

Kennzeichnung der Betonkonsistenz durch das Verdichtungsmaß v

Von Kurt Walz, Düsseldorf

Übersicht

Nach früheren Untersuchungen hängt die Schüttdichte eines Betons aus gleichen Ausgangsstoffen und mit gleichem Mischungsverhältnis von seinem Wassergehalt ab, der auch die Konsistenz dieser Mischung bestimmt. Hieraus wurde ein Verfahren zur Kennzeichnung der Konsistenz durch das sogenannte Verdichtungsmaß abgeleitet, das keinen besonderen Geräteaufwand erfordert. Wegen seiner Einfachheit bietet es sich vor allem für die Baustelle an. — Der Beton wird in einen Behälter von 40 cm Höhe und 20 cm · 20 cm Querschnitt lose eingefüllt und auf beliebige Weise vollständig verdichtet. Mit der Höhe h der verdichteten Füllung (in cm) ergibt sich das Verdichtungsmaß v (Konsistenzgrad) zu $v = 40/h$. — Das Verfahren ist über den ganzen praktisch vorkommenden Konsistenzbereich und mit größerem Behälter auch für Massenbeton mit beliebigem Größtkorn anwendbar. Für weichen, wenig Verdichtungsarbeit erfordernden Beton liegt v um 1,05, für plastischen Beton um 1,20 und für steilen Beton um 1,40. Die Prüfstreuung ist bei wiederholten Feststellungen an der gleichen Mischung gering; Änderungen der Konsistenz werden durch das Verdichtungsmaß ausreichend zuverlässig erfaßt. — Man kann auch ein Verdichtungsmaß v^1 durch eine nach Art und Verdichtungsarbeit begrenzte Einwirkung bestimmen und mit ihm die Verdichtungswilligkeit eines Betons durch Vergleich mit v beurteilen.

1. Einleitung

Zur Beurteilung der Frischbetoneigenschaften sind, außer der Betonzusammensetzung, auch Kennwerte für die Verarbeitbarkeit erforderlich. Als wichtiger Kennwert gilt ein Maß für die Konsistenz. Schon vor einer Reihe von Jahren wurden zur Prüfung der Konsistenz zahlreiche Verfahren entwickelt (Übersicht bis zum Jahre 1933 siehe [1]). Zum Teil wurde damit auch ein begrenzter Aufschluß über die zu erwartende Verarbeitbarkeit — neben Konsistenz auch Zusammenhalt und Verdichtungswilligkeit — gewonnen. Auch in den folgenden Jahren und bis in die jüngste Zeit wurden immer wieder neue Prüfverfahren vorgeschlagen (Hinweise siehe auch [2, 3, 5]). Die für Massenbeton und Konstruktionsbeton überwiegend angewandte Rüttelverdichtung führte zur Entwicklung zahlreicher, dieser Verdichtungsart angeglichener Geräte zur Bestimmung der Konsistenz oder der Rüttelwilligkeit (Übersicht siehe [3, 4, 5]).

Sind bei der Eignungsprüfung die für eine bestimmte Bauausführung zweckmäßige Betonmischung und ihr Konsistenzmaß festgelegt worden, so erhält man durch das Konsistenzmaß einmal eine zahlenmäßige Vorstellung über die Frischbetonbeschaffenheit und zum anderen auf der Baustelle die Möglichkeit, die Mischungen auf Gleichmäßigkeit, besonders hinsichtlich des Wassergehalts¹⁾, zu überwachen.

Für die Baustelle wird zur Überwachung einer festgelegten Konsistenz ein Verfahren benötigt, das einfach und mit robustem Gerät ausführbar ist. Es soll ausreichend empfindlich sein und gestatten, alle praktisch vorkommenden Mischungen und Konsistenzgrade zu erfassen.

In DIN 1048 sind für steifen Beton der Eindringversuch und für weichen Beton der Ausbreitversuch vorgesehen. Beide, allerdings nur für begrenzte Steifebereiche anwendbare, Verfahren sind zur Festlegung der Konsistenz und zur Überwachung ausreichend; sie werden jedoch für die Baustelle oft als zu umständlich bezeichnet.

Bei früheren Untersuchungen [2] ergab sich, daß die Schüttdichte eines Betons („Raumgewicht“ des lose geschütteten Betons) allgemein von seiner Zusammensetzung abhängt und daß bei sonst gleicher Mischung eine besonders enge Beziehung zwischen der

¹⁾ Hierbei ist vorausgesetzt, daß die übrige Mischungszusammensetzung etwa gleich bleibt.

