

# Wie werden betontechnische Erkenntnisse für das Bauen nutzbar gemacht? \*)

Von Kurt Walz, Düsseldorf

## Übersicht

*Die ersten Stahlbetonvorschriften der verschiedenen Länder verlangten Beton mit Druckfestigkeiten zwischen 100 und 200 kg/cm<sup>2</sup>. Ferner enthielten sie allgemeinere Angaben über die Zusammensetzung, die für diese Festigkeiten und für den nötigen Rostschutz der Stahlbewehrung nach den damaligen Erkenntnissen angemessen erschienen.*

*Die Forschung vertiefte das Wissen um die Zusammenhänge zwischen dem Aufbau des Betons und seinen Eigenschaften. Die Zemente wurden besser, und durch Einführen des Rüttelns ließ sich auch steifer Beton leicht und zuverlässig verdichten. Deshalb kann heute auch in der Praxis von Beton mit Druckfestigkeiten bis 600 kg/cm<sup>2</sup> Gebrauch gemacht werden. Es ist lerner möglich, die erforderliche Zusammensetzung festzulegen, um Betonbauwerke mit ausreichender Undurchlässigkeit, hohem Widerstand gegen Frost oder gegen chemische Angriffe zu schaffen. Hierbei kommt dem Wasserzementwert eine entscheidende Bedeutung zu, weil er die Eigenschaften des Zementsteins und damit die des Betons ausschlaggebend beeinflusst.*

*Zu dieser breiten Wirkung in der Bautechnik gelangen die an vielen Stellen gewonnenen betontechnischen Erkenntnisse immer erst dann, wenn sie in Richtlinien, Normen oder bautechnische Vorschriften gekleidet werden. Damit wird nicht nur die Sicherheit des Bauens gefördert, sondern auch der Stand der Entwicklung gelestigt und der Anwendungsbereich des Betons erweitert.*

## 1. Einleitung

Schon in den ersten betontechnischen Vorschriften der verschiedenen Länder heben sich zwei allgemeine Forderungen heraus: Die Forderung nach einer bestimmten Betonfestigkeit und die Forderung nach Sicherung des Rostschutzes der Bewehrung. Angaben über den Zementgehalt oder das Mischungsverhältnis in Raumteilen, allgemeine Hinweise über die Zusammensetzung des Zuschlags, den Einfluß des Wasserzusatzes und die Konsistenz sowie die Vorschrift, nur Normzemente zu verwenden, unterstützten diese beiden Forderungen. Dabei wurden z. B. in den um die zwanziger Jahre geltenden Bestimmungen lediglich Druckfestigkeiten von etwa 100 bis 200 kg/cm<sup>2</sup> verlangt.

Im Grunde enthalten die heutigen, wiederholt überarbeiteten Vorschriften noch die gleichen Forderungen. Diese werden auch in der zur Zeit in Arbeit befindlichen Neufassung der Stahlbetonbestimmungen (DIN 1045) sinngemäß wieder erscheinen. Durch die an vielen Stellen gewonnenen Erkenntnisse der beton-

---

\*) Vortrag auf der Zement-Tagung des Vereins Deutscher Zementwerke vom 13. bis 15. 9. 1960 in Salzburg.

technischen Forschung und durch die Weiterentwicklung der Zemente können wir jedoch heute Beton nach Güteklassen abgestuft bis zur hohen Druckfestigkeit von  $600 \text{ kg/cm}^2$  verlässlich herstellen und die Bedingungen für den Rostschutz bestimmter umreißen als früher. Darüber hinaus weiß man auch, wie andere, von Fall zu Fall wichtige Eigenschaften gewährleistet werden können, z. B. Undurchlässigkeit, hoher Widerstand gegen Frost oder gegen chemisch angreifendes Wasser.

## 2. Grundsätzliches über den Aufbau des Betons und seine Eigenschaften

Die in der Fassung von 1943 geltenden Stahlbetonbestimmungen verlangen für die Zusammensetzung des Betons, in Verbindung mit der Aufteilung der Zuschläge und einer bestimmten Kornzusammensetzung, Mindestzementgehalte. Damit wird auf die Gleichmäßigkeit des Betons und den Schutz der Bewehrung gegen Rosten hingewirkt. Der Rostschutz und andere Güteeigenschaften oder gar eine bestimmte Betondruckfestigkeit sind damit nur bedingt verbürgt, weil der Wassergehalt und somit auch der Wasserzementwert, von dem die Eigenschaften des erhärteten Betons in erster Linie abhängen, nicht begrenzt sind.

Bei allen Überlegungen über die Zusammensetzung einer Betonmischung gehen wir heute davon aus, daß bei vollständiger Verdichtung die Eigenschaften des Betons von der Beschaffenheit des die Zuschlagkörner verbindenden Zementleims bzw. Zementsteins abhängen.

Die Reaktion zwischen Zement und Wasser führt zu einer gelartigen Neubildung, die das Erstarren und fortschreitende Erhärten des Zementleims bewirkt.

Über die Zusammensetzung des Zementsteins, soweit sie zur Erklärung der Betoneigenschaften dient, haben wir heute eine verhältnismäßig klare Vorstellung<sup>1) 2) 3) 4) 5)</sup>. Der Zement kann bis zur vollständigen Hydratation nur eine bestimmte Menge Wasser chemisch binden, z. B. Portlandzement etwa 25 % seines Gewichtes. In frühem Alter und bei kleiner Hydratations-

---

1) Powers, T. C., and T. L. Brownard: Studies of the physical properties of hardened portland cement paste. Proc. Amer. Concr. Inst. 43 (1947) S. 669. — Bulletin 22, Portl. Cem. Assoc., Chicago 1948.

2) Powers, T. C., L. E. Copeland, J. C. Hayes and H. M. Mann: Permeability of portland cement paste. Proc. Amer. Concr. Inst. 51 (1955) S. 285; ebenso Bulletin 53, Portl. Cem. Assoc., Chicago 1955. — Copeland, L. E., and J. C. Hayes: Porosity of hardened portland cement pastes. Proc. Amer. Concr. Inst. 52 (1956) S. 633.

3) Verbeck, G.: Pore structure; Hardened concrete. Spec. Techn. Publ. No. 169. Amer. Soc. Test. Mat. 1956.

4) Powers, T. C.: The physical structure and engineering properties of concrete. Bulletin 90. Portl. Cem. Assoc., Chicago, July 1958.

5) Powers, T. C., L. E. Copeland and H. M. Mann: Capillary continuity or discontinuity in cement pastes. Journ. of the Res. and Development Laboratories (1959) No. 2, S. 38 (Portl. Cem. Assoc., Chicago).

geschwindigkeit ist die Wasserbindung geringer; sie beträgt nach 28 Tagen nur etwa 10 bis 15 %. Zu diesem Wasser kommen noch, ebenfalls vom Hydratationsgrad abhängig, bis zu etwa 15 % feinst verteiltes, physikalisch in das Gel eingebautes Wasser. Dieses steht für die Hydratation nicht mehr zu Verfügung. Es schwächt aber auch den Zementstein nicht, weil es in den Gelporen mit theoretischen Durchmessern von etwa 1/400 000 mm in pseudofestem Zustand vorliegt. Daraus geht hervor, daß nur bis zu einem Wasserzementwert von etwa 0,4 alles Wasser chemisch und physikalisch gebunden werden kann. Im Zementstein verbleiben also um so mehr Überschußwasser und hiervon herrührender Porenraum, je höher der Wasserzementwert über etwa 0,4 liegt oder je weniger die Hydratation fortgeschritten ist. Dieser Porenraum wird von feinen, den Zementstein durchziehenden, sehr saugfähigen Kapillarporen mit Durchmessern von 1/100 bis 1/1000 mm gebildet.

