

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

Zum Andenken an meinen Vater

INHALTSVERZEICHNIS

<i>Einleitung</i>	5
<i>Inhaltsübersicht</i>	7
<i>Folgerungen für die Praxis</i>	10
I. Die Verdichtbarkeit des Frischbetons und deren Messung	13
A. Einleitung und Definition der Verdichtbarkeit	13
B. Die Methode des Verdichtungsfaktors	14
C. Die Vibration des Frischbetons	15
1. Allgemeine Betrachtungen über die Verdichtung durch Vibration	15
2. Grundsätzliches über die Messung der Verdichtbarkeit durch Vibration	19
3. Die Separation des Frischbetons als Nebenwirkung der Vibration	20
4. Die praktische Bedeutung der Vibration	20
D. Die Messung der Verdichtbarkeit durch Vibration	22
1. Prinzipielle Betrachtungen über die bestehenden Methoden und über den zweckmäßigsten Versuchstyp. Die «einfache» Verdichtung	22
2. Meßmethoden, bei denen ein «einfacher» Verdichtungs Vorgang stattfindet	23
a) Messung der Vibrationsdauer bis zum «Wasserziehen»	23
b) Methode der Setzungskurve nach Fritsch	24
c) Diskussion der Methode von Fritsch	25
3. Die Methode von Plum	28
a) Allgemeines	28
b) Beschreibung der Methode von Plum	28
c) Anwendung der Methode	30
d) Eignung der Methode zur Messung der Verdichtbarkeit	31
E. Methoden zur Erfassung der Separation	32
1. Einleitung	32
2. Zahlenmäßige Erfassung der Separation nach Tournon	33
3. Messungen mit dem Deformabilitätsmesser des schwedischen Forschungsinstitutes für Zement und Beton	38
II. Verdichtbarkeitsmessungen nach der Methode von Fritsch (eigene Versuche)	43
A. Einleitung. Zweck der Versuche	43
B. Verwendete Geräte	45
C. Untersuchte Mischungen	48
D. Versuchsvorgang	49
E. Zusammenstellung der Resultate	52
F. Diskussion der Resultate	64
1. Einleitung	64
2. Diskussion der Versuchsergebnisse zur Ermittlung des Wesens der spezifischen Verdichtungsarbeit und deren Beziehung zur Vibrationszeit bis zum Wasserziehen	64
a) Einfluß der Vorverdichtung beim Einfüllen	64
b) Bedeutung der Wahl des Bezugsporengehaltes	68
c) Mathematische Approximation der Setzungskurven	71
d) Vergleich der spezifischen Verdichtungsarbeit mit der Vibrationsdauer bis zum Wasserziehen. Zurückführung der spezifischen Verdichtungsarbeit auf die streng definierte Verdichtbarkeit	74

e) Zusammenfassung	84
3. Diskussion der Versuchsergebnisse in bezug auf die Eigenschaften der untersuchten Materialien. Beziehungen zwischen Konsistenz und Verdichtbarkeit der untersuchten Mischungen	84
a) Erläuterung des Konsistenzbegriffes. Plastizität, Konsistenz und Befeuchtungsgrad	85
b) Beziehungen zwischen Konsistenz und Verdichtbarkeit der untersuchten Mischungen	89
c) Praktische Bedeutung des minimalen Zementgehaltes im Mörtel. Methode von Vallette	95
4. Diskussion der Resultate des Eindringversuches	96
III. <i>Methoden, welche eine zahlenmäßige Erfassung der Entmischbarkeit gestatten</i> ..	99
A. Einleitung. Grundsätzliches über die Messung der Transportverarbeitbarkeit	99
B. Die Ausbreitprobe	102
1. Beschreibung der Apparate. Versuchsgang	102
2. Diskussion des Ausbreitversuches	103
3. Eigene Versuchsergebnisse	104
C. Vebe-Versuche mit Kurvenaufnahme	106
1. Beschreibung des Vebe-Versuches	106
2. Zweck der vom Verfasser ausgeführten Versuche. Beschreibung des hierfür verwendeten Gerätes	107
3. Untersuchte Mischungen. Bestimmung der «Vebe-Zeit»	109
4. Diskussion der Versuchsergebnisse	109
a) Allgemeine Diskussion des Kurvenverlaufes	111
b) Einfluß der Kohäsion auf die Vebe-Zeit. Beziehung zwischen spezifischer Verdichtungsarbeit und Vebe-Zeit	112
c) Vergleich von Betonzusammensetzungen hinsichtlich Kohäsion. Neigung der Ausbreitphase	114
5. Schlußfolgerungen in bezug auf die Messung der Entmischbarkeit	115
IV. <i>Methoden zur Kontrolle des Wassergehaltes des Frischbetons</i>	119
A. Einleitung	119
B. Der Setzversuch (Slump-Test)	122
1. Versuchsgang	122
2. Beanspruchung der Proben. Die drei Slump-Typen	122
3. Eigene Versuchsergebnisse	123
4. Anwendungsmöglichkeiten des Setzversuches	125
C. Messung der Ausflußzeit aus einem Trichter bei Vibration	126
D. Die Eindringproben	130
1. Beschreibung verschiedener Eindringgeräte	130
2. Versuche mit der Betonsonde von Humm. Eignung derselben zur Kontrolle des Wassergehaltes	132
<i>Literaturverzeichnis</i>	135
<i>Anhang: Sammlung von Setzungskurven und Vebe-Kurven (Photokopien der Originalkurvenblätter)</i>	

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 Verdichtungs Vorganges 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.

Leer - Vide - Empty

I. Die Verdichtbarkeit des Frischbetons und deren Messung

A. EINLEITUNG UND DEFINITION DER VERDICHTBARKEIT

In der vorangehenden «Einleitung» wurde dargelegt, daß die Verarbeitbarkeit des Frischbetons am besten durch seine Verdichtbarkeit auszudrücken ist, so daß der zahlenmäßigen Erfassung der Verdichtbarkeit eine große Bedeutung zukommt. Es stellt sich nun die Frage, was unter Verdichtbarkeit genau zu verstehen ist.

Verdichtung bedeutet Übergang vom lockeren zum kompakten Gefüge. Den Bewegungen der Teilchen im Inneren einer Betonmasse, welche zu ihrer dichten Lagerung führen, widersetzen sich Reibungskräfte, deren Überwindung einen gewissen äußeren Arbeitsaufwand erfordert. Je größer dieser Arbeitsaufwand, desto schwerer ist ein Beton zu verdichten: als Maß für die Verdichtbarkeit kann deshalb die für die Verdichtung erforderliche Energiemenge herangezogen werden. Da die Verdichtbarkeit als eine spezifische Materialeigenschaft zu definieren ist, muß zu ihrer Kennzeichnung streng genommen nur diejenige Energiemenge berücksichtigt werden, welche tatsächlich die Aufhebung der Reibungswiderstände der Mischung «in sich selbst» bewirkt; ein Teil der total aufgewendeten Arbeit wird nämlich zur Überwindung der Reibung zwischen dem Beton und seinen Grenzflächen (Schalungen und Armierungen) verwendet. Zur eindeutigen Definition der Verdichtbarkeit ist ferner der Endzustand des Verdichtungs Vorganges genau festzulegen: streng genommen ist die Verdichtung dann beendet, wenn alle Hohlräume ausgefüllt sind. Die Verdichtbarkeit wäre somit durch jene Energiemenge auszudrücken, welche zur Erzielung der vollkommenen Verdichtung erforderlich ist¹. Obschon sich mit jeder normal zusammengesetzten Betonmischung die vollkommen dichte Raumauffüllung erreichen läßt, ist es versuchsstechnisch kaum möglich, festzulegen, wann diese genau eintritt. Man wird sich deshalb, statt auf die vollkommene Verdichtung, normalerweise auf einen bestimmten Verdichtungsgrad, d. h. auf einen bestimmten verbleibenden Hohlraumgehalt, beziehen müssen, womit wohl eine genügend gute Approximation des theoretisch genauen Verfahrens erreicht werden kann, wenigstens solange der Bezugsporengehalt klein ist.

¹ Im speziellen Fall des Luftporenbetons stellen die durch das Zusatzmittel erzeugten Luftporen eine Komponente des Betons dar, und sind somit in der «vollkommen verdichteten» Masse inbegriffen.

Ähnlich wie hier dargelegt wurde, ist die Eigenschaft der Verdichtbarkeit in einer Publikation von GLANVILLE (1) definiert. Die von ihm entwickelte Methode ist im Abschnitt B dieses Kapitels beschrieben. Sie kann allerdings heute nicht mehr empfohlen werden, da bei einer Messung der Verdichtbarkeit die Verdichtung prinzipiell durch dieselben Mittel bewirkt werden muß, die bei der praktischen Verarbeitung zur Anwendung gelangen. Nach diesem Prinzip ist zur Prüfung von Qualitätsbeton heute die Vibration zu verwenden.

Im Abschnitt C dieses Kapitels («Die Vibration des Frischbetons») wird dargelegt, auf welche Weise die Vibration die Aufhebung der Reibungswiderstände im Inneren einer Frischbetonmasse bewirkt und wie die Verdichtbarkeit durch Vibration grundsätzlich zu messen ist. Im gleichen Abschnitt wird ferner auf eine Nebenwirkung der Vibration hingewiesen, nämlich die Separation, deren eingehende Besprechung im Abschnitt E erfolgt, und endlich werden die Ursachen der allgemeinen Qualitätsverbesserung, welche die Einführung der Vibration mit sich gebracht hat, an einem Beispiel erläutert.

Auf die praktische Messung der Verdichtbarkeit durch Vibration wird im Abschnitt D dieses Kapitels eingegangen. Die bestehenden Methoden werden beschrieben und diskutiert, und es ergibt sich, daß eine der Methoden, nämlich die von FRITSCH, sich prinzipiell zur Messung der Verdichtbarkeit nach deren genauen Definition zu eignen scheint, wobei aber die übliche Art der Auswertung der Meßresultate nicht befriedigen kann. Es wird deshalb eine neue Methode zur Auswertung der Setzungskurven vorgeschlagen und deren Eignung durch eigene experimentelle Untersuchungen nachgewiesen.

Die Ziele und Ergebnisse der eigenen Versuche sowie die sich ergebenden Schlußfolgerungen betreffend die Messung der Verdichtbarkeit sind im zweiten Kapitel angegeben.

B. DIE METHODE DES VERDICHTUNGSFAKTORS

Ausgehend von seiner Definition der Verarbeitbarkeit, hat GLANVILLE die Methode des Verdichtungsfaktors (compacting factor) entwickelt. Sein Apparat ist in Figur 1 abgebildet. Der Versuchsgang ist folgender:

Der Beton wird zunächst in den oberen Trichter lose eingefüllt und dann in den unteren fallen gelassen, wodurch eine gewisse Vorverdichtung erreicht wird, welche von der zufälligen Art des Einfüllens weitgehend unabhängig ist. Aus dem unteren Trichter wird dann die Probe in einen Zylinder fallen gelassen.

Es erfolgt dabei eine Verdichtung durch Umsetzung der kinetischen Energie des freien Falles. Der Überschuß wird abgestrichen (die Dimensionen sind so gewählt, daß ein Überschuß immer vorhanden ist) und der Beton im Zylinder gewogen. Als Maß für die Verdichtbarkeit wird das Verhältnis des Betongewichts im Zylinder zu jenem Betongewicht, das sich bei vollkommener Verdichtung ergeben würde, betrachtet. Dieses Verhältnis wird als «Verdichtungsfaktor» bezeichnet.

Glanville wird der genauen Definition der Verdichtbarkeit gerecht, sofern die zwei folgenden Voraussetzungen erfüllt sind. Es muß einmal das Verhältnis der zur Überwindung der inneren Reibung erforderlichen Arbeit zur total aufgewendeten Arbeit für alle Mischungen dasselbe sein, und ferner müssen irgend zwei Mischungen, welche den gleichen Verdichtungsfaktor ergeben, welche sich also unter Aufwendung derselben Energiemenge im gleichen Maße verdichten, auch gleiche Energiemengen erfordern zu ihrer vollkommenen Verdichtung. Ob diese beiden Voraussetzungen genau zutreffen, wurde von Glanville nicht untersucht.

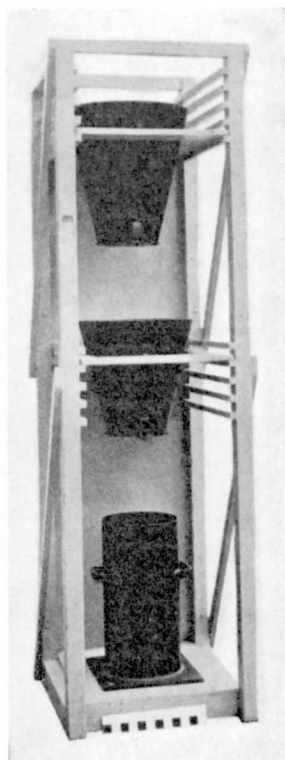


Fig. 1: Apparat von Glanville.

C. DIE VIBRATION DES FRISCHBETONS

1. Allgemeine Betrachtungen über die Verdichtung durch Vibration

Bei der Vibration von Frischbeton werden die Bewegungen der Teilchen im Innern der Masse, welche zu einer dichteren Lagerung derselben führen, dadurch ermöglicht, daß die gegenseitigen inneren Pressungen, die sich aus dem Gewicht und eventuellen äußeren Belastungen ergeben, durch einen durch die Vibration erzeugten «Gegendruck» periodisch aufgehoben werden.

Zur näheren Erklärung dieses Vorganges seien hier die wesentlichen Punkte der *Theorie von L'Hermite* erwähnt.

L'HERMITE hat sich eingehend mit der mathematischen Erfassung des Vibrationsvorganges abgegeben. In einer ersten Theorie (2) hat er die Entstehung des Gegendruckes, den er «Schwingungsdruck» (*pression d'agitation*)

oder «Expansion» nennt, auf die gegenseitigen Stöße der Teilchen zurückzuführen versucht. Auf Grund einer Entgegnung von FORSLIND und BERGSTRÖM (3), welche darauf hinwiesen, daß das Vorhandensein des Zementleims gar keine gegenseitigen Stöße zuläßt, hat er die Theorie insofern revidiert, daß er ihr nicht mehr die Bewegungen der einzelnen Teilchen, sondern die Fortpflanzung von «Gesamtvibrationswellen» zugrundelegt (4).

Betrachtet man irgendein eng begrenztes Volumenelement im Inneren einer vibrierenden Frischbetonmasse, so kann dessen «Gesamtschwingung», unter der Voraussetzung einer sinusförmigen erregenden Vibration, durch die Gleichung

$$u = a \cdot \cos \omega t \quad (1) \quad \text{wobei } a = \text{Amplitude der «Gesamtschwingung»}$$

$$\omega = \text{Kreisfrequenz der erregenden Vibration}$$

dargestellt werden.

Die Gleichung der zugehörigen Druckschwingung lautet:

$$p = a \cdot \omega \cdot \sqrt{\frac{\zeta}{\alpha}} \cdot \sin \omega t \quad (2)$$

wobei ζ = mittlere Dichte des Frischbetons

α = Kompressibilitätskoeffizient des Frischbetons

Ist nun die Amplitude der Druckschwingung ($a \cdot \omega \cdot \sqrt{\frac{\zeta}{\alpha}}$) größer als der durch das Gewicht und eine eventuelle äußere Belastung verursachte statische Innendruck, so werden während eines Teils der Vibrationsperiode die Kräfte, die sich den gegenseitigen tangentiellen Verschiebungen der Teilchen widersetzen, aufgehoben. Die Teilchen können sich frei trennen und verschieben, und der Frischbeton erhält den Charakter einer Flüssigkeit.

Es ist zu bemerken, daß die Druckschwingung (Gleichung 2) effektiv gemessen werden kann, wogegen die «Gesamtschwingung» nach Gleichung (1) eigentlich nicht existiert. L'Hermite sagt diesbezüglich: «Der Frischbeton besteht aus Teilchen verschiedener Masse, welche die Tendenz haben, unabhängig voneinander zu vibrieren. Jedes Teilchen hat seine Eigenfrequenz, und für die Teilchen, deren Eigenfrequenz gleich der Frequenz des Vibrators ist, ergibt sich Resonanz. Wir haben den Kornbereich, dessen Eigenfrequenz der Vibratorfrequenz entspricht, „bande passante“ genannt. Die Teilchen dieses Bereiches haben eine größere Schwingungsamplitude als die Gesamtmasse. Die kleineren Teilchen schwingen mit der Amplitude der Gesamtmasse, die größeren schwingen weniger oder überhaupt nicht.»

Die Gleichungen (1) und (2) geben den richtigen Zusammenhang zwischen Schwingung und Druck im Falle der Wellenfortpflanzung in einem homogenen elastischen Medium. Weil der Frischbeton nicht homogen ist, hat die Schwin-

gungsamplitude in Gleichung (1) lediglich die Bedeutung einer Vergleichsgröße: da es sich hier darum handelt, eine rein qualitative Erklärung des Vibrationsvorganges zu geben, wird die Schwingungsamplitude a in diesem Sinne weiterhin verwendet.

Die von einem Vibrator in eine Frischbetonmasse übertragene mechanische Energie pflanzt sich nicht verlustlos in der Masse fort, sondern wird zum Teil in Wärme umgewandelt, was zur Folge hat, daß die Schwingungsamplitude auch im Falle einer ebenen Welle, d. h. wenn die Wellenfortpflanzung nur in einer Richtung erfolgt, mit zunehmendem Abstand vom Vibrator abnimmt.

Bezeichnet man mit U die in der Volumeneinheit enthaltene, von der Schwingung herrührende Totalenergie ($U = E_{pot} + E_{kin} = \zeta \cdot \frac{a^2 \cdot \omega^2}{2}$ [3]), so lautet das allgemeine Gesetz der Energiefortpflanzung:

$$\frac{dU}{dx} = -\Omega U \quad (4)$$

wobei Ω der sogenannte Absorptionskoeffizient ist, welcher von der Frequenz und von der Zusammensetzung des Betons abhängt, während x der Abstand vom Vibrator bedeutet.

Die Lösung dieser Differentialgleichung lautet:

$$U = U_0 \cdot e^{-\Omega x} \quad (5)$$

wobei U_0 = Schwingungsenergie in unmittelbarer Nähe des Vibrators.

Setzt man für U und U_0 die entsprechenden Werte nach Gleichung (3) ein, so ergibt sich die Abhängigkeit der Schwingungsamplitude vom Abstand vom Vibrator wie folgt:

$$\begin{aligned} \frac{a^2 \cdot \omega^2}{2} \cdot \zeta &= \frac{a_0^2 \cdot \omega^2}{2} \cdot \zeta \cdot e^{-\Omega x} \\ a &= a_0 \cdot e^{-\Omega/2 \cdot x} \end{aligned} \quad (6)$$

wobei a_0 = Schwingungsamplitude in unmittelbarer Nähe des Vibrators.

Für die Amplitude der Druckschwingung gilt dann:

$$H = a_0 \cdot e^{-\Omega/2 \cdot x} \cdot \omega \cdot \sqrt{\frac{\zeta}{x}} \quad (7)$$

(Im Falle einer zylindrischen Wellenausbreitung kommt zum exponentiellen Abminderungsfaktor der Schwingungsamplitude, welcher sich aus den Energieverlusten ergibt, noch ein Abminderungsfaktor hinzu, welcher aus der Abnahme der Energiedichte mit zunehmendem Abstand von der Vibrationsquelle folgt.)

Zu dieser Berechnung der Abhängigkeit der Schwingungsamplitude vom Abstand vom Vibrator ist zu bemerken, daß die ihr zugrundeliegende Voraussetzung eines konstanten Wertes des Absorptionskoeffizienten Ω nur zutrifft,

sofern der Beton durchgehend dieselbe Zusammensetzung hat, d. h. insbesondere eine konstante Dichte aufweist. Dies bedeutet, daß die Gleichungen (6) und (7) nur für den Zustand gelten, der nach bereits erfolgter Verdichtung besteht.

Der eigentliche *Verdichtungsvorgang* geht folgendermaßen vor sich:

Vor Beginn der Vibration befindet sich der Beton in einem lockeren Zustand. Am Anfang des Vibrationsprozesses erfolgt wegen des großen Luftgehaltes eine unvollkommene Energieübertragung innerhalb der Masse, was mit anderen Worten bedeutet, daß die Schwingungsenergie stark gedämpft wird (hoher Absorptionskoeffizient). Der «Vibrationsdruck» ist am größten in unmittelbarer Nähe des Vibrators, so daß hier die Verdichtung am raschesten fortschreitet. Durch die Verminderung des Luftgehaltes wird die Energieübertragung verbessert (d. h. der Absorptionskoeffizient wird kleiner), der Bereich des «verflüssigten» Betons wird immer größer und der Verdichtungsgrad immer höher. Schließlich reicht die «verflüssigte» und somit vollkommen verdichtbare Zone bis zu jenem Abstand vom Vibrator, bei dem die Amplitude der Druckschwingung, die nun der Gleichung (7) entsprechen kann, da ja die Dichte nahezu konstant ist, gerade noch gleich groß ist wie die durch das Eigengewicht und die äußere Belastung bewirkte innere Pressung. Die Größe dieses Bereiches ist der sogenannte Aktionsradius des betreffenden Vibrators.

Bei dem so beschriebenen Verdichtungsvorgang sind zwei Faktoren von Bedeutung: die «Kopplung» zwischen Vibrator und Frischbeton, d. h. das Maß der effektiven Energieübertragung vom Vibrator in den Frischbeton, welches sich in den Schwingungen in der unmittelbaren Umgebung des Vibrators ausdrückt, und die «Energieabsorption» im verdichteten Beton, welche durch den Absorptionskoeffizienten gekennzeichnet werden kann. Kopplung und Energieabsorption bestimmen die Größe des Aktionsradius. Beide Faktoren sind abhängig von den Merkmalen des Vibrators und von der Zusammensetzung des Betons.

Wie diese Abhängigkeiten genau verlaufen, ist noch nicht bekannt. Es sind wohl diesbezüglich einzelne systematische Untersuchungen mit Schwingungs- und Druckmessungen im Inneren von vibrierenden Frischbetonmassen durchgeführt worden, ohne daß daraus schon endgültige Schlüsse gezogen werden könnten. Die Resultate der neuesten Untersuchungen, zusammen mit einer Darstellung der Versuche älteren Datums, sind in einer Publikation des Schwedischen Forschungsinstitutes für Zement und Beton (5) angegeben.

Im Hinblick auf die Messung der Verdichtbarkeit ist das Problem der Abhängigkeit der Kopplung von der Betonzusammensetzung von besonderer Bedeutung. In Mischungen trockener Konsistenz erfolgt bei Beginn der Vibration jeweils nur eine sehr reduzierte Energieübertragung vom Vibrator in den Frischbeton; es bildet sich aber sogleich eine Feinmörtelschicht um den Vibra-

tor herum, welche die Kopplung verbessert, so daß diese bald ebensogut ist wie in Mischungen «plastischer» Konsistenz. Allgemein kann wohl angenommen werden, daß nach einer kurzen Anlaufzeit die von einem bestimmten Vibrator in die Betonmasse pro Zeiteinheit übertragene Energiemenge für verschiedene Betonzusammensetzungen nur in sehr engen Grenzen variiert.

2. Grundsätzliches über die Messung der Verdichtbarkeit durch Vibration

Um die Verdichtbarkeit zahlenmäßig zu erfassen, muß festgestellt werden, welche Energiemenge von einem bestimmten Vibrator in eine Betonprobe übertragen werden muß, um dieselbe vollkommen zu verdichten. (Die vollkommene Verdichtung ist allerdings ein idealer Bezugspunkt der Messungen. Praktisch wird man sich, wie gesagt, auf einen bestimmten vorgeschrittenen Verdichtungsgrad beziehen müssen.) Dabei muß darauf geachtet werden, daß die Proben immer auf dieselbe Art in das Versuchsgefäß eingefüllt werden.

Wenn die aufgenommene Motorenleistung des Vibrators konstant ist, kann die Energiemessung durch eine Zeitmessung ersetzt werden. Die Bedingung ist in Wirklichkeit nicht genau erfüllt, da die vom Motor eines Vibrators aufgenommene Leistung mit der Vibrationsdauer und der Betonzusammensetzung variieren kann. Es scheint aber zweckmäßig, diesbezüglich von der strengen Definition der Verdichtbarkeit abzuweichen, da ja die Vibrationszeit für den Praktiker eine anschaulichere und einleuchtendere Vergleichsgröße darstellt als der effektive Energieaufwand.

Wenn die Voraussetzung zutrifft, daß die Kopplung für einen bestimmten Vibratortyp unabhängig von der Betonzusammensetzung ist, so hängt die für die Verdichtung erforderliche Vibrationszeit nur davon ab, wie leicht sich die Teilchen gegenseitig verschieben, wenn der statische Innendruck durch den Vibrationsdruck aufgehoben wird. Bei leichterer Verschiebbarkeit ergibt sich schon eine dichtere Lagerung vorgängig der Vibration, und während der Vibration erfolgt eine schnellere Verdichtung auch deshalb, weil sich die Energieübertragung rascher verbessert (raschere Abnahme der Energieabsorption).

Die Verdichtbarkeit des Frischbetons ist somit weitgehend gleichbedeutend mit seiner «inneren Beweglichkeit», wobei festgehalten werden muß, daß diese Eigenschaft nur in bezug auf einen bestimmten Vibrationstyp definiert werden kann. Es gibt mit anderen Worten keine allgemeine Eigenschaft der «Verdichtbarkeit durch Vibration». Die Einflüsse der Charakteristiken der Vibration (Frequenz, Amplitude, Beschleunigung) auf die innere Beweglichkeit von Betonmischungen sind wohl noch nicht systematisch untersucht worden. Dennoch läßt sich zum Beispiel die Bedeutung der Frequenz schon an der erwähnten Tatsache, daß jede Frequenz ihren zugehörigen Resonanz-Körnungsbereich hat, erkennen. Danach ist z. B. anzunehmen, daß das Verhältnis der Verdich-

barkeiten zweier Mischungen mit verschiedenen Größtkorndurchmessern für stark voneinander abweichende Frequenzen nicht dasselbe ist.

3. Die Separation des Frischbetons als Nebenwirkung der Vibration

Da sich eine vibrierende Betonmasse verhält wie eine Flüssigkeit, erfolgt in deren Inneren eine Relativverschiebung der Komponenten, indem die schwereren Teile, d. h. die Kieskörner, absinken, während der Feinmörtel, und insbesondere das Wasser, gegen die Oberfläche aufsteigen. Der Vorgang findet, je nach der Zusammensetzung der Mischung, entweder nach erfolgter Verdichtung, oder auch schon während derselben, statt.

Die Anreicherung von Kies im unteren Teil einer Betonmasse bringt wohl keine Beeinträchtigung der Qualität des Endproduktes mit sich. Dagegen kann sich die Ansammlung von Feinmörtel an der Oberfläche ungünstig auswirken, speziell im Hinblick auf die Frostbeständigkeit. Insbesondere deutet ein Feinmörtelaufstieg vor erfolgter Verdichtung auf eine ungenügende Wasserbindung im Inneren der Masse hin, was sich auch auf die Verdichtungsgeschwindigkeit selber auswirkt. (Siehe Diskussion der eigenen Verdichtbarkeitsmessungen in Kapitel II.)

Dieser Sedimentations- und Aufstiegsprozeß wird im Englischen und im Französischen «Entmischung» (*Ségrégation*) genannt. Es soll hier dafür der Ausdruck *Separation* verwendet werden, um diese Entmischung durch Sedimentation von der Entmischung im lockeren Zustande infolge der Trägheitskräfte zu unterscheiden.

Die Methoden, die auf direktem oder indirektem Wege die Separation von Frischbeton zu verfolgen suchen, sind im Abschnitt E dieses Kapitels behandelt.

4. Die praktische Bedeutung der Vibration

Die Vibration hat allgemein eine Erleichterung der Verarbeitung und damit eine Verbesserung der Qualität des Betons mit sich gebracht. Sie ermöglicht nämlich schon bei kleineren Wassergehalten eine vollkommene Verdichtung, was eine Erhöhung der Festigkeiten bedeutet. Es sei dies an einem Beispiel, welches die Druckfestigkeit betrifft, erläutert.

Bei einer bestimmten aufgewendeten Verdichtungsarbeit ergibt sich für jede Trockenzusammensetzung ein Maximalwert der Festigkeit, der abhängig ist von der Größe und Wirksamkeit der Verdichtungsarbeit.

Einer Publikation von TOURNON (2) ist die Figur 2 entnommen, in welcher die Würfeldruckfestigkeiten einer ziemlich sandreichen Mischung mit einem Maximal Korn von 2,5 cm und der Zementdosierung PC 300 in Funktion des Wassergehaltes aufgetragen sind. Sie wurden einerseits an gestampften Proben

(R_2), und andererseits an Proben, die während einer bestimmten Zeit auf einem Vibrationstisch verdichtet wurden (R_1), ermittelt.

Für Wassercementwerte höher als 0,65 sind die Kurven R_1 und R_2 identisch: die Proben sind in diesem Bereich vollkommen verdichtet. Unterhalb des Wassercementwertes 0,65 (Wendepunkt der Festigkeitskurve) genügt bei den gestampften Proben die aufgewendete Arbeit nicht mehr, um sie voll-

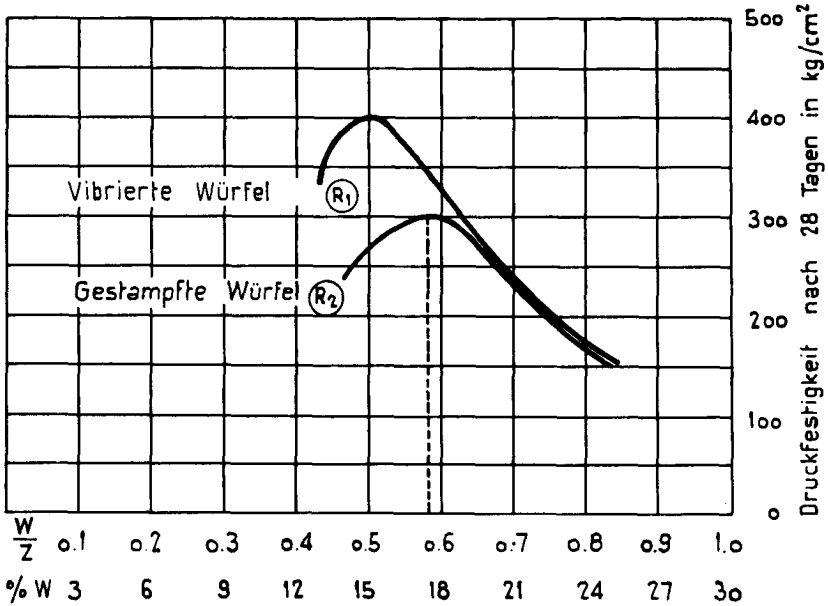


Fig. 2: Einfluß der Verdichtungsmethode auf die Festigkeit.

kommen zu verdichten. Mit abnehmendem Wassergehalt nimmt der verbleibende Luftgehalt immer stärker zu, und da sich ein Luftgehalt auf die Festigkeit gleich auswirkt wie ein gleichgroßer Wassergehalt, ergibt sich eine immer schwächere Zunahme und schließlich eine Wiederabnahme der Festigkeit mit abnehmendem Wassergehalt.

Die Kurven R_2 und R_1 können nun, obwohl sie sich auf einen Spezialfall beziehen, als charakteristisch betrachtet werden für die Verhältnisse, die sich für eine bestimmte Betonzusammensetzung, einerseits bei Anwendung eines vernünftigen Maßes an Stampfarbeit, und andererseits bei der vermehrten Energiezufuhr durch die moderne Vibration, ergeben: *die Vibration gewährt vollkommene Verdichtung bei kleineren Wassergehalten* und erlaubt somit die Herstellung von Beton mit höherer Festigkeit als dies bei Verarbeitung von Hand möglich war.

D. DIE MESSUNG DER VERDICHTBARKEIT DURCH VIBRATION

1. *Prinzipielle Betrachtungen über die bestehenden Methoden und über den zweckmäßigsten Versuchstyp. Die «einfache» Verdichtung*

Der Definition der Verdichtbarkeit, wie sie zu Beginn dieses Kapitels angegeben wurde, entspricht jene Meßmethode am besten, bei welcher nur eine vornehmlich vertikale Verschiebung der Teilchen bis zu ihrer dichten Lagerung erfolgt. Es sollten deshalb prismatische oder zylindrische Formen verwendet werden, welche eine regelmäßige Raumauffüllung vorgängig der Vibration gestatten. Von der Wandreibung darf man in diesem Fall annehmen, daß sie einen geringen Bruchteil der aufgewendeten Energie beansprucht. So dürfte die Verdichtbarkeit des Frischbetons bezogen auf einen bestimmten Vibrations-typ als spezifische Materialeigenschaft am deutlichsten und durch Besonderheiten der Messung am wenigsten beeinflußt zum Ausdruck kommen.

Ein solcher Verdichtungsvorgang soll im folgenden als «*einfache*» *Verdichtung* bezeichnet werden.

Bei den bisher bekannt gewordenen Methoden wird im allgemeinen eine Vibrationszeit gemessen, wobei es sich meistens nicht um einen «*einfachen*» Verdichtungsvorgang, sondern um kompliziertere Prozesse handelt. Die Methoden lassen sich in zwei Gruppen aufteilen:

1. Methoden, bei denen wohl die Vibrationszeit bis zur fertigen Verdichtung gemessen wird, wobei aber der einfache Verdichtungsvorgang entweder künstlich erschwert, z. B. durch Schikanen im Inneren der Gefäße, oder von einer Formänderung der Probe begleitet wird. Als Beispiel sei die *Vebe-Methode* erwähnt, bei welcher eine Umformung von einem Kegelstumpf in einen Zylinder bei gleichzeitiger Verdichtung erfolgt. Die Methode ist in Kapitel III beschrieben und diskutiert.

2. Methoden, bei denen die Vibrationsdauer, die zur Durchführung eines bestimmten Fließvorganges erforderlich ist, oder unter Umständen das Ausmaß des Fließens bei festgelegter Vibrationsdauer, gemessen wird, wobei das Fließen zur Hauptsache erst erfolgt, nachdem der Beton bereits verdichtet ist. (Z. B. die Methode von FAURY (6).)

Bei den vorerwähnten Methoden wird vom «*einfachen*» Verdichtungsvorgang aus den folgenden zwei Gründen abgewichen: einmal in der Meinung, daß durch einen komplizierteren Vorgang die praktischen Verarbeitungsverhältnisse besser wiedergegeben werden, und ferner auf Grund der Annahme, die Durchführung eines gegenüber der einfachen Verdichtung verlängerten Vorganges lasse die Unterschiede zwischen verschiedenen Mischungen in den Meßresultaten deutlicher zutage treten. Dazu ist folgendes zu bemerken:

Es besteht in der Baupraxis die Tendenz, den Beton vor Beginn der Vibration möglichst gleichmäßig innerhalb des endgültig auszufüllenden Raumes zu verteilen, um Inhomogenitäten zu vermeiden und um die Vibrierarbeit zu rationalisieren und übersichtlich zu gestalten. Somit besteht die Verarbeitung durch Vibration meistens tatsächlich nur im Auslösen von vertikalen Verschiebungen der Teilchen, ohne Umformungen oder Fließbewegungen der Gesamtmasse. Finden auch unter Umständen beschränkte Formänderungen oder Fließbewegungen statt, so sind diese je nach dem Objekt immer wieder anderer Art, so daß sie nicht in einer allgemein zu verwendenden Prüfmethode festgelegt werden können. Dasselbe gilt für die Erschwerung der Verdichtung, z. B. durch die Armierungen: auch diese wirken sich von Fall zu Fall verschieden aus und können nicht in einer allgemein gültigen Methode berücksichtigt werden. Bei den Methoden mit Fließvorgängen werden die Proben wie gesagt häufig stark übervibriert; eine ausgesprochene Übervibration ist aber prinzipiell unerwünscht wegen der Separationsgefahr. Was die Empfindlichkeit der Messungen anbelangt, ist zu bemerken, daß durch eine Komplizierung des Vorganges gegenüber der einfachen Verdichtung die Streuungsursachen vermehrt werden, was im Hinblick auf die praktische Anwendung der Methoden von großer Bedeutung ist.

Für die Messung der Verdichtbarkeit sind also unbedingt diejenigen Methoden vorzuziehen, bei denen lediglich eine «einfache» Verdichtung stattfindet. Diese sind im folgenden Abschnitt beschrieben. Es wird sich dabei zeigen, daß auch diese Methoden, so wie sie normalerweise angewendet werden, keine Resultate ergeben, die mit der Verdichtbarkeit nach ihrer genauen Definition in direktem Zusammenhang stehen. Es besteht aber die Möglichkeit, nach Auswertungsmethoden zu suchen, die einen solchen Zusammenhang ergeben.

2. Meßmethoden, bei denen ein «einfacher» Verdichtungs Vorgang stattfindet

a) Messung der Vibrationsdauer bis zum «Wasserziehen»

Bei dieser Methode wird die Zeit gemessen, die es braucht, um bei Vibration durch einen bestimmten Vibrator eine in ein prismatisches oder zylindrisches Gefäß eingefüllte Probe soweit zu verdichten, bis sich die Oberfläche durch das Aufsteigen des Rüttelleims schließt.

Die Methode ist ihrer Einfachheit wegen sehr verbreitet. Sie wird besonders im Zusammenhang mit der Herstellung der Probekörper für die Festigkeitskontrolle angewendet, da sie nur einen geringen zusätzlichen Arbeitsaufwand erfordert.

Gegen diese Methode kann aber von vorneherein ein prinzipieller Einwand erhoben werden, der im übrigen alle jene Methoden betrifft, bei denen der

Aufstieg des Rüttelleims als Stichpunkt für die Messung einer Vibrationszeit verwendet wird (z. B. die Vebe-Methode):

Es ist zuzugeben, daß bei der praktischen Verarbeitung dem Rüttelleimaufstieg als äußerem Zeichen für ein vorgeschrittenes Verdichtungsstadium eine große Bedeutung zukommt. Dies berechtigt aber noch nicht dazu, auch die Messung der Verdichtbarkeit nach dem Rüttelleimaufstieg zu richten; es ist nämlich nicht erwiesen, daß für verschieden zusammengesetzte Mischungen der Verdichtungsgrad im Zeitpunkt des «Wasserziehens» jeweils derselbe ist.

Auch ist es schwierig, diesen Zeitpunkt im Versuch überhaupt eindeutig festzulegen: der Aufstieg des Rüttelleims an die Oberfläche einer Probe erfolgt nicht auf der ganzen Fläche mit einem Schlag, sondern er erstreckt sich über eine gewisse Zeitspanne. Besonders bei trockenen Mischungen können sich je nach dem Beobachter beträchtliche Differenzen ergeben.

b) Methode der Setzungskurve nach Fritsch

In verschiedenen Publikationen (7), (8), (9), empfiehlt FRITSCH zur Messung der Verdichtbarkeit von Beton eine Methode, die auf der *Aufnahme der Setzungskurve bei einfacher Verdichtung durch Vibration* beruht.

Es wird ein zylindrischer Behälter beliebiger Größe verwendet, und die Verdichtung kann durch Einführung eines Nadelvibrators oder durch Aufschauben auf einen Vibrationstisch erfolgen. In Figur 3 ist der von Fritsch als großes Rüttelprüfgerät bezeichnete Apparat dargestellt. Der Behälter wird zunächst lose mit Beton gefüllt und dann der schwere aber leicht bewegliche und mit einem Schreibgerät verbundene Deckel locker aufgesetzt. Bei Vibration des Betons sinkt der Deckel an der Oberfläche nach und überträgt seine Bewegungen auf das Schreibgerät.

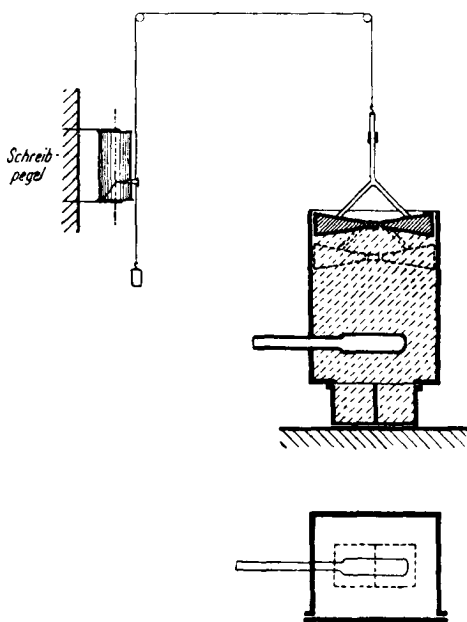


Fig. 3: Großes Rüttelprüfgerät von Fritsch.

Einem nicht publizierten Aufsatz von Fritsch («Rüttelprüfgeräte Bauart Fritsch», Wien, August 1952) ist folgender Absatz entnommen:

«Mit dem beschriebenen Gerät wurden an verschiedenen Prüf- und Baustellen in Österreich und im Ausland Hunderte von Betonprüfungen durchge-

führt. Die gemachten Erfahrungen lassen die folgende Arbeitsweise als zweckmäßig erscheinen:

Die Geschwindigkeit, mit der sogleich nach Inbetriebnahme des Rüttlers der Beton verdichtet und der Deckel abgesenkt wird, zeichnet sich am Schreibpegel vor allem im ersten und wichtigsten Teil der Setzungskurve sehr genau ab und gibt ein überaus wertvolles Maß für die Rüttelwilligkeit einer Betonmischung. Auf Grund von zahllosen Beispielen unserer Baustellen kennen wir den Verlauf der Kurve, die einer idealen Rüttelwilligkeit entspricht. Sie kann im Laufe der Bauzeit durch Vergleiche mit der Verarbeitbarkeit überprüft werden.»

Bei Entwicklung oder Prüfung von Betonmischungen geht Fritsch im allgemeinen so vor, daß er je nach der erforderlichen Qualität einen Wasserzementwert festlegt und für jede untersuchte Zusammensetzung der Zuschlagstoffe diejenige Menge Wasserzementleim bestimmt, die nötig ist, um die ideale Rüttelwilligkeit zu gewährleisten. (Diese Wasserzementleimmenge charakterisiert dann das betreffende Gemenge hinsichtlich seiner Wirtschaftlichkeit.)

Dazu nimmt Fritsch für verschiedene Befeuchtungsgrade (bei einer bestimmten Zusammensetzung der Zuschlagstoffe) die Setzungskurven auf, welche um so flacher sind, je trockener die Konsistenz. Die Kurven werden so übereinander aufgetragen, wie dies im Beispiel der Figur 4 gezeigt ist (ebenfalls dem erwähnten Aufsatz entnommen). Nach Dazwischenlegen der Idealkurve ergibt sich die gesuchte Menge Wasserzementleim durch Interpolation.

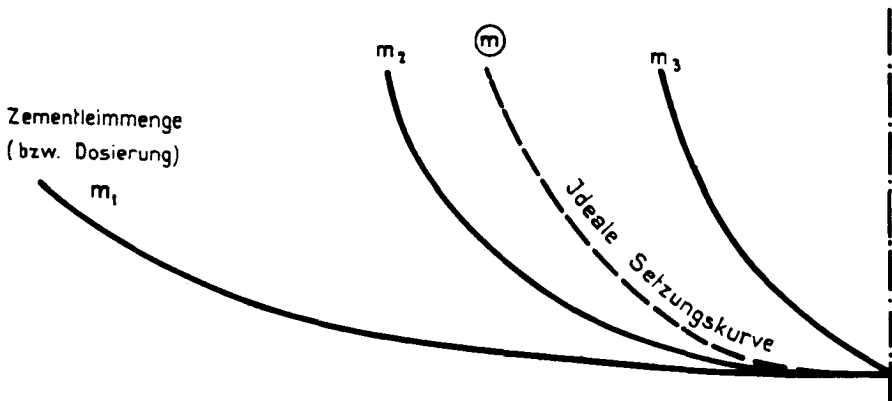


Fig. 4: Bestimmung der Menge Zementleim (bzw. der Zementdosierung), welche bei bestimmter Zusammensetzung der Zuschlagsmaterialien ideale Verdichtbarkeit ergibt.

c) Diskussion der Methode von Fritsch

Die «Rüttelwilligkeit» nach Fritsch ist diejenige Eigenschaft des Frischbetons, die im Abschnitt C 2 dieses Kapitels als «innere Beweglichkeit» bezeichnet wurde. Sie äußert sich in der Form der Setzungskurven.

Die beschriebene Auswertungsmethode der Setzungskurven nach Fritsch ergibt allerdings eine gewisse Unsicherheit, was an einem konkreten Beispiel gezeigt werden soll (Figur 5). Zu diesem Zweck werden drei Setzungskurven, die im Verlaufe der eigenen Versuche nach der Methode von Fritsch erhalten wurden, vorweggenommen, nämlich diejenigen, welche sich mit der Betonzusammensetzung A-100:15 (die Bedeutung dieser Bezeichnung ist in Kapitel II, Abschnitt C angegeben) bei den Wasserzementwerten 0,40, 0,42 und 0,44 ergeben haben.

Sollen die drei betrachteten Betonmischungen bezüglich Verdichtbarkeit miteinander verglichen werden, so sind nach Fritsch ihre Setzungskurven so übereinander zu legen, daß sie unten gemeinsam auslaufen. Figur 5 zeigt nun, daß ein solches Vorgehen keine eindeutige Auswertung der Versuchsergebnisse erlaubt. Wenn man nämlich die relative Lage von Setzungskurven, die in der beschriebenen Weise übereinandergelegt wurden, in vertikaler Richtung leicht variiert, so kann man nachträglich die nach unten auslaufenden Äste der Kurven durch Horizontalverschiebung wiederum zum Übereinstimmen bringen, wobei die seitlichen Abstände der oberen Äste der Setzungskurven, welche nach Fritsch für den Vergleich der Verdichtbarkeiten maßgebend sind, stark verändert werden.

Dies ist auf Figur 5 ersichtlich: der erste Vergleich der Setzungskurven ergibt dort ungefähr dieselbe Rüttelwilligkeit für die drei untersuchten Mischungen, während der zweite Vergleich der gleichen Setzungskurven auf eine deutliche Abstufung der Rüttelwilligkeiten schließen läßt. Die relative Lage der drei Kurven in vertikaler Richtung ist in Figur 5 aus der Lage der horizontalen Bezugsggeraden ersichtlich, welche das Niveau der vollkommenen Verdichtung für jede der drei Mischungen bezeichnen. Das Volumen der vollkommen verdichteten Proben ist im betrachteten Beispiel wohl bekannt, bei der üblichen Versuchsausführung nach Fritsch hingegen nicht, so daß man bei der Kurvenauswertung nach Fritsch ebensogut zu der einen wie zu der andern der beiden in Figur 5 dargestellten Lösungen gelangen kann, da ja die relative Vertikalverschiebung der beiden äußeren Kurven von einem Fall zum andern nur 3% der Totalhöhe der Proben beträgt. Es ist nicht einzusehen, wie unter diesen Umständen eine einwandfreie Charakterisierung der Mischungen erfolgen soll.

Zur Beseitigung der Unsicherheit in der Beurteilung der Setzungskurven muß unbedingt deren vertikale Lage eindeutig festgelegt werden können, und dies ist nur möglich, wenn man das Niveau der vollkommenen Verdichtung kennt. Ist dies der Fall, so können verschiedene Mischungen hinsichtlich ihrer Rüttelwilligkeit dadurch untereinander verglichen werden, daß man die Neigungen der Tangenten an die Setzungskurven bei einem bestimmten verbleibenden prozentualen Luftgehalt untereinander vergleicht.

