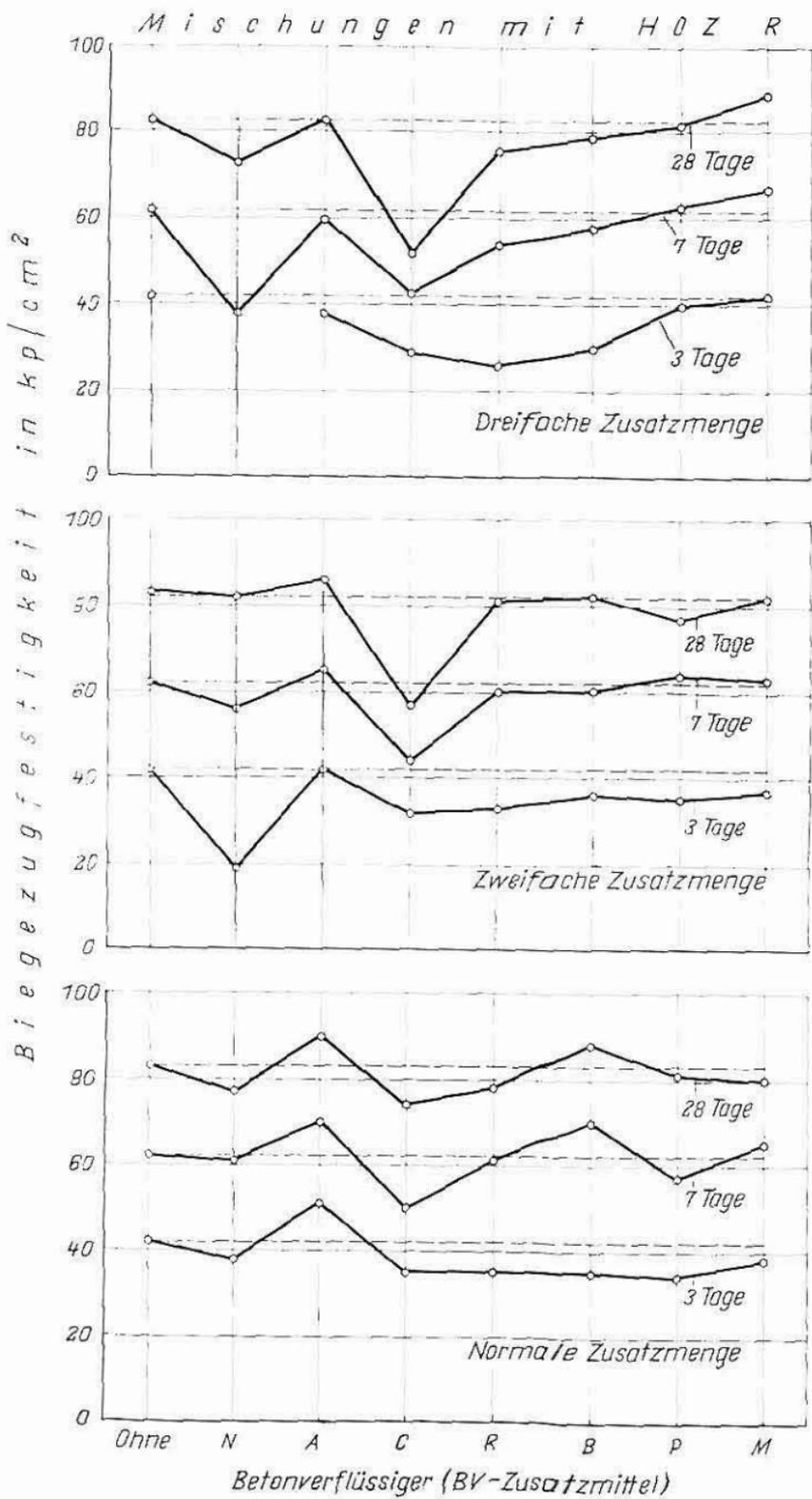


Bild 6 Biegezugfestigkeit nach 3, 7 und 28 Tagen der Mischungen mit HOZ R und normalen, 2fachen und 3fachen Zusatzmengen von Betonverflüssigern