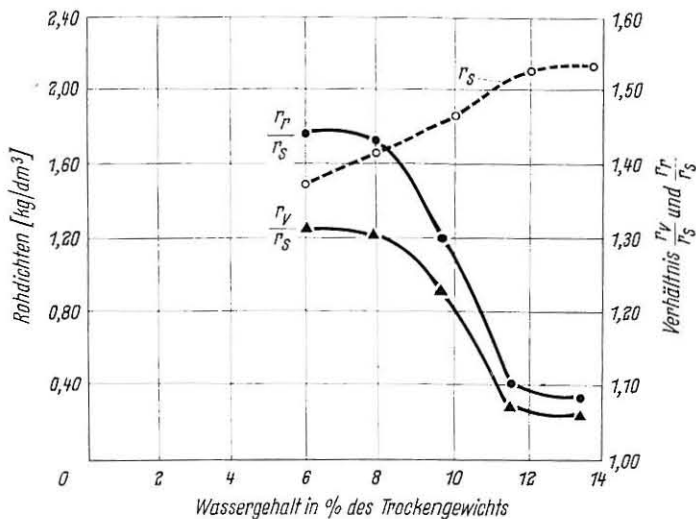


Bild 1 Rohdichten von Beton gleichen Mischungsverhältnisses, jedoch mit verschiedenem Wassergehalt [2]. Zementgehalt 240 kg/m³; Zuschlaggemisch aus gebrochenem Porphyr 0/30 mm, etwa nach Sieblinie D (DIN 1045).

r_s = Rohdichte des lose in eine 30 cm-Würfelform geschütteten Betons,

r_r = Rohdichte des praktisch vollständig verdichteten Betons,

r_v = Rohdichte des durch eine begrenzte Verdichtungsarbeit (hier eine bestimmte Stampfarbeit) verdichteten Betons

Schüttrohdichte und dem Wassergehalt bzw. der Konsistenz der Mischung besteht. Ein Beispiel aus diesen Untersuchungen ist in Bild 1 wiedergegeben. Wird die Rohdichte r_r des vollständig verdichteten Betons ins Verhältnis zu seiner Schüttrohdichte r_s gesetzt, so erhält man eine Verhältniszahl r_r/r_s , die mit zunehmendem Wassergehalt kleiner wird und dem Wert 1,0 zustrebt. Man erkennt, daß sich der Beton nach den Feststellungen in Bild 1 im Vergleich zum Volumen des vollständig verdichteten Betons um so lockerer schüttete, d. h. um so steifer und sperriger war, je weniger Wasser er enthielt. (Man kann weiter die Rohdichte des Betons r_v bestimmen (Bild 1), die mit einer festgelegten, begrenzten Verdichtungsarbeit und Verdichtungsart erreicht wird, und erhält dafür das Verhältnis r_v/r_s . Die Verdichtbarkeit eines Betons ist bei der gewählten Verdichtungseinwirkung (v) und einem bestimmten Wassergehalt um so ungünstiger, je weiter die beiden Linienzüge r_r/r_s und r_v/r_s auseinanderliegen.)

Zur Kennzeichnung der Konsistenz ist es aber nicht nötig, die Rohdichte selbst zu ermitteln. Die gleichen Beziehungen ergeben sich, wenn z. B. in einem prismatischen Behälter, der zur üblichen Ermittlung der Rohdichte des Betons dient (z. B. Würfelform), nur die Volumina oder – noch einfacher – nur die Schichthöhen der verschieden stark verdichteten Füllung bestimmt werden. Man erhält die gleichen Verhältniszahlen wie in Bild 1, wenn die Höhe der losen Füllung und die der vollständig verdichteten Füllung zueinander ins Verhältnis gesetzt werden. Es zeigte sich, daß mit diesem Verhältniszahl aus den beiden Schichthöhen (Verdichtungsmaß) die Konsistenz eines Betons einfach gekennzeichnet werden kann. Bei früheren Untersuchungen wurde eine 30 cm-Würfelform als Behälter zur Aufnahme der Schüttung benutzt; aus solchen Unter-