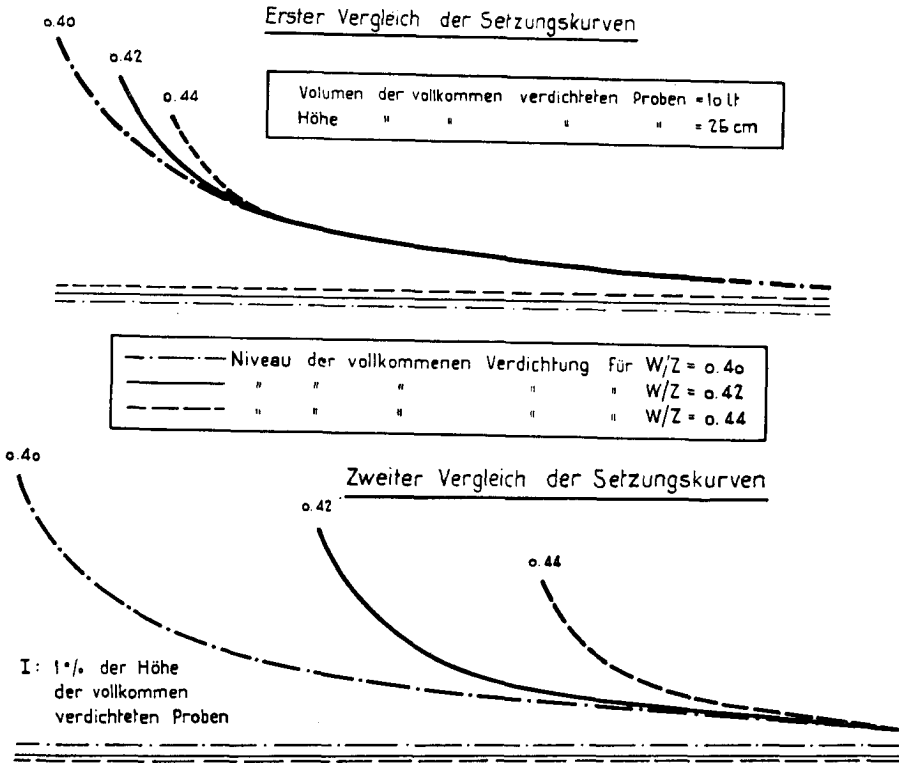
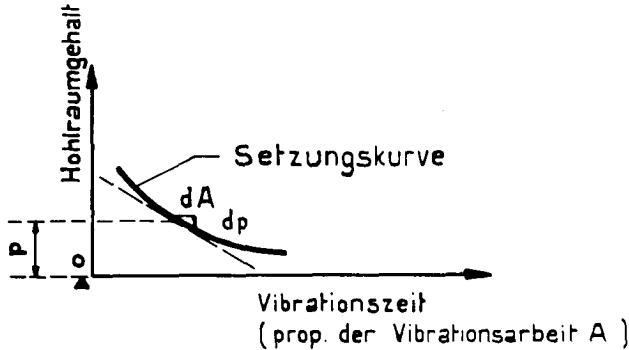


Fig. 5: Setzungskurven der Betonzusammensetzung A-100:15 für die Wasserzementwerte 0,40, 0,42 und 0,44.

Je flacher die Tangente an die Setzungskurve ist, desto schwerer läßt sich die Mischung weiter verdichten. Die Tangentensteigung bedeutet Verdichtungszeit pro Abnahme des Hohlraumgehaltes, und kann, unter der vereinfachenden Annahme einer direkten Proportionalität zwischen Vibrationszeit und Vibrationsarbeit (siehe Abschnitt C 2), als «spezifische Verdichtungsarbeit» bezeichnet werden.

Obschon die Tangentensteigung zweifellos eine Funktion der Verdichtbarkeit ist, kann nicht von vorneherein behauptet werden, daß sie die Verdichtbarkeit selber entsprechend ihrer genauen Definition ausdrückt. Weil die Bestimmung der «spezifischen Verdichtungsarbeit» aber auf der Kenntnis des vollkommen verdichteten Volumens beruht, kann der Zusammenhang zwischen Verdichtbarkeit und spezifischer Verdichtungsarbeit verfolgt werden. Im zweiten Kapitel geschieht dies an Hand der Resultate der eigenen Verdichtbarkeitsmessungen. Was mit den Versuchen im einzelnen bezweckt wird, ist aus der Einleitung zum zweiten Kapitel ersichtlich. Es soll hier lediglich vorweggenom-



$$\text{Spezifische Verdichtungsarbeit} = \frac{dA}{dp}$$

men werden, daß bei der Diskussion der eigenen Versuchsergebnisse unter anderem die Unzweckmäßigkeit, die Vibrationszeit bis zum Wasserziehen als Maß für die Verdichtbarkeit zu verwenden, nachgewiesen wird.

3. Die Methode von Plum

a) Allgemeines

Niels M. PLUM (Vorsteher des dänischen nationalen Forschungsinstitutes für das Bauwesen) hat eine Methode zur Kennzeichnung von Korngemischen hinsichtlich ihrer Eignung zur Herstellung von Qualitätsbeton entwickelt (10), welche hier angeführt wird, weil sie auf der Auffassung beruht, daß die Verdichtbarkeit die primäre Eigenschaft des Frischbetons in bezug auf seine Verarbeitung darstellt, und weil bei den Messungen eine genaue Berücksichtigung des Hohlraumgehaltes der Proben erfolgt.

Die praktische Bedeutung der Methode ist allerdings gering, einmal aus versuchstechnischen Gründen, indem die Hohlraumbestimmung kompliziert ist und die Kenntnis der Trockengewichte der Komponenten voraussetzt, und ferner aus prinzipiellen Gründen, indem keine direkten Vergleichswerte für die Verdichtbarkeit erhalten werden.

b) Beschreibung der Methode von Plum

PLUM (10) untersucht Betonzusammensetzungen durch *Aufnahme ihrer Hohlräume-Wassergehalts-Kurve für eine bestimmte Verdichtungsarbeit*.

Die Methode kann an Hand der Figur 6 (Figur 15 der Publikation von Plum) prinzipiell erläutert werden.

Für eine gegebene Betonzusammensetzung sind hier die absoluten Volumina an Feststoffen (Kiessand + Zement), Wasser und Luft in einem gleich 1 ge-

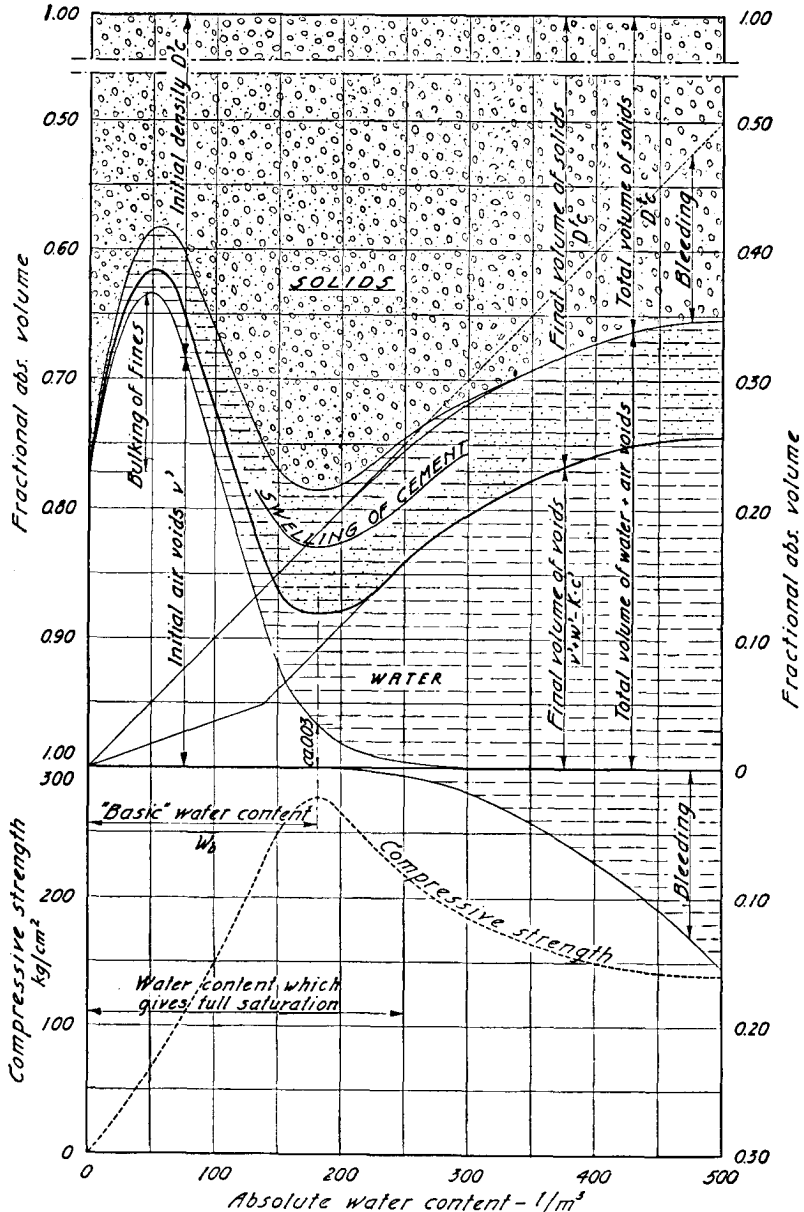


Fig. 6: Typische Beziehung zwischen Wassergehalt, Dichtigkeit und Festigkeit.

setzten Totalvolumen Beton, wie sie sich bei Anwendung einer bestimmten Verdichtungsarbeit ergeben, in Funktion des Wassergehaltes schematisch aufgetragen.

Wie bereits in Abschnitt C 4 erwähnt, erfolgt eine vollkommene Verdichtung (Luftporen = 0) nur oberhalb eines bestimmten Wassergehaltes (hier bei 250 l/m^3). Da unterhalb des Bereiches der vollkommenen Verdichtung der Luftgehalt mit abnehmendem Wassergehalt immer stärker wächst, stellt sich, wie gesagt, ein Minimum der «Gesamthohlräume» (Wasser+Luft) ein bei einem Wassergehalt, der als «Basis»-Wassergehalt (basic water content) bezeichnet wird.

Dieser Minimalwert der Gesamthohlräume (bzw. dessen Ergänzung zu 1, d. h. die maximale Dichtigkeit) wird nun von Plum als Ausdruck der Verarbeitbarkeit (= Verdichtbarkeit) der betreffenden Betonzusammensetzung betrachtet. Somit wird die Verarbeitbarkeit in engen Zusammenhang gebracht mit der Qualität des Endproduktes, da ja die «Gesamthohlräume» maßgebend sind für die Festigkeit, bei ein und demselben Zementgehalt. Genau genommen, hängt die Festigkeit ab von den «endgültigen Hohlräumen» (final volume of voids), die sich aus den Gesamthohlräumen durch Abzug der Volumenzunahme des Zements infolge Bildung des Zementsteins (swelling of cement) ergeben.

c) Anwendung der Methode

Plum hat seine Methode an einer Anzahl Mischungen durchgeführt. Er verwendete eine Würfelform (Kantenlänge 20 cm) mit auf den Seitenflächen angebrachten Halbrundeisen (zur Erschwerung der Verdichtung) (Figur 7). Die Methode wurde im Laufe der eigenen Untersuchungen ebenfalls angewandt. Die Figuren 7 und 8 beziehen sich auf diese eigenen Versuche.

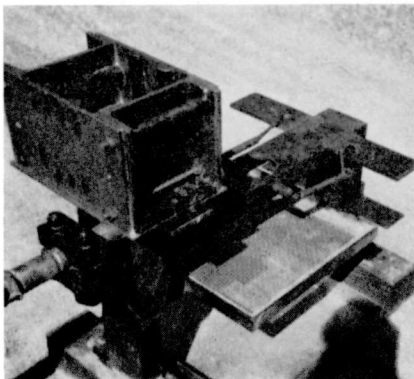


Fig. 7: Würfelform nach Plum, auf Vibrationsrahmen befestigt.

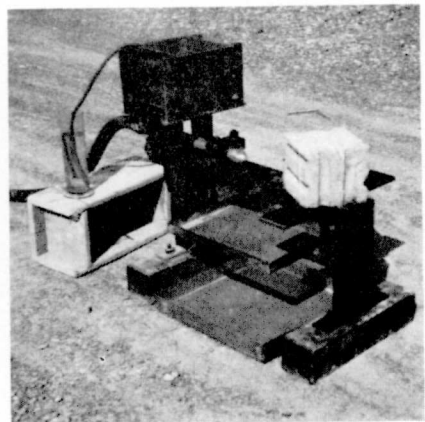


Fig. 8: Bestimmung des Volumens der vibrierten Probe nach der Methode von Plum.

Es werden jeweils ungefähr 6 Liter absoluten Volumens der zu untersuchenden Mischung in die Würfelform eingefüllt und während 60 sec auf einem Vibrationstisch vibriert. Die Form wird am folgenden Tage mit Wasser aufgefüllt; durch Wiederabsaugen des Wassers kann das Totalvolumen der vibrierten Probe ermittelt werden (Figur 8). Der Luftporengehalt ergibt sich aus diesem Gesamtvolumen, abzüglich das totale absolute Volumen, berechnet mit Hilfe der spezifischen Gewichte der Trockenmaterialien.

Für eine bestimmte Trockenzusammensetzung müssen Messungen bei verschiedenen Wassergehalten, welche zum Teil unterhalb des «Basis»-Wassergehaltes liegen, ausgeführt werden. Die Resultate werden aufgetragen in einem Diagramm der Gesamthohlräume in Funktion des Wassergehaltes (siehe Figur 9): zu jedem Wassergehalt als Abszisse gehört als Ordinate der entsprechende Gesamthohlraumgehalt, welcher sich als Summe des Wassergehaltes und des Luftporengehaltes ergibt.

Das Beispiel der Figur 9 zeigt wie das Resultat der Prüfung von zwei Betonzusammensetzungen mit der gleichen Dosierung und verschiedenen Sandgehalten ausfallen würde. Die sandärmere Mischung 1 ergäbe einen kleineren minimalen Gesamthohlraumgehalt als die sandreichere, weil bei der aufgewendeten Vibrationsarbeit die vollkommene Verdichtung für die erste Mischung bis zu einem kleineren Wassergehalt erreicht werden kann als dies bei der zweiten möglich ist.

d) Eignung der Methode zur Messung der Verdichtbarkeit

Aus der Beschreibung des Versuchsganges geht hervor, daß die Methode von Plum für die Verwendung auf der Baustelle schon aus rein versuchstechnischen Gründen nicht in Frage kommt.

Die Methode gibt im übrigen keine direkte Angabe über die Verdichtbarkeit einzelner Mischungen. Sie wäre wohl grundsätzlich geeignet zur Durchführung eines Vergleiches verschiedener Trockenzusammensetzungen im Hinblick auf ein größeres Bauvorhaben. Dabei kommt aber der Wahl der Bezugs-Vibrationszeit eine ausschlaggebende Bedeutung zu, was unbedingt als Nachteil zu betrachten ist.

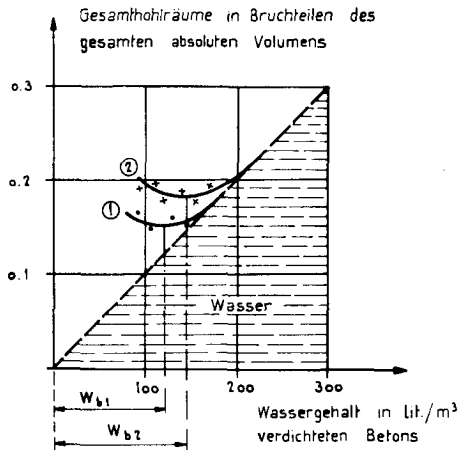


Fig. 9: Beispiel der Bestimmung der minimalen Gesamthohlräume nach Plum.

Anstatt die Vibrationszeit festzulegen, ist es zweckmäßiger den Vibrationsvorgang in seinen einzelnen Phasen zu verfolgen, wie dies beim Versuch nach Fritsch geschieht. Die Diagramme nach Plum, welche die Abhängigkeit der Gesamthohlräume vom Wassergehalt für eine bestimmte Vibrationsdauer darstellen, können ja ohne weiteres auch aus den Setzungskurven nach Fritsch abgeleitet werden, vorausgesetzt, daß das Niveau der vollkommenen Verdichtung jeweils bekannt ist.

E. METHODEN ZUR ERFASSUNG DER SEPARATION

1. Einleitung

Es wurde bereits im Abschnitt C 3 dieses Kapitels, im Laufe einer allgemeinen Erläuterung der Vibration, auf die Erscheinung der Separation hingewiesen, d. h. auf den vertikalen Entmischungsvorgang, der im Innern einer Frischbetonmasse durch die Vibration bewirkt wird. In diesem Abschnitt werden die Meßmethoden beschrieben, die eine direkte oder indirekte Erfassung der Separation gestatten.

Es wird zunächst die Methode von Tournon behandelt, bei welcher eine direkte zahlenmäßige Erfassung der Separation durch Bestimmung der Verschiebung der Schwerpunktslage im Inneren einer Betonmasse erfolgt. Die Methode ist allerdings sehr wenig empfindlich, was an Hand eigener Versuchsergebnisse gezeigt wird.

Sodann wird die schwedische Methode des Deformabilitätsmessers beschrieben. Bei dieser erfolgt eine Erfassung der Separation auf indirektem Wege. Gemessen wird eigentlich eine Art innerer Beweglichkeit des Frischbetons, die sogenannte «Deformabilität». Es handelt sich um eine Eigenschaft, die nicht genau definiert werden kann, was weiter nicht von großer Bedeutung ist, indem es sich bei den Versuchen mit dem Deformabilitätsmesser erwiesen hat, daß nicht so sehr die einzelnen «Deformabilitätswerte» an sich, als vielmehr die Variationen der Deformabilität im Laufe des Vibrationsprozesses von Bedeutung sind. Insbesondere deutet eine Abnahme der Deformabilität mit zunehmender Vibrationsdauer auf einen Schmiermittelaufstieg vor erfolgter Verdichtung, d. h. auf eine ungenügende Wasserbindung im Inneren der Masse hin. Mischungen, die ein solches Verhalten zeigen, werden als unstabil bezeichnet.

Wie bereits in der «Inhaltsübersicht» erwähnt wurde, äußert sich die ungenügende Stabilität gewisser Betonzusammensetzungen auch in den Resultaten der Verdichtbarkeitsmessungen nach Fritsch, insofern die Kurvenauswertung nach der in Abschnitt D 2 c vorgeschlagenen Methode erfolgt. (Siehe Kapitel II, Abschnitt F3.)

Die Methode des Deformabilitätsmessers kommt leider wegen den komplizierten Apparaten für eine praktische Anwendung nicht in Frage.

2. Zahlenmäßige Erfassung der Separation nach Tournon

Nach Messungen von TOURNON (2) ergibt sich im Inneren einer Betonprobe nach verlängerter Vibration eine Zunahme des Raumgewichts mit der Tiefe, wie in Figur 10 dargestellt. Der unterste Teil mit erhöhtem Raumgewicht entspricht der Zone mit Kiesanreicherung. Von einer bestimmten Tiefe an aufwärts zeigt sich eine bruske Raumgewichtsabnahme bis zum Raumgewicht des Mörtels und noch weiter hinunter in der obersten Schicht mit Wasseranreicherung.

Als Maß für die eingetretene Inhomogenität kann nach Tournon die Größe der Fläche zwischen der Kurve des effektiven Raumgewichts und dem Niveau des mittleren Raumgewichtes der vibrierten Probe, bezogen auf die Höhe der Probe, betrachtet werden (schraffierte Fläche auf Figur 10). Dabei muß die Differenz der spezifischen Gewichte des Kiesel und des Mörtels berücksichtigt werden, da ja eine bestimmte Fläche einer um so stärkeren Separation entspricht, je kleiner diese Differenz ist.

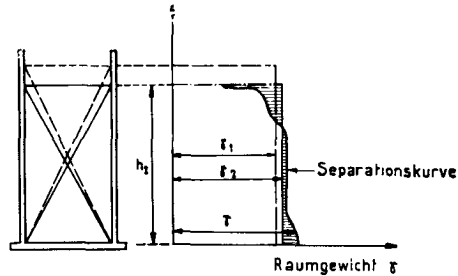


Fig. 10: Separationsvorgang. Verlauf des Raumgewichtes.

Der Ausdruck für die Separation S erhält somit nach Tournon die folgende Form:

$$S = \int_0^{h_2} \frac{|\gamma_2 - \gamma|}{h_2} dh \cdot \frac{1}{\gamma_{Kies} - \gamma_{Mörtel}} \quad (1)$$

wobei das spezifische Gewicht des Mörtels zur Vereinfachung der Messungen durch das mittlere Raumgewicht des vibrierten Betons (γ_2) ersetzt werden kann.

Zur Bestimmung dieser Größe müssen innerhalb einer vibrierten Probe die Raumgewichte in verschiedenen Tiefen ermittelt werden, was, selbst bei Verwendung eines demontierbaren Gefäßes, ein sehr langwieriges Verfahren darstellt.

Tournon schlägt deshalb eine vereinfachte Methode vor, die auf der Ermittlung der Schwerpunkthöhe im vibrierten Beton beruht.

Der Ausdruck (1) wird wie folgt abgeändert:

$$\text{Separation} = \int_0^{h_2} \frac{|\gamma_2 - \gamma| h \cdot dh}{h_2^2} \cdot \frac{1}{\gamma_{Kies} - \gamma_2} \quad (2)$$

Daraus ergibt sich durch Umrechnen:

$$\text{Separation} = \frac{h_{G1} - h_{G2}}{h_2} \cdot \frac{\gamma_2}{\gamma_{Kies} - \gamma_2} \quad (3)$$

wobei (siehe Figur) h_{G1} = Schwerpunkthöhe der vibrierten Betonmasse, wenn diese homogen wäre (= $h_2/2$),

h_{G2} = Schwerpunkthöhe effektiv (kleiner als h_{G1} wegen der erfolgten Separation).

Tournon hat ein Gerät entwickelt, die sogenannte «Separationswaage», das eine einfache Ermittlung der Schwerpunkthöhe h_{C2} und somit des Wertes der Separation nach Gleichung (3) gestattet.

Das Gerät ist in Figur 11 abgebildet. Die zu untersuchende Betonprobe wird in den zylindrischen Behälter eingefüllt und auf einem Vibrationstisch vibriert. Der dicht abschließende Deckel wird dann so weit in das Gefäß abgesenkt, bis er in Kontakt steht mit der Betonoberfläche (Entweichen der Luft durch ein Ventil in Deckelmitte). An den Seiten des Behälters sind zwei Arme angebracht, welche an ihrem freien Ende durch einen Bügel verbunden sind, woran Gewichte angehängt werden können. Der Behälter wird in horizontaler Lage mittels Schneiden auf eine Stütze aufgelegt und durch Anbringen entsprechender Gewichte ausbalanciert. Die Horizontalstellung des Behälters wird dabei mit Hilfe eines Index kontrolliert, der auf die Nullmarke einer an der horizontal gelagerten Stütze angebrachten Skala zeigen muß.



Fig. 11: Separationswaage von Tournon.

Die Anordnung der Kräfte beim Ausbalancieren des Behälters ist in Figur 12 dargestellt, woraus sich die folgende Gleichgewichtsbedingung ergibt:

$$G \cdot 43,95 = M \cdot m + L \cdot l' \quad (4)$$

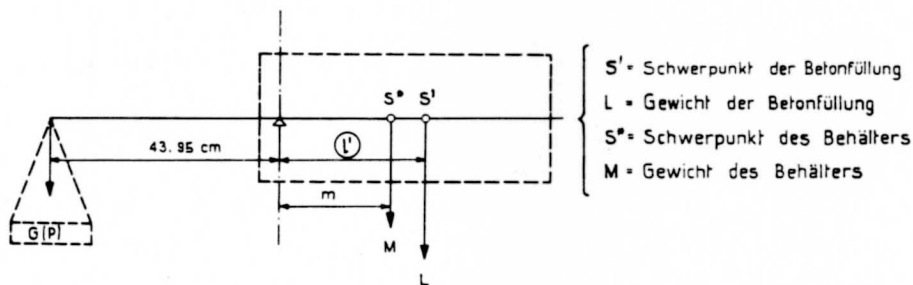


Fig. 12: Bestimmung der Schwerpunktslage im vibrierten Beton.

Nach Ermittlung der Kraft G , welche erforderlich ist, um das Gefäß samt der vibrierten Probe auszubalancieren, muß zur Bestimmung des Gliedes $M \cdot m$ in Gleichung (4) jeweils noch das leere Gefäß ausbalanciert werden, bei genauer Einhaltung der Deckelstellung, wie sie sich beim Vibrationsversuch ergab.

Die Gleichgewichtsbedingung ist die folgende:

$$P \cdot 43,95 = M \cdot m \quad (5)$$

(Bei häufiger Verwendung der Separationswaage empfiehlt es sich, die Abhängigkeit der Größe $M \cdot m$ von der Deckelstellung in Kurvenform aufzutragen.)

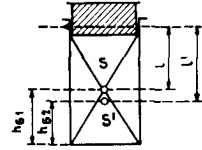
Der Schwerpunktsabstand der vibrierten Probe vom Auflager ergibt sich aus den beiden Gleichgewichtsbedingungen (4) und (5) wie folgt:

$$l' = \frac{43,95 (G - P)}{L} \quad (6)$$

Zur Berechnung der Separation nach Gleichung (3) wird dann die Differenz der Schwerpunktsabstände l' und l gebildet.

Es ist:

$$h_{G1} - h_{G2} = l' - l \quad (\text{siehe Figur})$$



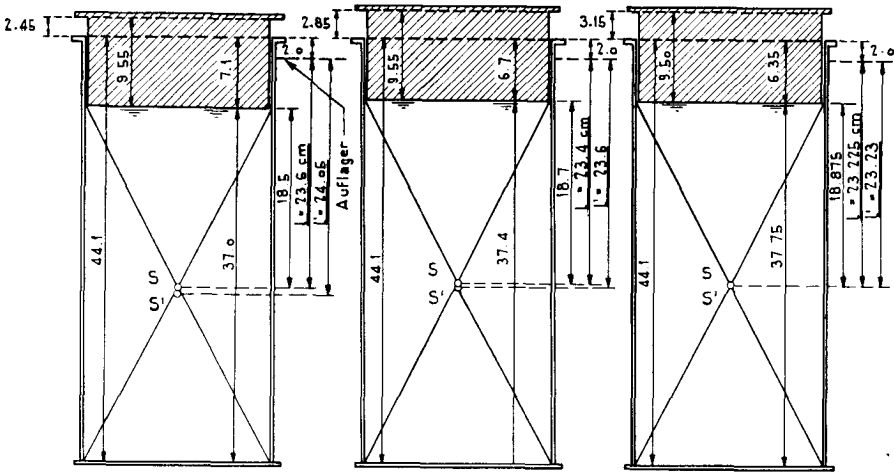
Im Laufe der eigenen Untersuchungen wurde die Empfindlichkeit dieser Methode geprüft, unter Verwendung einer von den Laboratoires du Bâtiment et des Travaux Publics (Paris) zur Verfügung gestellten Separationswaage (Figur 11).

Es wurde ein und dieselbe Trockenzusammensetzung untersucht (Material aus Kiesgrube Reichenbach, gewichtsmäßiges Mischungsverhältnis Sand:Kies:Zement =

$$\underline{W/Z = 0.65}$$

$$\underline{W/Z = 0.55}$$

$$\underline{W/Z = 0.50}$$



$$\left. \begin{array}{l} L = 27.16 \text{ Kg} \\ G = 21.12 \text{ " } \\ P = 6.28 \text{ " } \end{array} \right\} \begin{array}{l} l' = \frac{43,95(G-P)}{L} \\ = 24.05 \text{ cm} \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} L = 27.93 \text{ Kg} \\ G = 21.185 \text{ " } \\ P = 6.23 \text{ " } \end{array} \right\} \begin{array}{l} l' = 23.6 \text{ cm} \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} L = 28.30 \text{ Kg} \\ G = 21.14 \text{ " } \\ P = 6.195 \text{ " } \end{array} \right\} \begin{array}{l} l' = 23.23 \text{ cm} \end{array}$$

Schwerpunktsverschiebung :

$$\underline{h_{G1} - h_{G2} = l' - l = 24.05 - 23.6 = 0.45 \text{ cm} = 4.5 \text{ mm}}$$

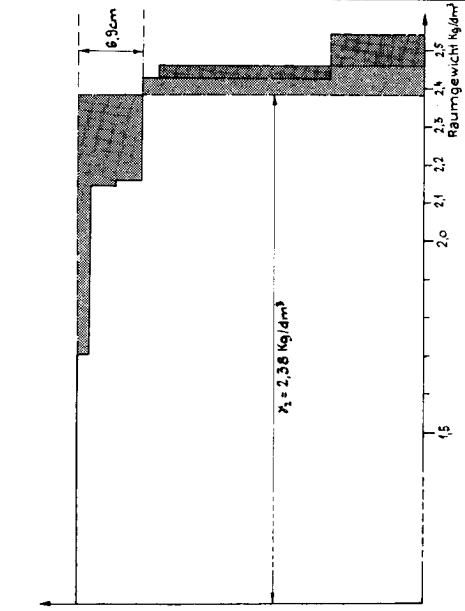
$$\underline{h_{G1} - h_{G2} = l' - l = 23.6 - 23.4 = 0.2 \text{ cm} = 2 \text{ mm}}$$

$$\underline{h_{G1} - h_{G2} = l' - l = 23.23 - 23.225 = 0.005 \text{ cm} = 0.05 \text{ mm}}$$

Fig. 13: Bestimmung der Schwerpunktsverschiebung nach 1 Minute Vibration.
Mischungsverhältnis Sand (0-5 mm): Kies (15-30 mm): Zement = 38:62:15.

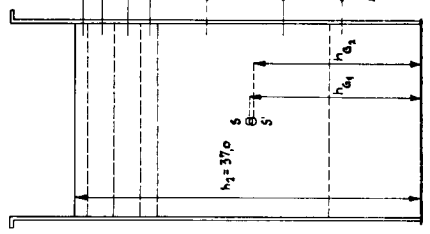
Verlauf des Raumgewichts mit der Tiefe nach 1 Minute Vibration.

Mischungverhältnis: Sand (0-5mm): Kies (5-30mm): Zement = 38:62:15. Wasserzementwert = 0,65



Gewicht Kg	Höhe cm	Schwerpts. Höhe h _s cm	Volumen dm ³	Raumgew. Kg/dm ³	Gew. h _s
0,68	1,3	36,35	0,4	1,7	24,75
1,71	2,6	34,4	0,8	2,14	58,80
2,00	3,0	31,6	0,925	2,16	63,20
1,27	1,7	29,25	0,525	2,42	37,20
(13,7	18,4	19,2	5,66	2,42	263,0
21,50	28,4	14,2	8,74	2,46	305,60
(7,8	10,0	5,0	3,08	2,54	39,0
46 = 27,16			11,39	4(6+4) = 489,55	(485,95)

$h_{s1} = \frac{h_1}{2} = 18,5 \text{ cm}$
 $h_{s1} \cdot ZG = 489,55 = 18,05 \text{ cm}$
 $h_{s1} \cdot ZG = 27,16$
 Schwerpunktsverschiebung:
 $h_{s1} - h_{s2} = 4,5 \text{ mm}$



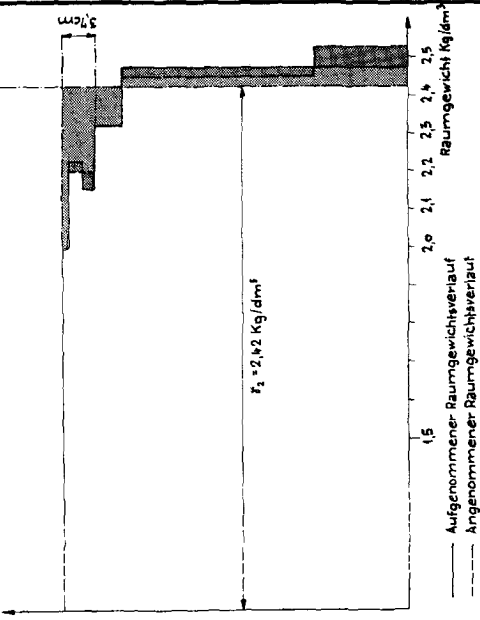
mittleres Raumgewicht: $\gamma_s = \frac{27,16}{11,39} = 2,38 \text{ Kg/dm}^3$
 ($h_{s1} = 18,05 \text{ cm} = 17,9 \text{ cm}$; Schwerpunktsverschiebung: $h_{s1} - h_{s2} = 6 \text{ mm}$)

— Aufgenommener Raumgewichtsverlauf
 - - - Angenommener Raumgewichtsverlauf

Fig. 14

Verlauf des Raumgewichts mit der Tiefe nach 1 Minute Vibration.

Mischungsteilnis: Sand (0-5mm): Kies (15-30mm): Zement = 38:52:10. Wasserzementwert=0,55.



Gewicht kg	Höhe cm	Schwerptk- Höhe kg cm	Volumen dm³	Raumgew. kg/dm³	Gewicht kg
0,44	0,7	37,05	0,22	2,0	16,3
1,16	1,7	35,85	0,62	2,25	41,6
0,86	1,5	34,55	0,40	2,15	29,6
2,20	3,1	32,15	0,95	2,32	79,8
12,02	3,0	35,2	0,92	2,30	71,1
(15,53)	29,6	20,3	6,34	2,45	315,8
25,27	50,6	15,3	9,43	2,47	556,4
(7,75	10,0	5,0	3,08	2,51	388)
				(1,52	Σ(G·h) = 544,7
					(512,8)

$h_1 = 37,4$
 $h_{G_1} = 2 = 18,7 \text{ cm}$

$h_{G_2} = \frac{\Sigma G \cdot h_2}{\Sigma G} = \frac{514,7}{27,95} = 18,45$

Schwerpunktverschiebung:

$h_{G_1} - h_{G_2} = 2,5 \text{ mm}$

Mittleres Raumgewicht: $x_1 = \frac{27,95}{11,52} = 2,42 \text{ kg/dm}^3$

($h_{G_1} = 18,37 \text{ cm}$; Schwerpunktverschiebung: $h_{G_1} - h_{G_2} = 3,3 \text{ mm}$)

Fig. 15

38:62:15, Zementdosierung PC 300) bei den drei Wasserzementwerten 0,65 (Gußbeton), 0,55 und 0,50 («plastische» Konsistenz). Die Proben wurden jeweils 1 Minute lang vibriert.

Die Resultate der Bestimmung der Schwerpunktsverschiebung sind in Figur 13 angegeben.

Für die Wasserzementwerte 0,65 und 0,55 wurde der Verlauf des Raumgewichtes mit der Tiefe nach beendigter Vibration approximativ aufgenommen durch sukzessive Materialentnahme aus dem Behälter, und in den Figuren 14 und 15 aufgetragen.

Die daraus berechneten Werte der Schwerpunktsverschiebung ($h_{G1} - h_{G2}$) stimmen überein mit den mit der Separationswaage bestimmten. Allerdings umfaßte die genaue schichtweise Raumgewichtsbestimmung nur den oberen Teil der Proben. Unter Annahme einer starken Kiesanreicherung auf dem Boden des Gefäßes (gestrichelter Raumgewichtsverlauf, eingeklammerte Werte in Tabellen auf Figur 14 und 15) ergeben sich Werte der Schwerpunktsverschiebung (eingeklammerte Werte $h_{G1} - h_{G2}$), welche ein wenig größer sind als die mit der Separationswaage bestimmten. Es ist dies eine Folge der Ungenauigkeit, sowohl der einen, wie der andern Methode.

Jedenfalls erweist sich die Methode der Schwerpunktsverschiebung als recht wenig empfindlich: Die Separation, die sich in der gießfähigen Mischung ($W/Z = 0,65$) im Laufe der Vibrationsdauer von 1 Minute eingestellt hat, ist nämlich beträchtlich (siehe Raumgewichtsverlauf auf Figur 14: die oberflächliche Schicht mit reduziertem Raumgewicht weist eine Dicke von 7 cm auf) und dürfte für normalen Vibrierbeton einen Extremfall darstellen. Dennoch beträgt die Schwerpunktsverlagerung nur 4,5 mm.

Die Unempfindlichkeit der Methode ergibt sich aus der Natur des untersuchten Stoffes selbst, nämlich aus der relativ geringen Raumgewichtsdifferenz der beiden Komponenten Kies und Mörtel.

3. Messungen mit dem Deformabilitätsmesser des schwedischen Forschungsinstitutes für Zement und Beton

Ausgehend von theoretischen Betrachtungen über die physikalischen Eigenschaften des Frischbetons, wurde im schwedischen Forschungsinstitut für Zement und Beton ein Gerät entwickelt, in welchem die Torsionsschwingungen eines in den Beton eingetauchten speziellen Schwingkörpers auf photoelektrischem Wege aufgenommen und mit Hilfe eines Oszillographen registriert werden (3), (13), (14), (15).

Apparatbeschreibung und Versuchsgang:

Das Gerät ist in Figur 16 dargestellt. Das schwingende System besteht aus einer vertikalen Torsionswelle 1, welche oben eingespannt und unten mittels einer Flügelscheibe 2 mit dem Beton gekoppelt ist. Der Beton wird in den Behälter 3 eingefüllt. Die Frequenz der Torsionsschwingung kann reguliert werden mit Hilfe der Massen 4, welche durch die Arme eines Kreuzes mit der Welle verbunden sind. Der Betonbehälter wird auf einen Vibrationstisch aufgeschraubt, so daß die Messungen, sowohl an Beton in Ruhe, als auch während fortschreitender Vibration ausgeführt werden können. Der die Schwingung erzeugende Anfangsimpuls erfolgt mittels Entladung von Kondensatorbatterien durch Elektromagnete, welche sich an den Enden des einen Kreuzarmes befinden.

Die Schwingungen werden photoelektrisch registriert (Fig. 17). Eine Scheibe 1, welche an das schwingende System befestigt ist, schirmt einen Teil des von einem Projektor 2 erzeugten Lichtkegels ab, bevor dieser auf eine Photozelle 3 einwirkt. Infolge der Schwingung variiert das Maß der Abschirmung, und somit die Lichtintensität auf

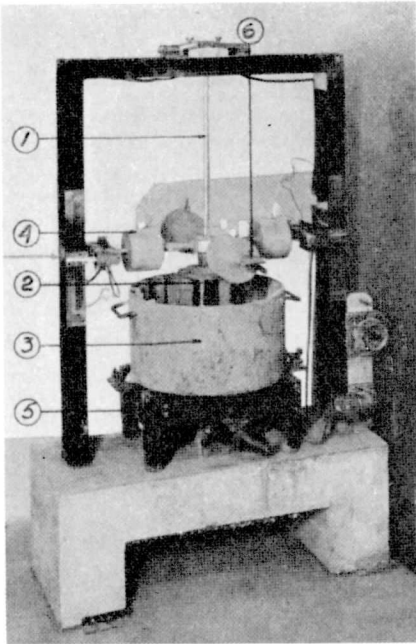


Fig. 16: Deformabilitätsmesser.

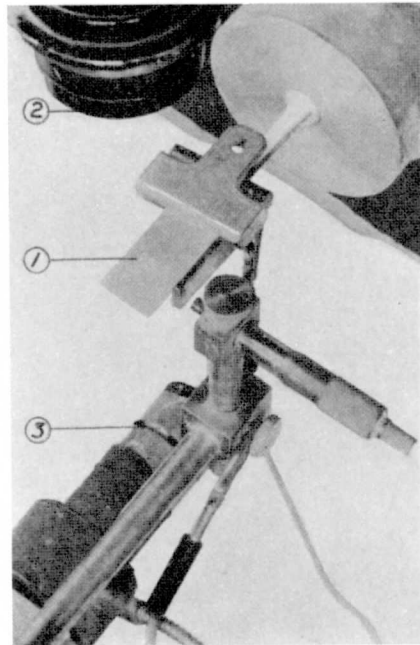


Fig. 17: Detail der Registriervorrichtung.

der Photozelle und die durch dieselbe erzeugte Stromstärke. Die Variationen der Stromstärke werden auf einen Oszillographen übertragen und auf einem Film registriert.

In den bis dahin ausgeführten Messungen betrug die maximale Schwingungsamplitude 0,003 bis 0,005 im Bogenmaß, d.h. höchstens 0,36 mm, und die Schwingungsdauer 0,7 bis 0,8 sec.

Auswertung der Oszillogramme:

Die sich ergebenden Schwingungsbewegungen (siehe Figur 18) können mit guter Approximation durch den Ausdruck

$$y = y_0 \cdot e^{-\beta t} \sin \omega t$$

dargestellt werden. Es ist dies die allgemeine Schwingungsgleichung, wenn das dämpfende Medium eine Newtonsche Flüssigkeit ist. Das logarithmische Dekrement der Schwingungsamplitude (= Logarithmus des Quotienten irgend zweier aufeinanderfolgender Höchstausschläge = $\beta \cdot T$) ist dann proportional der Viskosität.

Allerdings kann mit Hilfe eines Torsionsviskosimeters, selbst bei der Prüfung einer Newtonschen Flüssigkeit, nur dann auf den Absolutwert der Viskosität geschlossen werden, wenn die Geschwindigkeitsverteilung im Innern der zu untersuchenden Flüssig-

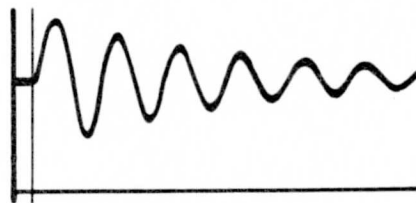


Fig. 18: Registrierte gedämpfte Torsionsschwingung.

keit mit Hilfe von theoretischen Betrachtungen berechnet werden kann. Dies ist möglich für den Fall eines kugelförmigen Schwingkörpers in einem kugelförmigen Behälter, oder eines zylindrischen Schwingkörpers in einem zylindrischen Behälter (16). Für den zweiten Fall z.B. wird angenommen, daß jede gedachte zylindrische Schicht der Substanz eine Torsionsschwingung ausführt. Mit Hilfe des Newtonschen Reibungsgesetzes und der Randbedingungen können die Phasenverschiebungen der Schwingungen benachbarter Schichten, und somit die Kräfte, die sie aufeinander ausüben, ermittelt werden, womit sich dann insbesondere die Dämpfungskraft auf den Schwingkörper in Funktion der Viskosität ergibt. Aus dem gemessenen logarithmischen Dekrement der Schwingungsamplitude läßt sich dann der Absolutwert der Viskosität ableiten. Dies ist im Fall des hier zur Sprache stehenden Gerätes nicht möglich, da die Form des Schwingkörpers es nicht erlaubt, selbst für eine Flüssigkeit die Geschwindigkeitsverteilung zu berechnen.

Im übrigen haben rheologische Untersuchungen ergeben, daß der Frischbeton nicht als plastische Substanz im theoretischen Sinne betrachtet werden kann und somit keine eigentliche Viskosität, bzw. Pseudoviskosität besitzt.

Der mit dem schwedischen Gerät bestimmte Wert des logarithmischen Dekrements der Schwingungsamplitude, bzw. eine seinem Reziprokwert proportionale Größe, wird deshalb neuerdings nicht mehr wie in den ersten Publikationen als Fluidität (d.h. Reziprokwert der Viskosität), sondern als Deformabilität bezeichnet.

Praktische Verwendung der Methode:

Der Deformabilitätsmesser hat sich als günstig erwiesen, um den Beton während der Verarbeitung durch Vibration innerlich «abzutasten».

Das übliche Verfahren besteht in der Aufnahme eines Oszillogramms alle 15 sec, während einer Zeit von 5 Minuten. Dazu ist zu bemerken, daß der schwedische Normenvibrationstisch eine wesentlich schwächere Einwirkung auf den Beton ergibt, als dies auf der Baustelle durch normale Nadel- und Oberflächenvibratoren der Fall ist: Dies erklärt die lange Versuchsdauer.

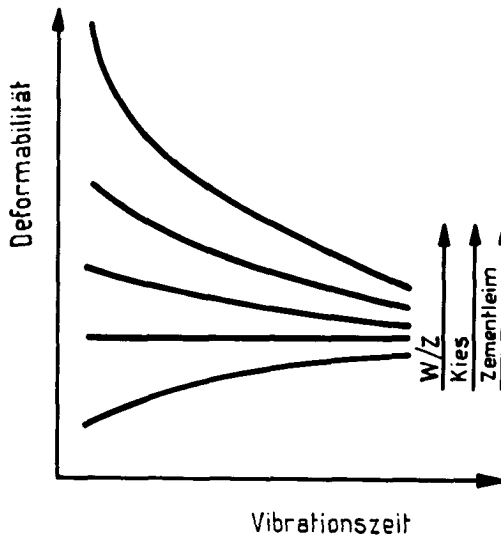


Fig. 19: Schematische Darstellung von Deformabilitätskurven.

Es wurde eine große Anzahl Versuchsserien ausgeführt, wobei in den meisten Fällen der Befeuchtungsgrad auf eine der drei folgenden Arten variiert wurde:

1. durch Variation des Wasserzementwertes bei konstanter Granulometrie und konstantem Zementgehalt;
2. durch Variation der Menge Zementleim bei konstantem Wasserzementwert und konstanter Granulometrie;
3. durch Variation der Granulometrie bei konstantem Wasserzementwert und konstantem Zementgehalt.

Die Resultate solcher Versuchsserien sind in Figur 19 schematisch dargestellt. Eine Zunahme des Befeuchtungsgrades von trockener bis zu nasser Konsistenz auf eine der drei erwähnten Arten (angegeben durch die Pfeile in Figur 19) bewirkt eine Änderung des Verlaufes der Deformabilitätskurven in Funktion der Zeit, in dem Sinne, daß die für geringe Befeuchtungsgrade steigende Kurvenform allmählich in eine fallende übergeht, bei gleichzeitiger Zunahme des Endwertes der Deformabilität.

Ein konkretes Beispiel ist in Figur 20 angegeben: diese zeigt Deformabilitätskurven bei konstanter Granulometrie (Maximalkorn = 16 mm) und Zementdosierung (PC 500), und variierendem Wasserzementwert.

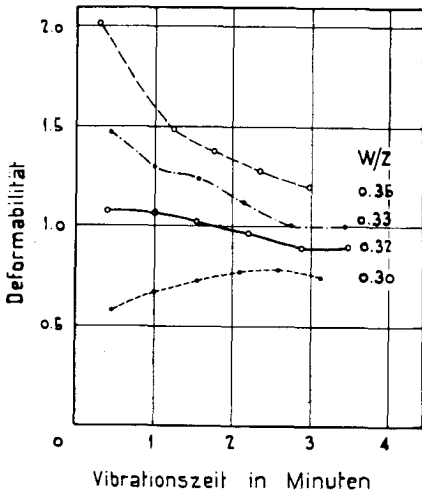


Fig. 20: Wirkung der Änderung des Wasserzementwertes bei konstantem Zementgehalt und konstanter Granulometrie.

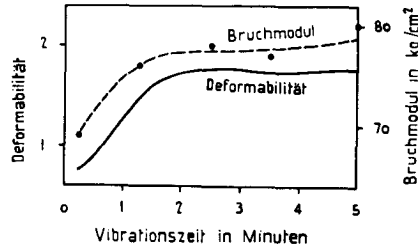


Fig. 21: Beispiel von zugeordneten Deformabilitäts- und Festigkeitskurven. (Zementmörtel, Wasserzementwert = 0,35, 7 Tage Wasserlagerung, Dimensionen der Probekörper: 10 × 15 × 80 cm).

Bedeutung der Form der Deformabilitätskurven. Stabilität von Betonmischungen:

Die Form der Deformabilitätskurve in Funktion der Vibrationsdauer ist von Bedeutung, weil einerseits ein steigender Verlauf fortschreitende Verdichtung bedeutet, während andererseits ein fallender Verlauf auf Separation während der Verdichtung schließen läßt.

Das Zutreffen des ersten Zusammenhanges wurde bewiesen an Hand von Messungen zur Ermittlung der Festigkeit von Proben nach verschiedenen Vibrationsdauern, unter gleichzeitiger Aufnahme von Oszillogrammen mit dem Deformabilitätsmesser. Es ergab sich in den meisten Fällen tatsächlich eine Zunahme der Festigkeit mit der Deformabilität (siehe Beispiel in Figur 21).

Separation kann bei Mischungen mit deutlich fallenden Deformabilitätskurven von Auge festgestellt werden. Ferner zeigen die Versuche (Figur 19), daß die Deformabilität um so stärker abnimmt, je größer der Befeuchtungsgrad und damit die Separationsgefahr ist.

Mischungen mit fallender Deformabilitätskurve sollen nach den schwedischen Forschern bei der Herstellung von Qualitätsbeton vermieden werden. In der Tat deutet Separation vor erfolgter Verdichtung auf eine ungenügende Bindung des Wassers im Innern der Masse, was die Verdichtungsgeschwindigkeit vermindern und insbesondere die Frostbeständigkeit durch Bildung von Schwächezonen an der Oberfläche des erhärteten Betons herabsetzen kann.

Aus den Resultaten der Untersuchungen von LOE und SPARKES (17) über den Frostwiderstand von Beton ergibt sich in der Tat, daß alle Änderungen der Betonzusammensetzung, welche den fallenden Charakter der Deformabilitätskurve verstärken (siehe Figur 19), auch die Frostbeständigkeit herabsetzen.

Auch Mischungen mit langsam steigender Deformabilitätskurve sind zu vermeiden: sie erfordern eine lange Vibrationsdauer zur Erreichung der vollkommenen Verdichtung und sind somit schwer verarbeitbar (Figur 22).

Eine ideale Mischung ist eine solche, deren Deformabilitätskurve rasch steigt und eine Zeitlang auf dem maximalen Deformabilitätsniveau verbleibt, bevor die Entmischung beginnt (Figur 23). Sie wird als stabil bezeichnet. Die Zeit t_1 ist die minimale, t_2 die maximal zulässige Vibrationsdauer. t_1 stellt bei nicht zu stark variierendem maximalem Deformabilitätsniveau ein Maß für die Verarbeitbarkeit dar.

