

Beziehung zwischen Wasserzementwert, Normfestigkeit des Zements (DIN 1164, Juni 1970) und Betondruckfestigkeit

Von Kurt Walz, Düsseldorf

Übersicht

Nach der neuen Zementnorm DIN 1164 (Juni 1970) werden die Normzemente mit einem etwas anderen Verfahren als zuvor geprüft. Dieses Prüfverfahren entspricht der ISO-Recommendation R 679. Man erhält damit für den gleichen Zement im allgemeinen eine etwas höhere Normdruckfestigkeit.

Die vor etwa 15 Jahren veröffentlichten Diagramme für die Beziehung zwischen dem Wasserzementwert des Betons, der Normdruckfestigkeit des Zements und der Würfeldruckfestigkeit des Betons im Alter von 28 Tagen wurden daher neu aufgestellt. Mit ihnen kann wieder die Zusammensetzung einer Betonmischung entworfen oder die zu erwartende Betondruckfestigkeit abgeschätzt werden.

Als Grundlage für die Diagramme dienen die Prüfergebnisse von rd. 830 Betonmischungen, die im Laboratorium seit 1963 hergestellt wurden.

1. Allgemeines

Für den Entwurf einer Betonmischung, mit der eine geforderte Würfeldruckfestigkeit nach 28 Tagen durch Herstellen, Lagern und Prüfen entsprechend DIN 1048 erreicht werden soll, werden häufig Formeln oder Diagramme benutzt. Sie beruhen meist auf einer Beziehung zwischen der Druckfestigkeit des Betons, der Normfestigkeit des zu verwendenden Zements und dem Wasserzementwert des Frischbetons. Bild 1 gibt ein solches Diagramm schematisch wieder. Man erkennt die Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit des Betons β_D vom Wasserzementwert w (d. i. das Verhältnis des Gewichts des gesamten Wassers W einschließlich Oberflächenfeuchtigkeit des Zuschlags zum Zementgewicht Z in 1 m^3 des praktisch vollständig verdichteten Frischbetons). Unter sonst gleichen Verhältnissen fällt die Betondruckfestigkeit mit zunehmendem Wasserzementwert nach einer stetigen Kurve ab. Die Druckfestigkeit ist also um so kleiner zu erwarten, je mehr Wasser der Zementleim enthält, d. h. je mehr er verdünnt ist (Wasserzementwert-Gesetz).

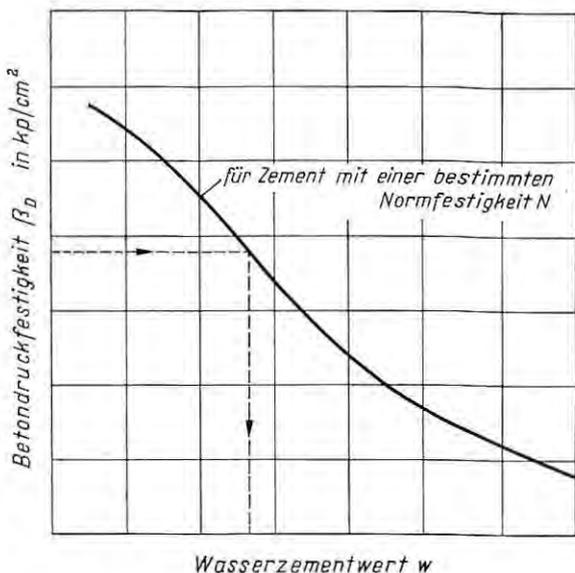


Bild 1 Beziehung (schematisch) zwischen Wasserzementwert w , Normdruckfestigkeit des Zements N und Betondruckfestigkeit β_D

Der einer Würfeldruckfestigkeit β_D entsprechende Wasserzementwert w kann dem Diagramm entnommen werden. Zur Errechnung des erforderlichen Zementgehalts Z der Mischung wird der Wassergehalt W abgeschätzt. Dazu benutzt man Erfahrungswerte, Nomogramme oder Rechenwerte, die die vorzusehende Konsistenz des Frischbetons und die Zusammensetzung des Zuschlaggemisches berücksichtigen. Der Zementgehalt Z errechnet sich dann zu $Z = W/w$. Mit der Stoffraumrechnung bestimmt man schließlich den Zuschlaganteil G , so daß mit Z , W und G die Zusammensetzung des Betons in etwa festgelegt ist ¹⁾.

Aus einem solchen Diagramm kann umgekehrt auch die zu erwartende Würfeldruckfestigkeit für eine Betonmischung abgeschätzt werden, wenn ihr Wasserzementwert und die Normdruckfestigkeit des Zements bekannt sind.

Einem häufig benutzten Diagramm, siehe z. B. [1], liegt die nach der alten Fassung der DIN 1164 (letzte Ausgabe Dezember 1958) ermittelte Normdruckfestigkeit des Zements nach 28 Tagen zugrunde; der Prüfmörtel wies einen Wasserzementwert von 0,60 auf. Nach der Neufassung der DIN 1164, Ausgabe Juni 1970, sind

¹⁾ Weiteres hierzu, insbesondere unter Berücksichtigung der DIN 1045 (1971), siehe Walz, K.: Herstellung von Beton nach DIN 1045. Beton-Verlag, Düsseldorf 1971.

die Zemente nunmehr in andere Festigkeitsklassen mit unterer und oberer Begrenzung der Normdruckfestigkeit nach 28 Tagen eingeteilt. Ihre Normfestigkeit wird nach Blatt 7 der Norm zudem mit einem geänderten Prüfverfahren, insbesondere mit dem kleineren Wasserzementwert von 0,50, bestimmt. Diese Prüfung entspricht der Zementprüfung nach der „RILEM-Cembureau-Method“ (ISO Recommendation R 679: Method of testing strength of cements; März 1968).

