Zeitschrift: Tec21
Herausgeber: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
Band: 130 (2004)
Heft: 44: Beton

Artikel: Entmischung von Beton durch Überverdichtung
Autor: Olbrecht, Hanspeter / Moser, Konrad
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-108461

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: 17.07.2025

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

Hanspeter Olbrecht, Konrad Moser

Entmischung von Beton durch Überverdichtung

Aus einem Beton, der von seiner Rezeptur her und aufgrund der Daten der Frischbetonkontrolle beispielsweise wasserdicht und frostbeständig sein sollte, resultiert in der Praxis oft ein Bauwerksbeton mit ungenügenden Eigenschaften. Ursache ist häufig die Entmischung des Betons infolge Überverdichtung. Die Minimierung der Entmischungsneigung führt zu einem wesentlich besseren Bauwerksbeton mit stark vermindertem Schadenpotenzial. Ein wichtiges Hilfsmittel dazu ist die Bestimmung des Entmischungsmasses.

Der Baustoff Beton hat sich in den letzten zwanzig Jahren wesentlich verändert. Höhere Anforderungen sowohl an den Frischbeton – leichtere Verarbeitbarkeit oder Pumpbarkeit – als auch an den Festbeton – Frost-Tausalz-Beständigkeit, höhere Druckfestigkeit oder tiefere Wasserleitfähigkeit – führten zu neuen Betonsorten mit Zusatzmitteln, insbesondere Fliessmitteln und Luftporenbildnern.[1]

Der heutige Beton weist dementsprechend immer höhere Labor-Prüfwerte auf. Ob eine bestimmte Druckfestigkeit oder Frost-Tausalz-Beständigkeit an Prüfkörpern erreicht wird, ist jedoch nicht allein massgebend. Für die Lebensdauer des Bauwerks sind die Qualität des eingebauten Betons und vor allem seine Homogenität von zentraler Bedeutung. Wie homogen der Beton im Bauwerk schliesslich ist, hängt von seiner Zusammensetzung, seiner Konsistenz und vom Einbauvorgang selbst ab.[2]

Beim Einbau weisen aktuelle Betonsorten zum Teil den erheblichen Nachteil auf, dass sie bei grosszügiger Dosierung mehrerer Zusatzmittel stark zur Entmischung infolge des Verdichtens neigen.[3] Die Folge dieser Entmischung ist eine inhomogene Betonqualität[4] mit inhomogenen Schwindspannungen und entsprechender Rissbildung. Parallel dazu kann der Luftporengehalt lokal so tief sein, dass Frostschäden zu erwarten sind. Durch die Definition, Quantifizierung und Minimierung der Entmischungsneigung[5] können einerseits Betonrezepturen optimiert und anderseits Massnahmen für den optimalen Einbau festgelegt werden.

Prüfung der Entmischung

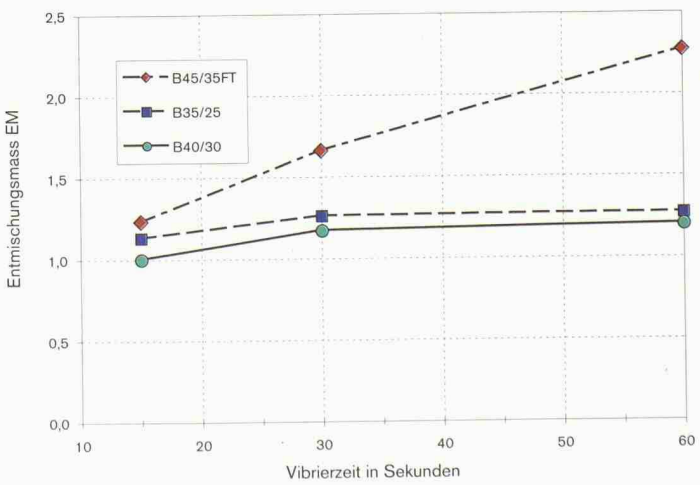
Zur Bestimmung der Konsistenz bzw. der Verarbeitbarkeit des Betons sind die Kenngrössen Setzmass, Setzzeitmass, Verdichtungsmass und Ausbreitmass definiert.[6] Die vorliegende Untersuchung arbeitete mit den folgenden Grössen:

– *Verdichtungsmass VM:* Das Verdichtungsmass ist das Verhältnis der Einfüllhöhe zur mittleren Höhe nach dem Verdichten. Es ist geeignet zur Charakterisierung von plastischem bis steifem Beton.

