Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 104 (1986)
Heft: 11

Artikel: Zementdosierung: Bestimmung im erhärteten Beton und Mörtel
Autor: Houst, Y. / Pfefferkorn, J. / Wolter, H.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-76101

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

grosse Energieverbrauchs-Zuwachsraten aufweisen: Verkehr und Elektrizität. Auch hier werden wir pragmatisch, wie im Erdölbereich vor bereits über 10 Jahren, nach Lösungen suchen müssen, um unsere grosse Auslandabhängigkeit und Umweltbelastungen zu vermindern. Die laufende NFP-Studie «Verminderung des elektrischen Energieverbrauches in Gebäuden» der Forschergruppe Brunner/Müller/Stulz/Wick ist ein Schritt in diese Richtung.

Adresse der Autoren : *Conrad U. Brunner*, dipl. Arch. ETH/SIA, und *Ernst A. Müller*, dipl. Geograph im Büro Conrad U. Brunner, Planung & Energie & Architektur, Lindenhofstrasse 15, CH-8001 Zürich.

Das vollständige Manuskript des Forschungsberichtes, der auch ein umfangreiches Quellenverzeichnis umfasst, ist bei den Autoren erhältlich.

Literaturverzeichnis:

[1] *Brunner C.U.* und *Müller E.A.*: «Strukturelle Verminderung des Energieverbrauches in Gebäuden», NFP 44, Zürich, 13. August 1985

[2] *Brunner C.U.* und *Müller E.A.*: «Auslöser und Nebenwirkungen beim Energiesparen im Bauwesen, NFP, Zürich 1982. Veröffentlichung Zusammenfassung in SI+A 30/31, Zürich 1983

[3] *Gabathuler Ch.* und *Wüest H.*: «Bauliche Ressourcen und ihre Benützung, Lagebeurteilung und mögliche Veränderungspotentiale, ETH- Forschungsprojekt Manto, Zürich 1984

[4] SIA-Empfehlung 380/1, «Energie im Hochbau», Zürich 1985, und SIA-Dokumentation 80, «Energie im Hochbau», Zürich 1985

[5] Baudirektion Kanton Schaffhausen, Kantonale Energiefachstelle: «Leitfaden zur Erstellung von energetischen Analysen in Gebäuden, Schaffhausen 1985

[6] *Müller E.A.*: «Energiesparmassnahmen bei 1108 Wohnungen», SI+A Nr. 12/85, Zürich 1985

[7] Bau- und Landwirtschaftsdirektion des Kantons Basel-Landschaft: «Energiegesetz des Kantons Basel-Landschaft, Erfolge sind messbar», Liestal 1985

[8] *Dittrich A.*: «Ermittlung von Jahresnutzungsgraden an 100 öl- und gasgefeuerten Zentralheizungsanlagen 1980/81, Schriftenreihe des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Hilden, BRD, 1982

[9] *Peters M.*: «Experimentelle Steuerung des Energieverbrauchsverhaltens privater Haushalte», Studie NFP 44, Zürich 1986.

Zementdosierung

Bestimmung im erhärteten Beton und Mörtel

Von Y. Houst, Lausanne, J. Pfefferkorn, Dübendorf, und H. Wolter, Wildegg

Das beschriebene Analysenverfahren, das in Kooperation zwischen der EMPA Dübendorf, der TFB Wildegg und dem LMC, ETH Lausanne, erarbeitet und langfristig auf Zuverlässigkeit geprüft wurde, erlaubt es, die Zementdosierung im erhärteten Beton und Mörtel nachträglich zu bestimmen. Als Referenzverbindung (Leitverbindung) wird hierbei die lösliche Kieselsäure herangezogen, die auf chemischem Wege bestimmt wird und in den Schweizer Portlandzementen im Mittel zu 21% vorhanden ist.

Da dieses Verfahren die Zementdosierung nur indirekt über die lösliche Kieselsäure ermittelt, ergeben sich bezüglich Einsatzmöglichkeiten gewisse Einschränkungen. Streng genommen werden nur für Schweizer Portlandzemente korrekte Resultate erhalten, wobei aber auch hier, bedingt durch das Probenalter, den Zuschlag, den geringfügig variablen löslichen SiO_2-Gehalt der einzelnen Zemente und die Probenahme, mit einem relativen Fehler zwischen +10 und −5% zu rechnen ist.

