

# Nachträgliche Bestimmung des Mischungsverhältnisses von Beton mit kalksteinhaltigem Zuschlag

Von Heinz Pisters, Beckum

## Übersicht

*Wenn an Betonbauten nachträglich maßgebende Eigenschaften des erhärteten Betons zu beurteilen sind, wird dazu häufig auch die Ermittlung des Zementgehalts erforderlich. Die dabei benutzten chemischen Verfahren gehen von einer Behandlung des Betons mit Salzsäure aus. Für den Fall, daß der Beton säurelöslichen Zuschlag enthält und dieser gesondert nicht mehr verfügbar ist, wird ein Bestimmungsverfahren mit einer Korrektur über den Kohlendioxidgehalt des Betons eingehend beschrieben. Nach den hiermit an definierten Betonen durchgeführten Bestimmungen ist es auch für diese Verhältnisse nunmehr möglich, den Zementgehalt mit einer Genauigkeit von mindestens  $\pm 10\%$  zu bestimmen.*

## 1. Allgemeines

Für die Bearbeitung von Schadensfällen an Betonbauwerken, insbesondere bei gutachtlichen Auseinandersetzungen, sowie für die Kontrolle von Betonen ist es häufig nötig, nachträglich auch den Zementgehalt zu bestimmen.

Diese Untersuchung erfolgt nach DIN 52 170 „Mischungsverhältnis und Bindemittelgehalt von erhärtetem Mörtel und Beton“. Es wird dabei festgestellt, in welchem Gewichtsverhältnis die Ausgangsstoffe Bindemittel und Zuschlag bei der Betonherstellung gemischt wurden. Man kann über das Mischungsverhältnis und die ermittelte Betonrohddichte dann den Zementgehalt eines Betons feststellen.

Zur Ermittlung des Mischungsverhältnisses von Zement und Zuschlag müssen Zement und Zuschlag voneinander getrennt werden. Zu diesem Zweck wird der Mörtel oder Beton mit Salzsäure behandelt. Dieses Verfahren führt zu einer Trennung von Zement (Zementstein) und Zuschlag, wenn nur der *Zement* in Lösung geht, also *salzsäurelöslich* ist, und der *Zuschlag* ungelöst zurückbleibt (*salzsäureunlöslich* ist). In allen anderen Fällen, in denen

der Zuschlag teilweise salzsäurelöslich,

der Zuschlag ganz salzsäurelöslich

oder der Zement nur teilweise salzsäurelöslich ist,

verlangt die DIN 52 170, daß für zusätzliche Untersuchungen entweder unverarbeiteter Zuschlag oder unverarbeitetes Bindemittel

zur Verfügung steht. Da der zu untersuchende Beton meist schon mehrere Monate oder sogar Jahre alt ist, wird eine Beschaffung der unverarbeiteten Ausgangsstoffe im allgemeinen nicht mehr möglich sein.

Die erste Forderung der DIN 52 170 für eine vollständige Trennung von Zement und Zuschlag ist folglich, daß sich der Zement völlig in Salzsäure löst. Diese Forderung wird praktisch von fast allen in der DIN 1164 „Portland-, Eisenportland-, Hochofen- und Traßzement“ genormten Zementen erfüllt. Lediglich der Traßzement hat einen erhöhten in Salzsäure nicht löslichen Anteil, der eine vollständige Trennung von Zement und Zuschlag stört. Der Verbrauch an Traßzement in der Bundesrepublik ist aber so gering, daß die Aufgabe der Bestimmung des Mischungsverhältnisses an „Traßzementbeton“ nur sehr selten auftritt. Der Anteil an salzsäureunlöslichen Bestandteilen in den Zementen PZ, EPZ und HOZ ist vernachlässigbar gering und in der DIN 1164 auf maximal 3,0 Gew.-% begrenzt. Man kann davon ausgehen, daß der weitaus größte Teil der in der Bundesrepublik verbrauchten Zemente praktisch völlig salzsäurelöslich ist und folglich diese Forderung der DIN 52 170 erfüllt.

