

Betontechnologie – Standortbestimmung für die Schweiz*

Von ULRICH TRÜB

Technische Forschungs- und Beratungsstelle der Schweizerischen Zementindustrie, Wildegg

Professor August Guyer gewidmet

Summary

Some important relationships between cement-content, consistence and compressive strength of concrete are discussed on the basis of the fundamental law of the influence of the water-cement ratio. These relationships are rather complex, and they are in general not exactly understood by the men on the site. Consequently, the findings of modern concrete research are not at all or not enough taken into consideration.

The principles of concrete mix design are shortly described. With this method, the properties of fresh and hardened concrete can be optimized as well as the costs and other factors. In this respect, the "cementpaste-batching" would be of great importance introducing new points of view on capacity, security and economy of concrete constructions. The empirical rules, still governing the practice on the site, as well as the standard regulations, are not making adequate use of the new knowledge.

Die Betontechnologie beschäftigt sich mit den Eigenschaften des frischen und erhärteten Betons. Das Fach beginnt mit der Beschreibung der Betonbestandteile und endet etwa bei jenen Angaben, die dem konstruierenden Ingenieur als Grundlage für seine Berechnungen dienen. Umrahmt wird dieses Feld von einigen Wissensgebieten, die zwar keine grundsätzlichen, aber doch vielfältig steuernde Einflüsse ausüben. Es sind dies Bautechnik, Maschinenwesen, Materialkunde, Ökonomie u. a.

Der Betontechnologe findet sich inmitten handfester Praktiker. Er pflegt eine Wissenschaft, die, am Gegenstand gemessen, von großer Bedeutung wäre, hingegen dort, wo sie nützlich sein könnte, kaum genügend beachtet wird. Die Baupraxis steckt noch tief im hergebrachten Erfahrungswissen. Manche ihrer Exponenten fühlen ihre Kreise durch den skeptischen «Theoretiker» gestört.

Die grundlegenden Fragen

Ein kurzer Bericht über den Stand und die Bedeutung der heutigen Kenntnisse muß sich auf die wegleitenden Fragen beschränken, also einer mittleren Linie folgen, die durch die Stichworte *Zementdosierung – Konsistenz – Festigkeit* gekennzeichnet ist.

Die Hauptanforderung an den frischen Beton ist die geeignete *Konsistenz*, die erlaubt, den Beton mit möglichst geringem Kraftaufwand möglichst vollständig zu verdichten.

Die Hauptanforderung an den erhärteten Beton ist eine bestimmte *Druckfestigkeit*, die bei möglichst geringem Materialaufwand möglichst hoch ausfällt und verläßlich eingehalten wird.

Diese Formulierung läßt auch die wichtige ökonomische Beurteilung erkennen, die offensichtlich nicht nur auf eine Reduktion der Zementdosierung abzielt.

Das grundlegende Gesetz

Die Anteile von Wasser und Zement im frischen Beton stehen in einem Verhältnis zueinander, das man den *Wasserzementwert* nennt. $w = W/C$ (kg/kg).

Das grundlegende Gesetz der Betontechnologie lautet: *Die Festigkeit des Betons hängt in der ersten Größenordnung ausschließlich vom Wasserzementwert ab. Je kleiner der Wasserzementwert, desto höher die Festigkeit* (bei gut verdichteten normalen Betonmischungen).

Dieses Gesetz hat der Doyen der Betontechnologen, der Amerikaner D.A. ABRAMS, 1918 postuliert. In der Folge erwies sich der Wasserzementwert immer deutlicher als die universelle Kenngröße für den Beton. Neben der Festigkeit beeinflusst er auch chemische Beständigkeit, Dichtigkeit, Frost- und Raumbeständigkeit, Schwinden, Kriechen u. a. im gleichen Sinne günstig.

Weitere Einflüsse auf die Festigkeit

Drei weitere Einflüsse auf die Festigkeit sind zu nennen:

- Das individuelle *Bindevermögen* des verwendeten Zementes hat eine unmittelbare Wirkung, die hier als konstant angesehen und nicht weiter behandelt wird.
- *Zunehmende Zementdosierung* bewirkt grundsätzlich *abnehmende Betonfestigkeit*. Der Beton besteht aus Zementstein und Zuschlagsgestein, wobei das letztere in der Regel bedeutend fester ist. Je höher also der Anteil der schwächeren Komponente, des Zementsteins, desto geringer die Festigkeit des Betons.
- *Zunehmender Durchmesser des Größtkorns* im Zuschlag bewirkt grundsätzlich *abnehmende Betonfestigkeit*. Da die Haftflächen zwischen Zementstein und Zuschlagsgestein die schwächsten Stellen im Querschnitt sind, sollten sich die Druck-, Zug- und Scherkräfte auf eine möglichst große Gesamtfläche verteilen (Verzahnungseffekt). Mit kleinerem Größtkorn ist diese Bedingung besser erfüllt.