Nicht anwendbar ist dieses Verfahren auf Beton- und Mörtelproben, die mit verschnittenen Zementen, wie z. B. Hochofenzementen, Puzzolanzementen, Flugaschezementen oder fillerisierten Zementen hergestellt worden sind. Gleiches gilt für Mörtel- oder Betonproben mit einem Zusatz von hydraulischem Kalk.

Einführung und Abgrenzung

Grund für die Erarbeitung des Analysenverfahrens

Zwar existieren schon seit langem Untersuchungsmethoden für die chemische Bestimmung der Zementdosierung im erhärteten Beton, doch ergaben die einzelnen Verfahren (Gelatine und Evaporation [1]) durch die unterschiedlichen Versuchstechniken meist laborspezifische und damit häufig nur relativ unsichere Resultate.

Um den Einfluss des Labors auf das Zementgehaltsergebnis auszuschliessen, d. h. um ein Verfahren zu entwickeln, das laborunabhängig eine korrekte Zementgehaltsbestimmung erlaubt, wurde im Jahre 1977 eine Zusammenarbeit zwischen der EMPA, Dübendorf, der TFB, Wildegg, und dem LMC der ETH Lausanne vereinbart. Hierbei konnte ein Analysenverfahren entwickelt werden, das es erlaubt, unabhängig vom Prüflabor die Zementdosierung etwa +10/−5% genau im rein zementgebundenen Beton und Mörtel zu bestimmen. Miterfasst wurden ebenfalls der Einfluss der Zementdosierung, das Probenalter und die Art des Zuschlagsstoffes sowie der SiO_2-Anteil in einem ausgewählten Portlandzement. Nach einer Erprobungszeit von mehreren Jahren soll nun diese Methode einem breiteren Anwenderkreis, aber auch dem Baupraktiker bekannt gemacht werden und zu zeigen, mit welchen unbekannten Einflüssen gerechnet werden muss und wie daher die Resultate zu interpretieren sind.

Anwendungsbereich des Analysenverfahrens

Da es auf chemischem Wege nicht möglich ist, den Zementgehalt im Beton oder Mörtel unmittelbar zu bestimmen, muss auf ein indirektes Verfahren zurückgegriffen werden. Hierbei muss eine Komponente gefunden werden, die im Zement in einem grösseren und möglichst gleichbleibenden Anteil vorhanden ist, im Zuschlagsstoff und Anmachwasser jedoch möglichst fehlen sollte. Eine solche Leitverbindung stellt die salzsäurelösliche Kieselsäure (SiO_2) dar. Sie ist in den Schweizer Portlandzementen im Mittel zu rund 21 Masse-% (bei einer Variationsbreite von 19,5–22,6 Masse-%) enthalten. Vom analytischen Standpunkt aus lässt diese

Verbindung gut reproduzierbare Ergebnisse zu, wenn das unten beschriebene Analysenverfahren angewandt wird. Allerdings ergeben sich durch das Betonalter, den verwendeten Zuschlagsstoff, die Probenahme und die Schwankung des SiO_2-Gehaltes in einzelnen Zementen sogenannte Nebeneffekte, die das Resultat der Zementdosierung in die eine oder andere Richtung beeinflussen können. Daher ist das beschriebene Verfahren streng genommen nur für Schweizer Portlandzemente zulässig, da hier die lösliche Kieselsäure nur im begrenzten Masse variiert. Absolut ungeeignet ist dieses Verfahren dagegen für verschnittene Zemente (Mischzemente), da hierbei durch den Zusatz von Hochofenschlacke, Puzzolan, Flugasche, Kalkfiller oder hydraulischem Kalk der lösliche Kieselsäureanteil derart verfälscht wird, dass das gewonnene SiO_2-Resultat für die Berechnung der Zementdosierung unbrauchbar wird.

Wesen des Untersuchungsverfahrens

Die Grundlage für die Zementgehaltsbestimmung im Beton oder Mörtel bildet die lösliche Kieselsäure im Portlandzement. Da diese Verbindung mit rund 21 Masse-% im Zement als konstant eingestuft wird und in den anderen Betonkomponenten praktisch nicht vorkommt, genügt es, die lösliche Kieselsäure durch Salzsäureaufschluss mit anschliessendem Abscheidungsprozess quantitativ zu ermitteln. Die Berechnung der Zementdosierung erfolgt hieraus nach dem Proportionalitätsverfahren unter Berücksichtigung der trockenen Beton- oder Mörtelrohdichte.