Auch wenn hier nicht weiter berücksichtigt wird, daß nach vollständiger Hydratation der Raum, den die Hydratationsprodukte (Zementgel und Kalkhydrat) einnehmen, etwa doppelt so groß ist wie das ursprüngliche Volumen des Zements und daß der Porenraum durch natürliche Luftporen etwas vermehrt oder durch Wasserabsondern etwas vermindert werden kann, so versteht man doch, warum mit zunehmendem Wasserzementwert und damit größer werdendem Kapillarporenraum des Zementsteins die Festigkeit und Dichte des Betons abnehmen.

Dieser beherrschende Einfluß des Wasserzementwerts ist aber auch der Grund dafür, daß weitgehend unabhängig vom Zementgehalt und der Kornzusammensetzung Betone mit praktisch

Tafel 1 Zusammensetzung von Beton mit vorgeschriebenem Wasserzementwert (Stoffraumrechnung)

*Stoffraum-Mengen in  $1\text{ m}^3$  verdichtetem Frischbeton*

$$\frac{Z}{\gamma_{0Z}} + W + \frac{G}{\gamma_G} + P = 1000 \text{ (dm}^3\text{)}$$

*Vorgeschrieben : Wasserzementwert  $w = W/Z$*

*Gegeben : Wassergehalt  $W$  [kg/m<sup>3</sup>] als Erfahrungswert*

*Hieraus : Zementgehalt  $Z = W/w$  [kg/m<sup>3</sup>]*

*Zuschlagmenge  $G$  (oberflächentrocken)*

$$G = \gamma_G \left( 1000 - P - \frac{Z}{\gamma_{0Z}} - W \right) \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

*$\gamma_{0Z}$  = spezifisches Gewicht des Zements*

*$\gamma_G$  = Raumgewicht des Zuschlaggesteins*

*$P$  = Gehalt an eingeschlossenen Luftporen [dm<sup>3</sup>]*

etwa gleicher Güte entstehen, wenn sie bei vollständiger Verdichtung den gleichen Wasserzementwert aufweisen. Die erforderliche Zementleimmenge fällt allerdings je nach Kornzusammensetzung, Kornform und Konsistenz verschieden groß aus, und man hat zu beachten, daß eine zunehmende Zementleimmenge unter sonst gleichen Verhältnissen die Hydratationswärme sowie das Schwinden und Kriechen steigert.

Aus diesen Erkenntnissen ist daher für die praktische Nutzung zu folgern, daß immer ein Beton mit einem für den bestimmten Fall angemessenen Wasserzementwert und einer für vollständige Verdichtung geringstmöglichen Zementleimmenge anzustreben ist. Man kann heute – wie in Abschnitt 3 gezeigt wird – den für bestimmte Betoneigenschaften erforderlichen Wasserzementwert festlegen und hiermit die Betonzusammensetzung über die Stoffraumrechnung eindeutig ermitteln. Nach Tafel 1 läßt sich mit dem Wasserzementwert  $w$  und den Erfahrungswerten für den zu bestimmter Konsistenz und Kornzusammensetzung gehörenden Wassergehalt ( $W^0$ ) oder Zementleimgehalt<sup>?)</sup> der Zementgehalt  $Z$  einfach errechnen. Aus der Gleichung für die Stoffraumrechnung

$$\frac{Z}{\gamma_{0Z}} + W + \frac{G}{\gamma_G} + P = 1000 \text{ dm}^3$$

erhält man dann den Zuschlaganteil  $G$ . In dieser Gleichung sind:

$Z$ ,  $W$  und  $G$  die Gewichte des Zements  $Z$ , Gesamtwassers  $W$  und Zuschlaggesteins  $G$  in kg in  $1 \text{ m}^3$  des frischen, verdichteten Betons,

$\gamma_{0Z}$  Reinwichte des Zements (spezifisches Gewicht) und

$\gamma_G$  die Rohwichte des Zuschlaggesteins (Raumgewicht).

Mit  $P$  ist der von eingeschlossenen, natürlichen oder künstlich von Zusatzmitteln herrührende Porenraum bezeichnet. (Der Gehalt an natürlichen Luftporen beträgt im praktisch vollständig verdichteten Beton meist 1 % bis 2 %, im Mittel etwa 1,5 %, d. s. 15 Liter je  $\text{m}^3$  Beton.)

Anschließend soll nun in einer gedrängten Übersicht gezeigt werden, von welchen Beziehungen zwischen Wasserzementwert und Betoneigenschaften auszugehen ist, wenn Beton für bestimmte Aufgaben verlangt wird.

### 3. Wasserzementwert und Betoneigenschaften

#### 3.1 Druckfestigkeit

Für die Beziehung zwischen Wasserzementwert und *Druckfestigkeit* des vollständig verdichteten Betons hat schon 1921 Abrams eine Formel aufgestellt. Eine Reihe solcher empirischer Beziehungen, in denen der Wasserzementwert und ein Faktor für die Zementfestigkeit erscheinen oder die direkt von der Dichte des Zementleims ausgehen, sind dann später auch von vielen anderen Forschern bekanntgegeben worden.

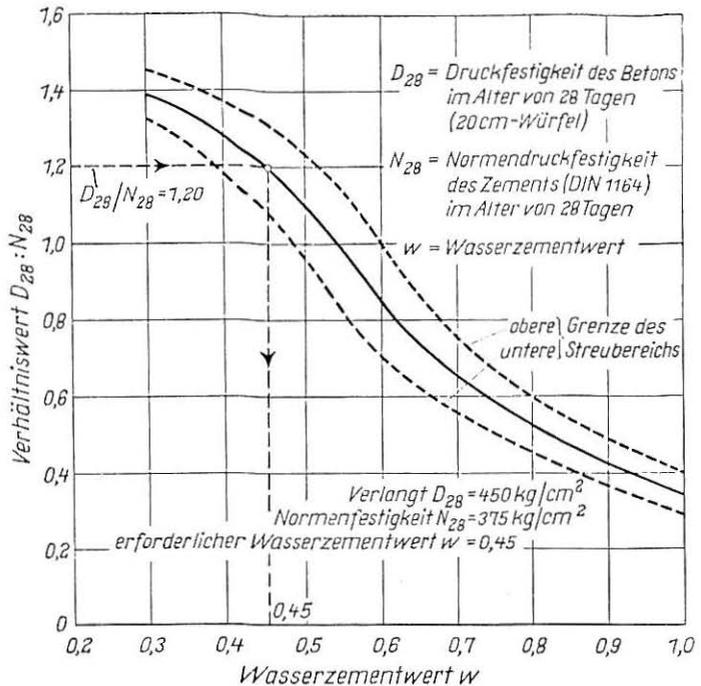


Bild 1 Beziehung zwischen Betondruckfestigkeit  $D_{28}$ , Zementfestigkeit  $N_{28}$  und Wasserzementwert  $w$