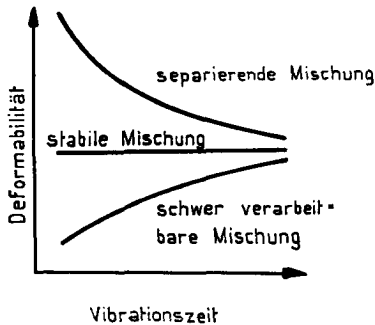


Fig. 22: Charakteristische Deformabilitätskurven.

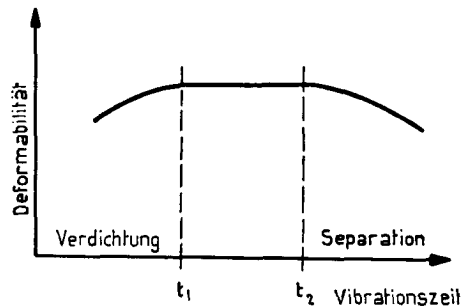


Fig. 23: Deformabilitätskurve einer stabilen Betonmischung.

Schlußfolgerungen:

So interessant diese Methode in ihren Anwendungen auch sein mag, so ist ihre Verwendungsmöglichkeit wegen den erforderlichen komplizierten Apparaturen auf Laboratoriumsversuche beschränkt.

Der Begriff der Stabilität, welcher sich hier auf die Wasserbindung im Innern von vibrierenden Betonproben bezieht, wird im gleichen Sinne bei der Diskussion der eigenen Versuche mit dem Gerät nach Fritsch verwendet werden (siehe Kapitel II, Abschnitt F 3).

Es wird sich dabei zeigen, daß sich magere Betonmischungen unter Umständen weniger leicht verdichten lassen als fettere mit dem gleichen Befeuchtungsgrad, was wohl auf eine ungenügende Stabilität der ersteren zurückgeführt werden kann, indem das sich frühzeitig aus der Masse loslösende Wasser eben für die Schmierwirkung bei der Verdichtung verloren ist.

II. Verdichtbarkeitsmessungen nach der Methode von Fritsch

(Eigene Versuche)

A. EINLEITUNG. ZWECK DER VERSUCHE

Im ersten Kapitel wurde untersucht, welches der beste Weg ist zu einer zahlenmäßigen Erfassung der Verdichtbarkeit, wobei von einer genauen Definition derselben ausgegangen wurde. Sowohl aus grundsätzlichen als auch aus praktischen Gründen sind Methoden zu bevorzugen, bei denen ein «*einfacher*» *Verdichtungs Vorgang* stattfindet. (Siehe Kapitel I, Abschnitt D 1.) Das Problem der Messung der Verdichtbarkeit ist aber damit noch nicht gelöst, da die in Frage kommenden Methoden, nämlich die Messung der Vibrationszeit bis zum «Wasserziehen» und die Methode der Setzungskurve nach Fritsch, so wie sie normalerweise angewendet werden, nicht befriedigen. Gegen die erste Methode können von vorneherein prinzipielle Einwände erhoben werden (siehe Kapitel I, Abschnitt D 2 a); da sie sehr häufig angewendet wird, muß allerdings ihre Unzweckmäßigkeit erst genau bewiesen werden. Was die Methode von Fritsch anbelangt, gelangte man im vorhergehenden Kapitel zur Auffassung, daß eine einwandfreie Kurvenauswertung nur möglich ist bei Kenntnis des absoluten Volumens der Proben, welches bei der normalen Versuchsausführung nach Fritsch nicht bestimmt wird.

Es ergab sich deshalb die Notwendigkeit, eigene experimentelle Untersuchungen durchzuführen, welche zeigen sollten, ob die aus den Setzungskurven abzulesende Größe der «*spezifischen Verdichtungsarbeit*» (= Neigung der Tangente an die Setzungskurve bei einem bestimmten verbleibenden prozentualen Luftporengehalt) ein *befriedigendes Maß für die Verdichtbarkeit* darstellt, und inwiefern die Vibrationszeit bis zum Wasserziehen sich von dieser Größe unterscheidet. Die Versuche wurden mit einem Gerät, das für die Verwendung in der Praxis des Eisenbetonbaus entwickelt wurde, ausgeführt.

Zunächst muß untersucht werden, ob die Neigung der Tangente bei einem bestimmten Luftporengehalt, dem «*Bezugsporengehalt*», für eine festgelegte Betonzusammensetzung überhaupt eine Konstante ist, und nicht etwa nach dem Vorverdichtungsgrad, d. h. nach dem Luftgehalt bei dem der Vibrationsvorgang beginnt, variiert. (Siehe Abschnitt F 2 a dieses Kapitels.) Zudem kann die Neigung der Tangente an die Setzungskurve bei einem beliebig gewählten Bezugsporengehalt nur dann als Maß für die innere Beweglichkeit des Frischbetons in Frage kommen, wenn beim Vergleich irgendwelcher Mischun-

gen miteinander die Tangentenneigungen im gleichen Verhältnis zueinander stehen, welches auch der gewählte Bezugsorengehalt sei. (Siehe Abschnitt F 2 b.) Sofern sich ergeben sollte, daß auch diese Bedingung erfüllt ist, müssen die Werte der spezifischen Verdichtungsarbeit mit den entsprechenden Werten der Vibrationszeit bis zum Wasserziehen verglichen werden. Sollte sich erweisen, daß diese beiden Größen einander nicht eindeutig zugeordnet werden können, so muß untersucht werden, welches die Ursache der Abweichungen ist. Die Bevorzugung der Methode von Fritsch kann dann nur insofern begründet werden, als es gelingt, die Größe der spezifischen Verdichtungsarbeit in direkten Zusammenhang mit der streng definierten Verdichtbarkeit, d. h. mit der zur vollkommenen Verdichtung erforderlichen Energiemenge, zu bringen. (Siehe Abschnitt F 2 d.)

Zu diesen grundsätzlichen Voraussetzungen für die Zweckmäßigkeit der vorgeschlagenen Methode zur Messung der Verdichtbarkeit kommt noch eine wichtige praktische Voraussetzung. Die Streuungen der Versuchsergebnisse dürfen nicht zu groß sein. Um ein klares Bild von der Empfindlichkeit der Methode zu erhalten, wurde bei den durchgeführten Versuchen für eine äußerst sorgfältige Herstellung der einzelnen zu prüfenden Proben gesorgt. Darüber und über die Zusammensetzung der geprüften Mischungen gibt im einzelnen Abschnitt C Auskunft.

Im Laufe der Diskussion der Versuchsergebnisse wird ein Vergleich zwischen der «Verdichtbarkeit» und der «Konsistenz» der untersuchten Mischungen angestellt, wobei einige interessante Einblicke in den Mechanismus des Verdichtungsvorganges gewonnen werden, besonders was die Schmierwirkung des Wassers im Zusammenhang mit dem Zement betrifft. (Siehe Abschnitt F 3 dieses Kapitels.)

Wie bereits erwähnt, wurden die Versuche mit einem im Hinblick auf die Verwendung in der Eisenbetonpraxis entwickelten Gerät ausgeführt. Dieses ist im Detail im folgenden Abschnitt B beschrieben. Es seien hier lediglich einige grundsätzliche Bemerkungen vorausgenommen.

In Kapitel I wurde dargelegt, daß die Eigenschaft der Verdichtbarkeit immer nur in bezug auf eine bestimmte Verdichtungsmethode definiert werden kann, und im speziellen Fall der Vibration nur in bezug auf einen bestimmten Vibrationstyp, wobei insbesondere auf die Bedeutung der Frequenz hingewiesen wurde. Bei einer Verdichtbarkeitsmessung sollte deshalb, streng genommen, die Verdichtung jeweils gleich wie im Bauwerk vor sich gehen: in den meisten Fällen würde dies die Anwendung der Innenvibration erfordern, bei Anpassung der Probemengen an die Leistungsfähigkeit des verwendeten Vibratorstyps. Dazu ist folgendes zu bemerken:

Die direkte Einführung einer Vibratornadel in den Beton bringt, verglichen mit der Vibration auf einem Vibrationstisch, versuchstechnisch gewisse Nach-

teile mit sich. Es kann nämlich, besonders bei trockenen Mischungen, die Dauer der Anlaufperiode bis zur Herstellung der Kopplung zwischen Vibrator und Betonmasse leicht von Zufälligkeiten abhängig sein, und allgemein ist die Möglichkeit von Schwankungen in der Energieübertragung auf den Beton bei Vibration auf einem Vibrationstisch geringer, indem hier die Energieübertragung durch die Wände des Gefäßes und besonders durch dessen Boden erfolgt, auf den der Beton durch sein Eigengewicht gepreßt wird. Ferner erfordert die Innenvibration, will man die Bedingung einhalten, daß die in den Beton pro Volumeneinheit und Zeiteinheit übertragene Energiemenge ungefähr gleich groß ist wie bei der effektiven Verarbeitung im Bauwerk, die Verwendung von sehr umständlichen Geräten.

Um bei der Prüfung des Betons doch eine der praktischen Verarbeitung entsprechende «Vibrationswirkung» zu erhalten, ohne daß der Vibrator direkt in die Probe eingeführt zu werden braucht, besteht die Möglichkeit der Verwendung eines Vibrationstisches, an den die Vibratornadel und der die Probe enthaltende Behälter angeschraubt werden: es wird dann die wirklich auftretende Frequenz beibehalten, und es kann eine den praktischen Verhältnissen entsprechende Energieübertragung auch bei Verwendung kleiner Prüfmengen erreicht werden, indem man das Gerät so ausbildet, daß ein angemessener Teil der Leistung des Vibrators durch die Schwingungen des Gerätes absorbiert wird.

Nach diesem Prinzip wurde das bei den eigenen Versuchen verwendete Gerät gebaut, wobei noch auf eine möglichst solide und einfache Konstruktion, welche eine einfache Versuchsausführung gestattet, Gewicht gelegt wurde.

Gegenüber einem Gerät, das einen eigentlichen Vibrationstisch mit festgelegter Frequenz und Leistung aufweist (wie er z. B. bei der Vebe-Methode verwendet wird), bietet dieses Gerät, neben dem grundsätzlichen Vorteil der Anpassungsfähigkeit an verschiedene Vibrationstypen, noch den praktischen Vorteil der geringeren Kosten, indem kein zusätzlicher Vibrator für die Betonprüfung angeschafft zu werden braucht.

B. VERWENDETE GERÄTE

Die ersten Versuche nach der Methode von Fritsch wurden mit dem in Figur 1 abgebildeten Gerät ausgeführt. Es handelt sich um Vorversuche, deren Ergebnisse hier nicht angegeben sind. Es wurde dazu ein Registrierapparat österreichischer Fabrikation verwendet (Firma Ganser, Wien), der durch ein Uhrwerk angetrieben wird und eine mit Registriertinte zu füllende Feder aufweist. Der Registrierapparat muß auf einer separaten Stütze befestigt werden (hier Tisch) und die Übertragung der Deckelbewegung erfolgt mittels eines dün-

nen Nickelindrahtes, welcher über eine Rolle geführt und durch ein Gegengewicht gespannt ist. Der zu untersuchende Beton wird in einen prismatischen Behälter mit quadratischem Querschnitt (20×20 cm) und 40 cm Höhe lose eingefüllt, welcher auf einem Vibrationsrahmen aufgeschraubt ist. An diesem ist mittels zweier Hartholzklammern ein hoctouriger Nadelvibrator Notz, Type

GF 46, mit 14 000 Schwingungen pro Minute, befestigt. Der 2,9 kg schwere Deckel weist in der Mitte eine quadratische Öffnung auf (Seitenlänge 7,5 cm) mit einem Drahtnetz von 3 mm Maschenweite. Es wird jeweils vibriert bis zum Zeitpunkt der Schließung der Oberfläche, erkennbar am Aufstieg des Rüttelleims in der Deckelöffnung.

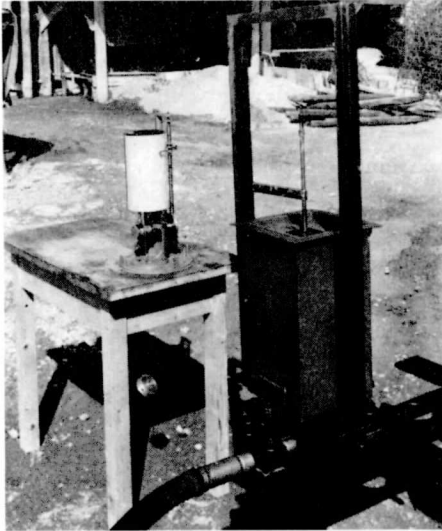


Fig. 1: Erstes Gerät nach Fritsch.

Diese Versuchsanordnung, welche den Angaben von Fritsch entspricht, ist für die Verwendung auf der Baustelle ungeeignet, in erster Linie wegen der separaten Aufstellung von Schreibgerät und Behälter mit Drahtverbindung, sowie wegen der heiklen Schreibfeder.

Die Ermittlung der spezifischen Verdichtungsarbeit setzt die Kenntnis des totalen absoluten Volumens

der Proben voraus. Bei dem beschriebenen Versuchsgang mit Unterbruch der Vibration beim Wasserziehen kann das absolute Volumen nur aus den spezifischen Gewichten der Komponenten, bei genauer Kenntnis des Mischungsverhältnisses und des Wassergehaltes, ermittelt werden, da ja der Porengehalt im Augenblick des Wasserziehens nicht bekannt ist. Dies stellt ebenfalls einen schwerwiegenden Nachteil dar.

Es mußten deshalb ein einfacheres Gerät und ein zweckmäßigerer Versuchsgang gesucht werden.

Das in Fig 2 abgebildete Gerät wird nun den Anforderungen der Praxis entsprechen. Der Behälter ist derselbe wie im ersten Gerät. Der Registrierzylinder ist aber jetzt direkt mit dem Vibrationsrahmen verbunden; er wird angetrieben durch einen Märklin-Motor, welcher so untersetzt ist, daß er eine Drehzeit des Schreibzylinders von etwas mehr als 30 sec ergibt. Der Schreibarm wird direkt am Führungsstab des Deckels angeschraubt; anstatt einer

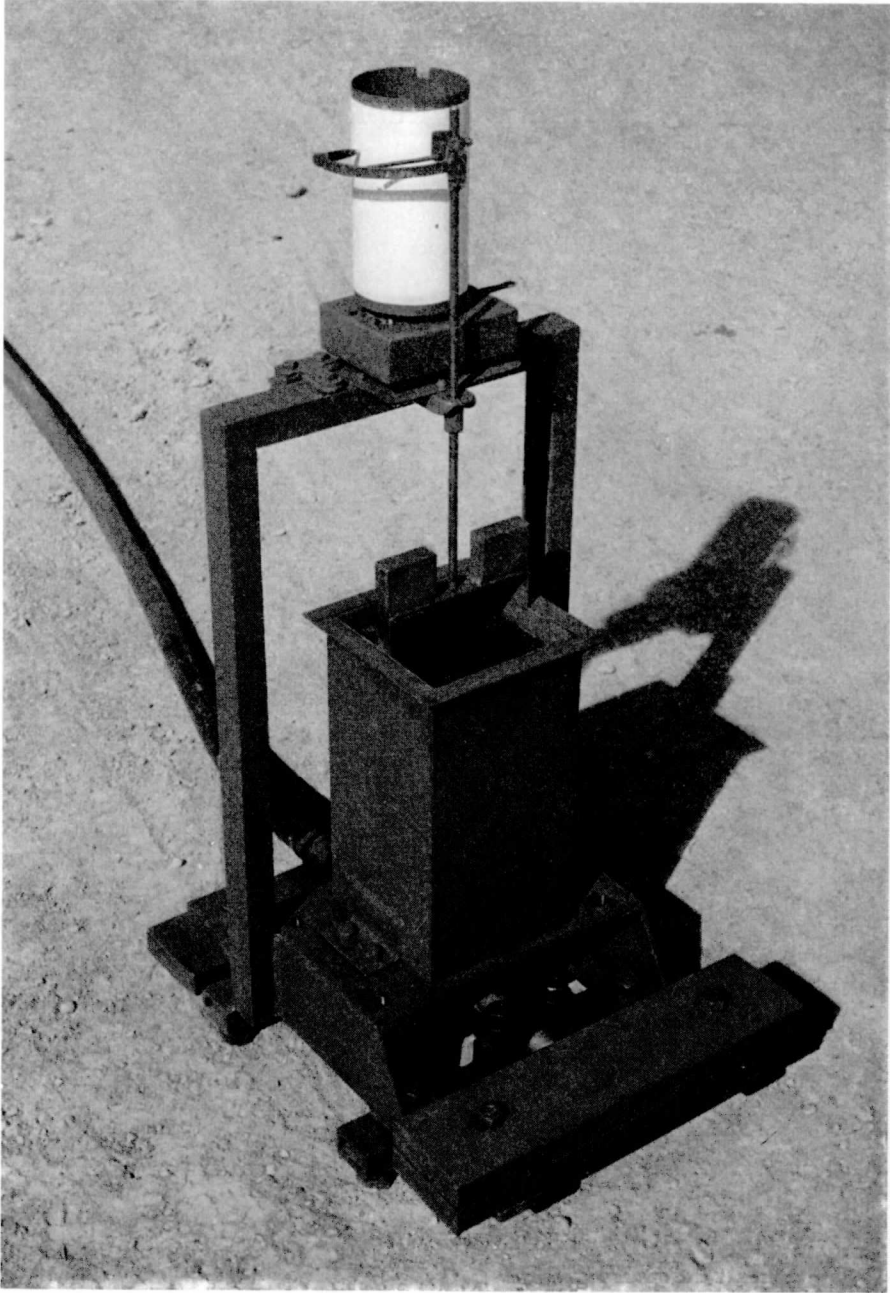


Fig. 2: Neues Gerät nach Fritsch.

Behälterfeder trägt er einen angeschraubten Kugelschreiber, der durch eine Spiralfeder an den Registrierzylinder angedrückt wird.

Der Deckel weist ein durchgehendes Drahtnetz auf, was die Ermittlung des totalen absoluten Volumens der Proben mittels verlängerter Vibration gestattet. (Siehe Abschnitt D.)

Die auf den Registrierapparat übertragenen Schwingungen werden stark gedämpft durch Gummipplatten, die zwischen dem Vibrationsrahmen und den Füßen des Registrierapparates eingeklemmt sind.

Das Gesamtgewicht des Gerätes wurde durch Aufschrauben von Eisenplatten (siehe Figur 2) so reguliert, daß bei Verwendung des Notz-Vibrators GF 46 eine angemessene Verdichtungsenergie auf die Betonprobe übertragen wird. Ferner wurde das Gewicht des Deckels vergrößert zur Vermeidung von Schwingungen des Schreibers, und schließlich die Drehgeschwindigkeit so gewählt, daß sich die Setzungskurven in einem für die Auswertung günstigen Maßstab ergeben.

Damit konnte eine sehr deutliche und von jeder sichtbaren Schwingung freie Kurvenaufzeichnung erreicht werden. (Siehe Photokopien der Originalkurven im Anhang.)

Die im folgenden beschriebenen Versuche wurden mit diesem Gerät ausgeführt. Es kann auch verwendet werden zur Ausführung von Vebe-Versuchen (siehe Kapitel III, Abschnitt C) und von Trichterversuchen (siehe Kapitel IV, Abschnitt C).

C. UNTERSUCHTE MISCHUNGEN

Es wurden für die Versuche zwei Kiessandzusammensetzungen verwendet. Das benützte Material stammt aus der Kiesgrube Reichenbach bei Zollikofen. Die Siebkurven sind in Figur 3 aufgetragen. Es handelt sich um Kiessandzusammensetzungen mit sogenannten Ausfallkörnungen (die Fraktion 5–15 mm fehlt, abgesehen von einem kleinen Gehalt an 5–8 mm) mit einem geringen Feinstsandgehalt (1,7% bzw. 1,3% < 0,223 mm). Die Siebkurven entsprechen nicht ganz dem natürlichen Sandvorkommen in der Kiesgrube Reichenbach: die Sandfraktionen wurden so ausgeglichen, daß sich ein stetiger Kurvenverlauf ergibt. Um die Streuungen der Sandgranulometrie, sowohl die periodischen als auch diejenigen, welche sich durch Entmischung am Haufen ergeben, vollkommen auszuschalten, wurde bei allen in diesem Kapitel beschriebenen Versuchen jede einzelne Probe aus den abgewogenen Fraktionen nach dem EMPA-Siebsatz zusammengesetzt.

Die sandärmere Mischung ist mit A bezeichnet, die sandreichere mit R. Die erste liegt etwa an der oberen Grenze und die zweite noch innerhalb des

Bereiches guter Kornabstufungen. Es wurden keine weiter auseinanderliegende Siebkurven gewählt, da ja die Meßmethode, wenn sie zweckmäßig sein soll, innerhalb des Bereiches hochwertiger Betonzusammensetzungen empfindlich sein muß. Kiessandzusammensetzungen mit Ausfallkörnungen wurden gewählt, weil sie eher zur Entmischung neigen als stetig zusammengesetzte Kiessand-

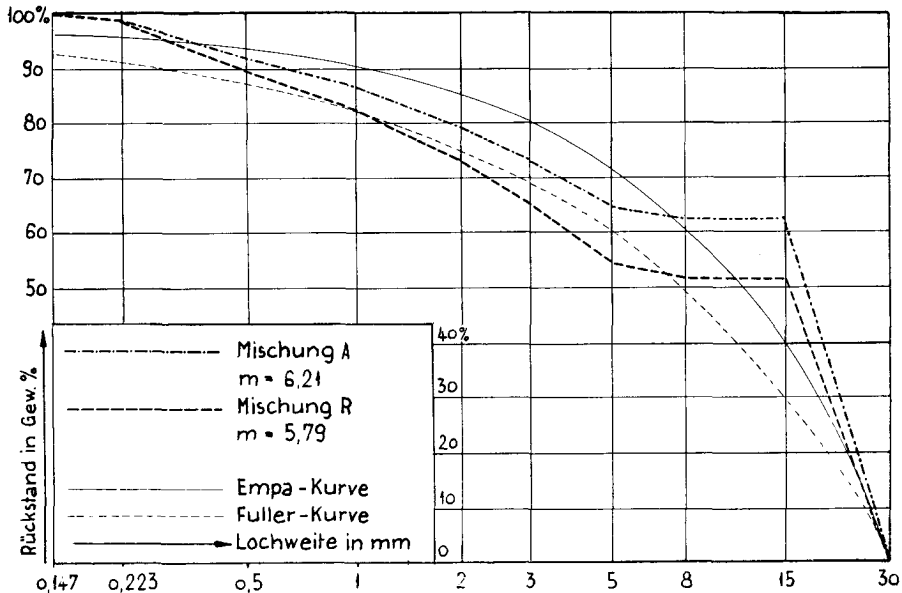


Fig. 3: Siebkurven der bei den Versuchen mit dem Gerät nach Fritsch verwendeten Mischungen.

gemenge, was im Hinblick auf die Messungen nach der Vebe-Methode, welche einen Hinweis auf die Kohäsion geben sollten, erwünscht war. Der geringe Feinstsandgehalt entspricht den modernen Qualitätsansprüchen.

Es wurden drei Zementdosierungen verwendet. Die Zementzugabe erfolgte jeweils in einem bestimmten Gewichtsverhältnis zum trockenen Sandkiesgemisch. Dieses beträgt für die kleinste Dosierung (PC 195–205, je nach Befeuchtungsgrad) 100:9,4, für die mittlere Dosierung (PC 290–310) 100:15 und für die höchste Dosierung (PC 385–415) 100:21.

D. VERSUCHSVORGANG

In den Behälter wurden jeweils 10 Liter absolutes Volumen des zu untersuchenden Betons eingefüllt, wobei die Einfüllmethode nicht immer dieselbe war: entweder wurden die mit einer Schaufel eingebrachten Proben vorgängig der Vibration nicht mehr berührt (Bezeichnung in der Zusammenstellung der

Versuchsergebnisse im Abschnitt E: lose eingefüllt) oder es wurde der Beton im Laufe des Einfüllens mit einem Rundstab lediglich verteilt oder verteilt und gestochert (Bezeichnung: eingefüllt mit Vorverdichtung). Bei vier der sechs untersuchten Betonzusammensetzungen (A-100:9,4; A-100:15; R-100:15; R-100:21) wurden beide Einfüllmethoden verwendet, bei den zwei übrigen (A-100:21; R-100:9,4) nur das Einfüllen mit Vorverdichtung.

Das totale absolute Volumen der Betonproben (ohne Luft) konnte konstant gehalten werden, da ja, zwecks Ausschaltung der Streuungsursachen, eine genaue gewichtsmäßige Zusammensetzung der Proben erfolgte und das spezifische Gewicht der Komponenten bekannt ist. Bei der normalen Anwendung des Geräts wird aber weder das eine noch das andere der Fall sein, und trotzdem muß sich aus dem Versuch das totale absolute Volumen ergeben. Es werden zu diesem Zweck die Proben jeweils weit über den Zeitpunkt des Wasserziehens hinaus vibriert, und zwar so lange, bis die vollkommene Verdichtung gewährleistet ist. Das bedingt die Verwendung eines auf dem ganzen Querschnitt durchbrochenen Deckels, damit dem Entweichen der Luft ein möglichst geringer Widerstand entgegengesetzt wird. Der Deckel im verbesserten Gerät nach Fritsch weist deshalb ein durchgehendes Drahtnetz auf, mit einem 3 cm hohen Eisenrand zwecks Führung (Einhaltung der Horizontalstellung beim Absinken) und Sammlung des aufgestiegenen Feinmörtels. Das Gewicht des Deckels ist so groß (3,5 kg), daß er in die Masse einsinkt, soweit es die Maschenbreite erlaubt.

Bei unseren Versuchen wurden die Proben jeweils eine Minute lang vibriert, mit Ausnahme der extrem trockenen Mischungen, die zur Gewährleistung der vollkommenen Verdichtung eine noch längere Vibrationszeit erfordern.

Nach Beendigung der Vibration wird die Dicke der sich über dem Drahtnetz befindenden Feinmörtelschicht auf den Millimeter genau gemessen. Durch Auftragen derselben über dem Schlußpunkt der Setzkurve ergibt sich das Niveau der vollkommenen Verdichtung, also die Horizontale für den Porengehalt = 0, des aufgenommenen Diagrammes.

Im Laufe unserer Versuche konnte die Genauigkeit dieses Verfahrens kontrolliert werden. Der Führungsstab des Deckels trägt eine 2-mm-Einteilung, wobei sich die Nullablesung ergibt, wenn der Deckel einen Raum von genau 10 Liter Inhalt begrenzt. Somit konnte jeweils das Endvolumen direkt abgelesen werden (wieder unter Berücksichtigung des Einsinkbetrages des Deckels), und es ergab sich effektiv in allen untersuchten Fällen vollkommene Verdichtung. Bei sehr nassen Mischungen ist allerdings zu berücksichtigen, daß eine Feinmörtelschicht von 1–2 mm Dicke bei der verlängerten Vibration durch Abspritzen verloren geht.

Im Laufe der Vibration wurde jeweils der Zeitpunkt abgestoppt, in dem sich die Oberfläche durch Aufsteigen des Rüttelleims (Wasserziehen) schloß.

Nach beendiger Vibration muß der Registrierzylinder einmal leer drehen, zwecks Aufzeichnung der horizontalen Bezugsachse (siehe Beispiele von Setzungskurven im Anhang). Das Kurvenblatt kann dann vom Registrierzylinder abgenommen werden. Durch den auf die oben beschriebene Weise bestimmten Punkt wird das Niveau der vollkommenen Verdichtung eingezeichnet (parallel zur aufgenommenen horizontalen Bezugsachse). Auf dieser Horizontalen wird der Zeitmaßstab, unter Berücksichtigung der effektiven Umdrehungszeit des Zylinders, markiert.

Jetzt wird die spezifische Verdichtungsarbeit durch Ziehen der Tangente an die Setzungskurve bei einem bestimmten Porengehalt bestimmt. Sie entspricht der Neigung dieser Tangente. Als Bezugsporengehalte wurden in unseren Versuchen benützt: 5%, 7,5% und 10% (über die Wahl des Bezugsporengehaltes siehe Abschnitt F 2 c). Die Porengehalte beziehen sich immer auf das verdichtete Volumen. 1% entspricht deshalb einer Ordinatenhöhe von 2,5 mm, da 10 Liter bei einer Grundfläche von 4 dm² eine Höhe von 25 cm ergeben. Die auf den Kurvenblättern angegebenen Werte der spezifischen Verdichtungsarbeit sind auf eine Drehzeit des Registrierzylinders von 30,5 sec bezogen.

Bei der praktischen Verwendung der Methode ist nicht ein bestimmtes absolutes Volumen, sondern ein bestimmtes Gewicht Frischbeton zu prüfen. Das totale absolute Volumen der Proben wird dabei mit der Zusammensetzung, in erster Linie mit der Konsistenz, variieren. Damit ändert auch die Höhe der Proben. Weil sich die Ordinatenwerte der Setzungskurven auf die Gesamthöhe der Proben beziehen, ändert sich mit dieser Höhe auch der Maßstab der Ordinate, was jedoch in der Praxis vernachlässigt werden darf.

Auf den Setzungskurven wurde jeweils der Punkt bezeichnet, der dem Zeitpunkt des Wasserziehens entspricht und der dazugehörige Porengehalt herausgelesen. (Die Bestimmung der Vibrationszeit bis zum Wasserziehen ist mit einer Unsicherheit behaftet. Der Aufstieg des Rüttelleims, welcher zur Schließung der Oberfläche führt, erfolgt nämlich nicht überall gleichzeitig, sondern erstreckt sich über eine gewisse Zeitspanne. Es können deshalb, je nach Beobachter, verschiedene Zeitpunkte innerhalb dieser Zeitspanne abgestoppt werden, wobei sich besonders bei trockenen Mischungen beträchtliche Differenzen ergeben können. Werte der Vibrationszeit bis zum Wasserziehen sind deshalb nur vergleichbar, wenn sie von ein und demselben Beobachter bestimmt wurden.)

Anschließend an die Aufnahme der Setzungskurve wurde jeweils an der vibrierten Probe, nach Entfernung des Deckels samt dem über das Drahtnetz aufgestiegenen Feinmörtel, der Eindringungsversuch nach Humm ausgeführt. (Ermittlung der Schlagzahl At_5 für die Eindringung von 5 bis 10 cm und der Schlagzahl At_{10} für die Eindringung von 5 bis 15 cm. Das Eindringgerät ist in Kapitel IV beschrieben.)

E. ZUSAMMENSTELLUNG DER RESULTATE

Die Resultate der Versuche mit dem verbesserten Gerät nach Fritsch sind in Tabellen zusammengestellt (siehe folgende Blätter).

Resultate der Hauptversuche mit dem Gerät nach Fritsch

Mischung <small>Granulometrie Gewichtsmässiges Mischungsverhältnis Kleissand: Zement</small>	Wassarzementwert Wassergehalt in % der Trockensubstanz	Spezifische Verdichtungsarbeit bei:						K Hyperbel- konstante		
		10 % Poren		7,5 % Poren		5 % Poren		Aus Kurven	Um- gerechnet	
		Lose eingefüllt	Eingefüllt mit Verdichtung	L. e.	E. m. Vv.	L. e.	E. m. Vv.			
A	0,55 4,72		1) 3,66 ✓ 2) 2,79 ✓ 3) 2,54 ✓ 4) 2,91 ✓ <u>11,90</u>		5,00 4,29 4,17 4,51 <u>17,97</u>		11,80 8,02 7,25 7,54 <u>34,61</u>	20,00 15,60 16,00 15,90 <u>65,50</u>	5,97 4,66 4,18 4,74 <u>19,55</u>	
		Mittel Umgerechnet		2,98 1,08		4,49 0,973		8,66 0,82	16,40 4,88	
	0,60 5,15		1) 2,14 2) 1,92 <u>4,06</u>	3) 1,56 ✓ 4) 1,57 ✓ 5) 2,02 ✓ 6) 2,08 ✓ <u>7,23</u>	2,7 2,42	2,26 3,08 2,89 3,07 <u>11,30</u>	7,17 4,59	4,29 5,97 5,65 5,12 <u>21,03</u>	7,71 9,96 8,10 9,25 <u>36,02</u>	2,30 2,98 2,72 2,76 <u>10,76</u>
		Mittel Umgerechnet	2,03 0,863	1,81 0,657	2,56 0,70	2,82 0,61	5,87 0,695	5,26 0,998	9,00 2,69	
	0,65 5,58		1) 1,55	2) 0,96 ✓ 3) 0,96 ✓ 4) 1,17 ✓ 5) 0,76 ✓ 6) 3,85 ✓ <u>3,85</u>	1,87	1,64 1,69 1,87 1,31 6,51 <u>6,51</u>	3,80	3,06 2,87 4,02 2,44 12,39 <u>29,61</u>	5,27 5,13 6,05 4,16 29,61 <u>6,15</u>	1,57 1,33 1,81 1,26 <u>6,15</u>
		Mittel Umgerechnet	1,55 0,66	0,96 0,348	1,87 0,51	1,63 0,383	3,80 0,46	(3,10) (0,294)	5,15 1,54	
	0,70 6,03		1) 0,68 2) 0,92 <u>1,60</u>	3) 0,62 ✓ 4) 0,63 ✓ 5) 0,99 ✓ 6) 0,73 ✓ <u>2,97</u>	0,87 1,18	0,98 1,18 1,66 1,26 <u>2,05</u>	2,25 2,34	2,02 2,18 2,62 2,66 <u>3,28</u>	3,27 3,72 5,40 4,21 <u>76,60</u>	0,98 1,11 1,61 1,25 <u>4,95</u>
		Mittel Umgerechnet	0,80 0,34	0,74 0,27	1,02 0,278	1,27 0,272	2,30 0,272	(2,32) (0,22)	4,15 1,24	
	0,80 6,86		1) 0,62 2) 0,48 <u>1,10</u>	3) 0,40 ✓ 4) 0,19 ✓ 5) 0,38 ✓ 6) 0,33 ✓ <u>1,30</u>	0,86 0,75	0,74 0,40 0,47 0,57 <u>2,18</u>	1,21 1,02	1,33 0,89 0,71 0,98 <u>3,91</u>	2,47 1,33 1,59 1,80 <u>7,19</u>	0,74 0,40 0,47 0,58 <u>2,15</u>
		Mittel Umgerechnet	0,55 0,234	0,32 0,116	0,80 0,219	0,54 0,117	1,12 (0,98) (0,033)	1,80 0,54		

Im Anhang sind für zwei der sechs untersuchten Trockenzusammensetzungen, A-100:9,4 und R-100:15, die Photokopien der Original-Setzungskurven (eine pro verwendeten Wassergehalt) je auf einem Blatt zusammengestellt. Die neben den Setzungskurven strichpunktiert aufgezeichneten Kurven sind gleichseitige Hyperbeln mit dem Niveau der vollkommenen Verdichtung als Asymptote (siehe mathematische Approximation der Setzungskurven im Abschnitt F 2 c dieses Kapitels).

Sec. Vibrationszeit bis Wasserziehen		Sec. Mittelwert „verteilt“	cm. Anfangs-Überhöhung		% Poren bei W'ziehen	cm Feinmörtel-aufstieg	Betonsonde von Humm								
L. e.	E.m. Vv.	Mittelwert „gestochert“	L. e.	E.m. Vv.	E.m. Vv.	E.m. Vv.	Lose eingefüllt			Eingefüllt m. Vorverdichtg.					
							Ramm-schläge At 10	Ramm-schläge At 5	At 10/At 5	Ramm-schläge At 10	Ramm-schläge At 5	At 10/At 5			
	14 9 10 11 14	11,0		6,9 6,8 7,1 6,8 27,6	3,9 4,7 4,2 3,8 16,6	0,4 - 0,3 0,7 1,4				345 470 290 290 1395	130 170 125 125 560	2,66 2,76 2,32 2,32			
	11			6,9	4,2	0,5	Mittel			349	138	2,51			
							Gesamtmittel			349	138	2,51			
9 7	3 5 6 7	4,5	8,1 8,6	6,0 5,3 5,7 4,4	6,8 4,9 4,0 3,5	1,4 1,0 0,9 1,2	286 375	72 131	3,97 2,86	350 225 255 390	115 130 100 160	2,69 1,96 2,55 2,78			
16	21	6,0	16,7	21,4	19,2	4,5	661	203		1220	485				
8	5,2		8,3	5,3	6,8	1,1	Mittel			330	102	3,24	306	121	2,52
							Gesamtmittel			344	116	2,73			
6	3 2 2,5 2,5 10,0	2,75	7,0	5,2 3,3 4,3 3,8 16,6	4,7 5,7 5,5 4,3 20,2	1,8 1,8 - 1,7 4,3	231	81	2,86	530 825 360 360 2075	125 135 135 120 515	4,24 6,11 2,66 3,00			
6	2,5	2,25	7,0	6,1	5,1	1,8	Mittel			231	81	2,86	519	129	4,02
							Gesamtmittel			461	119	3,88			
3 5	2 1 1 2 6	1,5	5,6 5,8	3,6 3,5 3,8 3,6 14,5	4,3 7,2 8,4 4,6 24,5	2,4 2,2 2,0 - 6,6	360 237	71 61	5,07 3,89	- 440 500 255 1195	(260) 115 142 100 357	- 3,83 3,52 2,55			
8	6	1,5	11,4	14,5	24,5	6,6	597	132		1195	357				
4	1,5		5,7	3,6	6,1	2,2	Mittel			298	66	4,51	338	119	3,34
							Gesamtmittel			358	98	3,66			
2 2	1,5 1 1 1	1,1	4,2 4,2	2,9 2,8 3,3 2,8 4,8	2,4 2,6 2,4 2,8 19,2	2,4 2,6 2,4 2,8 19,2	(7600) (7600)	(215) (215)		370 580 580 550 (7900) 1500	130 180 130 200 440	2,84 3,22 4,23			
4	4,5		8,4	4,8			Mittel			500	500	147	3,43		
2	1,1		4,2	2,9		2,65	Gesamtmittel			500	147	3,43			
							Mittel								
							Gesamtmittel								

Resultate der Hauptversuche mit dem Gerät nach Fritsch

Mischung	Wassermenge/ Wassergehalt in % der Trockensubstanz	Spezifische Verdichtungsarbeit bei :						K Hyperbel- konstante			
		10 % Poren		7,5 % Poren		5 % Poren		Aus Kurven	um- gerechnet		
		Lose eingefüllt	Eingefüllt mit Verdichtung	L. e.	E. m Vv	L. e.	E. m Vv				
A	0,36		1) 6,91 v			9,42		17,3	34,6	10,32	
			2) 7,96 v			12,86		20,2	35,6	11,80	
	4,69		3) 6,00 v			8,55		14,62	30,9	9,21	
			4) 5,03 v			6,82		18,58	27,1	8,09	
				25,70		37,65		70,70	132,2	39,42	
			Mittel	6,35		9,41		17,68	33,0	9,86	
			Umgerechnet	2,30		2,04		1,67			
	0,40		1) 4,51	4) 2,04 v	6,53	3,51	10,9	7,10	11,57	3,45	
			2) 3,73	6) 2,00 v	7,35	2,71	14,22	5,30	10,15	3,03	
	5,22			7) 2,45 v		4,52		9,83	14,38	4,29	
			8) 1,73 v		3,04		5,14				
			9) 1,79 v		2,03		5,46	8,90	2,66		
			10,21		13,88		16,81	25,10	33,53	48,00	
		Mittel	4,12	2,00	6,34	3,36	12,6	8,69	11,2	3,36	
		Umgerechnet	1,75	0,825	1,30	0,727	1,49	0,634			
Sand-arm	0,42		1) 2,74	6) 1,31 v	4,10	2,19	9,00	5,16	8,12	2,42	
			2) 1,65	7) 2,12 v	2,20	3,00	4,02	7,08	10,72	3,20	
	5,47		3) 1,95	8) 2,27 v	2,62	3,64	3,85	6,45	10,43	3,12	
			4) 2,20	9) 1,27 v	3,08	1,84	6,36	3,78	6,55	1,95	
			5) 2,51	10) 1,38 v	3,09	2,26	3,66	5,38	7,59	2,50	
				11,55		15,09		17,93	21,72	23,51	
			Mittel	2,21	1,64	3,02	2,59	5,16	5,67	8,70	2,60
			Umgerechnet	0,94	0,594	0,825	0,560	0,646	0,583		
	100:15 entspricht ~ PC 300	0,44		1) 1,16	6) 1,02 v	1,71	2,08	3,46	4,60	6,17	1,84
				2) 1,62	7) 0,82 v	2,20	1,65	4,64	4,00	5,92	1,77
5,74			3) 1,65	8) 0,70 v	2,94	1,23	4,39	2,44	3,86	1,45	
			4) 1,80	9) 0,86 v	2,48	1,59	3,46	2,88	4,34	1,42	
			5) 1,16	10) 0,80 v	1,60	1,23	2,58	2,88	4,57	1,36	
				11,73		10,67		11,78	18,53	25,28	
			Mittel	1,48	0,86	2,43	1,56	3,21	3,98	5,06	1,51
			Umgerechnet	0,63	0,312	0,582	0,338	0,44	0,32		
0,475		0,475		1) 1,04	8) 0,42 v	1,22	1,27	3,02	3,02	1,98	0,59
				2) 0,97	9) 0,36 v	0,93	0,60	1,47	1,56	2,46	0,73
	6,19		3) 0,42	10) 0,40 v	0,92	0,81	1,83	1,59	2,47	0,74	
			4) 0,57	11) 0,29 v	0,93	0,64	1,83	1,16	1,87	0,56	
			5) 0,50	12) 0,24 v	1,05	0,48	1,83	1,13	1,61	0,98	
				0,78		1,17		3,14	2,02	6,73	
				0,93		1,74		1,17	3,14	10,39	
			Mittel	0,77	0,34	1,10	0,63	2,21	1,35	2,08	0,82
			Umgerechnet	0,33	0,123	0,30	0,136	0,262	0,128		
	0,51	0,51		1) 0,33	6) - v	0,50	0,33	0,70	0,79	1,09	0,32
			2) 0,165	7) - v	0,41	0,51	0,78	1,51	2,23	0,66	
6,65			3) 0,24	8) - v	0,42	0,31	0,76	0,55	0,87	0,26	
			4) 0,18	9) - v	0,47	0,27	0,99	0,72	0,88	0,24	
			5) 0,17		0,21		0,82				
					2,11		1,42		5,07	7,50	
			Mittel	0,24		0,42	0,36	0,81	0,89	1,27	0,37
			Umgerechnet	0,102		0,145	0,078	0,096	0,084		

Sec. Vibrationszeit bis Wasserziehen		Sec. Mittelwert verteilt*	cm. Anfangs-Überhöhung		% Poren bei W'ziehen	cm Feinmörtel-aufstieg E. m.	Betonsonde von Humm							
L. e	E. m. Vv.	Mittelwert „gestochert“	L. e	E. m. Vv.	E. m. Vv.	E. m. Vv.	Lose eingefüllt			Eingefüllt m. Horverdichtg				
							Ramm-schläge At 10	Ramm-schläge At 5	At 10/At 5	Ramm-schläge At 10	Ramm-schläge At 5	At 10/At 5		
	27 35 23 25 110	25		9,4 6,5 9,0 6,2 31,1	3,6 3,1 3,8 3,0 13,5	0 0 0 0 0				300 230 290 210 1060	95 85 125 110 415	316 271 232 218		
	27,5	30		7,8	3,4	0	Mittel			265	104	2,59		
							Gesamtmittel			265 - 104 - 2,59				
28 29,2	10 8 12 7 6	7,5	11,1 11,2	5,2 6,8 5,0 7,0 5,0	2,8 3,5 3,2 3,7 3,8	0,8 0,8 0,5 0,8 -		93 82	58 42	1,6 1,95	165 117 225 135 122	48 50 69 67 82	344 234 326 2,02 2,36	
57,2 28,6	43 8,4	9,3	22,3 11,2	29,0 5,8	11,0 3,4	2,9 2,20	Mittel	175 87	100	1,74	765 153	286 67	2,68	
							Gesamtmittel			134 - 55 - 2,44				
10 8 8 10 9	7 8 8 6 7	-	9,8 4,7 8,8 9,7 8,9	5,1 5,5 5,4 5,7 4,8	3,2 2,7 3,5 3,0 3,0	0,9 0,7 0,5 0,8 0,8		35 37 57 50 110	36 35 21 37 50	2,64 2,77 2,71 2,44 2,20	85 109 80 106 84	42 55 37 50 46	2,02 1,98 2,16 2,12 1,91	
45 9	34 6,8	6,8	43,2 31	26,0 5,2	11,4 3,5	3,7 2,25	Mittel	449 90	179 36	2,50	93	46	2,02	
							Gesamtmittel			91 - 41 - 2,22				
7 8 8 6 6	4 4 3 3 2,5	-	8,3 8,5 7,7 7,9 8,0	3,6 3,8 4,6 5,0 4,6	3,7 3,5 3,4 4,0 4,2	1,2 1,3 1,4 1,2 1,3		66 75 57 52 52	26 34 21 21 25	2,54 2,20 2,48 2,48 2,80	87 158 99 85 91	40 75 57 33 37	2,18 2,10 2,68 1,60 2,46	
35 7	16,5 3,3	3,3	40,4 8,1	21,6 4,3	14,4 3,9	6,4 1,3	Mittel	315 63	137	2,34	605	288	2,10	
							Gesamtmittel			94 - 39 - 2,16				
(9,5) (5,0) 3 3 2,5 3 3 2,9	2 1,5 2 2 1 1,5 8,0	-	(6,5) (6,8) 5,5 6,1 5,4 6,2 6,4	3,2 3,2 3,3 3,0 3,0 3,2 15,7	2,6 4,1 3,4 4,1 2,0 2,2 11,0	1,8 1,8 1,6 2,0 2,0 2,2 1,85		54 30 12 29 70 68	29 9 34 7 35 33	1,86 3,34 2,12 4,44 2,00 2,06	71 71 74 111 102 477	34 22 27 48 46 177	2,09 3,23 2,74 2,31 2,18	
	1,6	1,6	5,9	3,1	3,4		Mittel	54	25	2,16	85	35	2,13	
							Gesamtmittel			68 - 29 - 2,34				
2,0 1,5 1,5 1,5 1,5 8,0 1,6	0,5 1,0 0,5 1,0 1,0 3,0 0,75	-	4,2 3,6 3,7 3,4 3,6 18,5 3,7	2,4 2,6 1,9 2,9 9,8 2,4	2,4 2,3 2,7 2,5 8,4 2,35	2,4 2,3 2,7 2,5 8,4 2,35		42 53 63 46 74 278 56	11 19 28 16 27 99 20	3,82 3,12 2,25 2,88 2,74	73 86 105 112 376	24 31 31 51 73	3,04 2,78 3,39 2,20	
							Mittel	56	20	2,80	94	34	2,76	
							Gesamtmittel			73 - 26 - 2,80				

Sec. Vibrationszeit bis Wasserziehen		Sec. Mittelwert „verteilt“ Mittelwert „gestochert“	cm. Anfangs- Ueberhöhung		% Poren bei W'ziehen	cm Fein- mörtel- aufstieg	Betonsonde von Humm					
L. e	E. m. Vv.		L. e	E. m. Vv.			Lose eingefüllt			Eingefüllt m. Vererdichtg		
							Ramm- schläge At 10	Ramm- schläge At 5	At 10/ At 5	Ramm- schläge At 10	Ramm- schläge At 5	At 10/ At 5
	35 45 50 40	42,5	10,4	3,2	0					315	105	3,0
	170		10,8	3,6	0					200	80	2,5
			11,3	3,3	0					300	135	2,22
			11,4	3,1	0					250	120	2,08
	42,5		11,0	3,3	0	Mittel				1065	440	
						Gesamtmittel	266 - 110 - 2,41					
	23 18 18 20	20	10,3	3,4	0					135	55	2,46
	79		10,1	3,5	0					245	110	2,22
			10,2	3,6	0					155	50	3,10
			9,8	3,1	0					160	70	2,28
	20		10,1	3,4	0	Mittel				635	285	
						Gesamtmittel	174 - 71 - 2,45					
	5 4 7 5	5,2	7,8	3,5	1,0					73	30	2,44
	21		8,0	4,0	0,8					54	24	2,25
			7,4	2,4	-					89	22	4,50
			8,0	4,1	0,6					81	36	2,25
	5,2		7,8	3,5	0,8	Mittel				307	112	
						Gesamtmittel	77 - 28 - 2,75					
	2,5 2 2,5 2	2,2	5,0	3,2	1,5					48	17	2,82
	9		5,3	3,2	1,6					68	25	2,72
			5,0	3,1	1,6					68	25	2,72
			5,6	4,2	1,6					72	26	2,76
	2,2		5,2	3,4	1,6	Mittel				256	99	
						Gesamtmittel	64 - 23 - 2,78					
	0,5 0,5 0,5 1	0,6	2,0		2,2					90	26	3,46
	2,5		1,9		3,8					102	36	2,83
			1,6		3,5					77	26	2,96
			2,4		2,5					74	37	2,00
	0,6		1,9		10,0	Mittel				343	125	
						Gesamtmittel	86 - 31 - 2,78					
						Mittel						
						Gesamtmittel						