Wesentlich schwieriger gestaltet sich die zweite Bedingung der DIN 52 170. Danach müssen Zuschläge in Salzsäure praktisch unlöslich sein. Diese zweite Forderung läßt sich nur relativ selten erfüllen, da jeder Zuschlag geringe Mengen an säurelöslichen Bestandteilen enthält. Auch schon wenige Prozente an löslichen Bestandteilen im Zuschlag beeinflussen die Bestimmung des Mischungsverhältnisses erheblich, da die Zuschlagmenge wesentlich größer als der Bindemittelanteil im Beton ist. Nach DIN 52 170 ist aber, wie oben erwähnt, eine Bestimmung bei teilweise oder ganz löslichem Zuschlag nur unter den aufgeführten, praktisch nicht erfüllbaren Voraussetzungen möglich.

Da die DIN 52 170 bei löslichem Zuschlag versagt, wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem das Mischungsverhältnis auch dann mit einer Genauigkeit von  $\pm 10\%$  bestimmt werden kann, wenn der Zuschlag ganz oder teilweise in Salzsäure löslich ist und unverarbeiteter Zuschlag für Zusatzuntersuchungen nicht zur Verfügung steht.<sup>1)</sup>

Im Bereich des Beckumer Laboratoriums fallen teilweise lösliche Zuschläge besonders im süd- und ostwestfälischen Raum an. Aus chemischer Sicht handelt es sich bei den salzsäurelöslichen Anteilen um carbonatisches Gestein, in erster Linie um Calciumcarbonat (Kalkstein).

Es trifft auch allgemein zu, daß als salzsäurelösliches Gestein in erster Linie Kalkstein ( $\text{CaCO}_3$ ) oder Magnesit ( $\text{MgCO}_3$ ) bzw. Gemische von beiden Carbonaten, z. B. Dolomit [ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ], in Frage kommen. Die Löslichkeit anderer Gesteine, die als Betonzuschlag Verwendung finden, ist, besonders wenn die Salzsäure-

---

<sup>1)</sup> Mit den Arbeiten an diesem Verfahren war der Verfasser zunächst im Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf beschäftigt und später im Zement- und Beton-Laboratorium in Beckum, in dem die jetzt vorliegende Form des Verfahrens entwickelt und auch die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen durchgeführt wurden.

einwirkung nicht sehr intensiv und langdauernd ist, relativ gering. Das vorgeschlagene Verfahren geht also von der Voraussetzung aus, daß es sich bei dem am meisten vorkommenden löslichen Zuschlag um Kalkstein ( $\text{CaCO}_3$ ) handelt.

Nachstehend wird zunächst das Untersuchungsverfahren beschrieben, dann wird über einige Versuchsergebnisse berichtet.

## 2. Untersuchungsverfahren

### 2.1 Chemische Grundlage des Verfahrens

Kalkstein ( $\text{CaCO}_3$ ) besteht zu ungefähr 44 % aus Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und etwa 56 % aus Calciumoxid ( $\text{CaO}$ ). Wenn ein Beton teilweise oder ganz  $\text{CaCO}_3$  als Zuschlag enthält, löst sich dieser in Salzsäure auf. Der salzsäurelösliche Anteil des Zuschlags würde daher nach der üblichen Berechnungsmethode des Mischungsverhältnisses als Bindemittel erscheinen.

Bei kalksteinhaltigem Zuschlag ist nun eine Korrektur des chemisch bestimmten Zuschlags (salzsäureunlöslicher Rückstand) möglich, wenn man den Kohlendioxidgehalt ( $\text{CO}_2$ ) eines Betons sozusagen als „Leitmolekül“ für den Kalksteingehalt benutzt. Man kann den  $\text{CO}_2$ -Gehalt des Betons wie folgt auf Kalkstein ( $\text{CaCO}_3$ ) umrechnen:

$$\frac{\% \text{CO}_2 \cdot 100}{44} = \% \text{CO}_2 \cdot 2,27 = \% \text{CaCO}_3$$

Dabei ist zu berücksichtigen, daß Zement nach DIN 1164 bis zu 2,5 %  $\text{CO}_2$  enthalten darf und daß der Beton während der Vorbereitung zur chemischen Analyse (Zerkleinern, Trocknen) etwas  $\text{CO}_2$  aufnimmt. Diese Anteile müssen einbezogen werden.