Da sich das Wasserzementwert-Gesetz auch beim Prüfmörtel auswirkt und somit die Festigkeit des Prüfmörtels mit abnehmendem Wasserzementwert zunimmt, wird mit der Prüfung nach der neuen Zementnorm für einen bestimmten Zement eine andere, manchmal etwas kleinere oder gleiche, in der Regel jedoch eine etwas größere Normdruckfestigkeit erhalten als mit dem früheren Prüfverfahren; siehe auch [2]. Dies bedeutet lediglich, daß jetzt die spezifische Festigkeit eines Zements (Normfestigkeit) mit einem etwas anderen Maß gekennzeichnet wird. Ferner neigt dieser Prüfmörtel mit dem kleineren Wasserzementwert und seinem gemischtkörnigeren Sand auch mit gröber gemahlene Zementen weniger zum Wasserabsondern als der bisher benutzte. Bei starkem Wasserabsondern konnte der bisherige Prüfmörtel im Extremfall anstatt mit einem Wasserzementwert von 0,60 mit einem solchen von nur 0,50 erhärten; er wies damit eine höhere Normfestigkeit aus, die sich als Druckfestigkeit oder „Leistung“ des Zements im Beton nicht ohne weiteres ebenso auszuwirken brauchte. Dies war der Fall, wenn der Beton ohne entsprechendes Wasserabsondern erhärtete, z. B. wenn er hohen Mehlkorngelinhalt aufwies oder auch bestimmte Zusatzmittel enthielt. Die „Leistung“ der Zemente wird also durch das neue Prüfverfahren einheitlicher und zutreffender bestimmt.

Aus alledem folgt, daß bei gleichen Wasserzementwerten w eines Betons sich mit dem neuen Zement-Prüfverfahren nunmehr auch das Verhältnis zwischen der Betondruckfestigkeit (β_{D28} ²⁾ und der Normdruckfestigkeit N_{28} des Zements ändert. Daher wurde an Stelle des früheren Diagramms [1] ein neues Diagramm aufgestellt. Es entstand durch Auswerten von rd. 830 Betonmischungen mit Zementen, deren Normdruckfestigkeit N_{28} nach DIN 1164, Ausgabe Juni 1970, ermittelt wurde.

2. Beziehung zwischen w , N_{28} und β_{D28}

2.1 Unterlagen

Für die Aufstellung der alten Diagramme dienten Mischungen aus Betonversuchen des Otto-Graf-Instituts der Universität Stuttgart bis etwa zum Jahre 1955. Dem neuen Diagramm liegen rd. 290

²⁾ Die hier im Diagramm ermittelte und anschließend durch die Eignungsprüfung zu belegende Würfelldruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen wurde mit β_{D28} bezeichnet, um eine Verwechslung mit den in Tabelle 1 der DIN 1045 (1971) bei der Güteprüfung verwendeten Bezeichnungen zu vermeiden. Dort sind β_{w28} die Mindestdruckfestigkeit eines jeden Würfels bzw. β_{wM} die Mindestdruckfestigkeit des Mittelwertes jeder Würfelserie aus 3 Würfeln, die verschiedenen Mischungen entstammen.

Mischungen zugrunde, die in der Betontechnischen Abteilung des Forschungsinstituts der Zementindustrie in Düsseldorf hergestellt wurden. Sie gehen bis auf das Jahr 1963 zurück, von dem ab alle Zemente auch nach dem inzwischen genormten neuen Verfahren geprüft worden sind. Weiter sind Versuchsergebnisse eines Teils der betontechnologischen Arbeiten einbezogen worden, die von Studierenden an Ingenieurschulen mit Unterstützung des Vereins Deutscher Zementwerke seit 1963 durchgeführt wurden (rd. 540 Versuchsmischungen).

Die Konsistenz der Mischungen überdeckte den Bereich der DIN 1045 (1971).

Der Zuschlag, überwiegend Kiessande mit einem Größtkorn um 30 mm, entstammte verschiedenen Gegenden der Bundesrepublik. Die verwendeten 78 Portland-, Eisenportland- und Hochofenzemente unterschieden sich nach Herkunft, Lieferzeitpunkt und Festigkeitsklasse; dabei überwogen die Portlandzemente. Die Normfestigkeit N_{28} wurde bei der Prüfung zwischen rd. 360 und 700 kp/cm² festgestellt.

Der Wasserzementwert der Betonmischungen lag zwischen rd. 0,35 und 1,20, vorwiegend jedoch zwischen 0,40 und 0,80. (Die Anzahl der Mischungen, die für die einzelnen Wasserzementwerte zur Verfügung standen, ist im oberen Teil von Bild 2, Abschnitt 2.2, eingetragen.) Der Zementgehalt reichte von rd. 150 bis 500 kg/m³.

Die Sieblinien der Zuschlaggemische verliefen stetig und angeglichen an die in Bild 2 der DIN 1045 (alt) aufgeführten Grenzsieblinien D, E und F oder zwischen diesen, häufig im praktisch gebräuchlichsten Bereich zwischen D/E bis E/F.

Die Betondruckfestigkeit β_{D28} ist das Mittel aus 3 Würfeln mit 20 cm Kantenlänge aus einer Mischung. Die Würfel sind nach DIN 1048 hergestellt (praktisch vollständig verdichtet) und geprüft worden. Sie lagerten 7 Tage feucht und dann in Raumluft. Im Forschungsinstitut betrug die Temperatur des Lagerraums gleichmäßig $20^\circ\text{C} \pm 2$ grad und die relative Luftfeuchtigkeit während der Luftlagerung $65\% \pm 2\%$. Für die in den Ingenieurschulen durchgeführten Untersuchungen kann angenommen werden, daß die in DIN 1048 vorgeschriebene Raumtemperatur zwischen 15 und 22°C bei der Lagerung eingehalten worden ist.