Resultate der Hauptversuche mit dem Gerät nach Fritsch

<u>Mischung</u> <small>Granulometrie Gewichtsmässiges Mischungsverhältnis Kiessand: Zement</small>	Wasserzementwert/ Wassergehalt in % der Trockensubstanz	Spezifische Verdichtungsarbeit bei:						K Hyperbel- konstante	
		10 % Poren		7,5 % Poren		5 % Poren		Aus Kurven	um- gerechnet
		Lose eingefüllt	Eingefüllt mit Verdichtung	L. e.	E. m. Vv.	L. e.	E. m. Vv.		
R Sand- reich 100:9,4 entspricht ~ PC 200	0,62		1) 5,20 v 2) 2,98 v 3) 4,03 v 4) 4,07 v <hr/> 16,28		8,35 6,21 5,84 7,50 <hr/> 27,90		12,83 15,62 10,50 14,52 <hr/> 53,47	24,0 17,7 20,4 26,0 <hr/> 88,9	7,40 5,28 6,09 7,76 <hr/> 26,53
	5,34								
		Mittel		4,07	6,97		(13,38)	22,2	6,63
		Umgerechnet		1,457	1,51		(1,27)		
	0,71		1) 1,86 v 2) 2,11 v 3) 1,30 v 4) 1,14 v <hr/> 6,41		4,36 3,75 2,96 2,26 <hr/> 13,33		8,88 6,88 6,38 7,51 <hr/> 29,65	12,18 14,92 9,06 8,25 <hr/> 44,41	3,64 3,56 2,71 2,46 <hr/> 12,37
	6,09								
		Mittel		1,60	3,34		(7,41)	10,37	3,09
		Umgerechnet		0,58	0,72		(0,702)		
	0,80		1) 0,48 v 2) 0,44 v 3) 0,72 v 4) 0,55 <hr/> 2,39		1,03 1,44 1,33 1,28 <hr/> 4,78		3,86 4,03 3,50 3,93 <hr/> 15,32	3,52 4,52 5,97 4,18 <hr/> 18,19	1,05 1,25 1,78 1,25 <hr/> 5,43
	6,86								
		Mittel		0,60	1,19		(3,84)	4,55	1,36
		Umgerechnet		0,218	0,258		(0,364)		
0,89		1) - v 2) - v 3) - v 4) - v		0,35 0,26 0,29 0,37 <hr/> 1,37		0,74 0,85 0,91 0,72 <hr/> 3,22	0,94 1,12 1,44 1,25 <hr/> 4,75	0,28 0,33 0,43 0,37 <hr/> 1,41	
7,64									
	Mittel		-	0,34		(0,80)	1,19	0,35	
	Umgerechnet			0,074					
	Mittel								
	Umgerechnet								
	Mittel								
	Umgerechnet								

Sec. Vibrationszeit bis Wasserziehen		Sec. Mittelwert „verteilt“	cm. Anfangs-Überhöhung		% Poren bei N'ziehen	cm Feinmörtel-aufstieg	Betonsonde von Humm						
L. e.	E. m. Vv.	Mittelwert „gestochert“	L. e.	E. m. Vv.	E. m. Vv.	E. m. Vv.	Lose eingefüllt			Eingefüllt m. Verdichtig.			
							Ramm-schläge At 10	Ramm-schläge At 5	At 10/At 5	Ramm-schläge At 10	Ramm-schläge At 5	At 10/At 5	
	12	9,5		6,6	5,5	0,4				195	95	2,05	
	7			6,4	5,9	0,2				168	75	2,48	
	8			6,5	5,9	0,6				192	80	2,40	
	11			6,9	5,6	0,4				265	110	2,41	
	38	—		26,4	22,9	1,6				838	360		
	9,5			6,6	5,7	0,4	Mittel			210	90	2,34	
							Gesamtmittel			210 - 90 - 2,34			
	4	4,75		5,4	6,3	1,1				215	105	2,04	
	6			5,3	4,8	1,4				190	65	2,92	
	5			5,4	4,4	1,4				240	100	2,40	
	4			5,4	5,1	1,2				155	55	2,82	
	19	—		21,5	20,6	3,1				800	325		
	4,75			5,4	5,15	1,3	Mittel			200	81	2,47	
							Gesamtmittel			200 - 81 - 2,47			
	1	1,4		3,8	6,4	1,7				350	65	5,28	
	1,5			3,8	5,6	1,6				185	46	3,59	
	1,5			3,7	4,8	-				340	95	3,59	
	1,5			4,0	5,9	1,9				290	70	4,14	
	5,5	—		15,3	24,7	5,2				1145	276		
	1,4			3,8	6,2	1,7	Mittel			286	49	4,14	
							Gesamtmittel			286 - 69 - 4,14			
	1	0,6		2,4		2,7				650	135	4,82	
	0,5			2,4		2,4				500	85	5,98	
	0,5			2,7		2,2				420	80	5,25	
	0,5			2,8		2,6				550	90	6,11	
	2,5	—		10,3		3,9				2120	390		
	0,6			2,6		2,5	Mittel			530	98	5,41	
							Gesamtmittel			530 - 98 - 5,41			
							Mittel						
							Gesamtmittel						
							Mittel						
							Gesamtmittel						

Resultate der Hauptversuche mit dem Gerät nach Fritsch

<u>Mischung</u>	Wasserzementwert Wassergehalt in % der Trockensubstanz	Spezifische Verdichtungsarbeit bei :						K Hyperbel- Konstante		
		10 % Poren		7,5 % Poren		5 % Poren		Aus Kurven	um- gerechnet	
		Lose eingefüllt	Eingefüllt mit Vorverdichtung	L. e.	E. m Vv	L e.	E. m Vv			
R	0,39 5,08		1) 4,39 V 2) 4,51 V 3) 5,27 V 4) 6,59 V		6,36 8,57 8,94 10,42		17,87 18,38 14,92 22,00	27,9 27,9 30,0 34,0	4,33 4,93 4,86 10,45	
		Mittel	20,76	34,29	73,17	119,8	35,76			
	Umgerechnet	5,78	8,58	18,30	30,0	1,93				
			1) 4,47	1) 2,88 V 2) 3,05 V 3) 2,49 V 4) 3,31 V	6,15	4,44 7,54 4,50 5,44	12,68 15,62 11,13 13,12	9,9 24,4 16,4 20,2	15,7 4,39 4,89 6,03	
	Mittel	4,47	2,94	6,15	5,47	12,68	12,43	18,4	5,5	
	Umgerechnet	1,065	1,18							
		0,45 5,86	1) 1,70 2) 2,39 3) 3,01 4) 3,12 5) 2,12	7) 3,06 G 8) 3,24 G 9) 2,56 G 10) 2,20 G 11) 2,72 G	2,86 4,06 3,94 4,37 3,16	4,11 4,97 4,30 3,94 5,07	6,93 8,24 7,83 10,58 8,67	9,89 11,77 13,30 14,46 10,97	15,1 16,8 16,0 13,5 16,1	4,50 5,01 4,77 4,02 4,10
	Mittel		2,35	3,76	3,66	4,62	4,85	10,56	15,5	4,62
	Umgerechnet	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0			
		0,49 6,39	1) 1,04 2) 0,96 3) 0,96 4) 1,05 5) 0,95	10) 0,82 G 11) 0,93 G 12) 1,09 G 13) 0,74 G 14) 0,71 G	1,55 1,32 1,27 1,17 1,52	1,69 2,08 2,54 1,17 1,92	4,21 2,75 2,64 4,27 4,18	5,46 4,53 4,87 3,05 5,36	6,28 6,78 7,73 4,17 6,16	1,87 2,02 2,60 1,24 1,84
	Mittel		0,99	0,96	1,44	1,78	3,61	4,65	6,43	1,91
	Umgerechnet	0,421	0,348	0,399	0,385	0,427	0,441			
	0,525 6,85	1) 0,66 2) 0,67 3) 2,95 4) 0,83 5) 0,67	6) 0,52 G 8) 0,48 G 9) 0,49 G 10) 0,37 G	1,12 1,10 1,46 1,34 1,18	1,12 0,86 1,11 0,75 1,18	3,60 3,09 3,08 3,64 5,55	2,70 2,46 3,70 2,37 2,37	3,42 3,26 3,52 3,64 12,44	1,02 0,97 1,05 0,90 3,83	
Mittel		0,76	0,44	1,24	0,96	3,79	(2,58)	3,21	0,96	
Umgerechnet	0,324	0,167	0,339	0,21		(0,244)				
	0,56 7,28	1) 0,35 2) 0,24 3) 0,18 4) 0,21 5) 0,22	6) — G 7) — G 8) — G 9) — G	0,62 0,61 0,36 0,49 0,58	0,26 0,24 0,32 0,20 1,02	1,95 2,42 1,13 0,62 3,28	0,57 0,43 0,52 0,62 2,54	1,04 1,34 1,13 0,89 4,40	0,31 0,40 0,34 0,87 1,82	
Mittel		0,22		0,53	0,26	1,16	(0,64)	1,10	0,33	
Umgerechnet	0,1935		0,165	0,258		(0,261)				

Sec. Vibrationszeit bis Wasserziehen		Sec. Mittelwert „verteilt“	cm. Anfangs-Überhöhung		% Poren bei W'ziehen	cm Feinmörtel-aufstieg	Betonsonde von Humm								
L. e.	E. m. Vv.	Mittelwert „gestochert“	L. e.	E. m. Vv.	E. m. Vv.	E. m. Vv.	Lose eingefüllt			Eingefüllt m. Verdrüchtg.					
							Ramm-schläge At 10	Ramm-schläge At 5	At 10 / At 5	Ramm-schläge At 10	Ramm-schläge At 5	At 10 / At 5			
	22 20 18 27	22		8,8 8,8 9,0 8,6	3,6 3,9 4,6 3,5	0 0 0 0				235 185 165 185	85 65 60 65	2,76 2,84 2,75 2,38			
	87	—		35,2	15,6	0				740	275				
	22			8,8	3,9	0	Mittel			185	69	2,68			
							Gesamtmittel			185	69	2,68			
20	12 12 11 13	12	10,3	8,2 8,0 8,4 7,2	3,7 5,0 4,2 4,1	0 0,2 0 0		232	100	2,32	140 140 130 170	50 55 45 85	2,8 2,54 2,89 2,0		
	44	—		31,8	17,0	0,2				50	235				
20	42		10,3	7,9	4,3	0,05	Mittel	232	100	2,32	145	59	2,46		
							Gesamtmittel			162	67	2,42			
13	9	—		8,7	4,2	0,4		137	64	2,14	58 100	31 53	1,87 1,85		
13	8			9,2	4,9	0,2		77	34	2,26	56	27	2,08		
12	7			8,1	4,9	0,4		65	32	2,06	77	30	2,56		
12	8			9,0	5,1	0,4		78	38	2,05	83	34	2,44		
10	9			8,8	5,4	0,4		58	29	2,00	81	40	2,02		
60	42	8,4		44,8	24,5	1,8		435	197	2,20	455	245			
12	8,4			9,0	4,9	0,25	Mittel	47	39	2,23	76	36	2,10		
							Gesamtmittel			81	37	2,18			
3,5	3	—		7,2	3,8	4,7	1,1	58	26	2,23	64	29	2,20		
4,0	3			4,9	3,9	4,1	1,1	44	22	2,00	67	31	2,16		
4,0	5			4,5	4,2	4,2	0,8	53	24	2,21	55	22	2,50		
4,0	2			4,7	3,4	4,3	1,2	57	23	2,48	76	28	2,71		
4,0	3			7,1	3,3	4,3	—	39	19	2,05	63	30	2,10		
23,5	16	3,2		34,4	18,6	22,3	4,2	251	114	2,21	355	22	2,50		
4,7	3,2			6,9	4,7	4,8	1,05	Mittel	50	23	2,18	65	27	2,44	
							Gesamtmittel			59	26	2,26			
4	2	—		6,5	3,7	3,9	1,3	61	31	1,97	54	26	2,08		
4	1,6			5,5	3,4	4,6	1,2	33	15	2,20	58	26	2,08		
4	1			6,2	3,6	6,3	1,8	47	24	1,96	61	25	2,44		
3,5	1			6,0	3,9	6,4	1,7	49	45	1,09	55	22	2,50		
3,5				5,6				36	4	2,57	78	27	2,89		
19,0	3,8	1,4		29,8	14,6	24,2	6,0	226	99	2,28	302	126			
3,8	1,4			6,0	3,6	5,3	1,8	Mittel	45	20	2,25	60	25	2,40	
							Gesamtmittel			53	22	2,41			
2	1	—		4,2	2,4		2,3	53	20	2,65	66	27	2,44		
1,5	0,5			3,8	2,6		1,8	59	24	2,46	68	28	2,43		
1	1			3,2	2,0		2,0	44	18	2,44	56	23	2,44		
1,5	1			4,5	2,6		2,0	63	25	2,52	58	14	4,14		
2				3,8				66	23	2,87					
8,0	3,5	0,9		14,5	9,6		8,1	285	110	2,59	248	92			
1,6	0,9			3,7	2,4		3,0	Mittel	57	22	2,59	62	23	2,70	
							Gesamtmittel			59	22	2,68			

Sec. Vibrationszeit bis Wasserziehen		Sec. Mittelwert „verteilt“	cm. Anfangs-Überhöhung		% Poren bei N'ziehen E. m Vv.	cm Feinmörtel-aufstieg E. m Vv.	Betonsonde von Humm						
L. e.	E. m Vv.		L. e.	E. m Vv.			Lose eingefüllt			Eingefüllt m. Verdichtung			
		Mittelwert „gestochert“					Ramm-schläge At 10	Ramm-schläge At 5	At 10/At 5	Ramm-schläge At 10	Ramm-schläge At 5	At 10/At 5	
	35 30 35 30		32,5		10,6 10,7 11,1 10,8	3,5 4,0 3,4 3,6	0 0 0 0				200 160 197 150	75 70 80 60	2,66 2,28 2,46 3,00
	130			43,2	14,5	0				177	69	2,56	
	32,5			40,8	3,6	0	Mittel			177	69	2,56	
							Gesamtmittel			177	69	2,56	
20 13 14 18 —	12 10 12 10	12	10,5 11,3 11,0 10,3 10,8	7,8 6,4 8,0 6,2 10,8	3,3 3,6 3,5 3,6 —	0 0 0 0 0		90 92 85 80 78 108	44 33 38 36 34 54	2,04 2,78 2,24 2,22 2,29 2,00	81 90 94 102 117	40 35 40 48 49	2,02 2,57 2,35 2,12 2,39
	65			53,5	28,4	44,0	0		533	239	444	212	
	16			19,7	7,1	3,5	0	Mittel	89	40	222	97	2,31
								Gesamtmittel	89	40	222	97	2,31
12 14 9 7 8 8 8	4 6 6 5 5 21	5,5	8,6 4,7 4,6 3,0 3,4 8,8 6,8	5,0 5,0 4,4 5,3 — 22,6	3,8 3,1 3,3 3,8 — 14,0	0,8 — 0,7 — — 2,4		56 52 66 56 45 57 49	31 27 28 27 20 21 21	1,81 1,93 2,34 2,08 2,25 2,72 2,24	46 61 66 66 — 239	11 39 24 24	2,56 1,66 2,25 2,25
	10			8,1	3,7	3,5	0,8	Mittel	54	25	216	60	2,31
								Gesamtmittel	54	25	216	60	2,31
7 6 5 4 3,5	3 2 3 1,5 1,5	3	7,8 7,0 7,0 7,1 7,4	4,3 3,4 5,0 3,9 4,3	2,3 1,2 1,1 3,8 5,0	1,4 1,4 1,1 — 1,2		17 25 26 25 33	9 12 9 13 17	1,89 2,08 2,89 1,92 1,84	45 44 42 55 43	20 20 14 14 15	2,85 2,20 3,00 3,06 2,46
	25,5			36,3	19,9	20,5	3,1		126	60	229	87	
	5,1			7,3	4,0	4,1	1,3	Mittel	25	12	208	46	2,20
								Gesamtmittel	25	12	208	46	2,20
3 3 3 — 9	1 1 1 — 3	1	5,9 5,5 5,2	2,5 2,6 3,4	— — —	2,0 2,0 1,0		16 15 7	7 6 3	2,28 2,50 2,24	34 35 44	17 12 20	2,00 2,82 3,20
	9			14,6	7,5	—	5,9		38	16	113	49	
	3			5,5	2,5	—	2,0	Mittel	13	5	260	34	2,37
								Gesamtmittel	13	5	260	34	2,37
2 2 1,5 1 1			4,0 4,1 7,5 3,3 2,8	— — — — —	— — — — —	— — — — —		15 14 23 15 25	6 4 7 6 8	2,50 3,50 3,89 2,50 3,13			
	7,5			15,7	—	—	—		92	31	—	—	
	1,5			3,4	—	—	—	Mittel	18	6	300	—	
								Gesamtmittel	18	6	300	—	

F. DISKUSSION DER RESULTATE

1. Einleitung

Aus der Einleitung zu diesem Kapitel ergibt sich, daß die eigenen experimentellen Arbeiten betreffend die Verdichtbarkeit des Betons in erster Linie deshalb ausgeführt wurden, um untersuchen zu können, ob die als «spezifische Verdichtungsarbeit» bezeichnete Neigung der Tangente an die Setzungskurve bei einem bestimmten verbleibenden prozentualen Porengehalt ein befriedigendes Maß für die Verdichtbarkeit darstellt, und ob sie der Vibrationszeit bis zum Wasserziehen vorgezogen werden kann.

Die Versuchsergebnisse sollen deshalb zunächst in dieser Hinsicht diskutiert werden (Abschnitt F 2), wobei im einzelnen die folgenden, bereits in der Einleitung zum Kapitel festgelegten Punkte zu untersuchen sind, nämlich der Einfluß der Einfüllmethode, d. h. der Vorverdichtung, auf die Größe der spezifischen Verdichtungsarbeit, die Bedeutung der Wahl des Bezugsporengehaltes im Zusammenhang mit einer mathematischen Approximation der Setzungskurven, und schließlich die Beziehungen zwischen spezifischer Verdichtungsarbeit und Vibrationszeit bis zum Wasserziehen.

Im nachfolgenden Abschnitt (F 3) werden dann die Versuchsergebnisse in bezug auf die Eigenschaften der untersuchten Mischungen diskutiert. Insbesondere werden die Beziehungen zwischen Befeuchtungsgrad und innerer Beweglichkeit bei Verdichtung durch Vibration, im Zusammenhang mit der Stabilität der Mischungen, untersucht. (Stabilität im Sinne der genügenden Wasserbindung im Inneren der vibrierenden Betonmasse. Siehe schwedische Versuche in Kapitel I, Abschnitt E 3.)

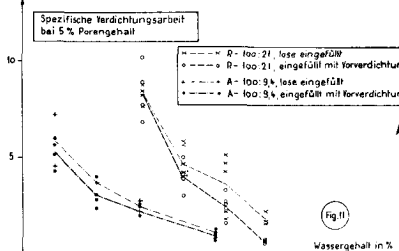
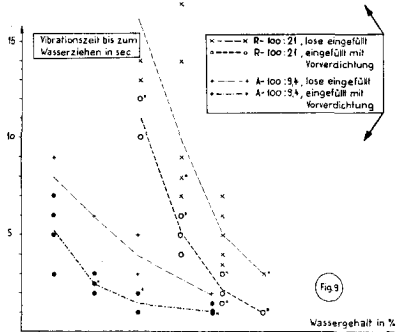
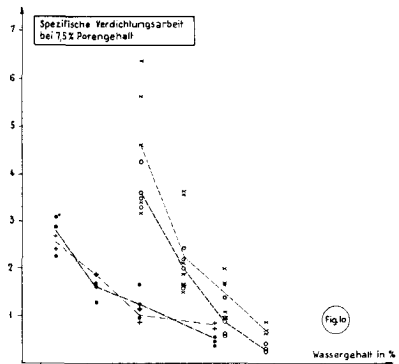
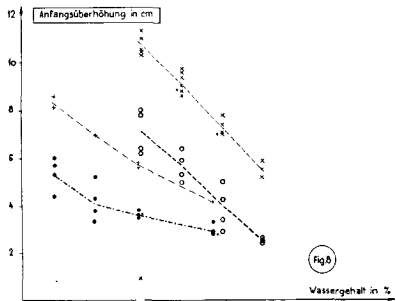
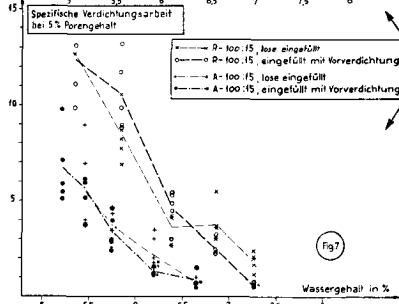
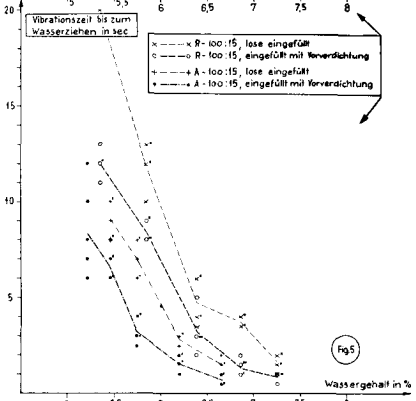
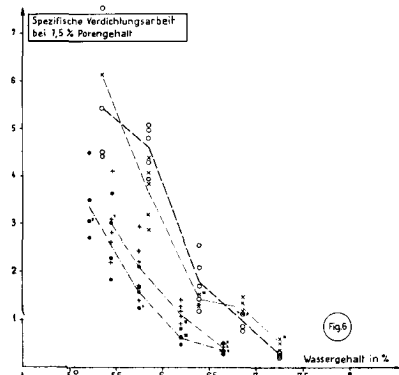
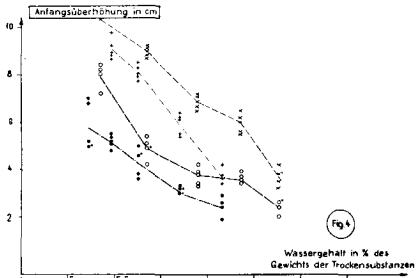
Im Abschnitt F 4 werden schließlich die Resultate der in Anschluß an die Verdichtbarkeitsmessungen durchgeführten Eindringversuche besprochen.

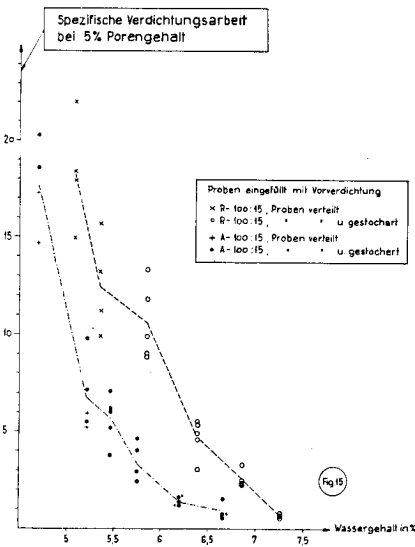
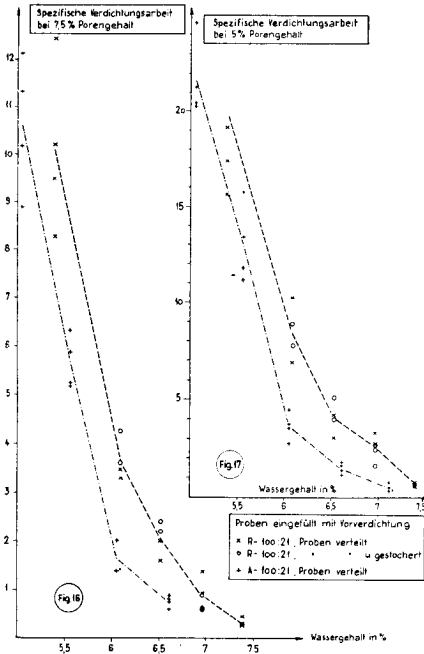
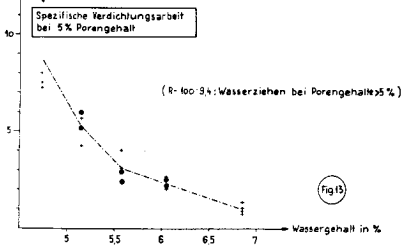
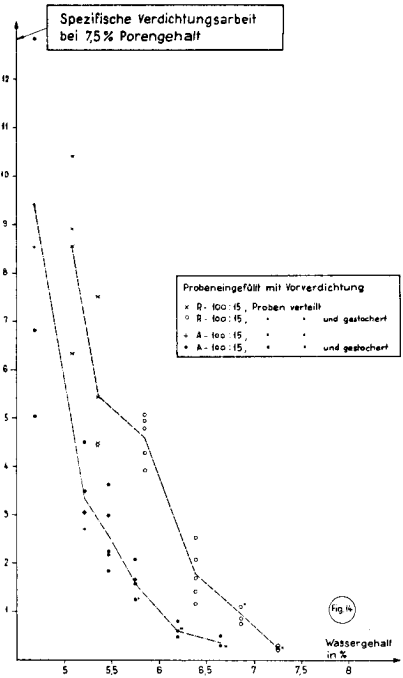
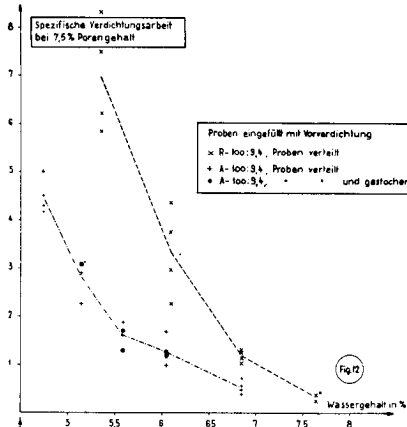
2. Diskussion der Versuchsergebnisse zur Ermittlung des Wesens der spezifischen Verdichtungsarbeit und deren Beziehung zur Vibrationszeit bis zum Wasserziehen

a) Einfluß der Vorverdichtung beim Einfüllen

Es werden hier zunächst nur die Resultate der Versuche mit den vier Mischungen angeführt, für welche beide Einfüllmethoden verwendet wurden. (A-100:9,4; A-100:15; R-100:15; R-100:21)

Die Höhe der Betonoberfläche über dem Niveau der vollkommenen Verdichtung bei Beginn des Vibrationsversuches wird als Anfangsüberhöhung bezeichnet (siehe Tabellen). Sie wird normalerweise aus den Setzungskurven nach Eintragung der horizontalen Bezugsachse herausgelesen; in unseren Ver-



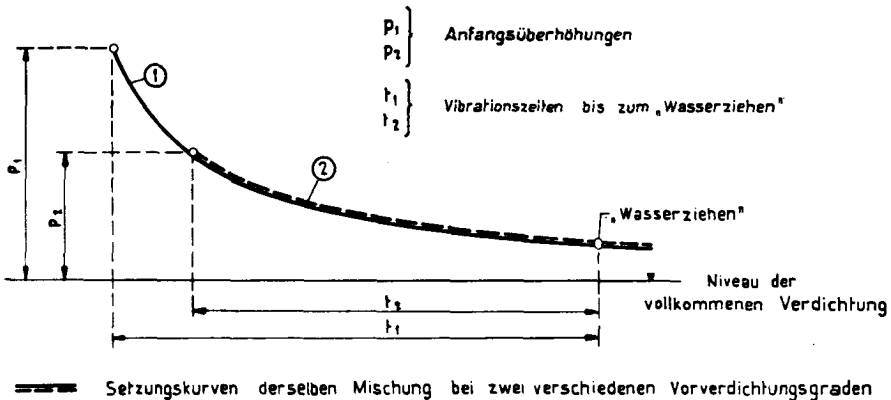


suchen konnte sie vor Beginn der Vibration am Führungsstab des Deckels abgelesen werden.

In den Figuren 4 und 8 sind für die vier Mischungen die Anfangsüberhöhungen, in den Figuren 5 und 9 die Vibrationszeiten bis zum Wasserziehen bei Einfüllen mit und ohne Vorverdichtung aufgetragen. Die Vibrationszeiten bei Einfüllen ohne Vorverdichtung (Bezeichnung in Tabellen: lose eingefüllt) sind größer als bei Einfüllen mit Vorverdichtung, entsprechend dem größeren Ausgangsvolumen.

In den Figuren 6, 7, 10 und 11 sind die Neigungen der Tangenten (spezifische Verdichtungsarbeiten) bei 7,5% und 5% Porengehalt bei losem Einfüllen und Einfüllen mit Vorverdichtung aufgetragen. Es zeigt sich keine eindeutige Abhängigkeit vom Anfangsvolumen. Die zur gleichen Mischung gehörenden Kurven der spezifischen Verdichtungsarbeit liegen viel näher beieinander als die entsprechenden Kurven der Vibrationszeit. Für die Mischung R-100:15 ist bei trockener Konsistenz die Neigung der Tangente bei Einfüllen ohne Vorverdichtung sogar kleiner. Die Übereinstimmung ist besonders gut bei der Mischung A-100:9,4.

Daß die als Neigung der Tangente an die Setzungskurve bestimmte Verdichtbarkeit einer Betonmischung im Gegensatz zur Vibrationszeit bis zum Wasserziehen eine von der Vorverdichtung unabhängige Größe darstellt, zeigt sich auch aus den Figuren 12–17, in denen die bei Einfüllen mit Vorverdichtung für die sechs verwendeten Granulometrien erhaltenen Werte aufgetragen sind, wobei die mit einem Kreuz bezeichneten Punkte den Versuchen mit bloßer Verteilung der Masse, die mit einem Kreis bzw. einem Punkt bezeichneten hingegen den Versuchen mit Vorverdichtung durch Stochern entsprechen. (In den Tabellen in Abschnitt E sind die Werte der spezifischen Verdichtungsarbeit bei Einfüllen mit Vorverdichtung mit einem V oder G bezeichnet, je nach dem die Proben nur verteilt oder auch gestochert worden waren.)



Die Tatsache, daß die Werte der Tangentenneigungen unabhängig von der Vorverdichtung sind, bedeutet, daß für einen bestimmten Beton und verschiedene Vorverdichtungsgrade die Setzungskurven identisch sind (abgesehen von den Streuungen). Die verschiedenen Vorverdichtungsgrade müssen sich dann eben in der Vibrationszeit bis zum «Wasserziehen» ausdrücken, da das «Wasserziehen» bei einem bestimmten verbleibenden Luftporengehalt erfolgt. (Siehe vorstehende Figur.)

b) Bedeutung der Wahl des Bezugsporengehaltes

Die Bestimmung der Verdichtbarkeit als Neigung der Tangente an die Setzungskurve hat, wie gesagt, nur einen praktischen Wert, sofern die Wahl des Bezugsporengehaltes sich nicht auswirkt auf die relative Größe der Neigungen, d. h. nur sofern beim Vergleich irgendwelcher Mischungen miteinander die Tangentenneigungen im gleichen Verhältnis zueinander stehen, welches auch der gewählte Bezugsporengehalt sei.

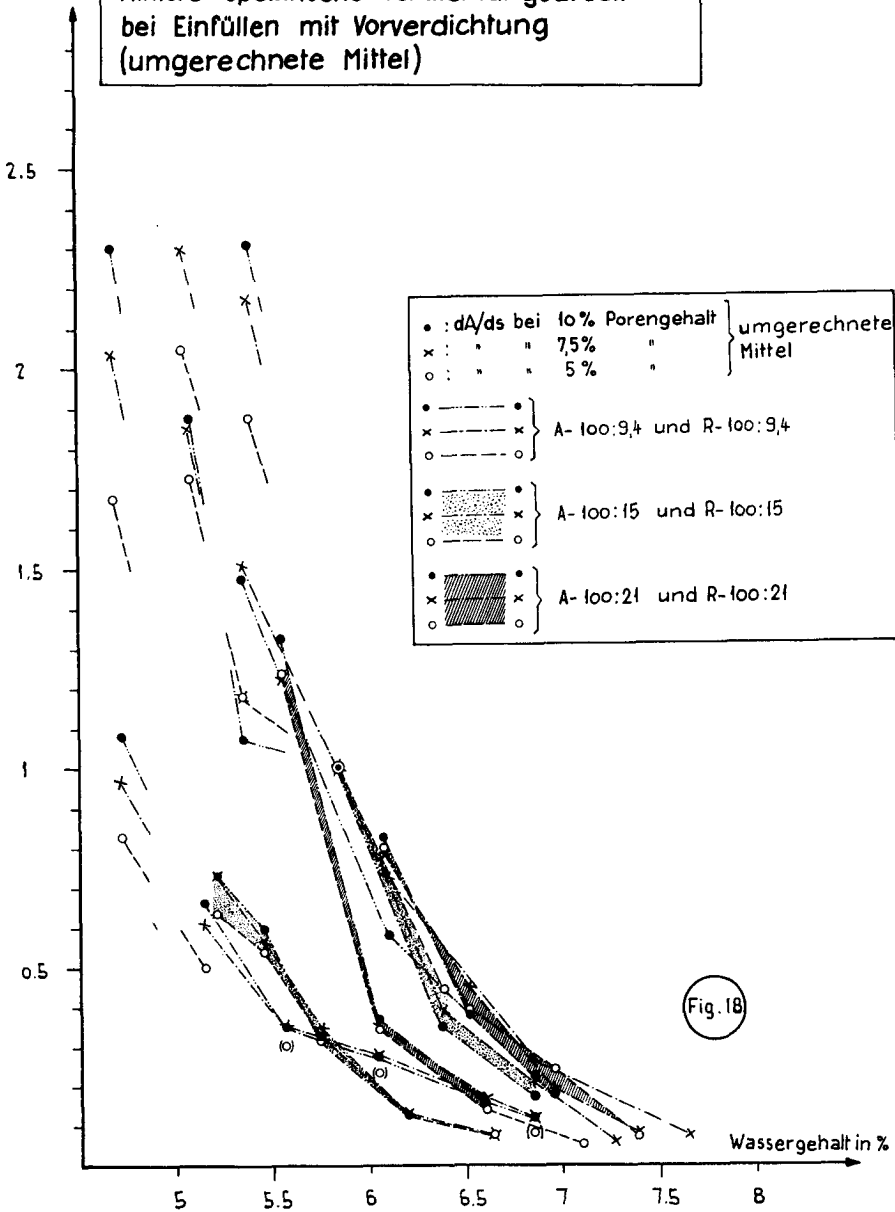
In Figur 18 sind die Mittelwerte der spezifischen Verdichtungsarbeiten bei 5%, 7,5% bzw. 10% Porengehalt aus den Versuchen mit Vorverdichtung in Funktion des Wassergehaltes aufgetragen, und zwar jeweils in Bruchteilen der spezifischen Verdichtungsarbeit der Mischung R-100:15 beim Wasserzementwert 0,45. Das ergibt eine Aufzeichnung der spezifischen Verdichtungsarbeiten bei 5%, 7,5% und 10% in drei verschiedenen Maßstäben, und zwar so, daß die drei Punkte für die Mischung R-100:15/0,45 zusammenfallen. Die in Figur 18 aufgetragenen Werte sind auf den Tabellen als umgerechnete Mittel bezeichnet.

Für die Mischungen, die Wasser ziehen bei einem Porengehalt größer als 5%, dürfen die Neigungen der Tangenten bei 5% nicht berücksichtigt werden. (Mittelwerte auf Tabellen eingeklammert.) Der mit dem Schreiber starr verbundene Netzdeckel dringt nämlich vom Augenblick des Wasserziehens an in die Betonmasse ein (Aufsteigen von Feinmörtel). Die Setzungskurve zeigt dann nicht allein die Verdichtung, sondern gleichzeitig die Separation, und die Tangentenneigung ergibt entsprechend der so verfälschten Kurvenform einen zu kleinen Betrag. (Siehe Setzungskurven für die Mischung A-100:9,4 bei den Wassergehalten 5,58%, 6,03% und 6,86%).

In Figur 18 ist für einige nasse Mischungen auch keine spezifische Verdichtungsarbeit bei 10% Poren angegeben: es sind dies die Zusammensetzungen, bei denen allein durch das Einfüllen eine Verdichtung bis auf weniger als 10% Poren stattfindet.

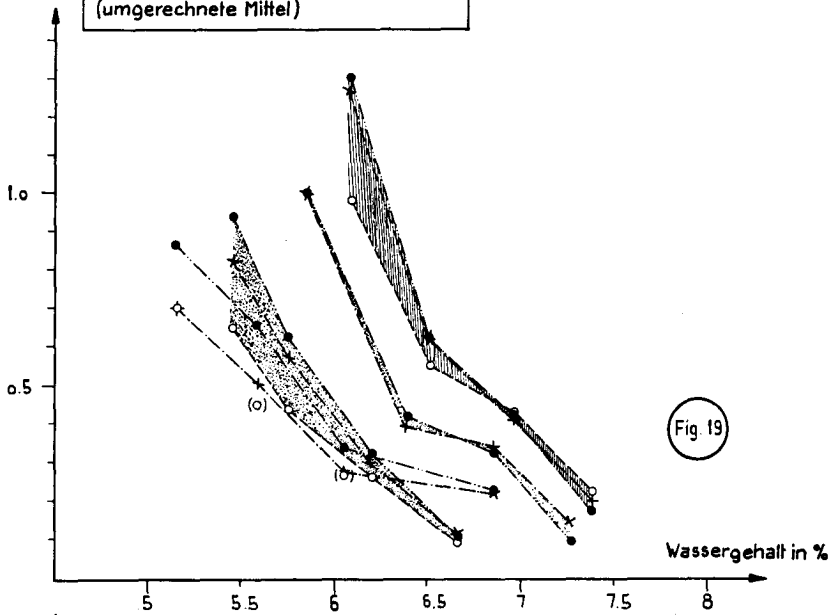
Die Übereinstimmung der Kurven in Figur 18 ist befriedigend, d. h. wenn man von den sehr trockenen Mischungen absieht, die deutlich außerhalb des Bereiches der verarbeitbaren Zusammensetzungen liegen, ergibt sich beim Vergleich der Verdichtbarkeiten dasselbe Bild, ob man nun als Bezugsporengehalt

Mittlere spezifische Verdichtungsarbeit
 bei Einfüllen mit Vorverdichtung
 (umgerechnete Mittel)

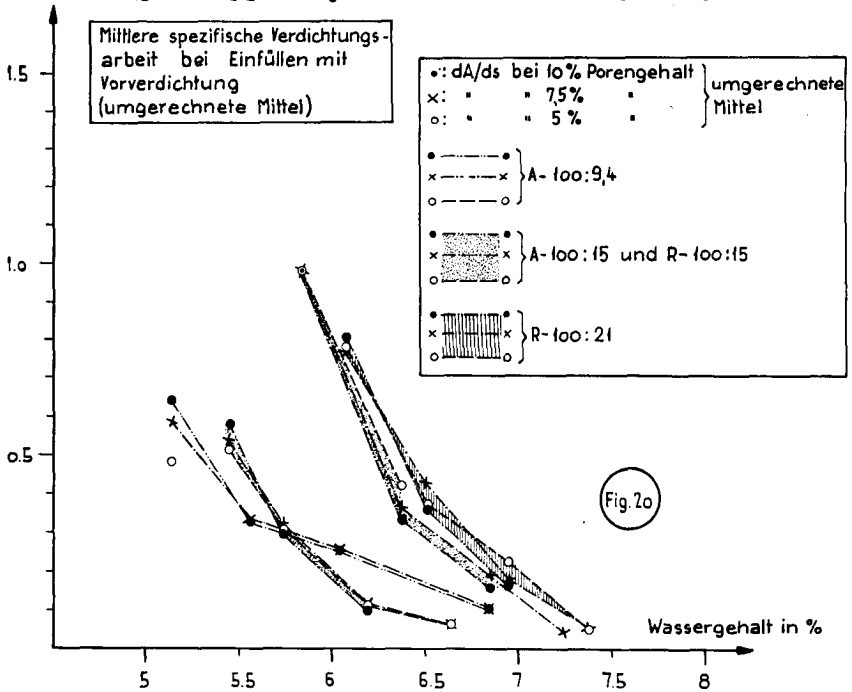


(Fig. 18)

Mittlere spezifische Verdichtungsarbeit
bei Einfüllen ohne Vorverdichtung
(umgerechnete Mittel)



Mittlere spezifische Verdichtungsarbeit
bei Einfüllen mit Vorverdichtung
(umgerechnete Mittel)



5%, 7,5% oder 10% wählt. Eine größere Streuung ergibt allein die Mischung R-100:9,4 bei 6,09% Wassergehalt.

Analog wie in Figur 18 für die Versuche mit Vorverdichtung sind in Figur 19 für die Versuche mit Einfüllen ohne Vorverdichtung die Mittelwerte der spezifischen Verdichtungsarbeiten bei 5%, 7,5% und 10% Porengehalt aufgetragen. Die Maßstäbe sind wieder so gewählt, daß sich für die Zusammensetzung R-100:15/0,45 ein und derselbe Wert ergibt. (In den Tabellen sind die in Figur 19 aufgetragenen Werte als umgerechnete Mittel angegeben.)

Zur Veranschaulichung des Vergleiches zwischen Einfüllen mit und ohne Vorverdichtung sind in Figur 20 nochmals die schon in Figur 18 enthaltenen Resultate dargestellt, welche sich auf die Zusammensetzungen beziehen, mit denen auch Versuche ohne Vorverdichtung ausgeführt wurden. Der Vergleich der Mischungen R-100:15 und R-100:21 auf Grund der Neigung der Tangente an die Setzungskurve ergibt bei Einfüllen ohne Vorverdichtung bei nasser Konsistenzen noch ein von der Wahl des Bezugsporengehaltes unabhängiges Resultat. Vergleicht man aber die Mischung R-100:15 mit den beiden sandärmeren Mischungen (A-100:15 und A-100:9,4), so sind die Resultate für die drei Bezugsporengehalte nicht dieselben. Es ergibt sich bei Einfüllen ohne Vorverdichtung (Figur 19), im Gegensatz zum Einfüllen mit Vorverdichtung (Figur 20), ein eher ungünstiges Bild.

Dies bedeutet, daß man aus den Setzungskurven nur dann schlüssige Vergleichswerte erhalten kann, wenn man vorgängig der Vibration auf eine regelmäßige Raumauffüllung achtet. Im folgenden werden deshalb bei der Diskussion der Versuchsergebnisse nur die Werte der spezifischen Verdichtungsarbeiten benützt, welche sich aus Versuchen mit Vorverdichtung ergeben haben.

c) *Mathematische Approximation der Setzungskurven*

Es stellt sich hier die Frage, ob nicht für die Setzungskurven ein allgemeiner mathematischer Ausdruck gefunden werden kann, welcher die Bedingung der konstanten relativen Größe der Tangentenrichtungen erfüllt.

Da die Setzungskurven im Niveau der vollkommenen Verdichtung eine horizontale Asymptote besitzen, ist anzunehmen, daß ihre Form annähernd hyperbolisch ist.

Die allgemeine Gleichung einer gleichseitigen Hyperbel, bezogen auf ihre Asymptoten x' und y' (Figur 21), lautet:

$$x' \cdot y' = K \quad (1)$$

Bezogen auf die horizontale Asymptote $x (= x')$ und eine verschobene Ordinatenachse y , ergibt sich die folgende Gleichung:

$$(x - x_0) \cdot y = K; \quad y = \frac{K}{x - x_0} \quad (2),$$

wobei x_0 die Abszisse des Hyperbelzentrums im neuen Achsensystem x - y bedeutet.

Der der spezifischen Verdichtungsarbeit entsprechende Winkelkoeffizient ($-dx/dy$) der Hyperbel berechnet sich wie folgt:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-K}{(x-x_0)^2}$$

$$-\frac{dx}{dy} = \frac{dA}{ds} = \frac{(x-x_0)^2}{K} = \frac{K}{y^2} \quad (3)$$

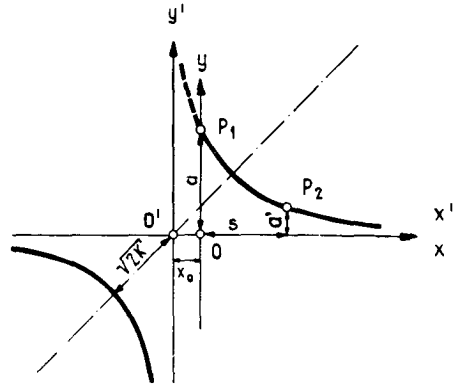


Fig. 21 Gleichseitige Hyperbel

Die gleichseitige Hyperbel erfüllt also die für die Setzungskurven in den meisten Fällen geltende Bedingung, daß die Werte der Winkelkoeffizienten im gleichen Verhältnis zueinander stehen, welches auch die Größe der Bezugsordinate y sei.

Ob die Setzungskurven im konkreten Fall durch gleichseitige Hyperbeln approximiert werden können, wurde an Hand der eigenen Resultate wie folgt untersucht. Es wurde zunächst für jede verwendete Betonzusammensetzung unter den aufgenommenen Setzungskurven diejenige ausgesucht, deren Tangentenneigungen bei 5%, 7,5% und 10% Porengehalt am wenigsten von den Mittelwerten für die betreffende Zusammensetzung abweichen. Dann wurde zu jeder dieser Setzungskurven diejenige gleichseitige Hyperbel aufgezeichnet, welche durch die beiden Extrempunkte der Setzungskurve und durch das Niveau der vollkommenen Verdichtung als horizontale Asymptote bestimmt ist. Als Anfangspunkt P_1 (siehe Figur 21) wurde dabei jeweils der Beginn des regelmäßigen Kurvenverlaufes (Ende der Anlaufschwankungen des Vibrators), und als Endpunkt P_2 im Prinzip der Augenblick des Wasserziehens genommen, da ja nach diesem Zeitpunkt der Deckel in die Betonmasse eindringt und die Setzungskurve somit nicht mehr die Verdichtung darstellt.

Aus den drei Größen a , s und a' (Koordinaten der Punkte P_1 und P_2 , siehe Figur 21) berechnen sich die beiden Konstanten der Hyperbelgleichung, die Ordinatenachsenverschiebung x_0 und die Hyperbelkonstante K , wie folgt:

$$x_0 = -\frac{a' \cdot s}{a - a'} ; \quad K = \frac{a \cdot a' \cdot s}{a - a'} \quad (4)$$

Im Anhang sind für zwei der sechs untersuchten Trockenzusammensetzungen, (A-100:9,4) und (R-100:15), die Photokopien der Originalkurvenblätter

mit den Setzungskurven und den entsprechenden Hyperbeln je auf einem Blatt zusammengestellt.

Vergleicht man die Setzungskurven mit den entsprechenden gleichseitigen Hyperbeln, so ergeben sich die folgenden Beobachtungen: Für alle Betonzusammensetzungen, die innerhalb des normalen Konsistenzbereiches für Vibrierbeton liegen, weichen die beiden Kurven wenig voneinander ab, in vielen Fällen fallen sie sogar genau zusammen. Eine deutliche Abweichung zeigt sich hingegen für vier der sechs untersuchten Zusammensetzungen bei extrem trockener Konsistenz. Die Abweichung von der Hyperbelform ist die Ursache der deutlichen Abweichung der in Figur 18 aufgetragenen Werte der spezifischen Verdichtungsarbeit voneinander. Die Hyperbel ergibt, wie gesagt (Gleichung 3), gleiche Relativwerte der Tangentenneigungen; im Fall der genannten trockenen Mischungen weichen die Setzungskurven gegenüber den Hyperbeln nach oben ab, wodurch sie bei 10% Poren relativ flacher und bei 5% Poren relativ steiler sind als die Hyperbeln (siehe entsprechende Abstufung der spezifischen Verdichtungsarbeiten auf Figur 18).

Das Eindringen des Deckels in die Betonmasse infolge Feinmörtelaufstieg zeigt sich in den meisten Fällen deutlich in der Abweichung der Setzungskurve von der gegen das Niveau der vollkommenen Verdichtung asymptotisch abfallenden Hyperbel.

Auf den Kurvenblättern der Mischung A-100:9,4 (\sim PC 200) für die Wasserzementwerte 0,65, 0,70 und 0,80 ist ersichtlich, wie die Tangente an die Setzungskurve bei 5% Porengehalt abweicht von derjenigen an die Hyperbel, infolge der Tatsache, daß die betreffenden Betonzusammensetzungen bei einem relativ hohen Porengehalt (um 5%) Wasser ziehen.

Die Werte der Hyperbelkonstante wurden noch im einzelnen mit denjenigen der spezifischen Verdichtungsarbeit verglichen.

In den Tabellen in Abschnitt E sind für alle ausgeführten Versuche bei Einfüllen mit Vorverdichtung die aus den Setzungskurven nach Gleichung (4) bestimmten, auf die Drehzeit von 30,5 sec bezogenen K -Werte angegeben.

