

Prüfung der Zusammensetzung des Frischbetons (Frischbetonanalyse)

Von Kurt Walz, Düsseldorf

Übersicht

In der Abhandlung werden typische Verfahren zur Frischbetonanalyse auf ihre Eignung als Baustellenprüfung für Normalbeton beurteilt. Mit den bekannt gewordenen Verfahren wird der Zementgehalt und/oder der Wassergehalt oder seltener direkt der Wasserzementwert ermittelt. Der hierfür erforderliche Zeit- und Geräteaufwand sowie die Genauigkeit der Prüfung sind sehr unterschiedlich. Die Prüftechniken, die allgemein gesehen für den Nachweis der Zusammensetzung und der Gleichmäßigkeit der einzubauenden Mischungen konzipiert sind, beruhen auf gravimetrischen, chemischen, elektrischen und kernphysikalischen Messungen.

Die an eine breit anwendbare Baustellenprüfung optimal zu stellenden Anforderungen werden von keinem der Verfahren voll erfüllt. Mit gewissen, vertretbaren Abstrichen von den optimalen Forderungen dürften für deutsche Verhältnisse einige wenige Verfahren in Frage kommen, sofern der zugehörige Prüfvorgang präzisiert wird und die durch umfassende Untersuchungen noch zu ermittelnde Prüfgenauigkeit sich als ausreichend erweist. Verfahren, die es erlauben, den Wasserzementwert einer Mischung mit unbekannter Soll-Zusammensetzung durch wenige einfache Prüfvorgänge rasch festzustellen, ist dabei der Vorzug zu geben.

1. Einleitung

In den Anfängen der Überwachung der Zusammensetzung von Frischbetonmischungen, wie zu Beginn des Autobahnbaues, beschränkte man sich auf die Überprüfung der Gleichmäßigkeit der Kornzusammensetzung des Zuschlaggemisches durch Auswaschen des Betons auf dem 1 mm-Sieb, auf die Ermittlung des Wassergehalts des Betons durch Trocknen und auf die Feststellung des „Raumgewichts“ des verdichteten Betons. Bei dem damals aufkommenden Abwiegen der Mischerfüllungen wurden gleichbleibende und zutreffende Anteile von Zement Z und Zuschlag G für die einzelnen Mischungen vorausgesetzt, wobei eine wechselnde Oberflächenfeuchte des Zuschlags berücksichtigt wurde. Mit dieser Voraussetzung wurde die Zusammensetzung von 1 m³ des verdichteten Betons errechnet [1,1; 1,2]. Daraus wurde anschließend die Frischbetonanalyse ohne vorausgesetzte Anteile von Z und G entwickelt

[1,3], also die Ermittlung der Bestandteile eines Betons mit einer im wesentlichen unbekanntem Zusammensetzung. Diese Prüfung stand zuerst als Entwurf DIN DVM 2171 und später, ab 1942 bis heute, als DIN 52 171 [1,4] zur Verfügung.

Die vorsorgliche Überwachung des Frischbetons zur Gütesicherung gewann neben der Prüfung von Würfeln, mit der im wesentlichen nur feststellbar ist, inwieweit der eingebaute Beton der vorgeschriebenen Festigkeitsklasse entspricht, mehr und mehr an Bedeutung. Daher finden sich zahlreiche Vorschläge für Verfahren zur Prüfung der Zusammensetzung des Frischbetons bei seiner Verarbeitung. Mit gravimetrischen, chemischen, elektrischen oder kernphysikalischen Prüfverfahren werden vor allem jene Betonkomponenten ermittelt, von denen unter sonst gleichen Verhältnissen die Eigenschaften des erhärteten Normalbetons im wesentlichen abhängig sind, also letztlich der Zement- und Wassergehalt bzw. der Wasserzementwert.

In DIN 1048 – Prüfverfahren für Beton – sind erstmals in Teil 1, Ausgabe Januar 1972, einige gravimetrische Prüfungen der Zusammensetzung des Frischbetons aufgenommen worden. Darauf wird in Abschnitt 2 kritisch eingegangen. In Abschnitt 3 werden dazu Varianten erläutert. Ausführliche Zahlenbeispiele an Hand fiktiver, genau definierter Betonmischungen zeigen, wie sorgfältig dabei alle Verhältnisse und Größen zu berücksichtigen sind, um zutreffende Ergebnisse zu erzielen. In Abschnitt 4 werden dazu einige Voraussetzungen zusammengefaßt. Andere im Ausland entwickelte gravimetrische und chemische Prüftechniken werden in Abschnitt 5 beschrieben. In Abschnitt 6 wird schließlich auf elektrische und kernphysikalische Verfahren zur Feststellung des Wasser- und Zementgehaltes eingegangen.¹⁾

Kurzfristig Ergebnisse liefernde Verfahren können, neben einem Gütenachweis, nötigenfalls der Korrektur laufender Mischungen dienen. Verfahren, die einen größeren Zeitaufwand verlangen, haben nur Bedeutung als nachträglicher Gütenachweis, wie z. B. für den Nachweis des Wasserzementwertes anstelle von Probekörpern bei der Druckfestigkeitsprüfung.

2. Ermittlung von Mischungsanteilen nach DIN 1048 Teil 1

2.1 „Gesamte Mischungsanteile“ nach Abschnitt 3.3.1 DIN 1048 Teil 1 bzw. DIN 52 171 [1,4]

Vorteilhaft bei dieser Bestimmung ist, daß die Soll-Zusammensetzung der Mischung nicht bekannt sein muß und daß die zu untersuchenden Proben verhältnismäßig groß sind. Es sind zu ermitteln: die Rohdichte des verdichteten Betons (z. B. in einem Gefäß mit 8 dm³ Inhalt) und an je einer 5 kg-Probe der Gehalt an Zuschlag > 0,25 mm durch Auswaschen und Trocknen bzw. der Wassergehalt durch Trocknen des Frischbetons. Dadurch, daß „unter

¹⁾ Mit der Arbeit zu diesem Beitrag wurde 1974 begonnen. – Da auch aus älteren Arbeiten zitiert wird und auch in der z. Z. geltenden DIN 1045 oder DIN 1048 z. T. noch von „Gew.-%“ oder „Gewichtsverhältnis“ die Rede ist, wurde hier die Bezeichnung „Gewicht“ anstelle der neuen Bezeichnung „Masse“ beibehalten.

ständigem Rühren möglichst rasch und scharf“ getrocknet wird, soll erreicht werden, daß der Wasserverlust ohne die Kernfeuchte des Zuschlags bestimmt wird. Die Erhitzung muß daher beendet werden, sobald das Betongemisch nicht mehr klumpig und die Kornoberfläche des Zuschlags annähernd trocken erscheint. Wird darüber hinaus länger erhitzt, so geht in den Wasserverlust auch die Kernfeuchte mehr oder weniger ein und die zur Errechnung der Betonbestandteile angegebenen Beziehungen sind nicht mehr zutreffend, wenn man, was praktisch nötig ist, den wirksamen Wassergehalt zugrunde legen will. Entsprechendes gilt auch für die Trocknung des ausgewaschenen Zuschlags $> 0,25$ mm.

Ein Nachteil ist dabei, daß nach dem Auswaschen des Mehlkorns $0/0,25$ mm, d. h. des Zements und Feinstsandes $0/0,25$ mm²⁾, der Zementgehalt unter Berücksichtigung eines für das jeweilige Zuschlaggemisch als zutreffend vorausgesetzten Gehalts an Feinstsand $0/0,25$ mm errechnet wird. Bei gleichbleibendem Feinstsandgehalt des Zuschlags und geringem Abrieb des Zuschlags im Mischer ist das Verfahren brauchbar; es erfordert aber verhältnismäßig viel Zeit.

Eine Verfahrensweise, bei der kein bestimmter Feinstsandgehalt $0/0,25$ mm vorausgesetzt wird, wird in Abschnitt 3.1 vorgestellt.

2.2 „Zementgehalt“ nach Abschnitt 3.3.2 DIN 1048 Teil 1

Dieses Vorgehen erlaubt lediglich, den Zementgehalt Z_1 der Soll-Mischerfüllung auf den entsprechenden Zementgehalt Z in 1 m³ des verdichteten Betons umzurechnen, wenn dazu a) die Rohdichte des Betons oder b) das von einer Mischerfüllung eingenommene Volumen V_1 bestimmt werden. Dabei wird bei a) mit den für die Mischerfüllung festgelegten Sollmengen Zement Z_1 , Zuschlag G_1 und Wasser W_1 und bei b) mit der Sollmenge Zement Z_1 gerechnet, auch wenn diese Mengen fehlerhaft in den Mischer gegeben worden wären.

Mit diesem Verfahren ist daher eine fehlerhafte Mischung nicht nachweisbar, d. h. der so errechnete Zementgehalt je m³ entspricht nicht dem wirklich vorhandenen Zementgehalt in einer ggf. fehlerhaft abgemessenen Mischung. Dies gilt auch für die entsprechend in DIN 1045, Abschnitt 7.4.3.2, für Beton B I vorgeschriebene „Prüfung“ des in 1 m³ Beton vorhandenen Zementgehalts Z .

2.3 „Überwachen des Wasserzementwerts durch Trocknen des Frischbetons“ nach Abschnitt 3.4.1 DIN 1048 Teil 1

Der Wassergehalt W_1 wird an einer 10 kg-Betonprobe B_1 durch Trocknen ermittelt. Dadurch, daß sie „rasch und scharf“ getrocknet wird „bis keine Klumpen mehr zu beobachten sind“, möchte man annehmen, daß die Kernfeuchte des Zuschlags nicht ausgetrieben wird; siehe auch Abschnitt 2.1. Mit dem so ermittelten Wassergehalt W_1 sowie der Rohdichte ρ_B des Frischbetons und dem auch hier als zutreffend vorausgesetzten Soll-Zementgehalt Z kg/m³ läßt sich dann der Wasserzementwert w bzw. mit dieser Voraussetzung auch die Zusammensetzung von 1 m³ des Betons insgesamt errechnen.

²⁾ Der Einfachheit halber ist hier nur von Zement und Feinstsand die Rede; ggf. gehören zu deren Kornfraktion auch Betonzusatzstoffe.

Doch ist die angegebene Beziehung für den Wasserzementwert $w = 1000 \cdot \rho_B \cdot W_1/Z \cdot B_1$ nicht ganz korrekt, weil lediglich wieder der als zutreffend vorausgesetzte Soll-Zementgehalt Z benutzt wird. Immerhin wird hier der Wassergehalt direkt bestimmt. Der Fehler bei w ergibt sich zu etwa 0,02, wenn der tatsächliche Zementgehalt von dem zur Berechnung benutzten Soll-Zementgehalt Z um die nach DIN 1045, Abschnitt 9.2.1, erlaubte Abmessungenauignigkeit von 3 % abweicht.

2.4 Bestimmung des Wasserzementwerts w mit vorausgesetzten Anteilen von Z und G

2.4.1 „Überwachung des Wasserzementwerts durch das Gewicht des entlüfteten Frischbetons in Wasser (S. Thaulow)“ nach Abschnitt 3.4.2 DIN 1048 Teil 1

In der angegebenen Gleichung

$$\text{Wasserzementwert } w = \frac{B}{T - V} (u_Z + k \cdot u_G) - (1 + k) \quad (1)$$

ist B das Gewicht des Betons (10 bis 12 kg), V das Wasserfasungsvermögen des Meßtopfes (10 dm³) und k das als bekannt und zutreffend vorausgesetzte Soll-Gewichtsverhältnis „der trockenen Zuschläge zum Zement“. $T - V$ wird als Gewicht des entlüfteten Betons „in Wasser“ angegeben; u_Z und u_G sind Größen mit der Dichte ρ_Z des Zements bzw. Kornrohddichte ρ_G des Zuschlags („in Wasser“).

2.4.2 Ableitung einer Gleichung zur Bestimmung von w nach dem Pyknometerverfahren

Die Gleichung zur Ermittlung von w nach obigem Abschnitt 2.4.1 läßt sich ohne die Vorstellung von „Gewichten in Wasser“ bzw. der in der Schrift von Thaulow [2,1] mit „immersion ratios“ bezeichneten Größen „ u “ (Verhältnis des Gewichts unter Wasser zum Gewicht an der Luft) einsichtiger ableiten.

Unterstellt man nämlich für die Ableitung der Gleichung die Verhältnisse beim Pyknometer-Verfahren und bezeichnet mit

V das Gewicht des Pyknometers (Meßgefäßes) mit Wasser,

T das Gewicht des mit dem Betongewicht B + zugegebenem Wasser W' luftfrei gefüllten Pyknometers und mit

V_B das Betonvolumen ohne Luftporen,

so ist

$$V_B = V - W', \quad W' = T - B \quad \text{und} \quad V_B = V - (T - B)$$

Die Rohddichte ρ_{oB} des luftporenfreien Betons ist daher

$$\rho_{oB} = \frac{B}{V - T + B}, \quad \text{andererseits ist } \rho_{oB} = \frac{1 + g + w}{\frac{1}{\rho_Z} + \frac{g}{\rho_G} + w} \quad ^3)$$

³⁾ Wenn wie sonst mit Zement Z , Gestein (Zuschlag) G und Wassergehalt W die Bestandteile in 1 m³ Beton bezeichnet werden, so ist es sinnvoll, auch hier das Mischungsverhältnis $1 + G/Z + W/Z$ entsprechend mit $1 + g + w$ anzugeben, also den Zuschlaganteil nicht mit k („Kiessand“), sondern allgemeiner mit g („Gestein“) zu bezeichnen.

Daraus erhält man

$$w = \frac{B}{T - V} \left[(1+g) - \left(\frac{1}{\rho_Z} + \frac{g}{\rho_G} \right) \right] - (1+g) \quad (2)$$

Gleichung (2) liefert das gleiche Ergebnis wie Gleichung (1) nach Thaulow.

3. Varianten zu den Prüfverfahren nach Abschnitt 2

3.1 Bestimmung der Belonzusammensetzung in Anlehnung an DIN 52 171, jedoch ohne Voraussetzung eines bestimmten Feinstsandgehaltes F

3.1.1 Wie nach Abschnitt 2.1 werden an zwei Frischbetonproben B gleichen Gewichts (5000 g) durch Trocknen bzw. durch Auswaschen festgestellt:

das Trockengewicht des Betons = B_1

das Trockengewicht des kernfeuchten Zuschlags $> 0,25$ mm = G_{11} , je einschließlich Kernfeuchte, und damit

das Trockengewicht des Mehlkorns M (0/0,25 mm) = $B_1 - G_{11}$.

Die Dichte ρ_Z für den verwendeten Zement und die Dichte ρ_F für den Feinstsand F 0/0,25 mm des Zuschlaggemisches werden für die laufenden Baustellenmischungen gleicher Soll-Zusammensetzung als gleichbleibend vorausgesetzt und seien vorab im Pyknometer bestimmt worden⁴⁾. Weiter ist bei jedem Auswaschversuch an einer Durchschnittsprobe des ausgewaschenen und getrockneten Mehlkorns dessen Dichte ρ_M im Pyknometer festzustellen.

Damit ergibt sich mit den ermittelten Größen M, ρ_M , ρ_Z und ρ_F und den Ansätzen

$$\rho_M = \frac{Z' + F}{\frac{Z'}{\rho_Z} + \frac{F}{\rho_F}} \text{ und } Z' = M - F$$

der Zementgehalt Z' in 5000 g Frischbeton

$$\text{zu } Z' = \frac{M \cdot \rho_Z (\rho_F - \rho_M)}{\rho_M (\rho_F - \rho_Z)} \text{ in g,} \quad (3)$$

der Zuschlaggehalt zu $G' = B_1 - Z'$, der Wassergehalt zu $W' = B - B_1$ und der Wasserzementwert zu $w = W'/Z'$. Mit der ebenfalls ermittelten Rohdichte ρ_B des verdichteten Frischbetons können dann Z, G und W für 1 m³ dieses Betons und über die Stoffraumrechnung sein Luftgehalt errechnet werden.

Der Feinstsandgehalt F des kernfeuchten, d. h. oberflächentrockenen Zuschlaggemisches, der hier nicht in Erscheinung tritt bzw. benötigt wird, ergibt sich aus der Beziehung

$$\rho_M = \frac{M}{\frac{Z'}{\rho_Z} + \frac{F}{\rho_F}}$$

⁴⁾ Bei allen Gleichungen und Rechenbeispielen sind Dichten und Rohdichten von Ausgangsstoffen dimensionslos eingeführt bzw. für die Dichte des Zements Z ein ρ_Z von 3,125 und für die Rohdichte des kernfeuchten Zuschlags G ein ρ_G von 2,612 einheitlich zugrunde gelegt worden.

3.1.2 Würde bei der Ermittlung des Wassergehalts für B_1 und G_1 , so lange getrocknet werden, bis auch die Kernfeuchte in den Wasserverlust eingeht (Gesamtwasser), so müßten die Trocken- gewichte B_{10} und G_{10} noch um die Kernfeuchte des Zuschlags erhöht und dieser Beitrag beim Gesamtwassergehalt abgezogen werden, was die Festlegung der Zusammensetzung des Betons erschwert, da die Zusammensetzung auf kernfeuchten Zuschlag und auf den Wassergehalt des Betons ohne Kernfeuchte (wirk- samer Wassergehalt) zu beziehen ist.

Die Kernfeuchte k_f (% des Gewichts des kernfeuchten Zuschlags) kann bei Zuschlaggemischen aus dichtem Gestein um etwa 1 % und bei Zuschlaggemischen mit weniger dichtem Gestein, wie z. B. solchen mit Sandsteinkörnern, um etwa 2 % liegen. Im Falle der vollständigen Trocknung des Betons wird zweckmäßig die Kern- feuchte k_f für das Zuschlaggemisch vorab gesondert ermittelt; siehe dazu [3,1]. Es wäre dann der Zuschlaganteil

G^* (kernfeuchter Zuschlag) = $B_{10} - Z'/1 - 0,01 k_f$ und der Wassergehalt $W' = B - Z' - G^*$.

Bei diesem Verfahren ohne vorausgesetzten Feinstsandgehalt müssen also, wie nach DIN 52 171, eine Betonprobe vollständig getrocknet, eine Betonprobe ausgewaschen und der dabei verblei- bende Zuschlag $> 0,25$ mm ebenso getrocknet sowie die Roh- dichte des Frischbetons ermittelt werden. Bei jedem Versuch ist jedoch zusätzlich die Dichte ρ_M des ausgewaschenen, jeweiligen Mehlkorns im Pyknometer zu bestimmen und, für Baustellen- mischungen mit gleichbleibenden Ausgangsstoffen, vorab einmal die Dichte ρ_F des Feinstsandes und die Dichte ρ_Z des Zements.