Hiernach ist es möglich, den erforderlichen Wasserzementwert  $w$  unter Berücksichtigung der Normenfestigkeit  $N$  des Zements zu errechnen oder ihn aus zugehörigen Diagrammen abzulesen. Ein solches Diagramm, das aus vielen Untersuchungen gewonnen wurde, findet sich in Bild 1<sup>6)</sup>. Man kann hier einen Vergleich mit zwei amerikanischen betontechnischen Richtlinien<sup>8)</sup> anstellen. Diese enthalten Tafeln mit dem für eine bestimmte Druckfestigkeit einzuhaltenen Mindestwasserzementwert, wenn die Druckfestigkeit nicht durch Versuche (Eignungsprüfung) vor Baubeginn nachgewiesen wird. Mit der Zementnormendruckfestigkeit nach DIN 1164 von 350 kg/cm<sup>2</sup> im einen Fall und mit 400 kg/cm<sup>2</sup> im anderen Fall ergibt sich für Wasserzementwerte zwischen 0,45 und 0,80 auch nach diesen amerikanischen Fest-

<sup>6)</sup> Siehe Walz, K.: Anleitung für die Zusammensetzung und Herstellung von Beton mit bestimmten Eigenschaften. Verlag Wilh. Ernst & Sohn, Berlin 1958.

<sup>7)</sup> Kluge, F.: Vorausbemessung der Wassermenge bei Betonmischungen für bestimmte Betongüten und Frischbetonkonsistenzen. Bauingenieur 24 (1949) H. 6, S. 172.

<sup>8)</sup> ACI-Standard 613-54: Recommended practice for selecting proportions for concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 51 (1955) S. 49.

<sup>9)</sup> Building code requirements for reinforced concrete (ACI 318-56). Proc. Amer. Concr. Inst. 52 (1956) S. 913.



Bild 2 Einrütteln der geschütteten Steineinlagen in Kies-sandbeton (Bettungsbeton)

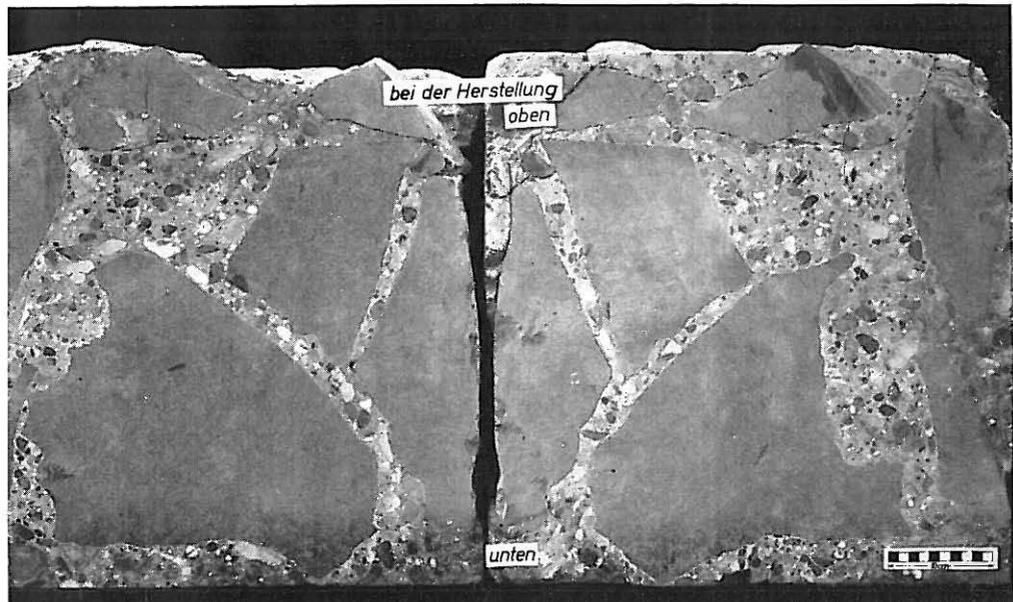
legungen ziemlich genau die gleiche Beziehung zwischen Beton-druckfestigkeit und Wasserzementwert, wie sie durch die untere Begrenzungslinie in Bild 1 dargestellt ist.

Selbst bei extremen Fällen der Kornzusammensetzung bleibt der Wasserzementwert für die Druckfestigkeit des Betons bestimmend. Man nutzt diese Erkenntnis bei massigen Bauteilen und setzt die Mischung mit viel Grobkorn zusammen oder rüttelt in ein vorgeschüttetes Bett aus üblichem, knapp weichem Beton Bruchsteine ein (Bild 2), die eine Kantenlänge bis zu 4 cm aufweisen können (patentiertes Verfahren). Da der Wasserzementwert dabei nicht verändert wird, entsteht etwa gleiche Festigkeit wie beim Bettungsbeton. Wegen der geringeren Wärmeentwicklung wird jedoch das Schwinden kleiner und das Raumgewicht größer, was z. B. bei Stau-mauern vorteilhaft ist. Das Beispiel in Tafel 2 gibt die Bestandteile eines solchen Betons wieder. Der knapp weich angemachte Bettungsbeton aus Kiessand 0/70 mm mit einem Wasserzementwert von 0,80 und einem Zementgehalt von  $217 \text{ kg/m}^3$  lieferte, am 50 cm-Würfel geprüft, nach einem Monat eine Druckfestigkeit von  $386 \text{ kg/cm}^2$  und nach 3 Monaten eine solche von  $483 \text{ kg/cm}^2$ . Nach dem Einrütteln von Steineinlagen in diesen Beton ent-

Tafel 2 Zusammensetzung und Druckfestigkeit des Bettungsbetons und des Betons nach dem Einrütteln von Steineinlagen

<i>Anteile in 1m<sup>3</sup> verdichtetem Beton</i>					
<i>Zement</i>	<i>Wasser</i>	<i>Kies= sand 0/70 mm</i>	<i>Stein= einlagen</i>	<i>W/Z</i>	<i>Summe (Raum= gewicht)</i>
<i>kg</i>	<i>kg</i>	<i>kg</i>	<i>kg</i>		<i>kg</i>
<i>Bettungsbeton (0...70mm)</i>					
217	174	2052	—	0,80	2443
<i>Beton mit Steineinlagen (10...40cm)</i>					
123 (43l) ( $\gamma_0=2,95$ )	99 (99l) ( $\gamma_0=1,0$ )	1162 (439l) ( $\gamma_0=2,65$ )	1164 (423l) ( $\gamma_0=2,75$ )	0,80 — —	2548 (1004l) —
<i>Druckfestigkeit des 50 cm-Würfels</i>					
			1	3	
<i>in kg/cm<sup>2</sup> nach</i>			<i>Monaten</i>		
<i>Bettungsbeton</i>			386	483	
<i>mit Steineinlagen</i>			384	487	

Bild 3 Schnitt durch einen abgedrückten 50 cm-Würfel aus Beton mit Steineinlagen



hielt der Beton bei *gleich gebliebenem Wasserzementwert* rd. 423 Liter Bruchsteine und nur 123 kg Zement je m<sup>3</sup>. Die Druckfestigkeit der 50 cm-Würfel aus Bruchsteinbeton war, entsprechend dem gleich gebliebenen Wasserzementwert, mit 384 und 487 kg/cm<sup>2</sup> ebenso groß wie die des Bettungsbetons.