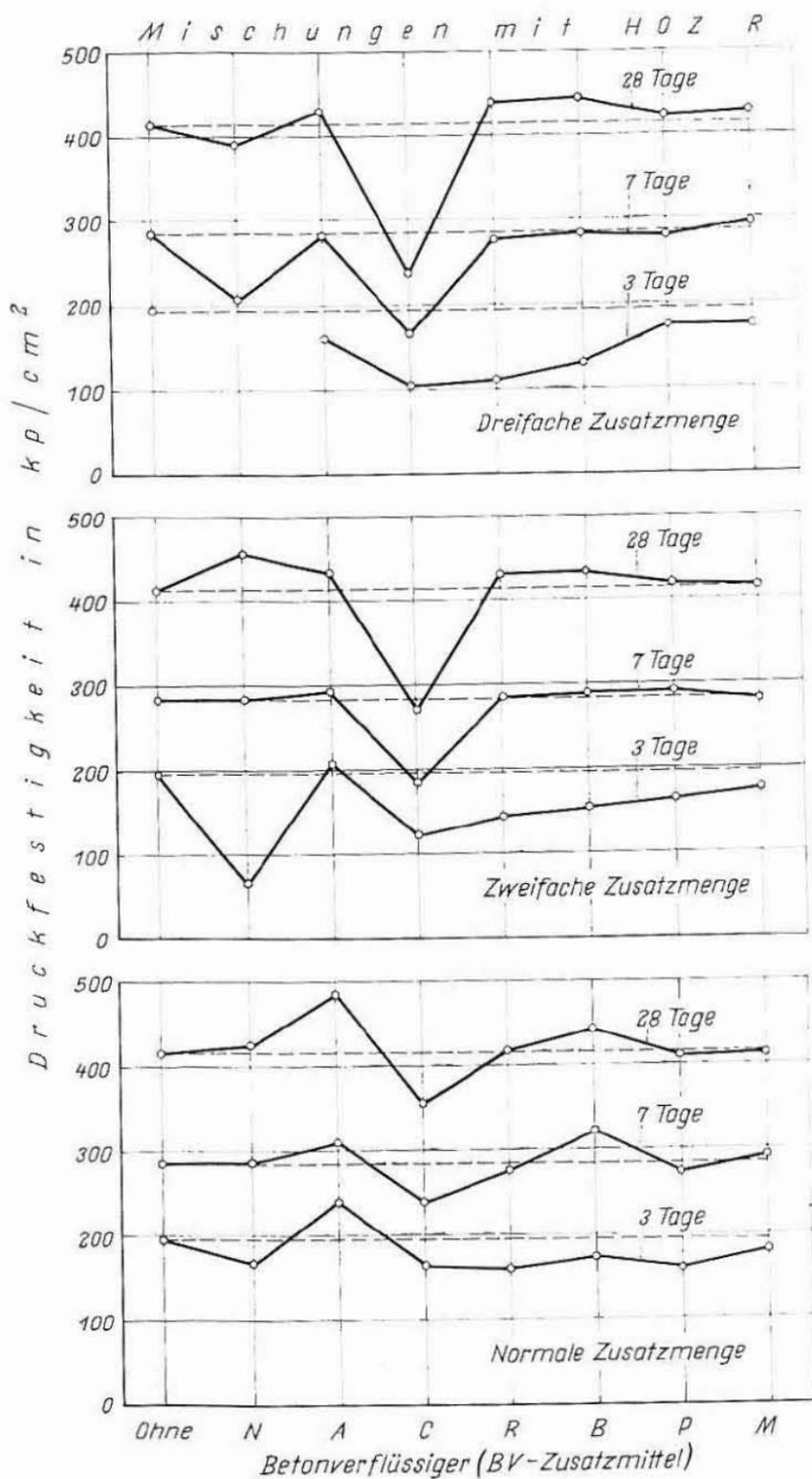


Bild 7 Druckfestigkeit nach 3, 7 und 28 Tagen der Mischungen mit HOZ R und normalen, 2fachen und 3fachen Zusatzmengen von Betonverflüssigern

und deren Zusatzmenge auf den Wasserzementwert und den Luftgehalt der Mörtel mit dem Hochofenzement R meist etwas größer und zum Teil auch anders gerichtet ist als bei den Mörteln mit dem Portlandzement M. Teilt man die Verflüssiger wieder nach ihrer Wirkung wie oben in die 3 Gruppen auf, so ergibt sich nach den Bildern 6 und 7 bzw. Tafel 4 folgendes:

Veränderung der 28 Tage-Biegezugfestigkeit

| Zusatzmenge | Steigerung | geringe Wirkung | Minderung |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|
| normal | + 7 % (A,B) | - 3 % (P,M) | - 8 % (N,C,R) |
| 2fach | — | 0 % (N,A,R,B,M) | - 19 % (C,P) |
| 3fach | + 7 % (M) | - 2 % (A,B,P) | - 19 % (N,C,R) |

Veränderung der 28 Tage-Druckfestigkeit

| Zusatzmenge | Steigerung | geringe Wirkung | Minderung |
|-------------|--------------|-------------------|----------------------------|
| normal | + 12 % (A,B) | + 1 % (N,R,P,M) | - 14 % (C) |
| 2fach | + 10 % (N) | + 5 % (A,R,B,P,M) | - 34 % (C) |
| 3fach | + 6 % (R,B) | + 3 % (A,P,M) | - 25 % (N,C) - 43 % (C) |

Auch bei den Mischungen mit Hochofenzement R ist – wie mit Portlandzement M – festzustellen, daß der eine oder andere Verflüssiger mit der 2fachen oder 3fachen Zusatzmenge zu einer Festigkeitssteigerung führte.

Im ganzen ergibt sich nach dieser Auswertung der Versuchsergebnisse, daß mit *normaler Zusatzmenge* nur einige der Verflüssiger eine hervortretende Steigerung der Festigkeit im Alter von 28 Tagen zur Folge hatten.

Aber auch mit einer 2- und 3fachen Zusatzmenge war mit einigen Verflüssigern ebenfalls noch eine Festigkeitssteigerung verbunden. Im Grunde stellte sich eigentlich immer nur mit dem Verflüssiger C ein bemerkenswerter Festigkeitsrückgang durch eine 2- und 3fache Zusatzmenge ein (-9 bis -43%). Ein Rückgang der 28 Tage-Druckfestigkeit war mit diesem Verflüssiger bei der Mischung aus Hochofenzement allerdings schon bei normaler Zusatzmenge zu beobachten (bis -14%). Eine wesentliche Ursache hierfür dürfte der hohe Luftgehalt sein, der durch den Verflüssiger C in die Mischungen eingetragen wurde.

Als wesentliche Folgerung ergibt sich, daß mit diesen Verflüssigern die 28 Tage-Festigkeiten durch die 2- und 3fachen Zusatzmengen nicht oder nur unwesentlich vermindert wurden, wenn damit keine zu starke Luftporenbildung hervorgerufen wurde. Dabei ist zu beachten, daß die hier mit „normal“ bezeichnete, einfache Zusatzmenge bereits die größte Menge ist, die nach dem Zulassungsbescheid zugesetzt werden darf. Daran mag es auch liegen, daß sich beim einen oder anderen Verflüssiger durch die „normale“ Zusatzmenge zum Teil nur eine mäßige Festigkeitssteigerung oder schon ein Rückgang einstellte. Durch

die bereits an der oberen Grenze liegende „Normalmenge“ wird der Einfluß einer hierauf bezogenen, mehrfachen Zusatzmenge verstärkt herausgekehrt.

Es besteht eine gewisse Berechtigung, anzunehmen, daß die hier mit Mörtel gewonnenen Feststellungen über die Auswirkung einer überhöhten Zusatzmenge sinngemäß auch auf Beton übertragen werden können. (Würde ein Beton diesen Mörtel und ebensoviel Kies 7/30 mm wie Sand enthalten, so wären im Beton rd. 64 Gew.-% Mörtel vorhanden. 1 m³ dieses Betons würde dann aus 310 kg Zement, 190 kg Wasser und 1870 kg Zuschlag bestehen.)

2.4 Einfluß der Zusatzmenge auf die Festigkeitentwicklung

Mit der Wiedergabe der 3-, 7- und 28tägigen Biegezugfestigkeit und Druckfestigkeit in den Bildern 8 und 9 (Mischungen mit dem Portlandzement M) und in den Bildern 10 und 11 (Mischungen mit dem Hochofenzement R) wird der Einfluß der Verflüssiger und der Zusatzmenge auf den Festigkeitsanstieg erkennbar. Ohne auf die Verflüssiger im einzelnen einzugehen, sollen nachstehend generelle Folgerungen gezogen werden.