Interferenzen, wie sie nachstehend beschrieben werden, bleiben bei der Berechnung unberücksichtigt, genau wie evtl. Abweichungen des löslichen SiO_2 vom angenommenen Sollwert im Zement.

Beeinflussung der Analysengüte durch Interferenzerscheinungen

Zwecks Erfassung von Nebeneffekten wurde in einer Reihenuntersuchung nicht nur die Zementdosierung (P 200 bis P 500) variiert, sondern ebenfalls der Einfluss der Lagerungsdauer (7...360 Tage) und der Zuschlagsart (Kalkstein, Quarz, silikathaltiges Aggregat) mit untersucht. Ebenfalls berücksichtigt wurde die im verwendeten Zement (PC Jura) gefundene lösliche Kieselsäure (19,6 Masse-%).

Bei der Reihenuntersuchung konnten folgende Fakten ermittelt werden:

□ Die nachträglich auf analytischem Wege gefundene Zementdosierung ist vom verwendeten Zuschlag abhängig

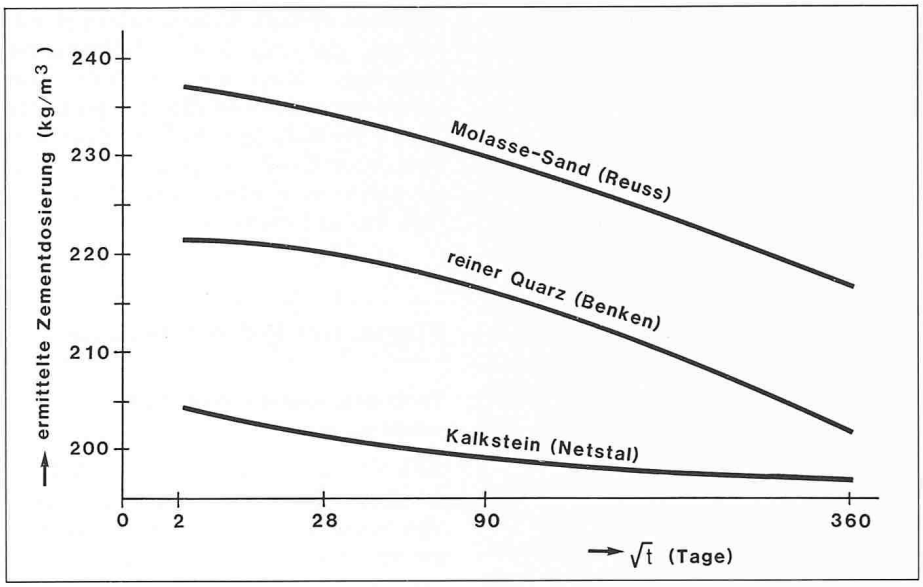


Bild 1. Einfluss der Zeit und des Beton-Zuschlagmaterials auf die gefundene Zementdosierung (nominell P200)

Bild 2. Einfluss der Zeit und des Beton-Zuschlagmaterials auf die gefundene Zementdosierung (nominell P500)