Aus diesen Gründen wird vom analytisch ermittelten  $\text{CO}_2$ -Gehalt des Betons stets ein auf Erfahrung beruhender Anteil von 0,3 %  $\text{CO}_2$  abgezogen. Außerdem kann ein Beton schon vorher  $\text{CO}_2$  aus der Luft aufgenommen haben. Dieser Vorgang, Carbonatisierung genannt, spielt sich an der Oberfläche des Betons ab. Für die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen kann nur *nicht carbonatisierter* Beton herangezogen werden. Carbonatisierte Randzonen von Beton müssen deshalb entfernt werden (siehe auch Abschnitt 2.4).

Wenn Carbonatgestein neben  $\text{CaCO}_3$  noch Magnesiumcarbonat ( $\text{MgCO}_3$ ) enthält, kann bei nur geringfügigen Anteilen an  $\text{MgCO}_3$  auch dann mit dem Umrechnungsfaktor von  $2,27 \cdot \text{CO}_2$  gerechnet werden. Dieser Faktor vermindert sich, wenn der  $\text{MgCO}_3$ -Anteil, wie im Dolomit [ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ], auf das Molverhältnis 1 : 1 steigt, dann gilt:

$$\frac{\% \text{CO}_2 \cdot 184,4}{88} = \% \text{CO}_2 \cdot 2,10 = \% \text{Dolomit.}$$

Die Verminderung des Faktors von 2,27 auf 2,10 entspricht 7,5 % und führt ohne Berücksichtigung bei der Berechnung des Mischungsverhältnisses zu einem spürbaren Fehler. Normalerweise kann man die mineralogische Zusammensetzung der Betonzu-

schläge in Erfahrung bringen. Anderenfalls ist es notwendig, ein grobes Korn des löslichen Zuschlages auf seine chemische Zusammensetzung zu untersuchen und höhere  $MgCO_3$ -Gehalte entsprechend zu berücksichtigen. Das Korn wird zerkleinert und daran nach Trocknen bei  $105\text{ }^\circ\text{C}$  der  $CO_2$ -Gehalt (in %) bestimmt. Der Umrechnungsfaktor von  $CO_2$  für den zu bestimmenden löslichen Zuschlag lautet dann:

$$\text{Faktor} = \frac{100}{\% CO_2}$$

## 2.2 Chemische und physikalische Bestimmungen

Am Beton werden bestimmt:

- Glühverlust und Kohlendioxidgehalt,
- salzsäureunlöslicher Rückstand,
- Rohdichte des Betons.

Der *Glühverlust* dient zur Bestimmung des Wassergehaltes, der nach einer Trocknung bei  $105\text{ }^\circ\text{C}$  noch im Beton verbleibt. Dieses Wasser wird nachfolgend „gebundenes Wasser“ genannt, ohne zu unterscheiden, ob es sich um chemisch oder physikalisch gebundenes Wasser handelt.

Gleichzeitig ist im Glühverlust auch das  $CO_2$  enthalten. Der Glühverlust (ermittelt durch Glühen bis  $1000\text{ }^\circ\text{C} \pm 25\text{ }^\circ\text{C}$ ) ist folglich die Summe von „gebundenem Wasser“ ( $H_2O$ ) und Kohlendioxid ( $CO_2$ ).

Das Kohlendioxid wird ermittelt zur Berechnung des Carbonatgesteins im Zuschlag. Ferner wird der  $CO_2$ -Gehalt zur Berechnung des gebundenen Wassers im Beton benötigt:

$$\% \text{ Glühverlust} - \% CO_2 = \text{gebundenes Wasser.}$$

Der *säureunlösliche Rückstand* muß zur Ermittlung des Zuschlags bestimmt werden. Wenn der gesamte Zuschlag weitgehend säureunlöslich ist (z. B. quarzitischer Rheinkiesand), dann ist der ermittelte säureunlösliche Rückstand dem Gehalt des Betons an Zuschlag gleichzusetzen. Der Gehalt derartiger Betone an  $CO_2$  ist dann normalerweise sehr gering.

Wenn sich der Zuschlag teilweise in Salzsäure löst, wird zunächst der säureunlösliche Anteil des Zuschlags bestimmt. Diesem Zuschlaganteil wird dann der  $CO_2$ -haltige (lösliche) Anteil des Zuschlags ( $\% CO_2 \cdot 2,27 = \% CaCO_3$ ) hinzugerechnet. Wenn sich der Zuschlag praktisch völlig in Säure löst (kein säureunlöslicher Rückstand), ist nur Carbonatzuschlag vorhanden.