3.2 Ableitung einer Gleichung zur Bestimmung des Wasserzement- werts w von verdichtetem Beton mit dem Druckgefäß und vor- ausgesetzten Anteilen Z und G

Wenn man nun schon, wie beim Vorgehen nach Abschnitt 2.4, eine gewisse Unzulänglichkeit durch die Annahme von Z und G bzw. $1+g$ in Kauf nimmt, dann kann der Wasserzementwert auch mit dem häufig verfügbaren Druckgefäß des Luftporenmeßgeräts be- stimmt werden (siehe Ausstattungsliste für Betonprüfstellen E zur Eigenüberwachung [3,2]). Dies bringt gegenüber dem Verfahren nach Thaulow den Vorteil, daß bei einem Inhalt des Druckgefäßes von $8,000 \text{ dm}^3$ das Betongewicht der Füllung, je nach Zusamen- setzung der Mischung, etwa 17,5 bis 19 kg beträgt und somit eine größere Betonprobe geprüft wird als im Meßtopf nach Thaulow mit etwa 10 bis 13 kg. Dabei werden auch gleichzeitig die Roh- dichte des Frischbetons und sein Luftgehalt festgestellt, die ge- braucht werden, wenn die Zusammensetzung für 1 m^3 verdichteten Frischbeton anzugeben oder mit der der Eignungsprüfung zu ver- gleichen ist.

3.2.1 Bei der Prüfung im Druckgefäß fallen an: die Rohdichte ρ_B (kg/m^3) des frischen, verdichteten Betons einschließlich Luftporen und sein Luftgehalt L_v (dm^3/m^3).

Die vollständige Ausgangsgleichung lautet dann

$$\rho_B = \frac{Z + G + W + L_m}{\frac{Z}{\rho_Z} + \frac{G}{\rho_G} + \frac{W}{\rho_W} + \frac{L_m}{\rho_L}} \cdot 1000 \text{ in kg/m}^3$$

Darin sind:

- ρ_B Rohdichte des frischen, verdichteten Betons mit eingeschlossenen Luftporen in kg/m^3
- Z Zement in kg/m^3
- G Zuschlagstein (kernfeucht) in kg/m^3
- W Wassergehalt in kg/m^3 (ohne Kernfeuchte des Zuschlags)
- L_m Luftgehalt in kg/m^3
- ρ_Z Dichte des Zements
- ρ_G Rohdichte des Zuschlags (kernfeucht)
- ρ_W Dichte des Wassers (1,00)
- ρ_L Dichte der Luft (1,293 kg/m^3)

Ferner ist $L_V = L_m/\rho_L$ oder $L_m = L_V \cdot \rho_L$.

Damit und durch Division mit Z erhält man als Gleichung mit dem Wasserzementwert w

$$\rho_B = \frac{1 + g + w + \frac{L_m}{Z}}{\frac{1}{\rho_Z} + \frac{g}{\rho_G} + w + \frac{L_V}{Z}} \cdot 1000$$

(Das Glied L_m/Z kann vernachlässigt werden, da es, selbst bei einem hohen Luftgehalt von z. B. 6 % und einem niederen Zementgehalt von 240 kg/m^3 , nur einen Beitrag von rd. 0,0003 Gewichtsteilen liefert, dagegen ist das letzte Glied im Nenner zu berücksichtigen.)

Aus obiger Gleichung ergibt sich der Wasserzementwert

$$w = \frac{1000}{\rho_B - 1000} \left[(1 + g) - \frac{\rho_B}{1000} \left(\frac{1}{\rho_Z} + \frac{g}{\rho_G} + \frac{L_V}{Z} \right) \right] \quad (4)$$

Als Z ist der als zutreffend angenommene Zementgehalt (Soll-Zementgehalt) der Eignungsprüfung in kg/m^3 einzusetzen, entsprechend auch 1 + g des Soll-Mischungsverhältnisses.

3.2.2 Beispiel

Nach der Eignungsprüfung (Soll-Zusammensetzung) bestehe der Beton aus $Z = 300 \text{ kg/m}^3$, $G = 1899 \text{ kg/m}^3$ (kernfeucht) und $W = 162 \text{ kg}$ ($w = 0,54$); dabei seien $\rho_Z = 3,125$ und $\rho_G = 2,612$ (kernfeucht).

ρ_B einschließlich Luftporen habe sich bei der Prüfung im Druckgefäß zu 2361 kg/m^3 und der Luftgehalt zu 1,5 % und damit L_V zu 15 dm^3/m^3 ergeben.

Mit den von der Soll-Zusammensetzung übernommenen Größen Z und G bzw. 1 + g und den ermittelten Werten für ρ_Z , ρ_G , ρ_B , und L_V ergibt sich mit Gleichung (4) der Wasserzementwert zu

$$w = \frac{1000}{1361} \left[7,330 - 2,361 \left(\frac{1}{3,125} + \frac{6,330}{2,612} + \frac{15}{300} \right) \right]$$
$$w = 0,735 [7,330 - 2,361 (0,320 + 2,423 + 0,050)] = 0,54$$

und als Betonzusammensetzung

Gewichte	Stoffraum
$Z = \frac{2361}{7,33 + 0,54} = 300,0 \text{ kg}$	$Z_V = 96,0 \text{ dm}^3$
$G = 300 \cdot 6,33 = 1899,0 \text{ kg}$	$G_V = 727,0 \text{ dm}^3$
$W = 300 \cdot 0,54 = 162,0 \text{ kg}$	$W_V = 162,0 \text{ dm}^3$
$L_m \quad -$	$L_V = 15,0 \text{ dm}^3$
$2361,0 \text{ kg}$	$1000,0 \text{ dm}^3$

Damit sei lediglich die Richtigkeit der Gleichung (3) nachgewiesen und gezeigt, mit welcher Genauigkeit die einzelnen Rechenwerte einzusetzen sind; siehe auch Abschnitt 4.

3.2.3 Anmerkung zu den Gleichungen mit vorausgesetzten Anteilen Z und G

Ein gewisser Nachteil der Gleichung (4) wie auch der Gleichungen (1) und (2) ist die im Einzelfall mehr oder weniger zutreffende Annahme, daß der Zementanteil Z und der Anteil des oberflächentrockenen Zuschlags G oder ihr Gewichtsverhältnis 1 : k bzw. 1 : g im zu prüfenden Beton denen der Sollmischung entsprechen. Von solchen Voraussetzungen wird z. B. auch bei [3,3 bis 3,10] ausgegangen. Dies trifft jedoch – was gerade nachzuprüfen wäre – bei fehlerhaftem Abwiegen der Bestandteile und/oder bei einer Änderung des Wassergehalts des Zuschlags nicht zu, wenn nicht gleichzeitig das eingestellte Zuschlagsgewicht der Waage sowie das Zugabewasser entsprechend geändert werden. Deshalb ist es nur bedingt möglich, den wirklichen Wasserzementwert zu ermitteln. (Weicht z. B. beim obigen Beton das vorausgesetzte, in die Gleichungen eingesetzte g von dem tatsächlichen g allerdings nur wenig ab, z. B. um 0,2 (Z um etwa 7 kg/m³), so unterscheidet sich der errechnete Wasserzementwert vom tatsächlich vorhandenen nur um etwa 0,02.)

Auf der anderen Seite kann als Vorteil der Gleichungen (1), (2) und (4) angesehen werden, daß der Wassergehalt selbst nicht bestimmt werden muß.

3.3 Verfahren mit dem Druckgefäß zur Ermittlung des Wasserzementwerts w, ohne vorausgesetzte Anteile von Z und G, jedoch mit Bestimmung von W durch Trocknen

Es wurde nun versucht, ohne die Benutzung der mehr oder weniger zutreffenden Anteile von Z und G bzw. 1 + g der Sollmischung auszukommen. Bestimmungsgleichungen für w mit den Größen q_B , q_Z , q_G und L_V allein führen jedoch nicht zum Ziel, da die zwei maßgeblichen Größen W und Z nicht bekannt sind. Eine davon müßte direkt ermittelt werden.

3.3.1 Ableitung der Gleichung

Wird der Wassergehalt W_p in Gew.-% des Frischbetons (ohne Kernfeuchte des Zuschlags), wie bei den Verfahren in den Abschnitten 2.1 und 2.3, ebenfalls gesondert bestimmt, ferner q_B , und ist damit $W = q_B \cdot W_p$ bekannt, so kann man die in Abschnitt 3.2.1 aufgestellte Ausgangsgleichung auch für die Errechnung von w benutzen.

Mit $\frac{G}{\rho_G} = 1000 - \frac{Z}{\rho_Z} - W - \frac{L_m}{\rho_L}$ und $Z = \frac{W}{w}$ ergibt sich die vollständige Bestimmungsgleichung für

$$w = \frac{1 - \frac{\rho_G}{\rho_Z}}{\frac{\rho_B}{W} - 1 + \rho_G \left(1 - \frac{1000}{W}\right) + \frac{L_m \cdot \rho_G}{\rho_L \cdot W} - \frac{L_m}{W}}$$

Da L_m/ρ_L dem im Druckgefäß ermittelten Luftgehalt L_V in dm^3/m^3 entspricht und das Glied $L_m/W = L_V \cdot \rho_L/W$ wegen des geringen Beitrags auch bei hohen Luftgehalten vernachlässigbar ist (siehe entsprechend Abschnitt 3.2.1), ergibt sich für w die nachfolgende für das Ausrechnen zweckmäßige Beziehung

$$w = \frac{W (\rho_Z - \rho_G)}{\rho_Z [W (\rho_G - 1) + \rho_B - \rho_G (1000 - L_V)]} \quad (5)$$

Diese Gleichung verlangt für Betonmischungen mit gleichbleibender Dichte ρ_Z des Zements und Rohdichte ρ_G des Zuschlags, wie dies bei einem Betoniervorhaben in der Regel der Fall ist, für jeden Prüffall nur die Bestimmung von ρ_B und L_V im Drucktopf und von W des Frischbetons (ohne Kernwasser des Zuschlags). Über andere Möglichkeiten zur Bestimmung des Wassergehalts als durch Trocknen siehe Abschnitt 5.

3.3.2 Beispiele

3.3.2.1 Soll-Zusammensetzung

Nach der Eignungsprüfung sei eine Mischung nach Abschnitt 3.2.2 festgelegt worden.

3.3.2.2 Ermittlung von w mit Gleichung (5) für eine zutreffend abgemessene Mischung

Bei der Nachprüfung des Betons auf der Baustelle sei ρ_B zu 2361 kg/m^3 , L_V zu $15 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ ($L_p = 1,5\%$) und der Wassergehalt W durch Trocknen, bezogen auf das Gewicht des Frischbetons (Abschnitt 2.1), zu $W = 162 \text{ kg/m}^3$ festgestellt worden.

Mit Gleichung (5) errechnet sich

$$w = \frac{162 (3,125 - 2,612)}{3,125 [162 \cdot 1,612 + 2361 - 2,612 \cdot 985]} = \frac{83,106}{154,137} = 0,54$$

Das Ergebnis bestätigt die Richtigkeit der Gleichung und besagt, daß der Beton der geprüften Mischung die festgelegte Zusammensetzung aufweist.

3.3.2.3 Mischung nach Abschnitt 3.3.2.2, jedoch mit oberflächenfeuchtem Zuschlag

a) Soll-Anteile der Mischerfüllung

Der Zuschlag weise $2,44\%$ Oberflächenfeuchte (bezogen auf sein Feuchtgewicht) auf. Dann sind an den Abmeßeinrichtungen folgende Anteile einzustellen:

Zement	Z = 300,0 kg
Zuschlag	G _f = 1946,5 kg
(mit 47,5 kg Oberflächenfeuchte)	
Zugabewasser	W _z = 114,5 kg (= 162 - 47,5)
Gesamtgewicht	2361,0 kg
(Wasserzementwert w = 0,54)	

b) Fehlerhaft abgemessene Anteile der Mischerfüllung

Ist nun eine größere Oberflächenfeuchte des Zuschlags von 3,85 % anstatt 2,44 % vorhanden, so wären für diese Mischung gegenüber a) folgende geänderte Mengen an den Abmeßvorrichtungen als zutreffend einzustellen:

Zement Z	= 300 kg
Zuschlag G _f = 1899/1 - 0,0385	= 1975 kg
(mit 76 kg Oberflächenfeuchte)	
Zugabewasser W _z = 162 - 76	= 86 kg
Gesamtgewicht	= 2361 kg
(Wasserzementwert	= 0,54)

Bleiben jedoch die Einstellungen für den feuchten Zuschlag mit 1946,5 kg und für das Zugabewasser mit 114,5 kg fälschlicherweise wie für a) bestehen, so enthält diese Mischung

$$1946,5 - (1946,5 \cdot 3,85 \%) = 1871,6 \text{ kg Zuschlag}$$

(kernfeuchter Zuschlag G)

und

$$114,5 + (1946,5 \cdot 0,0385) = 189,4 \text{ kg Wasser}$$

(Wassergehalt W)

Gelangen außerdem durch ungenaues Abwiegen nur 292 kg Zement, anstatt 300 kg, in den Mischer, so besteht die Mischung (gegenüber der nach Abschnitt 3.3.2.1) tatsächlich aus:

Zement Z	= 292,0 kg
Zuschlag G (kernfeucht)	= 1871,6 kg
Wasser W	= 189,4 kg
Gesamtgewicht	= 2353,0 kg
(Wasserzementwert	= 0,649)

Der Aufbau des verdichteten Betons mit 1,5 % Luftporen ist in Tafel 1 in den Spalten 1 und 2 im einzelnen wiedergegeben und, auf 1 m³ bezogen, in den Spalten 3 und 4.

Bei der Prüfung der Mischung wären also die Rohdichte des Frischbetons zu $\rho_B = 2319 \text{ kg/m}^3$ ermittelt worden, der Luftgehalt L_V zu 1,5 % und der Wassergehalt W zu $186,7 \text{ kg/m}^3$ (entsprechend 8,05 %, siehe 1. Absatz von Abschnitt 3.3.1). Hiermit errechnet sich auch nach Gleichung (5) der tatsächlich vorhandene Wasserzementwert

$$w = \frac{186,7 (3,125 - 2,612)}{3,125 (186,7 \cdot 1,612 + 2319 - 2,612 \cdot 985)} = \frac{95,777}{147,312} = 0,65.$$

Durch das fehlerhafte Abmessen des Zements (292 anstatt 300 kg) und die Nichtberücksichtigung der nur wenig höheren Oberflächen-

Tafel 1 Wirkliche Zusammensetzung der fehlerhaft abgemessenen Mischerfüllung bei 1,5 % Luftporen des verdichteten Frischbetons

1	2	3	4
Beton der Mischerfüllung		bezogen auf 1 m ³	
Gewicht kg	Stoffraum dm ³	kg	dm ³
Z = 292,0 G = 1871,6 W = 189,4 (L _m = 0,0197 ¹⁾)	Z _V = 93,440 G _V = 716,539 W _V = 189,400 L _V = 15,219 ¹⁾)	Z = 287,798 G = 1844,668 W = 186,675 L = 0,0194	Z _V = 92,095 G _V = 706,228 W _V = 186,675 L _V = 15,004
2353,0197	V = 1014,598	2319,160	1000,002
ρ _B = 2319,16 kg/m ³ w = 0,649		ρ _B = 2319,16 kg/m ³ w = 0,649	

1) Luftgehalt L_V der verdichteten Mischerfüllung mit dem Volumen V und einem Luftgehalt L_p % (hier L_p = 1,5 %)

$$L_V = \frac{L_p (Z_V + G_V + W_V)}{100 - L_p} = \frac{1,5 (999,379)}{98,5} = 15,219 \text{ dm}^3$$

2) Nachträglich aus L_V errechnet und eingesetzt (siehe Abschnitt 3.2.1).

feuchte des Zuschlags von 3,85 % – 2,44 % = 1,4 % entstand in der Mischung ein Wasserzementwert von rd. 0,65 gegenüber 0,54 der Soll-Mischung. Das Beispiel zeigt, welche große Bedeutung vor allem der zutreffenden Erfassung der Oberflächenfeuchte des Zuschlags bei der Errechnung des Wasserzementwerts zukommt.

In der Praxis ließen der durch Trocknen ermittelte höhere Wassergehalt W (186,7 kg/m³ anstatt 162 kg/m³) und auch die veränderte Konsistenz schon am Mischer erkennen, daß die Mischung zu wasserreich ist. Eine ähnlich deutliche Veränderung der Konsistenz tritt jedoch weniger ein, wenn bei erhöhtem Wassergehalt zugleich auch das Zuschlaggemisch feinkörniger geworden ist.

3.4 Verfahren mit dem Druckgefäß zur Ermittlung des Wasserzementwerts w mit vorausgesetztem Zementgehalt Z der Soll-Mischung

3.4.1 Bestimmungsgleichung für w

Will man auf die Ermittlung des Wassergehalts W wie nach Abschnitt 3.3 jedoch verzichten und setzt dafür den Zementgehalt Z der Soll-Mischung als angeblich zutreffend voraus (entsprechend wie bei den Verfahren in den Abschnitten 2.4 und 3.2), so kann mit der bei jeder Prüfung im Druckgefäß zu bestimmenden Rohdichte ρ_B des verdichteten Frischbetons (kg/m³) und seinem Luftgehalt L_V (dm³/m³) wieder von folgender Gleichung ausgegangen werden

$$\rho_B = \frac{Z + G + W}{\frac{Z}{\rho_Z} + \frac{G}{\rho_G} + W + L_V} \cdot 1000$$

Mit $W = Z \cdot w$ und $G = \rho_B - Z - W$ bzw. $G = \rho_B - Z - Z \cdot w$, wird

$$w = \frac{1000 \cdot \rho_Z \cdot \rho_G + Z (\rho_Z - \rho_G) - \rho_B \cdot \rho_Z - \rho_Z \cdot \rho_G \cdot L_V}{Z \cdot \rho_Z (\rho_G - 1)} \quad (6)$$

In dieser Gleichung sind bei Übernahme von Z aus der Soll-Zusammensetzung und bei gleichbleibenden Ausgangsstoffen die beiden ersten Glieder im Zähler und der Nenner konstanten. Lediglich die beiden letzten Glieder des Zählers ändern sich mit dem bei jeder Prüfung zu ermittelnden ρ_B und L_V .

3.4.2 Beispiele

Als Mischung sei an den Abmeßeinrichtungen die nach Abschnitt 3.2.2 eingestellt und bei der Prüfung im Drucktopf $\rho_B = 2361 \text{ kg/m}^3$ bzw. $L_V = 15 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ festgestellt worden. Nach Gleichung (6) beträgt dann mit $\rho_Z = 3,125$ und $\rho_G = 2,612$ der Wasserzementwert

$$w = \frac{8162,5 + 153,9 - 7378,1 - 122,4}{1511,25} = \frac{815,9}{1511,25} = 0,540;$$

er stimmt mit dem Sollwert von 0,54 überein.

Wie wirkt sich hier nun ein vom vorausgesetzten Soll-Zementgehalt tatsächlich abweichender Zementgehalt auf den Wasserzementwert aus? Unter Bezug auf die angestellten eingehenden Berechnungen soll dazu lediglich folgendes angeführt werden.