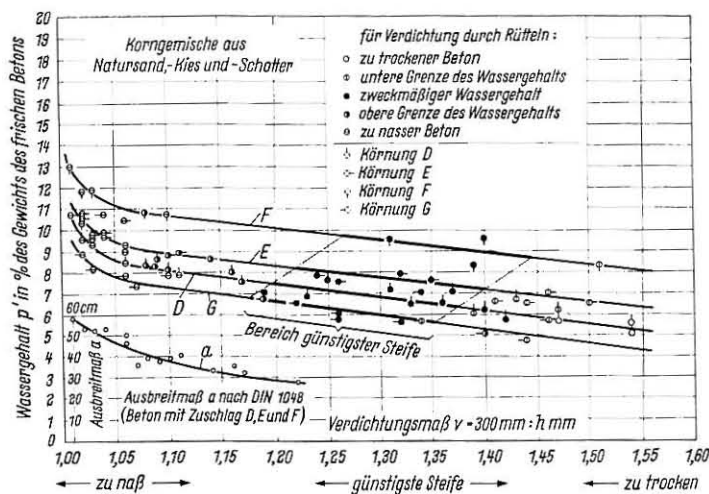


Bild 2 Beziehung zwischen Verdichtungsmaß v , Kornzusammensetzung des Zuschlaggemisches und Wassergehalt p' für Rüttelbeton. D, E, F = Zuschlaggemische nach DIN 1045 mit 30 mm Grösstkorn aus Natursand und Kies; G = Zuschlaggemische mit Grösstkorn bis 70 mm und 40 bis 50 % gut gekörntem Sand 0/7 mm [4]

suchungen stammt Bild 2 [4]. Diese frühere Darstellung dürfte auch der Anlaß für die Benutzung des Verdichtungsmaßes zur Konsistenzüberwachung auf Massenbetonbaustellen und in Laboratorien gewesen sein. Da 30 cm-Würfelformen nicht immer greifbar sind und da für üblichen Beton mit 30 mm oder höchstens 50 mm Größtkorn auch die in der Regel immer vorhandene 20 cm-Würfelform als Versuchsbehälter ausreicht, wird nunmehr das Verdichtungsmaß in der 20 cm-Würfelform mit dicht aufgesetztem, 20 cm hohem Aufsatzkasten (DIN 1048) oder besser in einem besonderen, leicht zu handhabenden, 40 cm hohen Blechbehälter mit 20 cm · 20 cm lichtem Querschnitt ermittelt. Dieser Behälter mit dem verhältnismäßig engen Querschnitt hat ferner den Vorteil, daß der Schüttvorgang eindeutiger festgelegt werden kann. Für steifen Massenbeton sind je nach Größtkorn (z. B. 70 mm, 120 mm, 150 mm) entsprechend größere Behälter zu benutzen.

2. Ermittlung des Verdichtungsmaßes v

Das Vorgehen ist schematisch in Bild 3 wiedergegeben. Als besondere Geräte werden gemäß Bild 4 benötigt: Stahlblechbehälter mit 40 cm Höhe und 20 cm · 20 cm Querschnitt, trapezförmige Kelle 10/16 cm, Abstreichlineal und Meterstab. Der zu untersuchende Beton wird in einer Menge von mindestens 30 l der Mischung an verschiedenen Stellen entnommen und gründlich von Hand durchgemischt. Dadurch sollen Entmischungen behoben und während des Transportes zum Prüfgerät vorverdichtete Partien

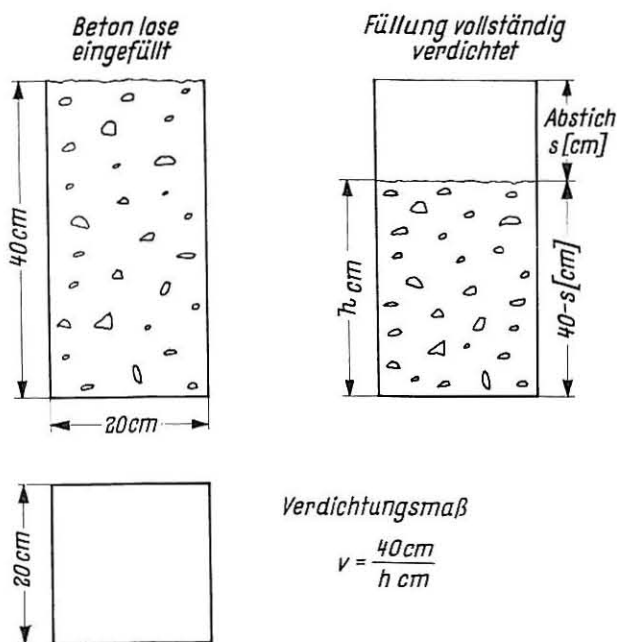


Bild 3 Ermittlung des Verdichtungsmaßes v in einem Behälter von 40 cm Höhe und 20 cm · 20 cm lichem Querschnitt

