



Nachweis des Feuerwiderstandes von Stahlbetonstützen

Christoph Ruch, dipl. Bauing. HTL, Hans-Peter Felder, dipl. Bauing. HTL

Einführung

Beton bietet einen guten Schutz gegen hohe Temperatureinwirkungen, wie diese bei einem Brand auftreten können. Grundsätzlich sind für den Nachweis des Brandwiderstandes, wie im Übrigen auch für andere statische Nachweise, die gültigen Normen einzuhalten. Die Normen bilden den Stand der Technik zu einem früheren Zeitpunkt ab. In der Zwischenzeit können sich – wie beim Nachweis des Brandwiderstandes – neue Erkenntnisse ergeben haben, die restriktivere Regeln vorgeben als die Normen. Gerade im Hinblick auf die Verwendung tragender Elemente im Hoch- und Tiefbau ist die (Brand-)Sicherheit unter Berücksichtigung des aktuellen Standes der Technik besonders zu beachten.

Ende 2012 schrieb die VKF (Vereinigung Kantonalen Feuerversicherer) einen Brief an SwissBeton (Fachverband für Schweizer Betonprodukte), welcher den überwiegenden Anteil der Hersteller in diesem Marktgebiet vertritt. Darin wird unmissverständlich gefordert, dass ein Einbau von unsicheren Betonprodukten nicht akzeptiert wird. Der Fokus wird vor allem auf Stahlbetonstützen gelegt. Sämtliche Produzenten werden angehalten, ausschliesslich (brand-)sichere Produkte herzustellen und zu verkaufen. Das Datum dieses Schreibens dürfte auch die Schnittstelle für mögliche Garantie- bzw. Gewährleistungs- und/oder Haftpflichtforderungen aus dem Verkauf von unsicheren Betonprodukten und deren Ertüchtigung sein. Zudem sind nach dieser eindeutigen und unmissverständlichen Mitteilung der VKF im Falle von Gefährdung von Leib und Leben durch unsichere Betonprodukte auch strafrechtliche Sanktionen gegen die Verantwortlichen am Bau sowie die Betonproduktehersteller durchaus vorstellbar (Art. 229 StGB; Gefährdung durch vorsätzliche oder fahrlässige Verletzung der Regeln der Baukunde). Was die Aktivitäten und auch die Einschätzung der verschiedenen Hersteller betreffend dieser Problematik in der vergangenen Zeit anbelangt, sind differente Strategien mit unterschiedlichen Lösungsansätzen erkennbar.

Norm SIA 262:2013 Betonbauten

Der Nachweis des Brandwiderstandes ist in der bestens eingeführten Norm SIA 262:2013 [1] mit einer eher grundsätzlichen Forderung bzw. Nachweisführung definiert. Der geforderte Brandwiderstand wird in der Nutzungsvereinbarung und in der Projektbasis festgelegt. Das Bauwerk ist dann so auszubilden, dass die Brandeinwirkung nicht zum vorzeitigen Versagen des Tragwerkes führt. Allgemeine Berechnungsverfahren sind zulässig. Der Nachweis mit Tabellen kann geführt werden, wenn zweifelsfrei nachgewiesen werden kann, dass der Beton

nicht abplatzt (Norm SIA 262:2013, Ziffer 4.3.10.5.2). Dieser Nachweis ist für alle Betonfestigkeitsklassen zu führen, da die Norm Gültigkeit für Normalbeton mit den Festigkeitsklassen C8/10 bis C100/115 hat [1], [4], [10]. Dieser Nachweis ist nur mit zeitintensiven, aufwendigen und kostspieligen Material- und belasteten Bauteilversuchen möglich. Dennoch zeigen sowohl Versuche wie auch Simulationen mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) [21], dass die Anwendung von Tabelle 16, Norm SIA 262:2013, nicht immer zu sicheren Lösungen führt. Leicht bewehrte Stützen (Bewehrungsgehalt bis etwa 5 %) erreichen auch dann, wenn das Abplatzen ausgeschlossen wird und die Vorgaben bezüglich der minimalen Bauteilabmessungen und Bewehrungsüberdeckung eingehalten werden, den gewünschten Brandwiderstand teilweise bei Weitem nicht (siehe Tabelle 1):