Wird die Soll-Zusammensetzung der Mischung richtig an der Abmeßanlage eingestellt und gelangt trotzdem weniger Zement in den Mischer, z. B. 291 kg anstatt 300 kg (-3%), so erhöht sich der wirkliche Wasserzementwert auf 0,557 gegenüber dem Sollwert von 0,54 (Mischung nach Abschnitt 3.2.2). Mit dem für diesen Beton ermittelten ρ_B und L_V wird mit Gleichung (6), wenn unrichtigerweise der Soll-Zementgehalt von 300 kg eingesetzt wird, dagegen ein $w = 0,544$, also ein um 0,013 zu kleines w ausgewiesen. Entsprechend ergibt sich mit Gleichung (5), wenn bei einer Mischung mit einem Soll-Zementgehalt von z. B. 240 kg anstatt mit fehlerhaft abgemessenem Zementgehalt von 233 kg gerechnet wird, ein um 0,015 zu kleines w .

Die Unterschiede von rd. 0,013 bzw. 0,015 sind praktisch gering (siehe ebenso Abschnitt 3.2.3), d. h. man würde für w einen kleinen Fehler in Kauf nehmen, wenn man auf die Ermittlung des Wasserzementwerts w , wie nach Abschnitt 3.3, verzichtet und stattdessen den Soll-Zementgehalt Z in die Gleichung einsetzt, sofern man voraussetzen kann, daß die Zementmenge nur mit mäßigen Schwankungen abgewogen wird (hier mit -3%). Man hätte bei der Prüfung also im Druckgefäß nur ρ_B und L_V zu bestimmen.

3.5 Verfahren mit dem Druckgefäß zur Nachprüfung des Wasserzementwerts bei der „Zementleimdosierung“ oder bei Verpreßarbeiten mit Zementleim

Der Vollständigkeit halber soll auch dafür eine Prüfmöglichkeit beschrieben werden.

3.5.1 Bei der selten anwendbaren Zementleimdosierung wird dem *oberflächentrockenen* Zuschlaggemisch soviel vorgemischter Zementleim mit festgelegtem Wasserzementwert zugemischt, bis der Beton die erforderliche Konsistenz erreicht hat; siehe auch [3,11]. Damit soll gewährleistet werden, daß die laufenden Mischungen, unabhängig von Schwankungen bei der Zuschlagabmessung und der Zuschlagzusammensetzung, immer den gleichen Wasserzementwert aufweisen. Bei der Nachprüfung ist also der Wasserzementwert an einer Zementleimprobe festzustellen.

Eine solche Nachprüfung kann auch bei Verpreßarbeiten mit Zementleim (Zementsuspensionen) angebracht sein, wenn die Einhaltung eines bestimmten Wasserzementwerts bzw. Wasser-Luft-Zementwerts in engen Grenzen erforderlich ist.

3.5.2 An einer Probe des in der Regel mehr oder weniger lufthaltigen Zementleims wird im Druckgefäß die Rohdichte ϱ_{IL} des Zementleims und sein Luftgehalt L_p in Raum-% bestimmt; außerdem sei die Dichte des Zements ϱ_Z vorab ermittelt worden bzw. bekannt.

Für den *luftfreien* Zementleim bestehen mit

w = Wasserzementwert und ϱ_I = Dichte des Zementleims folgende Beziehungen

$$\varrho_I = \frac{W + Z}{W + \frac{Z}{\varrho_Z}} \text{ und damit } \varrho_I = \frac{w + 1}{w + \frac{1}{\varrho_Z}} \text{ oder } w = \frac{\varrho_Z - \varrho_I}{\varrho_Z (\varrho_I - 1)} \quad (7)$$

Dabei ist ϱ_I zunächst unbekannt, da nur die Rohdichte ϱ_{IL} des lufthaltigen Zementleims festgestellt wird.

Für die in Wirklichkeit *lufthaltige* Zementleimprobe ergeben sich mit w_L = „Wasser-Luft-Zementwert“ und ϱ_{IL} = Rohdichte die Beziehungen

$$\varrho_I = \frac{\varrho_{IL}}{1 - \frac{L_p}{100}} \quad (8) \quad \text{und} \quad \varrho_{IL} = \frac{w + 1}{w + \frac{1}{\varrho_Z} + \frac{L_m}{\varrho_L \cdot Z}}$$

wobei $w + \frac{L_m}{\varrho_L \cdot Z} = w_L$ ist, siehe Abschnitt 3.3.1, damit wird

$$w_L = \frac{w + 1}{\varrho_{IL}} - \frac{1}{\varrho_Z} \quad (9)$$

Da nur ϱ_{IL} und L_p im Druckgefäß ermittelt werden, wird zunächst ϱ_I für den luftfreien Zementleim mit Gleichung (8) errechnet und mit diesem ϱ_I der Wasserzementwert w (luftfrei) nach Gleichung (7). Dieses w in Gleichung (9) eingesetzt, liefert den „Wasser-Luft-Zementwert“ w_L .

3.5.3 Beispiel

Für einen bestimmten Zementleim seien $\varrho_{IL} = 1,692$, $L_p = 5,5\%$ und $\varrho_Z = 3,125$ ermittelt worden. Es errechnen sich dann

$$\text{mit Gleichung (8) } \varrho_I = \frac{1,692}{1 - 0,055} = 1,790,$$

mit Gleichung (7) $w = \frac{3,125 - 1,790}{3,125 \cdot 0,790} = 0,54$ und

mit Gleichung (9) $w_L = \frac{1,54}{1,692} - 0,32 = 0,59$.

3.5.4 Zusammensetzung von 1 m³ Beton bzw. von 1 m³ Zementleim

a) Im Falle der Zementleimdosierung wird von dem errechneten w des luftfreien Zementleims der geprüften Probe (Abschnitt 3.5.3) ausgegangen. Dazu müssen die in den Mischer gegebenen Gewichtsmengen Zementleim l_m (kg) und Zuschlag G' (kg) sowie die Rohdichte ρ_B (kg/m³) des verdichteten, luftporenhaltigen Betons bekannt sein.

Die Zusammensetzung des Betons der Mischerfüllung mit dem Gewicht $B = l_m + G'$ bzw. $B = (Z' + W') + G'$ ergibt sich mit folgenden Beziehungen:

$$Z' = l_m / (w + 1), W' = l_m \cdot w / (w + 1) \text{ und } G' = B - Z' - W' \text{ je in kg.}$$

Die Anteile in kg je m³ des verdichteten Betons sind dann

$$Z = \rho_B \cdot l_m / B (w + 1); W = Z \cdot w; G = \rho_B - Z - W.$$

Dabei ist allerdings vorausgesetzt, daß die Gewichte des in den Mischer gegebenen Zementleims und Zuschlags hinreichend genau ermittelt wurden.

b) Soll für eine Zementleimverpressung der Zement- und Wassergehalt von 1 m³ des lufthaltigen Zementleims nachgewiesen werden, so erhält man mit dem festgestellten ρ_{IL} und dem errechneten w (siehe Abschnitt 3.5.3) $Z = \rho_{IL} / (w + 1)$ und $W = \rho_{IL} / (1 + \frac{1}{w})$.

4. Anmerkungen zur Nachprüfung des Zementgehalts und des Wasserzementwerts durch gravimetrische Verfahren nach den Abschnitten 2 und 3

4.1 Soweit in Bestimmungsgleichungen Mischungsanteile der Soll-Zusammensetzung des Betons benutzt werden (Z oder Z und G), wurde, z. B. in den Abschnitten 2.3 und 3.2.3, dargelegt, daß bei einer hiervon abweichenden Mischungszusammensetzung ein nicht ganz zutreffender Zementgehalt oder Wasserzementwert errechnet wird.

4.2 In den Gleichungen (1) bis (5) finden sich als Rechengrößen u. a. die Dichte ρ_Z des Zements und die Rohdichte ρ_G des Zuschlaggesteins. Diese sind für den jeweils verwendeten Zement und Zuschlag ggf. einschließlich Zusatzstoffen von Fall zu Fall genau zu bestimmen; siehe dazu die beiden folgenden Abschnitte 4.3 und 4.4.

4.3 Die für die einzelnen Zementarten in DIN 1164 Teil 4, Abschnitt 2.5, aufgeführten durchschnittlichen Dichten ρ_Z [4,1], z. B. 3,10 für Portlandzement, reichen für eine genaue Berechnung nicht immer aus. Pyknometerverfahren für pulverförmige Stoffe sind in [4,2; 4,3 und 4,4] ausführlich beschrieben. Als Pyknometerflüssigkeit wird für Zement nach [4,3] und [4,4] n-Heptan verwendet, mit

dem der Zement praktisch nicht reagiert. Mit dem Anmachwasser im Beton reagiert jedoch der Zement bereits in den ersten Minuten, mithin auch bis zur Prüfung der Rohdichte des Frischbetons. Die Dichte ρ_{zh} des so in geringem Maße „hydratisierten Zements“, der aus den noch nicht hydratisierten Zementbestandteilen und den wasserhaltigen Hydratationsprodukten besteht, ist kleiner als die Dichte ρ_z des nicht hydratisierten Zements.

Die Dichte ρ_{zh} sollte daher korrekterweise bei den zur Frischbetonanalyse anzustellenden Berechnungen benutzt werden (z. B. bei der Stoffraumrechnung).

Untersuchungen zu diesem Sachverhalt werden z. Z. im Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf angestellt [4,5]. Danach ist abzuwägen, ob die etwas kleinere Dichte ρ_{zh} für Berechnungen von Bedeutung ist. In den Arbeiten [2,1 S.23], [4,6] und [4,7] wurden für die Dichte des in geringem Maße hydratisierten Zements größere Werte als für die Dichte ρ_z des nicht hydratisierten Zements errechnet. Sie können daher nur als fiktive Rechenwerte unter gewissen Voraussetzungen benutzt werden.

Berechnungen z. B. mit Gleichung (5) ergaben, daß eine um 0,010 fehlerhaft eingesetzte Dichte ρ_z beim Beton nach Abschnitt 3.2.2 einen um rd. 0,01 vom Soll-Wasserzementwert w (0,54) abweichenden Wasserzementwert zur Folge hat. (Die Auswirkung des Fehlers auf w ist nicht linear; sie hängt vom Vorzeichen des Fehlers und von der Betonzusammensetzung ab.)

4.4 Wenn zu Berechnungen die Rohdichte ρ_G des Zuschlags benötigt wird, so sollte dafür die des kernfeuchten, oberflächentrockenen Zuschlags eingesetzt werden. Die Ermittlung der Rohdichte im Meßzylinder nach DIN 4226 Teil 3 durch Wasserverdrängung [4,8] genügt wegen der unsicheren Ablesung und der kleinen Probenmenge keinen hohen Anforderungen. Die Rohdichte des Zuschlaggemisches ρ_G sollte ebenfalls mit drei Stellen nach dem Komma ermittelt werden. Günstiger dafür ist zweifellos die Ermittlung in einem großräumigen Pyknometer mit Wasser als Füllflüssigkeit; auch hierbei ist, wie bei der Bestimmung von ρ_z , auf das Einhalten gleicher Temperaturen von Pyknometer und Füllung zu achten. Zweckmäßig werden dazu Pyknometer in Form von Steilbrustflaschen mit 10 000 cm³ Inhalt, Normschliff und Steigrohraufsatz benutzt sowie entsprechend große Proben; siehe [3,4], vergleichsweise auch [4,4 S. 113/115] und [4,9]. Die Rechnung, nach dem letzten Absatz des Abschnitts 4.3 ausgeführt, ergibt, daß ein um 0,010 falsch in die Gleichung (5) eingesetztes ρ_G bereits eine Änderung von w um etwa 0,08 bewirkt.

4.5 Entsprechend wirken sich auf den errechneten Wasserzementwert auch fehlerhafte Bestimmungen von ρ_B , W und L_V oder ungenau eingesetzte Werte aus.

Wird z. B. gegenüber den Sollwerten des Betons nach Abschnitt 3.2.2 ρ_B mit einem Fehler von 5 kg/m³ oder W mit einem Fehler von 4 kg/m³ oder L_V mit einem Fehler von 2 dm³/m³ (0,2 %) in der Gleichung (5) verwendet, so weicht der errechnete Wasserzementwert um je etwa 0,05 vom Sollwert 0,54 ab.

Ähnliche oder größere Abweichungen vom wirklichen Wasserzementwert errechnen sich beim Verfahren nach Thaulow (Ab-

schnitt 2.4.1 bzw. 2.4.2), wenn T (z. B. 13,828 kg) fehlerhaft um 200 g oder V (z. B. 8 000 cm³) fehlerhaft um 50 cm³ zu klein in Gleichung (1) bzw. Gleichung (2) eingesetzt werden.

Bereits geringe Abweichungen von den richtigen Rechengrößen können also bei derartigen Berechnungen einen für die Beurteilung stark verfälschten Wasserzementwert liefern.

Diese wenigen Beispiele zeigen, daß die bei der Rechnung benutzten Größen (Gewichte, Volumina) zutreffend und mit hoher Genauigkeit ermittelt werden müssen, auch wenn dies gegenüber den praktischen Gegebenheiten übertrieben erscheint. Andernfalls und insbesondere, wenn gleichzeitig mehrere fehlerhafte Größen in die Gleichungen eingehen, kann der errechnete Wasserzementwert je nach Vorzeichen und Größe der Abweichungen von den Sollwerten für eine Beurteilung unbrauchbar werden oder u. U. auch zutreffend erscheinen, wenn sich die Fehler gegenseitig zufällig aufheben.

Eine entsprechende Umsicht verlangt auch der Rechengang; siehe dazu einige Rechenbeispiele in den vorausgegangenen Abschnitten (Verwendung eines elektronischen Taschenrechners). Allein durch starke Auf- und Abrundungen kann, je nach deren Vorzeichen, der errechnete Wasserzementwert u. U. deutlich verändert werden.

Auf die erforderliche Sorgfalt bei der Versuchsdurchführung, die Voraussetzung zutreffender Rechenwerte und auf die Rechengenauigkeit bei solchen Prüfungen wurde schon wiederholt hingewiesen, siehe z. B. [3,4], [3,5], [3,6], [3,7], [3,9] und [4,9]. Bei angemessener Erfüllung all dieser Voraussetzungen kommen aber echte Änderungen der Mischung gegenüber der Soll-Zusammensetzung im errechneten Wasserzementwert empfindlich zur Geltung.

4.6 Nach DIN 1045, Abschnitt 7.4.3.3, darf der für Beton B II bei der Eignungsprüfung festgelegte Wasserzementwert w vom Mittelwert dreier aufeinanderfolgender w -Bestimmungen nicht und von Einzelwerten um höchstens 10 % überschritten werden. Der Wasserzementwert ist für Beton B II einmal je Betoniertag zu prüfen (DIN 1084). Die für Beton mit besonderen Eigenschaften oder wegen des Korrosionsschutzes festgelegten Wasserzementwerte dürfen auch von Einzelwerten nicht überschritten werden. Für die Nachprüfung der Wasserzementwerte wird in DIN 1045 auf die Verfahren in DIN 1048 Teil 1 verwiesen (siehe dazu obige Abschnitte 2.3 und 2.4.1 sowie auch [3,8]).

Man sollte in Anbetracht der hier angesprochenen Fehlermöglichkeiten der Prüfverfahren noch eingehender der Frage nachgehen, ob und inwieweit die dadurch bedingten Streuungen des Wasserzementwerts mit den Forderungen der DIN 1045 in Einklang zu bringen sind (siehe ferner auch Abschnitt 2.3). Dies könnte dadurch geschehen, daß in einer besonderen Arbeit für unterschiedliche, genau definierte, fiktive Soll-Zusammensetzungen von Betonen mittels Programmen im elektronischen Rechner zu den verschiedenen Gleichungen einmal übersichtlich festgestellt wird, welche Abweichungen die ermittelten Rechengrößen von den Sollwerten, auch unter Berücksichtigung eines Zusammenwirkens, höchstens aufweisen dürfen und welche Rechengenauigkeit einzuhalten ist, damit der Wasserzementwert, auch von richtig abgemessenen Mischungen, möglichst zutreffend erhalten wird. Im Ver-

gleich dazu wäre durch praktische Prüfungen definierter Betonmischungen zu ermitteln, welche Versuchsstreuung auch bei sorgfältigem Vorgehen in Kauf genommen werden muß und — insgesamt — welche Vorhaltewerte für den Wasserzementwert angemessen sind; siehe auch [4,10].

Schließlich ist auch zu beachten, daß verhältnismäßig kleine Betonproben untersucht werden und deshalb der ermittelte Wasserzementwert für eine bestimmte Mischung nur repräsentativ ist, wenn die Proben sehr umsichtig entnommen werden und der durchschnittlichen Zusammensetzung der Mischung wirklich auch entsprechen.

Soweit die Rohdichte des Frischbetons und sein Luftgehalt als Rechenwerte eine Rolle spielen, sollte auch von einer einheitlichen Verdichtung der Frischbetonprobe ausgegangen werden; siehe dazu [4,11]. Auch ein zuverlässiges Verfahren zur Bestimmung des Wassergehalts des Frischbetons, d. h. seines wirksamen Wassergehalts, ist noch festzulegen, wenn, wie bei einigen Analysen, der Wassergehalt benötigt wird.

4.7 Zusammenfassend ergibt sich, daß zu einer vertrauenswürdigen Anwendung der beschriebenen Verfahren eine größere Genauigkeit der Feststellungen, als sie im allgemeinen üblich ist, nötig würde; siehe auch [4,12 und 4,13], und daß man sich klar darüber werden sollte, wie groß bei den einzelnen Verfahren die praktisch unvermeidbaren Prüfstreuungen dann noch ausfallen. Dementsprechend wäre die Zuverlässigkeit der an sich nützlichen Frischbetonprüfungen zu bewerten.

5. Ausländische Analysenverfahren

Bei der Sichtung des Schrifttums fällt auf, daß wohl eine Reihe im Prinzip verschiedenartiger Verfahrensvorschläge gemacht wurden, daß aber auch viele Verfahren sich ähneln und sich nur durch die eine oder andere Variante unwesentlich unterscheiden. Wenn man die große Zahl der Veröffentlichungen als Maßstab nimmt, ist zu folgern, daß der Frischbetonanalyse seit langem große Bedeutung beigemessen wird (siehe dazu auch Abschnitt 6). Auffallend ist dabei, daß der weitaus größte Teil der Veröffentlichungen auf den englischen Sprachraum entfällt.

Nachfolgend werden typische Verfahrenstechniken zur Kennzeichnung der vorgeschlagenen Möglichkeiten, den Frischbeton zu analysieren, soweit beschrieben, daß der quantitative und qualitative Aufwand sowie die praktische Brauchbarkeit beurteilt werden können. Zusätzliches Schrifttum findet sich z. B. in [5.1,1] bzw. [5.1,2] und in den im folgenden aufgeführten Berichten, z. B. in [5.1,14].