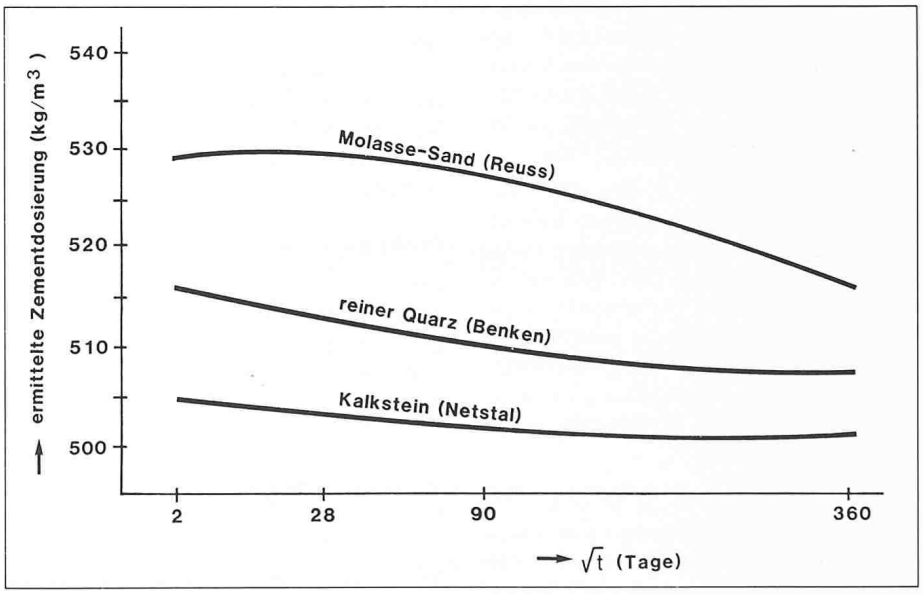
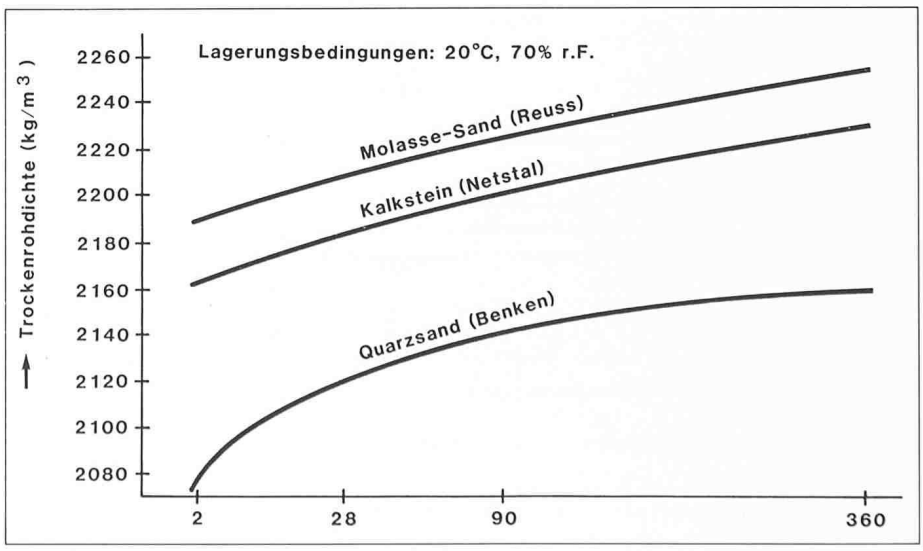


Bild 3. Zeitabhängige Veränderung der Trockenrohdichte von Mörtelproben (P200) mit unterschiedlichen Zuschlagstoffen



□ Bei reinem Kalkstein werden die nominellen Werte am wenigsten, bei silikatischem Kalkstein am stärksten beeinflusst

□ Dieser Einfluss macht sich immer in der Art bemerkbar, dass die ermittelten Werte gegenüber den Soll-Werten zu hoch ausfallen, d. h. eine zu hohe Zementdosierung vorgetäuscht wird

□ Diese Abweichung ist von der effektiven Zementdosierung praktisch unabhängig und spiegelt im frühen Betonalter bei kalksteinhaltigem Zuschlag ein Plus von rund 5 kg Zement/m³ und bei silikatischem Kalkstein von rund 30 kg Zement/m³ vor

□ Die Differenzen zum Soll-Wert vermindern sich jedoch mit zunehmendem Betonalter und betragen nach einem Jahr noch rund 1 kg/m³ beim Kalkstein und rund 20 kg/m³ beim silikatischen Zuschlag

□ Hieraus lässt sich bereits ableiten, dass die gefundene Zementdosierung zeitabhängig durch einen Mineralisierungsvorgang im Zementstein abnimmt; dieser Effekt ist bei der Untersuchung eines bereits stark gealterten Mörtels oder Betons unbedingt zu berücksichtigen (vgl. Bild 1 und 2).

Erwähnt sei ausserdem, dass die Trokkenrohdichte des verwendeten Mörtels zeitabhängig zunimmt, was eine Folge der Karbonatisierung, der Hydratation und einer gewissen Volumenkontraktion sein dürfte. Ähnliche Sachverhalte wurden in der TFB Wildegg unabhängig von dieser Untersuchung auch an Betonprobekörpern festgestellt (vgl. Bild 3).

Ferner ist dabei auch zu berücksichtigen, dass die verschiedenen Zuschlagsstoffe im Mörtel durch alkalische Verbindungen bei der Bestimmung des Zementgehaltes unterschiedlich stark angegriffen werden. So lässt sich in einem Mörtel, der mit SIA 215-Normsand (kieseliger Kalkstein) anstelle von Quarz hergestellt wurde, ein grösserer Anteil an löslichem SiO_2 nachweisen, obwohl im Quarz der gesamte SiO_2-Anteil höher als im kieseligen Kalkstein ist (vgl. hierzu Tabelle 1).