Die ermittelten Würfeldruckfestigkeiten β_{D28} lagen mit ihren Extremwerten zwischen rd. 110 und 730 kp/cm², in der großen Masse zwischen rd. 200 und 550 kp/cm².

2.2 Aufstellen des Diagramms

Alle Daten der Mischungen wurden auf Lochkarten übertragen³⁾ und für jede Mischung das Verhältnis β_{D28}/N_{28} gebildet. Vom elek-

³⁾ Bei der umfangreichen Auswertung hat mich Herr Dipl.-Ing. Dartsch, Mitarbeiter in der Betontechnischen Abteilung des Forschungsinstituts, unterstützt. — Für Anregungen und die Durchsicht des Manuskripts danke ich den Herren Dr.-Ing. Bonzel, Professor Locher und Dr.-Ing. Wischers.

Anzahl der benutzten Mischungen (828)

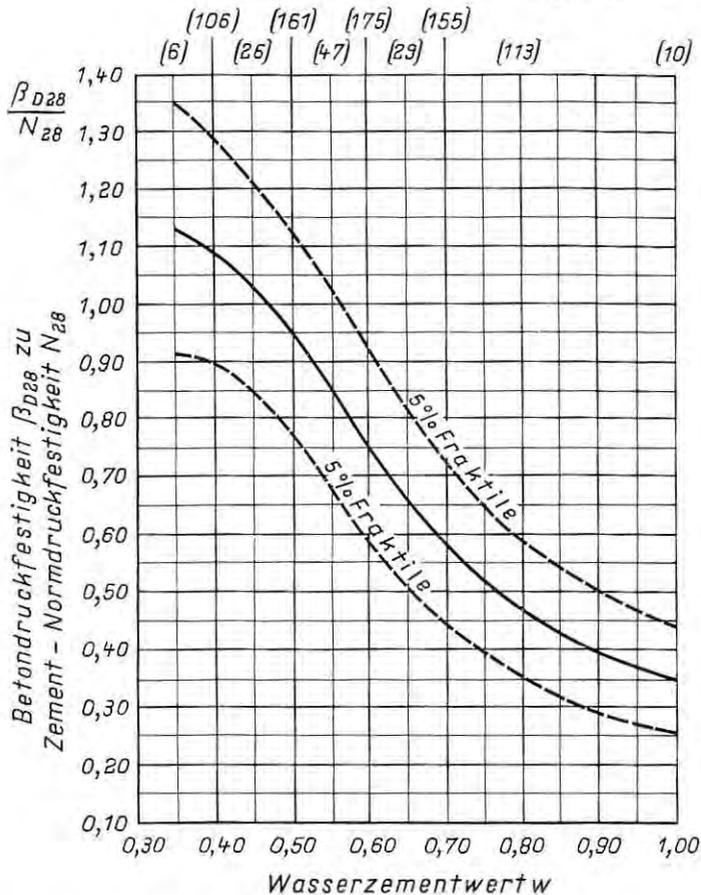


Bild 2 Beziehung zwischen Wasserzementwert w , Normdruckfestigkeit des Zements N_{28} (DIN 1164, Ausgabe Juni 1970) und Würfeldruckfestigkeit β_{D28} des Betons (empirisch ermittelte Beziehung nach rd. 830 im Laboratorium hergestellten Betonmischungen)

tronischen Rechner wurden dann zu den in Stufen von 0,05 zusammengezogenen Wasserzementwerten der zugehörige Mittelwert des Verhältnisses β_{D28}/N_{28} und die Standardabweichung s festgestellt. Für die Wasserzementwerte 0,40, 0,50, 0,60, 0,70 und 0,80 standen zwischen 106 und 175 Einzelwerte β_{D28}/N_{28} zur Verfügung, für dazwischenliegende 26 bis 47. Aus Mittelwert und Standardabweichung ist die obere und untere 5%-Fraktile errechnet worden.

Die Mittelwerte für β_{D28}/N_{28} und die 5%-Fraktile wurden in einem Diagramm als Ordinaten über den Wasserzementwerten

(Abszisse) aufgetragen; sie bildeten die Bezugspunkte für ausgleichende Kurven. Das so entstandene Diagramm ist in Bild 2 wiedergegeben.

Die aus den ausgleichenden Kurven errechnete Standardabweichung s lag je nach der Höhe der Druckfestigkeit β_{D28} (abhängig von w und N_{28}) zwischen 24 und 80 kp/cm^2 . Es ergaben sich mit der Druckfestigkeit zunehmend größere Standardabweichungen, die allerdings nicht in gleichem Maße wie die Festigkeit anstiegen, so daß der Variationskoeffizient v mit zunehmender Druckfestigkeit β_{D28} von 16 % auf rd. 11 % abnahm. Im einzelnen fand sich für

β_{D28}	150	200	300	400	500	600	700	kp/cm^2
s	= 24	32	43	50	58	69	80	kp/cm^2
v	= 16,0	16,0	14,3	12,5	11,6	11,5	11,4	%

Aus der Beziehung in Bild 2 wurde ein weiteres Diagramm, Bild 3, abgeleitet, das erlaubt, unmittelbar von der vorgesehenen Betondruckfestigkeit β_{D28} und den Festigkeitsklassen Z 250, Z 350, Z 450 und Z 550 des Zements auszugehen und den zugehörigen Wasserzementwert w abzulesen. Dem Diagramm liegen folgende mittleren Normdruckfestigkeiten N_{28M} für die 4 Festigkeitsklassen zugrunde: $N_{28M} = 350 \text{ kp/cm}^2$ für Z 250, $N_{28M} = 450 \text{ kp/cm}^2$ für Z 350, $N_{28M} = 550 \text{ kp/cm}^2$ für Z 450 und $N_{28M} = 635 \text{ kp/cm}^2$ für Z 550.