5.1 Gravimetrische Analysenverfahren

Zu den ersten weitergehend beachteten Analysenverfahren gehört das von *Dunagan* [5.1,3] veröffentlichte: Durch Wiegen einer Betonprobe von 4000 bis 5000 g an der Luft und unter Wasser (Balkenwaage, Auftriebsprinzip) wird das Unterwassergewicht des luftfrei verrührten Betons bestimmt, ebenso das Unterwassergewicht des durch Auswaschen über dem 0,15 mm-Sieb erhaltenen Zuschlags.

Das „Zementgewicht“ ergibt sich aus der Differenz beider Unterwasser-Gewichte und einem Faktor $q_z/(q_z - 1)$ aus der Dichte q_z des jeweiligen Zements.

Entsprechend wird auch das Zuschlaggewicht mit einem Faktor aus der Rohdichte des Zuschlags erhalten. Der Wassergehalt errechnet sich aus der Differenz zwischen dem Betongewicht und dem Zement- und Zuschlaggewicht.

Kritische Merkmale: Wiegen sind auf 1 g genau durchzuführen. Außerdem wird eine Korrektur nötig, wenn der Zuschlag eine größere Menge Feinstsand $\leq 0,15$ mm enthält. Die Zementdichte und Zuschlagrohddichte müssen vorab bestimmt werden, und bei unbekanntem Zuschlag ist der Anteil $< 0,15$ mm zusätzlich durch Trocknen zu bestimmen, ohne daß die Unterwasserwiegtung für die Zementermittlung entfallen kann. Die Unterwasserwiegtungen sind umständlich und fehleranfällig.

Viele andere Prüfungen gehen auf das Dunagan-Verfahren zurück, so auch die British Standard BS 1881 [5.1.4]. Zur Ermittlung des Zementgehalts wird entsprechend wie bei Dunagan vorgegangen. Für LP-Beton wird der Wassergehalt gesondert durch Trocknen bestimmt und bei der Berechnung des Zementgehalts benutzt. Die Unterwasserwiegtung wird mit einer halbautomatischen Balkenwaage mit 0,5 g-Ablesung durchgeführt. Auch hier erscheinen in den Bestimmungsgleichungen Zementdichte und Zuschlagrohddichte sowie Korrekturfaktoren für ausgewaschenen Feinstsand (Bestimmung durch Unterwasserwiegtung).

Murdock schlug eine Frischbetonanalyse vor [5.1.5], die auf einer Naßtrennung auf dem 0,15 mm-Sieb und der Ermittlung des Zementgehalts in der Suspension mit einem Aräometer (Senkspindel) beruht. Wenn – zur Erklärung des Vorgehens – zunächst angenommen wird, daß der Zuschlag keine Anteile $\leq 0,15$ mm enthält, werden 3 kg Beton naß ausgesiebt, der Zuschlag $> 0,15$ mm getrocknet und sein Gewicht bestimmt (Siebanalyse). Der ausgewaschene „Zement“ $\leq 0,15$ mm wird einschließlich Wasser in einem 19 l-Metallzylinder gesammelt und soviel Wasser zugefügt, daß ein bestimmtes Volumen der Füllung erhalten wird. Nach kräftigem Durchrühren der Suspension wird ein Aräometer eingesetzt und 1,5 min lang alle 10 s abgelesen; nach Durchrühren wird die Ablesung noch dreimal wiederholt. Die Ablesungen werden als Kurven in ein Diagramm eingetragen, auf den Zeitpunkt 0 extrapoliert und dafür der Mittelwert gebildet. Zu diesem Wert wird aus einer Bezugskurve der Zementgehalt in g/l Suspension abgelesen (Größenordnung 20 bis 40 g). Die Bezugskurve wird mit Suspensionen aufgestellt, die einen verschiedenen Gehalt des betreffenden Zements aufweisen.

Wenn der Zuschlag bekannterweise nur einen geringen Feinstsandgehalt aufweist und dieser in der Suspension gleichmäßig verteilt anzunehmen ist, kann eine Korrektur mittels der unterschiedlichen Dichten des Zements und des Feinstsandes an Hand von Bezugskurven für bekannte Gemische vorgenommen werden. Ohne dies und zu einer genaueren Analyse werden die salzsäureunlöslichen Rückstände des Zements, Feinstsandes und Sediments bestimmt und damit die Anteile an Zement und Feinstsand im trockenen Sediment errechnet. Der Fehler in der Bestim-

mung des Zementgehalts wird mit 2,2 % angegeben. Aus den Zement- und Zuschlaggewichten und dem Gewicht der Betonprobe ergibt sich der Wassergehalt.

Kritische Merkmale: Die Besonderheiten des Verfahrens sind also u. a. die an sich einfache Verwendung eines Aräometers (grundsätzlich ist hierbei die Temperatur der Suspension zu beachten), die Trocknung des Zuschlags $> 0,15$ mm (Berücksichtigung der Kernfeuchte bei der Errechnung des Wassergehalts des Betons), die Aufstellung einer Bezugskurve sowie die Korrektur für den Feinstsandgehalt (durch angenommene Menge, Dichte von Feinstsand und Zement oder durch chemische Analyse).

Durch eingehende Laboratoriumsversuche belegt, beschreiben *Hime und Willis* [5.1,6], wie durch eine schwere Flüssigkeit der Zement aus einer frisch gemischten Probe abgetrennt werden kann. Bei der Untersuchung wurden definierte Proben von rd. 1,5 kg und sehr unterschiedlicher Zusammensetzung benutzt. Die zu untersuchende Probe wird mit zusätzlichem Wasser und einem Ausflockungsmittel versehen, geschüttelt und dann durch ein 0,6 mm-Sieb naß getrennt. Nachdem sich die Suspension $\leq 0,6$ mm abgesetzt hat, wird das überstehende Wasser vorsichtig abgehert, der Feststoff (Zement und Feinstsand) 45 min lang durch Hitze getrocknet und gewogen. Daraus werden nach gründlichem Zerteilen zwei 25 g-Proben entnommen, je in ein graduiertes Zentrifugenröhrchen gebracht und bis zur 50 ml-Marke mit einer Flüssigkeit aufgefüllt, deren Dichte mit 2,80 zwischen der des Zements und des Feinstsandes liegt. Die Füllungen werden in Abschnitten mit zwischenzeitlichem Aufstochern der oberen Schicht insgesamt 11 min zentrifugiert und die Volumina der unten abgesetzten, sich deutlich vom Feinstsand abzeichnenden Zementschicht an beiden Röhrchen abgelesen. Aus diesem Zementvolumen wird das entsprechende errechnet, das sich für die gesamten Anteile $\leq 0,6$ mm ergeben würde („äquivalentes Volumen“). Aus einer Bezugskurve zwischen „äquivalentem Volumen“ und dem Zementgehalt der Mischung (z. B. kg/m^3), die auf diese Weise mit mehreren definierten Mischungen unterschiedlichen Zementgehalts vorab aufgestellt wurde, kann der Zementgehalt für beliebige Mischungen aus gleichen Ausgangsstoffen für ein jeweils ermitteltes „äquivalentes Volumen“ abgelesen werden. Je nach Zementtyp ergaben sich mit mehreren Zuschlägen gegenüber dem Soll-Zementgehalt gemittelte Unterschiede zwischen 0 und 21 kg/m^3 . Unter sonst gleichen Verhältnissen wirkten sich verschiedene Zemente (Einfluß der Mahlfeinheit) mit einer Abweichung von 12 kg/m^3 und verschiedener Sand mit 7 kg/m^3 (Einfluß der Dichte des Feinstsandes) aus. Eine Prüfung soll $1\frac{1}{4}$ Stunden benötigen.

Kritische Merkmale: Das Verfahren geht nur auf die Ermittlung des Zementgehalts aus und gibt so nur beschränkt Auskunft über die Betonzusammensetzung. Es erfordert eine Zentrifuge, die Herstellung einer schweren Flüssigkeit bestimmter Dichte, die Aufstellung einer Bezugskurve und lieferte bei den Laboratoriumsversuchen z. T. größere Abweichungen vom Soll-Zementgehalt.

Ein Verfahren, das die Ermittlung der Gewichtsanteile von Zement und Zuschlag in einer Betonprobe pyknometrisch erlaubt, wurde von *J. Laing* beschrieben [5.1,7]. Dazu wird eine Metallkanne von rd. 18 l Fassungsvermögen und verengtem Hals, der oben in

einer trichterförmigen Erweiterung endet, benutzt. Beim Füllen mit Wasser stellt sich die Füllhöhe (Volumen) mittels eines in den verengten Hals mündenden Überlaufröhrchens ein. Die Betonprobe, z. B. rd. 17 kg bei einem Größtkorn von 19 mm, wird auf Sieben über dem Auffangtrichter der Kanne durchgewaschen. Der Durchgang durch das 0,15 mm-Sieb und das Waschwasser werden in der Kanne aufgefangen und der Inhalt bis zum Überlauf mit Wasser gefüllt. Die Kanne mit dem „Zement“ wird auf 3 g genau gewogen, und aus ihrem Gewicht und Volumen sowie einem Faktor mit der Zementdichte (siehe oben bei Dunagan) wird der Zementgehalt der Probe errechnet. Entsprechend wird mit dem gewaschenen Zuschlag > 0,15 mm verfahren.

Feinstsand, der in die Suspension gespült wurde, wird mit dem im unverarbeiteten Zuschlag vorhandenen Anteil berücksichtigt. Man erhält so den Zement- und Zuschlaggehalt der Probe sowie aus der Differenz zur Einwaage — was nicht angeführt und offenbar von weniger Interesse war — den Wassergehalt bzw. Wasserzementwert.

Je nach Größtkorn des Betons kann die Analyse innerhalb von 10 bis 20 min durchgeführt werden. Bei sorgfältig durchgeführtem Versuch soll das Zuschlag-Zement-Verhältnis mit $\pm 2\%$ Streuung ermittelbar sein.

Kritische Merkmale: Bei dieser Analyse wird ein einfaches Gerät benutzt. Es benötigt keine Trocknung, jedoch die Zementdichte und Rohdichte des Zuschlags sowie eine zuverlässige Waage für große Gewichte und Ablesungen in g. Der Feinstsandanteil im Zuschlag muß gesondert ermittelt und berücksichtigt werden.

Ein Verfahren von *Bavelja* [5.1,8; 5.1,9], das verschiedentlich in Baustellenlaboratorien angewendet wurde, benutzt eine Naßsiegung durch das 0,15 mm-Sieb (Betonproben je nach Zuschlaggrößtkorn bis 3000 g) und ein Abpressen des Wassers aus der Suspension in einem Druckfilter, das an einen Luftkompressor oder eine Fuß-Luftpumpe angeschlossen ist. Dabei werden die abgefüllte Betonprobe nach Zufügen einer gleichen Gewichtsmenge Wasser in einem Flaschenschüttler zunächst 10 min lang aufgeschlämmt, auf dem 4,8 mm- und 0,15 mm-Sieb abgespült, das Wasser der auf dem Filter aufgegangenen Feinststoffe mit einem Druck von 1,5 bis 2,0 kp/cm² ausgepreßt und gesammelt. Alle Fraktionen werden bei 200 °C getrocknet. Aus den Gewichten der einzelnen Fraktionen wird dann der „Zement“- und Zuschlaggehalt der Probe errechnet und aus der Differenz zum Frischbetongewicht deren Wassergehalt. Bei der Errechnung des Zement- und Zuschlaggehalts wird ein Korrekturwert für den ausgewaschenen Feinstsandgehalt nötig, der gesondert am Originalzuschlag bestimmt wird. Für den Zementgehalt wird außerdem noch ein Korrekturwert für den beim Auswaschen gelösten Zementanteil vorgesehen. Der Wasserzementwert soll sich mit einer Genauigkeit von $\pm 0,02$ bis 0,03 bestimmen lassen und der Zeitaufwand je Betonprobe rd. eine Stunde betragen.

Kritische Merkmale: Außer einer genauen Waage (0,5 g) und üblichen Laborgeräten sind ein Schüttelapparat und ein Druckfiltergerät erforderlich. Die Naßsiegung verlangt eine Korrektur wegen des ausgewaschenen Feinstsandes, und die ermittelten Fraktionen werden zur Gewichtsbestimmung getrocknet.

Eine Naßsiebung des Betons durch das 0,16 mm-Sieb wird von *P. Esenwein* und *E. Rehmann* [5.1,10] mit technischem Alkohol durchgeführt. Die Fraktionen („Zement“ $\leq 0,16$ mm und Zuschlag $> 0,16$ mm) werden durch Verbrennen des Alkohols getrocknet. Der für die Analyse benutzte Beton wird zur Bestimmung seiner Rohdichte vorher in ein 1 dm³-Meßgefäß eingerüttelt. Hiermit und mit den direkt ermittelten Trockengewichten des „Zement“- und Zuschlaganteils ergibt sich als Differenz der Wassergehalt der Probe.

Bei verfügbarem Zuschlag wird dessen Feinstsand $\leq 0,16$ mm direkt bestimmt und damit der ermittelte Zement- bzw. Zuschlaggehalt korrigiert. Ist der Zuschlag nicht verfügbar, so wird im Passon-Apparat durch Salzsäurebehandlung im durchgewaschenen Feinstoff $\leq 0,16$ mm dessen Gehalt an Kalksteinmehl und säureunlöslichem Silicatfeinstsand bestimmt und damit der Gehalt an Feinstsand im durchgewaschenen Feinstoff errechnet. Der Kalksteingehalt kann unmittelbar abgelesen werden; der Gehalt an Silicatsand wird als Rückstand nach Auswaschen und Trocknen durch Wiegen erhalten. Die Analyse soll 20 bis 30 min beanspruchen.

Kritische Merkmale: Durch die chemische Ermittlung des Feinstsandes entfällt die unsichere Korrektur mit dem Feinstsandanteil aus einem vorgegebenen Zuschlaggemisch. Der Passon-Apparat erfordert eine gewisse Übung (genaue Wiegunen auf 0,1 g). Die zu untersuchende Betonprobe ist verhältnismäßig klein (1 dm³).

Bei einer Frischbetonanalyse, die der Ermittlung des Porenraums und des Wasserzementwerts zur Abschätzung der zu erwartenden Druckfestigkeit dient, wird von *Lehmann, Casper, Gangnus und Reinsdorf* [5.1,11] der Wassergehalt einer 2 kg-Betonprobe durch Trocknen (Verbrennen eingemischten Methanols) bestimmt und der Gehalt an Stoffen $\leq 0,2$ mm und Zuschlag $> 0,2$ mm durch Auswaschen auf Sieben und nachfolgendes Trocknen. Der Zementgehalt errechnet sich dann aus dem Trockengewicht aller Stoffe abzüglich des Zuschlaggewichts $> 0,2$ mm und des Gewichts des durchgewaschenen Feinstsandes $\leq 0,2$ mm. Der Anteil des durchgewaschenen Feinstsandes wird an einer Zuschlagprobe durch Siebversuch gesondert bestimmt.

Kritische Merkmale: Das Verfahren entspricht etwa DIN 52 171 [1,4].

Ein neuerdings auch in der Bundesrepublik Deutschland vorgestelltes, elektrisch betriebenes, programmgesteuertes Auswaschgerät, über das *Forrester, Black und Lees* berichten [5.1,12; 5.1,13], sondert die Anteile $\leq 0,15$ mm aus einer 8 bis 10 kg-Betonprobe automatisch ab. Die Wasserströmung ist so eingestellt, daß nur die feineren Teile ausgetragen werden (abgestimmt auf eine bestimmte Dichte des Zements und des Feinstsandes). Ein Teil hiervon (10 %; 90 % Zement und Feinstsand werden mit rd. 75 l Waschwasser abgelassen) passiert ein 0,15 mm-Sieb und setzt sich, mit einem Flockungsmittel versehen, in ein Gefäß mit bekanntem Volumen ab. In diesem befinden sich dann der abgesetzte „Zement“ und Wasser, dessen Niveau durch ein Überlaufröhrchen eingestellt wird. Das Gefäß wird abgenommen, gewogen und der Zementgehalt der Betonprobe aus einer Bezugskurve abgelesen.

Die für jedes Gerät aufgestellte Bezugskurve gibt die Beziehung

zwischen Gefäßgewicht und dem Gewicht des Feststoffes $\leq 0,15$ mm wieder. Da das Gefäß ein bekanntes Volumen von Feststoff + Wasser aufweist, ist dessen Gewicht dem Gewicht des enthaltenen Feststoffes proportional (letzten Endes Bestimmung auf pyknometrischer Grundlage, unter Annahme einer bestimmten, gleichbleibenden Dichte der Feststoffe). Je nachdem, ob wenig Feinstsand ($< 2\%$) oder mehr in dem Gefäß vorauszusetzen ist, sind unterschiedliche Korrekturverfahren für den abgelesenen Zementgehalt vorgesehen.

Kritische Merkmale: Mit dem Gerät, das um DM 10 000 kosten dürfte, kann lediglich der Zementgehalt einer Betonprobe, allerdings in weniger als 10 min, ermittelt werden. Die maximale Abweichung vom wirklichen Zementgehalt fand sich z. B. für Beton mit einer Rohdichte von 2400 kg/m^3 und wenig Feinstsand bei einer Aussagewahrscheinlichkeit von 95% zu $\pm 18,7 \text{ kg/m}^3$.

Über ein besonderes Auswaschgerät berichten auch *Kenny und Tulloch*. Die Angaben über dieses Verfahren sind [5.1,14 S. 16] entnommen. Hiernach werden aus 2 kg Beton über einem Satz schwingender Siebe alle Teile $\leq 0,21$ mm ausgewaschen. Von diesem Durchgang wird im Gerät eine Teilprobe abgetrennt, dann getrocknet und zerrieben. Diese Teilprobe wird mit Bromoform ($\rho = 2,9$) versetzt, so daß der Sand des Durchgangs $\leq 0,21$ mm aufschwimmt und der Gehalt an Zement und Feinstsand bestimmt werden kann, ohne daß eine repräsentative Zuschlagprobe für eine Korrektur erforderlich ist. Das Verhältnis von Zuschlag zu Zement soll bei 96% der durchgeführten Prüfungen innerhalb $\pm 3\%$ feststellbar sein. Größere Abweichungen fanden sich, wenn der Beton Kalkstein oder Basalt enthielt.

Kritische Merkmale: Dieses Verfahren, 1949 ähnlich auch als ASTM-Vornorm vorübergehend aufgenommen, hat sich jedoch nicht eingeführt, da es besondere Geschicklichkeit verlangt.

Nachteile oder Schwierigkeiten, die bekannten Analysenverfahren eigen sind, waren in den *Niederlanden* Anlaß, ein neues Verfahren zu entwickeln [5.1,15; 5.1,16]. (Der Bericht [5.1,15] enthält u. a. auch eine eingehende Übersicht und Beurteilung einiger bekannter Analysenverfahren.)