Eingesetzte Referenzmaterialien

Probenzusammensetzung und -abmessungen

Alle Versuche wurden bezüglich Prismenherstellung und Sieblinie nach SIA-Norm 215 durchgeführt (Prismengrösse: 4×4×16 cm). Variiert wurde die Zementdosierung (nominell 200 kg/m³ bzw. 500 kg/m³). Hierbei wurde der W/Z-Wert so gewählt, dass sich eine plastische Konsistenz ergab; somit konnte für den P 200 ein W/Z-Wert von rund 0,90 und für den P 500 ein solcher von rund 0,45 errechnet werden.

Als Zuschlagsstoff wurde reiner Quarzsand von Benken, Kalkstein von Netstal bzw. SIA-Normsand (fluvioglaziale Schotter des Schweizer Mittellandes = Quarz/Silikat/Kalkspat-Gemenge) verwendet.

Probenlagerung und -aufbereitung

Damit die Probekörper bis zur ersten Zementgehaltsbestimmung nach 7 Tagen von der Umgebung unbeeinflusst hydratisieren konnten, wurden die Prismen einzeln luftdicht in Plastikbeutel verpackt und bei 20 °C gelagert. Die Lagerung der restlichen Prismen erfolgte offen an Luft bei 20 °C und 70% r.F. Für die 28-, 90- bzw. 360-Tage-Prüftermine wurden die Prismen jeweils wie folgt aufbereitet:

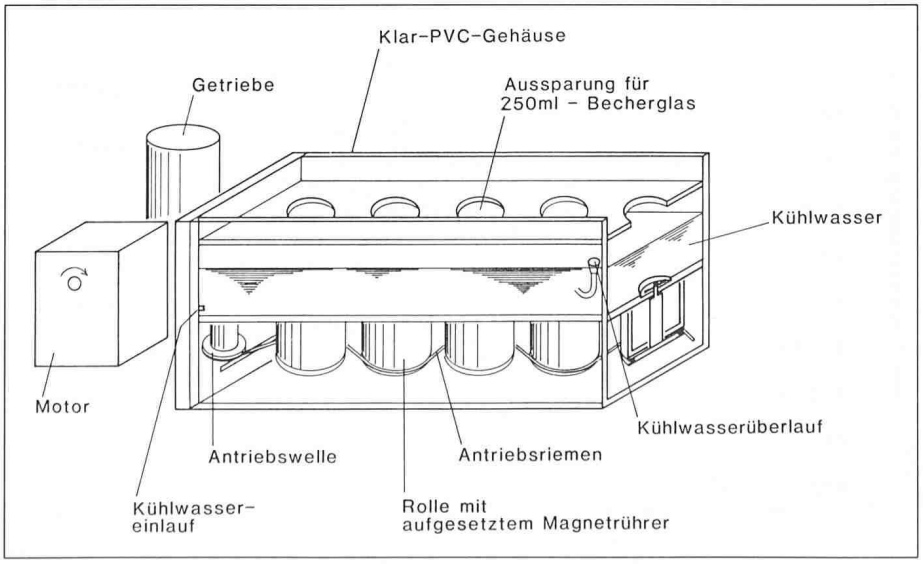
□ Bestimmung der Rohdichte nach Wassersättigung und Trocknung bei 105 °C durch Differenzwägung

□ Grobzerkleinerung in Spezialbehältern ohne Verlust an Festsubstanz

□ Feinmahlung der gesamten Probe auf < 0,1 mm

□ Homogenisierung, dann Abfüllen des Pulvers in Portionen zu je rund 100 g in luftdicht verschliessbare Glasflaschen

Bild 4. Aufschluss-Apparatur für Beton / Mörtel



Analysengang für die Bestimmung der Zementdosierung

Probenvorbereitung

Erforderliche Beton- oder Mörtelmenge
Wünschbare und repräsentative [2] Menge für den zu untersuchenden Beton bzw. Mörtel, bei

Max.-Korn	64 mm:	rund 10 kg
	32 mm:	2–5 kg
	16 mm:	0,5–1 kg
	8 mm:	200–500 g
	4 mm:	100–200 g