An dem Schnitt durch einen der geprüften Würfel (Bild 3) erkennt man den geringen Anteil des Bettungsbetons. Voraussetzung dafür, daß mit solchem Beton die gleiche Festigkeit wie beim zementreicheren Bettungsbeton erhalten wird, ist eine satte Einbettung der Steineinlagen. Diese Forderung kann heute durch kräftige Rüttler, deren Entwicklung bereits vor dem Kriege einsetzte, zuverlässig erfüllt werden. Damit der Zementstein an den Bruchsteinen fest haftet, sollen deren Flächen nicht zu glatt sein. Verschmutzte Flächen müssen nötigenfalls durch Waschen gereinigt werden. Auch ein nicht wasserabsondernder Bettungsbeton ist erforderlich. Sondert der Beton Wasser ab, so wird der Verbund an der unteren Fläche der Steine durch Wasseranreicherung unterbrochen (siehe auch Bild 5).

Die Gültigkeit und die Bedeutung des Wasserzementwertgesetzes für die Druckfestigkeit ließen sich noch mit vielen Beispielen belegen.

Im Entwurf der neuen Betonbestimmungen ist vorgesehen, bei besonders sorgfältiger Bauüberwachung, moderner Betonieranlage und betontechnisch geschulter Aufsicht für die einzelnen *Festigkeitsklassen* des Betons keine bestimmten Mindestzementgehalte mehr vorzuschreiben. Es wird dadurch bei besonderer Sachkenntnis möglich, die Betonzusammensetzung lediglich über den erforderlichen Wasserzementwert festzulegen und damit besonders zweckdienliche und wirtschaftlich günstige Mischungen einzubauen<sup>10)</sup>. Daneben soll es aber auch möglich sein, Beton bis zur Güteklasse B 225 für die große Masse der Bauten ohne die genannten Voraussetzungen herzustellen. Allerdings werden dann z. T. höhere Mindestzementgehalte als bisher und eine Begrenzung der Konsistenz des Betons nötig, damit auch auf solchen Baustellen bestimmte Wasserzementwerte – ohne daß diese im voraus festgelegt sind – mit einiger Sicherheit nicht überschritten werden.

### 3.2 Rostschutz

Es ist nach den Ausführungen über die Abhängigkeit des Porenraums vom Wasserzementwert leicht einzusehen, daß bei zu hohem Wasserzementwert, der einen Zementstein mit viel Kapillarporen zur Folge hat, der Stahl gegen Rosten nicht geschützt ist. Für den Deutschen Ausschuß für Stahlbeton wurden Untersuchungen über den Einfluß der Betonzusammensetzung auf das Rosten der Bewehrung an Betonbalken mit Stahlüberdeckungen

<sup>10)</sup> Siehe Walz, K.: Weiterentwicklung der betontechnischen Bestimmungen. (Vortrag auf dem Deutschen Betontag 1957 in Berlin). Bauingenieur 33 (1958) H. 1, S. 10.

bis herab zu 1,5 cm durchgeführt<sup>11)</sup>). Wertet man die nach 10-jähriger Lagerung der Balken im Freien erhaltenen Ergebnisse aus, so findet man, daß Betone mit Wasserzementwerten bis etwa 0,8 noch praktisch ausreichend rostschützend waren.

Im Entwurf der Betonbestimmungen ist der Mindestzementgehalt für den bewehrten, nicht besonders überwachten Beton B 160 und B 225 je nach Kornzusammensetzung und Konsistenz mit 210 bis 410 kg/m<sup>3</sup> und das Ausbreimaß mit höchstens 50 cm vorgesehen. Auch mit diesem Beton ergibt sich ungünstigenfalls kein größerer Wasserzementwert als etwa 0,8. Für den besonders überwachten Beton, der auch die Güteklassen B 300 und höher einschließt, könnte zur Sicherung des Rostschutzes der Wasserzementwert für dünnwandige Bauteile mit 0,60 und für massige, mit größerer Stahlüberdeckung mit 0,80 vorgeschlagen werden. In letzter Zeit wurden Bedenken vorgebracht, der Rostschutz könne im Laufe der Jahre durch die fortschreitende Karbonatisierung des Betons aufgehoben werden, weil dadurch die Alkalität des Betons und damit die Schutzwirkung der Passivschicht auf dem Stahl verloren gehe. Man kann diese Bedenken durch das Ergebnis neuerer Untersuchungen zerstreuen<sup>12)</sup>. An rd. 18 Jahre alten, im Freien gelagerten Betonen mit Wasserzementwerten von 0,50 bis 1,29 reichte die karbonatisierte Schicht bei Wasserzementwerten bis 0,65 nur 2...7 mm tief und mit den Wasserzementwerten bis rd. 0,85 zwischen 5 und 15 mm tief. Aber auch in diesem wenig dichten Zementstein, ebenso wie in den dichteren mit den Wasserzementwerten bis 0,65 fanden sich in dieser „karbonatisierten“ Schicht nicht karbonatisierte Reaktionsprodukte und sogar noch Klinkerreste. Eindringende Feuchtigkeit, die Voraussetzung für die Rostbildung ist, wird daher in Beton mit geschlossenem Gefüge immer alkalisch werden, so daß praktisch ausreichend lange die rostschützende Wirkung des Zementsteins erhalten bleibt.

Zu ähnlichem Ergebnis gelangten neuere japanische Untersuchungen an 20 Jahre alten Betonproben<sup>13)</sup>. Dabei wurde festgestellt, daß bei Beton mit Wasserzementwerten bis 0,70 die karbonatisierte Schicht weniger als 10 mm tief reicht und daß allgemein ein Rosten nicht auf die Karbonatisierung, sondern auf Fehler im Betongefüge zurückzuführen ist.

Die vorliegenden Untersuchungen lassen den Schluß zu, daß ein Wasserzementwert bis 0,80 in unserem Klima für Beton mit geschlossenem Gefüge eine ausreichende Sicherung gegen das

<sup>11)</sup> Graf, O.: Versuche über das Verhalten von Eiseneinlagen in Beton verschiedener Zusammensetzung. Deutscher Ausschuß für Eisenbeton H. 71, 1933; H. 80, 1935; Deutscher Ausschuß für Stahlbeton H. 97, 1941.

<sup>12)</sup> Gille, F.: Über die Tiefe der karbonatisierten Schicht in alten Betonproben, beton 10 (1960) H. 7, S. 328.

<sup>13)</sup> Takao Soda and Kanji Yamazaki: Long-time study (20 years) on the neutralization of concrete and the rusting of reinforcement in concrete. Jap. Cement Engineering Assoc. Review of the Twelfth General Meeting, Tokyo 1958. Semento Gijutsu Nenpo XII 1958, S. 91.

Rosten der Bewehrung abgibt, wenn nicht außergewöhnliche Einwirkungen, z. B. durch salzhaltige Meeresluft, zu erwarten sind.

### 3.3 Wasseraufnahme und Wasserundurchlässigkeit

Wie nicht anders zu erwarten ist, hängen auch Wasseraufnahme und Wasserdurchlässigkeit weitgehend vom Wasserzementwert ab. In Bild 4 ist die Wasseraufnahme von 14 Wochen alten 20 cm-Würfeln nach 3wöchiger Wasserlagerung wiedergegeben<sup>14)</sup>. Man erkennt, daß mit abnehmendem Wasserzementwert, d. h. kleiner werdendem Kapillar-Porenraum, die Wasseraufnahme zurückgeht. Es deutet sich dabei auch die Feststellung an (siehe unter 2), daß im vollständig hydratisierten Zementstein mit einem Wasserzementwert von höchstens etwa 0,4 wassersaugende Kapillarporen theoretisch nicht mehr vorhanden sind.