Bei dem vorgestellten Verfahren wird die an der Luft gewogene Frischbetonprobe (5 kg) in einem Gefäß (z. B. Luftpyknometer) luftfrei mit Wasser verrührt, das Gefäß mit Wasser gefüllt, geschlossen und gewogen. Danach wird aus der Probe über dem 2 mm- und 0,15 mm-Sieb der Anteil $\leq 0,15$ mm gewaschen und der Zuschlag $> 0,15$ mm mit dem wassergefüllten Gefäß gewogen. Das Gewicht des mit Wasser allein gefüllten Gefäßes ist bekannt, so daß sich nach dem Pyknometerprinzip aus diesen vier Gewichten der Zement-, Zuschlag- und Wassergehalt mit den dafür abgeleiteten Gleichungen errechnet. In diesen kommt wieder der Faktor mit der Zementdichte bzw. Zuschlagrohddichte vor (siehe oben bei Dunagan). Außerdem sind durch besondere Feststellungen erhaltene Korrekturfaktoren eingeführt, die den Zement berücksichtigen, der über dem 0,15 mm-Sieb zurückbleibt bzw. den Feinstsand im gewaschenen Anteil $\leq 0,15$ mm. Für kieseligen Zuschlag mit höchstens 1% Feinstsand und PZ-Beton sonst unbekannter Zusammensetzung sind zur praktischen Anwendung vereinfachte Gleichungen ohne Korrekturfaktoren aufgeführt.

Die Abweichung vom Sollwert, die mit 90 % Wahrscheinlichkeit nicht überschritten wird, wurde unter praktischen Bedingungen für Beton unbekannter Zusammensetzung ohne Zusatzmittel beim Zementgehalt zu $\pm 10\%$ und beim Wasserzementwert zu $\pm 0,04$ festgestellt. Diese Genauigkeit genügt der niederländischen Norm NEN 3202 – Lieferung von Beton – nicht, wonach der Zementgehalt nicht mehr als 7,5 % vom festgelegten abweichen darf. Die Analyse kann in 40 bis 50 min durchgeführt werden.

Kritische Merkmale: Das Verfahren benutzt eine Kombination von Naßsiebung (Abtrennung der Feinststoffe $\leq 0,15$ mm) und Wiegen von Proben im wassergefüllten Pyknometergefäß. Zur Berechnung der Betonzusammensetzung werden wieder Korrekturwerte benutzt, außerdem die Dichte des Zements und Rohdichte des Zuschlags.

Von *Werthmann* [5.1,17] wird wie in der ÖNORM 3303 – Betonprüfung – zunächst der Wassergehalt einer Betonprobe durch Darren bestimmt und an einer zweiten Betonprobe der Zuschlaganteil durch Naßsiebung in die Kornanteile $\leq 0,125$ mm und $> 0,125$ mm zerlegt [5.1,17]. Das Wasser der Suspension $\leq 0,125$ mm wird durch eine Filternutsche abgesaugt, der verbleibende Feststoff getrocknet und davon eine kleine Probe auf 670 °C erhitzt, um das Hydratwasser aus vorhandenen Neubildungen wieder auszutreiben. Mit der Analysenwaage werden hiervon mehrere Gramm in Zentrifugengläser eingewogen und mit einer Schwereflüssigkeit ($\rho = 2,96$) versetzt. Nach dem Zentrifugieren werden durch Abfiltrieren die Feststoffanteile mit $\rho < 2,96$ und $\rho > 2,96$ erhalten und ihr Gewicht mit der Analysenwaage bestimmt. Die Gleichung für den eigentlichen Zementanteil in der Probe schließt Korrekturwerte ein, die sich aus dem gesonderten Erhitzen einer Zement- und Feinstsandprobe bei 650 °C ergeben sowie aus gesonderter Bestimmung von Anteilen im Zement und Feinstsand, die eine kleinere bzw. größere Dichte als 2,96 aufweisen.

In der Gleichung zur Umrechnung des ermittelten Zementanteils auf den Zementgehalt in 1 m³ Beton erscheinen die Rohdichte des verdichteten Betons, sein Zuschlaganteil $> 0,125$ mm und sein durch Darren ermittelter Wassergehalt. Als Prüfunsicherheit für den Zementgehalt fand sich bei 22 Laboratoriumsmischungen mit 300 kg Zement/m³ ein Wert von rd. 4 % bei einem Vertrauensbereich von 95 %. Bis ein Ergebnis vorliegt, dürften mehrere Stunden vergehen.

Kritische Merkmale: Das Verfahren verlangt u. a. eine Naßsiebung, das Arbeiten mit der Analysenwaage und das Trennen von Feinststoffen in der Zentrifuge mit einer schweren Flüssigkeit sowie verschiedene Trocknungs- und Erhitzungsvorgänge. Es erlaubt die direkte Bestimmung des ausgewaschenen Zuschlaganteils $\leq 0,125$ mm, wozu aber wieder Feinkorrekturen benutzt werden, die auf Bestimmungen an den als verfügbar vorausgesetzten Ausgangsstoffen beruhen.

5.2 Chemische Verfahren

Einige der unter 5.1 aufgeführten „gravimetrischen Verfahren“ benutzten chemische Analysen nur zur genaueren Erfassung des Feinstsandanteils im ausgewaschenen Zement-Feinstsand-Gemisch

(z. B. Murdock sowie Esenwein und Rehmann). Nachfolgend werden zwei typische Verfahren aufgeführt, die erlauben, den Wasser- und Zementgehalt bzw. den Wasserzementwert einer Frischbetonprobe überwiegend durch chemische Untersuchungen festzustellen.

5.2.1 Ein von Kelly und Vail empfohlenes und häufig untersuchtes Verfahren [5.2,1 bis 5.2,5] geht zur Feststellung des Wassergehalts von der Verringerung der Konzentration einer Chloridlösung durch das Wasser im Beton aus. Der Zementgehalt wird über den CaO-Gehalt einer aus dem Beton ausgewaschenen Zement-Feinstsand-Suspension bestimmt.

Wassergehalt. Die Betonprobe (1000 g) wird mit 500 ml einer 0,5 n Natriumchloridlösung 3 min lang im Schüttelapparat vermischt. (Für den Fall, daß der Beton selbst schon Chlorid enthalten könnte, wie z. B. durch chloridhaltiges Anmachwasser oder Zuschlag von der Meeresküste, wird zur Korrektur noch eine Null-Prüfung einer anderen mit 500 ml destilliertem Wasser versetzten Betonprobe ebenso durchgeführt.) Nach einer Absetzzeit von 3 min werden 50 ml der klaren überstehenden Flüssigkeit mit einer Pipette entnommen und, unter anderem, mit 10 ml einer 50%igen Salpetersäure versetzt. Nach Zugabe von Silbernitrat wird bis zum rotbraunen Farbumschlagpunkt mit Kaliumrhodanid (Kaliumthiocyanat) zurücktitriert (Rücktitration nach Volhard) und die verbrauchte Menge an Kaliumrhodanid abgelesen. Mit dieser Menge, gegebenenfalls mit der Null-Prüfung korrigiert, wird dann aus einem Diagramm (ml Kaliumrhodanid zu % Wasser in der Probe) der Wassergehalt der Probe abgelesen.

Der Zeitaufwand für diese Prüfung wird mit 7,5 min angegeben; für die Prüfung werden einige im chemischen Laboratorium verfügbare Glasgeräte benötigt (Flaschen, Pipetten und Büretten), die, wie vorgeschlagen wird, auch in einem halbautomatischen Meß- und Zuteilsystem vereinigt werden können. Dazu kommen sechs verschiedene Lösungen bzw. Reagenzien.

Die Untersuchungen zeigten, daß, verglichen mit den Sollwerten, die Prüfergebnisse für den Wassergehalt (ohne Kernfeuchte) etwas repräsentativer waren als für den Gesamtwassergehalt; sie waren auch etwas von der stofflichen Zusammensetzung des Betons abhängig. Zum Beispiel betrug das Verhältnis des ermittelten Wassergehalts zum Soll-Wassergehalt (= 100 %) für Beton mit quarzitischem Zuschlag 94,2 % und mit Kiessand 100,2 %. Bezogen auf 33 Mischungen von Baustellenbetonen, deren Zuschlag allerdings getrocknet worden war, lag das Verhältnis des ermittelten Wassergehalts zum Soll-Wassergehalt (= 100 %) zwischen 92 % und 107 %, im Mittel bei 100 %. (Dies entspricht bei durchschnittlichen Betonen mit 300 kg Zement/m³ immerhin einer Abweichung von etwa ± 131 Wasser/m³ oder für den Wasserzementwert von $\pm 0,04$.)

Zementgehalt. Für die Untersuchung der 1000 g-Betonprobe wird ein weitgehend automatisches Gerät benutzt, das aus Sieben (4,8 mm und 0,3 mm), einem Rühr- und Waschwerk und einem Meß- bzw. Zuteilsystem für Flüssigkeiten besteht. Ein bestimmtes Volumen der gewonnenen Suspension < 0,3 mm wird im Gerät mit Salpetersäure und Wasser versetzt, um den Zement zu lösen.

Dann wird mit einem Flammenphotometer der Ca-Gehalt der Säurelösung bestimmt. (Das Flammenphotometer wird zuvor mit einer Standard-Kalklösung und mit destilliertem Wasser eingestellt.) Der Zementanteil (%) der Betonprobe ergibt sich dann aus einer vorher aufgestellten Bezugskurve (Galvanometeranzeige zu % Zement).

Man bestimmt also den CaO-Gehalt der Lösung und errechnet daraus den Zementgehalt mit der Voraussetzung, daß der CaO-Gehalt der Lösung nur aus dem Zement stammt, dessen CaO-Gehalt bekannt ist oder angenommen wird. Eine geringere Genauigkeit ist zu erwarten, wenn der feine Zuschlag einen hohen Calciumgehalt aufweist; ggf. ist eine gesonderte Zuschlag-Nullprüfung erforderlich.

Der beim Versuch bestimmte Zementgehalt fand sich zum Soll-Zementgehalt (= 100 %) im Mittel z. B. für Betone mit Flußkies-sand zu 94 % und für Betone mit kalkhaltigem Zuschlag zu 105 %. Der Zeitaufwand wird mit etwa 7 min angegeben.

Kritische Merkmale: Vom Standpunkt des Chemikers aus gesehen, handelt es sich bei dieser Wasser- und Zementgehaltsbestimmung wohl um einfache Analysenverfahren. Damit sind aber für ein Betonlaboratorium die Herstellung von bestimmten Lösungen und der Umgang mit Analysengeräten verbunden, u. a. mit dem Flammenphotometer, das eine laufende Eichung verlangt. Die Verfahren setzen somit gewisse Fertigkeiten und Verständnis für die chemischen Vorgänge voraus. Auch wenn an Stelle der flammenphotometrischen Bestimmung des Calciumgehalts ein einfacheres Verfahren treten würde, bei dem man z. B. mit Titration (Farbumschlag) arbeiten könnte, sollte nicht übersehen werden, daß nur 1000 g-Betonproben untersucht werden (etwa 0,6 dm³ unverdichteter Beton). Es dürfte schwierig sein, diese kleine Menge als repräsentative Probe der zu prüfenden Baustellenmischung zu entnehmen.

5.2.2 Von *Carlsen und Gukild* [5,2,6] wurde ebenfalls ein chemisches Verfahren entwickelt; mit ihm wird der Wasserzementwert direkt ermittelt. Dabei wird davon ausgegangen, daß im Wasser einer Zementsuspension aus dem Zement stammende Ionen in einer dem Zementgewicht proportionalen Menge gelöst sind und daß deren Konzentration daher ein Maß für das Verhältnis Wasser zu Zement ist. Aus verschiedenen Gründen wurde das wasserlösliche Chromat (Cr₂O₃) des Zements als Analysenkomponente gewählt.

Aus dem Frischbeton werden mit einem einfachen Vakuum-Filtergerät (Saugzylinder) zwischen 1 und 5 ml klare Flüssigkeit abgesaugt. Dies und das Einführen des mit einem Papierfilter zwischen zwei Lochplatten versehenen Saugzylinders ist nur bei Beton mit wenigstens plastischer Konsistenz direkt möglich. (Bei steiferem Beton wird einer 2 l-Betonprobe eine definierte Wassermenge zugesetzt.)

Ein genau bestimmtes Volumen der abgesaugten Flüssigkeit wird dann in einem Meßgefäß mit Wasser verdünnt, mit verdünnter Schwefelsäure angesäuert und mit einer Diphenylcarbazid-Lösung als Reagens versetzt (violette Färbung der Flüssigkeit). Das Meßgefäß wird bis zu einem genauen Endvolumen mit Wasser aufge-

füllt und der Extinktionswert (optische Dichte der Farbintensität) dieser Lösung in einer 1 cm-Küvette im Photometer abgelesen. Mit diesem Extinktionswert E_B und einem Vergleichs-Extinktionswert E_V errechnet sich der Wasserzementwert der Betonprobe zu $w_B = w_V \cdot E_V/E_B$. (Der Vergleichs-Extinktionswert E_V wird mit dem gleichen Verfahren für eine Suspension erhalten, die den verwendeten Zement und Soll-Wasserzementwert w_V des Betons aufweist.)

Kritische Merkmale: Es wird eine kleine Flüssigkeitsmenge aus dem Beton abgesaugt (1 bis 5 ml), von deren Chromatgehalt angenommen wird, daß er dem des durchschnittlich im Wasser der Mischung vorhandenen entspricht. Zur Vergleichsmessung muß der verwendete Zement verfügbar sein. Steifer Beton erfordert den Umweg über eine besondere Probe, der Wasser zugegeben wird. Das Prüfergebnis ist von der Zeit zwischen Mischbeginn und Prüfung abhängig. Die Prüfung wird fraglich, wenn der Beton Ton und reduzierende Bestandteile (z. B. Sulfid) enthält, weil dann das Chromat absorbiert bzw. reduziert wird und nicht mehr erfaßt werden kann. Einer Anwendung des Verfahrens soll eine Erprobung des Meßprinzips mit den praktisch verwendeten Stoffen vorausgehen. Das Verfahren verlangt Übung beim Ansetzen der Lösungen, beim Umgang mit kleinen Flüssigkeitsmengen und mit dem Photometer. Bei Beachtung aller Umstände soll der Wasserzementwert innerhalb einer Fehlergrenze von $\pm 5\%$ bestimmbar sein.

5.3 Anmerkungen zu den im Ausland entwickelten gravimetrischen und chemischen Analysenverfahren

5.3.1 Die hier als typische Vertreter einzelner Verfahrenstechniken beschriebenen Frischbetonanalysen unterscheiden sich im wesentlichen durch:

- Abtrennen von Zement und Feinstsand, Wiegen unter Wasser (Auftriebsverfahren) [5.1,3 und 5.1,4];
- Naßsiebung, Dichtebestimmung der Suspension mit dem Aräometer, Aufstellen einer Bezugskurve für den Zementgehalt [5.1,5];
- Naßsiebung, Trennen von Zement und Feinstsand durch Zentrifugieren in schwerer Flüssigkeit, Aufstellen einer Bezugskurve für den Zementgehalt [5.1,6];
- Naßsiebung, pyknometrische Bestimmung des Feinststoff- und Zuschlaggehalts [5.1,7];
- Naßsiebung, Abfiltrieren der Feinststoffe durch Preßdruck [5.1,8 und 5.1,9];
- Naßsiebung, Trocknung der Fraktionen [5.1,10];
- Naßsiebung, Trocknung des Betons und der Fraktionen [5.1,11];
- automatische Naßsiebung, automatische Abtrennung einer Probe der Feinststoffsuspension, Bezugskurve für den Zementgehalt [5.1,12 und 5.1,13];

- automatische Naßsiegung, Trocknung einer Feinststoffprobe und Trennung in Zement und Feinstsand durch eine schwere Flüssigkeit [5.1,14];
- Naßsiegung, pyknometrische Bestimmungen mit dem Beton und den Fraktionen [5.1,15 und 5.1,16];
- Naßsiegung, Trocknungsvorgänge, Trennen von Zement und Feinstsand durch schwere Flüssigkeit [5.1,17];
- Bestimmung des Wassergehalts durch Zugabe einer Chloridlösung, Titrierungen (Farbumschlag), Bezugskurve und Bestimmung des Zementgehalts durch Naßsiegung, Lösung des Zements der Suspension durch Salpetersäure, flammenphotometrische Bestimmung des CaO-Gehalts der Suspension, Bezugskurve für den Zementgehalt [5.2,1 bis 5.2,5];
- Absaugen von Wasser aus dem Beton, Zugabe einer Reagenslösung, Bestimmung der optischen Dichte im Photometer, Vergleich mit einem Bezugs-Sollwert, Errechnung des Wasserzementwerts [5.2,6].

5.3.2 Allgemein gesehen sind einige Verfahren auf die Bestimmung der Anteile von Z, G und W insgesamt ausgerichtet. Mehrere andere gehen nur auf die Bestimmung des Zementanteils aus und würden für die Errechnung der anderen Bestandteile der untersuchten Probe zusätzliche Feststellungen verlangen.

Die Verfahren, die eine Naßsiegung bzw. pyknometrische oder Auftriebsbestimmungen einschließen, benutzen eine mehr oder weniger genaue bzw. umständliche Korrektur für den mit dem Zement ausgewaschenen Feinstsandanteil sowie für die Berechnung des Zement- bzw. Zuschlaganteils, deren Dichte bzw. Rohdichte.

Die etwas prekären Verfahren, bei denen mit schweren Flüssigkeiten gearbeitet wird, erlauben eine direkte Bestimmung des Zementanteils.

Die drei chemischen Verfahren setzen zur Bestimmung des Wassergehalts bzw. des Zementgehalts Bezugswerte voraus.

Diese kurz zusammengefaßten Besonderheiten und die dazu in den Abschnitten 5.1 und 5.2 umrissenen einzelnen Verfahrenstechniken führen alles in allem zu dem Schluß, daß keine der hier beschriebenen, im Ausland bekannten Frischbetonanalysen voll befriedigt, sofern man von einer die Mischung repräsentativ wiedergebenden Analyse für das Baustellenlaboratorium verlangt, daß sie mit einfachen Geräten und für den Prüfer einsichtig durchführbar ist, ferner wenig Fehlermöglichkeiten bietet und möglichst auch keine Korrektur- oder Bezugswerte benötigt.

6. Elektrische und kernphysikalische Meßverfahren

Zu diesen Verfahren werden nur Besonderheiten herausgestellt, die zur Beurteilung der Anwendbarkeit für eine *Frischbetonanalyse* von allgemeinerer Bedeutung sind. Wegen der Techniken selbst wird auf fachkundige Veröffentlichungen verwiesen.

6.1 Elektrische Meßverfahren

6.1.1 Nach Durchsicht des verfügbaren Schrifttums können für die Frischbetonanalyse zwei Verfahren in Betracht gezogen werden, die auf der Messung der elektrischen Leitfähigkeit mittels zweier Elektroden oder der Dielektrizitätskonstanten mittels zweier Kondensatorplatten beruhen.