Bestimmung der Rohdichte (vorgängig der Zementgehaltsbestimmung)
Durch Differenzwägung der feuchtigkeitsgesättigten Probe an Luft und unter Wasser

Trocknen der Probe
Im Trockenschrank bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz

Aufbereitung der Probe
Vorbrechen des trockenen Materials im Backenbrecher auf eine Korngrösse von rund 10 mm

Reduktion der Probenmenge
Material so oft über den Probeteiler geben, bis noch etwa 200–250 g zurückbleiben

Pulversisieren der Probe
Reduziertes und feingebrochenes Material in Scheibenschwingmühle auf < 0,1 mm mahlen und in luftdichtverschlossenen Glasflaschen aufbewahren

Aufschlussapparatur

Da das Resultat der löslichen SiO_2-Bestimmung in starkem Masse von der Temperaturführung und von den entsprechenden Nachbehandlungsverfahren der Filterrückstände abhängt (Verluste durch vorzeitige SiO_2-Ausfällungen), müssen die nachstehenden Vorschriften genau eingehalten und nur von entsprechend geschultem Laborpersonal ausgeführt werden.

Die Unterschiede der gefundenen Einzelwerte einer Doppelbestimmung dürfen dabei maximal 0,1% SiO_2 betragen.

Eine vorschriftsmässige Temperaturführung während der Aufschlussphase

ist durch die nachstehend beschriebene Apparatur gewährleistet. Hierbei handelt es sich im Prinzip um ein von Leitungswasser (etwa 15 °C) durchflossenes Kühlbecken, das zur Aufnahme von 250-ml-Bechergläsern geeignet und mit einer Magnetrührereinheit ausgerüstet ist (vgl. Bild 4).

Erforderliche Reagenzlösungen

Salzsäure, konz.
Salzsäure 32% zur Analyse, Dichte 1,16 kg/l

Salzsäure (1:1)
1 Vol.-Teil konz. Salzsäure mit vollentsalztem Wasser auf 2 Vol.-Teile verdünnen

Salzsäure (1:23)
1 Vol.-Teil konz. Salzsäure mit vollentsalztem Wasser auf 24 Vol.-Teile verdünnen

Schwefelsäure (25%)
Schwefelsäure 25% zur Analyse

Flusssäure, konz.
Flusssäure 40% zur Analyse, Dichte 1,13 kg/l

Natriumcarbonatlösung (5%)
50 g Natriumcarbonat, wasserfrei, zur Analyse, in 950 ml vollentsalztem Wasser lösen und in Plastikflaschen aufbewahren (rund 1 n)

Natriumchloridlösung (3%)
30 g Natriumchlorid zur Analyse in 970 ml vollentsalztem Wasser lösen (rund 0,5 n)

Versuchsdurchführung

□ Zwecks Temperierung der Aufschlussapparatur das Leitungswasser bereits 10 min vor Versuchsbeginn strömen lassen

□ 5 g Einwaage (für P 300, bei höheren Zementgehalten 3 g und bei reinem PC 1 g) in ein 250-ml-Becherglas (hohe Form) bringen, Magnetstab hineinlegen und das Glas in die Aufschlussapparatur setzen

□ Nach 10 min Rührwerk starten und vorsichtig 60 ml auf etwa 5–8 °C gekühlte Salzsäure (1:1) hinzufügen

□ Nach einer Reaktionsdauer von 10 Minuten Becherglas abheben, Magnetrührstab herausnehmen mit kaltem Wasser abspülen und entfernen

□ Rückstand (= unlösliche Bestandteile) mit kaltem Wasser quantitativ auf ein 11-cm-Weissbandfilter bringen, einmal mit kaltem Wasser nachwaschen, wobei das Filtrat in einer Porzellanschale von 12,5 cm Durchmesser (oder in einem 400-ml-Becherglas) aufgefangen wird; das Filtrat enthält jetzt die Zement-Kieselsäure in gelöster Form

□ Filterrückstand 3mal mit kochend heisser Natriumchloridlösung (3%ig) nachwaschen

□ Zwecks Lösung der eventuell partiell ausgefallenen Kieselsäure den Rückstand 5mal mit kochend heisser Natriumcarbonatlösung (5%ig) nachwaschen, wobei der Rückstand jedesmal gut aufgewirbelt und erst nach dem Leerlaufen des Filters wiederholt nachgewaschen wird

□ Filtrat während des Auswaschens einige Male zwecks Unterdrückung einer zu heftigen CO_2-Entwicklung bewegen