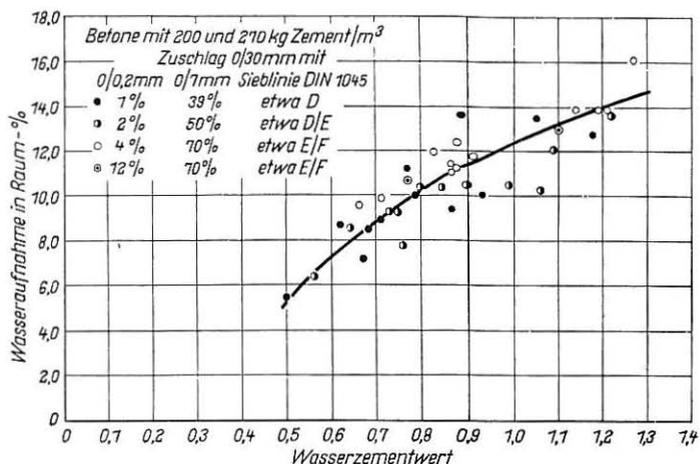


Bild 4 Beziehung zwischen Wasseraufnahme und Wasserzementwert von Beton unterschiedlicher Zusammensetzung

Damit ist nun nicht gesagt, daß Beton, der Wasserdruck ausgesetzt wird, bei einem höheren Wasserzementwert als 0,4 schon durchlässig ist. Nach amerikanischen Untersuchungen<sup>2)</sup> entspricht z. B. die Wasserdurchlässigkeitsziffer eines vollständig hydratisierten Zementsteins mit dem großen Wasserzementwert von 0,70 immer noch der eines Granits. Diese hohe Undurchlässigkeit ist vorhanden, weil die feinen, vom Überschußwasser herrührenden Kapillarporen dem Durchfließen einen großen Widerstand entgegensetzen und weil nach einer bestimmten Hydrationsdauer die Gelmenge so groß geworden ist, daß sie, in die Kapillarporen hineinwachsend, deren ursprünglich zusammenhängendes Adersystem unterbricht. Dieser Zustand wird z. B. beim Zementstein aus gewöhnlichem Portlandzement unter

<sup>14)</sup> Walz, K.: Undurchlässiger Beton. Bautechnik-Archiv, H. 13, Berlin 1956. Verlag Wilh. Ernst & Sohn.



Bild 5 Schnitt durch Beton mit zwei durch Schrumpfen und Wasserabsondern entstandenen Spalte S unter größeren Zuschlagkörnern

durchschnittlichen Verhältnissen mit einem Wasserzementwert von 0,50 nach 14tägiger Hydrationsdauer und mit 0,70 nach 1 Jahr erreicht. Ein Beton müßte also mit dem verhältnismäßig hohen Wasserzementwert von 0,70 später auch gegen hohe Drücke undurchlässig ausfallen. Dies ist jedoch praktisch nicht immer der Fall, weil der Beton oft zu früh austrocknet und daher die Gelbildung unterbrochen wird oder weil im Beton größere Strukturhohlräume vorhanden sein können, die durch Wasserabsondern des Zementleims, behindertes Schrumpfen oder unterbrochene Haftung des Zementsteins am Zuschlaggestein verursacht werden. Bild 5 zeigt zwei Spalte S, die durch Wasserabsondern unter Zuschlagkörnern entstanden und die Druckwasser wenig Widerstand entgegengesetzt. Man kann solche, während des Erstarrens entstehenden Strukturhohlräume durch Nachverdichten des Betons wieder schließen. Dies geschieht am wirkungsvollsten durch Rütteln, wenn der Zementleim schon merklich erstarrt ist, also bereits Wasser chemisch gebunden oder auch sonstwie abgegeben hat (siehe auch unter 4).

Solche Schrumpf- und Wasserspalte bilden sich vorwiegend auf der Unterseite von Zuschlagkörnern oder auch unter waagrecht liegenden Bewehrungsstäben. Sie sind, wenn hier von undichten Betonier- und Arbeitsfugen abgesehen wird, die Ursache dafür, daß Wasser durch einen Beton mit praktisch undurchlässigem Zementstein durchtreten kann. Ihren ungünstigen Einfluß erkennt man auch daran, daß der Beton in waagerechter Richtung immer durchlässiger ist als in senkrechter Richtung<sup>14)</sup>

Um möglichst bald einen undurchlässigen Zementstein zu erhalten und um das Wasserabsondern im Frischbeton und damit die Fehlstellen im Gefüge möglichst auszuschalten, ist daher für

Beton, der praktisch undurchlässig sein soll, im Entwurf der Betonbestimmungen neben einem ausreichenden Mehlkorngesamtgehalt<sup>15)</sup> und günstiger Verarbeitbarkeit der Wasserzementwert für dünnwandige Bauteile mit 0,60 und für massigere Bauteile mit 0,70 begrenzt.

Diese Grenzen sind auch nach praktischen Erfahrungen für Beton auf gut geleiteten und überwachten Baustellen ausreichend.

### 3.4 Frostbeständigkeit

Nach den vorausgegangenen Ausführungen wird im Zementstein der kapillare Porenraum zunehmend größer, wenn der Wasserzementwert über etwa 0,4 hinaus ansteigt. Deshalb kann Beton mit größerem Wasserzementwert als 0,4 durch häufiges Gefrieren zerstört werden, wenn die dann vorhandenen Poren mit Wasser vollständig gefüllt sind. Mit Hilfe luftporenbildender Zusatzmittel ist man in der Lage, beim Mischen feinste, kugelförmige Luftporen zu erzeugen, die den Zementstein sehr gleichmäßig durchsetzen und beim Gefrieren des Kapillarwassers als Puffer wirken.

So widersinnig es vor 20 Jahren anmutete, daß durch Luftporen der Frostwiderstand eines Betons erhöht wird, so haben doch die vielen Forschungsarbeiten dazu geführt<sup>15)</sup>, daß es heute zum Stande der Technik gehört, LP-Zusatzmittel zu verwenden, um einen an sich anfälligen Beton auch mit höherem Wasserzementwert als 0,4 frostbeständig herzustellen.

Es wurde auch nicht immer beachtet, daß der manchmal als unwesentlich hingestellte, durch künstliche Poren auf etwa 4% erhöhte Luftgehalt für den gesamten Beton gilt. Zieht man aber die nicht zerfrierenden Zuschlagkörner ab, so ergibt sich der Porengehalt im Zementleim je nach Betonzusammensetzung zu etwa 10 bis 18%. Es ist verständlich, daß dadurch das physikalische Verhalten des Zementsteins, auf das es in erster Linie ankommt, doch recht erheblich verändert werden kann. Um dies zu unterstreichen, sei aus den fast unübersehbar gewordenen Untersuchungen ein Beispiel herausgegriffen (Bild 6<sup>16)</sup>). Der Beton ohne LP-Zusatzmittel, der einen Wasserzementwert von 0,60 und eine Druckfestigkeit bei Frostbeginn im Alter von 3 Monaten von 489 kg/cm<sup>2</sup> aufwies, dehnte sich mit zunehmender Frostwechselzahl immer stärker aus; bereits nach 40 Frostwechseln bildeten sich die ersten Risse. Demgegenüber blieb der gleiche, mit einem LP-Zusatzmittel hergestellte Beton (Luftgehalt 3,1%) unverändert. Die geringe Dehnung von 0,08 mm/m nach 200 Frostwechseln lag im Bereich der Quellmaße wassergelagerten Betons.