Die *Rohdichte* (R) des Betons muß ermittelt werden, um aus dem Mischungsverhältnis den Zementgehalt in  $kg\text{ je m}^3$  Beton errechnen zu können. Die Berechnungsanleitung folgt im Abschnitt 2.7.

## 2.3 Entnahme und Größe der Betonprobe

Die Probemenge, die zur Bestimmung des Mischungsverhältnisses entnommen werden soll, hängt vom Größtkorn des Zuschlags ab.

Es sind zu entnehmen bei einem

Größtkorn bis 30 mm etwa 5 kg,

Größtkorn bis 7 mm etwa 3 kg,

Größtkorn bis 3 mm etwa 2 kg.

Für jede Stelle eines Bauwerks, an der der Zementgehalt bestimmt werden soll, ist eine gesonderte Probe zu entnehmen. Die Probe ist unmittelbar nach der Entnahme luftdicht zu verpacken.

## 2.4 Vorbereitung der Probe

Mit Phenolphthalein wird geprüft, ob Teile der Probe carbonatisiert und zu entfernen sind (siehe unter 2.1).

Die Probe wird – soweit noch nötig – zunächst grob zerteilt. Dabei werden zwei oder mehrere Stücke zur Rohdichtebestimmung entnommen. Der Rest wird in einem Laborbrecher auf eine maximale Korngröße von etwa 2 mm zerschrotet. In einem Laborprobenteiler (z. B. Fabrikat Retsch) werden dann in einem oder zwei Arbeitsgängen etwa 50 bis 100 g als repräsentative Probe abgeteilt und bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Diese Teilprobe wird anschließend analysenfein (< 0,2 mm) gemahlen und dann in einen *luftdichten* Probebehälter abgefüllt. Diese Vorbereitung sollte wegen der relativ schnellen CO<sub>2</sub>-Aufnahme aus der Luft in möglichst kurzer Zeit durchgeführt werden. Am besten lagert man die analysenfeine, in ein luftdichtes Gefäß abgefüllte Probe zusätzlich in einem Exsikkator über Natronasbest.

## 2.5 Durchführung der Untersuchungen

Sämtliche nachstehend aufgeführten Bestimmungen (Glühverlust, Kohlendioxid, salzsäureunlöslicher Rückstand, Betonrohddichte) müssen *doppelt* durchgeführt werden. Weichen die Werte der Doppelbestimmung um mehr als 2 % (relativ) voneinander ab, so wird ein dritter Kontrollwert ermittelt. Die späteren Berechnungen erfolgen mit den Mittelwerten aus jenen Einzelwerten, die nicht mehr als 2 % (relativ) voneinander abweichen.

### 2.5.1 Glühverlust

1 g der nach Abschnitt 2.4 vorbereiteten Probe wird auf 0,0001 g in einen Tiegel eingewogen und 10 Minuten in einem elektrischen Ofen bei 1000 °C ± 25 grad geglüht. Da die Gefahr besteht, daß das Material spritzt, sollte der Tiegel mit einem Deckel bedeckt sein. Nach dem Glühen wird die Probe im Exsikkator auf Raumtemperatur abgekühlt und auf 0,0001 g gewogen.

*Berechnung:*

$$\% \text{ Glühverlust} = \frac{(E - A) \cdot 100}{E}$$

Es bedeutet: E Einwaage in g; A Auswaage in g.

### 2.5.2 Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)

Das Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) wird nach dem Verfahren 2.2.8 des „Anlysengangs für Zemente“ (Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft

37/1970) oder nach einem anderen geeigneten Verfahren bestimmt.

Das Verfahren 2.2.8 des „Analysegangs für Zemente“ mit dem zugehörigen Gerät (Bild 1) wird nachstehend beschrieben. Zur Erzeugung eines Unterdrucks im Gerät wird eine kleine Vakuumpumpe oder ein Niveaugefäß verwendet.