Mit größer werdendem Wassergehalt eines Stoffes nimmt unter sonst gleichbleibenden Verhältnissen seine elektrische Leitfähigkeit zu, ebenso auch die Dielektrizitätskonstante (z. B. bei der kapazitiven Messung).

Beide Verfahren werden bisher vorwiegend für Messungen des Wassergehalts von Festbeton und von Schüttgütern angewendet und im letzteren Fall bei der Betonherstellung zur kontinuierlichen Bestimmung des Wassergehalts des Sandzuschlags. Bei weitgehender Mechanisierung der Abmeßanlage ist es damit möglich, über die Eingabe der Meßgrößen in die Dosiersteuerung einen veränderlichen Wassergehalt im Sand zu erfassen und bei der Wasserzugabe bzw. der Sandzuteilung zu berücksichtigen.

Berichte über die Ermittlung des Wassergehalts von Sandzuschlägen durch Messung der elektrischen Leitfähigkeit (eL) und der Dielektrizitätskonstante (Dk) finden sich u. a. bei

Frening [6.1,1]: Grundsätzliche Ausführungen zur Technik der Feuchtmessungen im Zuschlag (eL und Dk); physikalische und stoffliche Einflüsse; Vor- und Nachteile.

Ernst [6.1,2]: Einflüsse der Anordnung der Meßstellen (eL) im Zuschlagbunker; Bedingungen für den Meßstrom.

Slowak [6.1,3]: Ausführliche Behandlung der Grundlagen; physikalische und stoffliche Einflüsse des Zuschlags auf das Meßergebnis (eL und Dk); Fehlergrenzen.

Feger [6.1,4]: Fehlerquellen bei der Dosierung; Meßmöglichkeiten (eL und Dk) für die Zuschlagfeuchte.

Tran Ngoc Lan und A. Jallet [6.1,5]: Grundlagen zum Verfahren (Dk); Einflußgrößen des Sandes; Meßergebnisse bei Mischanlagen.

Wedler [6.1,6]: Einflüsse auf die Meßergebnisse (eL und Dk); praktische Anwendung bei der Sand-Wasser-Zumessung.

Auch Lück geht bei der Darstellung und Beurteilung zahlreicher Feuchtigkeitsmeßverfahren auf die Leitfähigkeitsmessung und die dielektrische Messung ein und stellt deren Meßeigenschaften einander gegenüber, ohne allerdings auf betontechnologische Verhältnisse weitergehend Bezug zu nehmen [6.1,7 bis 6.1,10; mit umfangreichem Schrifttum]. Ebenfalls zahlreiche Feuchtemeßverfahren werden von Monfore in einer Literaturbeschreibung englischsprachiger Berichte beschrieben [6.1,11; mit umfangreichem Schrifttum]. Die Leitfähigkeitsmessung und die dielektrische Messung werden hier im Hinblick auf Messungen der Feuchtigkeit in Böden und z. T. auch im erhärteten Beton behandelt; zum letzteren siehe auch [6.1,12 und 6.1,13].

Leitfähigkeitsmessungen zur kontinuierlichen Wassergehaltsbestimmung von Sanden in der Abmeßanlage wurden auf Groß-

baustellen schon vor 20 Jahren angewendet; siehe z. B. [6.1.14 und 6.1.15]. Die Messung der Leitfähigkeit wird auch heute bei großen Betonmischanlagen bevorzugt, weil damit ein verhältnismäßig geringer Geräteaufwand verbunden ist.

6.1.2 Aus den Untersuchungen über die Messung der Sandfeuchte (siehe insbesondere [6.1,1 und 6.1,3]) geht hervor, daß die Meßwerte der *elektrischen Leitfähigkeit* bei einem bestimmten Wassergehalt des Schüttgutes (Sandes) sehr stark von der Schüttdichte abhängen, aber auch von der Ionenkonzentration des im Schüttgut enthaltenen Wassers (gelöste Stoffe). Die elektrische Leitfähigkeit hängt ferner von der Kornform und der Kornverteilung (Wasserverteilung) sowie von der Größe der Elektroden ab.

Allgemein wäre im Hinblick auf eine hier interessierende Prüfung des Wassergehalts im wassergesättigten Frischbeton zu beachten, daß die elektrische Leitfähigkeit bei Sandschüttungen überwiegend von der Länge und vom Querschnitt der zusammenhängenden Wasserbahnen sowie deren Verteilung im Meßquerschnitt bestimmt wird und daß sie mit zunehmenden, hohen Wassergehalten weniger stark ansteigt.

Wenn eine Eichung des Feuchtemessers für die vorkommenden Wassergehalte unter sonst gleichen Verhältnissen vorgenommen wird, die an der Meßstelle herrschen (Schüttdichte, Ionenkonzentration des Wassers, Temperatur usw.), können die genannten Einflußgrößen in engen Grenzen gehalten werden. Wiederholte Eichungen sind angezeigt, wenn eine Änderung der einen oder anderen Einflußgröße anzunehmen ist.

6.1.3 Demgegenüber erfordert das *dielektrische Verfahren* zur Messung der Sandfeuchte nach den Berichten in Abschnitt 6.1.1 eine weitergehende und teurere apparative Ausstattung. Es eignet sich offenbar bei hohem Wassergehalt weniger gut. Auch bei ihm hängen die Meßwerte von der Lagerungsdichte ab, jedoch nur wenig von der Temperatur und der Ionenkonzentration in der Sandfeuchtigkeit. Als vorherrschende und wesentliche Störgröße wurden Schwankungen in der Lagerungsdichte festgestellt. Eine Meßgutberührung ist bei dieser Meßtechnik nicht notwendig.

Ausführungen über die Anwendung des dielektrischen Verfahrens zur Messung der Sandfeuchtigkeit in der Praxis fanden sich bei [6.1,5].

6.1.4 Über elektrische Messungen am Frischbeton konnten nur wenige Veröffentlichungen entdeckt werden:

Müller [6.1,16] beschreibt zahlreiche Anzeigegeräte für Mischanlagen zur Einstellung gleichbleibenden *Wassergehalts* im Frischbeton durch Messen der elektrischen Leitfähigkeit des Betons im Mischer, also während des Mischvorgangs bzw. während der Wasserzugabe; siehe auch eine Anmerkung in [6.1,1 S. T5].

Chadda [6.1,17] berichtete über ein Verfahren, bei dem der *Zementgehalt* im Frischbeton in Beziehung zur elektrischen Leitfähigkeit des in ihm enthaltenen Wassers gebracht wird. Dabei

wird davon ausgegangen, daß das Wasser gelöste Stoffe aus dem Zement in einer Konzentration enthält, die dem Zementgehalt proportional ist (Veränderung der Leitfähigkeit des Wassers durch gelöste Stoffe).

Darauf fußen, etwas modifiziert, die Untersuchungen und die Anleitung von LeClerc und Sandahl für die Nachprüfung des *Zementgehalts* in frischen Boden-Zement-Gemischen [6.1,18]. Zunächst wird eine Bezugskurve aufgestellt: Zu kleinen Bodenproben (450 g) mit verschiedenen Zementmengen (0 bis 35 g) wird eine geschätzte, etwa im fertiggemischtem Boden-Zement-Gemisch vorhandene Wassermenge zugemischt. Genau 10 min nach dem Zumischen wird mit 1,1 l Wasser vermischt und nach weiteren 10 min die Leitfähigkeit der überstehenden Flüssigkeit durch Einführen der Meßzelle bestimmt. Entsprechend werden die zu untersuchenden Boden-Zement-Proben aus dem Mischer behandelt und gemessen. Aus der Bezugskurve wird der Zementgehalt abgelesen. Mit dem durch Trocknen an einer größeren, gesonderten Probe bestimmten Wassergehalt und dem Probengewicht errechnen sich die Anteile Z, G und W in der Probe. (Man könnte so wohl auch über die elektrische Leitfähigkeit umgekehrt den Wassergehalt bestimmen, wenn man einen etwa gleichbleibenden Zementgehalt voraussetzt und die Bezugskurve für verschiedene Wassergehalte aufstellt oder die Messung der elektrischen Leitfähigkeit beim Verfahren nach Kelly und Vail, Abschnitt 5.2, benutzt.) Ohne auf weitere Einzelheiten einzugehen, sei hervorgehoben, daß bei der Untersuchung ein sehr genauer zeitlicher Ablauf einzuhalten ist und daß bei hohen Zementgehalten (hier zementreichstes Mischungsverhältnis rd. 1:13) und bei größeren Änderungen des Zementgehalts (> 5 %) die Empfindlichkeit des Verfahrens, wie zugegeben wird, gering ist. Das dürfte vermutlich auch bei der Anwendung auf Frischbeton mit üblichen, wesentlich höheren Zementgehalten zu beachten sein.

In einer Abhandlung über die Nachprüfung der Beschaffenheit von Frischbeton geht Lorman [6.1,19] auf die Möglichkeit der Messung des „*Wasserzementwerts*“ durch Messung der elektrischen Leitfähigkeit des Betons ein, wobei allerdings eingeräumt ist, daß damit nur festgestellt wird, ob der Beton mehr oder weniger Wasser enthält als vorher gemessene Bezugsproben, und daß zur Errechnung des Wasserzementwerts das Mischungsverhältnis bekannt sein muß. Der Einfluß eines Chloridgehalts wurde nicht als störend empfunden und der ermittelte Wassergehalt als ausreichend zutreffend beurteilt, wenn man sich unter sonst gleichbleibenden Verhältnissen mit Fehlbestimmungen im Wasserzementwert von $\pm 0,05$ zufrieden gibt.

Eine Literaturbearbeitung von Antrim u. Mitarb. [6.1,20] verweist auf zwei Geräte zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit. Mit ihnen soll der *Wassergehalt* des Frischbetons bzw. der „*Wasserzementwert*“ von Baustellenbeton bestimmbar sein, wenn die Meßwerte auf jene entsprechender Vergleichsmischungen bezogen werden, die vorher im Laboratorium ebenso geprüft wurden. Eine vibrierende Sonde wird dabei in den Beton eingetaucht und die elektrische Leitfähigkeit der abgesonderten Schlämme festgestellt.

6.1.5 Allgemein gesehen sind im Schrifttum gefundene Unterlagen über die eigentliche *Anwendung elektrischer Verfahren zur Frischbetonanalyse* dürftig und bieten wenig Hilfe zur Beurteilung deren praktischer Eignung. Nach alledem käme als Teilverfahren einer baustellenmäßigen Frischbetonanalyse höchstens nur die Ermittlung des Wassergehalts durch Messung der elektrischen Leitfähigkeit in Betracht. Dieses sollte möglichst ohne weitere Veränderung des Betons, wie durch Wasserzugabe, an der vollständig verdichteten Frischbetonprobe durchführbar sein.

Ob solche Messungen brauchbare Ergebnisse liefern, erscheint noch fraglich und müßte, neben der Entwicklung einer einfachen, zuverlässigen Meßvorrichtung, noch weitgehend untersucht werden. Dabei wäre u. a. folgenden Fragen nachzugehen: wie groß und gleichmäßig beschaffen muß die Probe im Meßquerschnitt sein (Einfluß der Verteilung des Zuschlags); wie wirken sich unterschiedliche Mischzeiten und Zeitabstände bis zur Messung aus; inwieweit wird die Kernfeuchte des Zuschlags mit erfaßt; ist die Messung im gesamten Bereich der üblichen Wassergehalte des Frischbetons ausreichend selektiv; welchen Einfluß auf die Meßgröße hat ein gegenüber der Baustellenmischung anderes Mischen der Eichproben für eine Bezugskurve und haben andere Frischbetontemperaturen?

6.2 Kernphysikalische Verfahren

6.2.1 Solche Verfahren stehen praxisreif im Erdbau zur Untersuchung der Dichte und des Wassergehalts von Böden zur Verfügung [6.2,1]. Sie fanden auch in der Betontechnik zur Messung des Wassergehalts des Sandzuschlags bei Dosieranlagen Eingang. Soweit die Literaturdurchsicht ergab, befassen sich nur wenige Berichte direkt mit der Möglichkeit der Messung des Wasser- und Zementgehalts im Frischbeton.

Die Meßeinrichtungen bestehen im wesentlichen aus einer Strahlenquelle, einem Detektor zur Anzeige der Art und Intensität der Streustrahlung und einem Impulszählgerät.

Die Messung des *Wassergehalts* beruht meist darauf, daß die Strahlung einer Neutronenquelle die Probe durchdringt, daß die schnellen Neutronen dort im wesentlichen nur von den Wasserstoffatomen des Wassers zu langsamen Neutronen abgebremst und diese vom Detektor aufgenommen werden. Die so über das Impulszählgerät erhaltene Zählrate für die langsamen Neutronen ist ein Kennwert für den Wassergehalt, da die Detektoranzeige der aufgenommenen langsamen Neutronen dem Wasserstoffgehalt je Volumeneinheit der Probe bzw., unter gewissen Voraussetzungen, der Volumenfeuchte der Probe proportional ist.

Zur Bestimmung des *Zementgehalts* wird Gamma- oder Neutronenbestrahlung benutzt. Hierbei werden die Strahlenabsorption und die Streustrahlung gemessen, die vor allem durch jene Elemente mit hoher Ordnungszahl bedingt werden, die in den Betonbestandteilen in größerer Menge vorhanden sind. Da im Beton zu solchen Elementen das Calcium mit der höchsten Ordnungszahl (rd. 20) gehört und Calcium im Zement in größerer

Menge vertreten ist, versucht man damit unter bestimmten Voraussetzungen und mehr oder weniger Berücksichtigung des Beitrags anderer Elemente eine Beziehung zum Zementgehalt abzuleiten.

Im Grunde sind die kernphysikalischen Vorgänge bei der Bestimmung des Wasser- und Zementgehalts recht verwickelt und nicht so einfach, wie sie hier bei dieser kurzen Umschreibung erscheinen mögen. Eine tiefergehende Erklärung für das, was bei Durchstrahlungsmessungen kernphysikalisch vor sich geht und was die Meßdaten aussagen, erfordert das Wissen des Fachphysikers. Aus dem Schrifttum sollen daher nur Darlegungen wiedergegeben werden, die bei einer praktischen Anwendung kernphysikalischer Verfahren zur Bestimmung des Wasser- oder Zementgehalts in Frischbetonproben von Bedeutung wären.

6.2.2 Hierbei verdienen zunächst auch die Erkenntnisse Beachtung, die bei der *Bestimmung der Sandfeuchte* mittels des Neutronenmeßverfahrens gewonnen wurden, weil sie im Grunde weitgehend auch auf die Bestimmung des Wassergehalts im Beton übertragen werden können:

Frenking [6.1,2] und Slowak [6.1,4]: Die Dichte der Sandschüttung muß konstantgehalten oder mittels Gammastrahlung gemessen und in das Ergebnis eingerechnet werden. Das Meßergebnis für den Wassergehalt wird von der Verteilungsdichte des Wasserstoffs bestimmt wie auch von anderen leichten Elementen, also nicht nur vom Wasserstoff des Wassers selbst, wobei der Wassergehalt je Meßvolumen angezeigt wird. Daher ist die Dichte der Sandschüttung auch bei der Umrechnung des Wassergehalts auf Gewichtsanteile zu berücksichtigen. Durch die Messung der Sandfeuchte in Silos einer großen Betonmischanlage und die damit verbundene Wasser-Sand-Korrektur im Prozeßrechner konnte eine gleichmäßigere Güte des Betons erzielt werden. Die Meßeinrichtung ist, besonders wenn die Dichte zur Korrektur mit gemessen wird, sehr aufwendig und verhältnismäßig teuer. Maßnahmen für den Strahlenschutz, entsprechende Überwachung der Einrichtung und Ausbildung des Personals sind vorgeschrieben.

Monfore [6.1,11]: Mit dem Neutronen-Meßverfahren wird der Wassergehalt insgesamt erfaßt, also auch die Kernfeuchte im Zuschlagkorn, ferner das bei der Frischbetonanalyse bedeutungslose, nicht verdampfbare Wasser im Zuschlaggestein (chemisch gebundenes Wasser und Kristallwasser). Bei einer Reihe von Zuschlaggesteinen übersteigt der Gehalt an nicht verdampfbarem Wasser häufig 1 Gew.-% (z.B. beträgt er in Sandsteinen im Mittel 1,3 %, in Basalten 0,4 bis 1,5 %). Nur wenn die Anzahl der gemessenen langsamen Neutronen allein eine Funktion der Wasserstoffkonzentration ist, kann eine einzige Bezugskurve benutzt werden. Die Streuung durch andere Atomkerne und Absorptionsverluste ist nicht vernachlässigbar, so daß bei wechselnder Stoffzusammensetzung eine Eichkurve allein nicht ausreicht. Dieser Einfluß kann jedoch durch Anbringen einer Cadmiumabschirmung über dem Detektor vermindert werden.

Lück [6.1,10]: Die Anzeigegeschwindigkeit ist bei der Feuchtemessung durch Neutronen-Meßverfahren verhältnismäßig gering.

Geräte mit Szintillationszählern arbeiten etwas schneller als solche mit Zählrohren, wenn gleiche Strahlungsdichte vorausgesetzt wird.

Koch [6.2,2]: Die Messung der eigentlichen Sandfeuchte ist nur dann ideal durchzuführen, wenn kein chemisch gebundener Wasserstoff oder Kristallwasser vorhanden ist oder wenn diese konstant bleiben; siehe auch [6.1,11]. Bei einer Schwankung des Kristallwasseranteils um 0,1 % entsteht ein Anzeigefehler von 0,1 % und bei einer Schwankung des gebundenen Wasserstoffanteils um 0,1 % dagegen ein Anzeigefehler von 0,9 %. Ein Vorteil der nuklearen Feuchtemessung ist u. a., daß sie unabhängig von der Temperatur, dem pH-Wert, den Korngrößen und der chemischen Struktur der Stoffe ist sowie berührungslos erfolgt. — (Schließlich wird in dieser Abhandlung noch auf Sondentypen und deren Einbau in den Vorratsbunkern eingegangen, ferner auf das Anbringen von Oberflächensonden im Zwangsmischer zur Einstellung des Sollwasseranteils — was meist eine ausreichend lange Mischdauer verlangt — und auf die Möglichkeiten der „Wasser-Sand-Korrektur“ in der Abmeßanlage unter Benutzung der Feuchteanzeige der Sonde.)

Foth [6.2,3]: Bei der Wassergehaltsbestimmung für Beton im Mischer mit dem Neutronen-Meßverfahren wird die sich ändernde Dichte des Meßvolumens statistisch ausgeglichen. Die zuzugebende Wassermenge wird im Speicher über das Verhältnis der gemessenen Impulsrate zur Impulsrate des Sollwasseranteils abgestimmt. Als reine Mischzeit werden dazu 80 s benötigt.