C50/60 QS [mm]	c_{nom} [mm]	Länge [mm]	λ_s	A_s/A_c [%]	R_{Ziel} (SIA 262)	$R_{eff.}$
200 × 200	20	3500	60,6	3,14	R60	R45
250 × 250	30	3500	48,5	3,40	R90	R78
300 × 300	30	4000	46,2	0,68	R120	R66
350 × 350	40	5000	49,5	1,03	R180	R94

Tabelle 1: Diese unsicheren Lösungen sind zum einen auf die Definition der Bewehrungsüberdeckung und zum anderen auf die Nichtberücksichtigung der Schlankheit zurückzuführen. Die effektive Feuerwiderstandsdauer $R_{eff.}$ wurde rechnerisch ermittelt [21].

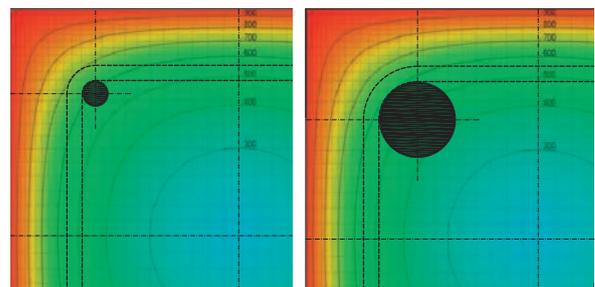


Bild 1: Temperaturprofil (ohne Berücksichtigung der Bewehrung gerechnet) für mehrseitig beanspruchte Stütze 240*240 mm – R90. Anordnung gemäss SIA 262, Bügel Ø 8 mm, links mit Längseisen Ø 14 mm, rechts mit Längseisen Ø 40 mm.

Die Bewehrungsüberdeckung ist gemäss Norm SIA 262:2013 definiert als der Abstand zwischen der Betonoberfläche und der äussersten Bewehrungslage, in diesem Fall die Bügelbewehrung. Der Vergleich (Bild 1) zeigt die direkte Auswirkung dieser Definition auf die Feuerwiderstandsdauer.

Die Betondeckung ist mit 30 mm bei beiden Stützen (Bild 1) identisch und entspricht der Vorgabe der Norm SIA 262:2013. Was allerdings auffällt, ist der unterschiedliche Achsabstand des jeweiligen Längsbewehrungsstabes von der Stützenoberfläche. Bei der schwach bewehrten Stütze beträgt die mittlere Temperatur des Bewehrungsstabes bereits nach 90 Minuten rund 600 °C, bei der stark bewehrten Stütze zum gleichen Zeitpunkt rund 500 °C. Die kritische Temperatur der Längsbewehrungseisen sollte aber 500 °C nicht überschreiten. Um zu einer sicheren Lösung zu gelangen (immer mit dem Vorbehalt, dass das Abplatzen ausgeschlossen werden kann), muss bei der schwach bewehrten Stütze die Bewehrungsüberdeckung, bei Einhaltung des Kriteriums für R90, im Vergleich zu SIA 262:2013 um mindestens 15 mm vergrössert werden.

Gemäss Norm SIA 261:2003 [17] kann der Nachweis der Tragsicherheit für die Bemessungssituation Brand wahlweise auf folgende Arten erfolgen:

- im Zeitbereich anhand der Feuerwiderstandsdauer
- im Festigkeitsbereich anhand des Tragwiderstandes
- im Temperaturbereich

Die thermische Einwirkung ist als aussergewöhnliche Leiteinwirkung zu behandeln. Dabei verweist die Norm SIA 261/1 [18] auf die SN EN 1991-1-2:2004.