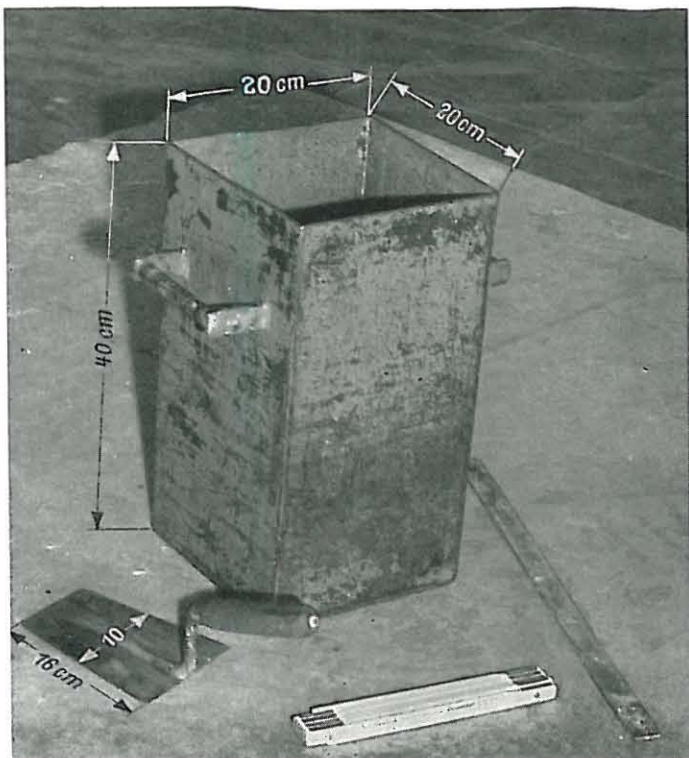


Bild 4 Geräte zur Bestimmung des Verdichtungsmaßes: Stahlblechbehälter 40 cm · 20 cm · 20 cm, Kelle 10/16 cm, Abstreichlineal und Meterstab für den Abstich s

wieder so aufgelockert werden, daß das Schüttverhalten des Betons dem beim Verlassen der Mischmaschine entspricht. Dann wird der Beton gemäß Bild 5 von der voll beladenen Kelle vom Rand des Behälters aus über eine Längskante der Kelle langsam in den Behälter abgekippt. Das Abkippen erfolgt reihum von den einzelnen Kanten aus, bis der 40 cm hohe Behälter gefüllt ist und abgestrichen werden kann (Füllhöhe 40 cm). Die Füllung wird vorsichtig, ohne irgendeine Verdichtungseinwirkung, abgestrichen und die Oberfläche nicht weiter behandelt oder geglättet; anschließend wird der Beton auf irgendeine Weise, am besten durch Rütteln, so lange verdichtet, bis kein Zusammensacken mehr eintritt, siehe Bild 6. Nach dem Ebnen der Oberfläche wird durch Abstich s an wenigstens 4 Stellen (Bild 3) die Höhe h (Mittelwert) der vollständig verdichteten Füllung ermittelt²⁾.

Als Konsistenzmaß gilt das Verdichtungsmaß

$$v = 40 : h$$

²⁾ Die Ermittlung des Verdichtungsmaßes nach dieser Anleitung ist inzwischen in die „Richtlinien für den Bau von Betonfahrbahnen“ aufgenommen worden [6]. Eine Beschreibung des Verfahrens, unter Verwendung der 30 cm-Würfelform, findet sich auch in [7].