<sup>15)</sup> Walz, K.: Eigenschaften und Wirkung luftporenbildender Zusatzmittel bei der Verwendung zu Beton. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 123, 1956 (mit Literaturzusammenstellung).

<sup>16)</sup> Walz, K., und G. Weil: Feststellungen über den Einfluß luftporenbildender Zusatzmittel auf die Festigkeit und die dynamische Elastizitätszahl von Beton bei Frostwechseln. Bauingenieur 30 (1955) H. 1, S. 15.

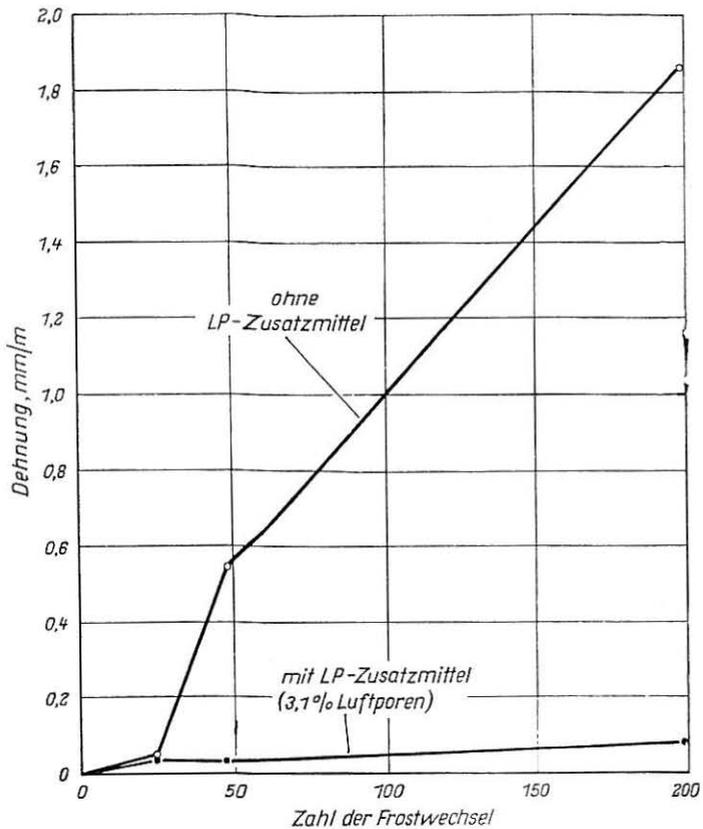


Bild 6 Dehnung von durchfeuchtem Beton durch 200 Frost-Tau-Wechsel (Prismen 10 cm × 10 cm × 55 cm)

Selten wurde auf einem Gebiet zur unmittelbaren praktischen Nutzung so viel Forschungsarbeit geleistet wie hier über die Wirkung der künstlichen Luftporen. Der erforderliche luftgefüllte Porenraum im Beton ist von dessen Mörtelgehalt abhängig; er soll z. B. im Beton mit 30 mm Größtkorn etwa 4...5% betragen. Es fand sich auch<sup>17)</sup> <sup>18)</sup> <sup>19)</sup> <sup>20)</sup>, daß zum Schutz gegen Zerkütern kugelige Poren mit einem Durchmesser nur bis etwa

<sup>17)</sup> Mielenz, R. C., V. E. Wolkodoff, J. E. Backstrom and H. L. Flack: Origin, evolution, and effects of the air void system in concrete. Part 1 — Entrained air in unhardened concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 55 (1958/59) S. 95.

<sup>18)</sup> Backstrom, J. E., R. W. Burrows, R. C. Mielenz and V. E. Wolkodoff: Origin, evolution, and effects of the air void system in concrete. Part 2 — Influence of type and amount of air-entraining agent. Proc. Amer. Concr. Inst. 55 (1958/59) S. 261.

<sup>19)</sup> Backstrom, J. E., R. W. Burrows, R. C. Mielenz and V. E. Wolkodoff: Origin, evolution, and effects of the air void system in concrete. Part 3 — Influence of water-cement ratio and compaction. Proc. Amer. Concr. Inst. 55 (1958/59) S. 359.

0,1 mm (besser nur bis 0,06 mm) besonders wirksam sind und daß der größte Abstand irgendeines Punktes des Zementsteins vom Umfang einer Luftpore nicht größer als 0,2 mm sein soll. Selbst LP-Beton, der in üblicher Weise durch Rütteln verdichtet wird, entsteht frostbeständig, weil nur die größeren, wenig wirksamen Luftporen entweichen oder größere Luftporen in feinere aufgeteilt werden. Nach neueren, sehr exakt durchgeführten amerikanischen Untersuchungen<sup>19) 20)</sup> war Beton, der durch Rütteln einige Prozente des ursprünglichen Gehalts künstlicher Luftporen verlor, trotzdem nicht weniger frostbeständig, weil sich die Anzahl der feinsten, in erster Linie wirksamen Luftporen und damit der Abstandsfaktor nicht vermindert hatten.

Interessant ist auch die Feststellung, daß der unterschiedliche Einfluß üblicher Normzemente auf den Frostwiderstand des Betons unter sonst gleichen Verhältnissen mit der Bildung von Luftporen zusammenhängt. Die Ursache für diese Eigenschaft konnte allerdings nicht entdeckt werden<sup>21)</sup>. (Eine praktische Bedeutung wird dieser Feststellung kaum zukommen, da man durch die Zugabe eines LP-Zusatzmittels am Mischer in einfacher Weise die Frostbeständigkeit eines Betons immer gewährleisten kann.)

Für Beton, der in unserem Klima durch häufige Frostwechsel beansprucht wird, ist für die Neufassung der Betonbestimmungen die obere Grenze des Wasserzementwerts mit 0,55 vorgesehen. Bei Betonen mit höheren Wasserzementwerten ist die Frostbeständigkeit auf alle Fälle durch Verwendung luftporenbildender Zusatzmittel sicherzustellen (Luftgehalt mindestens 4 %).

### 3.5 Widerstand gegen chemisch angreifende Wässer und Böden

Wenn oben der Einfluß des Wasserzementwerts auf die Wasseraufnahme des Betons und auf den Porenraum im Zementstein herausgestellt wurde, so bedarf es keiner weiteren Erklärung dafür, daß auch der Widerstand eines Betons gegen chemische Angriffe mit abnehmendem Wasserzementwert allgemein größer wird. Ist der Zementstein sehr dicht, wie bei niederem Wasserzementwert, und werden Strukturhohlräume durch sorgfältige Verarbeitung vermieden, so kann angreifende Flüssigkeit nur an der Betonoberfläche auf den Zementstein wirken. Durchgehende Zerstörungen, z. B. durch Einwirken von natürlichem, sulfathaltigem, huminsaurem oder kohlenstoffhaltigem Wasser, sind vor allem dort festgestellt worden, wo der Beton im heutigen Sinn nicht dicht war und bis ins Innere völlig von Wasser durchdrungen werden konnte.