Bleiben die Mischungen mit dem Verflüssiger C, der zu einer verstärkten Luftporenbildung führte, unberücksichtigt, so ergeben sich im Mittel aus den Mischungen mit den übrigen 6 Verflüssigern gegenüber der 0-Mischung folgende Festigkeitsänderungen:

Mischungen mit Portlandzement

| Zusatzmenge | nach 3 Tagen | nach 7 Tagen | nach 28 Tagen |
|-------------|--------------|--------------|---------------|
| normal | + 7 % | + 3 % | + 4 % |
| 2fach | - 3 % | + 2 % | + 4,5 % |
| 3fach | - 18,5 % | - 8 % | + 1,5 % |

Mischungen mit Hochofenzement

| Zusatzmenge | nach 3 Tagen | nach 7 Tagen | nach 28 Tagen |
|-------------|--------------|--------------|---------------|
| normal | - 8 % | + 3 % | + 2 % |
| 2fach | - 20,5 % | 0 % | + 1,5 % |
| 3fach | - 33 % | - 6,5 % | 0 % |

Allgemein betrachtet, findet man hiernach, daß durch eine 2- und 3fache Zusatzmenge eines Verflüssigers die Festigkeiten im Alter von 3 Tagen zum Teil erheblich kleiner ausfallen als bei normaler Zusatzmenge. Dies fand sich besonders bei dem an sich anfänglich langsamer erhärtenden Hochofenzement. (Er lieferte bereits mit der normalen Zusatzmenge eine kleinere 3 Tage-Festigkeit als die 0-Mischung; siehe dazu die Bemerkung im zweit-letzten Absatz des Abschnitts 2.3.)

Bereits nach 7 Tagen war der vermindernde Einfluß der 2fachen Zusatzmenge bei den Mischungen mit Portlandzement und Hochofenzement im Mittel nur noch unerheblich (+ 2 % bzw. 0 %) und mit der 3fachen Zusatzmenge auf -8 % bzw. -6,5 % zurückgegangen.

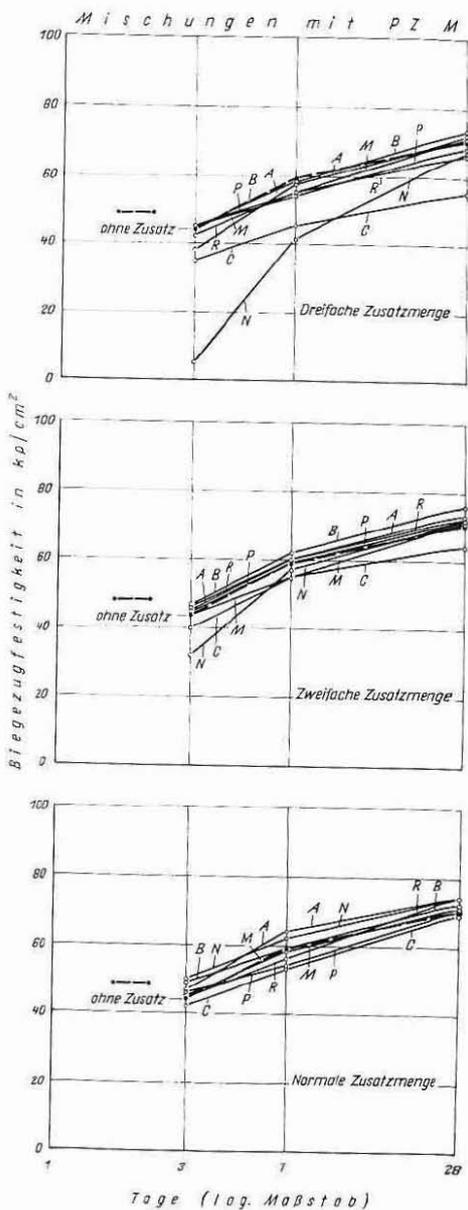


Bild 8 Anstieg der Biegezugfestigkeit von Mischungen mit PZ M und normalen, 2fachen und 3fachen Zusatzmengen von Betonverflüssigern

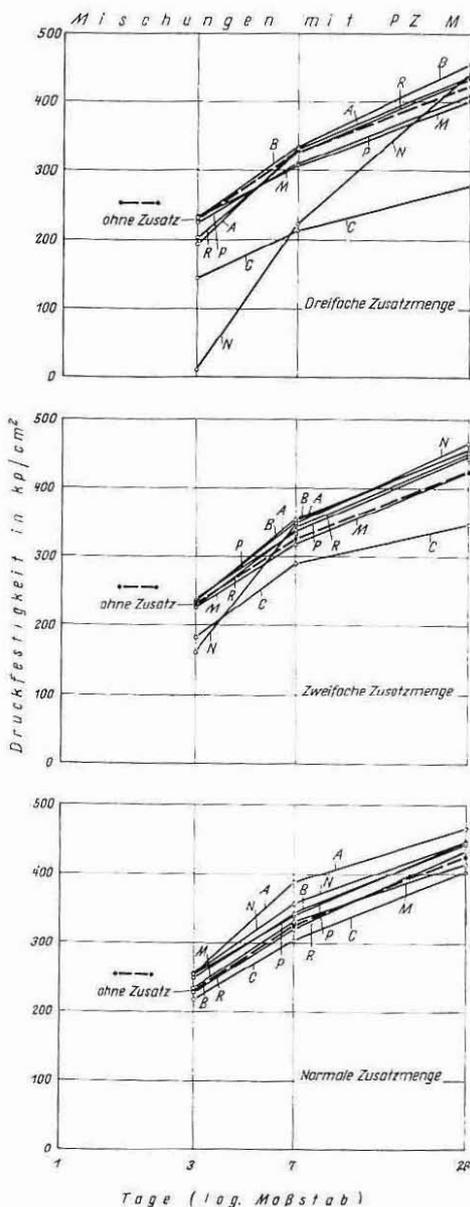


Bild 9 Anstieg der Druckfestigkeit von Mischungen mit PZ M und normalen, 2fachen und 3fachen Zusatzmengen von Betonverflüssigern

Nach 28 Tagen wurde die Festigkeit der Mischungen mit den 6 Verflüssigern (ohne C) bei 2- und 3facher Zusatzmenge im Mittel sogar noch etwas größer erhalten als mit der 0-Mischung (+ 4,5% und + 1,5% bzw. + 1,5% und 0%).