□ Anschliessend Filtrat auf dem Wasser- oder Luftbad zur vollständigen Trocknung eindampfen

□ Eindampfungsrückstand mit 5 ml konz. Salzsäure anfeuchten, nach etwa 2 min 100 ml warmes, vollentsalztes Wasser hinzufügen, gelegentlich umrühren und 15 min auf dem Wasserbad stehen lassen

□ Ausgeschiedenes SiO_2 durch ein 11-cm-Weissbandfilter abfiltrieren und fünfmal mit heisser Salzsäure (1:23) nachwaschen

□ Filter samt Niederschlag im Platintiegel bei langsam steigender Temperatur trocknen und veraschen. Anschliessend noch 30 min bei 1000 °C im Elektroofen glühen, im Exsikkator erkalten lassen und wägen (= m_1)

□ Zur Ermittlung der reinen Kieselsäure 20 Tropfen 25%ige Schwefelsäure und etwa 10 ml Flusssäure zusetzen, auf der Heizplatte oder offener Flamme abrauchen und anschliessend 5 min im Elektroofen bei 1000 °C glühen, im Exsikkator erkalten lassen und wägen (= m_2).

Adressen der Verfasser: *Y. Houst*, dipl. Chemiker, Laboratorium für Werkstoffe im Bauwesen, EPF, 1015 Lausanne; *J. Pfefferkorn*, dipl. Ing.-Chem. HTL, Abt. Bauchemie, EMPA, 8600 Dübendorf, und *H. Wolter*, Chem.-Ing. (grad.), Forschungs- und Beratungsstelle der Schweizerischen Zementindustrie (TFB), 5103 Wildegg.

Zuschlagsmaterial	*lösliche Kieselsäure*			
	im Mörtel nach 7 Tagen	*Differenz zum Kalkstein*	*im Original-Zuschlag*	*Differenz zum Kalkstein*
Kalkstein	1,84%	0,00%	0,10%	0,00%
Quarz	2,05%	0,21%	0,40%	0,30%
Normsand	2,12%	0,28%	0,28%	0,18%

Tabelle 1. Beeinflussung der löslichen Kieselsäure durch die Zuschlagsart

Berechnungen

□ *Rohdichte des Trockenbetons*

$$\varrho = \frac{m_{tr}}{m_{fl} - m_{iw}} \cdot 1000 \qquad [kg/m^3]$$

m_{tr} = Masse der trockenen Probe [g]
m_{fl} = Masse der wassergesättigten Probe an Luft [g]
m_{iw} = Masse der wassergesättigten Probe im Wasser [g]
Anm.: Auftrieb ≙ Volumen ≙ $m_{fl} - m_{iw}$

□ *Lösliche Kieselsäure*

$$SiO_2 \text{ im Beton} = \frac{m_1 - m_2}{\text{Probeneinwaage}} \cdot 100 \qquad [Ma.\text{-}\%]$$

m_1 = Tiegel + Rückstand vor dem Abrauchen [g]
m_2 = Tiegel + Rückstand nach dem Abrauchen [g]

□ *Zementgehalt*

$$\text{Zementgehalt im Beton} = \frac{SiO_2 \text{ im Beton [Ma.-\%]}}{21 \text{ [Ma.-\%]}^*} \cdot 100 \qquad [Ma.\text{-}\%]$$

□ *Zementdosierung*

$$\text{Zementdosierung} = \frac{SiO_2 \text{ im Beton [Ma.-\%]} \cdot \varrho \text{ [kg/m}^3]}{21 \text{ [Ma.-\%]}^*} \qquad [kg/m^3]$$

Anm.: Der Anteil an löslicher Kieselsäure im Zuschlag bleibt bei der Berechnung unberücksichtigt.

* Angenommener, durchschnittlicher SiO_2-Anteil [Ma.-%] in den Schweizer Zementen; falls der effektive SiO_2-Gehalt im Zement bekannt, ist mit diesem zu rechnen.

Literaturverzeichnis

[1] *P. Esenwein:* Über die nachträgliche Bestimmung des Zementgehaltes von Betonproben; Schweizer Archiv, Sept. 1953, S. 279 ff.

[2] *W. Studer:* Die nachträgliche Bestimmung des Zementgehaltes im Beton; Schweiz. Bauzeitung, H. 43, 26. Okt. 1978, S. 809 ff.