



Doctoral Thesis

Die Messung der Verarbeitbarkeit von Frischbeton

Author(s):

Losinger, Robert

Publication Date:

1956

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000314719> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Prom. Nr. 2470

**DIE MESSUNG
DER VERARBEITBARKEIT VON
FRISCHBETON**

VON DER

**EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN
HOCHSCHULE IN ZÜRICH**

ZUR ERLANGUNG

**DER WÜRDE EINES DOKTORS DER
TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN**

GENEHMIGTE

PROMOTIONSARBEIT

VORGELEGT VON

ROBERT LOSINGER

VON BURGDORF

Referent: Herr Prof. Ed. Amstutz

Korreferent: Herr Prof. G. Schnitter

RÖSCH, VOGT & CO., BERN, 1956

EINLEITUNG

Schon vor mehr als 20 Jahren haben die an der Ausführung von Betonbauten beteiligten Fachleute erkannt, daß bei der Herstellung von Qualitätsbeton die Verarbeitbarkeit von ausschlaggebender Bedeutung ist. Sie beeinflußt indirekt die Festigkeit, Wasserdichtigkeit und Frostbeständigkeit des Betons, indem bei gleichem Wasserzementfaktor, gleichem Kies- und Sandvorkommen und gleicher Zementqualität ein gut verarbeitbarer Frischbeton die besseren Eigenschaften ergibt als schlecht verarbeitbare Mischungen.

Im Laufe der Jahre wurden verschiedene Maßnahmen zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit empfohlen, so z. B.:

1934 von Ottokar Stern in der Publikation «Zielsichere Betonbildung» das Ausscheiden bestimmter Körnungen, der «Ausfallkörnungen».

1947 schreibt Dr. Ing. W. Humm in seinem Werke «Bindemittel, Mörtel und Beton»:

Konsistenz und Verarbeitbarkeit werden erhöht durch Steigerung des Mörtelgehaltes im Beton und Verwendung gut gerundeten Zuschlagmaterials und maßvolle Erhöhung der Anmachwassermenge. Schlechte Verarbeitbarkeit eines Frischbetons sollte nie mit dem Wasserzusatz allein, sondern immer auch durch zweckmäßige Änderung der Sandkiesabstufung und durch Erhöhung der Zementdosierung behoben werden.

1953 spricht M. Duriez, der Chefingenieur der Ponts et Chaussées und Direktor des technischen Dienstes des Zentrallaboratoriums der Ponts et Chaussées in Paris, anlässlich eines Vortrages über «Plastifizierende und luft-einführende Betonzusätze» unter anderem auch über die Verbesserung der Verarbeitbarkeit ohne Erhöhung des Wasserzementfaktors.

1955 berichtet das «Schweizer Archiv» im Heft 5 «Von der Tätigkeit der Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt im Jahre 1954» unter anderem:

An individuell gearteten Auftragsuntersuchungen von grundsätzlicher Bedeutung können aus dem Jahre 1954 genannt werden:

2. im Zusammenhang mit mehreren Großbaustellen umfassende Untersuchungen über die Eignung der Zuschlagstoffe und die zweckmäßige Zusammensetzung des Betons, wobei nicht nur die im Einzelfall erreichten Festigkeiten des Betons, sondern ebenso sehr dessen Verarbeitbarkeit wie seine Wasserdichtigkeit und Frostbeständigkeit zu verfolgen waren unter besonderer Berücksichtigung der mit einer völligen Entfernung oder doch strengen Dosierung des Feinsandes und der Anwendung verschiedener Beton-Zusatzmittel verbundenen Effekte.