Dabei wurde davon ausgegangen, daß die Zemente gemäß DIN 1164, Blatt 1 (Ausgabe Juni 1970), in die 4 Festigkeitsklassen

Z 250, Z 350, Z 450 und Z 550

eingeteilt sind. Diese Zahlen geben die Mindest-Normdruckfestigkeit N_{28} in kp/cm^2 an, die bei keiner Einzelprüfung unterschritten werden darf. Außerdem darf die bei jeder Einzelprüfung ermittelte Normdruckfestigkeit bei den unteren drei Klassen nur um höchstens 200 kp/cm^2 über der Mindest-Normdruckfestigkeit der jeweiligen Klasse liegen. Bei der höchsten Klasse Z 550 ergibt sich aus dem Stand der heutigen Zementtechnik von selbst eine ähnliche obere Festigkeitsgrenze.

Aus dem für die unteren drei Klassen zulässigen Festigkeitsbereich von 200 kp/cm^2 könnte man schließen, daß die Festigkeit verschiedener Zementlieferungen in diesen Grenzen schwanken würde. Das ist jedoch nicht der Fall, weil diese Werte bei keiner Einzelprüfung unter- oder überschritten werden dürfen, auch nicht unter Berücksichtigung der Prüfstreuungen, deren Standardabweichung allein schon in der Größenordnung von wenigstens 20 kp/cm^2 liegt. Nach statistischen Untersuchungen werden nur jeweils 5 % der Lieferungen um mehr als $\pm 50 \text{ kp/cm}^2$ von dem eingestellten Mittelwert abweichen, und rd. $\frac{2}{3}$ aller Prüfwerte werden in einen Bereich fallen, der größenordnungsmäßig nur um $\pm 30 \text{ kp/cm}^2$ vom Mittelwert abweicht. Es ist also gerechtfertigt, für den Entwurf von Betonmischungen aus Zementen der Festigkeitsklassen Z 250, Z 350 und Z 450 eine Normdruckfestigkeit zu wählen, die in der Mitte zwischen den jeweiligen unteren und oberen Grenzfestigkeiten, d. h. um 100 kp/cm^2 über der jeweiligen Mindest-Normdruckfestigkeit, liegt.

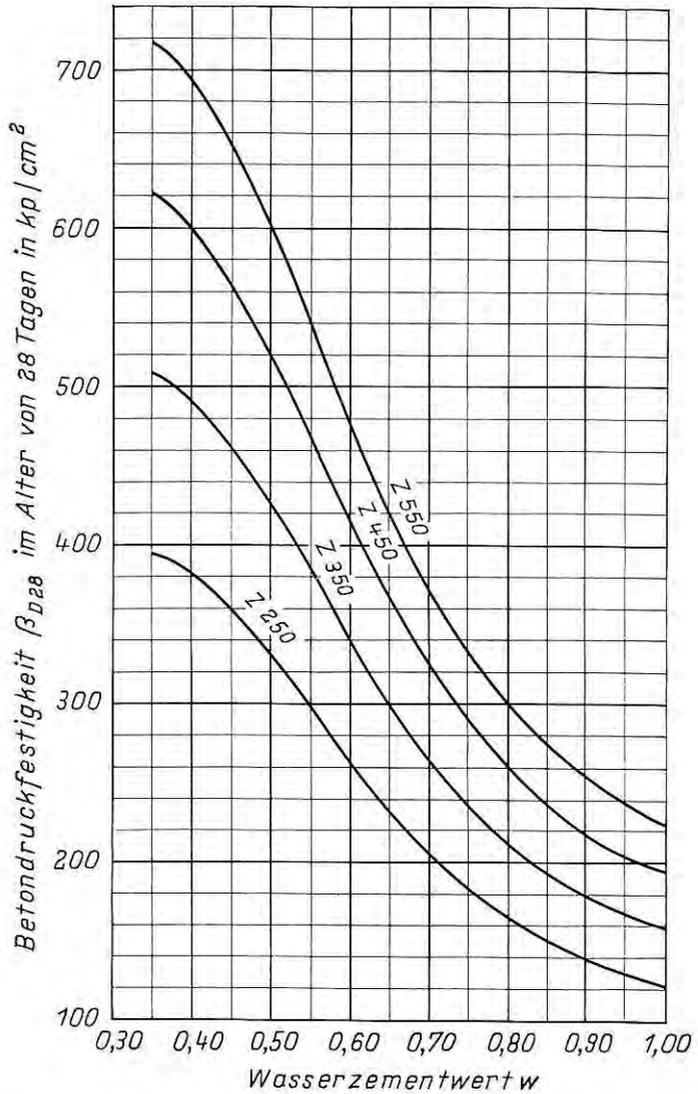


Bild 3 Abhängigkeit der Würfeldruckfestigkeit β_{D28} des Betons vom Wasserzementwert und von der Festigkeitsklasse des Zements nach DIN 1164, Ausgabe Juni 1970 (abgeleitet aus der in Bild 2 dargestellten Beziehung mit folgenden Normdruckfestigkeiten: $N_{28M} = 350 \text{ kp/cm}^2$ für Z 250, $N_{28M} = 450 \text{ kp/cm}^2$ für Z 350, $N_{28M} = 550 \text{ kp/cm}^2$ für Z 450 und $N_{28M} = 635 \text{ kp/cm}^2$ für Z 550)

3. Anwendung der Beziehung

3.1 Einflußgrößen

Die Beziehung $w/N_{28}/\beta_{D28}$ gilt für gemittelte Verhältnisse. Darin erscheinen also der Wasserzementwert zusammen mit der Normfestigkeit des Zements als maßgebende Einflußgrößen für die Betondruckfestigkeit β_{D28} . Daneben können noch andere Zusammenhänge — wenn auch nicht ausschlaggebend — Einfluß nehmen; sie sind quantitativ kaum erfaßbar und lassen es auch deshalb geraten erscheinen, von Beziehungen $w/N_{28}/\beta_{D28}$ allgemein keine übertriebene Genauigkeit zu fordern. Im einzelnen ist dazu folgendes zu beachten:

3.1.1 Der hier zugrunde gelegte Wasserzementwert bezieht sich auf das gesamte Wasser im Frischbeton. Nach den theoretischen Grundlagen des Wasserzementwert-Gesetzes geht man davon aus, daß im Zementstein des Betons zu jedem Zeitpunkt des Erhärtens um so mehr mit Wasser gefüllte, festigkeitsmindernde Kapillarporen verbleiben, je größer der Wassergehalt des Betons bzw. unter sonst gleichen Verhältnissen der Wasserzementwert des Zementleims war. Beim Wasserzementwert der Beziehungen nach den Bildern 1, 2 und 3 ist ein Teil des Wassers W, das bei der Reaktion mit dem Zement (Hydratation) chemisch und physikalisch in die Reaktionsprodukte (Neubildungen) fest eingebaut wird, mit eingerechnet. Dieses trägt nicht zur Porenbildung bei; außerdem nehmen die Neubildungen, die die Festigkeit bedingen, einen etwa doppelt so großen Raum ein wie der Teil des Zements, der bis zu einem bestimmten Zeitpunkt hydratisierte. Der verbleibende, festigkeitsmindernde, zunächst wassergefüllte Kapillarporenraum ist also im Zementstein kleiner als der für den Wasserzementwert der Beziehung eingesetzte Wassergehalt W des Frischbetons (Zementleims). Wieviel Wasser z. B. bis zum Alter von 28 Tagen gebunden wird, hängt vom Reaktionsvermögen des Zements und von der Erhärtungstemperatur ab. Sehr rasch reagierende Zemente, wie solche der Festigkeitsklasse Z 550, sind bei ausreichendem Wasserangebot nach 28 Tagen weitgehend hydratisiert, andere benötigen mehr Zeit. Man kann annehmen, daß z. B. Normzemente der Festigkeitsklasse Z 350 bis zum Alter von 28 Tagen nur etwa 60 bis 80 % der Wassermenge binden, die zu vollständiger Hydratation gebraucht wird.

In großen Zügen gilt, daß Normzemente zur vollständigen Hydratation insgesamt etwa 37 bis 40 Gew.-% Wasser benötigen, was also einem Wasserzementwert von rd. 0,40 entspricht. Bei diesem und natürlich auch bei kleineren Wasserzementwerten wird der ursprünglich vom Wasser im Zementleim eingenommene Raum im Zementstein vollständig von den festen Neubildungen ausgefüllt, so daß in ihm kein Kapillarporenraum verbleibt⁴⁾.

Es genügt hier festzuhalten, daß also alle Zemente bei der Erhärtung bis zu dem hier interessierenden Alter von 28 Tagen einen bestimmten Teil des Anmachwassers fest binden und dadurch bzw. durch die Neubildungen den vom gesamten Anmachwasser im ursprünglichen Zementleim herrührenden Kapillarporenraum dementsprechend mehr oder weniger vermindern. In

Wirklichkeit dürfte man also nur die kapillarporenbildende Wassermenge in Rechnung stellen, die vom pauschalen Wasserzementwert und vom Hydratationsgrad eines Zements abhängt. Dem Einfluß des Hydratationsgrades eines Zements wird durch die Einbeziehung der Normfestigkeit des Zements weitgehend Rechnung getragen. Denn auch im Normprüfmörtel mit dem Wasserzementwert von 0,50 findet bis zum Alter von 28 Tagen ebenfalls eine von der Erhärtungscharakteristik (Hydratation) des Zements abhängige Wasserbindung statt. Diese kann aber bei anderen Wasserzementwerten des Betons als 0,50 von der im Normmörtel etwas verschieden sein. Man muß weiter annehmen, daß zur Streuung auch die unterschiedliche Lagerung von Normmörtel (Wasserlagerung) und Beton (abschließende Luftlagerung) beiträgt. Denn dadurch kann sich, abhängig von der Art und Festigkeitsklasse der einzelnen Zemente, die Festigkeit im Beton etwas anders entwickeln als durch die Normfestigkeit des Zements ausgewiesen wird.

Einige andere sich als Streuung auswirkende Zusammenhänge werden im folgenden erwähnt.

3.1.2 In mehreren Arbeiten wurde festgestellt, daß bei gleichem Wasserzementwert die Druckfestigkeit von Beton mit hohem Zementgehalten (z. B. über 350 kg/m^3) bei zunehmendem Zementgehalt (Zementsteinvolumen) nicht mehr dem Wasserzementwert entsprechend voll zur Wirkung kommt. Dieser Einfluß deutet sich vielleicht auch in Bild 2 durch den am Anfang flacheren Verlauf der Kurve bis zum Bereich des Wasserzementwerts von 0,40 an. (Die Mehrzahl der benutzten Mischungen mit Wasserzementwerten bis 0,40 hatten Zementgehalte über 350 kg/m^3 .) Das Zementsteinvolumen solcher Betone ist also dementsprechend groß, und zwischen den größeren Zuschlagkörnern liegen dicke Zementstein- oder Feinmörtelschichten. Man kann sich die geringere Wirksamkeit des Zements in sehr zementreichem Beton dadurch erklären, daß für dicke Schichten zwischen den größeren Körnern bei der Druckbeanspruchung eine Art „Prismenfestigkeit“ maßgebend wird, die wesentlich kleiner ist als die „Plattenfestigkeit“ von dünneren Schichten zwischen den festen Zuschlagkörnern bei kleineren Zementgehalten. (Die spezifische Druckfestigkeit des verkittenden Zementsteins oder Feinmörtels an sich ist natürlich in beiden Fällen gleich groß.)