– *Ausbreitmass AM:* Beim Ausbreitmass wird die Ausbreitfähigkeit des Frischbetons infolge definierter Erschütterungen bestimmt. Das Ausbreitmass ist geeignet zur Charakterisierung von plastischem bis weichplastischem Beton.

Betonsorten mit gleichem Verdichtungs- bzw. Ausbreitmass weisen oft unterschiedliche Entmischungsneigungen auf. An der Empa wurde deshalb eine Methode entwickelt, welche direkt die Neigung des Betons zum Entmischen infolge des Verdichtens quantifiziert. Sie kann über den gesamten Konsistenzbereich angewendet werden.[5]

Der Beton wird bei der Bestimmung des Verdichtungsmasses im Walzbehälter (genormter Behälter für die Bestimmung des Verdichtungsmasses nach Walz) während 60 Sekunden vibriert. Damit lassen sich alle im Stahlbetonbau verwendeten Betonsorten im Sinne



1

Entmischungsmass in Funktion der Vibrierzeit für die drei Betonmischungen (Bilder: Empa)

der Prüfung entmischen. Nach der Messung des Verdichtungsmasses wird im obersten und im untersten Bereich des vibrierten Betons eine Probe von rund 7.5 kg entnommen und daran der Feinmörtelgehalt m bestimmt. Als Feinmörtel wird der über einem Sieb mit 2 mm Maschenweite auswaschbare Betonanteil betrachtet (Rückstand auf dem Sieb: $M_{>2}$). Das Entmischungsmass EM ist definiert als Verhältnis zwischen dem Feinmörtelanteil der oberen $m_{<2,\,oben}$ und demjenigen der unteren Probe $m_{<2,\,unten}$:

$$EM = \frac{m_{<2,\,oben}}{m_{<2,\,unten}} \quad \text{mit}$$

$$m_{<2,\,unten} = \frac{M_{unten} - M_{>2,\,unten}}{M_{unten}} \quad \text{und} \quad m_{<2,\,oben} = \frac{M_{oben} - M_{>2,\,oben}}{M_{unten}}$$

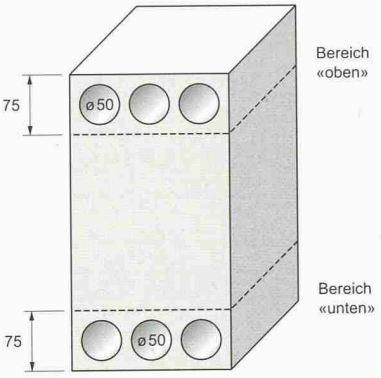
Ein Beton, der sich in der Prüfung nicht entmischt, weist unten und oben den gleichen Feinmörtelgehalt auf, d.h. das Entmischungsmass beträgt 1.0 (Tabelle a). Ein Beton mit einem Entmischungsmass bis 2.0 entmischt sich beim üblichen Vibrieren nur geringfügig. Ein Beton mit einem Wert zwischen 2.0 und 4.0 neigt stark zum Entmischen, muss entsprechend sorgfältig eingebaut werden und darf nur kurzzeitig und in einem engen Raster vibriert werden.