Norm SN EN 1992-1-2:2004, Eurocode 2:

Tragwerksbemessung für den Brandfall

Um die Norm SN EN 1992-1-2:2004 [2] derzeit in der Schweiz anwenden zu können, ist eine Vereinbarung zwischen Projektverfasser und Bauherr erforderlich. Die Nationalen Anwendungsparameter (NDP), die die Projektbasis darstellen, müssen dokumentiert sein und die lokalen Bestimmungen berücksichtigt werden. Der nationale Anhang (NA) bzw. die erforderlichen nationalen Anwendungsparameter sind in der Schweiz erst im Entwurf vorhanden und gehen im Verlauf 2014 in die Vernehmlassung. Zudem sind in Deutschland verschiedene Methoden oder Nachweisverfahren für die Anwendung nicht freigegeben (z.B. Nachweis Stützen nach Methode B, Tabellen im Anhang C usw.) [3], da diese nachweislich zu grossen Diskrepanzen im Vergleich zu experimentellen Ergebnissen führen würden [11], [12]. Trotzdem lohnt es

sich, die Nachweiskonzepte der SN EN 1992-1-2:2004 genauer zu studieren, ist doch das umfangreiche Wissen und die langjährige Erfahrung aus dem gesamten europäischen Raum darin vertreten.

Die brandschutztechnischen Nachweisverfahren werden in drei Stufen vorgenommen:

Stufe 1: Tabellarische Werte

Stufe 2: Vereinfachte Berechnungsverfahren

Stufe 3: Allgemeine Berechnungsverfahren

Die Nachweisverfahren mittels tabellarischer Daten beschränken sich in der Regel darauf, die Querschnittsabmessung des zu untersuchenden Bauteils (z.B. Stütze, Träger, Wand usw.) und den Achsabstand der Bewehrung mit Werten zu vergleichen, die nach den Ergebnissen von Normbrandversuchen zum Erreichen der vorgesehenen Feuerwiderstandsdauer erforderlich sind.

Mit den vereinfachten Rechenverfahren wird in der Regel nachgewiesen, dass von einem Bauteil die im Brandfall massgebenden mechanischen Einwirkungen bis nach Ablauf einer vorgeschriebenen Branddauer aufgenommen werden können. Dafür werden unter anderem Vereinfachungen bei der Ermittlung der Bauteiltemperaturen und der Beschreibung des Versagenszustandes im Brandfall getroffen.

Mit den allgemeinen Rechenverfahren können für eine vorgegebene Brandbeanspruchung das tatsächliche Tragvermögen und gegebenenfalls das Verformungsverhalten eines Bauteils oder Tragwerks ermittelt werden.

Normalfester Beton – Hochfester Beton

Die Abgrenzung normalfester/hochfester Beton liegt bei der charakteristischen Druckfestigkeit (Würfel 150 × 150 × 150 mm) von $f_{ck,cube} = 60 \text{ N/mm}^2$. Ein Beton mit der Festigkeitsklasse C50/60 wird im Eurocode 2 als normalfester Beton behandelt, C55/67 als hochfester Beton. Die Norm SIA 262:2013 differenziert nicht zwischen normalfesten und hochfesten Betonen. Sie ist gültig für alle Betonfestigkeitsklassen, analog SN EN 206-1:2000 [4], [5]. Konsequenterweise heisst dies nun aber, dass für alle Festigkeitsklassen der Nachweis gegen Abplatzen geführt werden muss. Diese Forderung ist zweckmässig, denn die Festigkeitsklasse ist nur ein mögliches Kriterium, um das Abplatzen beurteilen zu können. Zudem unterstützen nachfolgende Überlegungen diese Einschätzung:

- Nacherhärtung, $f_{cw,365}/f_{cw,28} > \text{etwa } 1.10$
- Überfestigkeit (gemäss Norm ist eine minimale Festigkeit zu erreichen. Für den Nachweis gegen Abplatzen ist aber sinnvollerweise ein Maximalwert zu definieren). Die

geplante Betonfestigkeitsklasse wird im Schnitt um eine bis zwei Klassen übertroffen.