4) Obwohl bei noch kleineren Wasserzementwerten als rd. 0,40 nicht mehr der ganze Zement in Neubildungen umgesetzt wird und bereits beim Wasserzementwert 0,40 keine Kapillarporen mehr verbleiben, ist mit weiter abnehmendem Wasserzementwert noch eine Festigkeitssteigerung verbunden. (Dieser Bereich des Wasserzementwerts ist jedoch hier ohne Bedeutung, da Frischbeton mit solchen Wasserzementwerten unter baupraktischen Verhältnissen für eine vollständige Verdichtung im allgemeinen zu steif ist.) Hierfür gibt es mehrere Erklärungen. Unter anderem kann man annehmen, daß die zwischen den Neubildungen verbleibenden, nicht hydratisierten Kerne der Zementkörnchen, richtiger Klinkerkörnchen, fester sind als die Neubildungen (Zementgel); sie steifen so die Neubildungen nach Art eines Zuschlaggerüstes aus; siehe auch die Parallele im Beton unter 3.1.2 und noch andere Überlegungen bei [3]. — Weiter spaltet sich mit den Neubildungen unter diesen Verhältnissen wohl auch eine geringere Menge Kalkhydrat ab, das wenig zur Festigkeit der Neubildungen beiträgt [4].

Von gleichgerichtetem Einfluß ist dabei auch die kleinere Oberfläche des Zuschlags in einem Beton mit hohem Zementgehalt, die für das Verbundsystem „Zementstein – Zuschlag“ weniger Haftfläche bei der Kraftübertragung auf die festeren Gesteinskörner und größere Unstetigkeit des Gefüges mit mancherlei ungünstigen Auswirkungen bedeutet.

Eine entsprechende Erklärung bietet sich auch für manche Feststellungen an, wonach mit feineren Zuschlaggemischen bei gleicher Zementmenge und gleichem Wasserzementwert eine etwas höhere Druckfestigkeit erreicht wird als mit grobkörnigeren Gemischen.

3.1.3 Der Beton der Würfel wurde „praktisch vollständig“ verdichtet. In solchem Beton ist im großen Durchschnitt noch ein Gehalt an natürlichen größeren Luftporen von rd. 1,5 Raum-% vorhanden. Wird jedoch, z. B. durch Verwendung von Zusatzmitteln, weitere Luft eingetragen, so wird der Porenraum größer und ist als festigkeitsmindernd zu berücksichtigen (siehe auch unter 3.2.3). Durch Zusatzmittel kann auch die Festigkeitsentwicklung im Beton etwas anders verlaufen, als sie durch die Normfestigkeit des Zements gekennzeichnet ist.

3.1.4 Auch die je nach Oberflächentextur der Zuschlagkörner und ihrer mineralischen Zusammensetzung unterschiedliche Haftung zwischen Gesteinsoberfläche und Zementstein wirkt sich ebenso wie eine unterschiedliche Kornform auf die Druckfestigkeit des Betons aus.

Ferner kann, abhängig vom Wasseraufnahmevermögen des Zuschlaggesteins, der Wasserzementwert bei Verwendung trockenen Zuschlags etwas vermindert werden, was sich in einer Erhöhung der Druckfestigkeit des Betons beim oberen Streubereich auswirkt. Umgekehrt wird die Haftung bei wassersattem Zuschlag etwas ungünstiger anzunehmen sein als bei einem noch etwas wassersaugenden.

3.1.5 Abhängig vom Zement kann die Betondruckfestigkeit trotz normgemäßer Lagerung etwas anders ausfallen, je nachdem die Herstellungs- und Lagerungstemperatur der Würfel innerhalb des in DIN 1048 festgelegten Bereichs von + 15 °C bis + 22 °C an der unteren oder oberen Grenze liegt. Auch kann der Erhärtungsverlauf anfänglich unterschiedlich beeinflußt werden und von dem des Normmörtels abweichen, je nachdem, ob der Beton, abhängig vom Zement und Zementgehalt, in der Form mehr oder weniger Wärme entwickelt. Dazu kommt, daß nach DIN 1048 die Würfel während der anfänglichen 7tägigen Feuchtlagerung unter Wasser oder auch in feuchtem Sand gelagert werden können. Die Feuchtigkeit des Betons bei der Prüfung nach anschließender 21tägiger Luftlagerung kann deshalb, und weil in DIN 1048 auch die relative Feuchtigkeit der Luft des Lagerraums nicht eingegrenzt ist, verschieden sein und u. U. das Ergebnis der Druckfestigkeitsprüfung ebenfalls etwas beeinflussen (bei hohem Feuchtigkeitsgehalt wird eine etwas kleinere Druckfestigkeit bestimmt als dem eigentlichen Erhärtungsgrad entspricht; siehe auch [5]).

Diese hier angesprochenen Einflüsse gehören zur sog. Herstellungs- und Prüfstreuung, zu der noch weitere, z. B. durch unge-

naues Abmessen, durch unterschiedliches Mischen und Verdichten der Versuchsmischung, durch unebene Druckflächen, durch verschiedene Prüfgeschwindigkeit u. a., kommen.

3.1.6 Zusammenfassend soll festgestellt werden, daß durch eine Reihe von Einflüssen ein Streubereich in der Beziehung $w/N_{28}/\beta_{D28}$ des Bildes 2, hier gekennzeichnet durch die 5 %-Fraktile, unabdingbar ist. Die aus einer Vielzahl von Versuchsmischungen gewonnene mittlere Kurve für die Beziehung $w/N_{28}/\beta_{D28}$ gibt jedoch — wie die Erfahrung mit der früheren Kurve [1] lehrt — einen guten Anhalt für den Entwurf oder die Beurteilung von Mischungen in einem praktisch am häufigsten vorkommenden Bereich⁵⁾.