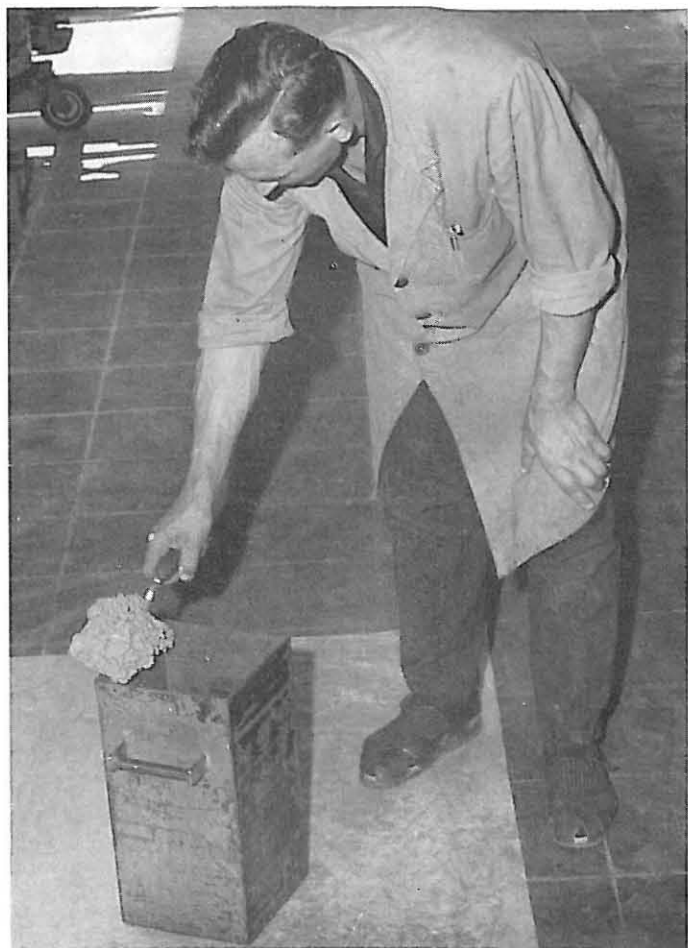


Bild 5 Füllen des Behälters 40 cm · 20 cm · 20 cm durch langsames Abkippen des Betons von den Behälterkanten aus

3. Untersuchungen

Im folgenden wird das Ergebnis einiger kennzeichnender Untersuchungen wiedergegeben.

3.1 Einfluß des Wassergehalts

In Bild 7 ist das Verdichtungsmaß v zahlreicher, sehr unterschiedlich zusammengesetzter Mischungen abhängig vom Wassergehalt aufgetragen. Die Mischungen wurden im Laboratorium anlässlich anderer Untersuchungen während eines größeren Zeitraums hergestellt. Man kann daraus entnehmen, daß die Betone, die den ganzen Bereich zwischen weicher und steifer Konsistenz überdecken, bei einem von rd. 200 auf 140 l/m^3 abnehmenden Was-



Bild 6 Vollständiges Verdichten des ursprünglich mit losem Beton gefüllten Behälters durch einen mittig eingeführten Innenrüttler (auch durch kräftiges Stampfen möglich)

sergehalt Verdichtungsmaße v zwischen rd. 1,02 bis 1,40 aufwiesen. Betone gleichen Verdichtungsmaßes hatten im großen und ganzen einen um so höheren Wasseranspruch, je feinkörniger das Zuschlaggemisch war. Da der für eine bestimmte Konsistenz erforderliche Wassergehalt von weiteren Einflußgrößen der Mischungszusammensetzung, wie Kornform, Zement- und Feinstsandgehalt, abhängt, darf nicht erwartet werden, daß für sehr unterschiedlich zusammengesetzte Betone eine engere Beziehung zwischen Wassergehalt und Verdichtungsmaß besteht.

Wird dagegen, wie in Bild 8, der Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Verdichtungsmaß für sonst gleichen Beton dargestellt, so tritt eine klare Abhängigkeit des Verdichtungsmaßes vom

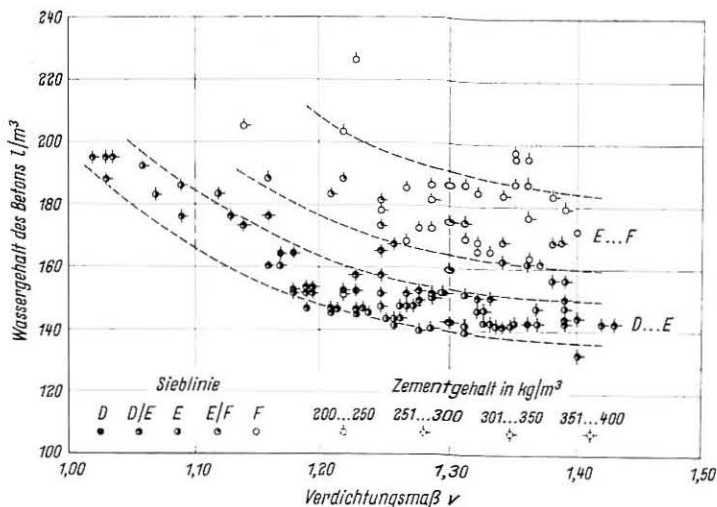


Bild 7 Verdichtungsmaß v von Betonen aus verschiedenen zusammengesetzten Zuschlaggemischen 0/30 mm (Natursand, Kies oder Splitt) mit Wassergehalten von rd. 200 bis 140 l/m^3 und Zementgehalten von rd. 200 bis 400 kg/m^3