<sup>19)</sup> Mielenz, R. C., V. E. Walkodoff, J. E. Backstrom and R. W. Burrows: Origin, evolution and effects of the air void system in concrete. Part 4 — The air void system in job concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 55 (1958/59) S. 507.

<sup>21)</sup> Walz, K.: Über den Einfluß des Zements auf den Widerstand des Betons gegen häufiges Durchfrieren. beton 10 (1960) H. 4, S. 164.

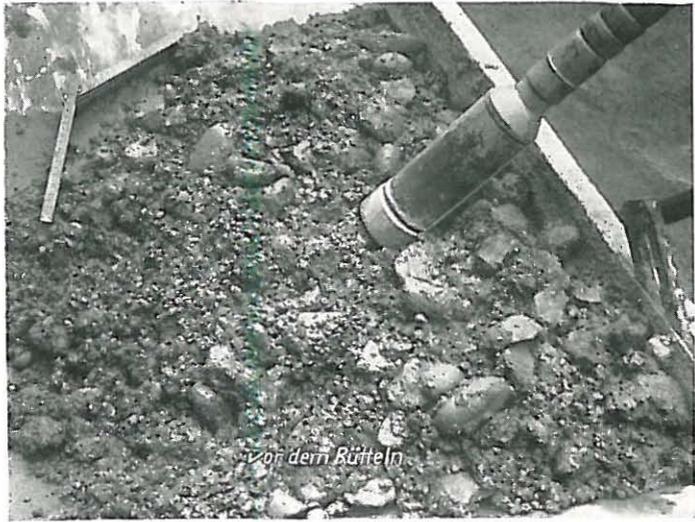


Bild 7 Steifer Rüttelbeton mit zweckmäßigem Wassergehalt vor und nach dem Rütteln (Feinmörtel des Betons vor dem Rütteln glänzend-feucht; siehe oberes Bild)

Ist mit schwachen Angriffen zu rechnen, so darf nach dem Entwurf der Betonbestimmungen der Wasserzementwert des Betons nicht über 0,55, bei stärkeren Angriffen nicht über 0,45 liegen. Darüber hinaus muß durch Wahl geeigneter Zemente erreicht werden, daß auch an der Oberfläche ein Angriff, z. B. durch Meerwasser oder stark sulfathaltige Wässer, unterbleibt oder – wie bei Einwirkung natürlicher saurer Wässer – durch sehr dichten Beton so beschränkt wird, daß der Bestand eines Bauwerks nicht gefährdet ist.

#### 4. Verdichten des Betons

Bisher wurden die Zusammenhänge zwischen Wasserzementwert und Betoneigenschaften behandelt. Dabei wurde stets betont, daß diese nur gelten, wenn der Beton vollständig verdichtet ist. Daher soll abschließend noch auf die Möglichkeiten eingegangen werden, die die Rüttelverdichtung hierzu bietet.

Durch die Entwicklung der Rüttler und viele Untersuchungen auf diesem Gebiete<sup>22)</sup> wurde ein wesentlicher Beitrag zur Gütesteigerung und zur wirtschaftlichen Herstellung des Betons geleistet.

Grundsätzlich ist zu beachten, daß durch Rütteln keine wesentliche Gütesteigerung gegenüber gleichem Beton zu erwarten ist, der auf andere Weise ebenso weitgehend verdichtet wird. Doch wurde es erst durch die Rütteltechnik in der Praxis überhaupt möglich, auch steifen und grobkörnigen Beton ohne viel Aufwand zuverlässig zu verdichten und die mit einem niederen Wasserzementwert verbundenen Vorteile voll zu nutzen.

Die vom Rüttler ausgehenden Schwingungen werden auf die Bestandteile des Betons übertragen. Zweckmäßig zusammengesetzter, steifer Beton nimmt dabei die Eigenschaften einer zähen Flüssigkeit an, so daß der Beton zusammenhängend fließt, die Schalung ausfüllt und unter dem Einfluß der Schwerkraft eingeschlossene Luft nach oben entweichen läßt. Doch ergaben alle Untersuchungen, daß sich ein steifer Beton nur dann durch Rütteln noch optimal verdichten läßt, wenn der Zementleim oder Feinmörtel mindestens so feucht ist (Bild 7, oben), daß er während des Rüttelns eine zähflüssige, klebende Konsistenz annimmt (Bild 7, unten). Ist der Wasserzementwert des Zementsteins sehr niedrig, so reichen die eingeleiteten Schwingungen nicht mehr aus, um die großen kapillaren Haftkräfte des sehr dünnen Wasserfilms zu überwinden, der die Zement- und feinsten Sandkörnchen umhüllt. Dann fließt aber auch das Zwickel-Kapillarwasser nicht zusammen, und es entsteht kein dichter Zementstein. Auch die Schwingungsausschläge des Rüttlers oder der Schalung werden erst voll auf den Beton übertragen, wenn die Betonschüttung mit einem klebenden Zementleim- oder Feinmörtelfilm an der schwingenden Fläche haftet. Wir erkennen damit, daß auch beim Rüttelbeton der Gütesteigerung durch Vermindern des Wasserzementwerts eine Grenze gesetzt ist. (Beim Rütteln unter Pressung liegen die Verhältnisse etwas anders.)

Bei einer bestimmten Verdichtungseinwirkung, bei den Versuchen in Bild 8 durch einen Oberflächenrüttler<sup>22)</sup>, steigt daher die Festigkeit mit abnehmendem Wasserzementwert nur so lange an, wie die Steife des Zementleims, gekennzeichnet durch den Wasserzementwert, eine vollständige Verdichtung erlaubt. Wird der Wasserzementwert noch weiter gesenkt, z. B. nach Bild 8 unter den Wert von 0,44, so wird der Beton nicht mehr völlig verdichtet und die Festigkeit deshalb wieder kleiner.

<sup>22)</sup> Walz, K.: Rüttelbeton. 3. Auflage. Verlag Wilh. Ernst & Sohn, Berlin 1960.

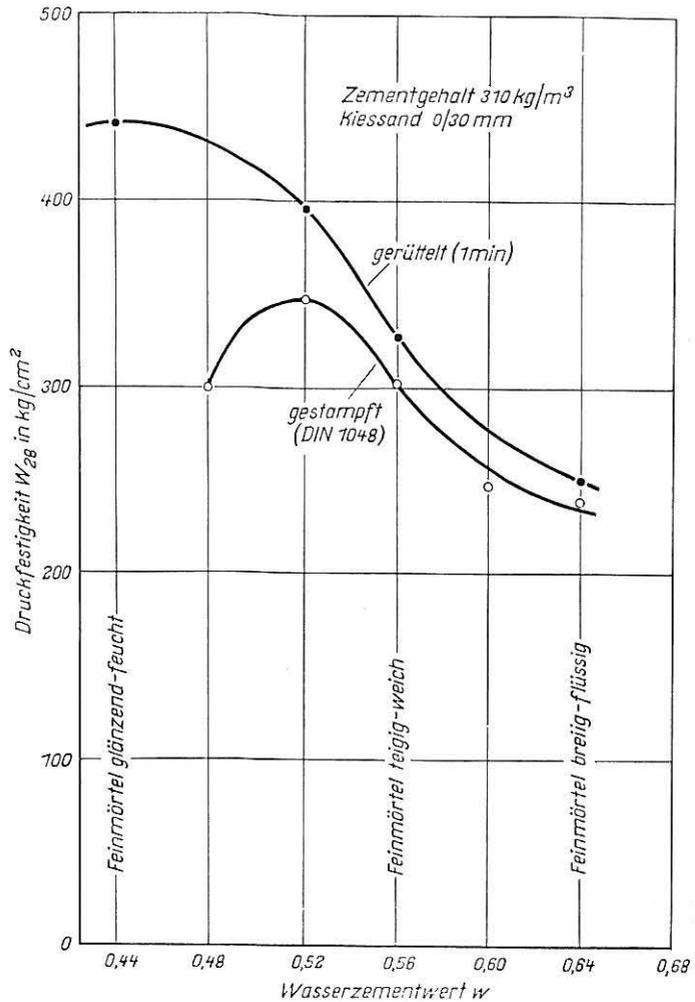


Bild 8 Druckfestigkeit von gerütteltem und gestampftem Beton mit verschiedenem Wasserzementwert