Oft wird die Verarbeitbarkeit mit «Betonsteife» bzw. «Betonweichheit» oder mit «Betonkonsistenz» eng verbunden oder gleichgesetzt. Die Beziehungen der Verarbeitbarkeit einer frischen Betonmischung zu deren «Konsistenz» sowie zu deren «Zusammenhalt» oder «Kohäsion» werden in der Fachliteratur wohl erwähnt, doch sind sie, soweit dem Verfasser dieser Arbeit bekannt ist, noch nie systematisch untersucht worden. So befaßt sich z. B.:

- 1947 das «Cementbulletin» Nr. 14 der technischen Forschungs- und Beratungsstelle der E. G. Portland mit dem Thema «Die Verarbeitbarkeit des Betons».
- 1949 erwähnt Ing. O. R. Solvey in seiner Schrift «Neue rationelle Betonherzeugung» die Verarbeitbarkeit im Zusammenhang mit dem «Betonsteifegrad».
- 1951 wird ebenfalls im «Cementbulletin» Nr. 21, unter dem Titel «Harsche oder geschmeidige, steife oder weiche Mischungen?» die Verarbeitbarkeit frischer Betonmischungen instruktiv behandelt.
- 1955 bringt das «Cementbulletin» Nr. 17 die Verarbeitbarkeit in Zusammenhang mit der «Entmischung von frischem Beton».

Diese wenigen Beispiele zeigen, welche Bedeutung Betonpraktiker, Forschungsstellen und Materialprüfungsanstalten der Verarbeitbarkeit des Frischbetons beimessen. Noch fehlt es aber an einer klaren Definition dieses Begriffes und gibt es noch kein allgemein anerkanntes Gerät, das erlaubt, die Verarbeitbarkeit zu messen. Humm ist der Ansicht, es sei «schwierig, wenn nicht unmöglich, eine universell anwendbare Meßmethode zu finden». Er verweist auf die Setzprobe, die Ausbreitprobe und die Eindringproben, womit er nur einen kleinen Teil der vielen entwickelten Methoden erwähnt.

Zweck der nachstehend beschriebenen Versuche war, in dieses Problem etwas tiefer einzudringen, d. h. den Begriff «Verarbeitbarkeit» abzugrenzen, die zweckmäßigste unter den bekannten Meßmethoden zu ermitteln und die Beziehungen der «Verarbeitbarkeit» zur «Konsistenz» und «Entmischbarkeit» abzuklären. Dabei stellte sich zunächst die Frage, was unter Verarbeitbarkeit überhaupt genau zu verstehen ist.

Wie das Wort sagt, ist die *Verarbeitbarkeit* eine Eigenschaft des frischen Betons, die in Zusammenhang mit einer äußeren Krafteinwirkung zum Ausdruck kommt, und zwar derjenigen Krafteinwirkung, oder genauer gesagt derjenigen Folge von Krafteinwirkungen, welchen der Beton vom Augenblick des Mischens an bis zur erfolgten Verdichtung im Bauwerk unterworfen ist. Die Verarbeitbarkeit ist also ein weiter und relativer Begriff. Was bis jetzt mit diesem Wort bezeichnet wurde, kann nur unter Berücksichtigung der jeweiligen auftretenden speziellen Verhältnisse, d. h. der Beförderungs-, Einbringungs- und

Verdichtungsmethoden sowie der Form und der Ausmaße des Bauteils, beurteilt werden.

Um die Verarbeitbarkeit zahlenmäßig erfassen zu können, ist es unumgänglich, den Vorgang der Verarbeitung des frischen Betons aufzuteilen. Sieht man vom Mischprozeß ab, so können im Arbeitszyklus, den der Frischbeton durchläuft, stets zwei Phasen unterschieden werden: der Transport vom Mischer in die Form und das Verdichten in der Form. Zur ersten Phase muß auch das der eigentlichen Verdichtung vorangehende Einbringen in die Form gezählt werden, das in den meisten Fällen aus dem Entleeren aus einem Transportgefäß besteht. Für die Qualität des Endproduktes, d. h. des erhärteten Betons, ist in erster Linie der Erfolg der zweiten Operation maßgebend, nämlich des Verdichtens, wobei lediglich dazu Sorge getragen werden muß, daß Inhomogenitäten, die sich innerhalb der Masse im Laufe des Transportes gebildet haben, beim Verteilen, vorgängig der Verdichtung, aufgehoben werden.