In einigen Berichten finden sich Angaben über Messungen des Wassergehalts des Sandes bei großen Abmeßanlagen (Neutronen-Sonden in den Sandbunkern):

So betrug nach [6.2,4] die Meßunsicherheit bei der Feuchtigkeitsmessung für drei verschiedene Sandfraktionen z. B. 0,4 %, 0,2 % und 0,3 % (absolut). Die erfaßte Sandmenge entsprach etwa 140 kg. Der Einfluß der vorkommenden Lagerungsdichten wurde dabei als vernachlässigbar und eine Strahlengefährdung unter den vorhandenen Installations- und Betriebsbedingungen nicht festgestellt.

Yamamoto [6.2,5] beschreibt den Einbau einer Neutronen-sonde in den Sandbunker einer Abmeßanlage für ein Bauvorhaben mit 100 000 m³ Beton. Die angezeigte Sandfeuchte diente zur automatischen Korrektur des Wasser- und Sandanteils jeder Charge. Zum Vergleich wurde die Oberflächenfeuchte des Sandes gelegentlich pyknometrisch bestimmt. Solche Bestimmungen wurden auch vorab zur Aufstellung der Bezugskurve zwischen Meßdaten und Oberflächenfeuchten des Sandes durchgeführt. Der Feuchtigkeitsgehalt des Grobzuschlags, mehrmals am Tage durch Trocknen festgestellt, wurde entsprechend berücksichtigt und die Rohdichte des Sandes als konstant angenommen. Für die verwendete Neutronenquelle der Sonde im Sandbunker wurde nachgewiesen, daß die Strahlendosis außerhalb des Bunkers weit geringer ist als der nach den japanischen Vorschriften erlaubte Wert.

Als besondere Einrichtung der Betonieranlage für eine Stau-
mauer wird in [6.2,6] der Einbau einer Neutronen-sonde in jeden
Sandbunker zur Korrektur der Wasserzugabe bei wechselnder
Sandfeuchtigkeit erwähnt.

6.2.3 Die folgenden Belegstellen befassen sich mit der Ermitt-
lung des *Zementgehalts im Frischbeton* durch kernphysikalische
Messungen. Sie sind somit unmittelbar auf die hier interessie-
rende Frischbetonanalyse bezogen als das unter Abschnitt 6.2.2
aufgeführte Neutronen-Meßverfahren zur Bestimmung des Was-
sergehalts im Zuschlag oder zur Einstellung des Sollwasser-
gehalts durch Messen des Wassergehalts im Mischer.

Für erhärtenden und erhärteten Beton werden in [6.2,7] von
Bhargava, neben allgemeinen theoretischen Grundlagen und der
Bestimmung des Wassergehalts mit dem Neutronen-Meßverfah-
ren, Untersuchungen zur Erfassung des Zementgehalts beschrie-
ben. Dabei wird eine kleine Betonprobe mit Neutronen in einem
Kernreaktor aktiviert, so daß die aktivierten Kerne ihre charakte-
ristische Strahlung aussenden, deren Intensität der Häufigkeit
der entsprechenden Elemente in der Probe proportional ist. Als
Strahlungsquelle wird das Natriumisotop ^{24}Na mit einer Halb-
wertzeit von etwa 15 h gewählt. Die Halbwertzeit des aktivierten
Zements wird zuvor gesondert bestimmt und damit auf den Zement-
gehalt geschlossen.

Mitchell [6.2,8] beschreibt die Eigenart und Anwendung eines
Gerätes zur Messung des Zementgehalts im Frischbeton an Hand
von Laboratoriumsversuchen. Seiner Funktion nach wird das Ge-
rät als Gamma-Streuungs- und Absorptionsmesser bezeichnet.

Calcium hat von den in größerer Menge im Beton vorhandenen
Elementen im allgemeinen die höchste Ordnungszahl und ist in
wesentlichen Mengen im Beton durch den aus dem Zement stam-
menden Anteil vertreten. Es leistet daher einen wesentlichen
Beitrag zur gesamten Gamma-Strahlen-Absorption in der durch-
strahlten Probe. Eine Gamma-Strahlung mit niedriger Energie
wird durch eine Betonprobe sowohl gestreut als auch absorbiert.
Je mehr Zement und entsprechend mehr Ca die Probe daher
enthält, desto größer ist die Absorption der Strahlung und desto
geringer die Intensität der Strahlung, die schließlich über den
Detektor zur Zählung gelangt. — Die verhältnismäßig einfache
Gerätschaft besteht aus einer mit Kunstharz imprägnierten Stan-
dard-Betonprobe (Hohlzylinder), einer Sonde u. a. mit dem Ra-
dioisotop als Strahlungsquelle und dem Detektor, einem Sonden-
halter und dem Analysator (Impulszähler). Der Zementgehalt
(kg/m^3) ergibt sich mit dem Verhältnis der Zählrate der Probe
zur Zählrate der Standardprobe aus einer zuvor aufgestellten
Bezugskurve. Für jede Baustelle sind im Laboratorium gesondert
Bezugskurven durch Herstellen und Messen definierter Betone
mit mehreren Zementgehalten zu erstellen. — Die Zählrate wird
bei Betonen mit gleichem Mischungsverhältnis nicht signifikant
beeinflusst, wenn die Rohdichte des Betons zwischen 2180 und
2400 kg/m^3 liegt; auch Wasser- und Luftgehalte haben im üb-
lichen Bereich keinen Einfluß. Dagegen wirken sich größere
Calciumgehalte und Gehalte anderer Elemente mit hoher Ord-

nungszahl (> 20) in einer geringeren Anzeigegenauigkeit der Änderung des Zementgehalts aus. Der Fehler im angezeigten Zementgehalt wird mit diesem Gerät u. U. sehr hoch, wenn bei einer von den Proben der Bezugskurve abweichenden Temperatur gemessen wird (Kompensation durch Vergleichsmessung mit der Standardprobe). Die Strahlungsgefährdung ist minimal. — Entsprechende Ausführungen von Mitchell finden sich auch in [6.2,9].

In einer Abhandlung von Iddings und Mitarb. [6.2,10] wird, theoretisch und durch Laboratoriumsversuche belegt, die Ermittlung des Zementgehalts von Frischbeton durch eine Neutronen-Aktivierungsanalyse beschrieben. Bei Bestrahlung einer Betonprobe mit Neutronen werden meßbare Mengen verschiedener radioaktiver Isotope erzeugt. Unter Berücksichtigung mehrerer verfahrensmäßiger Faktoren bilden sich dabei bestimmte Isotope, die von der Zusammensetzung des Betons, insbesondere vom Zementgehalt, abhängig sind. Diese Isotope senden ihrerseits eine charakteristische Strahlung aus, deren Intensität als Maß für den Zementgehalt gelten kann. Von den im Beton durch kurze Neutronen-Bestrahlung entstehenden Isotopen eignet sich bei bestimmten Vorkehrungen das Calciumisotop ^{49}Ca für eine Bestimmung des Zementgehalts besser als jedes andere, das in größeren Mengen im Zement vorhanden ist. Dazu muß mit Betonproben definierter Zusammensetzung eine Bezugskurve aufgestellt werden, die die Intensität der ^{49}Ca -Strahlung in Abhängigkeit vom Zementgehalt des Betons (kg/m^3) wiedergibt. Der Zementgehalt in Betonproben mit silicatischem, aber CaO-freiem Zuschlag kann rasch und genau ermittelt werden.

Bei einer eingehenden theoretischen Behandlung und Laboratoriumsuntersuchung geht Howdysshell [6.2,11] von einem neu entwickelten Mehrfach-Signaturverfahren aus, um den Wasser- und den Zementgehalt in zahlreichen Frischmörteln zu bestimmen. Ohne tiefere Kenntnisse auf kernphysikalischem Gebiet können hieraus nur allgemeine, die Betontechnologie berührende Angaben gemacht werden. — Als Signaturelemente werden H, Ca, Si und C benutzt, letzteres z. B. bei Vorhandensein von kalkhaltigem Zuschlag. Das Verfahren beruht auf der Beziehung zwischen den gemessenen Signatur-Intensitäten und dem Gehalt an den entsprechenden chemischen Elementen. Die Prüfung der einzelnen Bestandteile der Mörtel zeigt, daß die dafür erhaltenen Signaturen wegen der drastischen Unterschiede durch die Matrixzusammensetzung der Mörtel (Vorhandensein von Wasser) nicht zur Auswertung der Signaturen der Mörtelmischungen benutzt werden können. Eine Weiterentwicklung der Eichtechnik für einige Typen von Bestandteilen wird als nötig erachtet.

Rhodes [6.2,12]: Neutronen-Gamma-Verfahren haben den großen Vorteil, daß eine Probe von mehreren Kilogramm analysiert werden kann. Um jedoch den Wasser- und Zementgehalt von Beton zu bestimmen, der ein unbekanntes Verhältnis von Kieselsäure zu Kalk im Zuschlag aufweist, ist eine sorgfältige Auswahl der Signaturelemente zu treffen. Diese sind für Wasser bevorzugt H, für Zement Ca, für Carbonatgestein C und für silicatisches Gestein Si. Zur Bestimmung all dieser Elemente reicht ein einziges

Neutronen-Gamma-Verfahren nicht aus; vielmehr müssen mindestens drei der vier gangbaren Verfahren angewendet werden. — Die für die einzelnen Elemente in Frage kommenden Verfahrensvorgänge werden kurz umschrieben.

6.2.4 Zusammenfassend ist festzustellen, daß über die *Bestimmung des Wassergehalts in Sanden* mit Neutronen-Meßverfahren ausreichende Erkenntnisse zur praktischen Anwendung vorliegen. Bei solchen Messungen hängt die registrierte Impulsrate nicht nur vom Wassergehalt, sondern wesentlich auch vom Dichtigkeitsgrad der Sandschüttung ab. Außer dem leichten Element Wasserstoff, das aus dem freien Wasser stammt, wird bei der Messung auch Wasserstoff erfaßt, der chemisch oder kristallin im Zuschlag gebunden ist. Ebenso geht in das Meßergebnis die Kernfeuchte des Zuschlags ein und gegebenenfalls auch die Wirkung anderer leichter Elemente, die im normalen Zuschlag praktisch jedoch kaum vorkommen. Für gleichbleibende Bedingungen (Schüttung; Beschaffenheit des Sandes) kann jedoch eine Bezugskurve zwischen der Oberflächenfeuchte des Sandes und der Impulsrate der Neutronensonde aufgestellt werden, wofür die zugehörige eigentliche Oberflächenfeuchte, die allein betontechnologisch von Bedeutung ist, für den Bereich der vorkommenden Oberflächenfeuchten experimentell gesondert zu bestimmen ist.

Bei der Übertragung dieser Verhältnisse bei Sanden auf die *Ermittlung des Wassergehalts einer Frischbetonprobe* durch eine Neutronensonde (worüber noch keine ausreichenden Untersuchungen vorliegen) könnte man vermutlich davon ausgehen, daß der Einfluß der Lagerungsdichte entfällt, da die Messungen an vollständig verdichteten Betonproben vorgenommen werden können. Dazu müßte wieder, da die Impulsrate für den gesamten Wasserstoffgehalt gilt, eine Bezugskurve zum wirksamen Wassergehalt des Betons aufgestellt werden — entsprechend wie für die Oberflächenfeuchte des Sandes. Ferner wären wohl noch Feststellungen u. a. über das zu messende Betonvolumen nötig, auch im Hinblick auf die Erfassung einer repräsentativen Stoffverteilung, ferner Feststellungen über die erforderliche Meßdauer, siehe dazu auch [6.2,1 Abschnitte 5.3.2 und 7.2.1].

Eine Ermittlung des Wassergehalts einer Frischbetonprobe mit der Neutronensonde erscheint demnach im Prinzip möglich. Doch dürften einer breiten praktischen Anwendung auf der Baustelle vor allem die sehr weitreichenden gesetzlichen Bestimmungen über den Umgang mit radioaktiven Strahlungsquellen, siehe dazu [6.2,1 Abschnitt 8], im Wege stehen.

Nach den hier aufgeführten Berichten über die *Bestimmung des Zementgehaltes* im Frischbeton mit Neutronen- oder Gamma-Meßverfahren ist man dabei auch im Laboratorium über ein Versuchsstadium noch nicht hinausgekommen. Soweit erkennbar, dürfte es u. a. wegen der Auswirkung mehrerer Elemente auf die Impulsrate oder deren Erfassung durch verschiedenartige Bestrahlungsverfahren überhaupt schwierig sein, ein einheitliches Meßverfahren für Beton mit beliebigem Zuschlag, z. B. auch mit kalkhaltigem Zuschlag, anzubieten. Abgesehen davon würde sich eine breite praktische Verwendung solcher kernphysikalischer Verfahren zur laufenden Prüfung des Zementgehalts auf der Bau-

stelle schon durch die erheblichen Kosten für die Geräte ausschließen, vor allem aber wieder wegen der die Handhabung sehr belastenden und einengenden gesetzlichen Auflagen für den Strahlenschutz.

7. Zusammenfassung

7.1 Allgemeines

Mit einer Frischbetonanalyse sollen sowohl der Wasser- als auch der Zementgehalt oder besser direkt der für die meisten Eigenschaften des erhärteten Betons maßgebende Wasserzementwert auf der Baustelle nachprüfbar sein. Bei der Beurteilung der Brauchbarkeit der zahlreichen vorgestellten Verfahren spielen für Baustellenprüfungen folgende als Optimum aufgeführte Anliegen eine Rolle:

- einfache und billige Geräte sowie geringer Zeitaufwand (z. B. max. 10 min);
- einfache und verständliche Versuchsdurchführung für angeleitetes Personal;
- geringe Fehleranfälligkeit der einzelnen Prüfvorgänge und insgesamt ausreichend zutreffendes Prüfergebnis (z. B. Prüffehler max. 2 %);
- Anwendbarkeit auf beliebige Mischungen ohne Benutzung von vorgegebenen Größen der Soll-Zusammensetzung, wie Mischungsverhältnis, Zementgehalt oder Feinstsandgehalt;
- Prüfung großer Frischbetonproben, die der durchschnittlichen Beschaffenheit der zu prüfenden Mischung entsprechen.

Alles in allem ergibt sich aus der vorausgegangenen Beschreibung der Verfahren, daß kein Verfahren alle Anforderungen erfüllt. Man muß daher auch bei den wenigen Verfahren, die überhaupt für eine breite Anwendung auf der Baustelle in Frage kommen, in der einen oder anderen Hinsicht Zugeständnisse machen.

7.2 Gravimetrische Verfahren

Von den in Abschnitt 2 aufgeführten Ermittlungen von Mischungsanteilen nach DIN 1048 scheidet das in Abschnitt 2.2 erwähnte Vorgehen als eigentliches Prüfverfahren für den Zementgehalt aus.

Das „Überwachen des Wasserzementwerts nach DIN 1048 durch Trocknen des Frischbetons“ (siehe Abschnitt 2.3) benutzt den Soll-Zementgehalt als Rechengröße. Entsprechend wird auch bei der Bestimmung des Wasserzementwerts nach Thaulow (siehe Abschnitt 2.4.1), ferner nach dem Pycnometerverfahren (siehe Abschnitt 2.4.2) oder bei der Variante nach Abschnitt 3.2 mit Benutzung des Druckgefäßes, ein Soll-Mischungsverhältnis als zutreffend vorausgesetzt.

Eine umfassende Frischbetonanalyse wird nach DIN 52 171 erhalten (siehe Abschnitt 2.1), jedoch erfordert sie die gesonderte

Ermittlung des Wassergehalts und die Annahme eines zutreffenden Feinstsandgehaltes. Größere Abweichungen hiervon verfälschen den errechneten Zementgehalt. Wie ohne diese Annahme auszukommen ist, wird in Abschnitt 3.1 beschrieben, wobei zusätzlich zum Vorgehen in DIN 52 171 die Rohdichte des Zuschlags und die Dichte des Zements bekannt sein sowie die Dichte des Mehlkorns bei jedem Versuch bestimmt werden müssen.

Abweichend von DIN 1048 findet sich in Abschnitt 3.3 ein Vorschlag zur einfachen Ermittlung des Wasserzementwerts mittels des Druckgefäßes bei gesonderter Feststellung des Wassergehalts, wobei die eigentliche Rohdichte des Frischbetons und sein Luftgehalt in die Berechnung eingehen.

Kann man voraussetzen, daß der Zement nur mit mäßigen Abweichungen vom Sollwert abgemessen wird, und übernimmt man diesen Soll-Zementgehalt wie bei dem Vorschlag zur Prüfung des Wasserzementwerts mit dem Druckgefäß nach Abschnitt 3.4, so müssen bei jeder Prüfung nur die Rohdichte des verdichteten Frischbetons und sein Luftgehalt ermittelt werden. (Die Auswirkung einer um 3 % tatsächlich zu klein abgemessenen Zementmenge auf den errechneten Wasserzementwert ist gering, z. B. 0,015, und entspricht naturgemäß Abweichungen wie bei den Verfahren mit vorausgesetztem Mischungsverhältnis; siehe Abschnitt 3.2.3.)

Für die Feststellung des Wassergehalts durch Trocknen, die immer die Bezugsgrundlage für jede andere Art der Wassergehaltsbestimmung bleibt, sollte ein hinreichend definiertes Prüfverfahren noch festgelegt werden, mit dem der Wassergehalt des Betons, ohne die Kernfeuchte des Zuschlags, erfassbar wird.

Nach den Erfahrungen z. B. bei Prüfungen nach Thaulow oder nach den zu den einzelnen Prüfverfahren in Abschnitt 3 aufgeführten Fehlerrechnungen sind allgemein höhere Anforderungen an die Genauigkeit der einzelnen Bestimmungen bei den gravimetrischen Verfahren zu stellen, als dies bisher der Fall war; siehe dazu Abschnitt 4. Dazu wird es u. a. auch nötig, im einzelnen noch *einheitlich* festzulegen, z. B. in gesonderten Arbeitsblättern, wie die ggf. in Abzug zu bringende Kernfeuchte des Zuschlaggemisches und wie die Rohdichte desselben (siehe Abschnitt 4.4) sowie die Rohdichte des Frischbetons (Verdichtung der Probe) zu ermitteln sind.

7.3 Ausländische gravimetrische und chemische Analyseverfahren

Die in Abschnitt 5.1 beschriebenen *gravimetrischen Analysen* sind gegenüber den in Abschnitt 2 und 3 aufgeführten für die Praxis nicht einfacher und zuverlässiger zu handhaben; siehe dazu Abschnitt 5.3.

Von den *chemischen Verfahren* in Abschnitt 5.2 könnte höchstens das von Kelly und Vail zur Bestimmung des Wassergehalts (Zugabe einer Chloridlösung) praktische Beachtung verdienen, sofern größere Betonproben benutzt werden und an Stelle des

für eine Baustellenprüfung hinderlichen Titrierens eine einfachere Bestimmung der Lösungskonzentration treten könnte, z. B. durch Messung der elektrischen Leitfähigkeit; siehe dazu auch Abschnitte 6.1.5 und 7.4, 1. Absatz.