Eine bessere Erfassung der von Fall zu Fall speziell vorhandenen Stoffeinflüsse und eine Nachprüfung des nach Bild 2 oder 3 aufgestellten, auf gemittelten Verhältnissen beruhenden Mischungsentwurfs ist mit der Eignungsprüfung möglich, die gemäß DIN 1045 einem Mischungsentwurf folgen muß.

3.2 Eignungsprüfung

3.2.1 Nach DIN 1045 (1971) dient die Eignungsprüfung dazu, vor Verwendung des Betons festzustellen, welche Zusammensetzung der Beton haben muß, damit er mit den in Aussicht genommenen Ausgangsstoffen und der vorgesehenen Konsistenz unter den Verhältnissen der betreffenden Baustelle zuverlässig verarbeitet werden kann und die geforderten Eigenschaften sicher erreicht. Im einzelnen ist dazu angegeben, unter welchen Umständen Eignungsprüfungen nötig sind und dabei auch der erforderliche Wasserzementwert festzulegen ist.

Bei der Eignungsprüfung muß der Mittelwert der Druckfestigkeit der 3 Würfel aus derjenigen Betonmischung, deren Zusammensetzung für die Bauausführung maßgebend sein soll, ein bestimmtes Vorhaltemaß einschließen. Dieses beträgt entsprechend der bei der Güteprüfung mindestens zu gewährleistenden mittleren Druckfestigkeit (β_{wM} ²⁾ für die Festigkeitsklassen (Nennfestigkeit) Bn 100 bis einschließlich Bn 250 (Beton B I) mindestens 50 kp/cm²; für Beton B II (Festigkeitsklassen Bn 350 und höher) kann es unter Berücksichtigung des zu erwartenden Streubereichs der betreffenden Baustelle nach Erfahrung gewählt werden. Da also die mindestens zu erreichende mittlere Druckfestigkeit β_{wM} bereits um 50 kp/cm² höher angesetzt ist als die Nennfestigkeit β_{wN} (Betonfestigkeitsklasse Bn), bedeutet dies, daß bei der Eignungsprüfung für Beton I das Ergebnis der Druckprüfung um 100 kp/cm²

⁵⁾ In der ACI-Standard 613-54, proposed revision 1969: Recommended practice for selecting proportions for normal weight concrete [6] findet sich die Tabelle 5.2.4 (a), die für Würfeldruckfestigkeiten von rd. 180 bis 540 kp/cm² (umgerechnet nach [7]) den dazu erforderlichen Wasserzementwert angibt (0,82 bis 0,41). Diese Druckfestigkeiten stimmen mit der Beziehung nach Bild 3 für die Wasserzementwerte von 0,45 bis 0,75 recht gut überein, wenn dort die Kurve für die mittlere Normfestigkeit des Z 350 ($N_{28M} = 450$ kp/cm²) benutzt wird.

über der Nennfestigkeit liegen muß und bei Beton II um 50 kp/cm^2 über der Nennfestigkeit zuzüglich des angemessen zu wählenden Vorhaltemaßes.

Somit ist der erforderliche Wasserzementwert dem Bild 2 oder 3 für eine Druckfestigkeit β_{D28} zu entnehmen, die diesen Bedingungen Rechnung trägt.

3.2.2 Man wird bei einer Eignungsprüfung zweckmäßig 3 Mischungen ansetzen, die sich von der nach Bild 2 oder 3 abgeleiteten und nach Abschnitt 1, 2. Absatz, errechneten Mischung [8] im Wasserzementwert um rd. $+ 0,05$ und $- 0,05$ unterscheiden. Es ist zu erwarten, daß damit die zusätzlichen Einflüsse (s. Abschnitt 3.1) abgedeckt werden und daß die Baustellenmischung nach dem Ergebnis dieser 3 Mischungen endgültig festgelegt werden kann oder daß nötigenfalls eine einfache Korrektur der errechneten Mischung damit möglich wird.

3.2.3 Wie unter 3.1.3 erwähnt, gelten Bild 2 oder 3 für Beton mit einem natürlichen Luftporengehalt von etwa 1,5 %. Bei höheren Luftgehalten durch Betonzusatzmittel ist der darüber hinausgehende Luftgehalt L wie ein Teil des Anmachwassers als festigkeitsmindernd einzubeziehen ¹⁾.

3.2.4 Zum Entwurf von Betonmischungen, für die eine bestimmte Druckfestigkeit β_D früher als nach 28 Tagen verlangt wird, stehen mit den Normfestigkeiten des Zements nach dem neuen Prüfverfahren noch keine Beziehungen entsprechend Bild 2 oder 3 zur Verfügung. Wie die Auswertung einiger Untersuchungen [9, 10] für die Beziehung w, N und β_D für früheres Alter (z. B. 3 oder 7 Tage) erkennen läßt, entstehen Frühfestigkeiten des Betons, bezogen auf das Alter von 28 Tagen, *im großen Durchschnitt* etwa im Verhältnis der Normfestigkeit des Zements im entsprechenden Alter. Für einen *ungefähren Anhalt* beim Entwurf einer Betonmischung für eine Frühfestigkeit kann man daher, mit einer gewissen Einschränkung für den Einzelfall, die Beziehung nach Bild 2 benutzen, wenn man für N die Normfestigkeit des Zements der betreffenden Altersstufe einsetzt.

4. Zusammenfassung

4.1 Die bisher benutzten Diagramme, die auf der Beziehung zwischen Wasserzementwert w, Normdruckfestigkeit des Zements N_{28} und der Würfeldruckfestigkeit des Betons β_{D28} beruhen, haben sich als brauchbar erwiesen, um Mischungen für Beton zu entwerfen, von dem nach 28 Tagen eine bestimmte Würfeldruckfestigkeit β_{D28} verlangt wird, oder um die zu erwartende Druckfestigkeit abzuschätzen, wenn w und N_{28} für eine Mischung bekannt sind.