* Eingegangen am 5. April 1967.

Erste Gegensätze

Die beiden eben genannten Einflüsse der Zementdosierung und des Größtkorns auf die Festigkeit stehen im Gegensatz zu alten Erfahrungen der Praxis.

Mit höherer Zementdosierung wird in der Regel eine höhere Festigkeit erzielt. Wie kommt es zu diesem Widerspruch? Die genannte grundsätzliche Wirkung wird durch den entgegengesetzten und offenbar stärkeren Einfluß des Wasserzementwertes überlagert.

Der Wasserzementwert nimmt nach Definition mit zunehmendem Zementgehalt ab. Gemäß dem grundlegenden Gesetz bedeutet dies Gewinn an Festigkeit.

Ähnlich bringt der Wasserzementwert den grundsätzlichen Einfluß des Größtkornes zum Verschwinden. Um die gleiche Konsistenz oder Verarbeitbarkeit zu erlangen, hat ein Beton mit grobem Zuschlagsgemisch einen geringeren Wasserbedarf als mit feinem. Bei grobem Zuschlag ist demnach der Wasserzementwert in der Regel kleiner, die Festigkeit größer.

Diese Überlagerungen von grundsätzlichen und praktisch bedingten Einflüssen sind in der Praxis wenig bekannt. Die Entwicklung des Betons läßt aber die unterdrückten grundsätzlichen Einflüsse mehr und mehr an Bedeutung gewinnen. In einigen Fällen erlangen sie heute womöglich die Oberhand und stiften dann, da dem Gewohnten entgegengesetzt, einige Verwirrung.

Einflüsse auf die Konsistenz

Die Einflüsse auf die Konsistenz können gut gezeigt werden, wenn man sich den frischen Beton aus zwei Komponenten zusammengesetzt denkt, nämlich aus einer festen, dem Zuschlag, und einer flüssigen, dem Zementleim (Zementleim = Gemisch aus Zement und Wasser). Der Zementleim bildet gewissermaßen das schmierende Polster zwischen den harten Gesteinskörnern.

So gesehen bestehen zwei Möglichkeiten, den Flüssigkeitsgrad des Betons zu heben: Man verdünnt den Zementleim oder man erhöht den Anteil an Zementleim.

Die Verdünnungsmethode ist gemäß Wasserzementwert-Gesetz der Betonqualität abträglich. Trotzdem steht sie traditionsgemäß wegen oft noch ungenügenden maschinellen Einrichtungen in Anwendung.

Bei der zweiten Methode entsteht keine wesentliche Beeinträchtigung der Betonqualität. Mit der Wasserbeigabe wird gleichzeitig auch die Zementdosierung erhöht, so, daß sich der Wasserzementwert nicht verändert. Da es sich um kleine Anpassungen handelt, wird dadurch die Festigkeit kaum beeinflusst. Das Verfahren ist gleichbedeutend, wie wenn man dem Zuschlagsstoff einen vorge-mischten, konstant zusammengesetzten Zementleim zugeben würde. Es heißt deshalb «Zementleimdosierung».

Ferner wird die Betonkonsistenz durch die Kornabstufung des Zuschlages beeinflusst. Je höher die Anteile an feineren Korngruppen sind, desto besser wird die Verarbeitbarkeit der Mischung.

Der große Gegensatz

Zwischen Konsistenz und Festigkeit schwelt ein Interessenkonflikt. Der Bauunternehmer ist an einem geschmeidigen, gut verarbeitbaren Beton interessiert, der Ingenieur und die Bauherrschaft an einem Beton von hoher Festigkeit und Beständigkeit. Diese Wünsche münden zunächst in der Forderung nach mehr bzw. weniger Anmachwasser und sind unvereinbar. Die Meinungsverschiedenheit spielt sich auf der Baustelle oft sehr realistisch ab. Es wird hart um einen Kompromiß gerungen, wobei auch Argumente ins Feld geführt werden, die vom betontechnologischen weit entfernt sind und in unbestimmbaren «Erfahrungen» wurzeln. Verbürgtes wird mit Unverbürgtem durchsetzt und entwertet.

Diesem Konflikt wäre mit der vorhin beschriebenen Zementleimdosierung beizukommen. Die Betontechnik ist aber hierzulande noch nicht bereit, allgemein nach diesem Prinzip zu arbeiten.