Nach dem allgemein ansteigenden Verlauf der Linienzüge in den Bildern 8 bis 11 ist ferner zu folgern, daß sich die Nacherhärtung in jedem Falle noch fortsetzen würde.

Es muß als praktisch bedeutungsvoll noch herausgehoben werden, daß eine besonders starke Minderung der Frühfestigkeit durch die 3fache Zusatzmenge des Verflüssigers N entstand (nach 3 Tagen im Mittel -96%, nach 7 Tagen -32%). Durch die Nacherhärtung wurde diese Minderung jedoch bis zum Alter von 28 Tagen bereits weitgehend aufgeholt (im Mittel -4,5%). Verglichen mit dem 0-Mörtel, läßt der steilere Verlauf des Linienzugs für die Mischungen mit dem Verflüssiger N (Bilder 8 bis 11, oberer Teil) außerdem erwarten, daß mit der Zeit sicher die Festigkeiten der 0-Mischung erreicht werden würden.

Verallgemeinert kann man auch folgern, daß ein anfänglich besonders starkes Zurückbleiben der Festigkeiten (wie hier durch die 3fache Zusatzmenge des Verflüssigers N) nicht ohne weiteres auch eine niedere Endfestigkeit zur Folge haben muß.

In der Praxis soll ein durch zu große Zusatzmenge in der Erhärtung gestörter Beton lange feucht gehalten werden, weil dann die Wahrscheinlichkeit besteht (siehe auch unter 3.), daß die geforderte Festigkeit doch noch erreicht wird, vorausgesetzt, daß die Festigkeitsminderung nicht weitgehend durch eine zu starke, luftporenbildende Wirkung des Verflüssigers hervorgerufen wurde und deshalb, wie mit dem Verflüssiger C, eine dauernde Erniedrigung der Festigkeit bestehen bleibt.

3. Untersuchungen mit verflüssigenden Verzögerern

In diesem Zusammenhang sollen ähnliche vor kurzem bekannt gewordene, sehr umfassende, amerikanische Untersuchungen mit 25 verflüssigenden Verzögerern angeführt werden [4]. Mit einem Teil von ihnen wurde der Einfluß einer 4fachen Zusatzmenge auf die Festigkeitsentwicklung festgestellt.

Die benutzten Verzögerer waren Lignosulfonate, Polyoxycarbonsäuren und zuckerartige Kohlenwasserstoffe. Die Lignosulfonate, meistens aus Sulfitablauge, lagen als Ammonium-, Calcium- oder Natriumsalze vor.

Zu den Untersuchungen wurde schwachplastischer Beton mit Zuschlag von 0 ... 25 mm und gleicher Konsistenz (Setzmaß 5 ... 7,5 cm) benutzt. Mit einem LP-Zusatzmittel (neutralisiertes Vinsol Resin) wurde ein Luftgehalt von 5 ... 6% eingestellt. Der Wasserzementwert der 0-Mischung (Reihe 1) war 0,52, der Zementgehalt 335 kg/m³.

3.1 Normale Zusatzmenge

Durch die verflüssigende Wirkung der Verzögerer, die in solcher Menge zugesetzt wurden, daß eine Verzögerung von 2¹/₂ bis 3 h entstand, lag für gleiche Konsistenz und gleichen Zementgehalt (Versuchsreihe 2) der Wasserzementwert mit den Verzögerern

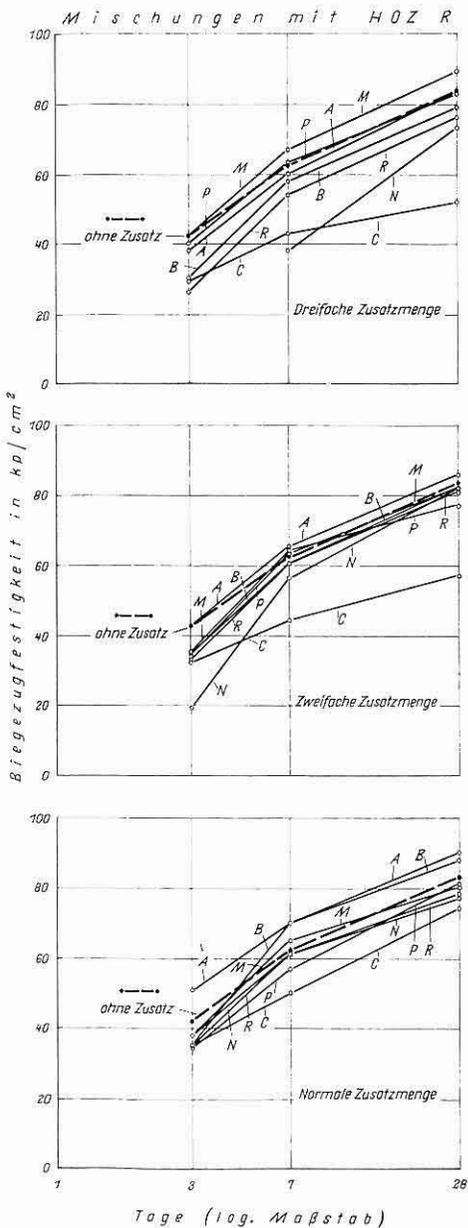


Bild 10 Anstieg der Biegezugfestigkeit von Mischungen mit HOZ R und normalen, 2fachen und 3fachen Zusatzmengen von Betonverflüssigern