Untersuchung der vertikalen Entmischung

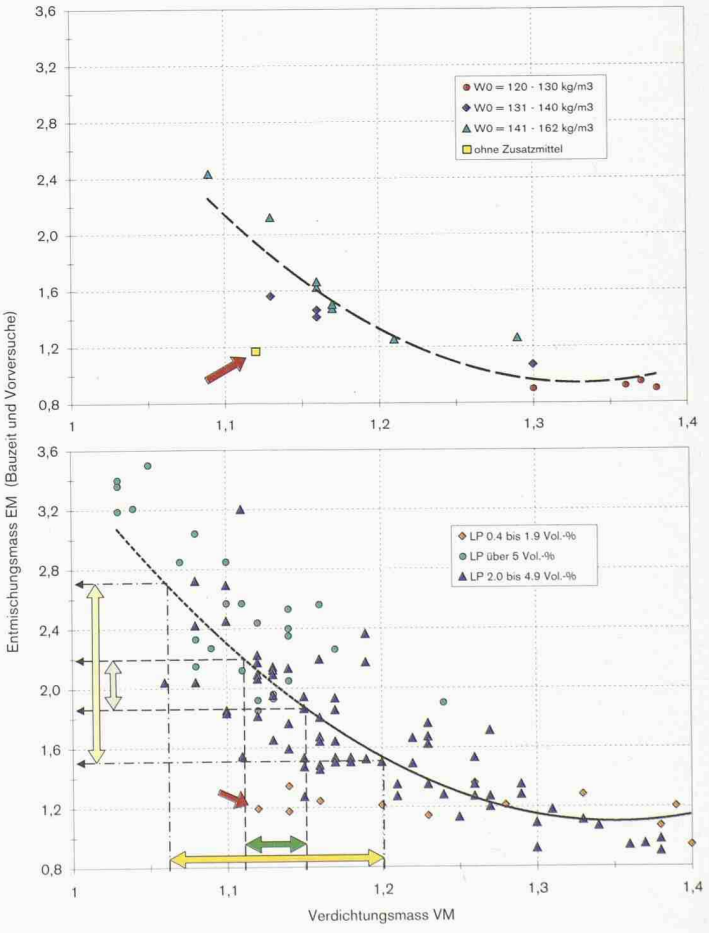
Um die an Bauwerken beobachtete Entmischung nachzuvollziehen, wurden im Labor drei Betonsorten hergestellt (Tabelle b) und in Schalungen mit den Abmessungen des Walzbehälters zur Bestimmung des Entmischungsmasses bewusst unterschiedlich verdichtet (Tabelle c). Die Betonsorte B 45/35 FT weist mit zunehmender Verdichtungszeit ein stark zunehmendes Entmischungsmass auf (Bild 1 und Tabelle c). Bei den beiden anderen Sorten nimmt das Entmischungsmass bis zur doppelten Vibrierzeit nur geringfügig zu und bleibt dann konstant. Aus den oberen und unteren Randzonen der erhärteten Prüfkörper wurden je fünf Bohrkerne zur Bestimmung der Wasserleitfähigkeit und der Porosität sowie je vier zur Bestimmung von Rohdichte und Druckfestigkeit entnommen (Ø = H = 50 mm, siehe Bild 2). Die Mittelwerte der Druckfestigkeit beim Beton B 40/30 sind unten und oben praktisch gleich (keine Entmischung). Bei den beiden anderen Sorten betragen die Werte infolge der Entmischung oben im Prüfkörper weniger als 80% von derjenigen unten (Tabelle d). Betrachtet man die Wasserleitfähigkeit in Tabelle d, dokumentiert sich die Entmischung noch deutlicher. Bei den Sorten B 40/30 und B 35/25 beträgt das Verhältnis unten zu oben rund 70 %, während beim Beton B 45/35 FT der Anteil der unteren Proben infolge der stärkeren Entmischung, d.h. der erhöhten Porosität der oberen Proben, nur noch bei 45 % liegt.

Das Entmischungsmass in der Frischbetonkontrolle

Für einen Nationalstrassenabschnitt wurden für die Betonsorte B 45/35 FT anhand von Vorversuchen sowohl Sollwerte als auch Grenzwerte der Frischbetoneigenschaften festgelegt[7] (Tabelle e).



2
Entnahmepositionen der Bohrkerne (Ø = H = 50 mm) aus den Prüfkörpern



3
Zusammenhang zwischen Entmischungs- und Verdichtungsmass eines Nationalstrassenabschnitts in den Vorversuchen (oben) und während der Bauzeit (unten)

Bei Betonen mit gleicher Zuschlag-, Zement- und Zusatzmitteldosierung variiert das Entmischungsmass in Funktion des Wassergehaltes (W0) gemäss dem in Bild 3 oben gezeichneten Zusammenhang. In den Vorversuchen schwankte das Verdichtungsmass zwischen 1.08 und 1.38. Entsprechend variierte auch das Entmischungsmass von 0.9 bis 2.4. Mit abnehmendem Verdichtungsmass (flüssigerer Beton) steigt das Entmischungsmass überproportional an.