Man muß also zwischen «*Transportverarbeitbarkeit*», welche definiert werden kann als die Fähigkeit, während des Transportes und dem Ausschütten die Homogenität zu bewahren, d. h. sich nicht zu entmischen, und «*Verdichtbarkeit*» unterscheiden. Da die «*Verdichtbarkeit*» die Qualität des erhärteten Betons unmittelbar und maßgebend beeinflusst, muß sie bei der Aufteilung der Verarbeitbarkeit als die primäre Eigenschaft betrachtet werden. Gelingt es, die Verdichtbarkeit zu messen, so ist das Problem der Messung der Verarbeitbarkeit von Frischbeton im wesentlichen gelöst.

Das Hauptziel dieser Arbeit besteht darin, eine für die Praxis geeignete Methode zur zahlenmäßigen Erfassung der Frischbeton-Verdichtbarkeit vorzuschlagen, wobei als Verdichtungsmittel ausschließlich die Vibration berücksichtigt wird.

INHALTSÜBERSICHT

Im I. Kapitel wird die Verdichtbarkeit des Frischbetons definiert und deren Messung beschrieben. Aus der Überprüfung der wichtigsten der bisher bekannten Methoden, welche Messungen an Frischbeton bei gleichzeitiger Vibration desselben betreffen, ergibt sich, daß die Methode von Fritsch sich am besten für die Messung der Verdichtbarkeit zu eignen scheint. Fritsch mißt die Setzung der Oberfläche einer in ein prismatisches Gefäß eingefüllten Probe in Funktion der Zeit, wobei die Probe durch Vibration verdichtet wird. Die Verdichtung erfolgt einzig und allein durch Verschiebung der Teilchen in vertikaler Richtung, ohne Änderung der Probenform und ohne daß die Bewegungen der Teilchen durch irgendwelche Hindernisse erschwert werden, was die Streuungsursachen auf ein Minimum herabsetzt. Das ist von großer Wichtigkeit, weil die

Streuung der Meßresultate ganz allgemein die Charakterisierung des Frischbetons erschwert und auf der Baustelle oft sogar in Frage stellt.

Der Methode, wie sie von Fritsch beschrieben wird, haften allerdings gewisse Mängel an, insbesondere was die Art der Auswertung der Setzungskurven betrifft. Es wird vom Verfasser dieser Arbeit ein abgeändertes Verfahren für die Auswertung der Setzungskurven vorgeschlagen, welches auf der Kenntnis des absoluten Volumens der Proben beruht. Um die Zweckmäßigkeit dieses Verfahrens nachzuweisen, mußte eine größere Serie Versuche durchgeführt werden.

Diese sind im *II. Kapitel* beschrieben und diskutiert. Es wurde zur Prüfung einer Anzahl Betonmischungen ein eigens entwickeltes Gerät verwendet, welches gegenüber der üblichen Ausführung gewisse praktische Vorteile bietet. Die Resultate der Versuche berechtigen zur Behauptung, daß die Methode von Fritsch, zusammen mit dem neu vorgeschlagenen Vorgehen bei der Durchführung der Messung und bei der Kurvenauswertung, zur zahlenmäßigen Erfassung der Verdichtbarkeit geeignet ist, indem insbesondere nachgewiesen werden konnte, daß der aus den Kurven abgeleitete Zahlenwert ein Maß für diejenige Energiemenge darstellt, die aufgewendet werden muß, um die Proben bis zu ein und demselben verbleibenden Luftgehalt zu verdichten.