Die Schwierigkeiten der Zementleimdosierung

Die Umstände, die sich einem reibungslosen Übergang zur Zementleimdosierung entgegenstellen, sind folgende:

- Der Feuchtigkeitsgehalt des Zuschlagmaterials, herrührend von der Sand- und Kiesaufbereitung, ist stark schwankend. Man ist in der Praxis nicht gewohnt und auch nicht dafür eingerichtet, den Wassergehalt laufend, rasch und genau zu bestimmen. Die Zementleimdosierung würde dies aber voraussetzen.
- Zur rationellen Zementleimdosierung bedarf es modifizierter Vorrichtungen, um Zement und Anmachwasser abzumessen.
- Die Zementleimdosierung kann naturgemäß nur bei freistehender Zementdosierung sinnvoll angewandt werden. Gemäß den in unserem Lande gültigen technischen Normen wird aber eine anzuwendende Betonmischung nach Zementgehalt definiert. Die Vorschrift P 300 z.B. bedeutet einen Beton mit 300 kg Portlandzement pro m³. Normenvorschriften können mitunter dem technischen Fortschritt ungebührliche Schranken setzen.

Die Streuung der Betonfestigkeit

In den letzten Jahren war auch viel vom Streuungsmaß der Betonfestigkeit die Rede. Dieses entspricht der Standardabweichung, ermittelt an einer Reihe vergleichbarer Resultate der Festigkeitsmessung.

Für die zuverlässige Bestimmung des Streuungsmaßes bedarf es einer für gewöhnliche Baustellen unmöglich hohen Zahl von Einzelbestimmungen (30 bis 50 Probekörper).

Die Größenordnung des Streuungsmaßes ist nach dem Qualitätsstandard der Baustelle bestimmt und beträgt bei gut eingerichteten und geleiteten Baustellen ungefähr 10% und bei primitiver Betonherstellung 20 bis 30% (Variationskoeffizient).

Die rechnerisch beurteilte Sicherheit eines Betonbauwerkes hängt stark vom Streuungsmaß der Festigkeit ab. Die Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen einer kritischen Situation ist bei einem Variationskoeffizienten der Druckfestigkeit von 10% um einige Zehnerpotenzen kleiner als bei einem solchen von 20%.

Dieser bedeutungsvolle Unterschied würde eine Differenzierung des Betons nach Streuungsklassen rechtfertigen.

Konsequenzen bei der Herstellung des Frischbetons

Die Bestrebungen gehen also dahin, von Mischung zu Mischung einen Beton mit angemessener Konsistenz und mit einer bestimmten, wenig streuenden Festigkeit herzustellen. Der Wasserzementwert sollte demnach auf eine bestimmte Höhe eingestellt und mit möglichst hoher Regelmäßigkeit eingehalten werden.

Bei starrem Festhalten an der Mischrezeptur wird dieses Anliegen kaum erfüllt, da sich die veränderliche Kornzusammensetzung und der schwankende Wassergehalt des Zuschlages entsprechend auf die Konsistenz und den Wasserzementwert auswirken.

Zwei Herstellungsprinzipien ermöglichen einen Ausgleich: Dosieren auf gleichbleibende Konsistenz und Dosieren auf gleichbleibenden Wasserzementwert.

Dosieren auf gleichbleibende Konsistenz

Bei diesem althergebrachten Verfahren wird der Einfluß des schwankenden Feuchtigkeitsgehaltes des Zuschlages durch entsprechend angemessene Wasserbeigabe ausgeglichen. Als Maßstab gilt allein die gleichzuhaltende Konsistenz der Mischung. Da nun aber der Feinheitsgrad des Zementes und die Kornabstufung des Zuschlages ebenfalls direkt auf die Konsistenz einwirken, kann das Verfahren nur dann zum Ziele führen, wenn diese Größen unverändert bleiben. Entsprechende häufige Kontrollen, wenigstens bezüglich der Granulometrie des Zuschlages, sind notwendig. Bei eintretenden starken Änderungen ist es aber trotzdem kaum möglich, einen qualitativen Anschluß an die vorausgegangenen Mischungen zu finden.

Ein weiterer Nachteil der Methode ist die maßgebende Beurteilung der Konsistenz. Die vielfältigen dafür vorgeschlagenen Meßverfahren nehmen alle zu viel Zeit in Anspruch. Bei modernen Mixern mit Rührarmen kann die Konsistenz mittels der Motorenleistung vergleichsweise gut beurteilt werden.

Dosierung auf gleichbleibenden Wasserzementwert

Die Dosierung auf konstanten Wasserzementwert hat die Bedeutung eines anzustrebenden idealen Verfahrens.