Zum Vergleich mit der spezifischen Verdichtungsarbeit wurden diese Werte jeweils noch umgerechnet, und zwar so, daß der Mittelwert von K für die Mischung R-100:15 beim Wasserzementwert 0,45 den gleichen Betrag ergab wie die mittlere spezifische Verdichtungsarbeit bei 7,5% Porengehalt. (Kolonne «Hyperbelkonstante K umgerechnet» in Tabellen.)

Als Bezugsporengehalt für den Vergleich wurde 7,5% gewählt, weil dadurch fast alle untersuchten Zusammensetzungen erfaßt werden können. Für die Wahl des Bezugsporengehaltes bleibt ein ziemlich enger Bereich: nach unten ist er beschränkt durch die Separation, welche bei mageren nassen Mischungen schon bei 6% Poren beginnen kann, nach oben durch die Vorverdichtung

infolge Eigengewicht, die bei nassen Mischungen Anfangsporengehalte bis unter 10% ergeben kann.

Die umgerechneten K -Werte sind in den Figuren 22, 23 und 24 aufgetragen; in den Figuren 25, 26 und 27 sind die Mittelwerte allein aufgetragen, zusammen mit den entsprechenden Mittelwerten der spezifischen Verdichtungsarbeit bei 7,5% Porengehalt.

Die Mittelwerte stimmen in den meisten Fällen nahezu überein. Nur bei den beiden Mischungen A-100:21 und R-100:21 (Figur 27) zeigt sich für die trockensten Konsistenzen eine geringe Abweichung der Mittelwerte voneinander. Die Streuung der K -Werte entspricht im allgemeinen derjenigen der spezifischen Verdichtungsarbeit (vgl. Figuren 12, 14, 16 und 22, 23, 24). In einigen Fällen liegen die extremen K -Werte für eine und dieselbe Betonzusammensetzung weniger weit auseinander als die entsprechenden extremen spezifischen Verdichtungsarbeiten.

Es kann aus dem Vergleich geschlossen werden, daß die *Bestimmung der Tangentenneigung und die Berechnung der Hyperbelkonstante* nicht nur theoretisch (Gleichung 3), sondern auch praktisch *gleichwertige Methoden der Auswertung der Setzungskurven* darstellen.

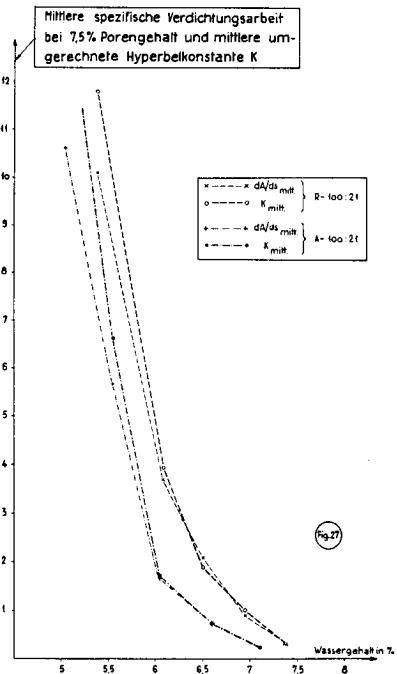
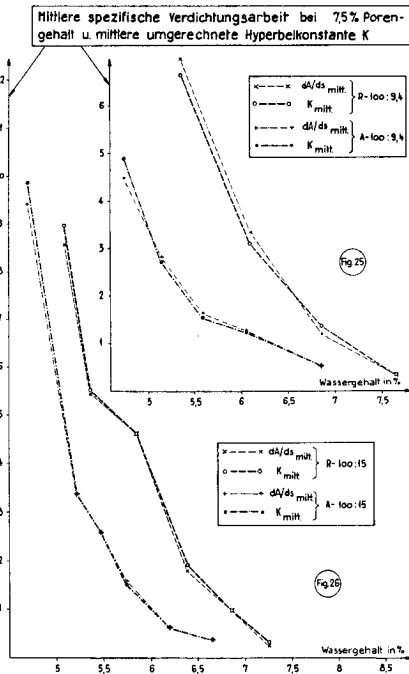
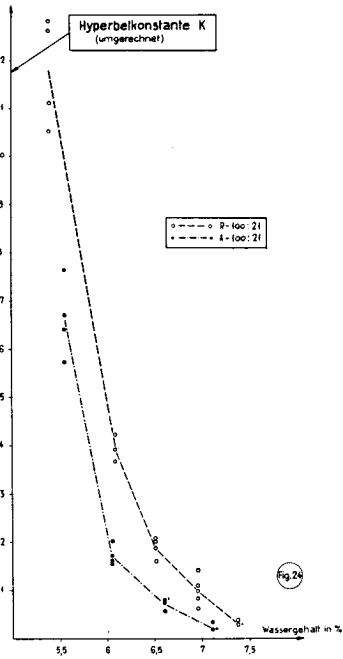
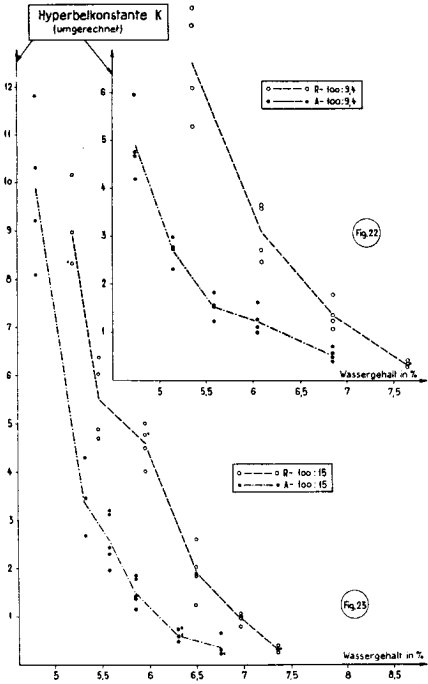
d) *Vergleich der spezifischen Verdichtungsarbeit mit der Vibrationsdauer bis zum Wasserziehen. Zurückführung der spezifischen Verdichtungsarbeit auf die streng definierte Verdichtbarkeit.*

Die Vibrationsdauer bis zum Wasserziehen wird heute vielfach als die zweckmäßigste Größe zur Charakterisierung der Verdichtbarkeit von Vibrierbeton betrachtet. Es ist dies naheliegend, da die Schließung der Oberfläche grob als ein Zeichen der erfolgten Verdichtung aufgefaßt werden kann, und die Messung einfach ist.

Will man die spezifische Verdichtungsarbeit als die zweckmäßigere Größe empfehlen, so genügt es nicht, nur auf die beiden folgenden Vorteile, die durch die Kurvenauswertung geboten werden, hinzuweisen, nämlich auf die Ausschaltung des persönlichen Faktors und auf die Unabhängigkeit von der Vorverdichtung (Abschnitt F 2 a).

Es wird deshalb im folgenden zu ergründen versucht, in welchem Verhältnis die beiden Größen «Vibrationsdauer bis zum Wasserziehen» und «Spezifische Verdichtungsarbeit» zueinander stehen, ob sie eindeutig zugeordnete Werte ergeben, oder wie eventuelle Unterschiede erklärt und zugunsten einer der beiden Methoden ausgelegt werden können.

Als Bezugsporengehalt wird für diesen Vergleich wieder 7,5% gewählt, aus den in Abschnitt F 2 c dargelegten Gründen. Die Kurven der Mittelwerte der spezifischen Verdichtungsarbeit bei 7,5% Porengehalt für die sechs unter-



suchten Mischungen in Funktion des Wassergehaltes sind in Figur 28 zusammengefaßt. (Gleiche Kurven wie in Figuren 12, 14 und 16.)

Für den Vergleich dürfen nur Vibrationszeiten verwendet werden, die bei Anwendung ein und derselben Einfüllmethode gemessen wurden. Nun erfolgte die Vorverdichtung nicht immer auf dieselbe Art. Zum Teil wurden bei derselben Zusammensetzung die eingefüllten Proben durchwegs verteilt, zum Teil durchwegs gestochert, und zum Teil verteilt oder gestochert. Als «Bezugsvorverdichtung» wird das Einfüllen mit bloßer Verteilung der Masse gewählt.

In Figur 29 sind für alle ausgeführten Versuche die Mittelwerte der Vibrationszeiten aufgetragen, und zwar verschieden bezeichnet, je nach der Einfüllmethode. (Es sind auch die Vibrationszeiten bei losem Einfüllen angegeben.) Die ausgezogenen Kurven beziehen sich auf das Einfüllen bei bloßer Verteilung der Masse. Sie ergeben sich für die Granulometrien A-100:21, R-100:21, A-100:9,4 und R-100:9,4 direkt, da für alle untersuchten Mischungen Versuche mit Verteilung der Masse ausgeführt wurden. Mit den Granulometrien A-100:15 und R-100:15 sind nur für die beiden trockensten Mischungen Versuche mit bloßer Verteilung der Masse ausgeführt worden. Für die übrigen Wassergehalte konnten aber die Vibrationszeiten bei Einfüllen mit bloßer Verteilung aus den tatsächlich gemessenen Vibrationszeiten abgeleitet werden.

Die Kurve für die Mischung R-100:15 auf Figur 29 verläuft somit durch die folgenden Punkte: Für die nässeste Zusammensetzung durch das Mittel der Vibrationszeiten bei Einfüllen mit Stochern (das Anfangsvolumen ist für sehr nasse Mischungen bei Einfüllen unter bloßer Verteilung der Masse und bei leichter Verdichtung nahezu gleich), für die Wassergehalte 6,85% und 6,39% etwas unterhalb dem Mittel zwischen den Vibrationsdauern bei Einfüllen mit Stochern und ohne Vorverdichtung (vgl. Wassergehalte 6,07% und 6,95% bei der Mischung R-100:21), für den Wassergehalt 5,86% durch den Mittelwert der Vibrationsdauer bei Einfüllen mit Stochern, zwecks Ausgleich einer sich zwischen den Wassergehalten 5,34% und 5,86% ergebenden Unstetigkeit (eine ähnliche Unstetigkeit ergibt sich an der gleichen Stelle auch für die spezifische Verdichtungsarbeit).

Für die Mischung A-100:15 ergab sich die Ergänzung der Kurve der Vibrationszeit bei verteiltem Einfüllen zwischen den gegebenen Punkten der Wassergehalte 5,22% und 6,65%, bei Einhaltung einer stetigen Form, zwangsläufig. Die Kurve verläuft bei den Wassergehalten 5,74% und 6,19% etwas oberhalb den Mittelwerten bei Einfüllen mit Stochern.

Aus den Figuren 28 und 29 wurden die Relationen zwischen der spezifischen Verdichtungsarbeit bei 7,5% Poren und der Vibrationsdauer bis zum Wasserziehen bei Einfüllen mit bloßer Verteilung der Masse für die sechs untersuchten Granulometrien abgeleitet und in Figur 30 aufgetragen. Es zeigen sich starke Unterschiede: für ein und dieselbe spezifische Verdichtungsarbeit ergeben

Mittlere spezifische Verdichtungs-
arbeit bei 7,5% Porengehalt

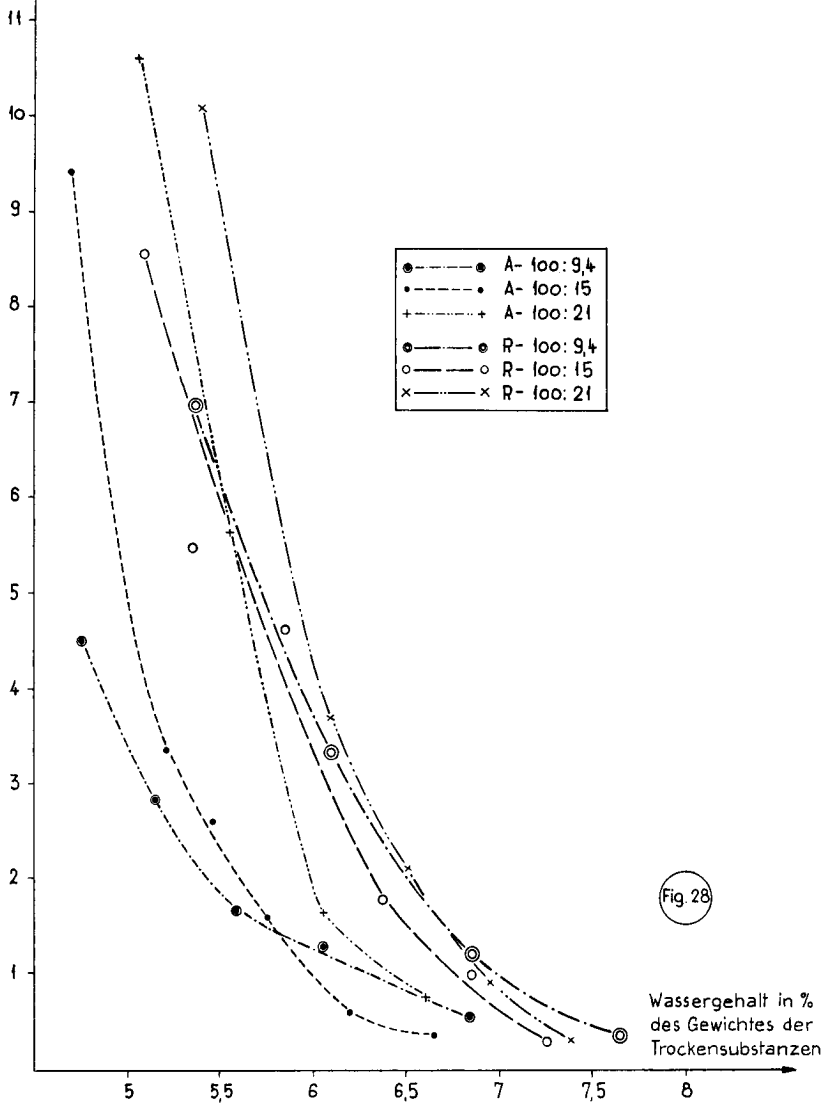
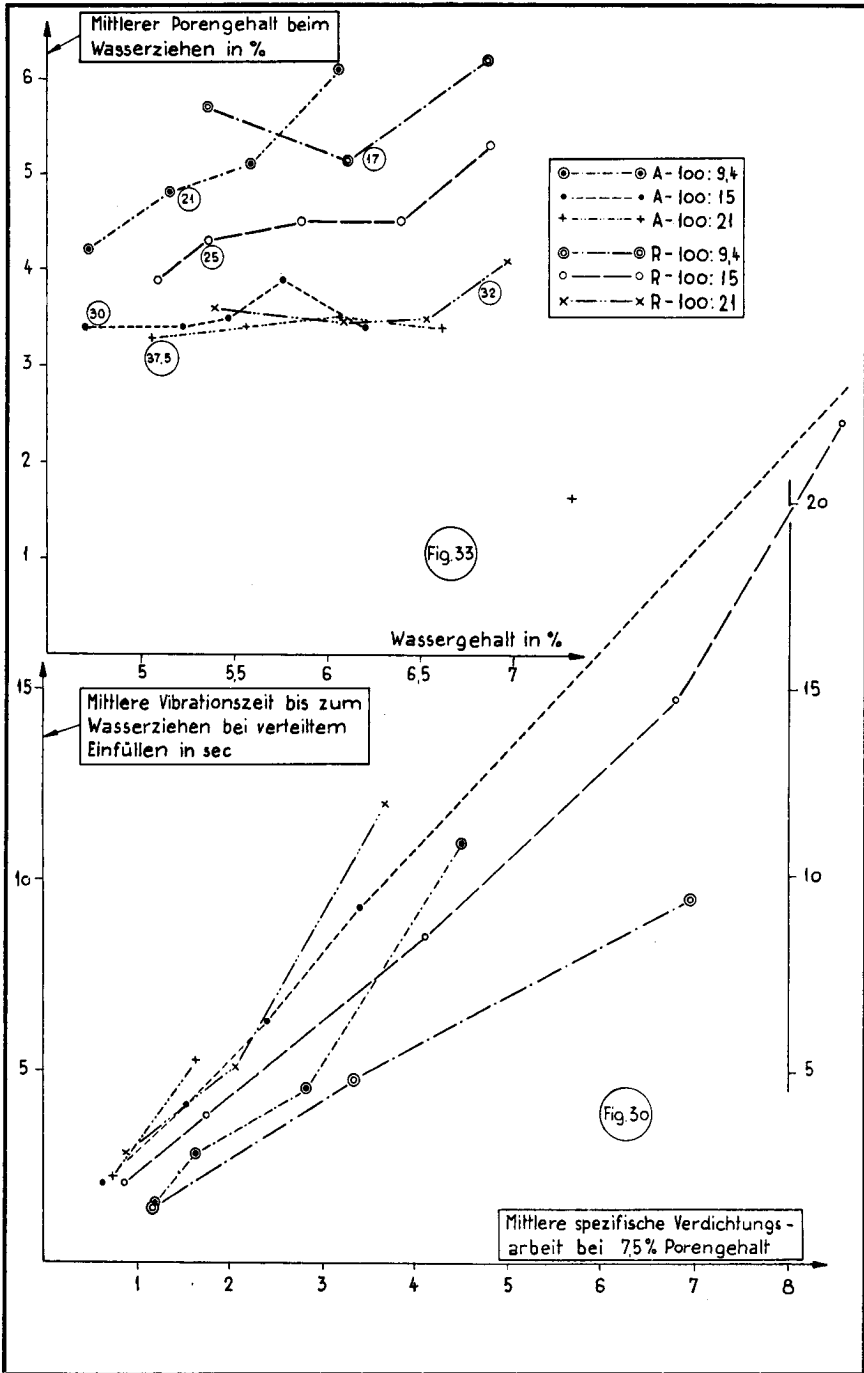
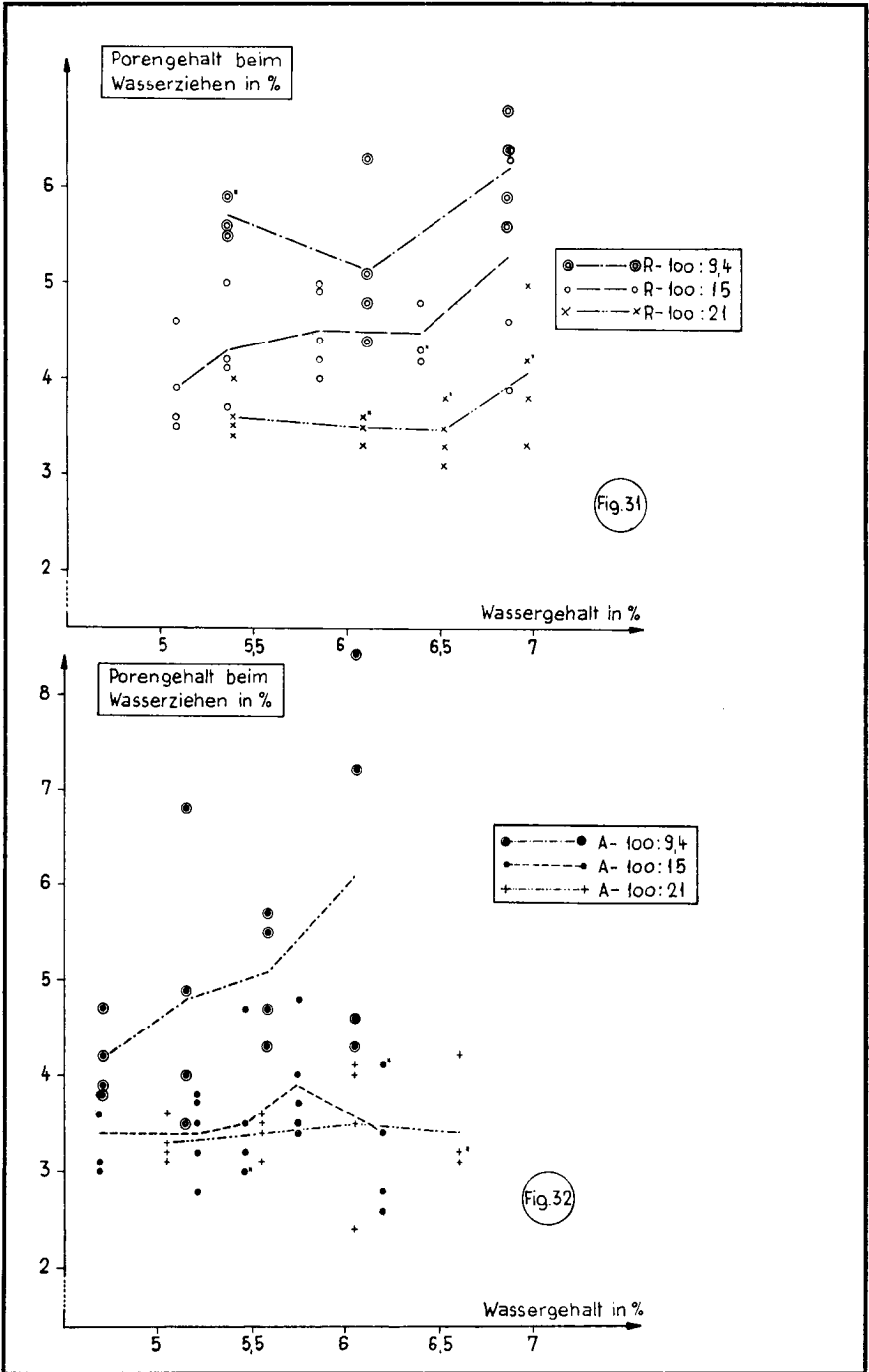


Fig. 28

Wassergehalt in %
des Gewichtes der
Trockensubstanzen





sich für die fetten Mischungen R-100:21 und A-100:21 (\sim PC 400) die größten, für die Mischungen A-100:15 und R-100:15 (\sim PC 300) mittlere, und für die mageren Mischungen A-100:9,4 und R-100:9,4 (\sim PC 200) die kleinsten Vibrationszeiten. Es kommt also durch die spezifische Verdichtungsarbeit nicht die gleiche Materialeigenschaft zum Ausdruck wie durch die Vibrationsdauer bis zum Wasserziehen.

Zur Erklärung des Unterschiedes müssen die Porengehalte im Augenblick des Wasserziehens berücksichtigt werden. Diese sind in den Figuren 31, 32 und 33 für die untersuchten Granulometrien in Funktion des Wassergehaltes aufgetragen. Die Mittelwerte liegen zwischen 3,3% und 6,2%. Die drei sandreicheren Mischungen zeigen eine deutliche Abstufung der Porengehalte entsprechend der Zementdosierung (Figur 31). Die magere Mischung zeigt beim Wasserziehen die größeren Porengehalte als die mitteldosierte (PC 300), und diese wieder die größeren als die fette; die Streuungsbereiche überschneiden sich nur wenig. Für die sandärmeren Mischungen (Figur 32) ergibt sich eine weniger scharfe Abstufung der Porengehalte nach der Dosierung: die Werte für die magere Mischung liegen immerhin deutlich über den entsprechenden Werten für die beiden höher dosierten.

In Figur 33 sind für alle sechs Mischungen die Mittelwerte allein aufgetragen. Vergleicht man nun diese Darstellung der Porengehalte beim Wasserziehen mit den in Figur 30 aufgetragenen Relationen zwischen spezifischer Verdichtungsarbeit und Vibrationsdauer, so zeigt sich ein interessanter Zusammenhang: Die Kurven der Vibrationsdauer in Funktion der spezifischen Verdichtungsarbeit haben im großen und ganzen eine ähnliche relative Lage zueinander wie diejenigen der Porengehalte beim Wasserziehen. *Die Mischungen, welche bei der gleichen spezifischen Verdichtungsarbeit die längere Vibrationszeit ergeben, sind die, welche bei einem kleineren Porengehalt Wasser ziehen.*

Es liegt somit die Vermutung nahe, daß der verschiedene Luftgehalt im Augenblick des Wasserziehens allein verantwortlich ist für das Nichtübereinstimmen der beiden Größen. Zur Prüfung der Richtigkeit dieser Annahme wurden die Vibrationsdauern für alle untersuchten Zusammensetzungen umgerechnet auf einen und denselben verbleibenden Porengehalt, indem zu der gemessenen Zeit vom Beginn der Vibration bis zum Augenblick des Wasserziehens jeweils die Zeit zur Weiterverdichtung bis zu einem Porengehalt von 3,4% addiert wurde. 3,4% ist der minimale Porengehalt beim Wasserziehen, der sich fast durchwegs bei den fetten Mischungen ergibt.

Die zur mittleren Vibrationszeit bei Einfüllen mit Verteilung der Masse (Figur 29) zu addierende Zeit Δt wurde für jede geprüfte Zusammensetzung mit bestimmter Granulometrie und bestimmtem Wassergehalt jeweils aus der Setzungskurve desjenigen Versuches herausgelesen, bei dem sich gerade der mittlere oder der davon am wenigsten abweichende Wert des Porengehaltes

für die betreffende Zusammensetzung eingestellt hat. (Siehe zwei Beispiele auf den Kurvenblättern im Anhang.) Die Umrechnungen sind in untenstehender Tabelle angegeben.

Umrechnung der Vibrationszeiten:

Mischung	W/Z	dA/ds	t ₁	Δt	t ₂	Mischung	W/Z	dA/ds	t ₁	Δt	t ₂
A 100:9,4	0,55	4,49	11,0	2,4	13,4	R 100:9,4	0,62	6,97	9,5	8,1	17,6
	0,60	2,82	4,5	2,9	7,4		0,71	3,34	4,7	4,3	9,0
	0,65	1,63	2,8	2,8	5,6		0,80	1,19	1,4	2,6	4,0
	0,70	1,20	1,5	1,5	3,0		0,89	0,34	0,6	—	—
	0,80	0,54	1,1	—	—						
A 100:15	0,36	9,41	25,0	0	25,0	R 100:15	0,39	8,58	22,0	3,1	25,1
	0,40	3,40	9,3	0	9,3		0,41	6,80	14,8	2,8	17,8
	0,42	2,40	6,3	0,3	6,6		0,45	4,10	8,5	3,6	12,1
	0,44	1,56	4,1	0,6	4,7		0,49	1,78	3,8	1,7	5,5
	0,475	0,63	2,0	0	2,0		0,525	0,87	2,0	1,3	3,3
	0,51	0,36	0,9	—	—		0,56	0,26	0,9	—	—
A 100:21	0,29	10,62	42,5	—	—	R 100:21	0,31	10,10	32,5	—	—
	0,32	5,67	20,0	0	20,0		0,35	3,67	12,0	0,3	12,3
	0,35	1,64	5,2	0,3	5,5		0,375	2,06	5,0	0,2	5,2
	0,38	0,76	2,2	0	2,2		0,40	0,89	2,8	0,8	3,6
	0,41	—	0,6	—	—		0,425	0,33	1,0	—	—

In den Kolonnen sind folgende Größen dargestellt:

Mischung: Kiessandzusammensetzung und Zementdosierung

W/Z: Wasserzementwert

dA/ds: Mittlere spezifische Verdichtungsarbeit bei 7,5% Poren.

(Aus Kurven der Figur 28.)

t₁: Vibrationsdauer bis zum Wasserziehen bei vert. Einfüllen in sec.

(Aus Kurven der Figur 29.)

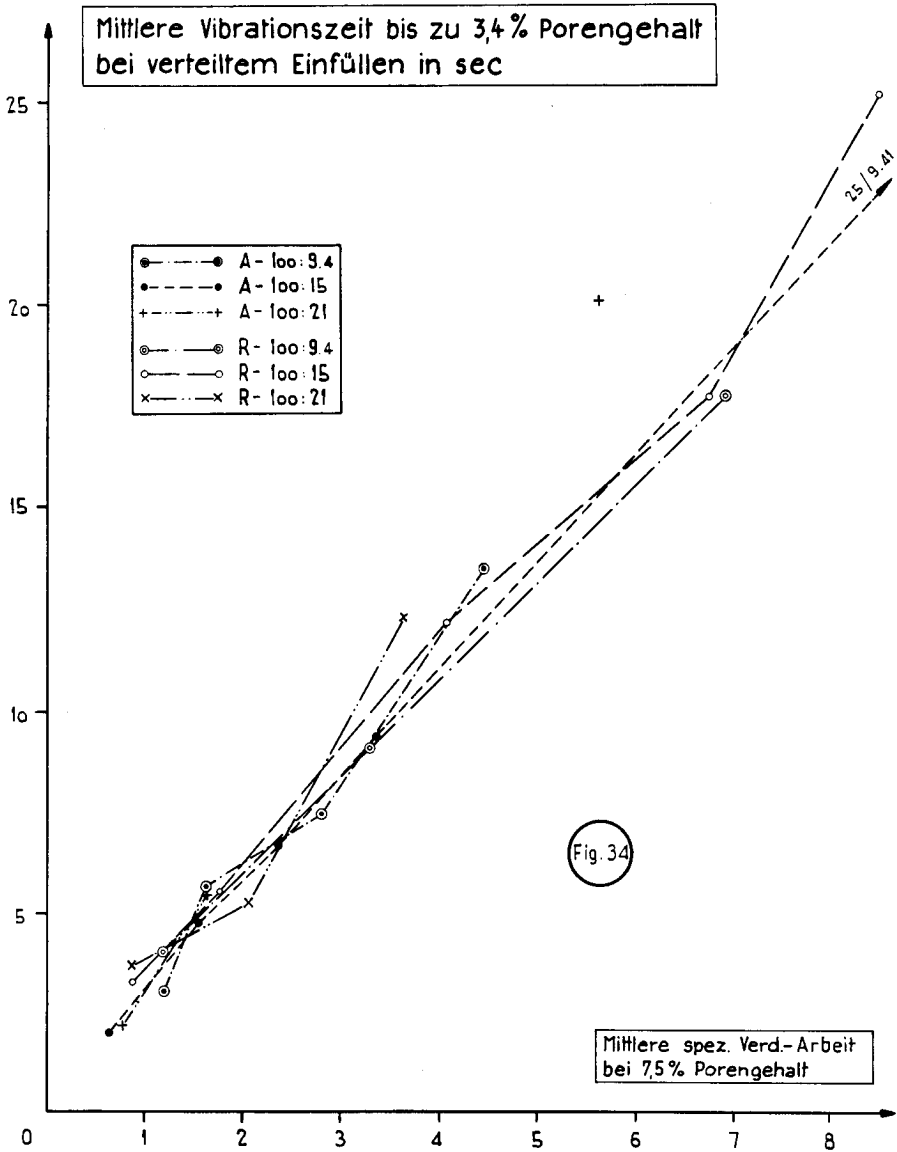
Δt: Bestimmt aus Setzungskurven, wie oben beschrieben.

t₂: Vibrationszeit bis zum Porengehalt 3,4% bei vert. Einfüllen in sec.

$$t_2 = t_1 + \Delta t$$

Die Relationen zwischen der spezifischen Verdichtungsarbeit und der so korrigierten Vibrationsdauer (aus obiger Tabelle) sind in Figur 34 dargestellt. Die Kurven für die sechs Granulometrien liegen nun sehr nahe beieinander und haben im Gesamten einen linearen Verlauf. Einzig die Mischung A-100:21 bildet bei trockener Konsistenz eine Ausnahme.

Wenn man berücksichtigt, daß die Grenze des Bereiches der praktisch verarbeitbaren Mischungen bei einer spezifischen Verdichtungsarbeit von 3,5 liegt (Wasserzementwert = 0,40 für die sandärmere Mischung bei PC 300), so kann



aus Figur 34 geschlossen werden, daß jedenfalls innerhalb dieses Bereiches die Übereinstimmung zwischen der spezifischen Verdichtungsarbeit und der Vibrationszeit bis zum Porengehalt von 3,4% bei ein und derselben Einfüllmethode ausnahmslos eine recht gute ist. Für die trockeneren Mischungen gibt die Methode der Tangentenneigung ohnehin weniger befriedigende Resultate,

indem sich eine gewisse Abhängigkeit von der Wahl des Bezugsporengehaltes zeigt (Figur 18).

Die Zeit, welche zur Verdichtung bis zu einem bestimmten verbleibenden niederen Luftporengehalt erforderlich ist, kann als Maß für die Verdichtbarkeit nach deren strengen Definition betrachtet werden, obschon diese sich eigentlich auf die vollkommene Verdichtung bezieht (siehe Einleitung zu Kapitel I). Es ist somit erwiesen, daß *die spezifische Verdichtungsarbeit ein genaueres Kriterium über die Verdichtbarkeit darstellt als die Vibrationszeit bis zum Wasserziehen.*

Es ist zweckmäßiger, aus den Setzungskurven die spezifische Verdichtungsarbeit (Neigung der Tangente) als die Vibrationszeit bis zu einem bestimmten Porengehalt zu bestimmen. Die zweite Methode setzt eine bestimmte Art des Einfüllens voraus, was bei der ersten hingegen nicht der Fall ist, da ja die Größe der spezifischen Verdichtungsarbeit unabhängig von der Vorverdichtung ist (siehe Abschnitt F 2 a).

e) Zusammenfassung

In den vorhergehenden Abschnitten (F 2 a, b, c, d) wurden alle diejenigen Untersuchungen beschrieben, welche notwendig waren, um nachweisen zu können, daß die Neigung der Tangente an die Setzungskurve bei einem bestimmten verbleibenden Porengehalt ein genaues Maß der Verdichtbarkeit darstellt. Diesen Beweis zu erbringen, war das Hauptziel der nach der verbesserten Methode von Fritsch ausgeführten Versuche, wie dies in der Einleitung zu diesem Kapitel dargelegt ist. Es konnten alle die dort gestellten Fragen beantwortet werden, d. h. es ergab sich im einzelnen, daß die Tangentenneigung unabhängig vom Vorverdichtungsgrad ist, daß beim Vergleich verschiedener Mischungen untereinander die Wahl des Bezugsporengehaltes sich nicht auf die relative Größe der Tangentenneigungen auswirkt, und daß die Größe der spezifischen Verdichtungsarbeit, im Gegensatz zur Vibrationszeit bis zum Wasserziehen, mit der streng definierten Verdichtbarkeit in Zusammenhang gebracht werden kann.

3. Diskussion der Versuchsergebnisse in bezug auf die Eigenschaften der untersuchten Materialien. Beziehungen zwischen Konsistenz und Verdichtbarkeit der untersuchten Mischungen

Nachdem gezeigt wurde, daß die «spezifische Verdichtungsarbeit» ein gut brauchbares Maß der Verdichtbarkeit darstellt, soll nun an Hand der erhaltenen Resultate noch untersucht werden, wie sich Änderungen in der Betonzusammensetzung auf die Verdichtbarkeit auswirken. Dabei sollen gleichzeitig die Beziehungen zwischen «Verdichtbarkeit» und «Konsistenz» der untersuchten Mischungen verfolgt werden. Ein Vergleich zwischen «Konsistenz»

und «Verdichtbarkeit» ist deshalb von Interesse, weil es in der Praxis oft vorkommt, daß aus dem Trockenaufbau von Betonmischungen (d. h. aus der Siebkurve der Zuschlagsstoffe und aus der Zementdosierung) mit Hilfe von bestimmten empirischen Gesetzen (von Abrams, Bolomey usw.) rechnerisch der Wasserzusatz bestimmt wird, der nötig ist, um dem betreffenden Gemisch eine bestimmte «Konsistenz» zu verleihen. Dabei wird stillschweigend angenommen, daß «Konsistenz» ein eindeutiges Kriterium sei, und daß darüber hinaus eine bestimmte «Konsistenz» immer annähernd derselben Verarbeitbarkeit entspreche.

Wie weit dies zutrifft, kann in unserem Fall dadurch untersucht werden, daß die «Konsistenzen» der verwendeten Mischungen nach einer der bekannten Wasseranspruchsformeln berechnet und dann diese Konsistenzwerte mit den entsprechenden Werten der spezifischen Verdichtungsarbeit verglichen werden.

Vor der Durchführung dieses Vergleiches soll zunächst einmal der Konsistenzbegriff erläutert werden, sowohl im allgemeinen, als auch speziell in bezug auf den Frischbeton.

a) *Erläuterung des Konsistenzbegriffes. Plastizität, Konsistenz und Befeuchtungsgrad*

Konsistenz ist ein Begriff, der nur auf Stoffe anzuwenden ist, welche eine gewisse Plastizität besitzen. Unter *Plastizität* versteht man die Fähigkeit eines Stoffes, bleibende Verformungen ohne Verlust des Zusammenhanges zu erleiden. Ein plastisches Verhalten zeigen u. a. die Feststoffe (z. B. die Metalle) bei Beanspruchung jenseits der Elastizitätsgrenze. Die elastische Deformation beruht auf einer Veränderung der Molekülabstände, während die plastische Deformation auf einer Vorzugsorientierung der Aufbauelemente und auf Fließbewegungen derselben beruht.

Hier ist die Rede von der Plastizität von körnigen Materialien, welche in die Kategorie der «Pseudo-Feststoffe» gehören. Als solche werden allgemein Körper mit inhomogener Textur bezeichnet, deren Aufbauelemente in einem Größenbereich, der weit über demjenigen der Moleküle liegt, vollständig voneinander getrennt sind. Der Zusammenhalt («Kohäsion») dieser Stoffe beruht auf Oberflächenkräften, sofern in Kapillaren oder in Form dünner Schichten eine Flüssigkeit vorhanden ist, welche die nötige Affinität zu der Festsubstanz besitzt (Erscheinungen der Benetzung und der Adsorption). Ein typischer Pseudo-Feststoff ist der Ton. Die Größe der Einzelteilchen liegt beim Ton zwischen 0,2 und 2 micron: es handelt sich vorwiegend um schichtenweise angeordnete Blättchen mit dazwischenliegenden Schichten von zum Teil adsorbierten Wassers. Bei derart aufgebauten Stoffen ist ein plastisches Verhalten möglich, da sich die Teilchen relativ zueinander verschieben können,

ohne daß der durch die Oberflächenkräfte gewährte Zusammenhang verloren geht.

Daraus geht hervor, daß die Fähigkeit zum plastischen Verhalten, bei sonst gleichen Bedingungen, um so größer wird, je feinkörniger der Stoff ist, da ja bei zunehmender Feinheit sowohl die gegenseitige Verschiebbarkeit als auch die Oberflächenwirkungen erhöht werden.

Ist ein Pseudo-Feststoff, seinem Aufbau nach, zu einem plastischen Verhalten fähig, so hängt der Grad seiner Plastizität vom Wassergehalt ab. Es sei dies am Beispiel des Tons erläutert. Der Plastizitätsbereich eines Tons ist in Richtung abnehmenden Wassergehaltes durch die Plastizitätsgrenze und in Richtung zunehmenden Wassergehaltes durch die Fließgrenze begrenzt. Die Plastizitätsgrenze liegt beim Übergang vom plastischen zum festen Zustand, d. h. bei dem Wassergehalt, bei welchem die Wasserfilme, welche die Körner umgeben, vollständig adsorbiert sind: die Kohäsion ist dann hoch, eine Deformation durch zusammenhängendes gegenseitiges Abgleiten der Teilchen ist aber nicht mehr möglich. Die Fließgrenze liegt beim Übergang vom plastischen zum flüssigen Zustand, d. h. bei dem Wassergehalt, oberhalb dessen der Ton sich unter dem Einfluß des Eigengewichts allein wie eine Flüssigkeit ausbreitet.

Der Begriff der Konsistenz wird nun, wie gesagt, bei der Kennzeichnung von plastischen Substanzen verwendet. Er bezieht sich auf das Widerstandsvermögen des Stoffes gegenüber der plastischen Deformation.

Es ist allgemein üblich, die Konsistenz mit Hilfe bestimmter Bezeichnungen anzugeben. So wird für einen bestimmten Ton, beginnend beim geringsten Zusammenhaltsvermögen und mit abnehmendem Wassergehalt, von «zähflüssiger», «sehr weicher», «weicher», «mittelsteifer», «steifer», «halbfester» und «fester» Konsistenz gesprochen, um nur eine der gebräuchlichen Terminologien zu erwähnen. Dabei liegt beim Übergang von der zähflüssigen zur sehr weichen Konsistenz die obere, und beim Übergang von der steifen zur halbfesten Konsistenz die untere Grenze des Plastizitätsbereiches. Da die verschiedenen Tone an den Grenzen des Plastizitätsbereiches annähernd das gleiche Widerstandsvermögen gegenüber deformierenden Kräften aufweisen, ist in der qualitativen Kennzeichnung der Konsistenz mittels den erwähnten Bezeichnungen implizite eine quantitative Angabe über dieses Widerstandsvermögen enthalten.

Für die Charakterisierung von Frischbetonmischungen werden ebenfalls gewisse Konsistenzbezeichnungen verwendet, indem jeweils von «erdfeuchter», «steifplastischer», «plastischer», «weichplastischer» und «gießfähiger» Konsistenz gesprochen wird. Diese Bezeichnungen wurden eingeführt unter der Voraussetzung, daß die Betonmischungen innerhalb eines gewissen Wassergehaltsbereiches effektiv plastisch sind. Da das plastische Verhalten durch die feinsten Körnungen bestimmt wird, ist das aber nur bei genügender Zement-

dosierung oder entsprechend erhöhtem Feinstsandanteil der Fall. Es kommt deshalb vor, daß die gleichen Konsistenzbezeichnungen für Betonmischungen verwendet werden, die infolge Verschiedenheiten in ihrem Kornaufbau gar nicht annähernd gleiche Widerstandsvmögen aufweisen können, und die insbesondere im Extremfall überhaupt kein plastisches Verhalten aufweisen.

Durch die Konsistenzangabe wird in der Betontechnologie im Grunde genommen lediglich der Befeuchtungsgrad bezeichnet, d. h. das Verhältnis des Wassergehaltes zur totalen inneren Oberfläche des Sandkies- und Zementmaterials. Insbesondere betreffen die Wasseranspruchsgesetze den Befeuchtungsgrad, obschon sie sich dem Wortlaut nach auf die Konsistenz beziehen.

Dies sei am Beispiel der Wasseranspruchformel von Bolomey dargelegt. Einem Aufsatz von Bolomey («Baukontrolle im Beton und Eisenbeton» – Schweizerische Bauzeitung, 29. 8. 1931) ist nachfolgender Abschnitt entnommen:

«Die zu einer gegebenen granulometrischen Zusammensetzung gehörende Anmachwassermenge kann aus folgender Formel berechnet werden:

$$W = \Sigma w = \sum \frac{pN}{\sqrt[3]{d^2}} \quad (1)$$

w ist das Gewicht des Anmachwassers (in kg), das benötigt wird für das Anmachen des Gewichtes p desjenigen Zuschlagstoffes (Kieses oder Sandes), dessen mittlerer Korndurchmesser d mm beträgt; d ist also der mittlere Korndurchmesser ($\sqrt{d_{\max} \cdot d_{\min}}$) einer Kiessandkomponente, $W = \Sigma w$ das Gesamtgewicht des Anmachwassers, das dem Gewicht Σp des betrachteten Kiessandgemisches entspricht. N ist ein vom spezifischen Gewicht des das Kiessandgemisch bildenden Gesteins, der Rauigkeit der Oberflächen und dem Flüssigkeitsgrad des Betons abhängiger Koeffizient. Für ein Gestein vom spezifischen Gewicht von rund 2,65 hat N folgende Werte:

	Abgerundete Körner (Geschiebe)	Scharfkantige Körner (gebroch. Material)
Erdfeuchter Beton $N =$	0,085	0,100
Plastischer Beton $N =$	0,095	0,120
Gußbeton $N =$	0,110	0,140

Diese Tabelle zeigt den Einfluß der Konsistenz und der Oberflächenbeschaffenheit auf die Menge des Anmachwassers.»

Im Wortlaut des vorstehend zitierten Abschnittes ist implizite die Gleichsetzung von Konsistenz und Befeuchtungsgrad enthalten. Liegt nämlich zum Beispiel eine bestimmte granulometrische Zusammensetzung vor, und will man

deren Wasseranspruch für eine bestimmte Konsistenz (z. B. für plastische Konsistenz) nach Bolomey bestimmen, so wird der entsprechende N -Wert verwendet und die Summenbildung nach Formel (1) vorgenommen, welche sich nun eben auf die Befeuchtung des Korngemisches bezieht.

Dazu ist zu bemerken, daß die oben angegebene Definition des Befeuchtungsgrades als Verhältnis des Wassergehaltes zur totalen inneren Oberfläche des Sandkies- und Zementmaterials nicht genau stimmt. Wenn nämlich die zur Befeuchtung eines Korngemisches erforderliche Wassermenge wohl im gleichen Sinne variiert wie die gesamte zu benetzende Oberfläche, so ist sie jedoch, wie es sich aus der empirischen Wasseranspruchsformel von Bolomey ergibt, nicht direkt proportional dieser Oberfläche.

Nach Bolomey ist die zur Benetzung einer bestimmten Menge einer Kornfraktion erforderliche Wassermenge umgekehrt proportional dem mittleren Korndurchmesser in der Potenz $\frac{2}{3}$. Die Größe der zu benetzenden Oberfläche pro Gewichtseinheit (spezifische Oberfläche) ist aber umgekehrt proportional dem mittleren Korndurchmesser in der ersten Potenz. Bei abnehmendem Korndurchmesser wächst folglich die für die Befeuchtung erforderliche Wassermenge in geringerem Maße als die zu benetzende Oberfläche.

Die Wasseranspruchsformel von Bolomey ist nicht mehr gültig, wenn der Korndurchmesser unter 0,1 mm sinkt, d. h. insbesondere nicht für den Zement. Tatsächlich ist das Zusammentreten von Zement und Wasser von kolloidalen Erscheinungen begleitet, die sich zum Teil wesentlich von der gewöhnlichen Benetzung unterscheiden (Flockenbildungen, Gelbildungen mit nachfolgender Synerese), was zur Folge hat, daß der Wasseranspruch des Zements für eine bestimmte Konsistenz wesentlich geringer ist als der, welcher sich aus der Formel von Bolomey durch Einsetzen des mittleren Korndurchmessers des Zements ergeben würde. Erfahrungsgemäß liegt der Wasseranspruch des Zements für plastische Konsistenz zwischen 20 und 25 Gewichtsprozenten, was nach der Formel von Bolomey einem mittleren Korndurchmesser von 0,3 mm entsprechen würde.

Die in den Wasseranspruchsgesetzen implizite enthaltene Gleichsetzung von Befeuchtungsgrad und Konsistenz ist dann gerechtfertigt, wenn die in Frage kommenden Korngemische so aufgebaut sind, daß sie ein plastisches Verhalten ergeben können. In der Zeit, aus der die Wasseranspruchsgesetze stammen, war dies nun effektiv vorwiegend der Fall, so daß z. B. Bolomey zur Ermittlung der Zahlenwerte für seinen Konsistenz-Koeffizienten sich des Ausbreitversuches bedienen konnte, indem die von ihm untersuchten Mischungen sich auf dem Ausbreittisch durchwegs plastisch deformierten. Das Ausbreitmaß konnte deshalb als Maß für die Konsistenz im wahren Sinne des Wortes, nämlich als Widerstandsvermögen gegen die plastische Deformation, betrachtet werden. Heute ist dies infolge der Einführung der Vibration, welche zur Ver-

wendung von sehr harschen und trockenen Mischungen führt, nicht mehr der Fall. (Siehe Kapitel III, Abschnitt B.)

Was die Gleichsetzung von Konsistenz und Verarbeitbarkeit betrifft, so wäre diese gerechtfertigt unter der doppelten Voraussetzung, daß der Kornaufbau ein plastisches Verhalten erlauben würde und daß die Verarbeitung effektiv vorwiegend in der Ausführung von plastischen Formänderungen bestünde. Dies ist nun offensichtlich im hier zur Diskussion stehenden Fall der Betonverdichtung durch Vibration nicht der Fall. Es sollen im folgenden Abschnitt die Beziehungen zwischen Konsistenz und Verdichtbarkeit an Hand der eigenen Versuchsergebnisse, unter Zuhilfenahme der Wasseranspruchsformel von Bolomey, untersucht werden.

b) Beziehungen zwischen Konsistenz und Verdichtbarkeit der untersuchten Mischungen

Um den Vergleich zwischen Konsistenz und Verdichtbarkeit der untersuchten Mischungen durchzuführen, wurde folgendermaßen vorgegangen:

Die Kurve der spezifischen Verdichtungsarbeit bei 7,5% Porengehalt für die Zusammensetzung A-100:15 (siehe Figur 28) wurde als Bezugskurve betrachtet. Für zwei Mischungen dieser Zusammensetzung mit den Wassergehalten 5,22% bzw. 6,19% wurden die Konsistenzen nach Bolomey berechnet (Ermittlung des Konsistenzkoeffizienten N und der Anmachwassermenge für den Zement in Bruchteilen des Zementgewichtes), wonach dann für die fünf übrigen Zusammensetzungen jeweils diejenigen zwei Wassergehalte berechnet wurden, welche diesen Zusammensetzungen die Konsistenzen der beiden Bezugsmischungen verleihen.