Während der Bauzeit wurden Verdichtungs- und Entmischungsmass regelmässig bestimmt (Bild 3 unten). Die Bereiche der Soll- und der Grenzwerte des Verdichtungsmasses sind entlang der x-Achse, die korrespondierenden Bereiche des Entmischungsmasses entlang der y-Achse mit Pfeilen dargestellt. Die Variation ist hier wesentlich grösser als in den Vorversuchen, vor allem beim Entmischungsmass ($0.85 < EM < 3.5$).

Bei den in Bild 3 mit roten Pfeilen bezeichneten Mischungen, die relativ weit ausserhalb des Streubereiches um die Trendlinie liegen, wurde anstelle von Zusatzmitteln entsprechend mehr Anmachwasser beigegeben.

Bedeutung der Entmischung

Wird ein Beton zu lange und intensiv vibriert, so steigen die feinen Anteile des Betons auf und die groben sinken ab. Entsprechend weist der Festbeton oben einen höheren Zementsteinanteil und einen tieferen Zuschlaganteil auf. Dadurch verändern sich seine Eigenschaften. Im oberen Teil ist die Druckfestigkeit etwas tiefer als unten, während die Wasserleitfähigkeit deutlich erhöht ist. Der Anstieg der Wasserleitfähigkeit ist gleichzeitig mit einer Abnahme der Frost- und Frost-Tausalz-Beständigkeit verbunden. Dieser Trend wird noch dadurch verstärkt, dass bei zu intensivem Vibrieren der Luftporengehalt abnimmt.

Horizontale Entmischung

Die Entmischung findet beim Vibrieren nicht nur in der Vertikalen, sondern auch in der Horizontalen statt. In den äussersten Millimetern des Betons reichern sich ebenfalls die Feinanteile an, was die Qualität des Oberflächenbetons wesentlich verringert. Untersuchungen an Beton in Stützmauern zeigen, dass der Zementsteingehalt in der Aussenschicht mehr als zweimal so hoch sein kann wie im Innenbeton. Dadurch kann beispielsweise die Frost-Tausalz-Beständigkeit von hoch auf mittel sinken, und es sind entsprechende Frostschäden zu erwarten. Bei dicken Deckenplatten kann bei den Vibrierstellen der Zementsteingehalt ebenfalls stark erhöht sein. Dadurch wird das Schwindverhalten derart unterschiedlich, dass mit der Anhäufung von meist schalenförmigen Rissen zu rechnen ist.

Entmischung und Dauerhaftigkeit

Im Versuch stieg mit zunehmender Vibrierzeit die Entmischung auf 2.3 an, in der Praxis lassen sich jedoch Entmischungsmasse bis zu 3.5 beobachten (Bilder 1 und 3). Auffällig ist auch, dass das Entmischungsmass der Mischungen mit geringem Luftgehalt (<2 Vol.-%) durchwegs unterhalb von 1.4 liegt. Mischungen mit

Entmischungsmass EM	Entmischung
1.0	keine
1 bis 2	gering
2 bis 4	stark

a

Betonsorte	B 40/30 Empa-Standardbeton	B 35/25 für Hochbauten	B 45/35 FT [1] für Brückenbauten
Gesteinskörnung 0–32 mm [2]	ideal nach SIA 162	Kiessand von einem Betonwerk geliefert	
Zementdosierung	300 kg/m³	300 kg/m³	325 kg/m³
w/z-Wert	0.50	0.56	0.45
Zusatzmittel (% des Zementgewichtes)	keine	keine	0.8 % FM [3]