In drei Stufen, die sich durch gesteigerten Aufwand für Maschinen und Meßgeräte auszeichnen, wird das Bestmögliche erreicht:

- a) Ein einfaches elektrisches Meßgerät in der Behälterwand des Mixers erlaubt den relativen Wassergehalt der Betonmischung laufend zu bestimmen. Damit kann ein Beton mit gleichbleibendem, zahlenmäßig jedoch nicht genau bekannten Wasserzementwert geliefert werden.
- b) Wird zudem der Feuchtigkeitsgehalt des Zuschlages gemessen, was ebenfalls durch elektrische oder radiologische Sonden möglich ist, so läßt sich unter Einbezug des zugemessenen Zementes und Wassers der Wasserzementwert zahlenmäßig genau berechnen.
- c) Wird zudem mit Hilfe einer Automatik die Zement- und Wasserzugabe so gekoppelt, daß immer derselbe Wasserzementwert entsteht, so ist damit die «Zementleimdosierung» verwirklicht. Die Betonherstellung wird unabhängig von einer festbleibenden Zementdosierung. Die Betonkonsistenz kann jeweils unverzüglich den Erfordernissen angepaßt werden, ohne daß wesentliche Qualitätsschwankungen eintreten. Die Forderung nach gleichbleibender Kornzusammensetzung des Zuschlages ist kaum mehr von Bedeutung.

Die Baumaschinenindustrie hat in letzter Zeit vielfältige Einrichtungen zur Lösung dieses sehr aktuellen Problems hervorgebracht. Die Verwirklichung geht schrittweise von der Großanlage bis zum kleinen Baustellenmischer.

Konsequenzen für die Betonbauweise

Aus dem Gesagten geht hervor, daß durch das Prinzip der Zementleimdosierung das Problem der harmlosen Anpassung der Konsistenz gelöst würde und daß, gemäß dem Wasserzementwert-Gesetz, eine bestimmte mittlere Druckfestigkeit zum voraus eingeplant und mit minimaler Streuung gehalten werden könnte.

Die vorausbestimmte garantierte mittlere Druckfestigkeit würde eine bessere Anpassung der Betonmischungen an die materiellen Gegebenheiten und technischen Erfordernisse ermöglichen. Die gute Kenntnis des eingehaltenen Streuungsmaßes würde ferner gestatten, den Beton entsprechend zu klassieren und belastungsmäßig auszunützen. In beiden Fällen ergäbe sich volkswirtschaftlicher Gewinn, der angesichts der Bedeutung des Betons im Bauwesen beträchtlich sein könnte.

Tatsächlich liegen hier große unerschlossene Reserven für den Betonbau versteckt, denn die heute geltenden schweizerischen Ausführungsnormen für den Betonbau weisen noch immer praktisch dieselben Festigkeitsannahmen und Sicherheitsmargen auf wie im Jahr 1935 (!). Die seit jener Zeit zu verzeichnenden bedeutenden Fortschritte in der Betontechnik können somit in unserem Lande weder konstruktiv noch ökonomisch voll genutzt werden. Diese Fortschritte sind: Verbesserungen in der Zementherstellung und in der Sandkiesaufbereitung, ge-

wichtsmäßiges Abmessen der Betonbestandteile, Verdichtung durch Vibration und entsprechende Senkung des Wasserzementwertes, vermehrte Anwendung von industriell hergestelltem Beton (Transportbeton, vorgefertigte Bauelemente). In wenigen Jahren wird man die Einführung der Zementleimdosierung hinzuzählen, ohne freilich wegen den heute geltenden Normen alle ihre Vorteile zur Geltung bringen zu können.

Die Betrachtungen zeigen, daß sich die Betontechnik noch mitten im Wandel von einer beschreibenden qualitativen Erfahrungslehre zu einer weitgehend quantitativen Wissenschaft befindet.

Literaturangaben

- WALTER H. PRICE, Factors Influencing Concrete Strength, *J. Amer. Concr. Inst.* 1951 (February)*.
- S. POPOVICS, Relation between the Change of Water Content and the Consistence of fresh Concrete, *Mag. Concr. Res.* (London) 1962 (July).
- W. A. CORDON und H. A. GILLESPIE, Variables in Concrete Aggregates and Portland Cement Paste which influence the Strength of Concrete, *J. Amer. Concr. Inst.* 1963 (August).
- K. WALZ, *Anleitung für die Zusammensetzung und Herstellung von Beton mit bestimmten Eigenschaften*, Berlin/München 1963.
- W. H. TAYLOR, *Concrete Technology and Practice*, New York 1965.
- * *Journal of the American Concrete Institute*, die klassische Zeitschrift der Betontechnologie, erscheint seit 1905.