Der Gang dieser Berechnungen ist im einzelnen der folgende:

Ermittlung der Konsistenzkoeffizienten für die beiden Bezugsmischungen A-100:15 - w = 5,22% und 6,19%:

- KS = Gewicht des Kiessandes in 10 Liter absoluten Volumens Beton
- Z = Gewicht des Zementes in 10 Liter absoluten Volumens Beton
- W = Gewicht des Wassers in 10 Liter absoluten Volumens Beton
- $W = W_{KS} + W_Z$ $\left\{ \begin{array}{l} W_{KS} = \text{Wasser zur Befeuchtung des Kiessandes} \\ W_Z = \text{Wasser zur Befeuchtung des Zementes} \end{array} \right.$
- p' = Prozentualer Anteil einer Kornfraktion (zwischen d_{\min} und d_{\max}) im Kiessandgemisch.

Nach Bolomey ist:

$$W = W_{KS} + W_Z = \sum \frac{(p' \cdot KS/100) \cdot N}{\sqrt{d_{\min} \cdot d_{\max}}} + M \cdot Z \quad (2)$$

Durch die Größe der Koeffizienten N und M wird, bei gegebenen Zuschlagstoffen und gegebener Zementsorte, die Konsistenz charakterisiert.

Der Ausdruck $\sum \frac{P'}{3\sqrt{d_{\min} \cdot d_{\max}}}$ ergibt für die Kiessandzusammensetzungen A und R die Werte 46,54 und 55,9.

Die Gleichung (2) ist für die nässere der beiden Bezugsmischungen ($w = 6,19\%$) erfüllt, wenn man für N den Wert 0,09 und für M 0,2 einsetzt. Nach den Angaben von Bolomey entsprechen diese Werte einer steifplastischen Konsistenz.

Reduziert man die Werte von N und M im gleichen Verhältnis auf 0,075 und 0,167, so ist die Gleichung (2) für die trockenere der beiden Bezugsmischungen ($w = 5,22\%$) erfüllt.

Berechnung der Wassergehalte, welche den 5 übrigen Zusammensetzungen die Konsistenzen der beiden Bezugsmischungen verleihen:

Die Berechnung des Wassergehaltes erfolgt jeweils mittels einer Volumengleichung. Als Beispiel sei die Berechnung für die Zusammensetzung R-100:15 und die nässere der beiden Konsistenzen angegeben:

$$\begin{aligned}
 10 \text{ Liter abs. Vol.-Bet.} &= \underbrace{\frac{0,49 \cdot KS}{2,67}}_{\text{Abs. Vol. Sl.}} + \underbrace{\frac{0,51 \cdot KS}{2,70}}_{\text{Abs. Vol. Ks.}} + \underbrace{\frac{0,15 \cdot KS}{3,12}}_{\text{Abs. V. Z.}} + \\
 &+ \underbrace{0,09 \cdot 55,9 \cdot KS/100}_{W_{KS}} + \underbrace{0,2 \cdot 0,15 \cdot KS}_{W_Z}
 \end{aligned}$$

Daraus ergibt sich:

$$\begin{aligned}
 10 &= 0,5014 \cdot KS ; KS = 19,93 \text{ kg} \\
 &Z = 2,99 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

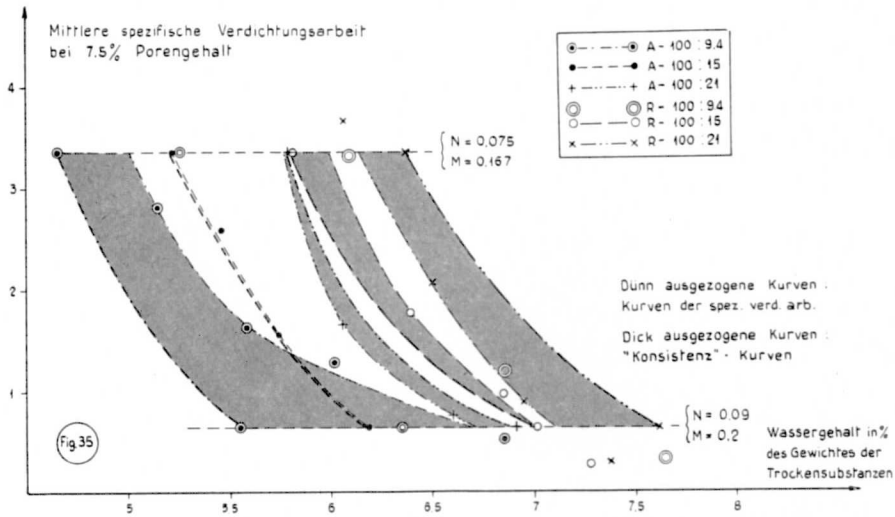
$$\text{Gewicht der Trockensubst.} = 22,92 \text{ kg}$$

$$W = 0,09 \cdot 55,9 \cdot 19,93/100 + 0,2 \cdot 2,99 = 1,61 \text{ Liter}$$

$$w\% = 1,61/22,92 \cdot 100 = 7,02\%$$

Die auf diese Weise berechneten Wassergehalte wurden in Figur 35, welche die Kurven der spezifischen Verdichtungsarbeit bei 7,5% Porengehalt in Funktion des Wassergehaltes enthält (dünn ausgezogene Kurven), zu den Ordinaten 0,63 und 3,36 (spezifische Verdichtungsarbeiten der beiden Bezugsmischungen) als Abszissen aufgetragen, und die erhaltenen Punkte für jede der sechs Zusammensetzungen durch eine Kurve verbunden. (Dick ausgezogene Kurven.) Auf den dick ausgezogenen Kurven entsprechen gleichen Ordinatenwerten gleiche Befeuchtungsgrade, und sie können als Kurven der «Konsistenz» in Funktion des Wassergehaltes betrachtet werden, sofern man annimmt, daß es möglich ist, für die «Konsistenz» einen solchen Maßstab zu wählen, daß «Konsistenz» und spezifische Verdichtungsarbeit für die Zusammensetzung A-100:15 zusammenfallen.

An Hand der Kurvenschar in Figur 35 können nun die Beziehungen zwischen der «Konsistenz» und der Verdichtbarkeit der untersuchten Zusammensetzungen ermittelt werden.



Was die sandärmeren Zusammensetzungen betrifft (A), zeigt sich folgendes: Die Kurven der spezifischen Verdichtungsarbeit und der Konsistenz der Zusammensetzung A-100:21 liegen sehr nahe beieinander: dies bedeutet, daß beim Übergang von der Dosierung PC 300 (A-100:15) zur Dosierung PC 400 (A-100:21) zur Aufrechterhaltung der Verdichtbarkeit derselbe Wasserzusatz erforderlich ist wie zur Beibehaltung des Befeuchtungsgrades. Anders liegen die Verhältnisse beim Übergang von der Dosierung PC 300 zur Dosierung PC 200 (A-100:9,4). Die Kurve der spezifischen Verdichtungsarbeit der Zusammensetzung A-100:9,4 liegt deutlich im Bereich höherer Wassergehalte als diejenige der Konsistenz: dies bedeutet, daß es zur Erzielung derselben Verdichtbarkeit wie für die Zusammensetzung A-100:15 mehr Wasser braucht als für die Einhaltung desselben Befeuchtungsgrades.

Was die sandreicheren Zusammensetzungen betrifft (R), ist zunächst zu bemerken, daß die Konsistenz- und Verdichtbarkeitskurven für die Zusammensetzung R-100:9,4 nicht ausgezogen wurden, um das Bild nicht zu überlasten. Die einzelnen Werte sind aber als Punkte markiert. Aus Figur 35 ist ersichtlich, daß, ausgehend von der Zusammensetzung A-100:15, die Zusammensetzung R-100:15 relativ mehr und die Zusammensetzung R-100:21 relativ weniger Wasser zur Erzielung derselben Verdichtbarkeit erfordert, als zur Erhaltung desselben Befeuchtungsgrades notwendig ist (siehe die ersten zwei schattierten Flächen rechts). Vergleicht man die drei sandreicheren Zusammensetzungen unter sich, so braucht es zur Erzielung derselben Verdichtbarkeit für die schwach dosierte Zusammensetzung R-100:9,4 (PC 200) mehr Wasser als für die mitteldosierte R-100:15 (PC 300). Beim Übergang von der Dosie-

rung PC 300 zur Dosierung PC 400 (R-100:21) ist der zur Erhaltung der Verdichtbarkeit erforderliche Wasserzusatz geringer als der, welcher zur Erhaltung der Konsistenz notwendig ist.

Zur Erklärung dieser auf den ersten Blick zum Teil paradoxen Resultate sollen wieder die Werte der Luftgehalte im Zeitpunkt des Wasserziehens zu Hilfe gezogen werden (siehe Figur 33). Es besteht für die untersuchten Zusammensetzungen ein Minimum des verbleibenden Porengehaltes, und zwar bei etwas mehr als 3%, einem Wert, welcher sich im Mittel mit geringen Abweichungen für die Mischungen A-100:15, R-100:21 und A-100:21 ergibt, unabhängig von der Konsistenz. Die Mischungen R-100:15, A-100:9,4 und R-100:9,4 ergeben zunehmend höhere Luftgehalte beim Wasserziehen.

Dazu ist folgendes zu bemerken. Im Inneren einer in Vibration versetzten Betonmasse erfolgt infolge der Aufhebung der inneren Reibung, einerseits eine Relativverschiebung der Körner bis zu ihrer dichten Lagerung, und andererseits ein Aufstieg der leichtesten Bestandteile, nämlich des Feinmörtels (siehe Figur 36).

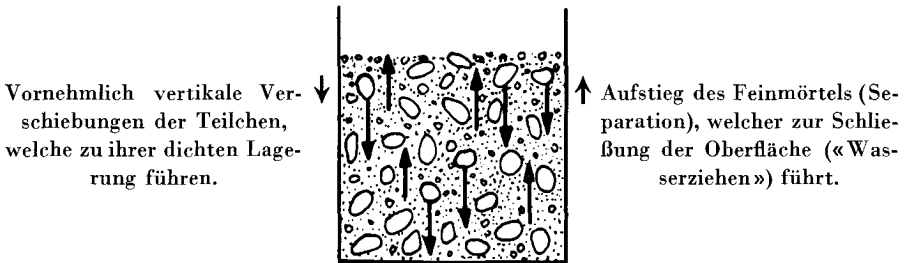


Fig. 36: Schematische Darstellung des Verdichtungs Vorganges durch Vibration.

In einem bestimmten Stadium des Verdichtungs Vorganges gelangt der Feinmörtel zur Ausfüllung der Hohlräume an der Oberfläche des Betons, welcher dann, wie man sagt, «Wasser zieht». Eigentlich müßten im Augenblick des Wasserziehens, bei der hier zur Diskussion stehenden Vibration auf einem Vibrationstisch, welche eine von unten nach oben fortschreitende Betonverflüssigung mit sich bringt, alle Hohlräume ausgefüllt sein. Dies ist aber nur bis zu einem gewissen Grad der Fall, indem sich eben je nach der Trockenzusammensetzung gewisse systematische Unterschiede im verbleibenden Luftgehalt im Augenblick des Wasserziehens einstellen.

Diese Unterschiede können erklärt werden, wenn man sich gewissermaßen einen zeitlichen Wettstreit zwischen der Verdichtung (Vertikalbewegung der Teilchen) und der Separation (Feinmörtelaufstieg) vorstellt (siehe Figur 36). Je leichter die Separation des Wassers und des Feinmörtels im Laufe der Ver-

dichtung erfolgen kann, desto weniger weit wird die Verdichtung im Augenblick des Wasserziehens vorgeschritten sein.

Hält man sich nun den Aufbau des Frischbetons vor Augen, so erkennt man, daß es in erster Linie der Zement ist, welcher das Homogenbleiben der Masse im Laufe des Verdichtungs Vorganges zu gewährleisten hat, insbesondere was die Festhaltung des Wassers im Inneren der vibrierenden Masse betrifft. Als feinste Körnung hat der Zement weitaus die größte Oberflächenwirkung, ganz abgesehen von den unter Umständen auftretenden kolloidalen Erscheinungen, welche zu einer noch stärkeren Bindung des Wassers führen. Nach den neueren, in der Betontechnologie herrschenden Auffassungen sollte zwischen dem Zement und dem Feinsand eine eigentliche «Ausfallkörnung» liegen, in dem Sinne, daß das Feinstkorn des Sandes bei etwa 0,4 mm liegen würde. In der Zusammensetzung der hier zur Diskussion stehenden Betonmischungen ist dieser Auffassung schon weitgehend Rechnung getragen, indem das Minimal Korn des Sandes bei 0,2 mm liegt, während man als Maximal Korn des Zements etwa 0,08 mm betrachten kann. Bei einer derartigen Kornabstufung zwischen Zement und Feinsand muß die überragende Bedeutung des Zements als homogenisierendes und schmierendes Element im Zusammenhang mit dem Wasser besonders deutlich zum Ausdruck gelangen.

In Figur 33 ist für jede der sechs untersuchten Zusammensetzungen der prozentuale Gewichtsanteil des Zements in der Trockenzusammensetzung des Mörtels angegeben (eingekreiste Zahlen). Bei einem Zementgehalt von 30% und mehr ergibt sich der für die untersuchten Zusammensetzungen minimale Porengehalt, während der im Zeitpunkt des Wasserziehens verbleibende Porengehalt entsprechend dem Abnehmen des Zementanteils zunimmt, sobald dieser unter 30% liegt.

Bei einer Mörtelzusammensetzung mit 70% Sand und 30% Zement ist somit die für den betreffenden Sand bestmögliche Wasserbindung erreicht, in dem Sinn nämlich, daß diese bei erhöhtem Zementgehalt wohl erhalten bleibt, nicht aber verbessert werden kann. Mit anderen Worten scheint der Zementanteil im Mörtel mindestens 30% betragen zu müssen, damit die Homogenität im Laufe des Verdichtungs Vorganges so gut erhalten bleibt, als dies bei der Natur des verwendeten Sandes und Zements und beim verwendeten Vibrationstyp überhaupt möglich ist.

In Anlehnung an die Betrachtungen, die in den schwedischen Publikationen über Messungen mit dem Deformabilitätsmesser zu finden sind (siehe Kapitel I, Abschnitt E 3), können die Mörtelzusammensetzungen, welche den minimalen Luftgehalt beim Wasserziehen ergeben, als «stabil» bezeichnet werden. (Der Begriff der Stabilität wird in den schwedischen Publikationen auf die Fähigkeit von Frischbetonmischungen, ihre Homogenität im Laufe der Vibration

zu bewahren, bezogen.) Die Mörtelzusammensetzung mit 30% Zement würde somit die niedrigst dosierte stabile Zusammensetzung darstellen.

Die Zurückführung der Unterschiede im Luftgehalt beim Wasserziehen auf Unterschiede in der Zusammensetzung des Mörtels allein ergab sich zwangsläufig aus den Werten des Luftgehaltes, da diese Werte eben eine Abstufung nach dem Zementanteil im Mörtel zeigen, unabhängig vom Mörtelanteil im Beton. Es ist dies auch sehr plausibel, da ja die Oberflächenwirkung der Kieskörner bei der Wasserbindung bestimmt nicht ins Gewicht fällt, um so mehr als bei den untersuchten Zusammensetzungen zwischen Sand und Kies eine deutliche Abstufung in der Korngröße besteht (Ausfallkörnung von 5–15 mm).

Nicht ganz plausibel ist auf den ersten Blick eher die Tatsache, daß der Luftgehalt beim Wasserziehen für eine bestimmte Betonzusammensetzung mit dem Wassergehalt wenig variiert, und für die stabilen Zusammensetzungen sogar nahezu konstant bleibt. Da aber bei der Vibration durch eine Erhöhung des Wassergehaltes, sowohl die Separationstendenz, als auch die innere Beweglichkeit erhöht wird, kann man sich sehr wohl vorstellen, daß das Nachhinken der vollkommenen Verdichtung hinter der Schließung der Oberfläche durch den Feinmörtel denselben Endeffekt ergeben kann (d. h. denselben verbleibenden Luftgehalt beim Wasserziehen), welches auch der Befeuchtungsgrad sein mag.

Im Hinblick auf die Diskussion der Beziehungen zwischen Verdichtbarkeit und Konsistenz, stellt sich nun die Frage, wie sich die mehr oder weniger gute Wasserbindung im Innern einer vibrierenden Betonmasse auf die Verdichtbarkeit der Mischungen auswirken muß.

In Mischungen, deren Zementgehalt im Mörtel kleiner ist als der für die Erreichung des minimalen Luftgehaltes erforderliche, erfolgt, wie gesagt, eine relativ leichtere Loslösung des Schmiermittels. In dem Maße wie der Feinmörtel aufsteigt wird aber die Schmierwirkung verringert, was sich in einer verminderten Verdichtbarkeit ausdrücken muß. Es ist deshalb anzunehmen, daß Zusammensetzungen, deren Zementgehalte über dem Minimalen für eine stabile Mörtelzusammensetzung liegen, dann dieselbe Verdichtbarkeit aufweisen werden, wenn ihre Wassergehalte dieselbe Befeuchtung des Kiessand- und Zementgemisches ergeben, während hingegen eine unstabile Zusammensetzung, im Vergleich mit einer stabilen, für die Verdichtung eine relativ größere Wassermenge erfordern wird als für die Befeuchtung, da der Verlust an Schmierwirkung im Laufe des Verdichtungsvorganges kompensiert werden muß.

Betrachtet man nun wieder die Kurvenschar in Figur 35, so entspricht der Verlauf der Konsistenzkurven und der Kurven der spezifischen Verdichtungsarbeit der sandärmeren Zusammensetzungen genau diesen Annahmen. Tatsächlich liegen die Kurven der spezifischen Verdichtungsarbeit und der Konsistenz für die Zusammensetzung A-100:21 sehr nahe beieinander, während für die unstabile Zusammensetzung A-100:9,4 die Kurve der spezifischen Verdich-

tungsarbeit deutlich im Bereich höherer Wassergehalte liegt als diejenige der Konsistenz.

Was die sandreicheren Zusammensetzungen betrifft, so wäre zu erwarten gewesen, daß die zwei Kurven für die Zusammensetzung R-100:21 näher zusammenliegen würden als dies in der Figur der Fall ist. Die gegenseitige Lage der Kurven für die drei Zementdosierungen entspricht gut den gemachten Annahmen. Die Kurven der spezifischen Verdichtungsarbeit der Zusammensetzungen R-100:15 (PC 300) und R-100:21 (PC 400) liegen viel näher beieinander als die entsprechenden Konsistenzkurven. Dies entspricht der Annahme einer relativ schwächeren Wasserbindung in der niedriger dosierten Zusammensetzung (Zementanteil im Mörtel = 25% < 30%): der Wasserzusatz, der beim Übergang von der Dosierung PC 300 zur Dosierung PC 400 zur Beibehaltung der Verdichtbarkeit erforderlich ist, ist kleiner als die für die Befuchtung der zusätzlichen Zementquantität notwendige Wassermenge, da ja durch die Erhöhung der Zementdosierung der Übergang von einer unstabilen zu einer stabilen Zusammensetzung bewirkt wird. Die Unstabilität der Zusammensetzung R-100:9,4 (Zementanteil im Mörtel = 17%) kommt sehr deutlich zum Ausdruck, indem diese Zusammensetzung für eine bestimmte Verdichtbarkeit annähernd dieselbe Wassermenge erfordert wie die hochdosierte Zusammensetzung R-100:21.

c) Praktische Bedeutung des minimalen Zementgehaltes im Mörtel. Methode von Vallette

Die Erkenntnis, daß für einen Mörtel, der aus einem bestimmten Sand und einem bestimmten Zement aufgebaut ist, offenbar ein bestimmter Wert des Zementgehaltes existiert, der nicht unterschritten werden kann, ohne daß die Separationstendenz zum Nachteil der Verdichtbarkeit begünstigt wird, verdient Beachtung.

Der Schmiermittelaufstieg, welcher in «unstabilen» Mischungen relativ leichter erfolgt als in «stabilen», beeinträchtigt nämlich nicht nur die Verdichtbarkeit, sondern ebenso sehr die Qualitätseigenschaften des erhärteten Betons.

Hält man sich den Erhärtungsprozeß des Zements vor Augen, welcher zur Bildung eines die inerten Körnungen umgebenden und verbindenden dichten Kristallgefüges führt, so ist es selbstverständlich, daß die Gefügebildung um so besser ist, je regelmäßiger der Zementbrei im Innern des Korngemenges verteilt ist. Ein übermäßiger Feinmörtelaufstieg bedeutet somit immer eine Beeinträchtigung der Betonqualität. Besonders ungünstige Folgen hat die Feinmörtelabsonderung dann, wenn dem Abnutzungswiderstand der Betonoberfläche eine große Bedeutung zukommt, wie dies bei Straßen- und Flugpistenbelägen der Fall ist. Hier kann eine übermäßige Feinmörtelanreicherung an der Oberfläche die Dauerhaftigkeit des Belages gefährden.

Im Zusammenhang mit dem Begriff des minimaldosierten stabilen Mörtels sei hier auf eine neuere Methode zur Ermittlung von Betonzusammensetzungen ausgehend von gegebenen Zuschlagstoffkomponenten hingewiesen, nämlich auf die *Methode von Vallette*. Diese unterscheidet sich grundsätzlich von den klassischen granulometrischen Theorien und hat in Frankreich einen bedeutenden Anklang gefunden. Es sei hier nur ganz kurz das Wesentliche angedeutet. Die Methode beruht auf einem stufenweisen Aufbau der Betonzusammensetzungen, ohne Berücksichtigung irgendeiner vorgeschriebenen Siebkurvenform: es wird auf dem Versuchswege zunächst der minimaldosierte Mörtel und in einer zweiten Phase dann der Beton mit minimalem Mörtelgehalt ermittelt. Als Kriterium gilt dabei in erster Linie die dichte Raumauffüllung, zusammen mit einer gefühlsmäßigen Beurteilung der Verarbeitbarkeit.

Die Verdichtbarkeitsmessung nach der verbesserten Methode von Fritsch bietet die Möglichkeit, auf dem Wege der Bestimmung des verbleibenden Luftgehaltes beim Wasserziehen, den Wert des nicht zu unterschreitenden Zementgehaltes im Mörtel zu ermitteln. Das erste und wichtigste Problem, das sich bei der Betonbildung nach Vallette stellt, würde somit auf einem anderen Wege gelöst als ihn der Verfasser der Methode vorschlägt, wobei das Ergebnis wohl dasselbe sein dürfte.

Es ist zu bemerken, daß die Theorie von Vallette auf der Voraussetzung der Verwendung von Ausfallkörnungen beruht. Es herrscht in der Betontechnologie heute allgemein die Auffassung, daß der unetstetige Kornaufbau eine etwas bessere Gewähr für eine gute Betonqualität bietet als der stetige, und zwar im wesentlichen aus den zwei folgenden Gründen. Bei Verwendung von Korngruppen, die in der Größe deutlich gegeneinander abgestuft sind, kann jede Fraktion die Hohlräume im Gerippe der nächstgrößeren Fraktion ausfüllen, ohne dasselbe auszuweiten, wobei der «Wandeffekt» (*effet de paroi*), d. h. die Wandreibung, auf ein Minimum reduziert ist. Ferner ist die Konstanz der granulometrischen Verteilung im Inneren der Masse besser gewährleistet, weil die Anzahl der Variablen reduziert ist. Als einziger Nachteil der Ausfallkörnungen ist die etwas leichtere Entmischbarkeit zu erwähnen, indem nämlich bei einem stetigen Kornaufbau die Anwesenheit der mittleren Körnungen das Loslösen der groben Körner aus der Mischung behindert.

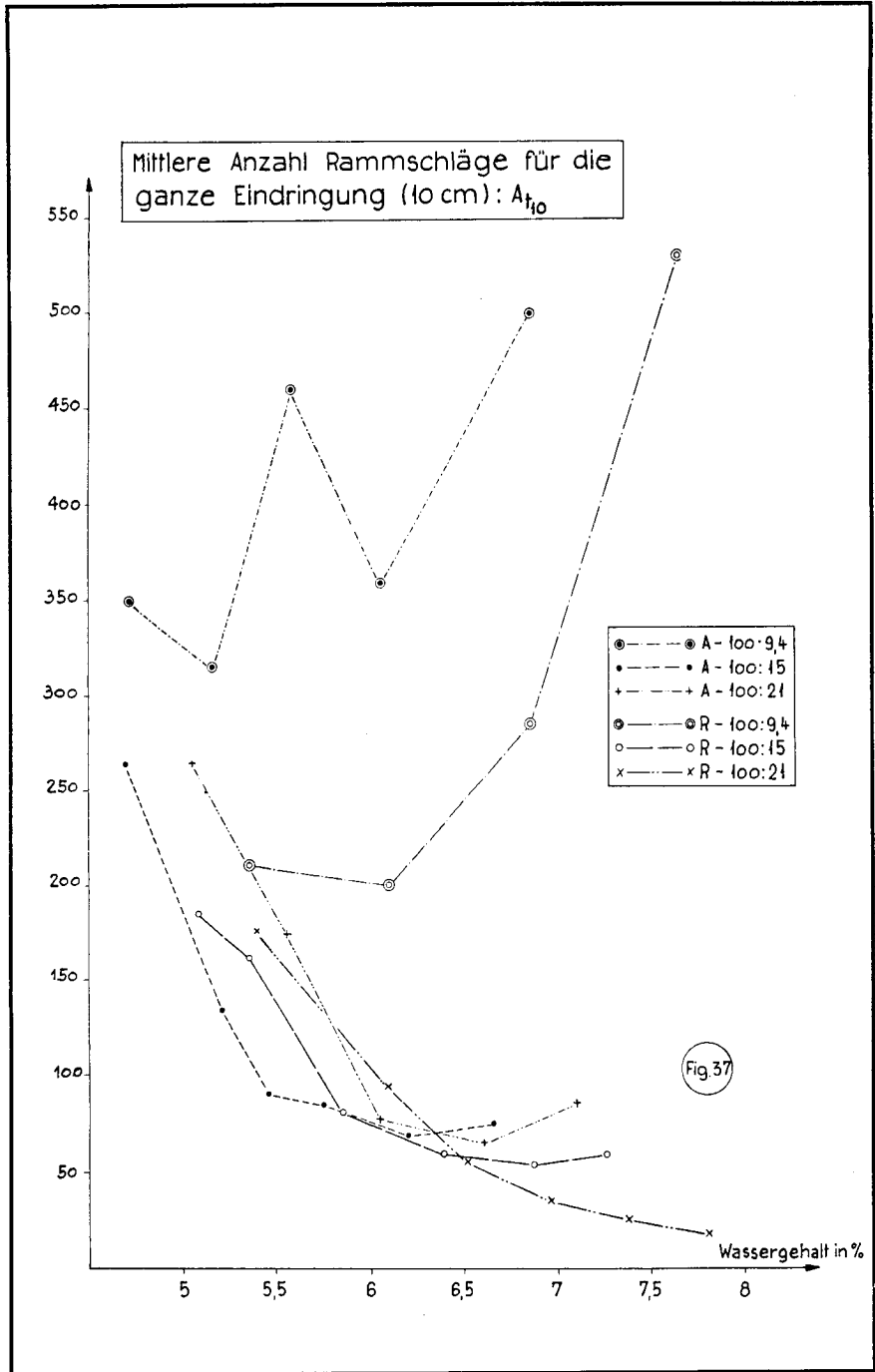
4. Diskussion der Resultate des Eindringversuches

Bei den in diesem Kapitel beschriebenen Versuchen wurde anschließend an die Aufnahme der Setzungskurve jeweils an der übervibrierten Probe der Eindringversuch nach Humm ausgeführt (siehe Beschreibung der Methode in Kapitel IV). Es lag die Vermutung nahe, daß sich dadurch die Möglichkeit zu einer zusätzlichen Kennzeichnung der Mischungen hinsichtlich ihrer Tendenz zur Separation ergeben würde.

Leider ließ sich aber aus den erhaltenen Ergebnissen keine praktisch anwendbare Methode zur Auswertung der Resultate des Eindringversuches als Ergänzung der Verdichtbarkeitsmessung ableiten. Unter den vorliegenden besonderen Voraussetzungen findet nämlich eine Überlagerung der Einflüsse verschiedener Faktoren statt, welche eine einfache Interpretation der Versuchsergebnisse verunmöglicht.

Einer dieser Faktoren ist wohl die mit der Mörtelzusammensetzung variierende Wasserbindung im Innern der vibrierenden Masse. Dazu kommt aber der Einfluß der oberflächlichen Sandanreicherung, sowie jener der Konsistenz, indem bei der konstanten Vibrationsdauer von einer Minute die Übervibration sich bei hohen Wassergehalten relativ stärker auswirkt als bei niedrigen.

Auf die Wiedergabe der Diskussion der Eindringmessungen wird hier, in Anbetracht der Tatsache, daß sie zu keinem praktisch verwertbaren Ergebnis geführt hat, verzichtet. Die Resultate selber, d. h. die mittleren Schlagzahlen für den ganzen Eindringweg von 10 cm (von 5 bis 15 cm unter der Oberfläche), sind in Figur 37 aufgetragen.



III. Methoden, welche eine zahlenmäßige Erfassung der Entmischbarkeit gestatten

A. EINLEITUNG. GRUNDSÄTZLICHES ÜBER DIE MESSUNG DER TRANSPORTVERARBEITBARKEIT

Die Transportverarbeitbarkeit steht in engem Zusammenhang mit der *Kohäsion* der Frischbetonmischungen. Diese beruht in erster Linie auf Oberflächenkräften, indem im Inneren einer unverdichteten Betonmasse das Wasser in den Hohlräumen, sofern der Luftgehalt innerhalb gewisser Grenzen liegt, zum großen Teil kapillar gebunden ist, und somit eine Korn-zu-Korn-Bindung erzeugt. Diese innere Bindung ist grob gesehen um so stärker, je feinkörniger das Gemenge, da die feinen Körnungen die Kapillaren verkleinern und vermehren. Somit trägt die Feinstkörnung, d. h. der Zement, am stärksten zur Kohäsion bei. Zur kapillaren Bindewirkung kommt beim Zement eine zweite Wirkung hinzu, die auf Strukturbildungen innerhalb des Zementbreis beruht: die Zementkörner sind nämlich nicht unabhängig voneinander im Wasser suspendiert, sondern schließen sich dank gegenseitiger Anziehungskräfte (Flockungskräfte) zu einem Netzwerk zusammen, welches sich durch das ganze Volumen des Zementbreis hindurch erstreckt und zur Kohäsion der Gesamtmasse beiträgt. Die physikalischen Eigenschaften des Zementbreis werden auch durch Schichten von Neubildungen beeinflusst, welche beim Mischen des Betons durch chemische Reaktionen entstehen und die Zementkörner umhüllen. Bis vor kurzem wurde angenommen, daß der Adsorption von Wasser an der Oberfläche der Zementkörner eine große Bedeutung zukomme; neuere Erkenntnisse scheinen aber diese Auffassung zu widerlegen. Die Adsorptionswasserhüllen spielen wohl bei tonigen Böden, die vorwiegend aus kolloidalen Teilchen bestehen (Korndurchmesser $< 2\mu$), eine große Rolle, indem die Kohäsion solcher Böden in erster Linie auf der Scherfestigkeit der Adsorptionshüllen beruht. Beim Zement hingegen schließt schon die Korngröße einen merklichen Einfluß von eventuellen Adsorptionswasserhüllen aus. In den Aufbau des Zementbreis konnte bis heute noch kein umfassender Einblick gewonnen werden. Was hier dargelegt wurde, entspricht den Auffassungen, die sich indirekt aus Untersuchungen über das «Bluten» von Zementbrei ergaben (11).

Die Transportverarbeitbarkeit steht im Zusammenhang mit der Kohäsion, weil sie gewisse Zerfallserscheinungen betrifft, die im Laufe des Betontrans-

portes auftreten, indem sich Teile des Korngemenges aus dem Zusammenhang lösen (Entmischung). Weitaus am häufigsten geschieht dies, wenn der Beton nach dem Aus- oder Umleeren aufprallt, indem dabei bei den einzelnen Körnern Trägheitskräfte ausgelöst werden, die den Bindekräften entgegenwirken. Da die Trägheitskräfte proportional der Masse zunehmen, d. h. mit der dritten Potenz des Korndurchmessers, währenddem die Bindekraft proportional der Kornoberfläche wächst, d. h. mit dem Quadrat des Korndurchmessers, besteht der Zerfall in erster Linie aus einer teilweisen oder völligen Loslösung der größten Körner aus dem Zusammenhang.

Die Transportverarbeitbarkeit einer Mischung kann also durch ihre Entmischbarkeit gekennzeichnet werden, eine Eigenschaft, die allerdings kaum genau definierbar ist, und die auch nicht direkt gemessen werden kann:

Zur Beurteilung der Entmischbarkeit muß der Zerfall einer Probe hervorgerufen werden, und dies ist nur möglich mittels einer Beanspruchung, welche gleichzeitig eine Formänderung der Gesamtmasse bewirkt. Betrachtet man z. B. den Aufprall einer frei fallenden Probe auf eine horizontale Unterlage, so hängt die Form der Probe nach dem Aufprall nicht nur vom Grad der erfolgten Entmischung, sondern auch von der Größe der plastischen Ausbreitung der Gesamtmasse ab. An der ausgebreiteten Probe kann somit keine Größe gemessen werden, die mit der Entmischbarkeit allein in Zusammenhang steht.

Für eine bestimmte Betonzusammensetzung wächst die Größe der plastischen Gesamtverformung mit zunehmendem Wassergehalt, weil eine Mischung, solange das Wasser sich nicht absondern kann, um so beweglicher wird, je nasser sie ist. Die Kohäsion hingegen, welche in erster Linie auf Kapillarkräften beruht, ist am größten für einen bestimmten mittleren Wassergehalt, bei dem sich die für die Ausbildung der Oberflächenkräfte günstigste Kornlagerung ergibt. (Durch eine Erhöhung des Wassergehaltes gegenüber dem optimalen wird eine gewisse Überflutung der Hohlräume bewirkt, die zum Teil auch dadurch entsteht, daß sich bei höherem Wassergehalt, infolge der größeren inneren Beweglichkeit, eine dichtere Lagerung der Körnungen ergibt. Die Größe des optimalen Wassergehaltes ist für eine bestimmte Betonzusammensetzung keine Konstante, sondern variiert je nach dem, ob es sich um Mischungen in locker angeschüttetem Zustand handelt, oder um solche, die durch irgendeine äußere Einwirkung schon teilweise verdichtet sind. Bei demselben Wassergehalt ist die Lagerung im zweiten Fall jeweils dichter als im ersten, und die optimale Kapillarkraftwirkung stellt sich schon bei einem niedrigeren Wassergehalt ein.)

Wird nun für eine und dieselbe Betonzusammensetzung bei verschiedenen Wassergehalten eine «Zerfallsmessung» durchgeführt, z. B. durch Aufpralllassen von Proben auf eine Unterlage, so ergibt sich durch Superposition des eigentlichen Zerfalls und der plastischen Ausbreitung der Gesamtmasse die

folgende Abhängigkeit der totalen Ausbreitung vom Wassergehalt: Von einer erdfeuchten Konsistenz ausgehend, bewirkt eine Erhöhung des Wassergehaltes zunächst eine Verminderung der totalen Ausbreitung, weil die Erhöhung der Kohäsion sich stärker auswirkt als die Verbesserung der inneren Beweglichkeit. Im Bereich der optimalen Kohäsion stellt sich ein Minimum der totalen Ausbreitung ein. Dann folgt eine Zunahme der Ausbreitung, da bei weiterer Erhöhung des Wassergehaltes sowohl die Zerfallstendenz als auch die innere Beweglichkeit zunehmen.

Dieses *Minimum der «Totalverformung»* ist nun von den Größen, die sich aus «Zerfallsmessungen» ergeben, die einzige, welche direkt etwas über die Entmischbarkeit aussagt: sie stellt für eine bestimmte Betonzusammensetzung, ein Maß für die Entmischbarkeit im Konsistenzbereich der optimalen Kohäsion dar. Es ist allerdings zu bemerken, daß die Vergleichswerte, die man bei einer solchen Charakterisierung von Betonzusammensetzungen hinsichtlich ihrer Entmischbarkeit erhält, in einem gewissen Maße von der angewandten Prüfmethode abhängig sind, da bei verschiedenen Prüfvorgängen ein verschiedenes Zusammenwirken der Faktoren, welche die Größe der «Totalverformung» bestimmen, erfolgt.

Abgesehen von diesem prinzipiellen Einwand, den man gegen diese zurzeit einzig möglich scheinende Methode zur zahlenmäßigen Erfassung der Entmischbarkeit erheben kann, wird deren praktische Anwendbarkeit leider schon aus rein versuchstechnischen Gründen in Frage gestellt. Zur Charakterisierung einer bestimmten Betonzusammensetzung muß das Minimum der «Totalverformung» ermittelt werden, was eine große Zahl von Messungen erfordert. Einmal müssen verschiedene Wassergehalte im Konsistenzbereich der optimalen Kohäsion verwendet werden, und ferner ist für jeden Wassergehalt die Messung mehrmals zu wiederholen, weil die Streuung bei diesen Versuchen besonders groß ist. Dies bedingt einen Arbeitsaufwand, der sich in Anbetracht der untergeordneten Bedeutung der Entmischbarkeit bei der Frischbetoncharakterisierung wohl nur selten wird verantworten lassen.

Im Kapitel III sind zwei Methoden beschrieben, welche die Ermittlung der Entmischbarkeit nach den soeben dargelegten Grundsätzen gestatten, nämlich *die Methode des Ausbreittisches und die Vebe-Methode mit Kurvenaufnahme*. Es handelt sich um Methoden, die ursprünglich zur Messung der Konsistenz entwickelt wurden, bei denen aber die Betonproben derart beansprucht werden, daß tatsächlich «Zerfallsmessungen», im Sinne wie dieser Ausdruck hier verwendet wurde, vorliegen.

B. DIE AUSBREITPROBE

1. Beschreibung der Apparate. Versuchsgang

Es wird ein Frischbetonkonus auf einem Rütteltisch hergestellt und die Ausbreitung infolge einer bestimmten Anzahl Fallbewegungen gemessen.

Die amerikanischen Normen schreiben die in Figur 1 angegebenen Apparat-Abmessungen vor. Der Durchmesser der ausgebreiteten Probe wird als Mittel von 6 regelmäßig verteilten Messungen bestimmt. Als Ausbreitmaß wird die Durchmesserzunahme in Prozenten des ursprünglichen Durchmessers D_0 angegeben.

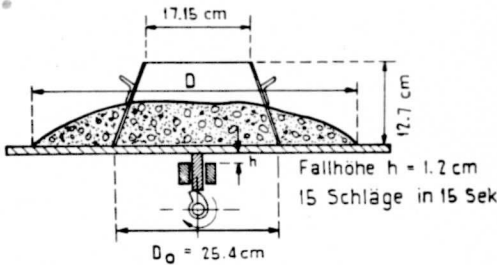


Fig. 1: Ausbreitversuch nach den amerikanischen Normen.

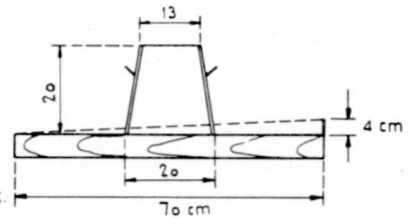
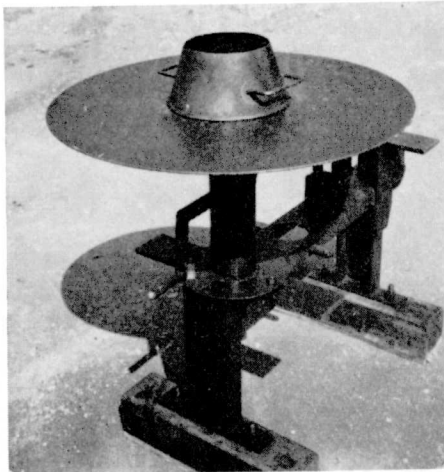


Fig. 2: Ausbreitversuch nach den deutschen Normen.

Der Ausbreittisch nach den deutschen Normen ist in Figur 2 dargestellt. Als Ausbreitmaß wird der Durchmesser der ausgebreiteten Probe (Mittel der Maße in den zwei Hauptrichtungen) angegeben.



In der Schweiz ist es üblich, den Ausbreitversuch mit einem Ausbreittisch nach den deutschen Normen auszuführen, unter Verwendung des Slumpkegels, einer Fallhöhe von 2 cm (anstatt 4 cm) und einer Schlagzahl von 10 (anstatt 15).

Die Versuchsanordnung nach den amerikanischen Normen ist wohl die zweckmäßigste, einmal wegen der symmetrischen Fallbewegung, und ferner wegen den Abmessungen des Kegels, weil durch

Fig. 3: Im Laufe eigener Versuche verwendeter Ausbreittisch.

dessen gedrungene Form das Abbrechen des obersten Teiles der Proben vermieden wird.

Für die eigenen Versuche wurde ein Apparat verwendet (siehe Figur 3), dessen Dimensionen den amerikanischen Normen entsprechen, mit einer allerdings etwas leichteren Tischplatte. Auch der Versuchsgang wurde genau den amerikanischen Normen angepaßt.

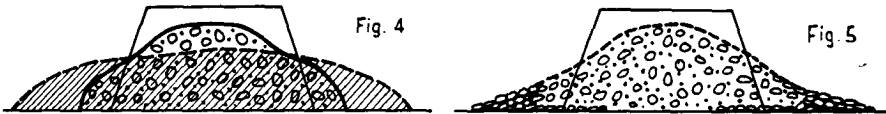
2. Diskussion des Ausbreitversuches

Die Materialprobe wird beim Ausbreitversuch einer bestimmten Anzahl Fallbewegungen unterworfen. Diese lösen einmal Trägheitskräfte bei den einzelnen Körnern aus, und zudem bewirken sie eine dynamische Beanspruchung der Gesamtmasse.

Die Trägheitskräfte, welche die größeren Körner aus dem Zusammenhang zu lösen suchen, wirken sich um so stärker aus, je geringer die Kohäsion der Mischung ist. Eine sehr kohärente Masse (z. B. fetter Beton mit wenig Kies bei mittlerer Befeuchtung) würde auf dem Ausbreittisch eine rein plastische Deformation erleiden, die in einer sukzessiven Ausbreitung der unteren Schichten unter dem Einfluß des statischen und dynamischen Gewichtes der oberen besteht (siehe Figur 4).

Bei der Durchführung des Ausbreitversuches an einem Beton von bestimmter Trockenzusammensetzung, unter Variation des Wassergehaltes in weitesten Grenzen, d. h. vom vollkommen trockenen Zustand bis zur gießfähigen Konsistenz, ergibt sich allgemein das folgende Resultat:

Ohne Wasserzusatz erfolgt reiner Zerfall (siehe Figur 5); die auf der Oberfläche des zusammenbrechenden Haufens abrollenden Kieskörner führen zur



Bildung eines breiten Kiesrandes, wodurch es zu einer beträchtlichen Vergrößerung des Durchmessers kommt. Bei leichter Befeuchtung beginnt sich die Kohäsion auszuwirken; da noch keine merkbare plastische Deformation stattfindet, ergibt sich eine Verkleinerung des Ausbreitmaßes gegenüber der vollkommen trockenen Mischung. Bis zu einem mittleren Befeuchtungsgrad, bei dem die Kohäsion am größten ist, wirkt sich die Abnahme des Zerfalls stärker aus als die Zunahme der plastischen Verformung; somit stellt sich im Konsistenzbereich der optimalen Kohäsion ein *Minimum des Ausbreitmaßes* ein. Bei weiterer Steigerung des Wassergehaltes erfolgt eine Zunahme der Ausbreitung mit der Fluidität der Mischung.

Diese Abhängigkeit des Ausbreitmaßes vom Befeuchtungsgrad für eine bestimmte Betonzusammensetzung ist prinzipiell dieselbe, wie sie in der Einleitung zu diesem Kapitel für «Zerfallsmessungen» ganz allgemein erläutert wurde. Nach den dort angestellten Überlegungen kann also mit Hilfe der Ausbreitprobe eine *Charakterisierung von Betonzusammensetzungen hinsichtlich Entmischbarkeit durch Bestimmung des Minimalwertes des Ausbreitmaßes* erfolgen.

Es stellt dies eine Anwendungsmöglichkeit der Ausbreitprobe dar, die nicht ihrer ursprünglichen Zweckbestimmung entspricht: *die Ausbreitprobe ist als «Konsistenz»-Meßmethode entwickelt worden* und wird als solche heute noch häufig verwendet.

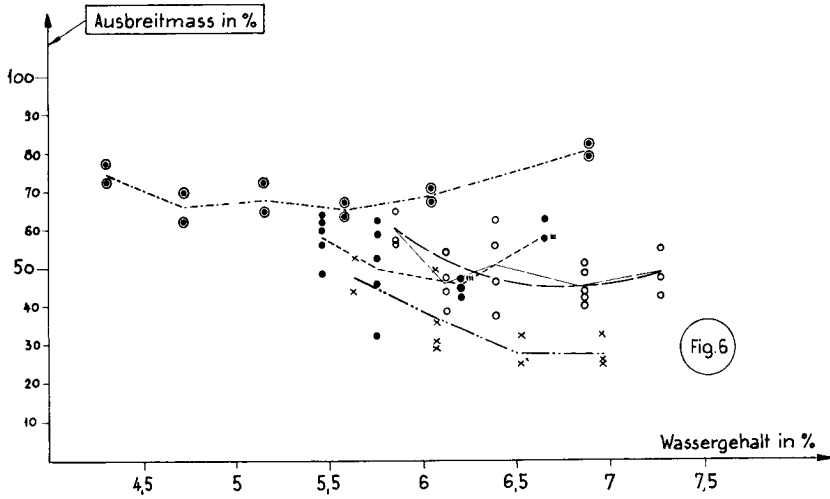
Der Ausbreitversuch ist aber zur Messung der Konsistenz nur geeignet, sofern Mischungen zu prüfen sind, die bei der Ausbreitung eine vornehmlich plastische Deformation ergeben und die ausnahmslos im Konsistenzbereich des aufsteigenden Astes der Kurve des Ausbreitmaßes in Funktion des Wassergehaltes liegen. Dies war vorgängig der Einführung der Vibration normalerweise der Fall, indem allgemein eher feinkörnige und fette Mischungen von plastischer oder gießfähiger Konsistenz verwendet wurden. Die Vibration führt indessen zur Bevorzugung von Betonmischungen, die einmal wegen ihrem geringeren Feinstteilgehalt eine stärkere Zerfallstendenz aufweisen, und die im übrigen in einem deutlich trockeneren Konsistenzbereich liegen. Dies hat zur Folge, daß die Vibrierbetonmischungen sich nicht mehr ausschließlich im Bereich des aufsteigenden Astes der Kurve des Ausbreitmaßes befinden, sondern ebenso häufig in die Zone des absteigenden Astes zu liegen kommen. (Siehe eigene Versuchsergebnisse auf Figuren 6 und 7.)

Unter diesen Umständen kann das Ausbreitmaß keine eindeutige und klare Konsistenzangabe mehr liefern. Hingegen kann die Methode im oben erwähnten Sinne verwendet werden, indem die minimalen Ausbreitmaße für verschiedene Trockenzusammensetzungen nach ihrem optimalen Zusammenhaltsvermögen abgestuft sind.

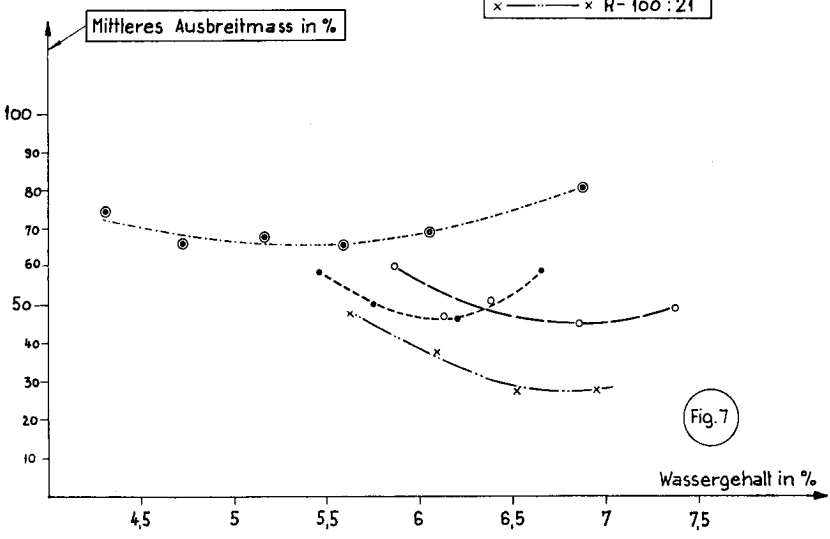
3. Eigene Versuchsergebnisse

In den Figuren 6 (Einzelwerte) und 7 (Mittelwerte) sind die Resultate der Ausbreitversuche mit den vier Mischungen A-100:9,4 (\sim PC 200), A-100:15, R-100:15 (\sim PC 300) und R-100:21 (\sim PC 400) in Funktion des Wassergehaltes aufgetragen. Die Versuche wurden nach den amerikanischen Normen ausgeführt, d. h. mit den aus Figur 1 ersichtlichen Konusabmessungen, einer Fallhöhe von 12 mm ($\sim 1/2''$) und einer Schlagzahl von 15 (1 Schlag/sec). (Siebkurven der Kiessandzusammensetzungen A und R siehe Kapitel II, Abschnitt C).