#### Reagenzien:

Quecksilber(II)-chlorid	HgCl <sub>2</sub> , p. a.
Natronasbest	zur Elementaranalyse
Schwefelsäure, konz.	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , p. a. (d = 1,84)
Schwefelsäure, verd.	1 : 4
Magnesiumperchlorat	Mg(ClO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · XH <sub>2</sub> O, p. a.

In den 100-ml-Destillationskolben (NS 29) des Geräts wird 1 g der nach Abschnitt 2.4 vorbereiteten Probe auf 0,0001 g eingewogen, mit einer Spatelspitze Quecksilber(II)-chlorid versetzt und mit wenig Wasser aufgeschlämmt. Der Kolben wird luftdicht am Schliff des Tropftrichters befestigt. Anschließend wird 15 Minuten Luft durch das Gerät gesaugt, wobei die angesaugte Luft vor dem Eintritt in den Kolben einen mit Natronasbest gefüllten Trockenturm durchströmt und von Kohlendioxid befreit wird. Nach Unterbrechen des Luftstroms durch Abklemmen des Verbindungsschlauchs zwischen dem Natronasbesturm und dem Destillationskolben mit einem Quetschhahn werden die Hähne der beiden mit Natronasbest gefüllten Absorptionsrohre geschlossen, die Absorptionsrohre abgenommen und das Gewicht der Rohre auf 0,0001 g festgestellt. Anschließend werden die Rohre wieder in das Gerät eingebaut, die Hähne geöffnet, und dann werden aus dem Tropftrichter 25 bis 30 ml Schwefelsäure 1 : 4 in den Kolben gegeben. Dabei ist darauf zu achten, daß ein Rest der Säure als Sperrflüssigkeit im Tropftrichter verbleibt. Nach Öffnen des Quetschhahns befördert der Luftstrom das freigesetzte Kohlendioxid über den Kühler und die beiden ersten zum Trocknen dienenden, mit Magnesiumperchlorat gefüllten Absorptionsrohre zu den beiden auf 0,0001 g gewogenen, mit Natronasbest gefüllten Absorptionsrohren. Um Eindringen von Kohlendioxid und Wasser aus der Luft zu verhindern, ist ein mit Magnesiumperchlorat und Natronasbest gefülltes Absorptionsrohr nachgeschaltet. Daran schließt sich eine mit Paraffinöl gefüllte Gaswaschflasche als Blasenähler an. Nach etwa 10 Minuten wird der Kolbeninhalt zum Sieden erhitzt. Das Durchsaugen der Luft wird fortgesetzt, bis der Destillationskolben erkaltet ist. Anschließend werden die Hähne geschlossen und die Absorptionsrohre abgenommen, die dann zum Ausgleich der Temperatur 5 Minuten lang in einen Exsikkator gelegt und anschließend auf 0,0001 g gewogen werden.

#### Berechnung:

$$\% \text{ CO}_2 = \frac{(A - B) \cdot 100}{E}$$

Es bedeutet:

A Gewicht der Absorptionsrohre nach der Absorption in g

B Gewicht der Absorptionsrohre vor der Absorption in g

E Einwaage in g

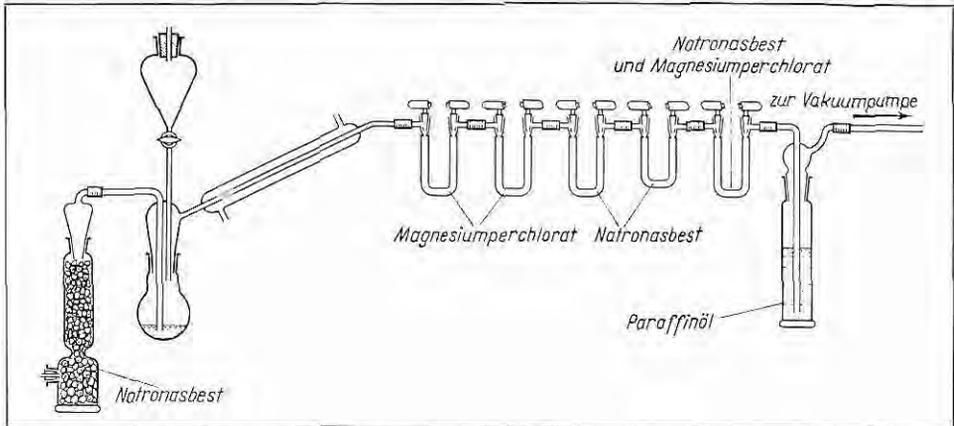


Bild 1 Gerät zur gravimetrischen Kohlendioxidbestimmung

### 2.5.3 Salzsäureunlöslicher Rückstand

#### Reagenzien:

Salzsäure, konz.	HCl, p. a. (d = 1,19)
Salzsäure, verd.	1 : 20
Natriumchlorid	NaCl, p. a.
Natriumchloridlösung	29 g Natriumchlorid werden mit Wasser zu 1000 ml gelöst (~ 0,5 n)
Natriumcarbonat	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , p. a.
Natriumcarbonatlösung	53 g Natriumcarbonat werden mit Wasser zu 1000 ml gelöst (~ 1 n).

3 g der nach Abschnitt 2.4 vorbereiteten Probe werden auf 0,0001 g eingewogen und in einem 250-ml-Becherglas (hohe Form) mit 70 ml Wasser aufgeschlämmt, mit 10 ml konzentrierter Salzsäure versetzt, umgeschüttelt und 1 Minute lang gekocht. Anschließend wird durch ein Glasfiltertiegel 1 G4 filtriert, das Becherglas gut gesäubert und der Rückstand im Tiegel dreimal mit heißer (~ 80 °C) Natriumchloridlösung (~ 0,5 n) gespült. Beim Säubern des Becherglases und beim Auswaschen darf *nur* Natriumchloridlösung verwendet werden. Der Tiegel soll beim Spülen jedesmal leerlaufen. Danach wird fünfmal mit heißer Natriumcarbonatlösung (~ 80 °C) gespült, um ausgefallene Kieselsäure des Bindemittels in Lösung zu bringen. Anschließend wird dreimal mit heißer Natriumchloridlösung und dann dreimal mit heißer verdünnter Salzsäure gewaschen.

Der Tiegel wird anschließend in einem Trockenschrank bei 105 °C ± 5 grd bis zur Gewichtskonstanz (~ 30 min) getrocknet. Der Rückstand wird auf 0,0001 g gewogen und in Prozent bezogen auf die Ausgangssubstanz angegeben.

Berechnung:

$$\% \text{ salzsäureunlöslicher Rückstand} = \frac{A \cdot 100}{E}$$

Es bedeutet: A Auswaage in g; E Einwaage in g

#### 2.5.4 Betonrohddichte

Die Rohdichte des Betons wird in Anlehnung an DIN 52 102 „Prüfung von Naturstein; Bestimmung der Dichte“ festgestellt. Dazu werden zwei oder mehrere Teilstücke des Betons bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und gewogen (Trockengewicht  $G_t$ ). Dann werden die Probestücke mit Wasser getränkt und die Gewichte dieser zuvor mit einem feuchten Tuch abgeriebenen Stücke ermittelt ( $G_s$ ). Danach wird mit einer Senkwaage das Unterwassergewicht ( $G_u$ ) der Probestücke festgestellt und die Rohdichte nach folgender Formel bestimmt.

$$R = \frac{G_t \cdot 1000}{G_s - G_u} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Aus den Einzelwerten der verschiedenen Stücke wird dann der Mittelwert R in  $\text{kg/m}^3$  berechnet.

### 2.6 Auswertung und Berechnung der Mischungsverhältnisse

Das Mischungsverhältnis eines Betons, der ganz oder teilweise aus salzsäurelöslichen Zuschlägen hergestellt wurde, ist wie folgt mit den Mittelwerten der Analysenergebnisse zu berechnen:

#### 2.6.1 Gebundenes Wasser

Glühverlust	=	%
- CO <sub>2</sub>	=	%
geb. Wasser	=	%

#### 2.6.2 Kalkstein (Calciumcarbonat) im Zuschlag

Gesamt-CO <sub>2</sub>	=	%
- CO <sub>2</sub> <sup>2)</sup>	=	0,3 %
CO <sub>2</sub> im Zuschlag	=	%
Kalkstein (CaCO <sub>3</sub> ) = 2,27 · CO <sub>2</sub> im Zuschlag	=	%