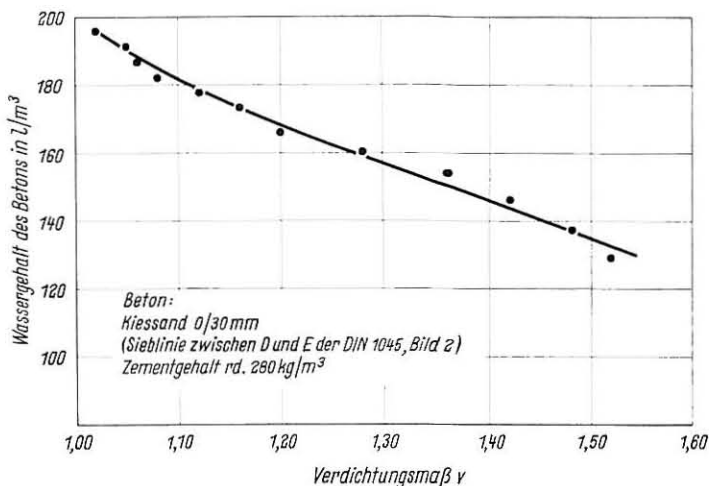


Bild 8 Verdichtungsmaß v eines Betons mit verschiedenen Wassergehalten (rd. 200 bis 140 l/m^3)

Wassergehalt hervor. Das Verdichtungsmaß sprach bereits auf verhältnismäßig geringe Änderungen des Wassergehalts sowohl im weichen als auch im steifen Bereich an. Die Abhängigkeit des Verdichtungsmaßes vom Wassergehalt zeigte sich auch noch, allerdings mit größerem Streubereich, bei den Betonen nach Bild 9, die bei gleicher Kornzusammensetzung des Kiessandes verschiedenen Zementgehalt (240 und 330 kg/m^3) aufwiesen [8].

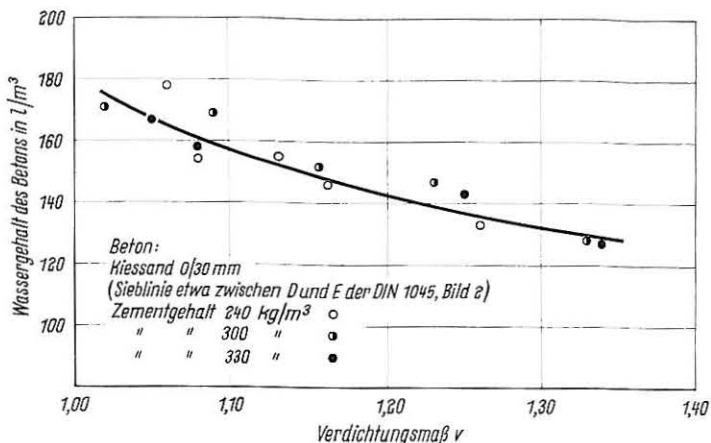


Bild 9 Verdichtungsmaß von Betonen 0/30 mm mit unterschiedlichem Wasser- und Zementgehalt (nach [8], Tafeln 1 bis 3), ermittelt in der 30 cm-Würfelform; siehe auch [7]

3.2 Reproduzierbarkeit

Zur Beurteilung der Streuung durch verschiedene Ausführende wurde das Verdichtungsmaß einer steifen und einer weichen Betonmischung nacheinander von acht, zum Teil ungeübten Laboranten gemäß Abschnitt 2 bestimmt. Der Beton enthielt rd. 270 kg Zement/m³; die Sieblinie des Kiessandes 0/30 mm verlief in der Mitte des günstigen Sieblinien-Bereichs D . . . E der DIN 1045. Es fand sich nacheinander für den steifen Beton

$$v = (1,42 + 1,43 + 1,42 + 1,44 + 1,45 + 1,45 + 1,45 + 1,47) : 8 = \mathbf{1,44.}$$

Die Streuung (Standardabweichung), die allerdings nur aus 8 Werten ermittelt wurde und die auch die Veränderung durch eine zunehmende Versteifung einschließt, betrug weniger als 0,02.

Für den weichen Beton wurde erhalten

$$v = (1,19 + 1,21 + 1,20 + 1,25 + 1,22 + 1,22 + 1,25 + 1,24) : 8 = \mathbf{1,22}$$

mit einer Streuung von etwas mehr als 0,02.

Die 8 Bestimmungen an der gleichen Mischung erstreckten sich über rd. 35 min, so daß dadurch und durch das wiederholte Durchmischen eine mäßige Versteifung der Mischung eintrat, die sich auf das Verdichtungsmaß auswirkte. Die Verdichtungsmaße, die von den acht Ausführenden ermittelt wurden, sind in Bild 10, abhängig von der seit der ersten Bestimmung verflossenen Zeit, aufgetragen. Die eingezeichneten, durch Regressionsrechnung (Methode der kleinsten Quadrate) erhaltenen beiden Geraden zeigen eine geringe Versteifung des Betons an, die eine zunehmende Erhöhung von v bis zum Versuchsende um etwa 0,05 bedingte und die zur Beurteilung der eigentlichen Prüfstreuung zu eliminieren ist. Geschieht dies, so sinkt die Streuung für die