Es zeigt sich aus Figur 7 eine deutliche Abstufung des Minimalwertes der Ausbreitung nach der Zementdosierung. Dabei sind die zu den Minimalwerten



- ⊙ ——— ⊙ A-100:9,4
- ——— • A-100:15
- ——— ○ R-100:15
- × ——— × R-100:21



gehörenden Wassergehalte um so größer, je feinkörniger die Mischungen, was der Annahme eines und desselben Befeuchtungsgrades für optimale Kohäsion entspricht (die Lage des Minimumpunktes der Mischung R-100:15 ist unbestimmt, wegen der Streuung der Resultate, wie aus Figur 6 ersichtlich).

Ausbreitung unter vollkommener Wahrung des Zusammenhanges, d. h. rein plastische Deformation, ohne Loslösung von Kieskörnern aus der Mantelfläche des Kegelstumpfes, ergab sich bei der fettesten Mischung (R-100:21) für optimale Kohäsion und teilweise bei der sandreichen mitteldosierten Mischung (R-100:15). Bei der Mischung A-100:15 zeigte sich im Bereich der minimalen Ausbreitung noch eine beträchtliche Kiesabbröckelung aus der plastischen Gesamtmasse (ungefähr 50prozentiger Zerfall der Kegelstumpf-Mantelfläche); eine noch viel stärkere Kiesabbröckelung ergab sich bei der mageren Mischung A-100:9,4 (fast 100prozentiger Zerfall der Kegelstumpf-Mantelfläche).

Nach Überschreitung des mittleren Befeuchtungsgrades mit optimaler Kohäsion ist eine Zunahme des Ausbreitmaßes mit dem Wassergehalt festzustellen (die ausgeführten Versuche erstrecken sich jeweils nur bis zum Beginn des steigenden Astes der Kurven), wobei die Deformation in einer plastischen Verformung der Gesamtmasse besteht, mit gleichzeitiger, je nach der Kohäsion mehr oder weniger starker Loslösung der groben Körner aus dem Zusammenhang (Bildung eines Kiesrandes).

C. VEBE-VERSUCHE MIT KURVENAUFNAHME

1. Beschreibung des Vebe-Versuches

Der Vebe-Apparat ist in Figur 8 dargestellt. Auf einem kleinen Vibrations-tisch *G* ist ein zylindrischer Behälter *A* (Durchmesser 24 cm, Höhe 20 cm) aufgeschraubt. Darin wird mit dem zu untersuchenden Beton ein Slumpkegel hergestellt (*B*), auf welchen dann die Glasplatte *C*, durch Drehung um die Achse *X* und Verschiebung in vertikaler Richtung, abgesenkt wird. Bei In-gangsetzung der Vibration senkt sich, unter der Wirkung derselben und des Gewichtes der Glasplatte, der Kegelstumpf.

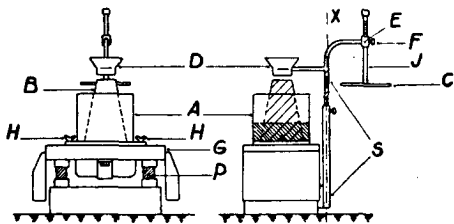


Fig. 8: Vebe-Apparat.

Es wird die Zeit gemessen vom Beginn der Vibration bis zum Augenblick, in dem auf der ganzen Fläche der Kontakt zwischen Beton und Glasplatte hergestellt ist, d. h. bis zum «Wasserziehen» auf der ganzen Oberfläche. Zudem

wird durch Ablesung an einer Skala auf dem Führungsstab der Glasplatte das Endvolumen V_f der Probe bestimmt.

Als Versuchsergebnis wird die mit dem Quotienten des Endvolumens V_f durch das Anfangsvolumen V_o multiplizierte Vibrationszeit betrachtet.

$$S = t \cdot \frac{V_f}{V_o}$$

S = Versuchsergebnis in Vebe-Graden

t = Vibrationszeit in sec

V_o = Anfangsvolumen der Probe = Inhalt des Slump-Kegels = 5,5 Liter

V_f = Endvolumen der Probe

2. Zweck der vom Verfasser ausgeführten Versuche. Beschreibung des hierfür verwendeten Gerätes

In der Einleitung zum Kapitel III wurde ausgeführt, daß zur zahlenmäßigen Erfassung der Entmischbarkeit von Frischbetonmischungen «Zerfallsmessungen» vorzunehmen sind, wobei der Zerfall von einer plastischen Verformung begleitet ist. Kennzeichnend für die Entmischbarkeit ist die minimale «Gesamtverformung», die sich für eine bestimmte Trockenzusammensetzung bei Variation des Wassergehaltes ergibt.

Beim Vebe-Versuch findet tatsächlich ein Zerfall der Proben bei gleichzeitiger Formänderung statt, jedoch wird nicht das Ausmaß der Verformung gemessen, sondern die Vibrationsdauer, die erforderlich ist, um die Umformung und die Verdichtung der Proben zu bewirken. Die Vebe-Methode gehört eigentlich zu den in Kapitel I erwähnten Verfahren zur Messung der Verdichtbarkeit durch Vibration, unter Anwendung eines von der «einfachen» Verdichtung abweichenden Vorganges.

Der ursprüngliche Zweck der eigenen Vebe-Messungen war das Suchen nach einer Vergleichsmöglichkeit von Betonmischungen hinsichtlich ihrer Entmischbarkeit, beruhend auf dem doppelten Vergleich ihrer Vebe-Zeiten und ihrer spezifischen Verdichtungsarbeiten. Es wird sich aber bei der Prüfung der Versuchsergebnisse zeigen (siehe Abschnitt 4), daß die Kohäsion der Mischungen, entgegen den Erwartungen, in der Vebe-Zeit nicht zum Ausdruck kommt, obwohl der Versuchsprozeß deutlich eine Zerfallsphase enthält.

Ein Rückschluß auf die Entmischbarkeit wird aus den Vebe-Versuchen trotzdem erhalten werden können, dank der Tatsache, daß der Versuchsgang in Kurvenform aufgenommen wurde. Es kann nämlich aus den Vebe-Kurven eine «Zerfallsgeschwindigkeit» herausgelesen werden, welche für jede Trockenzusammensetzung im Konsistenzbereich der optimalen Kohäsion einen Mini-

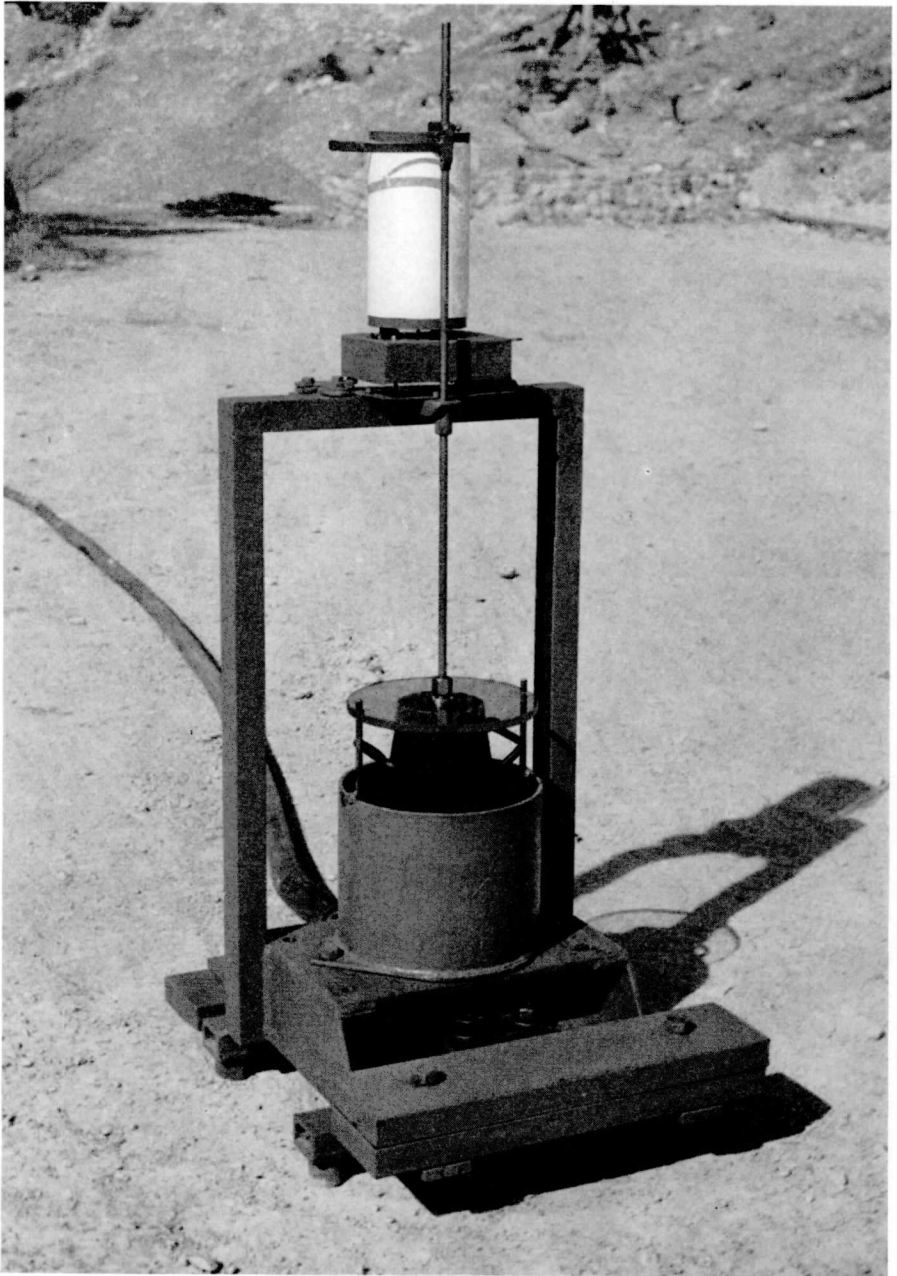


Fig. 9: Verwendung des Gerätes nach Fritsch zur Durchführung von Vebe-Versuchen mit Kurvenaufnahme.

malwert aufweist. Die Minimalwerte für verschiedene Trockenzusammensetzungen sind nach ihrem optimalen Zusammenhaltsvermögen abgestuft.

Somit wird sich für den Vebe-Versuch schließlich doch eine Auswertungsmethode ergeben, welche jener der «Zerfallsmessungen», wie sie in der Einleitung zum Kapitel beschrieben ist, entspricht.

Die Vebe-Versuche wurden mit Hilfe desselben Vibrationsgerätes mit Registriervorrichtung durchgeführt, das für die Aufnahme der Setzungskurven verwendet wurde (Figur 9). Da der Zerfall des Slump-Kegels rasch vor sich geht, muß zu dessen deutlicher graphischer Erfassung die Drehgeschwindigkeit der Registriertrommel wesentlich größer sein als bei der Aufnahme von Setzungskurven. Beim Märklin-Motor wurde dafür die zweite Übersetzung mit einer Drehzeit von 8,5 sec verwendet. Um eine Abdrehung des Schreibers von der Registriertrommel zu verhindern, ist die Glasplatte längs zweier am zylindrischen Behälter befestigten Rundstäben geführt.

3. Untersuchte Mischungen. Bestimmung der «Vebe-Zeit»

Es wurden Versuche ausgeführt mit den vier Mischungen A-100:9,4 (\sim PC 200), A-100:15, R-100:15 (\sim PC 300) und R-100:21 (\sim PC 400) für verschiedene Wassergehalte (Siebkurven der Kiessandzusammensetzungen A und R siehe Kapitel II, Abschnitt C). Wie bei den Versuchen nach Fritsch wurde jede einzelne Probe aus den abgewogenen trockenen Fraktionen nach dem EMPA-Siebsatz zusammengesetzt.

Die Vebe-Zeit wurde direkt aus den Kurven herausgelesen, und zwar jeweils als Zeitdauer zwischen dem Beginn der Vibration und der Stelle der Kurve, an der die Tangente annähernd horizontal wird. (Die so bestimmten Vebe-Zeiten sind in Tabelle 1 zusammengestellt.) Es ist dies eine empirische und in einigen Fällen ungenaue Methode, ebenso wie die Bestimmung von Auge durch Beobachtung der Benetzung der Glasplatte beim üblichen Vebe-Versuch. Die vollkommene Verdichtung ist ja normalerweise noch nicht erreicht, und die Kurve wird nur deshalb annähernd horizontal, weil durch die Glasplatte das Entweichen der Luft erschwert wird. Die Bestimmung der Vebe-Zeit aus den Kurven hat jedoch den Vorteil, daß die Resultate vom persönlichen Faktor weniger abhängig sind.

Durch den Umrechnungsfaktor der Vebe-Zeit $V_f:V_o = \text{Endvolumen:Anfangsvolumen}$ (siehe Beschreibung des Vebe-Versuches in Abschnitt 1) soll der Umformprozeß gegenüber dem Verdichtungsvorgang betont werden. Es wird sich aber aus den Versuchsergebnissen mit Kurvenaufnahme zeigen (siehe Diskussion im folgenden Abschnitt), daß durch den Vebe-Versuch in erster Linie doch die Verdichtbarkeit zum Ausdruck kommt, womit der Umrechnungsfaktor keine Berechtigung mehr hat, um so mehr, als er ja die Vibrationsdauer um so stärker verkürzt, je weniger Material verdichtet wurde. Er wird deshalb in den Resultaten der eigenen Versuche nicht berücksichtigt.

4. Diskussion der Versuchsergebnisse

Der Anhang dieser Arbeit enthält eine Sammlung von verkleinerten Photokopien von Vebe-Kurven. Sie umfaßt 6 Blätter; jedes der ersten 4 Blätter entspricht einer bestimmten Trockenzusammensetzung und enthält für alle geprüften Konsistenzen, mit

Tabelle 1: Zusammenstellung der Resultate der Vebe-Versuche mit Kurvenaufnahme

Mischung	W/Z W.-Ge- halt in %	Versuch Nr.	Vebe- Zeit sec	Neigung der Aus- breit- phase	Mischung	W/Z W.-Ge- halt in %	Versuch Nr.	Vebe- Zeit sec	Neigung der Aus- breit- phase	
A (sandarm) 100:9,4 (PC 200)	0,50 4,29	1	24	0,14	A (sandarm) 100:15 (PC 300)	0,40 5,22	1	13,5	0,45	
		2	18,5	0,27			2	17,0	0,40	
	Mittel		21	0,20		Mittel		15,2	0,42	
	0,55 4,72	1	9,2	0,18		0,42 5,47	1	8,3	0,54	
		2	8,9	0,16			2	6,2	—	
		Mittel		9,0			0,17	3	6,4	0,35
	0,60 5,15	1	9,0	0,32			4	7,0	0,35	
		2	8,5	0,28			5	6,0	0,52	
		3	4,0	0,30			6	6,9	0,52	
		Mittel		6,4		0,29	Mittel		6,8	0,46
	0,65 5,58	1	6,3	0,29		0,44 5,74	1	3,9	0,61	
		2	4,0	0,25			2	4,4	0,44	
3		3,9	0,28	3	3,3		0,33			
Mittel		4,7	0,27	4	4,4		0,56			
0,70 6,03	3	2,9	0,23	5	4,4		0,67			
	Mittel		2,8	0,21	Mittel		4,1	0,52		
0,80 6,86	1	2,4	—	0,475 6,19	3	2,5	0,33			
	2	1,7	0,13		4	2,1	0,26			
	3	2,1	0,16		5	3,0	0,26			
Mittel		2,1	0,14		6	2,0	0,26			
0,45 5,86	1	8,2	0,50		7	2,5	0,33			
	2	7,3	0,63		Mittel		2,4	0,29		
	3	7,0	0,34		1	2,0	0,34			
	4	4,9	0,56	2	2,3	0,27				
	Mittel		6,8	0,48	4	1,4	0,26			
0,47 6,12	1	5,0	0,98	0,51 6,65	5	1,4	0,25			
	2	6,1	0,42		1,8	0,28				
	3	4,3	0,76		0,325 5,63	1	19,0	0,65		
	4	4,0	0,77			2	26,0	0,74		
	Mittel		4,8			0,73	3	15,0	0,75	
	0,49 6,39	1	5,0	0,77		4	10,5	0,48		
2		5,0	0,86	Mittel		17,5	0,65			
3		4,1	0,80	0,35 6,07		1	8,0	1,44		
4		3,7	0,46		2	8,5	1,44			
5		2,9	0,54		3	8,0	0,87			
Mittel		4,1	0,69	4	9,0	1,50				
0,525 6,85	3	2,2	0,38	Mittel		8,4	1,31			
	4	1,7	0,26	0,375 6,51	1	7,0	1,40			
	5	2,1	0,28		2	7,4	1,45			
	6	2,2	0,32		3	5,6	0,81			
	7	1,7	0,30		4	6,9	1,34			
	Mittel		2,0		0,31	5	5,6	1,17		
	0,56 7,28	1	1,6		0,30	Mittel		6,5	1,23	
2		1,4	0,20		2	2,5	0,47			
3		1,0	0,19	3	3,1	0,52				
4		1,0	0,19	4	2,3	0,36				
Mittel		1,2	0,22	Mittel		2,6	0,45			
0,425 7,38	1	2,5	0,38	0,40 6,95	2	2,5	0,47			
	0,45 7,81	1	1,9		0,19	3	3,1	0,52		

Ausnahme der extremen, je eine Kurve, welche etwa dem mittleren Verlauf für den betreffenden Wassergehalt entspricht. Die Kurven sind nicht alle im gleichen Maßstab aufgezeichnet: Die Drehzeit der Registriertrommel betrug bei einem Teil der Messungen 10 sec, anstatt 8,5.

a) *Allgemeine Diskussion des Kurvenverlaufes*

Betrachtet man die Kurven für eine und dieselbe Trockenzusammensetzung, so zeigt sich eine Abhängigkeit des Kurvenverlaufes von der Konsistenz, welche im Prinzip immer dieselbe ist (siehe Figur 10).

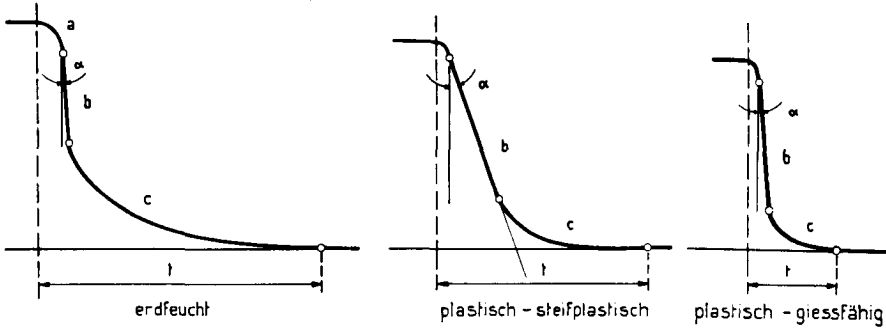


Fig. 10: Abhängigkeit des Verlaufes der Vebe-Kurven von der Konsistenz.

Bei «erdfeuchter» Konsistenz erfolgt nach einer Anlaufzeit (a) ein rasches Auseinanderfallen des Kegelstumpfes (b) mit anschließender Verdichtungsphase (c).

Bei «plastisch-steifplastischer» Konsistenz besitzt der Kegelstumpf einen besseren Zusammenhalt: die Kurve fällt infolgedessen weniger steil ab und verläuft bis relativ weit hinunter annähernd linear (b).

Bei «plastisch-gießfähiger» Konsistenz fällt die Kurve wieder steiler. Der lineare Teil erstreckt sich, im Gegensatz zu den erdfeuchten Mischungen, bis nahezu auf das Endniveau hinunter, wegen der von unten nach oben rasch fortschreitenden Betonverflüssigung.

Die Tatsache, daß die Kohäsion für eine und dieselbe Trockenzusammensetzung bei mittlerem Befeuchtungsgrad am größten ist, äußert sich also deutlich im Verlauf der Vebe-Kurven.

Vergleicht man die Kurven für verschiedene Trockenzusammensetzungen miteinander, so zeigt sich auf den ersten Blick ein deutlicher Unterschied der Neigungen des linearen Teils (b) bei optimalem Zusammenhalt des Kegelstumpfes:

Bei der Zusammensetzung A-100:9,4 (sandarm, Dosierung PC 200) zerfällt auch im günstigsten Fall (Wasserzementwert = 0,60) der Kegelstumpf sehr rasch. Bei der höheren Zementdosierung PC 300 (A-100:15) ist die Minimalneigung der Vebe-Kurven (Wasserzementwert = 0,44) schon deutlich kleiner. Noch langsamer zerfällt der Kegelstumpf im günstigsten Fall (Wasserzementwert = 0,47) bei der sandreicheren Mischung R-100:15, und am langsamsten bei der sandreicheren und hochdosierten (PC 400) R-100:21 (Wasserzementwert = 0,35).

Auch die Unterschiede in der optimalen Kohäsion von einer Trockenzusammensetzung zur andern äußern sich also deutlich im Verlauf der Vebe-Kurven.

b) *Einfluß der Kohäsion auf die Vebe-Zeit. Beziehung zwischen spezifischer Verdichtungsarbeit und Vebe-Zeit*

Es scheint sich somit, auf Grund obiger Beobachtungen, die Annahme zu bestätigen, daß die Kohäsion einen ausschlaggebenden Einfluß auf die Resultate von Vebe-Messungen ausübt. Es soll nun untersucht werden, inwiefern der sich im Kurvenverlauf äußernde Einfluß auch das Endresultat, nämlich die Vebe-Zeit, betrifft.

Zu diesem Zweck wurden aus den Kurven der Vebe-Zeit (Figur 11 enthält die in Tabelle 1 zusammengestellten Werte) und den entsprechenden Kurven der spezifischen Verdichtungsarbeit bei 7,5% Porengehalt (Figur 28 des vorhergehenden Kapitels) die Beziehungen zwischen Vebe-Zeit und spezifischer Verdichtungsarbeit für die vier untersuchten Mischungen abgeleitet und in Figur 12 aufgetragen.

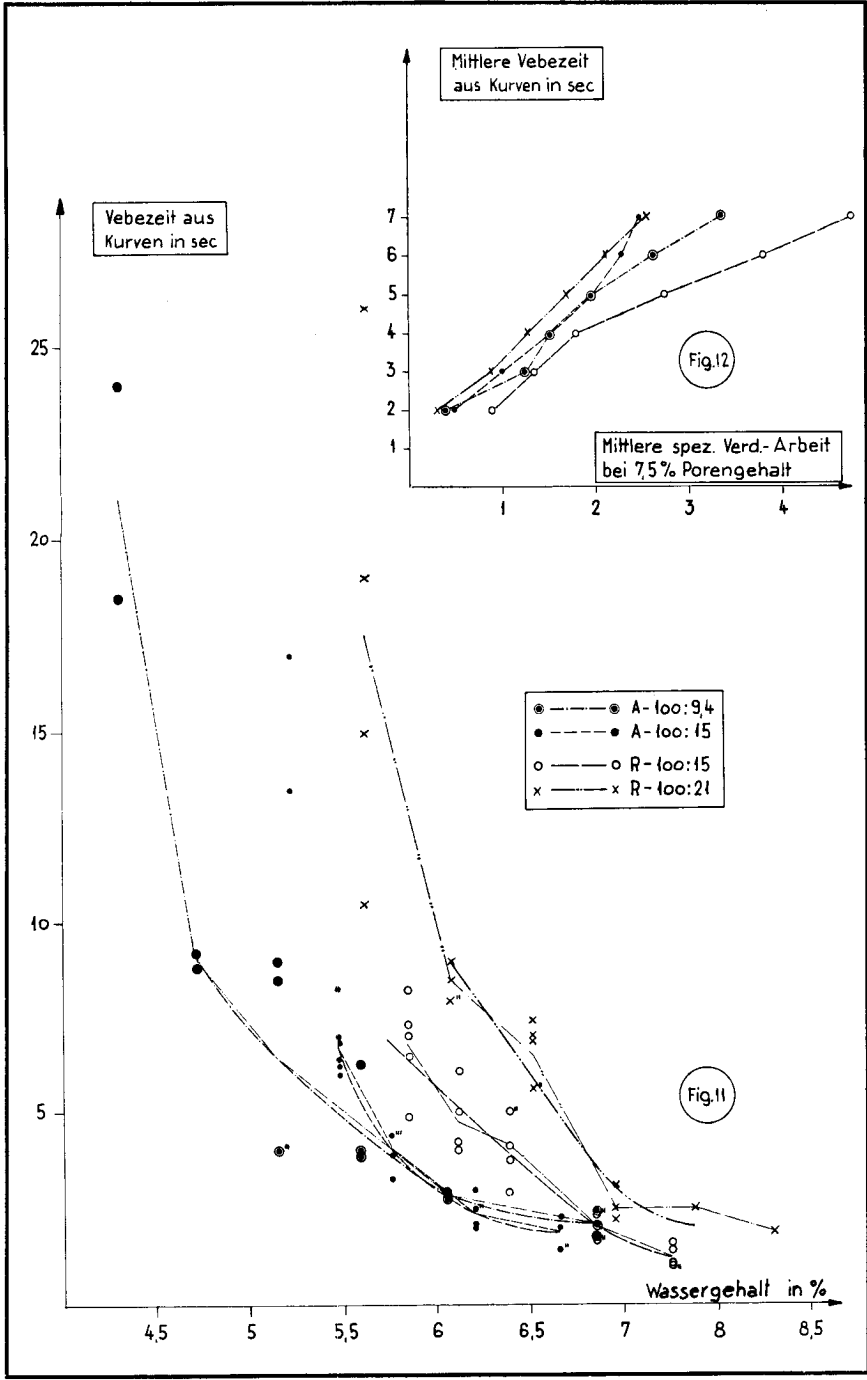
Aus Figur 12 ergibt sich nun für drei der vier Mischungen eine nur geringe Variation der Vebe-Zeit für gleiche Werte der spezifischen Verdichtungsarbeit. Die Mischung R-100:15 ergibt für alle untersuchten Konsistenzen relativ kürzere Vebe-Zeiten. *Es zeigt sich also wider Erwarten keine Abstufung der Vebe-Zeiten nach der Kohäsion der Mischungen.*

Dieses Ergebnis, das scheinbar in Widerspruch steht zur obigen Diskussion des Verlaufes der Vebe-Kurven, soll anhand einiger Beispiele erklärt werden:

Auf Blatt 5 der Sammlung von Vebekurven im Anhang sind je 2 Kurven, die mit den Zusammensetzungen R-100:21 / W/Z = 0,35 und R-100:15 / W/Z = 0,47 erhalten wurden, abgebildet. Diese Zusammensetzungen liegen im Konsistenzbereich der optimalen Kohäsion, was wohl im Mittelwert der Kurvenneigungen zum Ausdruck kommt, nicht aber in jedem einzelnen Versuchsergebnis, da sich teilweise noch ein rascher Kegelstumpferfall ergeben kann. Die beiden Beispiele zeigen jeweils gerade zwei extreme Kurvenverläufe für dieselbe Zusammensetzung. Trotzdem ergeben sie jeweils annähernd die gleiche Vebe-Zeit: in den Fällen, wo der Kegelstumpf seinen Zusammenhang bewahrte (Kurven 0,47/1 und 0,35/4), war eben die Verflüssigung nach beendigtem Zerfall so weit vorgeschritten, daß die Verdichtung kurz darauf beendet war und nicht längere Zeit in Anspruch nahm als in den Fällen, wo der Zerfall am Anfang des Versuches erfolgte (Kurven 0,47/2 und 0,35/3).

Auf Blatt 6 der Sammlung von Vebe-Kurven sind Kurven zusammengestellt, die jeweils dem mittleren Verhalten einer der in untenstehender Tabelle angegebenen Betonzusammensetzungen entsprechen.

Mischung	W/Z / W.-Gehalt in %	Mittlere Vibrationszeit bis zum Wasserziehen beim Fritsch-Versuch (Aus Fig. 29, Kap. II) sec	Mittlere Vibrationszeit bis zum Porengehalt 3,4% beim Fritsch-Versuch (vert. Einfüllen). (Aus Tab. in Kap. II Ab. F2d) sec	Mittlere spez. Verdichtungsarbeit bei 7,5% Porengehalt (Aus Fig. 28, Kap. II)	Mittlere Vebe-Zeit aus Kurven (Aus Fig. 11) sec	Zum betrachteten Beispiel gehörender Wert der Vebe-Zeit sec
A-100:9,4 R-100:15	0,65/5,58 0,49/6,39	2,3 3,8	5,6 5,5	1,63 1,78	4,5 3,9	4,0 4,1
A-100:15 R-100:21	0,42/5,47 0,375/6,51	6,3 5,0	6,6 5,2	2,59 2,06	6,8 6,0	7,0 6,9
R-100:15	0,45/5,86	8,5	12,1	4,62	6,4	7,0



Die ersten beiden Mischungen besitzen im Mittel gleiche spezifische Verdichtungsarbeiten. Bei der mageren sandarmen Zusammensetzung A-100:9,4 / W/Z = 0,65 zerfällt der Kegelstumpf ziemlich rasch, während bei der sandreicheren, höher dosierten R-100:15/0,49 der Zusammenhalt viel besser ist, womit die Kurve weniger steil abfällt. Trotzdem sind die Vebe-Zeiten gleich groß (4 sec und 4,1 sec für die Beispiele auf Blatt 6). Im Mittel ergibt sogar die magere, weniger kohärente Mischung die längere Vebe-Zeit.

Analog verhalten sich die beiden Zusammensetzungen A-100:15/0,42 und R-100:21/0,375. Der aus den Vebe-Kurven (Blatt 6) ganz deutlich sichtbare Unterschied in der Kohäsion wirkt sich wieder nicht auf die Vebe-Zeiten aus, welche sich im Mittel verhalten wie die spezifischen Verdichtungsarbeiten. Bei der sandärmeren und schwächer dosierten ersten Mischung schreitet eben die Betonverflüssigung nicht rascher vor als bei der zweiten, so daß nach dem rasch erfolgten Zusammenbruch des Kegelstumpfes die Verdichtung noch so lange Zeit dauert, daß die Totalzeit (Vebe-Zeit) derjenigen der besser zusammenhaltenden Mischung entspricht.

Bei der letzten der in obiger Tabelle angegebenen Mischungen (R-100:15/0,45) liegt der Wassergehalt unterhalb desjenigen des optimalen Zusammenhaltes (rascher Zerfall des Kegelstumpfes). Sie ergibt gegenüber der besser zusammenhaltenden höher dosierten Mischung eine relativ kürzere Vebe-Zeit, indem die Vebe-Zeiten im Mittel gleich groß sind bei stark voneinander abweichenden Werten der spezifischen Verdichtungsarbeit (siehe Tabelle). Es zeigt sich also in diesem Fall, im Gegensatz zu den vorhergehenden Beispielen, doch eine Auswirkung der Kohäsion auf die Vebe-Zeit, was aber nicht von Bedeutung ist, da ja die Mischung R-100:15 bei trockenen Konsistenzen auch relativ kürzere Vebe-Zeiten ergibt als die weniger kohärenten Mischungen A-100:15 und A-100:9,4 (siehe Figur 12).

Aus den Beispielen auf Blatt 5 und 6 der Zusammenstellung von Vebe-Kurven im Anhang, sowie aus der Darstellung der Vebe-Zeit in Funktion der spezifischen Verdichtungsarbeit auf Figur 12, kann also allgemein geschlossen werden, daß *keine deutliche Beeinflussung der Endresultate des Vebe-Versuches durch die Kohäsion der Mischungen erfolgt*: Es scheint für die Vebe-Zeit in erster Linie die Verdichtbarkeit ausschlaggebend zu sein, wie sie bei der Aufnahme der Setzungskurve nach Fritsch zum Ausdruck kommt, da ja in den meisten hier untersuchten Fällen gleichen Werten der spezifischen Verdichtungsarbeit auch annähernd gleiche Werte der Vebe-Zeit entsprechen, welches auch das Zusammenhaltvermögen sei.

c) *Vergleich von Betonzusammensetzungen hinsichtlich Kohäsion. Neigung der Ausbreitphase.*

Wenn man den Vorgang beim Vebe-Versuch nicht als Ganzes betrachtet, sondern ihn mittels Kurvenaufnahme in seinen verschiedenen Phasen verfolgt, so ergibt sich doch die Möglichkeit, verschiedene Betonzusammensetzungen hinsichtlich Kohäsion miteinander zu vergleichen. Das Zusammenhaltvermögen der Mischungen kommt in der ersten Phase des Versuches zum Ausdruck, welche die Ausbreitung des Slumpkegels betrifft, mit oder ohne Zusammenbruch desselben.

Auf jeder aufgenommenen Vebe-Kurve wurde derjenige Punkt markiert, welcher den linearen Verlauf der Kurve nach unten begrenzt. Es kann vereinfachend angenommen werden, daß in diesem Punkt die Ausbreitung des Kegelstumpfes beendet ist, so daß der nachfolgende letzte Teil des Vorganges eine reine Verdichtungsphase darstellt. Der Punkt wurde jeweils verbunden mit dem Anfangspunkt des Versuches (Anspringen des Vibrators) und der Tangens des Neigungswinkels der Verbindungsgeraden gegenüber der Vertikalen bestimmt. Dieser Neigungskoeffizient (N) ist auf allen Kurvenblättern angegeben

(die angeschriebenen Werte sind die auf die normale Drehzeit von 8,5 sec umgerechneten) und wird als *Neigung der Ausbreitphase* bezeichnet. (Zusammenstellung der Werte siehe Tabelle 1.)

In Figur 13 sind für die vier untersuchten Betonzusammensetzungen die Einzel- und Mittelwerte der Neigung der Ausbreitphase in Funktion des Wassergehaltes aufgetragen. Der Verlauf der Kurven der Mittelwerte entspricht der Diskussion der Vebe-Kurven in Abschnitt a, d.h. es ergibt sich für jede Betonzusammensetzung (Trockenzusammensetzung) ein Maximalwert der Neigung der Ausbreitphase bei einem mittleren Befeuchtungsgrad, und die Maximalwerte sind abgestuft nach Granulometrie und Zementgehalt.

Der kleinste Maximalwert (0,29) ergibt sich für die sandarme Mischung und die Zementdosierung PC 200 (A-100:9,4). Deutlich größere Maximalwerte weisen die Mischungen mit mittlerer Zementdosierung (PC 300) auf, nämlich 0,52 die sandärmere (A-100:15) und 0,72 die sandreichere (R-100:15), und den größten die sandreichere und hochdosierte Mischung R-100:21 (1,31).

Die Maximalwerte der Neigung der Ausbreitphase sind also abgestuft nach der optimalen Kohäsion der entsprechenden Betonzusammensetzungen. In dieser Form bietet der Vebe-Versuch die Möglichkeit, verschiedene Trockenzusammensetzungen hinsichtlich Kohäsion miteinander zu vergleichen.

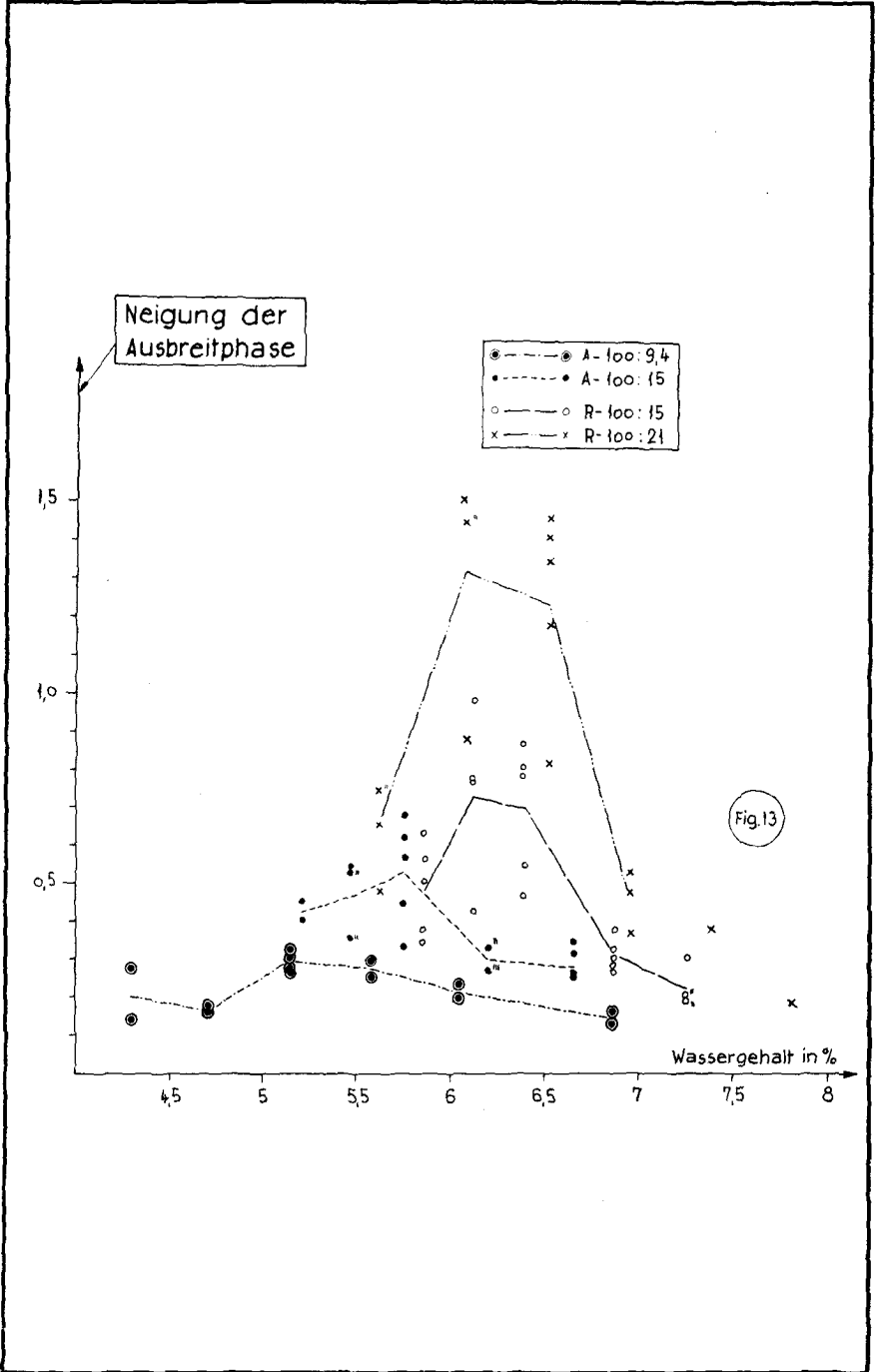
Das Verfahren entspricht im Prinzip der in Abschnitt B beschriebenen Methode mit dem Ausbreittisch, wo für jede Zusammensetzung das minimale Ausbreitmaß gesucht wird, welches um so kleiner ist, je größer die optimale Kohäsion der betreffenden Zusammensetzung ist.

Vergleicht man die Resultate des Ausbreitversuches (Figuren 6 und 7) im einzelnen mit denjenigen des Vebeversuches mit Kurvenaufnahme (Figur 13), so zeigt sich bei letzteren gegenüber den ersten eine Verschiebung der zu den Optimalwerten gehörenden Wassergehalte in Richtung trockenerer Konsistenzen. Dies ist eine Folge der Vibration: durch die mit dem Ingangsetzen des Vibrators beginnende Verdichtung (Verbindung der Wasserhüllen benachbarter Körner) erhalten solche trockene Mischungen schon einen guten Zusammenhalt, die hingegen in lockerem Zustand noch einen zusammenhanglosen, erdigen Charakter aufweisen.

5. Schlußfolgerungen in bezug auf die Messung der Entmischbarkeit

Zur Bestimmung des die Entmischbarkeit einer Betonzusammensetzung ausdrückenden Maximalwertes der «Neigung der Ausbreitphase» muß eine beträchtliche Anzahl Versuche durchgeführt werden (analog wie für die Ermittlung des minimalen Ausbreitmaßes):

Einmal müssen verschiedene Wassergehalte im Konsistenzbereich des optimalen Zusammenhaltes geprüft werden, und ferner sind für jeden Wassergehalt mehrere Vebe-Kurven aufzunehmen. Es zeigt sich nämlich, wie bereits im Abschnitt 4 b erwähnt, daß beim Befeuchtungsgrad, welcher den besten Zusammenhalt ergibt, unter Umständen doch noch in einzelnen Fällen ein relativ rascher Zusammenbruch des Kegelstumpfes erfolgen kann. Somit ergibt sich eine große Streuung der Einzelwerte der «Neigung der Ausbreitphase» (siehe Figur 13), und die Mittelwerte können nur dann als Vergleichswerte



verwendet werden, wenn sie aus einer genügenden Anzahl Versuche (mindestens drei) bestimmt wurden.

Es muß deshalb abschließend gesagt werden, daß der zu einer einigermaßen zutreffenden Charakterisierung von Frischbetonmischungen bezüglich ihrer Entmischbarkeit erforderliche Arbeitsaufwand, sowohl nach der Vebe-Methode als auch nach der Methode des Ausbreittisches so groß ist, daß die Durchführung von Untersuchungen, wie sie in diesem Kapitel beschrieben sind, in Anbetracht der untergeordneten Bedeutung der Transportverarbeitbarkeit bei der Frischbeton-Charakterisierung, sich wohl nur in den wenigsten Fällen lohnen wird. Zur Kennzeichnung der Verarbeitbarkeit von Frischbetonmischungen wird deshalb die Angabe über die Verdichtbarkeit praktisch genügen.

Leer - Vide - Empty

IV. Methoden zur Kontrolle des Wassergehaltes des Frischbetons

A. EINLEITUNG

Zum Thema der vorliegenden Arbeit, «Die Messung der Verarbeitbarkeit von Frischbeton», ist nach der Besprechung der Messung der Verdichtbarkeit (Kapitel I und II) und der Transportverarbeitbarkeit (Kapitel III) grundsätzlich nichts mehr beizufügen.

Im Kapitel IV soll indessen noch eine Frage behandelt werden, die sich bei der praktischen Anwendung der in Kapitel II vorgeschlagenen Methoden stellt, nämlich das Problem der raschen und einfachen Kontrolle des Wassergehaltes von Betonmischungen auf der Baustelle. In diesem Sinne bildet das Kapitel eine praktisch wichtige Ergänzung der Betrachtungen über die Messung der Verarbeitbarkeit.

Bei der Vorbereitung von größeren Eisenbetonbauten sind mit den erhältlichen Zuschlagstoffen jeweils Vorversuche zur Ermittlung derjenigen Granulometrie, welche bei festgelegter Zementdosierung die besten Eigenschaften ergibt, durchzuführen. Als Vergleichsbasis bei der Herstellung der Probekörper mit den verschiedenen Zusammensetzungen dient die am besten nach der verbesserten Methode von Fritsch zu messende Verdichtbarkeit. Zusätzlich kann noch die Neigung zur Entmischung kontrolliert werden.

Auf Grund solcher Vorversuche sind dann alle Faktoren, welche bei der Bauausführung für die Zusammensetzung des Betons wichtig sind, festgelegt, wobei die einzige Komponente, deren Größe nicht automatisch konstant gehalten werden kann, der Wassergehalt ist. Weil der Feuchtigkeitsgrad der Zuschlagstoffe, insbesondere des Sandes, innerhalb weiter Grenzen schwankt, ist es schwierig, den totalen Wassergehalt konstant zu halten. Im übrigen besteht bezüglich des Wassergehaltes ein gewisser Interessenkonflikt zwischen dem Bauherrn und dem Bauausführenden, indem eine Erhöhung des Wassergehaltes den Arbeitsaufwand für die Verdichtung verkleinert, gleichzeitig aber die erreichbare Festigkeit herabsetzt.

Der beste Weg zur Kontrolle des Wassergehaltes während der Bauausführung besteht zweifellos in der Durchführung von Verdichtbarkeitsmessungen. Durch sie wird der Einfluß des Wassergehaltes auf die ausschlaggebende Frischbetoneigenschaft direkt zum Ausdruck gebracht. Leider sind diese Verdichtbarkeitsmessungen kompliziert und zeitraubend. Für die Vornahme von

Stichproben und zur raschen Untersuchung einzelner nicht ganz einwandfreier Mischungen wäre eine andere Methode erwünscht. Es sollte irgendeine Größe gemessen werden können, welche für eine bestimmte Betonzusammensetzung deutlich auf den Wassergehalt anspricht.

In Frage kommen könnte eines der unter die Bezeichnung «Konsistenz»-Meßmethoden fallenden Verfahren. Besonders im englischen Sprachgebrauch werden als «Konsistenz»-Messungen überhaupt alle einfachen Methoden zur Prüfung von Frischbeton bezeichnet, unter der stillschweigenden Annahme, die «Konsistenz»-Messung genüge zur Charakterisierung der Mischungen in bezug auf ihre Verarbeitbarkeit. Im deutschen Sprachgebrauch werden die gleichen Methoden oft «Steife»-Messungen, im französischen «Plastizitäts»-Messungen genannt.

Allein schon auf Grund dieser unterschiedlichen Bezeichnungsart läßt sich vermuten, daß durch diese Methoden im allgemeinen weder die Konsistenz, noch die Plastizität, noch die Verarbeitbarkeit im wahren Sinne der Ausdrücke gemessen wird. Welchen Anforderungen eine wirkliche Messung der Verarbeitbarkeit zu entsprechen hat, braucht hier nicht wiederholt zu werden. Die Begriffe «Plastizität» und «Konsistenz» sind in Kapitel II, Abschnitt F 3 a erläutert. An jener Stelle wurde dargelegt, daß z. B. der Begriff der Konsistenz in der Betontechnologie überhaupt nicht seinem wahren Sinne entsprechend verwendet wird, indem darunter oft einfach der Befeuchtungsgrad verstanden wird, d. h. das Verhältnis des Wassergehaltes zur totalen inneren Oberfläche des Korngemisches. Es wäre zweckmäßiger, anstatt wie üblich von erdfechter, plastischer und gießfähiger «Konsistenz» zu sprechen, die betreffenden Mischungen einfach als trocken, feucht und naß zu bezeichnen.

Es soll in diesem Zusammenhang nicht weiter untersucht werden, inwiefern die erwähnten Begriffe bezüglich der verschiedenen Meßmethoden im einzelnen zu Recht oder Unrecht angewendet werden. Es handelt sich hier, nachdem die Frage der Messung der Verarbeitbarkeit in den vorangegangenen Kapiteln geklärt wurde, nur noch darum, *nach Möglichkeiten zur einfachen Kontrolle des Wassergehaltes zu suchen.*

Zu diesem Zweck sind unter den Methoden, die wir weiterhin als «Konsistenz»-Meßmethoden bezeichnen wollen, solche auszuwählen, welche den folgenden drei Anforderungen entsprechen:

1. Die gemessene Größe muß bei festgelegter Trockenzusammensetzung des Betons sehr empfindlich sein auf Variationen des Wassergehaltes.
2. Der Wassergehalt muß der gemessenen Größe eindeutig zugeordnet werden können.
3. Das Gerät muß handlich und in seiner Verwendung möglichst einfach sein.

Im folgenden wird die Eignung der Setzprobe (Slump-Test), des Trichter-versuches und der Eindringproben besprochen.

Die Setzprobe ist die älteste und meistverbreitete «Konsistenz»-Meßmethode. Es wird sich zeigen, daß sie sich zur Charakterisierung von Vibrierbeton auf keine Weise mehr eignet.

Die Trichtermethode wurde vom Verfasser entwickelt, weil sie versprach, den drei obigen Anforderungen besonders gut zu genügen. Die Versuchsergebnisse sind nicht so ausgefallen, daß man ihre Anwendung empfehlen könnte.

Eindringgeräte gibt es eine ganze Anzahl. Der Abschnitt D dieses Kapitels enthält eine kurze Beschreibung der verschiedenen Eindringmethoden und anschließend die Besprechung der eigenen Versuchsergebnisse mit der Methode der Betonsonde von Humm, von der schon in Kapitel II im Zusammenhang mit den Verdichtbarkeitsmessungen die Rede war. Die Betonsonde von Humm ist unter den an sich schon einfachen Eindringgeräten eines der handlichsten, und die Versuchsergebnisse zeigen, daß sie sich für die Prüfung von Vibrierbeton sehr gut eignet.

Bei der Untersuchung der einzelnen «Konsistenz»-Meßmethoden wird sich u. a. ergeben, daß, wenn auch einige unter ihnen für die Kontrolle des Wassergehaltes von Betonmischungen bei festgelegter Trockenzusammensetzung geeignet sind, es keine erlauben würde, verschieden zusammengesetzte Mischungen bezüglich ihres Befeuchtungsgrades miteinander zu vergleichen.