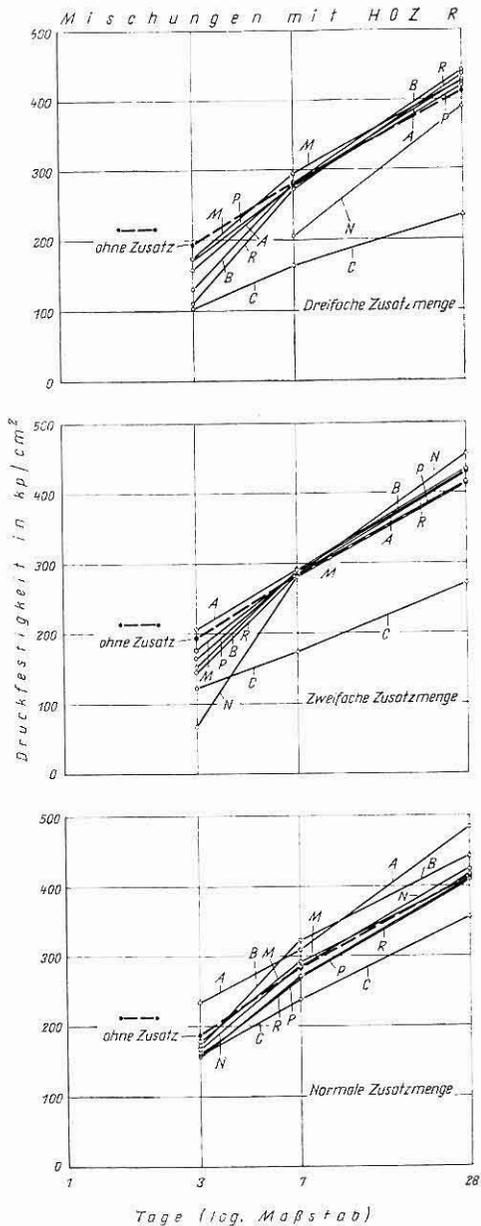


Bild 11 Anstieg der Druckfestigkeit von Mischungen mit HOZ R und normalen, 2fachen und 3fachen Zusatzmengen von Betonverflüssigern

zwischen 0,51 und 0,45 (0-Mischung 0,52). Durch die wassereinsparende Wirkung wurde der Wasserzementwert also mehr oder weniger stark gesenkt.

Bei Versuchsreihe 3 wurde dagegen der gleiche Wasserzementwert wie bei der 0-Mischung (0,52) eingehalten, so daß für die gleiche Konsistenz ein kleinerer Zementgehalt (320, 305, 295 kg/m³) gegenüber der 0-Mischung möglich war.

Untersucht wurden mit Zylindern 15/30 cm, Prismen 15 cm x 15 cm x 53 cm und 7,5 cm x 10 cm x 40 cm die Druck- und

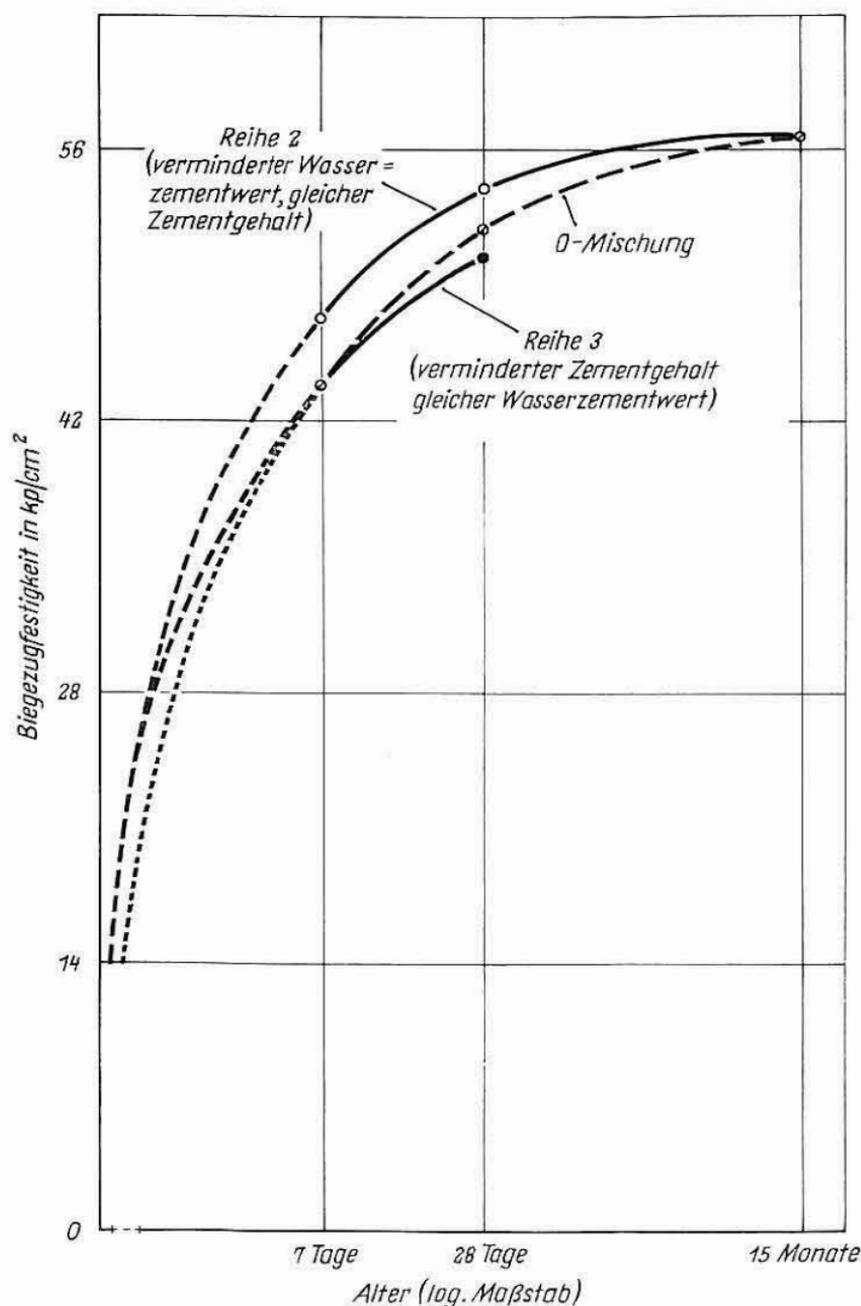


Bild 12 Biegezugfestigkeit der Betone mit Verzögerern (Mittelwerte der Versuche mit 25 Verzögerern)

Biegezugfestigkeit, der statische und dynamische E-Modul, der Frostwiderstand, die Dichte, die Wasseraufnahme, die Längenänderungen und die Wärmeentwicklung sowie der Einfluß eines Nachrüttelns. Es würde zu weit führen, alle Ergebnisse wiederzugeben. Hier soll im wesentlichen nur auf den Einfluß der Verzögerer auf die Festigkeit eingegangen werden. (Die anderen Eigenschaften lassen demgegenüber nichts Ungewöhnliches erkennen.)