#### 2.6.3 Gesamtzuschlag

Kalkstein	=	%
+ säureunlös. Anteile	=	%
Gesamtzuschlag	=	%

<sup>2)</sup> Korrektur für den CO<sub>2</sub>-Gehalt im Bindemittel und für die CO<sub>2</sub>-Aufnahme aus der Luft während des Untersuchungsvorganges (s. Abschn. 2.1)

### 2.6.4 Zement

Beton (bei 105 °C getrocknet)	=	100,0	%
– gebundenes Wasser	=		%
– Gesamtzuschlag	=		%
<hr/>			
Zement	=		%

### 2.6.5 Mischungsverhältnis Zement : Zuschlag (in Gewichtsteilen)

$$\text{Mischungsverhältnis} = 1 : \frac{\text{Gesamtzuschlag (\%)}}{\text{Zement (\%)}}$$

### 2.6.6 Mischungsverhältnis Zement : Zuschlag : gebundenes Wasser (in Gewichtsteilen)

$$\text{Mischungsverhältnis} = 1 : \frac{\text{Gesamtzuschlag (\%)}}{\text{Zement (\%)}} : \frac{\text{geb. Wasser (\%)}}{\text{Zement (\%)}}$$

## 2.7 Zementgehalt

Der Zementgehalt in  $\text{kg/m}^3$  Beton errechnet sich aus der Rohdichte des Festbetons und aus dem Mischungsverhältnis von Zement : Zuschlag : gebundenem Wasser wie folgt:

$$\text{Zementgehalt} = \frac{R}{\left[ \text{kg/m}^3 \right] \left( 1 + \frac{\text{Gesamtzuschlag (\%)}}{\text{Zement (\%)}} + \frac{\text{geb. Wasser (\%)}}{\text{Zement (\%)}} \right)}$$

## 3. Kontrollversuche

Um die Genauigkeit des vorgeschlagenen Verfahrens zu überprüfen, wurden im Zement- und Beton-Laboratorium Beckum Probewürfel mit 20 cm Kantenlänge hergestellt. Die Betone sind aus Portlandzement sowie Sand und Kies mit 30 mm Größtkorn vom Rhein oder von der Lippe hergestellt worden. Der Kiessand von der Lippe enthält einen relativ hohen Anteil an carbonatischem Gestein. Die Betone wiesen ein Mischungsverhältnis von Zement : Zuschlag : Wasser = 1,00 : 6,00 : 0,60 (Gew.-T.) auf. Der Zementgehalt betrug etwa  $310 \text{ kg/m}^3$ . Die Sieblinie der Zuschläge lag im besonders guten Bereich nach DIN 1045.

Das Korngemisch wies folgende Anteile auf:

bis 3	7	15	30 mm
30	50	75	100 %

Die Würfel lagerten zunächst 1 Tag unter feuchten Tüchern, dann bis zum 3. Tag unter Wasser und anschließend in Raumluft.

Die nachträgliche Bestimmung des Mischungsverhältnisses wurde an je einem Würfel nach 3 und 28 Tagen und nach 1 Jahr durchgeführt, und zwar nach DIN 52170 (mit der Voraussetzung, daß der Zuschlag in Salzsäure unlöslich ist) und nach dem Verfahren mit der  $\text{CaCO}_3$ -Korrektur.

Die Ergebnisse sind in Tafel 1 (Verfahren nach DIN 52170) und in Tafel 2 (Verfahren mit CaCO<sub>3</sub>-Korrektur) aufgeführt.

Das Verfahren nach DIN 52170 liefert beim Beton aus Rheinkies-sand mit 1 : 6,4 ein Mischungsverhältnis, das der tatsächlichen Zusammensetzung von 1,00 : 6,00 in der Größenordnung nahe-kommt. Beim Beton mit Zuschlag von der Lippe ergab sich, wie zu erwarten war, mit 1 : 1,4 ein völlig unzutreffendes Mischungs-verhältnis.

Beim Verfahren mit der CaCO<sub>3</sub>-Korrektur wurde auch eine Be-rechnung des Zementgehaltes durchgeführt, die sich beim Ver-fahren nach DIN 52170 wegen der großen Abweichungen beim Beton mit Lippekies-sand erübrigte.