Untersuchungen haben gezeigt, dass die Standardabweichung von Beton ab etwa $f_{ck,cube} = 30 \text{ N/mm}^2$ konstant bei etwa 5 N/mm^2 bleibt [14]. Die 5-%-Fraktile ist demnach Mittelwert minus 1,645-facher Standardabweichung. Somit gilt:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ N/mm}^2$$

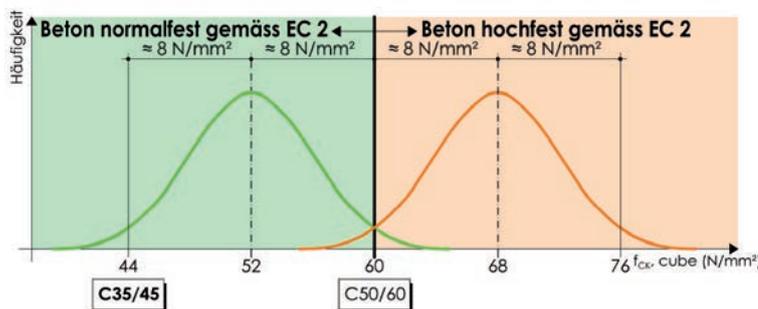


Bild 2:

Nachweis Festigkeit: $f_{ck,cube}$ = rote Häufigkeitskurve;

Nachweis Brand, Abplatzen: $f_{ck,cube}$ = grüne Häufigkeitskurve;

massgebend = ungünstiger Fall = C35/45

Um mit 95%-iger Wahrscheinlichkeit einen normalfesten Beton zu produzieren, ist die Festigkeitsklasse C35/45 anzustreben (Nacherhärtung und Überfestigkeiten nicht miteinbezogen!).

Die Norm SN EN 1992-1-2:2004 regelt dies mit der Anmerkung, dass, wenn die charakteristische Festigkeit des Betons wahrscheinlich einer höheren Klasse angehört, die Vorgaben (Reduktion der Festigkeit bei hohen Temperaturen, Massnahmen gegen Abplatzen usw.) für diese höhere Klasse angewendet werden sollen.

Für den Nachweis gegen das Abplatzen gibt es zurzeit noch keine Normprüfungen oder allgemein anerkannte Vorgaben. Der Nachweis ist daher nur durch umfangreiche und systematische Material- und Bauteilversuche möglich.

Die Norm SN EN 1992-1-2:2004 unterscheidet zwischen normalfestem (C8/10 bis C50/60) und hochfestem Beton (C55/65 bis C100/115). Wenn Tabellen verwendet werden, ist für normalfesten Beton keine weitere Überprüfung erforderlich (4.5.1, Abschnitt 4). Allerdings ist zu beachten, dass bei Verwendung der vorhandenen Tabellen (z. B. für Stützen Tabelle 5.2a «Mindestquerschnittsabmessungen und Achsabstände von Stützen mit Rechteck- oder Kreisquerschnitt») sämtliche nachfolgende Einschränkungen einzuhalten sind:

- $l_{o,fi} \leq 3 \text{ m}$ (Ersatzlänge der Stütze im Brandfall)
- Bewehrungsgehalt $< 4 \%$
- Querschnitte $200 \text{ mm} \leq b' \leq 450 \text{ mm}$
- Seitenverhältnis $h \leq 1,5 \times b$
- Regeln nach Norm SN EN 1992-1-1:
 - Kaltbemessung
 - Grössere Minimalbewehrung
 - Grössere Querbewehrung
- minimale Anzahl Längsbewehrungsstäbe
- gültig nur für Rechteck- und Kreisquerschnitt