Biegeprüfungen fanden nach 7 und 28 Tagen, zum Teil auch nach 15 Monaten, Druckprüfungen nach 3, 7, 28 und 365 Tagen statt. Die Proben hierfür lagerten dauernd in feuchtigkeitsgesättigter Luft.

Bild 12 gibt die *Biegezugfestigkeit* und Bild 13 die *Druckfestigkeit* als mittlere Festigkeit aus allen Mischungen mit Verzögerern im Vergleich mit der 0-Mischung wieder.

Die *Biegezugfestigkeit* der Mischungen mit den Verzögerern fiel bei gleichem Zementgehalt (Reihe 2) im Alter von 7 und 28 Tagen um 8% bzw. 4% größer aus als bei der 0-Mischung (Bild 12). Wurde, wie bei Reihe 3, der Wasserzementwert gleich gehalten, so unterschieden sich die Festigkeiten im Vergleich mit der 0-Mischung nur wenig (+ 1% bzw. -3%).

Höhere *Druckfestigkeiten* (Bild 13) als bei der 0-Mischung entstanden mit normaler Zusatzmenge sowohl bei der Reihe 2 mit dem verminderten Wasserzementwert und dem gleichen Zementgehalt als auch bei der Reihe 3 mit dem verminderten Zementgehalt und dem gleichen Wasserzementwert, sofern der Luftgehalt durch die Verzögerer nicht übermäßig (hier über 8%) erhöht wurde. Dies war mit einem Verzögerer bei der Reihe 2 und mit zwei Verzögerern bei der Reihe 3 der Fall.

Durch die den verflüssigenden Verzögerern zuzuschreibende Wassereinsparung (Reihe 2) und vermutlich auch durch die, wie bei niedriger Temperatur anfänglich verlangsamte Hydratation [5], lag trotz Einbeziehung der luftporenrreichen Mischung die Druckfestigkeit im Alter von 3 Tagen im Mittel um 29% über jener der 0-Mischung. Nach 7 Tagen war die Druckfestigkeit um 22%, nach 28 Tagen um 15% und nach 1 Jahr um 17% größer erhalten worden. Bei Reihe 3 mit gleichem Wasserzementwert und kleinerem Zementgehalt wurde die Druckfestigkeit durch die Verzögerer trotz der zwei luftporenrreichen Mischungen im Mittel nach 3, 7 und 28 Tagen und nach 1 Jahr um rd. 7% (10%, 7%, 5% und 6%) größer erhalten.

Ein *Nachrütteln*, das bei der 0-Mischung 3 h und bei den Reihen 2 und 3 erst 5 $\frac{1}{2}$ h nach dem Herstellen erfolgte, steigerte die 28 Tage-Druckfestigkeit bei der 0-Mischung um 11%, bei Reihe 2 im Mittel um 4% und bei Reihe 3 im Mittel um 7%. Eine Änderung der Biegezugfestigkeit trat durch das Nachrütteln im Mittel praktisch nicht hervor. (Dies wird auf die Schwierigkeit zurückgeführt, einen Balken mit einem Querschnitt 15 cm x 15 cm mit einem Innenrüttler nachzuverdichten, wie es hier geschehen ist.)

3.2 Überhöhte Zusatzmenge

Mit 10 der Verzögerer wurde der Einfluß einer 4fachen Zusatzmenge untersucht. Den Betonen mit den Verzögerern Nr. 3, 7

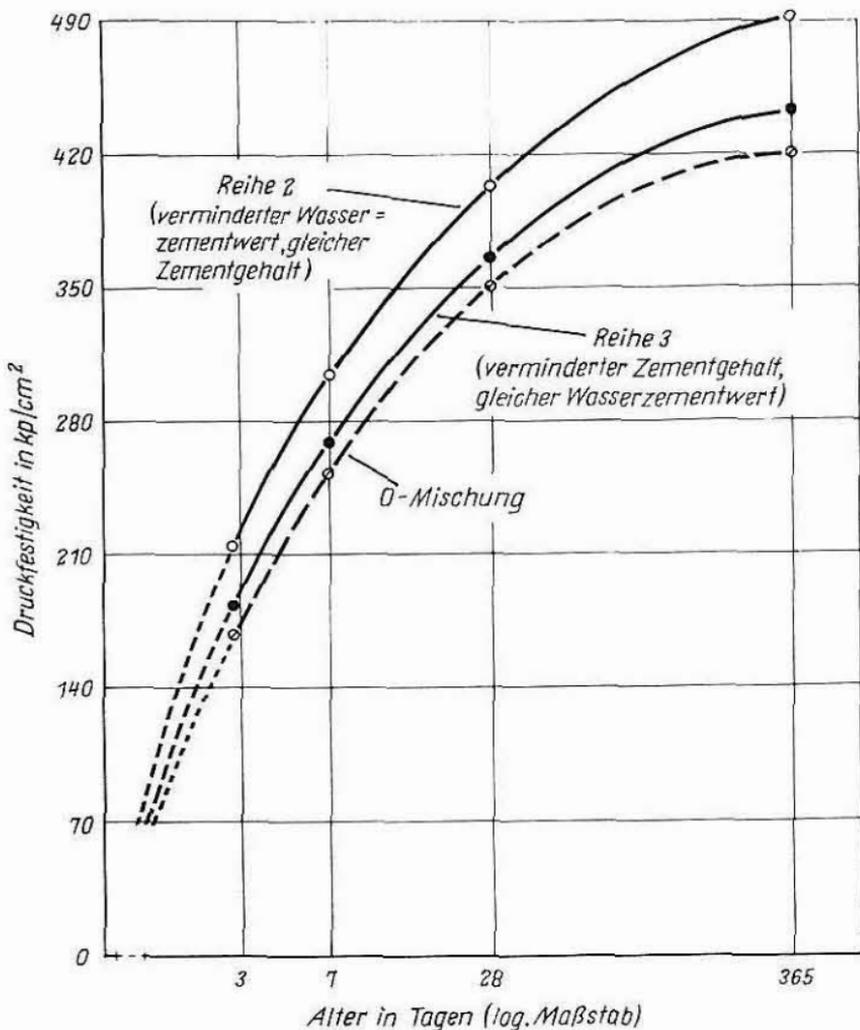


Bild 13 Druckfestigkeit der Betone mit Verzögerern (Mittelwerte der Versuche mit 25 Verzögerern)

und 11 wurde kein LP-Zusatzmittel zugegeben, da die Betone ohnedies einen Luftgehalt von über 8% erreichten. Der Luftgehalt der übrigen Betone, einschließlich der 0-Mischung, lag zwischen 4,8 und 5,7%.