4.2 Da der Zement in Zukunft nach DIN 1164, Ausgabe Juni 1970, mit einem Normmörtel geprüft wird, der einen Wasserzementwert von 0,50 gegenüber früher von 0,60 aufweist, wird bei der Prüfung des gleichen Zements jetzt im allgemeinen eine etwas höhere Normdruckfestigkeit N_{28} erhalten. Naturgemäß fällt dadurch die mit einer bestimmten Betonmischung zu erwartende

Würfeldruckfestigkeit nicht anders aus; doch kann die bisherige Beziehung $w/N_{28}/\beta_{D28}$ wegen der veränderten Größe von N_{28} nicht mehr für den Entwurf von Mischungen benutzt werden.

4.3 Eine neue Beziehung wurde durch Auswerten von rd. 830 im Laboratorium hergestellten Betonmischungen in Form eines Diagramms (Bild 2) aufgestellt. Für die Mischungen wurden zahlreiche Zemente benutzt, deren Normfestigkeit N_{28} nach der neuen DIN 1164 ermittelt worden ist. Die Zusammensetzung der Betone war sehr unterschiedlich und deckte den Bereich der praktisch vorkommenden Mischungen hinsichtlich Zementgehalt, Wasserzementwert, Konsistenz und Sieblinien des Zuschlags mit rd. 30 mm Größtkorn. Die Druckfestigkeit β_{D28} gilt für Würfel, wie sie bei der Eignungsprüfung nach DIN 1048 herzustellen, zu lagern und zu prüfen sind.

Ein zweites Diagramm (Bild 3) wurde abgeleitet, in dem 4 Bezugskurven eingetragen sind, die für eine mittlere Normfestigkeit der in der neuen Norm festgelegten 4 Festigkeitsklassen der Zemente Z 250, Z 350, Z 450 und Z 550 gelten.

Wie die alten Diagramme, so wurden auch die neuen empirisch gewonnen; sie geben die gemittelte Beziehung $w/N_{28}/\beta_{D28}$ in Kurven wieder. Die Streuung um diese ergibt sich durch eine Reihe von Einflüssen, die durch die Eigenheiten der Beziehung sowie der einzelnen Mischungen und durch die Prüfung bedingt sind.

4.4 Mit dem aus der gemittelten Beziehung der Diagramme erhaltenen Wasserzementwert kann mit einem abgeschätzten Wassergehalt des Frischbetons der zugehörige Zementgehalt bestimmt werden und über die Stoffraumrechnung der Zuschlaganteil. Diese einfache, wenig aufwendige Berechnung kann ohne zusätzliche Diagramme durchgeführt werden und erlaubt so, auch anderen nachgeordneten Einflußgrößen jeweils Rechnung zu tragen sowie das Verständnis für die Zusammenhänge zu vertiefen, die beim Entwurf von Betonmischungen und allgemein zu beachten sind.

Die entworfene Mischung wird der in DIN 1045 geforderten Eignungsprüfung zugrunde gelegt.

SCHRIFTTUM

- [1] Walz, K.: Wie werden betontechnische Erkenntnisse für das Bauen nutzbar gemacht? beton 10 (1960) H. 10, S. 483/490; ebenso Betontechnische Berichte 1960, Beton-Verlag, Düsseldorf 1961, S. 107/125.
- [2] Walz, K., und G. Wischers: Zum Entwurf der Neufassung der Zementnorm DIN 1164. beton 18 (1968) H. 1, S. 10/14; ebenso Betontechnische Berichte 1968, Beton-Verlag, Düsseldorf 1969, S. 21/32.
- [3] Wischers, G.: Einfluß einer Temperaturänderung auf die Festigkeit von Zementstein und Zementmörtel mit Zuschlagstoffen verschiedener Wärmedehnung. Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 28, Düsseldorf 1961, S. 52 und S. 53; ferner Wischers, G.: Physikalische Eigenschaften des Zementsteins. beton 11 (1961) H. 7, S. 481/486, Abschnitt 4, ebenso Betontechnische Berichte 1961, Beton-Verlag, Düsseldorf 1962, S. 199/213.
- [4] Locher, F. W.: Stöchiometrie der Hydratation von Tricalciumsilicat. Zement-Kalk-Gips 20 (1967) H. 9, S. 402/407.
- [5] Dahms, J.: Einfluß der Eigenfeuchtigkeit auf die Druckfestigkeit des Betons. beton 18 (1968) H. 9, S. 361/365; ebenso Betontechnische Berichte 1968, Beton-Verlag, Düsseldorf 1969, S. 113/126.
- [6] ACI-Committee 211: Proposed revision of ACI 613-54. Proc. Amer. Concr. Inst. 66 (1969) S. 612/628.
- [7] Walz, K.: Beton- und Zementdruckfestigkeiten in den USA und ihre Umrechnung auf deutsche Prüfwerte. beton 12 (1962) H. 9, S. 420/423, und H. 10, S. 463/466; ebenso Betontechnische Berichte 1962, Beton-Verlag, Düsseldorf 1963, S. 123/140.
- [8] Walz, K.: Anleitung für die Zusammensetzung von Beton mit bestimmten Eigenschaften. 2. Aufl., Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin-München 1963.
- [9] Meyer, A.: Über den Einfluß des Wasserzementwertes auf die Frühfestigkeit von Beton. Betonstein-Zeitung 29 (1963) H. 8, S. 391/394 (Tafeln 1 u. 5).
- [10] Bonzel, J., und J. Dahms: Der Einfluß des Zements, des Wasserzementwertes und der Lagerung auf die Festigkeitsentwicklung des Betons. beton 16 (1966) H. 7, S. 299/305, und H. 8, S. 341/342; ebenso Betontechnische Berichte 1966, Beton-Verlag, Düsseldorf 1967, S. 115/138.