Es ergaben sich bei der Auswertung der Versuchsergebnisse mit dem vom Verfasser abgewandelten Gerät nach Fritsch, bei einem Vergleich der Verdichtbarkeit der untersuchten Mischungen mit deren Konsistenz, einige interessante Einblicke in den Mechanismus des Verdichtungs Vorganges, besonders was die Schmierwirkung des Wassers in Zusammenhang mit dem Zement betrifft. Die diesbezüglichen Erkenntnisse gehören zu den wesentlichen Ergebnissen dieser Arbeit. Es zeigte sich, daß Mischungen mit höherem Zementgehalt (bei sonst gleicher Zusammensetzung) sich in gewissen Fällen leichter verdichten lassen als schwächer dosierte, was auf den ersten Blick widersinnig erscheint, weil die gesamte innere Oberfläche des Korngemenges mit steigendem Zementgehalt wächst. Die beobachtete Erscheinung ist jedoch ein Hinweis auf die wirkliche Funktion des Zements beim Verdichtungs Vorgang. Der Zement darf eben nicht zu den zu benetzenden Körnungen gerechnet werden. Wasser allein übt innerhalb einer vibrierenden Kiessandmischung nur eine relativ geringe Schmierwirkung aus, im Sinne einer Herabsetzung der Reibung zwischen den Aggregat-körnern. In dem durch die Vibration «verflüssigten» Beton findet ein vertikaler Entmischungsvorgang statt, der im Absinken der schwersten Bestandteile, d. h. der Kieskörner, und im Aufstieg der leichtesten, nämlich des Wassers, besteht, das in dem Maß, wie es aufsteigt, für die Schmierwirkung verloren geht. Der Wasseraufstieg wird jedoch durch den Zement erschwert, weil dieser den Anteil an kapillar gebundenem Wasser gegenüber dem freien Porenwasser erhöht und zudem Strukturen bildet, die ebenfalls zur Wasserbindung bei-

tragen. Der Zement stabilisiert somit die Mischungen, d. h. er gewährleistet die Aufrechterhaltung der Schmierwirkung im Innern der vibrierenden Masse bis zur erfolgten Verdichtung derselben.

Der Begriff der Stabilität von Betonmischungen wird im gleichen Sinne verwendet, wie in den neueren Publikationen des Schwedischen Forschungsinstitutes für Zement und Beton, welche Messungen betreffen, die an vibrierendem Frischbeton mit einem speziellen Gerät, dem Deformabilitätsmesser, ausgeführt wurden. Es ist interessant festzustellen, daß man bei der Auswertung von Setzungskurven nach Fritsch zu prinzipiell ähnlichen Schlüssen bezüglich des Verdichtungsvorganges von vibrierendem Beton und der Verdichtbarkeit verschiedener Mischungen gelangt, wie sie sich bei der Interpretation von Messungen mit dem Deformabilitätsmesser ergeben. Die schwedischen Untersuchungen sind mit äußerst empfindlichen Geräten durchgeführt worden und stellen eine bedeutende Forschungsarbeit über das Verhalten des Frischbetons bei Vibration dar. Für die praktische Anwendung kommt jedoch die Methode wegen den äußerst komplizierten Apparaturen nicht in Frage, was der Möglichkeit, mit der vom Verfasser abgewandelten Methode von Fritsch zu analogen Resultaten zu gelangen, besondere Bedeutung verleiht.

Im *III. Kapitel* wird auf das Problem der *Messung der Transportverarbeitbarkeit* eingegangen. Es sei auf die Einleitung zum Kapitel hingewiesen, in welcher allgemein die Schwierigkeiten, welche die Messung der Transportverarbeitbarkeit mit sich bringt, dargelegt sind: es ist grundsätzlich wohl möglich, experimentell gewisse Vergleichswerte für die Transportverarbeitbarkeit zu erhalten, nur aber unter der Voraussetzung eines beträchtlichen Versuchsaufwandes.