[1] FT: Hohe Frost-Tausalz-Beständigkeit
[2] Zuschlag: Alluvionalmaterial aus dem schweizerischen Mittelland
[3] Zusatzmitteldosierung infolge guten Zuschlags nur rund 70 % der üblichen Dosierung

b

Betonsorte		B 40/30	B 35/25	B 45/35 FT
Rohdichte	kg/m³	2421	2405	2373
Luftporengehalt	Vol.-%	1.7	1.7	4.2
Ausbreitmass (cm)	AM	–	42	38
Verdichtungsmass	VM	1.14	1.08	1.10
		Entmischungsmass EM		
– normal vibriert	(15 sec)	1.00	1.13	1.23
– doppelt vibriert	(30 sec)	1.17	1.26	1.66
– übervibriert	(60 sec)	1.20	1.27	2.27

c

Betonsorte	B 40/30		B 35/25		B 45/35 FT	
Druckfestigkeit fcwm nach 28 Tagen [N/mm²]						
oben	47.1	97 %	35.9	88 %	33.8	88 %
unten	49.7	103 %	45.5	112 %	43.3	112 %
Mittelwert	48.4	100 %	40.7	100 %	38.6	100 %
Wasserleitfähigkeit qw [g/(m² h)]						
oben	16	123 %	15	125 %	13	144 %
unten	11	85 %	10	85 %	6	66 %
Mittelwert	13	100 %	12	100 %	9	100 %

d

Messgrösse	Sollwerte	Grenzwerte
Verdichtungsmass	1.11 bis 1.15	1.06 bis 1.20
Luftporengehalt	4.0 bis 4.5 Vol.-%	3.2 bis 6.0 Vol.-%
w/z-Wert	0.41 bis 0.45	0.39 bis 0.48

e

a
Wertebereiche des Entmischungsmasses (Tabellen: Empa)

b
Betonsorten für den Entmischungsversuch

c
Frischbetonwerte und Entmischungsmasse für verschiedene Vibrierzeiten

d
Druckfestigkeit und Wasserleitfähigkeit der aus den Prüfkörpern entnommenen Bohrkerne

e
Soll- und Grenzwerte für Tiefbaubeton B 45/35 FT

hohem Luftgehalt (>5 Vol.-%) weisen jedoch Entmischungsmasse von 2.0 bis 3.6 auf. Der Luftgehalt des Frischbetons und damit der Gehalt an luftporenbildendem Zusatzmittel beeinflusst das Entmischungsmass offensichtlich stark.

Das Schwindverhalten ist für die Dauerhaftigkeit eines Bauteils von entscheidender Bedeutung und wird von der Entmischung massgebend beeinflusst. Wegen der vertikal und horizontal ungleichmässigen Verteilung des Zementsteins entstehen inhomogene Schwindspannungen, welche sowohl Anzahl als auch Breite der Schwindrisse deutlich erhöhen.

Weil die Entmischungsneigung von der Zusatzmitteldosierung abhängt, können bei Bauteilen aus Beton mit hohen Anforderungen mit entsprechend hohen Zusatzmitteldosierungen oft bedeutend mehr Schwindrisse beobachtet werden als bei Bauteilen aus Beton mit geringen Anforderungen ohne Zusatzmittel.

Mit der Bestimmung des Entmischungsmasses wird eine wichtige Eigenschaft des Frischbetons erfasst, die sich entscheidend auf die Homogenität des Bauwerkbetons und auf die Dauerhaftigkeit des Bauteils auswirken kann.

Folgerungen für die Baupraxis

- Es gilt zu vermeiden, dass die Besteller zu hohe Anforderungen an den Beton stellen, da dies meist einen erhöhten Zusatzmitteleinsatz erforderlich macht.
- Zusatzmittel sollen verwendet werden, wenn sie wirklich benötigt werden, aber in minimal notwendiger Dosierung.
- Der Beton, im speziellen Beton mit mehreren Zusatzmitteln, darf nur so lange vibriert werden, wie er sich wirklich verdichten lässt. Ist er verdichtet und es wird weiter vibriert, entmischt er sich.
- Betone mit Zusatzmitteln sollten ein Entmischungsmass von maximal 2.5 aufweisen, damit die Entmischungen im Bauwerk nicht zu gross werden.
- Bei der praktischen Ausbildung des Baustellenpersonals ist zu vermitteln, dass Betone mit Zusatzmitteln etwa ab der doppelten Mindestvibrierzeit stark entmischen. Der Beton darf aus dem gleichen Grund auch nicht mit Hilfe des Vibrationsverdichters in der Schalung verteilt werden.

Offene Fragen

Bei den durchgeführten Untersuchungen kamen Fliessmittel mit Ligninsulfonaten und Naphtalinsulfonaten zur Anwendung. Es ist anzunehmen, dass sich Verflüssiger der neusten Generation (Polykarboxylatether) gleich verhalten, was aber noch zu verifizieren ist.