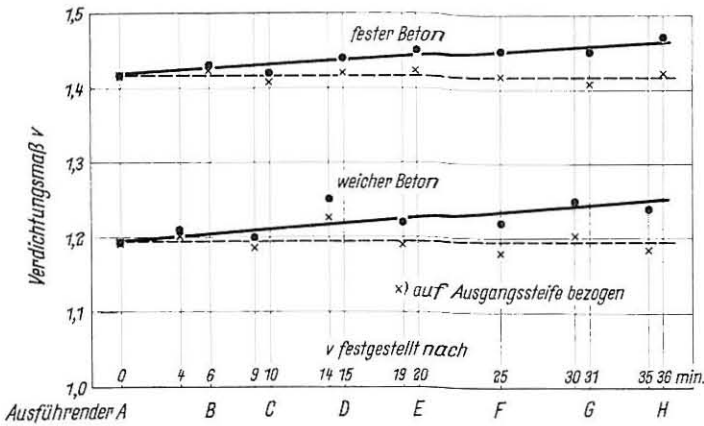


Bild 10 Verdichtungsmaß v für steifen und weichen Beton, ermittelt durch acht Ausführende an der gleichen Mischung (rd. 270 kg Zement je m^3 ; Kiessand 0/30 mm mit einer Sieblinie in der Mitte zwischen D und E nach DIN 1045)

Wiederholprüfung durch verschiedene Ausführende auf weniger als 0,01 (steifer Beton) oder etwas weniger als 0,02 (weicher Beton). Demnach lag die Streuung bei Ermittlung des Verdichtungsmaßes an derselben Mischung durch verschiedene Ausführende in sehr engen Grenzen. Da der gesamte Meßbereich des Verdichtungsmaßes von 1,00 bis 1,50 reicht, also 0,50 beträgt, so liegt der zu erwartende Fehler (dreifache Standardabweichung) unter 10 %. Im allgemeinen (zweifache Standardabweichung) entsprechend rd. 95 % der Fälle) liegt der Fehler unter 6 %. Das bedeutet für ein so einfaches Prüfgerät eine ausgezeichnete Reproduzierbarkeit.

Weiter wurde im Laboratorium untersucht, welche Verdichtungsmaße 3 verschieden steife Betone aufweisen, wenn diese 3mal an verschiedenen Tagen hergestellt und geprüft werden. Der steif, plastisch oder sehr weich angemachte Beton wies einen Zementgehalt von rd. 310 kg/m^3 auf; die Sieblinie des Kiessandes 0/30 mm verlief etwas unterhalb der Sieblinie E (DIN 1045). Aus jeder Mischung wurde durch zwei Laboranten das Verdichtungsmaß insgesamt 3mal bestimmt, siehe Tafel 1.

Tafel 1 Verdichtungsmaße v einer steif, plastisch und sehr weich angemachten Betonmischung an 3 verschiedenen Tagen

Betonherstellung am	Verdichtungsmaß v		
	bei steifer Mischung	bei plastischer Mischung	bei sehr weicher Mischung
27. 2. 1963	(1,42 + 1,44 + 1,43): 3 = 1,43	(1,16 + 1,16 + 1,16): 3 = 1,16	(1,03 + 1,03 + 1,02): 3 = 1,03
28. 2. 1963	(1,42 + 1,41 + 1,42): 3 = 1,42	(1,12 + 1,15 + 1,12): 3 = 1,13	(1,03 + 1,03 + 1,03): 3 = 1,03
19. 3. 1963	(1,38 + 1,38 + 1,42): 3 = 1,39	(1,06 + 1,10 + 1,12): 3 = 1,09	(1,02 + 1,02 + 1,02): 3 = 1,02
Gesamtmittel	1,41	1,13	1,03

Selbst die an verschiedenen Tagen erhaltenen mittleren Verdichtungsmaße weichen demnach vom Gesamtmittel nur wenig ab, obwohl eine gleichgerichtete, offenbar von äußeren Verhältnissen herrührende Abnahme von v bei den späteren beiden Prüfungen feststellbar ist. Die 3 zueinandergehörenden Einzelwerte einer Bestimmung liegen in der Regel nahe zusammen (dabei richteten sich die Ausführenden noch nicht nach einer besonderen Anleitung, wie sie jetzt in Abschnitt 2 für das Füllen des Behälters gegeben ist).