Diese Einschränkungen ergeben sich aufgrund von sehr umfangreichen Normbrandversuchen und deren Auswertung. Die geometrischen Angaben dieser Tabelle 5.2a, Norm SN EN 1992-1-2:2004, sind aber deutlich konservativer als die in der Norm SIA 262, Tabelle 16, vorgegebenen geometrischen Mindestabmessungen und zudem noch mit verschiedenen Einschränkungen versehen. Dieser wesentliche Unterschied ist darauf zurückzuführen, dass die Norm SIA 262:2013 einen Nachweis fordert, dass keine Abplatzungen auftreten (Definition des Nettoquerschnittes); die Norm SN EN 1992-1-2:2004 jedoch keine Überprüfung des Abplatzens verlangt (Definition des Bruttoquerschnittes). Die Mindestquerschnitte in Norm SN EN 1992-1-2:2004 wurden so festgelegt, dass bei Brandbeanspruchung geringfügige Oberflächenabplatzungen möglich sind, zerstörende Abplatzungen aber ausgeschlossen werden müssen. Eine Vermischung der Normen, wie dies heute von verschiedenen Akteuren praktiziert wird – normalfester Beton benötigt keinen Nachweis gegen das Abplatzen (Norm SN EN 1992-1-2:2004) und anschliessende Verwendung von Tabelle 16 (Norm SIA 262:2013) –, ist nicht statthaft und führt zu nachweislich unsicheren Lösungen. Diese «Scheinlösung» entspricht nicht dem Stand der Technik und wird von verschiedenen Gebäudeversicherungen als Nachweis des Brandwiderstandes auch nicht toleriert.

In Tabelle 2 (S. 5) ist ersichtlich, dass bei gleicher Feuerwiderstandsklasse die Norm SIA 262 generell kleinere Mindestquerschnitte erlaubt.

Beispiel:

Mindestquerschnitte bei Feuerwiderstandsklasse R90 (R60) und Verwendung von normalfestem Beton:

Norm SIA 262:2013: 240 mm (200 mm); Nachweis gegen Abplatzen erforderlich.

Norm SN EN 1992-1-2:2004: 350 mm (250 mm); Nachweis gegen Abplatzen nicht erforderlich.

In allen Fällen sind die geforderten Achsabstände/Bewehrungsüberdeckungen einzuhalten.

Feuerwiderstandsklasse	SN EN 1992-1-2	SIA 262
Nachweis Abplatzen	$f_{ck} < 60 \text{ N/mm}^2$ nicht erforderlich	generell erforderlich
R30	200 / 32	150 / 37
	300 / 27	
R60	250 / 46	200 / 39
	350 / 40	
R90	350 / 53	240 / 51
	450 / 40	
R120	350 / 57	280 / 53
	450 / 51	
R180	450 / 70	360 / 68

Tabelle 2: Minimale Bauteilabmessung / Achsabstand der Längsbewehrung (zur besseren Vergleichbarkeit wird auch für die Werte gemäss Norm SIA 262 der Achsabstand mit folgenden Annahmen bestimmt: Querbewehrung $\varnothing 8 \text{ mm}$, Längsbewehrung $< 8 \%$).

Die in der Norm SN EN 1992-1-2:2004 festgelegte Grenze zwischen normalfestem Beton (bis C50/60) und hochfestem Beton (ab C55/65) kann für den Nachweis des Feuerwiderstandes nicht alleine beigezogen werden. Auch im europäischen Raum steht diese – willkürlich gewählte – Grenze zur Diskussion.

Wer noch heute tragende Bauteile aus normalfestem Beton der höchsten Festigkeitsklasse ohne zusätzliche spezielle Massnahmen und ohne Nachweis, dass der Überdeckungsbeton nicht abplatzt, herstellt, handelt gegen die anerkannten Regeln der Technik.

Herstellverfahren für Bauteile aus hochfestem Beton

Selbstverdichtender Beton:

SVB (Selbstverdichtender Beton) ist ein neues, innovatives Produkt, welches in den achtziger Jahren des 20. Jahrhunderts in Japan entwickelt wurde. Dieser Beton zeichnet sich durch ein besonders hohes Fliessvermögen aus. Selbst bei Bauteilen mit anspruchsvoller Geometrie füllt dieser hochviskose Werkstoff Hohlräume selbstständig aus und entlüftet ohne zusätzliche Verdichtungsenergie [6].

Schleuderbeton:

Mit dem Schleuderverfahren können symmetrische Hohlkörper aus Beton (Rohre, Stützen, Masten, Pfähle usw.) hergestellt werden. Der plastische bis weiche Beton wird in geschlossenen Formen zentrifugiert. Eine Entmischung ist damit immer verbunden (grobe Gesteinskörnung aussen, wasserreicher Mörtel innen).