Tafel 1 Mischungsverhältnis von Betonen, ermittelt nach DIN 52 170

Untersuchungen	Zuschlag vom Rhein			Zuschlag von der Lippe		
	3 Tg.	28 Tg.	1 Jahr	3 Tg.	28 Tg.	1 Jahr
Glühverlust	3,3	3,9	3,6	17,3	19,8	19,7
unlöslicher Rückstand	83,7	83,1	83,3	48,0	47,3	45,8
Zement	13,0	13,0	13,1	34,7	32,9	34,5
Mischungsverhältnis Zement : Zuschlag	1 : 6,4	1 : 6,4	1 : 6,4	1 : 1,4	1 : 1,4	1 : 1,3

Tafel 2 Mischungsverhältnis von Betonen, ermittelt nach dem Verfahren mit CaCO<sub>3</sub>-Korrektur

Untersuchungen	Zuschlag vom Rhein			Zuschlag von der Lippe		
	3 Tg.	28 Tg.	1 Jahr	3 Tg.	28 Tg.	1 Jahr
Glühverlust	3,3	3,9	3,6	18,3	19,8	19,7
Kohlensäure	0,5	0,7	0,8	15,5	16,6	16,6
gebundenes Wasser	2,8	3,2	2,8	2,8	3,2	3,1
Kalkstein (CaCO <sub>3</sub> ber.)	0,5	0,9	1,1	34,5	37,0	37,0
säureunlöslicher Rückstand	82,5	81,8	83,3	49,2	46,1	45,8
Zuschlag	83,0	82,7	84,4	83,7	83,1	82,8
Zement	14,2	14,1	12,8	13,5	13,7	14,1
Mischungsverhältnis Zement : Zuschlag	1 : 5,8	1 : 5,9	1 : 6,6	1 : 6,2	1 : 6,1	1 : 5,9
Mischungsverhältnis Zement : Zuschlag : gebundenes Wasser	1 : 5,8 : 0,2	1 : 5,9 : 0,2	1 : 6,6 : 0,2	1 : 6,2 : 0,2	1 : 6,1 : 0,2	1 : 5,9 : 0,2
Rohdichte Festbeton kg/m <sup>3</sup>	2250	2290	2320	2270	2290	2260
Zementgehalt kg/m <sup>3</sup>	320	322	298	306	312	318

Das Verfahren mit der  $\text{CaCO}_3$ -Korrektur liefert sowohl mit Rheinkiessand (Mittelwert 1 : 6,1) als auch mit Lippekiessand (Mittelwert 1 : 6,1) eine zufriedenstellende Übereinstimmung. Auch die berechneten Zementgehalte kommen dem Zementgehalt mit  $310 \text{ kg/m}^3$  ausreichend nah.

#### **4. Zusammenfassung und Ausblick**

Für die nachträgliche Bestimmung des Zementgehalts von Beton, der säurelöslichen Zuschlag enthält und für den unverarbeiteter Zuschlag für zusätzliche Untersuchungen nicht zur Verfügung steht, wird ein Bestimmungsverfahren mit einer Korrektur über den Kohlendioxidgehalt des Betons vorgeschlagen. Untersuchungen an bestimmten Laborbetonen haben gezeigt, daß dieses Verfahren eine Bestimmung des Mischungsverhältnisses und eine Berechnung des Zementgehaltes mit einer Genauigkeit von wenigstens  $\pm 10 \%$  ermöglicht. Dadurch kann jetzt auch das Mischungsverhältnis von Beton bestimmt werden, bei dem das bisherige Verfahren nach DIN 52 170 versagt.

Das vorgeschlagene Verfahren läßt sich voraussichtlich auch auf carbonatisierte Betone und Mörtel anwenden. Dazu müssen jedoch noch eingehende Untersuchungen über die Kohlendioxidaufnahme von Betonen und Mörteln durchgeführt werden.

Verfahren mit „Leitmolekülen“ oder „Leitelementen“ lassen sich unter Umständen auch für andere Zuschläge (z. B. Bims, Leichtzuschläge, Asbest und dergleichen) oder für Bindemittel mit erhöhtem Anteil an salzsäureunlöslichen Bestandteilen (Traßzemente, Zemente mit Zusatzstoffen) anwenden. Derartige Untersuchungen werden zur Zeit durchgeführt.