4. Verdichtungsmaß und Verarbeitbarkeit

Abschließend wird in Bild 11 versucht, die Zusammenhänge zwischen Verdichtungsmaß v , Konsistenzgrad³⁾, erforderlichem Verdichtungsaufwand bzw. erforderlicher Verdichtungseinwirkung allgemein wiederzugeben. Diese Darstellung, die nach Beobachtungen bei den Laboratoriumsuntersuchungen aufgestellt wurde, kann nur als grober Anhalt dienen, da der Konsistenzgrad, hier das Verdichtungsmaß v , lediglich eine der Eigenschaften des Frischbetons ist, die seine Verarbeitbarkeit bestimmen.

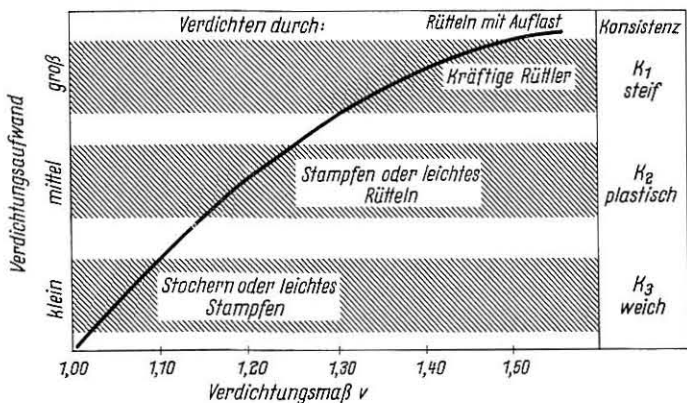


Bild 11 Verdichtungsmaß (Konsistenz) und Verdichtungsaufwand für Beton 0/30 mm (grobe Richtwerte; eine Verschiebung der Grenzen ist je nach Kornzusammensetzung, Mehlkorngelalt, Kornform, Abmessungen des Bauteils, Bewehrung usw. möglich)

5. Zusammenfassung

Mit dem Verdichtungsmaß v läßt sich die Konsistenz des Betons sowohl im steifen als auch weichen Bereich zuverlässig kennzeichnen. Es spricht auf Veränderungen des Wassergehalts einer Mischung gut an. Die Versuchsdurchführung ist für die Baustelle einfach und erfordert nur Geräte, die unempfindlich und leicht beschaffbar sind. Die Anzeigegenauigkeit des Prüfverfahrens (Prüfstreuung) ist bei Befolgung der Versuchsanleitung auch mit verschiedenen Ausführenden recht gut.

³⁾ Über die Beschreibung der Betonbeschaffenheit siehe [9, 10].

Man kann auch ein Verdichtungsmaß v' durch eine nach Art und Verdichtungsarbeit begrenzte Einwirkung auf die Behälterfüllung bestimmen und mit ihm die Verdichtungswilligkeit eines Betons durch Vergleich mit v beurteilen.

SCHRIFTTUM:

- [1] Walz, K.: Einflüsse auf die Verarbeitbarkeit des Betons. Zement 22 (1933) H. 66, S. 78/81, und H. 7, S. 93/95.
- [2] Walz, K.: Verarbeitbarkeit und mechanische Eigenschaften des Frischbetons. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 91 (1938) S. 37 und 38.
- [3] Walz, K., in O. Graf: Handbuch der Werkstoffprüfung, 3. Bd., 2. Aufl.: Die Prüfung nichtmetallischer Baustoffe. Abschnitt VI B 3: Verarbeitungseigenschaften. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1957, S. 405/409.
- [4] Walz, K.: Rüttelbeton. 1. Aufl. Verlag von Wilh. Ernst & Sohn, Berlin 1944, S. 17 ff. (ebenso 3. Aufl. 1960, S. 20 ff.)
- [5] Brux, G.: Messen von physikalisch-mechanischen Eigenschaften von Betonmischungen, insbesondere der Beweglichkeit. Straßen- und Tiefbau 16 (1962) H. 11, S. 1116/1122.
- [6] Richtlinien für den Bau von Betonfahrbahnen. 4. Ausgabe. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Köln 1963, Abschnitt 10.1.3.1.
- [7] Leitsätze für die Bauüberwachung im Beton- und Stahlbetonbau. 11. Aufl. Deutscher Beton-Verein, Wiesbaden 1962, S. 127.
- [8] Albrecht, W., und H. Schäffler: Konsistenzmessung von Beton. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 158 (1964) S. 38/60.
- [9] Walz, K.: Grundlagen der Betontechnologie. Beschreibung eines Lehrfilms mit Erläuterungen. 5. Aufl. Beton-Verlag, Düsseldorf 1964, S. 28 f.
- [10] Wischers, G.: Herstellung und Verwendung von Transportbeton. Zement-Taschenbuch 1964/65, Bauverlag, Wiesbaden 1963, S. 355 f.