Jede «Konsistenz»-Messung ist mit einer bestimmten Formänderung verbunden. Welcher Art diese Formänderung im speziellen Fall auch sein mag (Zusammendrückung, Fließen, inneres Ausweichen usw.), es wirkt sich dabei nicht der Befeuchtungsgrad allein, sondern immer in einem gewissen Maß auch der Kornaufbau, und speziell der Anteil an Feinstkörnungen (Zement und Feinsand), aus. Beim Eindringen eines Stempels in eine Frischbetonmasse erfolgen die Verschiebungen, welche sich aus der Massenverdrängung ergeben, bei einem höheren Feinstteilgehalt relativ leichter als bei einem niedrigeren. Deshalb ergeben bei demselben Befeuchtungsgrad fette Mischungen größere Eindringmaße als magere. Aus analogen Gründen liefert der Slump-Test unter Umständen für magere Mischungen beim gleichen Befeuchtungsgrad kleinere Setzmaße als für fette.

Solange lediglich Variationen des Wassergehaltes zu verfolgen sind, spielt die Art der mit der Messung verbundenen Beanspruchung, sofern sie die Unterschiede im Wassergehalt deutlich zum Ausdruck bringt, keine wesentliche Rolle. Soll aber ein Vergleich von Mischungen mit verschiedenem Kornaufbau erfolgen, so hat es keinen Sinn, die Proben anderen Beanspruchungen als den bei der praktischen Verarbeitung auftretenden zu unterwerfen, da man damit weder über den Befeuchtungsgrad noch über die Verarbeitbarkeit zutreffende Werte erhalten würde.

B. DER SETZVERSUCH (SLUMP-TEST)

1. Versuchsgang

Bei der Bestimmung des Setzmaßes ist es wichtig, den normenmäßigen Versuchsgang in jeder Einzelheit einzuhalten:

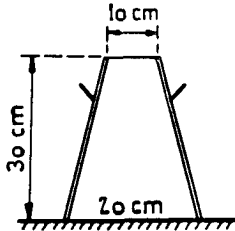


Fig. 1:
Slump-Trichter.

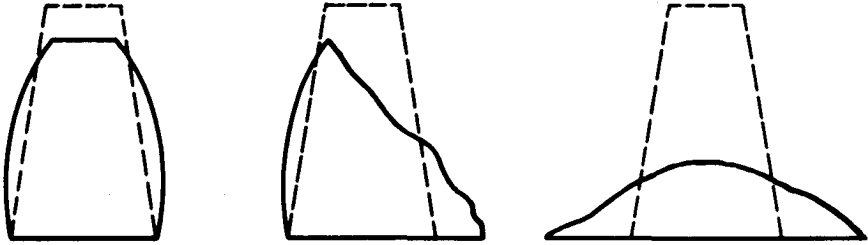
Der Trichter (Dimensionen siehe Figur 1) wird in drei volumengleichen Schichten gefüllt. Jede Betonzugabe wird auf der ganzen Oberfläche regelmäßig verteilt und jede Schicht mit einem Rundstab von 16 mm Durchmesser und 60 cm Länge 25 mal gestochert. Die Stocherschläge müssen jeweils in die untere Schicht eindringen. Nach dem Stochern der obersten Schicht wird die Oberfläche mit der Kelle abgezogen, worauf die Form sorgfältig abgehoben und das Setzmaß bestimmt wird.

2. Beanspruchung der Proben. Die drei Slump-Typen

Die Setzprobe kann als vertikaler Druckversuch betrachtet werden: unter der Wirkung des Eigengewichtes erfolgt eine Zusammendrückung der Proben, welche sich in einer Höhenabnahme, dem sogenannten Setzmaß, äußert.

Je nach der Zusammensetzung der Proben kann sich allerdings statt einer reinen Setzung (wahrer Slump) unter Umständen ein teilweiser oder ein vollkommener Zusammenbruch ergeben. Man kann den frischen Beton als Mischung zweier in ihrer physikalischen Natur grundverschiedener Bestandteile auffassen; dem Zementbrei, als kohärente, plastische Substanz, und dem Steinskelett, als körniges Material mit innerer Reibung. Der plastische Anteil bestimmt einerseits den Zusammenhalt der Gesamtmasse und andererseits ihre innere Beweglichkeit. Für eine bestimmte Trockenzusammensetzung bleibt der Slumpkegel bei zunehmender Befeuchtung so lange intakt, als die bindende Wirkung des Zementbreis die Herabsetzung der inneren Reibung noch überwiegt. Ist das nicht mehr der Fall, so bricht der Kegel entweder teilweise zusammen, indem sich eine Gleitfläche bildet, oder, bei noch stärkerer Befeuchtung, vollkommen. Man unterscheidet somit zwischen wahrem Slump, Slump mit Abscherung und Slump mit Auseinanderfallen (Figur 2).

Abgesehen davon, daß bei einem teilweisen oder vollkommenen Zusammenbruch der Probe der physikalische Charakter des Versuches anders ist als beim wahren Slump, wird für die Befeuchtungsgrade, die an der Grenze des Zusammenhaltes liegen, die an sich schon beträchtliche Streuung der Versuchsergebnisse wesentlich vergrößert.



Wahrer Slump

**Slump mit
Abscherung**

**Slump mit
Auseinanderfallen**

Fig. 2: Die 3 Slump-Typen.

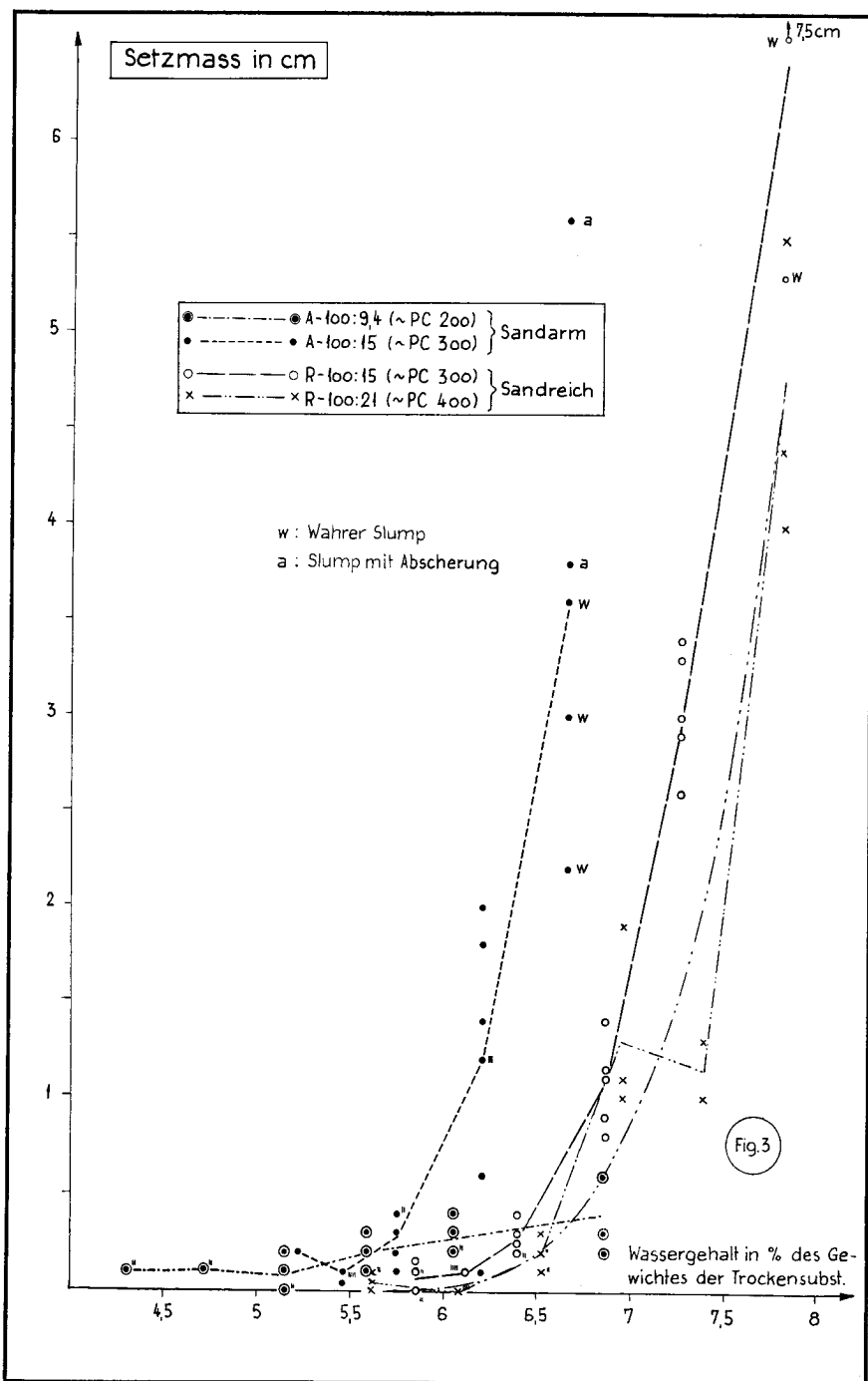
Im allgemeinen ist der Konsistenzbereich, innerhalb welchem der Slumpkegel den Zusammenhang bewahrt (wahrer Slump), um so größer, je fetter die Mischung.

3. Eigene Versuchsergebnisse

In Figur 3 sind die Resultate der Slump-Versuche mit den vier Mischungen A-100:9,4 (\sim PC 200), A-100:15, R-100:15 (\sim PC 300) und R-100:21 (\sim PC 400) in Funktion des Wassergehaltes aufgetragen. Genaue Angaben über die vier verwendeten Mischungen (insbesondere die Siebkurven der beiden Kiessandzusammensetzungen A und R) befinden sich in Kapitel II, Abschnitt C.

Betrachtet man die Kurven der beiden Mischungen mit der mittleren Dosierung (d. h. \sim PC 300), so fällt die große Streuung der Setzmasse bei der sandärmeren Mischung auf (A-100:15). Die Bildung einer Gleitfläche wurde nur bei der nassesten Konsistenz in zwei der fünf Versuche festgestellt ($w = 6,65\%$). Für die sandreichere Mischung ergab sich durchwegs ein wahrer Slump: bei gleicher Dosierung scheint somit eine feinere Kornabstufung des Kiessandmaterials (d. h. eine größere spezifische Oberfläche desselben) den «Zusammenhaltbereich» beim Slump-Test in Richtung höherer Befeuchtungsgrade zu erweitern.

Ein spezielles Verhalten zeigt die magere Mischung A-100:9,4 (\sim PC 200). Das Setzmaß nimmt wenig zu mit dem Wassergehalt und beträgt noch bei dem höchsten Befeuchtungsgrad ($w = 6,86\%$) nur 0,4 cm. Dabei zeigt sich ein geringer Zerfall durch einseitiges Abbröckeln, ohne Bildung einer eigentlichen Scherfläche. Im Gegensatz dazu ergibt die fette Mischung (R-100:21) relativ hohe Setzmaße im Vergleich mit der mitteldosierten gleicher Kornabstufung (R-100:15).



4. Anwendungsmöglichkeiten des Setzversuches

Die Zusammensetzungen A-100:15 und R-100:15 können ihrem Kornaufbau und ihrer Dosierung nach (PC 300) als «gute» Zusammensetzungen für den Eisenbetonbau bezeichnet werden. Nach ihrem Verhalten beim Slump-Test kann deshalb die Eignung desselben zur Kontrolle des Wassergehaltes auf der Baustelle beurteilt werden.

Die obere Grenze des Konsistenzbereiches für guten Vibrierbeton liegt für die sandärmere Zusammensetzung bei einem Wasserzementwert von 0,475 ($w = 6,19\%$), für die sandreichere bei einem solchen von 0,525 ($w = 6,85\%$). Dies entspricht einem maximalen Setzmaß von etwas mehr als 1 cm (siehe Figur 3). Die Wassergehaltsschwankungen, welche bei der Herstellung von Vibrierbeton auftreten können, ergeben somit Unterschiede im Setzmaß von der Größenordnung einiger Millimeter. Demzufolge muß der Setzversuch bezüglich Empfindlichkeit auf Variationen des Wassergehaltes unbedingt als ungenügend bezeichnet werden.

Obschon die hier an einem Beispiel dargelegte *Unzweckmäßigkeit des Slump-Tests zur Prüfung von Vibrierbeton* immer wieder festgestellt wird, findet die Methode wegen ihrer Einfachheit noch häufig Verwendung.

Aus Figur 3 lassen sich, neben der in diesem Zusammenhang wesentlichen Erkenntnis der ungenügenden Empfindlichkeit des Setzmaßes auf Variationen des Wassergehaltes, noch Rückschlüsse auf die Eignung der Methode zum Vergleich der Befeuchtungsgrade verschieden zusammengesetzter Mischungen ableiten.

Es wurde bereits auf das besondere Verhalten der mageren Mischung (A-100:9,4) hingewiesen, welche bei hohen Wassergehalten kleinere Setzmaße ergibt als die drei übrigen Zusammensetzungen, welche durchwegs eine größere innere Oberfläche aufweisen. Die hochdosierte Zusammensetzung (R-100:21) ergibt bei gleichen Wassergehalten, d. h. bei verschiedenen Befeuchtungsgraden, annähernd dieselben Setzmaße wie die mitteldosierte gleicher Kornabstufung (R-100:15).

Ein Vergleich verschieden dosierter Zusammensetzungen bezüglich ihres Befeuchtungsgrades kann also mit Hilfe des Setzversuches nicht durchgeführt werden. Der Grund dafür liegt in der Tatsache, daß beim Setzversuch neben dem Befeuchtungsgrad die Plastizität maßgebend ist. Das «Setzen» beim Slump-Test ist im wesentlichen eine plastische Deformation. Das Steinskelett allein würde, solange es nicht zum Zusammenbruch kommt, nahezu starr bleiben. Je plastischer die Mischung, d. h. je höher sie bei gleicher Kornabstufung dosiert ist, desto größer ist beim gleichen Befeuchtungsgrad das Setzmaß.

C. MESSUNG DER AUSFLUSSZEIT AUS EINEM TRICHTER BEI VIBRATION

Der für die erste Versuchsserie verwendete Trichterapparat ist in Figur 4 dargestellt. Der Versuchsvorgang ist folgender: In den Trichter werden 5 kg

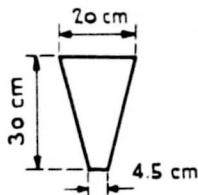
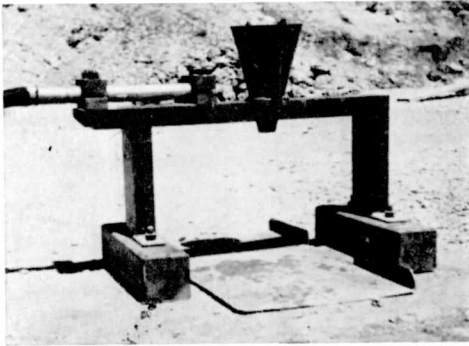


Fig. 4: Trichterapparat,
1. Ausführung.

des zu untersuchenden Betons (Maximalkorn 30 mm) lose eingefüllt. Der Vibrator wird in Gang gesetzt, und nach erfolgter Verdichtung (sichtbar am Aufsteigen des Rüttelleims) wird die Ausflußöffnung unten freigegeben und die Zeit gemessen, welche die Probe braucht, um aus dem Trichter auszuffießen.

Bei diesem Vorgang kommt eine Eigenschaft der Betonmischung zum Ausdruck, welche im Zusammenhang mit der inneren Beweglichkeit stehen muß, die für die Verdichtungsgeschwindigkeit maßgebend ist. Welcher Art dieser Zusammenhang ist, und was eigentlich mit der Ausflußzeit ge-

messen wird, ist allerdings schwer zu sagen.

Die Methode sollte lediglich die Möglichkeit bieten, den Befeuchtungsgrad einer Mischung bei festgelegter Trockenzusammensetzung auf der Baustelle auf einfache Weise zu kontrollieren. Sie schien dazu geeignet, wegen der scheinbar kleinen Streuung und in Anbetracht der Tatsache, daß der Ausfluß aus dem Trichter ein relativ langer Vorgang darstellt.

Die ersten Versuche ergaben befriedigende Resultate, besonders was die Streuung anbelangt. Es wurden dazu drei Kiessandzusammensetzungen verwendet (Material aus der Kiesgrube Reichenbach) bei ein und derselben Zementdosierung (gewichtsmäßiges Mischungsverhältnis Zement:Kiessand = 1:6,67, d. h. ungefähr PC 300) (Siebkurven siehe Figur 5). Die Resultate sind in Figur 6 in Funktion des Wassergehaltes aufgetragen.

Später wurde die Methode in bezug auf Streuung und Empfindlichkeit mit derjenigen von Fritsch verglichen (Aufnahme der Setzungskurve und Bestimmung der «spezifischen Verdichtungsarbeit»). Für zwei Kiessandzusammensetzungen (Mischungsverhältnis Sand:Riesel:Kies = 35:30:35, bzw. 41,4:27:31,6) bei derselben Zementdosierung (ungefähr PC 300) wurden Messungen

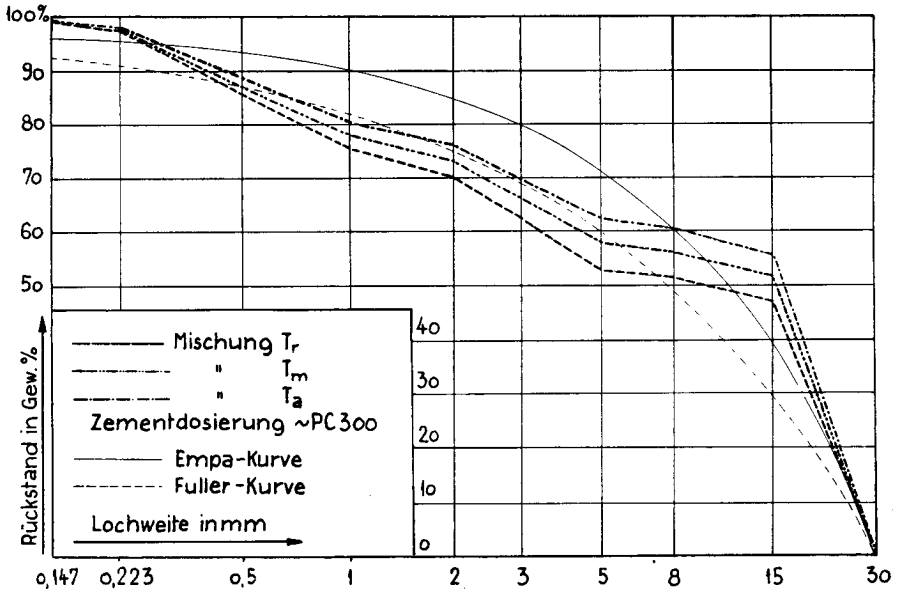
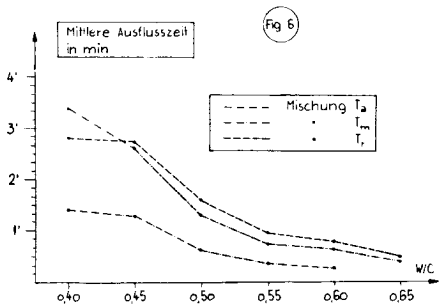
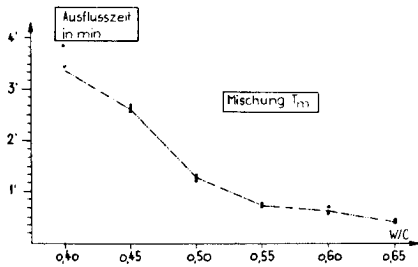
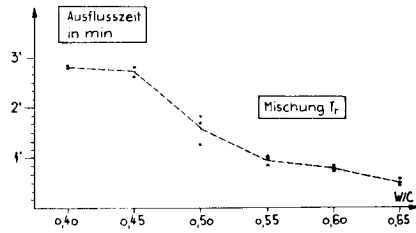
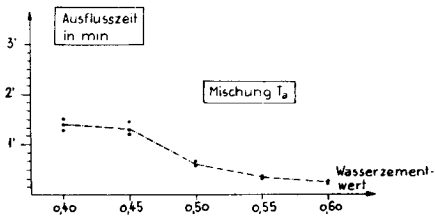
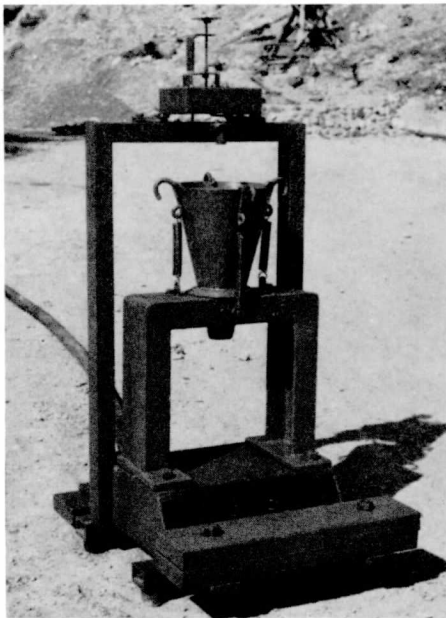
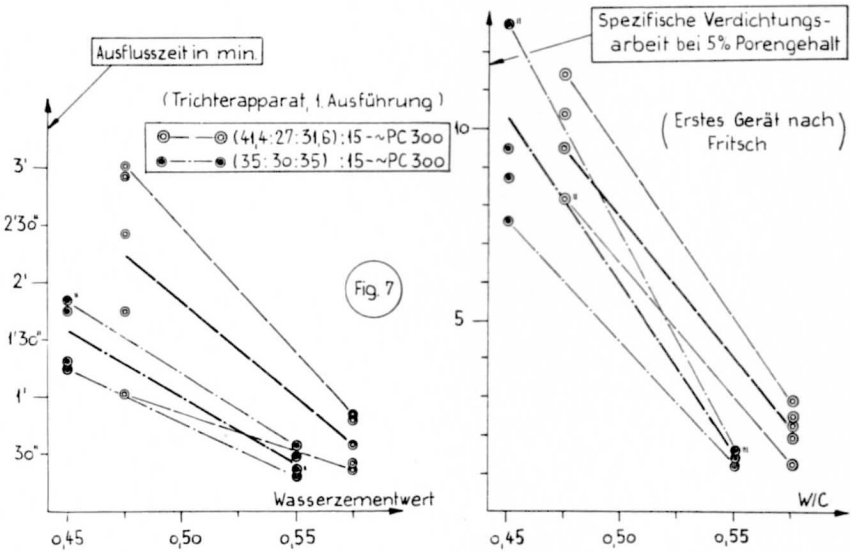


Fig. 5: Siebkurven der bei den ersten Versuchen mit dem Trichterapparat verwendeten Kiessandzusammensetzungen.



ausgeführt mit den Wassergehalten, die den Bereich gut verarbeitbaren Betons begrenzen. Die Resultate sind in Fig 7 aufgetragen. Die Empfindlichkeit der Methoden kann jeweils beurteilt werden nach dem Verhältnis der zwei Mittel-



werte aus den Versuchsergebnissen für eine und dieselbe Trockenzusammensetzung, verglichen mit der Größe der Streuungsbereiche. In dieser Beziehung ergibt die Methode von Fritsch auf Fig 7 ein günstigeres Bild als die Trichtermethode.

Weitere Messungen wurden ausgeführt im Zusammenhang mit den Versuchen nach der Methode von Fritsch (Kapitel II). Ein auf die Vibrationsplatte aufzuschraubender U-Eisenbügel erlaubt die Durchführung von Trichterversuchen mit dem Gerät, das normalerweise zur Messung der Verdichtbarkeit dient. (Siehe Fig 8.)

Fig. 8: Trichterapparat, 2. Ausführung (kombiniert mit Gerät nach Fritsch)

Es wurden die Mischungen A und R untersucht (siehe Siebkurven in Kapitel II, Abschnitt C) mit den Zementgehalten PC 200 und 300, bzw. PC 300 und 400. Dabei erfolgte eine ganz genaue Zusammensetzung der Proben, durch Abwägen jeder einzelnen Siebfraction der trockenen Zuschlagstoffe.

Die Resultate sind in Figur 9 angegeben. Es ergibt sich teilweise eine beträchtliche Streuung. Insbesondere ist die Empfindlichkeit auf Variationen des Wassergehaltes für die beiden normal dosierten Mischungen (PC 300) im Bereich zwischen 6 und 7% Wassergehalt (Bereich der guten Vibrierkonsistenz für die sandreichere Mischung R) gering, woraus geschlossen werden muß, daß

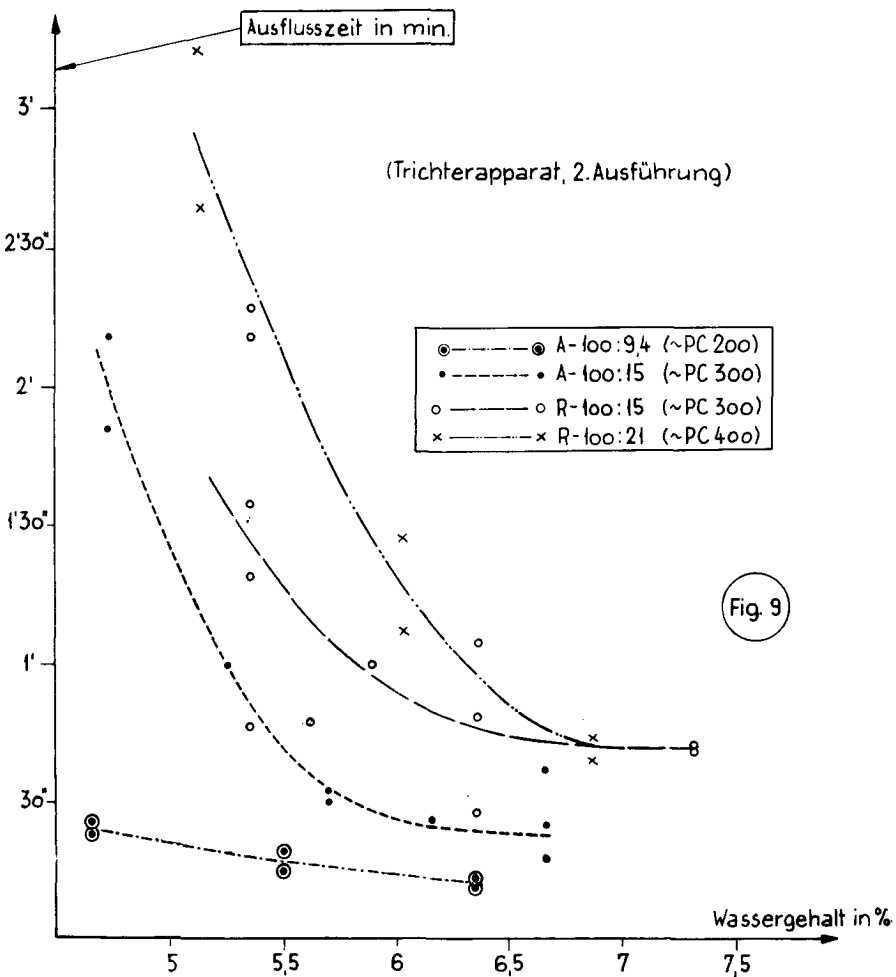


Fig. 9

die Trichtermethode wider Erwarten doch nicht zur Kontrolle des Wassergehaltes empfohlen werden darf.

Vergleicht man die Kurven der Ausflußzeit aus dem Trichter mit denjenigen der spezifischen Verdichtungsarbeit nach Fritsch (Figur 28, Kapitel II), so scheint der Trichterversuch die mageren Mischungen zu bevorzugen, indem die Kurven für gleichen Sandgehalt und verschiedene Zementdosierung in Figur 9 weiter auseinander liegen als in Figur 28.

D. DIE EINDRINGPROBEN

1. Beschreibung verschiedener Eindringgeräte

Die erste Eindringmethode zur Prüfung von Frischbeton wurde im Jahre 1923 von PEARSON und HITCHCOCK (19) eingeführt. Der Apparat besteht aus einem zylindrischen Gefäß (\varnothing 6", Höhe 12"), welches auf einem kleinen Hubtisch befestigt ist. Oberhalb der Form befindet sich eine Führung für einen Eisenrundstab (\varnothing $\frac{3}{4}$ ", 20" lang, mit abgerundetem unterem Ende), welcher unter der Wirkung des Eigengewichtes frei absinken kann und eine Einteilung trägt, an der die Eindringtiefe abgelesen werden kann. Es wird die Anzahl Fallbewegungen gemessen, um eine bestimmte Eindringtiefe des Eisenstabes zu erzielen.

Pearson und Hitchcock haben im Laufe ihrer Untersuchungen bei der Prüfung von Mischungen mit demselben Ausbreitmaß (110%) festgestellt, daß der Eindringwiderstand um so geringer ist, je höher die Zementdosierung (bei gleicher Kiessandzusammensetzung) und je feiner der Sand (bei gleichem Mischungsverhältnis Zement:Sand:Kies).

Je nachgiebiger und geschmeidiger die Masse ist (d. h. je fetter und feinkörniger), desto leichter erfolgen in ihrem Inneren die Umlagerungen, die sich aus der Materialverdrängung durch den Eindringkörper ergeben, und desto kleiner wird der Eindringwiderstand. Allgemein ergeben sich deshalb beim selben Befeuchtungsgrad um so größere Eindringmaße desto höher der Feinteilgehalt der Mischungen ist, was bedeutet, daß bei einer Beurteilung der «Verarbeitbarkeit» nach dem Eindringmaß fetttere und sandreichere Mischungen gegenüber einem Vergleich nach dem Befeuchtungsgrad bevorzugt würden.

SMITH und CONAHEY (20) haben eine gegenüber Pearson und Hitchcock abgeänderte Methode entwickelt, bei welcher die Eindringung nicht durch Rüttelbewegungen des Gefäßes, sondern durch Rammschläge auf den Eindringkörper selber bewirkt wird, wodurch allfällige Entmischungerscheinungen im Inneren der Probe vermieden werden.

Der in England verwendete «Consistometer» (21) (Figur 10) entspricht im Prinzip dem Apparat von Pearson und Hitchcock: es wird auch hier die Anzahl

Fallbewegungen eines Hubtisches gemessen, die zur Erzielung einer bestimmten Eindringtiefe erforderlich ist.

In Deutschland stellt die Eindringprobe nach GRAF (22) die meist verwendete Konsistenzmeßmethode dar. Der Beton wird in eine Würfelform (Kantenlänge 30 cm) eingefüllt. Ein Eindringkörper (\varnothing 10,2 cm, Länge 30 cm) wird aus einer Höhe von 20 cm fallen gelassen, worauf die sich ergebende Eindringtiefe t gemessen wird (siehe Figur 11).

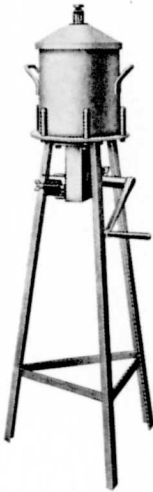


Fig. 10: Der «Consistometer».

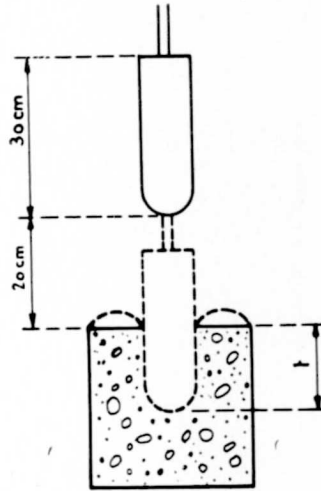


Fig. 11: Eindringprobe nach Graf.

Die Eindringprobe nach Graf hat ähnlich wie der Slump-Test, wenn auch in geringerem Maße, den Nachteil, daß ihre Empfindlichkeit mit abnehmendem Befeuchtungsgrad abnimmt, und somit im Konsistenzbereich des Vibrierbetons am geringsten ist.

Für die Prüfung von Vibrierbeton eignen sich jene Eindringversuche besser, bei denen die für eine bestimmte Eindringtiefe erforderliche Zahl von Rammschlägen ermittelt wird. Sie sind im trockenen Konsistenzbereich am empfindlichsten. Dazu gehört die Methode von Smith-Conahey.

In jüngerer Zeit wurde von der Technischen Forschungs- und Beratungsstelle der EG Portland in Wildegg ein Rammbar-Eindringgerät entwickelt, die sogenannte *Betonsonde von HUMM* (23) (siehe Figur 12). Sie besteht aus einem zylindrischen Eindringkörper mit halbkugelförmiger Spitze (\varnothing 2 cm, verwendbar bis zu einem Maximal Korn von 30 mm), welcher mit einem 0,5 kg schweren Fallgewicht versehen ist (Fallhöhe 20 cm). Es wird normalerweise die Anzahl Rammschläge gemessen für einen Eindringweg von 10 cm (von 5 bis 15 cm unter der Oberfläche).

2. Versuche mit der Betonsonde von Humm. Eignung derselben zur Kontrolle des Wassergehaltes

Die Betonsonde von Humm wurde im Laufe der eigenen Versuche verwendet, und zwar jeweils im Anschluß an die Messung der Verdichtbarkeit nach Fritsch.



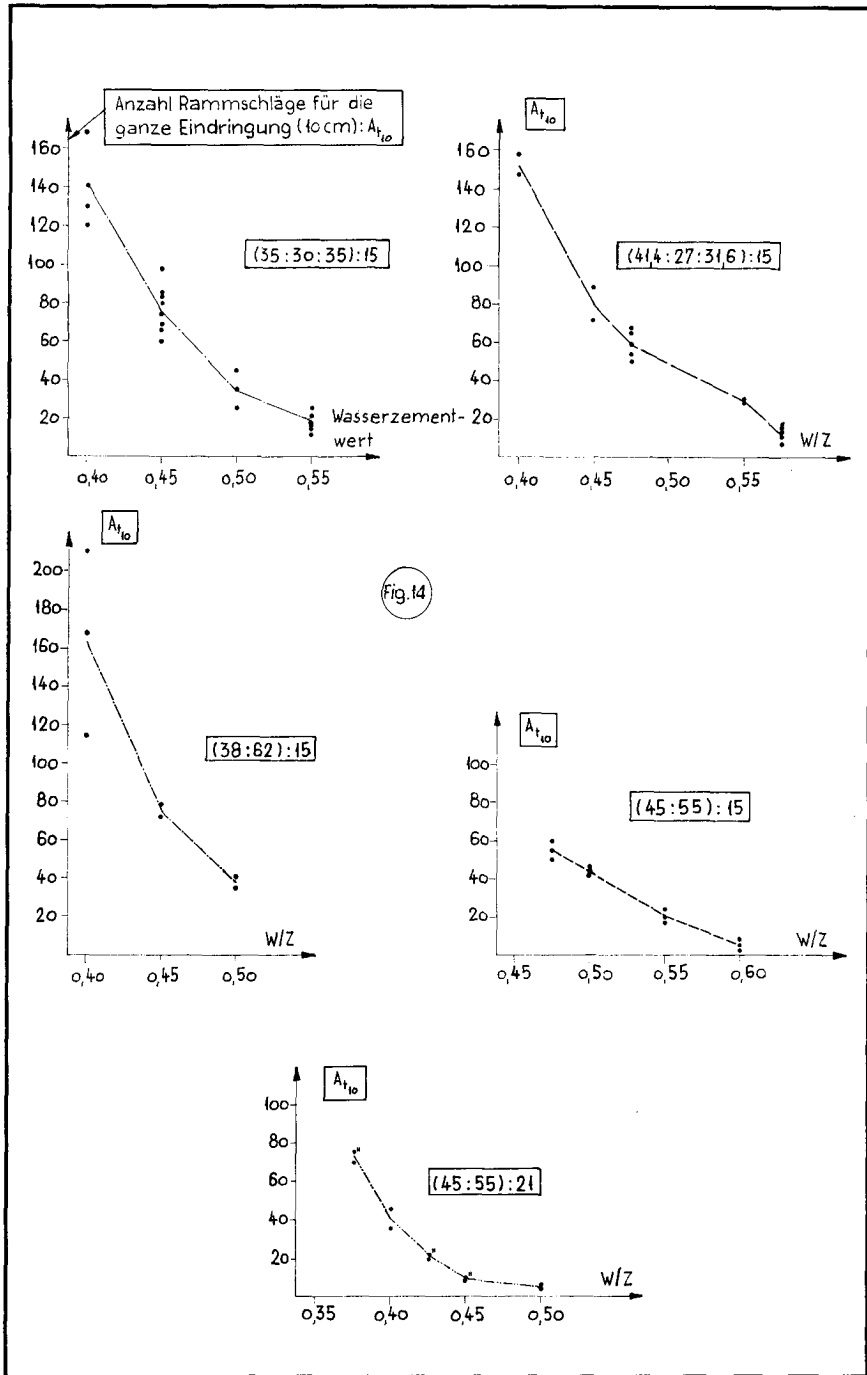
Fig. 12: Betonsonde von Humm.

Bei den Versuchen mit dem verbesserten Gerät nach Fritsch (siehe Kapitel II) wurden die Proben (10 Liter absolutes Volumen) jeweils in einem prismatischen Gefäß (Grundfläche 20×20 cm) mindestens 1 Minute lang vibriert, worauf dann der Eindringversuch ausgeführt wurde. Die diesbezüglichen Resultate, welche zum Teil stark durch die Separation beeinflußt sind, werden in Kapitel II besprochen. (Abschnitt F 4.) An dieser Stelle seien nur die Ergebnisse der im Laufe der Vorversuche mit dem ersten Gerät nach Fritsch ausgeführten Eindringversuche angegeben. Bei diesen wurden die Proben jeweils nur bis zum «Wasserziehen» vibriert.

Die Siebkurven der verwendeten Mischungen (2 stige Körnungen und 2 Ausfallkörnungen) sind in Figur 13 angegeben. Das Mischungsverhältnis Kiessand:Zement (in Gewichtsteilen) betrug 100:15, was bei mittlerem Befeuchtungsgrad einer Zementdosierung von 300 kg pro Kubikmeter verdichteten Betons entspricht. Für die sandreichere Ausfallkörnung (45:55) wurden auch Versuche ausgeführt bei einer Zementdosierung von 400 kg pro Kubikmeter verdichteten Betons (gewichtsmäßiges Mischungsverhältnis Kiessand: Zement = 100:21).

In Figur 14 sind die Resultate der Eindringversuche für die fünf untersuchten Betonzusammensetzungen in Funktion des Wasserzementwertes aufgetragen. Es ergibt sich in den meisten Fällen eine nur geringe Streuung der Werte für denselben Wasserzementwert. Die Empfindlichkeit auf Variationen des Wassergehaltes (d. h. die Abstufung der Mittelwerte, verglichen mit der Größe des Streubereiches) ist in allen hier dargestellten Fällen befriedigend: innerhalb des untersuchten Konsistenzbereiches (Vibriertbeton) bietet der Eindringversuch nach Humm somit die Möglichkeit, den *Befeuchtungsgrad bei festgelegter Trockenzusammensetzung auf einfache und ausreichend genaue Art zu bestimmen.*

Was den Vergleich von Mischungen mit verschiedenem Kornaufbau miteinander betrifft, ergibt sich auch in unseren Versuchen (analog den Beobachtungen von Pearson und Hitchcock) eine Bevorzugung der sandreicheren Zusammensetzungen. Dies ist auf Figur 15 ersichtlich, wo die Mittelwerte der Schlag-



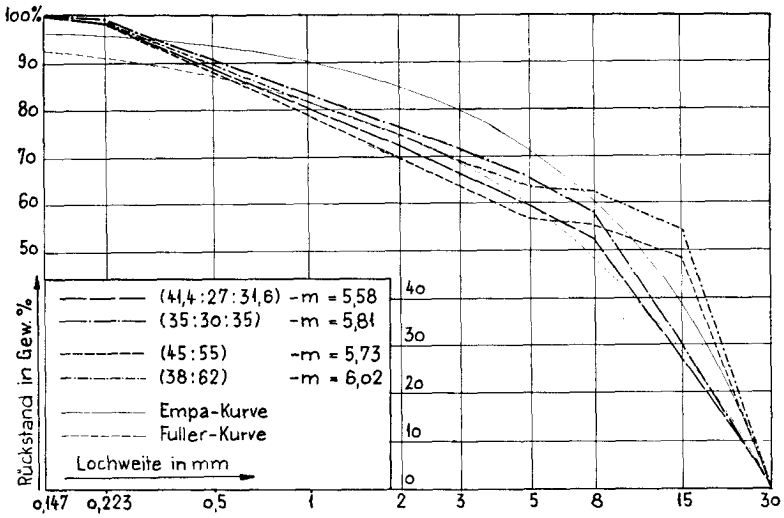
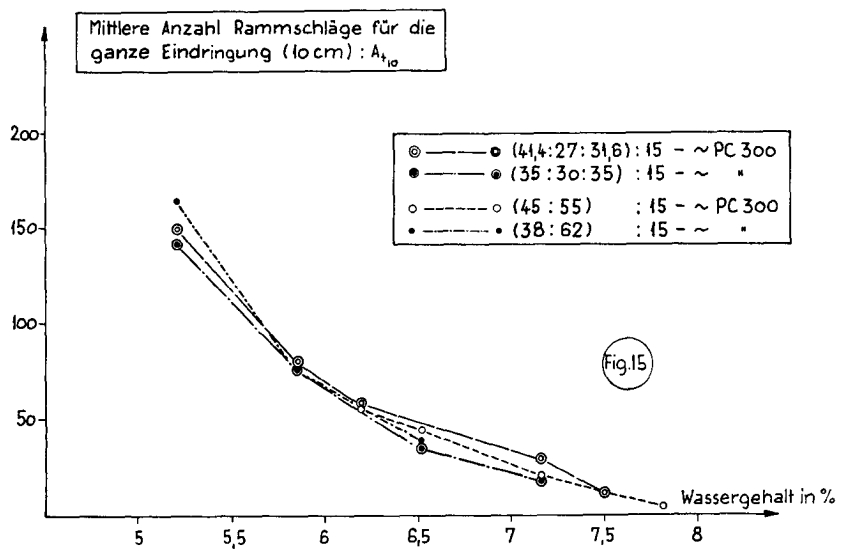


Fig. 13: Siebkurven der Mischungen, für welche Eindringversuche nach Humm an normal vibrierten Proben ausgeführt wurden.



zahlen At_{10} für die vier normaldosierten Mischungen (PC 300) in Funktion des Wassergehaltes aufgetragen sind: die Mittelwerte für die vier Mischungen unterscheiden sich bei gleichem Wassergehalt durchwegs nur wenig voneinander, was eben einer Bevorzugung der sandreicheren Zusammensetzungen gegenüber einem Vergleich nach dem Befeuchtungsgrad entspricht.

Von den in diesem Kapitel beschriebenen Methoden ist *die Eindringprobe von Humm zweifellos diejenige, welche sich bei festgelegter Trockenzusammensetzung für die Kontrolle des Wassergehaltes auf der Baustelle am besten eignet*: das Gerät könnte kaum einfacher und handlicher sein und dennoch ist die Empfindlichkeit auf Variationen des Wassergehaltes eine sehr gute. Dies besonders, wenn die Messungen, wie es bei den hier beschriebenen Versuchen der Fall war, an bereits durch Vibration normal verdichteten Proben vorgenommen werden. (Daß die Streuung der Meßresultate bei nur teilweiser Verdichtung der Proben durch Stampfen größer ist, konnte im Laufe von hier nicht beschriebenen Vorversuchen festgestellt werden.)

LITERATURVERZEICHNIS

- (1) W. GLANVILLE – The grading of aggregates and workability of concrete – Road research technical paper No 5, London 1947.
- (2) R. L'HERMITE und M. TOURNON – La vibration du béton frais – Annales de l'Inst. Techn. du Bât. et des Trav. Publ., Février 1948.
- (3) E. FORSLIND und S. BERGSTROEM – Studies on the properties of fresh concrete (schwedisch) – Swedish Cement and Concrete Research Institute, Bulletin Nr. 12, Stockholm 1948.
- (4) L'HERMITE – Récentes recherches sur la vibration du béton frais – Cahiers du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, No 7, 1950.
- (5) S. BERGSTROEM und S. LINDERHOLM – La vibration du béton – Swedish Cement and Concrete Research Institute, Bulletin Nr. 18, Stockholm 1949.
- (6) A. CAQUOT und J. FAURY – Etudes entreprises sur la plasticité de mise en œuvre du béton en construction de béton armé – Annales de l'Inst. Techn. du Bât. et des Trav. Publ., Juillet-Août 1937.
- (7) J. FRITSCH – Talsperrenbeton – Schriftenreihe des Österreichischen Wasserwirtschaftsverbandes, Heft 15, Wien 1949.
- (8) J. FRITSCH – Aufbau und Eignungsprüfung von Rüttelbeton – Österreichische Bauzeitschrift, Heft 1/3, 1948.
- (9) J. FRITSCH – Wovon hängt die Betonfestigkeit ab? – Zement - Kalk - Gips, Heft 7, 1951.
- (10) N. PLUM – The predetermination of water requirement and optimum grading of concrete – The Danish Nation. Instit. of Buildg. Res., Study Nr. 3, Copenhagen 1950.

- (11) H. STEINOUR – Further studies of the bleeding of portland cement paste – Research Laboratory of the Portland Cement Association – Bulletin 4, Chicago 1945.
- (13) A. ERIKSSON – Development of fluidity and mobility meters for concrete consistency tests – Swedish Cement and Concrete Research Institute, Proceedings Nr. 12, Stockholm 1949.
- (14) S. BERGSTROEM – Stable concrete mixes (schwedisch) – Betong, Nr. 1, 1951, Stockholm.
- (15) S. BERGSTROEM – Test of properties of fresh concrete – Magazine of Concrete Research, Nr. 11, 1952, London.
- (16) J. VERSCHAFFELT – The viscosity of liquified gases – Proc. Acad. Amsterdam 18, 19, 20, 1915–1917.
- (17) J. LOE und F. SPARKES – The deterioration of concrete. Some factors affecting the resistance of concrete to frost action – Zürich, International Association for Bridge and Structural Engineering. Preliminary report of 3rd Congress at Liege. Vol. III, 1948, 201.
- (18) O. STERN – Neue rationelle Betonerzeugung – Wien, Springer-Verlag, 1949.
- (19) G. C. PEARSON und F. A. HITCHCOCK – A penetration test for the workability of concrete mixtures – Proc. ASTM, 1923, 23 (part. II), 276–294.
- (20) G. A. SMITH und G. CONAHEY – A study of some methods of measuring workability of concrete – Proc. ACI, 1928, 24, 24–42.
- (21) V. S. WIGMORE – The consistometer. An apparatus for testing concrete workability on site – Civil Engr. and Public Works Rev., London, Dec. 1948, Vol. 43.
- (22) K. WALZ – Verarbeitbarkeit und mechanische Eigenschaften des Frischbetons – Deutscher Ausschuß für Eisenbeton, Heft 91, Berlin 1938.
- (23) G. A. RYCHNER – Die Betonsonde, ein neues Gerät zur Bestimmung der Verarbeitbarkeit von Beton – Schweiz. Bauzeitung, August 1949, Vol. 67, Nr. 33, 445–449.

Lebenslauf

Am 18. Juli 1923 wurde ich als Sohn des Bauunternehmers Ing. Oscar Losinger in Zürich geboren. Nach dessen Tod im Jahre 1924 übersiedelte meine Mutter nach Lugano, wo ich die Primarschule und das Progymnasium besuchte. Im Herbst 1942 bestand ich am Freien Gymnasium in Bern die kantonale Maturität Typus C.

Nach Ableistung des Militärdienstes erwarb ich im Frühling 1950 an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich das Diplom als Bauingenieur.

Anschließend trat ich in die Baufirma Losinger & Co. AG ein. Die experimentellen Untersuchungen über die Messung der Verarbeitbarkeit von Frischbeton habe ich im Betonlaboratorium der Kiesgrube Reichenbach bei Bern durchgeführt.

Gegenwärtig bin ich, wie schon während den Betonier-Kampagnen 1953—1955, auf der Baustelle der Staumauer Grande Dixence tätig.

Anhang

Sammlung von Setzungskurven und Vebe-Kurven (Photokopien der Originalkurvenblätter)

Setzungskurven (Maßstab 1:1):

Blatt 1: Betonzusammensetzung A-100:9,4
» 2: » R-100:15

Vebe-Kurven (Maßstab 1:2):

Blatt ①: Betonzusammensetzung A-100:9,4
» ②: » A-100:15
» ③: » R-100:15
» ④: » R-100:21
» ⑤: } Erläuterungen siehe Kapitel III, Abschn. C4b
» ⑥: }



* V O R L A G E - G R O S S - E T H *

:

Vorlage > A3

:



* V O R L A G E - G R O S S - E T H *

:



* V O R L A G E - G R O S S - E T H *

:

Vorlage > A3

:



* V O R L A G E - G R O S S - E T H *

:



* V O R L A G E - G R O S S - E T H *

:

Vorlage > A3

:



* V O R L A G E - G R O S S - E T H *

:

6