Im Beispiel (Bild 8) blieb nach sehr starkem Verdichten durch Stampfen selbst im wasserreicheren Beton mit höheren Wasserzementwerten die Druckfestigkeit stets geringer als im Rüttelbeton. Wesentlich ist vor allem, daß der Wendepunkt in dem durch Stampfen weniger verdichteten Beton schon bei einem Wasserzementwert von 0,52 erreicht war<sup>23)</sup>. Wie weit der Wasserzementwert gesenkt werden kann, damit der Feinmörtel beim Rütteln noch ausreichend flüssig wird, hängt von den mechanischen Größen des Rüttlers ab. Für die Wirkung eines Innenrütt-

<sup>23)</sup> Siehe auch Hummel, A.: Das Beton-ABC, 12. Auflage. Verlag Wilh. Ernst & Sohn. Berlin 1959, S. 93.

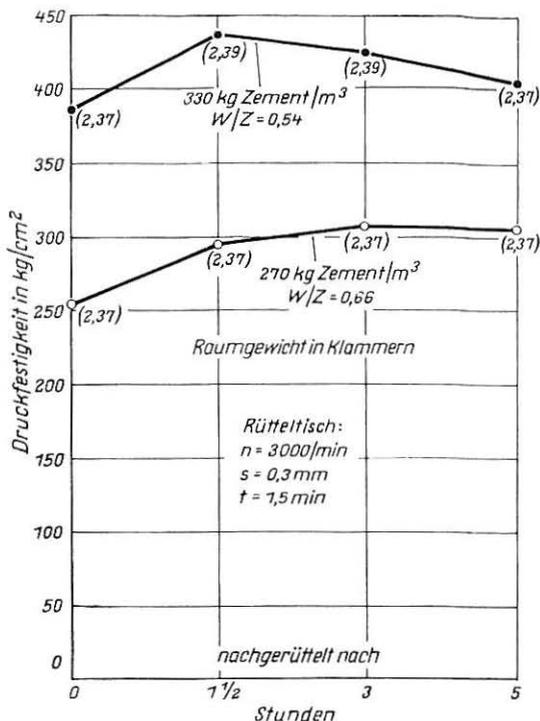


Bild 9 Druckfestigkeit von nachgerüttelten Betonen

lers sind die in der Zeiteinheit von der Rüttelflasche ausgeübten Stöße und das Arbeitsvermögen des einzelnen Stoßes von Bedeutung. Bestimmend hierfür sind im wesentlichen die Schwingungszahl, die Zentrifugalkraft und das Gewicht der Flasche. Man darf daher nicht, wie dies in der Praxis häufig geschieht, ohne weiteres folgern, daß allein eine hohe Schwingungszahl auch immer eine hohe Verdichtungsleistung verbürgt.

Wird von einigen Sonderfällen abgesehen, so liegt nach den Untersuchungen im Laboratorium und den Feststellungen auf der Baustelle kein Bedürfnis vor, für den üblichen Baustellenbeton die Wirkung der zur Verfügung stehenden Rüttler noch allgemein zu ändern oder zu steigern. Ein Fortschritt könnte erwartet werden, wenn es gelänge, z. B. durch zusätzliche Einleitung von besonderen, aber weitreichenden Schwingungen, den wasserarmen Zementleim in einem sehr trockenen Beton mit extrem niederem Wasserzementwert (z. B. von 0,20) ebenfalls zu verflüssigen<sup>22</sup>).

Die durch die technisch-wissenschaftlichen Untersuchungen über die Rüttelverdichtung gewonnenen Erkenntnisse fanden ihren Niederschlag in Richtlinien für die Verwendung von Innenrüttlern (DIN 4235) sowie für Rütteltische (DIN 4236) und können so von der Praxis genutzt werden. Auch diese Richtlinien werden

laufend durch neue Feststellungen ergänzt. Z. B. sollte allgemein berücksichtigt werden, daß bereits verdichteter Beton während des Erstarrens durch leichte Rüttelerschütterungen oder -schwingungen nicht geschädigt wird. Dadurch kann, wie Bild 9 als Beispiel aus vielen Untersuchungen zeigt, die Güte des Betons sogar noch verbessert werden. Diese günstige Wirkung kommt zustande, weil durch Schwingungen oder schwache Erschütterungen feine Hohlräume und Lockerungen, die durch abgesondertes Wasser und durch Schrumpfen entstanden, in dem noch schwach verformbaren Beton wieder geschlossen werden (siehe unter 3.3). Diese Ausführungen und Beispiele mögen genügen, um zu zeigen, daß mit der Vertiefung unseres Wissens um den Aufbau des Betons auch gleichlaufend das über die Verdichtungstechnik nutzbringend erweitert wurde.

## **5. Zusammenfassung**

Mit den vorausgegangenen Ausführungen wurde versucht, in einem Querschnitt zu erläutern, wie technisch-wissenschaftliche Untersuchungen die Zusammenhänge zwischen Zusammensetzung und Eigenschaften des Betons klären und damit zur Weiterentwicklung der Bestimmungen und zur sachgemäßen Verwendung des Betons beitragen. Eine beherrschende Bedeutung kommt in der neueren Betontechnologie dem Wasserzementwert zu. Wir können heute, begründet durch Untersuchungen über die Wasserbindung und Struktur des Zementsteins die Grenzen für den Wasserzementwert angeben, die Voraussetzung dafür sind, daß Beton bestimmter oder besonders hoher Festigkeit sowie mit zuverlässigem Rostschutz, hoher Undurchlässigkeit und Beständigkeit entsteht.

Solche durch die Forschung auf betontechnischem Gebiet gewonnenen Erkenntnisse tragen dazu bei, die Sicherheit und Wirtschaftlichkeit der Betonbauweise zu steigern und Bauwerke oder Betonzeugnisse zu schaffen, wie sie früher nicht möglich oder anderen Baustoffen vorbehalten waren.

Meist sind es zunächst nur vereinzelte Unternehmer oder aufgeschlossene Stellen der Bauaufsicht, die neuen Erkenntnissen zur ersten Anwendung verhelfen.

Eine breite Anwendung und vollen Nutzen erlangen solche Erkenntnisse aber erst, wenn sie durch Ausschüsse mit verantwortungsbewußten Fachleuten in allgemein anwendbare und fortschrittliche Richtlinien, Normen oder Bestimmungen gefaßt werden.