Ein festgelegter, mit dem Proctorstab bestimmter Versteifungsgrad stellte sich durch die 4fache Zusatzmenge mit den verschiedenen Verzögerern erst nach einem 2- bis 20mal größeren Zeitraum ein.

Bild 14 zeigt die Entwicklung der Druckfestigkeit nach 7 und 28 Tagen bei 4facher Zusatzmenge. Mit den 3 Verzögerern Nr. 1, 2 und 9 wurden trotz 4facher Zusatzmenge schon nach 7 Tagen höhere Druckfestigkeiten als beim 0-Beton erhalten, ebenso nach 28 Tagen mit den 6 Verzögerern Nr. 1, 2, 4, 5, 6 und 9. Drei der Betone mit den Verzögerern Nr. 3, 7 und 11 wiesen Luftgehalte von über 8% auf, wodurch auch die im Alter von 28 Tagen verminderte Druckfestigkeit mit erklärbar wird.

Im ganzen kann nach dem stark ansteigenden Kurvenverlauf in Bild 14 gefolgert werden, daß bei feuchter Nachbehandlung auch ein anfänglich sehr starkes Zurückbleiben der Druckfestig-

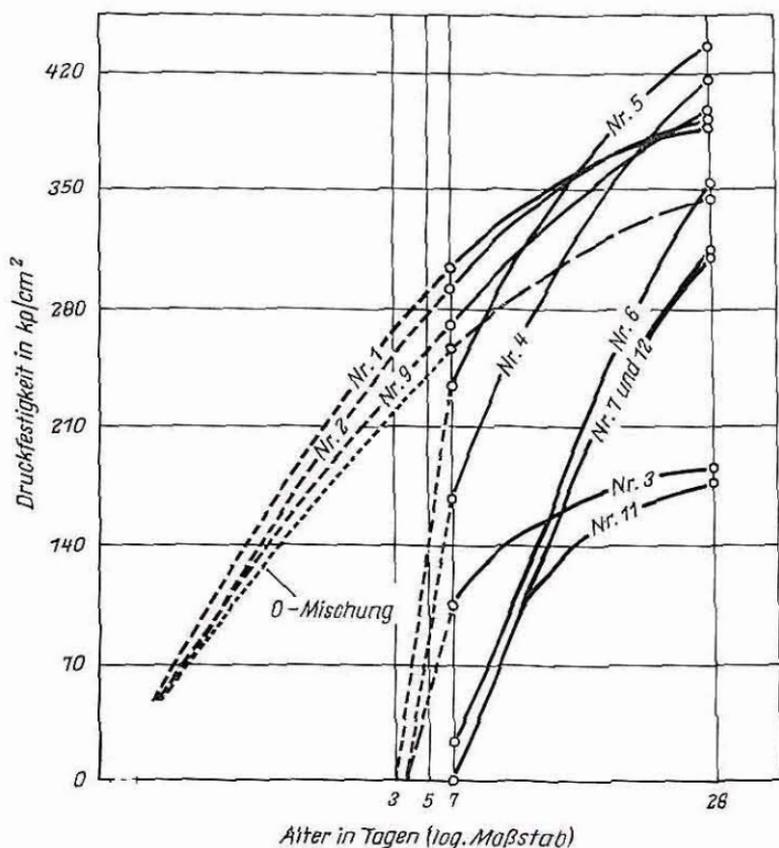


Bild 14 Einfluß einer 4fachen Zusatzmenge von 10 Verzögerern auf die Druckfestigkeit der Betone

keit später aufgeholt werden kann, wenn die Verzögerer nicht stark luftporenbildend wirken und wenn der steile Anstieg der Erhärtung dies, wie bei den Mischungen mit den Verzögerern Nr. 7 und 12, erkennen läßt.

Diese Feststellungen über die Wirkung einer übermäßigen Zusatzmenge stehen in gutem Einklang mit denen, die bei unseren vorausgehend beschriebenen Versuchen erhalten wurden.

4. Einfluß verschiedener Zementlieferungen auf die Wirkung eines Verflüssigers

Bei den in Abschnitt 2 aufgeführten Untersuchungen fand sich, daß die Wirkung eines Verflüssigers von Zement zu Zement verschieden sein kann. Daß ein Verflüssiger unter Umständen auch auf verschiedene Lieferungen des gleichen Zements verschieden anspricht, zeigte ein kürzlich in den USA veröffentlichter Fall mit Beton, dem ein Verflüssiger auf Lignosulfonat-Grundlage zugesetzt worden war [6]:

Bei dem längere Zeit ohne Störung verlaufenden Betonieren einer Tunnelauskleidung lösten sich zwischendurch Partien in der Firse, wenn die Schalung wie sonst üblich nach 10 h entfernt wurde. Das Erstarren war stark verzögert worden. Durch che-

mische Analyse wurde festgestellt, daß die Zementlieferungen für den Beton der Tunnelauskleidung sich nur im SO_3 -Gehalt (Gipsgehalt) unterschieden. Als Grund für die zu starke Verzögerung ergab sich die Verminderung des SO_3 -Gehalts des Zements von 2,0% auf etwa 1,6%. (Der verwendete Portlandzement, Type II, wies einen mäßigen C_3A -Gehalt auf.) Der Zement, der zu diesen Störungen führte, wurde beim Laboratoriumsversuch mit zusätzlichem Gips versetzt, so daß wieder ein SO_3 -Gehalt von 2% und mehr vorhanden war. Dadurch wurde das Erstarren auch bei Zusatz des Verflüssigers wieder wie früher normal und selbst mit einer 2fachen Zusatzmenge nicht bemerkenswert verzögert.