Im einzelnen werden in Kapitel III die Methode des Ausbreitversuches und der Vebe-Versuch behandelt. Beide Methoden sind eigentlich zur Messung der Konsistenz entwickelt worden. Sie erlauben aber, Rückschlüsse auf die Entmischbarkeit des Frischbetons zu ziehen. Allerdings gestatten weder der Ausbreitversuch, noch die Vebe-Messung eine direkte zahlenmäßige Erfassung der Entmischbarkeit beliebiger Frischbetonmischungen. Es können lediglich verschieden zusammengesetzte Mischungen (wobei unter Zusammensetzung hier die Trockenzusammensetzung allein zu verstehen ist) im Konsistenzbereich der optimalen Kohäsion hinsichtlich ihrer Entmischbarkeit miteinander verglichen werden. Der dazu erforderliche Versuchsaufwand dürfte sich allerdings, in Anbetracht der untergeordneten Bedeutung der Transportverarbeitbarkeit, nur in den wenigsten Fällen lohnen.

Im *IV. Kapitel* werden *Methoden* beschrieben, welche für eine rasche und bequeme Kontrolle des Wassergehaltes des Frischbetons auf der Baustelle in Frage kommen.

Aus welchen Gründen sich überhaupt die Notwendigkeit ergeben kann, auf

der Baustelle statt einer eigentlichen Verdichtbarkeitsmessung lediglich eine sogenannte «Konsistenz»-Messung durchzuführen, d. h. die Messung einer Größe, über deren eigentliche Bedeutung keine genaue Aussage gemacht werden kann, ergibt sich aus dem folgenden Abschnitt, welcher die praktische Anwendung der Verdichtbarkeitsmessung betrifft. Es sei hier vorweggenommen, daß die bis dahin am meisten verwendete Methode, der Slump-Test, den heutigen Anforderungen nicht mehr entspricht. Es genügen nämlich zur Erzielung einer befriedigenden Verdichtbarkeit durch Vibration so geringe Befeuchtungsgrade, daß das Setzmaß des Slump-Tests im allgemeinen weniger als 1 cm beträgt. Besser sind die Eindringgeräte. Sie sind viel empfindlicher auf Variationen des Wassergehaltes innerhalb des Konsistenzbereiches des Vibrierbetons. Als besonders geeignet wird sich die Methode der Betonsonde von Humm erweisen.

FOLGERUNGEN FÜR DIE PRAXIS

Zu jeder Charakterisierung von Betonmischungen, die bei der Herstellung von wichtigen Bauten oder Bauteilen verwendet werden, gehört eine Zahlenangabe über die Verdichtbarkeit, welche das beste Maß für die Beurteilung der Verarbeitbarkeit darstellt. Diese Verdichtbarkeit kann am zweckmäßigsten nach der modifizierten Methode von Fritsch gemessen werden. Verdichtbarkeitsmessungen müssen insbesondere dann erfolgen, wenn im Hinblick auf eine größere Bauaufgabe (Brücken-, Staumauer-, Industriebau) mit den jeweils zur Verfügung stehenden Kiessandmaterialien Vorversuche durchgeführt werden, mit dem Ziel, die geeignetste Betonzusammensetzung zu ermitteln, d. h. entweder diejenige, die bei festgelegter Zementdosierung die beste Qualität ergibt (d. h. in erster Linie die höchste Festigkeit), oder aber diejenige, die zur Erreichung einer bestimmten Qualität die niedrigste Zementdosierung erfordert. *Bei solchen Untersuchungen liefert die Verdichtbarkeitsmessung erst die Möglichkeit, verschiedene Betonzusammensetzungen überhaupt untereinander zu vergleichen. Die Festigkeit stellt nur dann ein Maß für die Güte von Betonzusammensetzungen dar, wenn sie unter Einhaltung derselben Verarbeitbarkeit ermittelt wurde.*