7.4 Elektrische und kernphysikalische Verfahren

Eine praktische Bedeutung *elektrischer Verfahren* für die Frischbetonanalyse kann allenfalls der Messung der elektrischen Leitfähigkeit zur Bestimmung des Wassergehalts zugestanden werden; siehe Abschnitt 6.1, insbesondere 6.1.4. Ausreichende Erfahrungen mit diesem rasch Ergebnisse liefernden Verfahren liegen für Frischbeton noch nicht vor. Dazu wären auch die Entwicklung eines einfachen Meßgeräts für die Baustellenprüfung sowie eine eingehende Festlegung der Prüftechnik im einzelnen nötig.

Kernphysikalische Verfahren (Abschnitt 6.2) sind zur Bestimmung des Wassergehalts oder gar des Zementgehalts des Frischbetons auf der Baustelle nicht geeignet. Die Verfahrens- und Auswertungstechnik ist kompliziert und würde besondere Kenntnisse verlangen, die beim Baustellenprüfer nicht vorausgesetzt werden können. Vor allem aber stehen die sehr weitreichenden Verordnungen zum Strahlenschutz beim Umgang mit radioaktiven Strahlungsquellen einer mobilen Anwendung entgegen.

7.5 Schlußbemerkung

Eine zuverlässige Frischbetonanalyse, z. B. zur Bestimmung des Wasserzementwerts, ist ein wertvolles Hilfsmittel, um frühzeitig Aufschluß über die Güte und Gleichmäßigkeit der laufenden Mischungen zu erhalten. Daher sollte ihr nicht weniger Beachtung geschenkt werden als der nachträglichen, mit erheblichem Aufwand betriebenen „Güteprüfung“ von Würfeln. Man wird aber dann nicht umhin können, die wenigen überhaupt in Frage kommenden einfacheren und wenig Zeit erfordernden Analyseverfahren noch weiter zu verbessern, wenn sie ihre Aufgabe erfüllen sollen.

SCHRIFTTUM

- [1,1] Walz, K.: Die Nachprüfung der Körnung des Zuschlags im Frischbeton. Beton und Eisen 35 (1936) H. 11, S. 185/187.
- [1,2] Walz, K., und A. Bonwetsch: Untersuchung von Straßenfertigern und Stampfgeräten zur Herstellung einschichtiger Betonfahrbahndecken. Jahrbuch der Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen e. V., Volk und Reich Verlag, Berlin 1936, S. 167/246.
- [1,3] Walz, K.: Überwachung des Betons auf der Baustelle – Mischungsverhältnis, Wasserzementwert und Stoffmengen in 1 m³ frischem Beton. Handbuch der Werkstoffprüfung, 3. Band: Die Prüfung nichtmetallischer Baustoffe. Verlag von J. Springer, Berlin 1941, S. 450/452.
- [1,4] DIN 52 171: Stoffmengen und Mischungsverhältnis im Frisch-Mörtel und Frisch-Beton. Ausgabe Juli 1942 (heute geltende x-Ausgabe von Oktober 1961 inhaltlich gleich).

- [2,1] Thaulow, S.: Fjeld testing of concrete, Norsk Cementforening, Oslo 1952, S. 18 und S. 43 u. f.
- [3,1] Wischers, G., und O. Hallauer: Einfluß und Bestimmung der Eigenfeuchte von Betonzuschlagstoffen. beton 16 (1966) H. 5, S. 207/211, und H. 6, S. 249/253; ebenso Betontechnische Berichte 1966, Beton-Verlag, Düsseldorf 1967, S. 89/113.
- [3,2] Merkblatt für Betonprüfstellen E – Fassung März 1972. Mitteilung Institut für Bautechnik 3 (1972) Sonderheft Nr. 1, S. 12/13.
- [3,3] Momber, K.: Zur Frischbetonüberwachung durch praxisnahe W/Z-Wert-Kontrolle nach Thaulow. beton 19 (1969) H. 7, S. 301/302.
- [3,4] Foth, J.: Baustoff-Untersuchungen mit dem Pyknometer. Betonstein-Zeitung 35 (1969) H. 11, S. 667/671.
- [3,5] Werse, H. P.: Vergleich verschiedener Verfahren zur Bestimmung des Wasserzementwertes. Beton- und Stahlbetonbau 65 (1970) H. 9, S. 222/225.
- [3,6] Lackner, R., und D. Smolen: Die Bestimmung des Wasserzementwertes an Frischbeton mit dem Luftpyknometer. Betonstein-Zeitung 37 (1971) H. 4, S. 215/217.
- [3,7] Nischer, P.: Einfache Verfahren zur Bestimmung der Konsistenz und des W/Z-Wertes des Frischbetons sowie des Wassergehalts der Zuschläge. Zement und Beton (Wien) 1971, Nr. 54, S. 11/15.
- [3,8] Blaut, H.: Erfahrungen bei der Messung des Wasser-Zement-Wertes nach dem Thaulow-Verfahren. Betonwerk + Fertigteil-Technik 38 (1972) H. 8, S. 602/608.
- [3,9] Schmincke, P.: Überwachung des W/Z-Wertes am Frischbeton mit dem A-M-Gerät. beton 23 (1973) H. 12, S. 544/546.
- [3,10] Vasilii, D.: Neues Verfahren zur schnellen Betonqualitätskontrolle. Baustoffindustrie – Ausg. B – 18 (1975) H. 4, S. 15/19.
- [3,11] Schlotmann, B.: Grundlagen der Betonherstellung mit vorgemischtem Zementleim. Dissertation TH Aachen, 1962.
- [4,1] DIN 1164 Teil 4: Portland-, Eisenporland-, Hochofen- und Traßzement; Bestimmung der Mahlfineinheit. Ausgabe Juni 1977.
- [4,2] DIN 52 102: Prüfung von Naturstein; Bestimmung der Dichte; Rohdichte, Reindichte, Dichtigkeitsgrad, Gesamtporosität. Ausg. Sept. 1965.
- [4,3] Verein Deutscher Zementwerke: Mahlfineinheit von Zement; Richtlinien für die Bestimmung. Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 33, S. 40/46. Beton-Verlag, Düsseldorf 1967.
- [4,4] Iken, H. W., R. R. Lackner und U. P. Zimmer: Handbuch der Betonprüfung. 2. Aufl., Beton-Verlag, Düsseldorf 1972, S. 44/51.
- [4,5] Walz, K., und W. Richartz: Dichte des Zements im Frischbeton. Erscheint demnächst in beton.
- [4,6] Ford, C. L.: Determination of the apparent density of hydraulic cement in water using a vacuum pyknometer. ASTM Bulletin (TP 169) 1958, S. 81/84.
- [4,7] Arnds, W.: Der Porenraum im Zementstein – seine Entstehung und Erfassung und sein Einfluß auf die Druckfestigkeit. Betonstein-Zeitung 28 (1962) H. 3, S. 112/121.
- [4,8] DIN 4226 Teil 3: Zuschlag für Beton; Prüfung von Zuschlag mit dichtem oder porigem Gefüge. Ausgabe Dezember 1971, Abschnitt 3.4.1.
- [4,9] Musewald, J.: Ermittlung der Kornrohichte von Zuschlägen mit dichtem und porigem Gefüge. Beton-Informationen (Montan-Zement) 1975, H. 6, S. 83/85.
- [4,10] Kern, E.: Erfahrungen mit den neuen Betonnormen aus der Sicht des Unternehmers. beton 27 (1977) H. 4, S. 149/152.
- [4,11] Koehne, H. D., P. Lanninger und R. Lewandowski: Begrenzung der Prüfungen bei Betongüteprüfungen durch standardisierte Probenverdünnung. beton 20 (1970) H. 4, S. 145/149.
- [4,12] Bonzel, J.: Zur Sicherung der Gebrauchseigenschaften des Betons – Bedeutung der Bestimmungen und Erfahrungen. Sonderdruck des Güteschutzverbandes Beton B II-Baustellen e. V. (Vortrag von J. Bonzel am 22. 6. 1976).

- [4,13] Scheer, O.: Erfahrungen mit den neuen Betonnormen aus der Sicht eines Fremdüberwachers. *beton* 27 (1977) H. 3, S. 93/98.
- [5.1,1] Constr. Engineering Res. Laboratory (CERL). Conference Proceedings. Champaign, Ill., M-128, May 1975: Rapid testing of fresh concrete. Prep. by P. A. Howdysshell.
- [5.1,2] Popovics, S.: Determination of the composition of fresh concrete by nonnuclear means [5.1,1 S. 7/18].
- [5.1,3] Dunagan, W. M.: A method of determining the constituents of fresh concrete. *Proc. Amer. Concr. Inst.* 26 (1930) S. 202/210.
- [5.1,4] BS 1881, 1970: Methods of testing concrete. Part 2: Methods of testing fresh concrete; 7. Analysis of fresh concrete.
- [5.1,5] Murdock, L. J.: The determination of the proportions of concrete. *Cement and Lime Manufacture* 21 (1948) Nr. 5, S. 91/96.
- [5.1,6] Hime, W. G., und R. A. Willis: A method for the determination of the cement content of plastic concrete. *ASTM Bulletin* Nr. 209, Okt. 1955, S. 37/43.
- [5.1,7] Laing, J.: Simple but precise method for the rapid analysis of fresh mixed concrete. *Rilem Bulletin* Nr. 22 (1964) S. 59.
- [5.1,8] Bavelja, R.: A rapid method for the wet analysis of fresh concrete. *Concrete* 4 (1970) Nr. 9, S. 351/353.
- [5.1,9] Bavelja, R.: Fresh analysis as a control on pavement quality concrete. *The Highway Engineer* 22 (1975) Nr. 1, S. 26/30.
- [5.1,10] Esenwein, P., und E. Rehmann: Frischbeton-Schnellanalyse „EMPA-Canard“. *Cementbulletin (TFB Wildeggen)* 38 (1970) Nr. 10 u. 11.
- [5.1,11] Lehmann, H., K. Casper, S. Gangnus und S. Reinsdorf: Schnellprüfverfahren zur Ermittlung der Betonfestigkeit am Frischbeton. *Baustoffindustrie, Ausg. B* 16 (1973) S. 15/18.
- [5.1,12] Forrester, J. A., P. F. Black und T. P. Lees: An apparatus for the rapid analysis of fresh concrete to determine its cement content. *Technical Report 42.490, Cement and Concr. Ass., London*, April 1974.
- [5.1,13] Forrester, J. A.: Cement content by the rapid analysis machine [5.1,1 S. 43/49].
- [5.1,14] Forrester, J. A.: Wet analysis. *Concrete* 9 (1975) Nr. 3, S. 45/47. (Current Practice Sheets, Cement and Concrete Assoc., Nr. 21).
- [5.1,15] Rapport 81: Kwaliteitscontrole beton, CUR-Stichting Commissie voor Uitvoering van Research, August 1976 (Verf. L. Huibregtse mit J. G. Wiebenga), S. 46/64.
- [5.1,16] Huibregtse, L.: Qualitätskontrolle. *Heron* 21 (1976) Nr. 2, S. 141/146. (Forschungsberichte des Instituts I.B.B.C., Rijswijk, und des Stevin-Laboratoriums, Delft).
- [5.1,17] Werthmann, E.: Thermisch-physikalische Bestimmungsmethode des Zementgehalts im Frischbeton. *Zement und Beton (Wien)* 21 (1976) H. 2, S. 106/108.
- [5.2,1] Kelly, R. T., und J. W. Vail: Rapid analysis of fresh concrete. *Concrete* 2 (1968) Nr. 4, S. 140/145, und Nr. 5, S. 206/210.
- [5.2,2] Howdysshell, P. A.: Evaluation of a chemical technique for determine water and cement content of fresh concrete. *Transportation Research Record* No. 558 (1975) S. 104/113.
- [5.2,3] Kelly, R. T., und P. J. Baldwin: The Kelly-Vail chemical technique for water and cement content. [5.1,1 S. 19/35].
- [5.2,4] Howdysshell, P. A.: Evaluation of a chemical technique to determine water and cement content of fresh concrete. *Construction Engineering Res. Lab., Champaign, Ill., Report* Nr. CERL-TM-M-119, Januar 1975.
- [5.2,5] Howdysshell, P. A.: Correlating Kelly-Vail test results to the strength potential of fresh concrete. [5.1,1 S. 57/81] (Verfahren S. 67/70).
- [5.2,6] Carlsen, R., und J. Gukild: Eine direkte Methode zur Bestimmung des W:Z-Verhältnisses im Frischbeton. *Betonstein-Zeitung* 37 (1971) H. 9, S. 556/561.

- [6.1,1] Frenking, H.: Grenzen und Möglichkeiten von elektrischen Geräten bei der Eigenfeuchtigkeitsbestimmung von Zuschlägen. *Bauwirtschaft* 23 (1969) H. 1, S. T1/T7.
- [6.1,2] Ernst, K.: Feuchtemessung für die Betonherstellung. *Betonstein-Zeitung* 35 (1969) H. 2, S. 74/80.
- [6.1,3] Slowak, W.: Grenzen der Feuchtigkeitsmessung von Zuschlägen für die Betonherstellung. Diss. TH Aachen 1972; ebenso Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen Nr. 2341, Westdeutscher Verlag, Opladen 1973.
- [6.1,4] Feger, H.: Dosieren und Mischen bei der Betonbereitung. *Betonwerk und Fertigteil-Technik* 40 (1974) H. 8, S. 512/528.
- [6.1,5] Tran Ngoc Lan und A. Jallet: Mesure par capacité électrique de la teneur en eau des sables sur bande transporteuse. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées* Nr. 71, Mai/Juni 1974, S. 109/115. (Ebenso Gragger, F.: Kapazitive Messung des Feuchtigkeitsgehalts von Sand auf dem Förderband. *Straßen- und Tiefbau* 29 (1975) H. 10, S. 15/20.)
- [6.1,6] Wedler, K.: Sand-Wasser-Korrektur bei der Betonproduktion. *beton* 27 (1977) H. 3, S. 99/103.
- [6.1,7] Lück, W.: Messung der Materialfeuchte. *Archiv für technisches Messen (ATM)* V 1281-10, Lieferung 312, Januar 1982, S. 5/8.
- [6.1,8] Lück, W.: Messung der Materialfeuchte. *Archiv für technisches Messen (ATM)* V 1281-F1, Lieferung 358, November 1965, S. 261/264.
- [6.1,9] Lück, W.: Messung der Materialfeuchte. *Archiv für technisches Messen (ATM)* V 1281-F2, Lieferung 434, März 1972, S. 45/48.
- [6.1,10] Lück, W.: Über die Schwierigkeiten, Materialfeuchte zu messen. *Regelungstechnische Praxis und Prozeß-Rechentechnik* 16 (1974) H. 3, S. 60/65.
- [6.1,11] Monfore, G. E.: A review of methods for measuring water content of highway components in place. *Highway Research Record* Nr. 342 (1970) S. 17/26.
- [6.1,12] Paquet, J.: Mesure d'humidité in-situ par les méthodes diélectriques application au béton. *Matériaux et Constructions* 4 (1971) Nr. 19, S. 87/100.
- [6.1,13] Hundt, J., und J. Buschmann: Moisture measurement in concrete. *Matériaux et Constructions* 4 (1971) Nr. 22, S. 253/259.
- [6.1,14] van Alstine, C. B.: Mixing water control by use of a moisture meter. *Proc. Amer. Concr. Inst.* 52 (1955/56) S. 341/347.
- [6.1,15] Graf, P.: Elektrische Bestimmung der Sandfeuchtigkeit im Betonurm der Staumauer Mauvoisin. *Schweiz. Bauzeitung* 75 (1957) Nr. 6, S. 85/86.
- [6.1,16] Müller, H.: Wasserdosierung mit Geräten. *Betonstein-Zeitung* 29 (1963) H. 8, S. 419/430.
- [6.1,17] Chadda, L. R.: The rapid testing of cement content in concrete and mortar. *Indian Concrete Journal* 29 (1955) Nr. 8, S. 258/260.
- [6.1,18] LeClerc, R. V., und H. E. Sandahl: A rapid field method for determining cement content of plastic cement-treated base. *Highway Research Board, Bulletin* 267 (1960) S. 1/13.
- [6.1,19] Lorman, W. R.: Verifying the quality of freshly mixed concrete. *Proc. Amer. Soc. Test. Mat.* 62 (1962) S. 944/959.
- [6.1,20] Antrim, J. D., F. B. Brown, H. W. Busching, J. A. Chisman, J. H. Moore, J. P. Rostron und A. E. Schwartz: Rapid test methods for field control of highway construction. *Highway Research Board (Nat. Coop. Highway Res. Program) Report* 103 (1970) S. 13/14.
- [6.2,1] Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen; Arbeitsgruppe Untergrund-Unterbau: Merkblatt über die Anwendung radiometrischer Verfahren zur Bestimmung der Dichte und des Wassergehaltes von Böden. Köln 1975.

- [6.2,2] Koch, E.: Das Feuchte-meßverfahren mit Neutronen bei der Herstellung von Beton. Informationsheft des Büro EURISOTOP Nr. 55: Strahlungs- und Isotopenanwendung im Bauwesen, Band II, Brüssel 1972, S. 607/620.
- [6.2,3] Foth, J.: Radiometrische Wassergehaltsbestimmung an Frischbeton während seiner Herstellung. Wissenschaftl. Zeitschr. d. Hochschule f. Architektur und Bauwesen Weimar 17 (1970) H. 4, S. 367/368.
- [6.2,4] Rozinski, F.: Die Betonherstellung beim Donaukraftwerk Ottensheim-Wilfering. Zement und Beton (Wien) 1972, Nr. 61/62, S. 22/27.
- [6.2,5] Yamamoto, M.: Quality control of concrete using a neutron moisture gauge [6.2,2 S. 647/662].
- [6.2,6] Kraftwerksgruppe Malta – 1 600 000 m³ Beton für Österreichs höchste Staumauer. beton 26 (1976) H. 12, S. 463/466.
- [6.2,7] Bhargava, J.: Application of some nuclear and radiographic methods on concrete. Matériaux et Constructions 4 (1971) Nr. 19, S. 231/240.
- [6.2,8] Mitchell, T. M.: Nuclear gage for measuring the cement content of plastic concrete. Public Roads 38 (1975) Nr. 4, S. 134/139.
- [6.2,9] Mitchell, T. M.: A gamma backscatter and absorption gage for the cement content of fresh concrete [5.1,1 S. 89/104].
- [6.2,10] Iddings, F. A., Ara Arman, C. E. Pepper, W. G. Aubert und J. R. Landry: Analysis of in-place and plastic concrete for cement content by neutron activation analysis [5.1,1 S. 107/121].
- [6.2,11] Howdyshell, P.: Preliminary evaluation of the neutron-gamma technique to determine the water and cement content of fresh concrete [5.1,1 S. 123/156].
- [6.2,12] Rhodes, J. R.: History of nuclear methods [5.1,1 S. 85/87].