5. Zusammenfassung

5.1 Bei Verwendung von Betonverflüssigern (BV) soll die zweckmäßige Zusatzmenge von Fall zu Fall durch eine Eignungsprüfung bestimmt werden, weil die Wirkung eines Verflüssigers nicht nur von der Zusatzmenge, sondern auch von dem jeweiligen Zement und anderen Eigenschaften der Mischung abhängt.

Erhärtungsstörungen, die in der Praxis an irgendeiner Stelle eines Bauteils aufgetreten sind, wurden auf eine zu große, fehlerhafte Zusatzmenge eines Verflüssigers zurückgeführt. Systematische Untersuchungen darüber, ob und inwieweit der Beton in einem solchen Fall noch nacherhärtet und welche Endfestigkeit er erreicht, waren nicht bekannt.

5.2 Als Beitrag zu dieser Frage sind Untersuchungen mit 7 auf dem Markt befindlichen, amtlich zugelassenen Verflüssigern angestellt worden. Auf gleiche Konsistenz abgestimmte, weiche Prüfmörtel mit Portlandzement und mit Hochofenzement erhielten die nach dem amtlichen Zulassungsbescheid noch erlaubte größte Zusatzmenge („normale“ Menge), ferner die 2- und 3fache Menge. Prüfungen auf Biegezug- und Druckfestigkeit fanden nach 3, 7 und 28 Tagen statt.

5.3 Durch die Verflüssiger konnte gegenüber der 0-Mischung (ohne Verflüssiger) der Wasseranspruch zur Erlangung gleicher Konsistenz immer etwas gesenkt werden, und zwar mit der 2fachen Zusatzmenge im Mittel noch etwas mehr als mit der normalen. Die Wassereinsparung durch die 3fache Zusatzmenge war demgegenüber nur noch gering (mittlerer Wasserzementwert aus allen Mischungen: 0-Mischung 0,60, mit normaler Zusatzmenge 0,57, mit 2facher Zusatzmenge 0,55, mit 3facher Zusatzmenge 0,54).

5.4 Durch einige Verflüssiger wurde der Luftgehalt, mit der Zusatzmenge ansteigend, erhöht. Je nach Verflüssiger und Zement nahm der Luftgehalt gegenüber jenem der 0-Mischung (2,0%) bei normaler Zusatzmenge höchstens um 2,5%, bei 2facher höchstens um 3% und bei 3facher höchstens um 4,5% zu. Doch fand sich unter den 7 geprüften Verflüssigern einer, der sehr stark luftporenbildend wirkte und z. B. den Luftgehalt der Mischung mit Hochofenzement bei 2facher Zusatzmenge auf 11% und bei 3facher Zusatzmenge auf 16% erhöhte.

5.5 Die Festigkeiten fielen im Alter von 3 Tagen durch die 2- und 3fache Zusatzmenge zum Teil erheblich kleiner aus als

bei der 0-Mischung, insbesondere bei den Mischungen mit dem Hochofenzement.

5.6 Bereits nach 7 Tagen war der festigkeitsmindernde Einfluß der überhöhten Zusatzmengen im ganzen nicht mehr so ausgeprägt.

5.7 Die anfänglich durch die 2- und 3fache Zusatzmenge verzögerte Festigkeitsentwicklung holte bis zum Alter von 28 Tagen sehr stark auf, so daß im Mittel nach 28 Tagen etwa die gleiche Festigkeit erreicht wurde wie bei der 0-Mischung. Selbst bei 2facher und 3facher Zusatzmenge wurde in einigen Fällen im Alter von 28 Tagen eine Steigerung der Festigkeit um 10 und 8% (Portlandzement) bzw. 8 und 6% (Hochofenzement) erhalten. Wesentlich ist jedoch dabei, daß der gleiche Verflüssiger nicht immer bei jeder Zusatzmenge zu einer Steigerung führte.

Eine Ausnahme bildeten die Mischungen mit dem stark luftporenbildenden Verflüssiger; mit ihm blieben auch die 28 Tage-Festigkeitswerte, besonders bei der 2- und 3fachen Zusatzmenge, wesentlich zurück.

Auch für die Zeit nach 28 Tagen zeichnete sich oft noch eine starke Nacherhärtung ab.

5.8 Allgemein kann gefolgert werden, daß auch ein anfänglich besonders starkes Zurückbleiben der Festigkeit durch eine übermäßige Zugabe eines Verflüssigers nicht auch eine niedere Endfestigkeit zur Folge haben muß, vorausgesetzt, daß der Zusatz nicht stark luftporenbildend wirkt und dadurch die Festigkeit an sich nachteilig beeinflusst.

Zu einer guten Nacherhärtung einer anfänglich in der Festigkeitsentwicklung stark verzögerten Mischung ist eine lange Feuchtlagerung nötig.

5.9 Die Feststellungen stimmen mit denen von kürzlich veröffentlichten amerikanischen Untersuchungen über den Einfluß eines stark überhöhten Zusatzes von verflüssigenden Verzögerern gut überein.

SCHRIFTTUM:

- [1] Prüfrichtlinien für Betonzusatzmittel (Fassung 1958 mit Änderungen und Erläuterungen 1960). Bundesbaublatt 9 (1960) H. 9, S. 514/516 und S. 538/542, Betonstein-Zeitung 26 (1960) H. 10, S. 424/433.
- [2] Walz, K.: Betonzusatzmittel. Bau und Bauindustrie 5 (1952) H. 10, S. 221/223; H. 11, S. 245/249; H. 12, S. 270/273; H. 13, S. 298/299.
- [3] Schäffler, H.: Einflüsse von Zusatzmitteln mit grenzflächenaktiver Wirkung auf die Eigenschaften von Beton und Mörtel. Bauwirtschaft 15 (1961) H. 9, S. 219/224.
- [4] Grieb, W. E., O. Werner and D. O. Woolf: Water reducing retarders for concrete — physical tests —. Public Roads 31 (1961) No. 6, S. 136/154.
- [5] Walz, K., und J. Bonzel: Festigkeitsentwicklung verschiedener Zemente bei niedriger Temperatur, beton 11 (1961) H. 1, S. 35/48.
- [6] Tuthill, L. H., R. F. Adams, S. N. Baily and R. W. Smith: A case of abnormally slow hardening concrete for tunnel lining. Proc. Amer. Concr. Inst. 57 (1960/61) S. 1091/1109.