Bei Staumauerbauten wird es nicht nur anläßlich der Voruntersuchungen, sondern auch im Laufe des Baues immer wieder nötig sein, Verdichtbarkeitsmessungen durchzuführen. Da infolge des hohen Anteils des Zements an den Gesamtkosten und wegen der großen Bedeutung der Wärmeentwicklung bei der Hydratation die Dosierung jeweils möglichst genau auf dem zur Erreichung der gewünschten Qualitätseigenschaften erforderlichen Minimum gehalten wird, kommen innerhalb der Staumauer, je nach den zu erwartenden Beanspruchungen, verschiedene Betonzusammensetzungen zur Anwendung; ferner kann unter Umständen im Laufe der Bauzeit mehrmals eine gewisse Anpassung der Beton-

granulometrie an Schwankungen in der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials erfolgen, womit sich also immer wieder die Notwendigkeit ergeben wird, Betonzusammensetzungen zu charakterisieren, die im Laufe der Vorversuche nicht untersucht worden waren.

Die Verhältnisse liegen anders *auf dem Gebiete des Eisenbetons*, indem hier normalerweise die Zementdosierung und die Granulometrie für die ganze Bauzeit und die verschiedenen Bauteile zum vorneherein festgelegt werden können, bei Gewährleistung einer konstanten Zusammensetzung der während des Baues angelieferten Zuschlag-Komponenten. Es handelt sich also bei der Ausführung einer Eisenbetonkonstruktion nur darum, die Einhaltung der in den Vorversuchen festgelegten Zusammensetzungen zu überwachen, und da bleibt als einzige unbestimmte Größe, bei der heute immer stärker Fuß fassenden gewichtsmäßigen Dosierung sowohl des Zements als auch der Zuschlagstoffe, der Wassergehalt. Die Tatsache, daß der natürliche Feuchtigkeitsgrad der Zuschlagstoffe, insbesondere des Sandes, innerhalb gewisser Grenzen schwankt, erschwert das Konstanthalten des totalen Wassergehaltes. Im übrigen besteht bezüglich des Wassergehaltes ein gewisser Interessenkonflikt zwischen dem Bauausführenden und dem Bauherren, indem eine Erhöhung des Wassergehaltes den Arbeitsaufwand für die Verdichtung verkleinert, gleichzeitig aber die Festigkeit herabsetzt. Es sollte deshalb im Interesse aller am Bau Beteiligten liegen, sich über den zweckmäßigsten Wassergehalt zu einigen, sofern dieser sich nicht schon aus den Vorversuchen ergeben sollte, und auf jeden Fall eine Methode zur kontradiktorischen Kontrolle desselben festzulegen.

Es besteht die Möglichkeit, diese Kontrolle in Form einer Verdichtbarkeitsmessung durchzuführen; insbesondere empfiehlt es sich, auf der Baustelle jeweils die Verdichtbarkeit derjenigen Mischungen zu bestimmen, die zur Herstellung der Probekörper für die Festigkeitskontrolle verwendet werden. Das im Laufe der eigenen Untersuchungen verwendete vereinfachte Gerät nach Fritsch (siehe Kapitel II) ist speziell im Hinblick auf den Baustellengebrauch entwickelt worden.

Für die Durchführung von Stichproben, oder wenn einzelne nicht ganz einwandfreie Mischungen möglichst rasch untersucht werden sollen, empfiehlt es sich allerdings, andere Geräte zu verwenden, welche handlicher sind als das Gerät nach Fritsch und mit denen irgendeine Größe gemessen wird (z. B. ein Eindringmaß), welche für eine bestimmte Betonzusammensetzung mit dem Wassergehalt variiert. Anstatt einer Verdichtbarkeitsmessung wird dann lediglich eine «Konsistenz»-Prüfung durchgeführt, wobei für jede Betonzusammensetzung auf experimentellem Wege eine Relation zwischen der mit dem Gerät nach Fritsch gemessenen Verdichtbarkeit und der mit dem einfacheren «Konsistenz»-Prüfgerät gemessenen Größe aufgestellt werden kann. Sehr geeignet zu diesem Zweck ist die Betonsonde von Humm.