Der Einfluss von Stabilisatoren, wie sie zum Beispiel beim selbstverdichtenden Beton zum Einsatz kommen, ist noch nicht untersucht worden.

Die Entmischung sollte innerhalb eines Bauteils nicht nur mit Einzelproben untersucht, sondern mit einem Raster von Bohrkernen erfasst werden. Da die Art des Einbaus für die Entmischung entscheidend ist, sind diese Daten mit den Frischbetoneigenschaften und der Protokollierung der Einbauvorgänge zu kombinieren.

Literatur

1 CANMET and ACI Third Conference: Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Ottawa, 1989.
Whiting, D., Djiedzic, W.: Behaviour of Cement-Reduced and «Flowing» Fresh Concretes Containing Conventional Water-Reducing and «Second-Generation» High-Range Water-Reducing Admixtures. Cement Concrete Aggregates, 11 (1) 30–39, 1989.
Malhotra, V. M.: Developments in the Use of Superplasticizers. ACI Publication SP-68, American Concrete Institute, Detroit, 1981.
Ghosh, R. S., Malhotra, V. M.: Use of Superplasticizers as Water Reducers. Cement Concrete Aggregates, 1(2) 56–63, 1979.

2 Olbrecht, Hp.: Einfluss des Vibrierens auf die Festbeton-Eigenschaften, Schweizer Baublatt 63/64, August 1997.
Mamillan, M.: Influence de la mise en œuvre sur l'homogénéité du béton constituant les ouvrages d'art. Revue technique du bâtiment et des constructions industrielles, no. 135., 1989.

3 Yamamoto, Y., Kobayashi, S.: Effect of Temperature on the Properties of Superplasticized Concrete. ACI JI, Technical Paper, Title No. 83–10, 80–87, 1986.

4 Faber, M. H., Gehlen, C.: Probabilistischer Ansatz zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von bestehenden Stahlbetonbauten. Beton- und Stahlbetonbau 97, Heft 8, 421–429, 2002.

5 Studer, W.: Verarbeitbarkeit des Betons. Material und Technik, Heft 4, 1983.

6 SN EN 12350-2:1999: Prüfung von Frischbeton – Teil 2: Setzmass. SIA Zürich.
SN EN 12350-3:1999: Prüfung von Frischbeton – Teil 2: Setzzeitmass. SIA Zürich.
SN EN 12350-4:1999: Prüfung von Frischbeton – Teil 4: Verdichtungsmass. SIA Zürich.
SN EN 12350-2:1999: Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmass. SIA Zürich.

7 Empa-Bericht 255'576/20: Kanton Schaffhausen: Städtische Nationalstrasse N 4: Resultate der Vorversuche und der Frischbetonkontrollen, 1993.

Bezeichnung der Betonsorten

(ar) Die für die Versuche verwendeten Betonsorten sind gemäss der Norm SIA 162 (1989) bezeichnet und nicht gemäss der am 1. Januar 2003 in Kraft getretenen Norm SIA 262 Betonbau. Da die betreffenden Versuche vor dem Inkrafttreten der Norm SIA 262 konzipiert und durchgeführt worden sind und keine detaillierten Angaben zu den Betonzusammensetzungen vorliegen, werden die alten Betonbezeichnungen beibehalten. Die Relevanz der Ergebnisse und Folgerungen aus den beschriebenen Versuchen wird dadurch nicht tangiert.

Gemäss der SIA-Dokumentation D 0182 «Einführung in die Norm SIA 262» können die Festigkeitsklassen der vorigen und der neuen Normen unter bestimmten Voraussetzungen näherungsweise verglichen werden. Für die hier untersuchten Betonsorten gilt die folgende ungefähre Zuordnung:

SIA 162	SIA 262
B 35/25	C 20/25 – C 25/30
B 40/30	C 25/30 – C 30/37
B 45/35	C 30/37

Hanspeter Olbrecht, dipl. Ing. HTL,
ehem. Empa Beton / Bauchemie
Konrad Moser, Dr. Ing. ETH,
Empa Beton / Bauchemie,
Empa, Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf
beton@empa.ch