Typische Eigenschaften, welche Schleuderbeton auszeichnen, zeigen sich im Brandfall problematisch:

- glatte, porenfreie Oberfläche: Beim Schleudern des

Betons werden die leichtesten Teile (Luft) nach innen verdrängt. Das Resultat ist eine sehr dichte, glatte und porenfreie Betonoberfläche – ästhetisch ansprechend, im Brandfall aber von Nachteil: sehr dichte Betone neigen im Brandfall zum Abplatzen.

- die Zugabe von Kunststofffasern ist möglich, deren Verteilung über den Querschnitt aber äusserst ungewiss. Durch das tiefe spezifische Gewicht (Rohdichte $< 1000 \text{ kg/m}^3$) werden die Fasern beim Schleudern vorzugsweise ins Querschnittsinnere transportiert – für den Brandfall nicht optimal.

- Hohlraum: Typisches Merkmal bei Schleuderbeton ist der Hohlraum, welcher zwangsläufig beim Herstellungsprozess entsteht. Im Brandfall ebenfalls von Nachteil: die Stütze wird schneller heiss, weil die Kernmasse fehlt bzw. das fehlende Volumen einen negativen Einfluss auf die Wärmeaufnahmefähigkeit des Querschnittes hat.

Vibrierter Beton:

Die Verdichtung erfolgt in der Regel mit der Hilfe von Vibratoren (Rüttler, Vibrierische). Die Zementmenge, die Zusatzstoffe, der Wasser-Zement-Wert sowie die petrografische Zusammensetzung beeinflussen den Brandwiderstand.

Unabhängig vom Herstellungsprozess sind präzise Aussagen über das Durchwärmungs- und Abplatzverhalten für jeden Beton erforderlich, mit welchem Betonstützen hergestellt werden sollen. Diese Grundlagen erreicht man nur mit umfangreichen Material- und Bauteilversuchen in dafür geeigneten Brandöfen.

Betonabplatzungen im Brandfall

Die Gründe für mögliche Betonabplatzungen im Brandfall sind noch nicht in allen Teilen klar erforscht. Es hat sich aber gezeigt, dass einzelne Faktoren oder auch mehrere im Zusammenwirken das Abplatzen beeinflussen.

Eine alleinige Beschränkung der Festigkeit führt meist zu unsicheren Lösungen. Berücksichtigt werden müssen zusätzlich zum Beispiel:



Bild 3: Beton C25/30, Zementgehalt 325 kg/m^3 , W/Z-Wert 0,42, Luftporengehalt 1,5 %, PP-Fasergehalt $1,0 \text{ kg/m}^3$ [15]

- Betonzusammensetzung (Zementgehalt, Zementart, WZ-Wert usw.)
- Festbetoneigenschaften (Permeabilität, Luftporengehalt, Festigkeit usw.)
- Art der Verdichtung (Dichtigkeit, Entmischung, inhomogener Querschnitt)
- Anteil Zusatzstoffe (inert, puzzolanisch, latent hydraulisch, hydraulisch)
- Petrografische Zusammensetzung der Zuschläge (z. B. Quarzit, Kalkstein), Kornform, Grössenverteilung
- Bewehrung (Gehalt, Anordnung, Festigkeit)
- Feuchtigkeitsgehalt
- Einwirkungen (Momente), Lastausnutzung
- Betontechnologische Massnahmen (Zugabe von Kunststofffasern, zusätzliche Luftporen usw.)
- Konstruktive Massnahmen (Schutznetz, Ausbildung Querbewehrung, Bügelform und Abstand usw.)
- Aufheizgeschwindigkeit, Temperaturverlauf Feuerangriff

Diese Aussagen werden auch durch umfangreiche Literatur gestützt. So gibt es unzählige Berichte die zeigen, dass Betone auch mit tiefen Festigkeiten (teilweise mit Zugabe von Kunststofffasern) im Brandfall Abplatzungen aufweisen können [15], [16]. Andererseits ist es möglich, hochfeste oder ultrahochfeste, äusserst dichte Betone herzustellen, die im Brandfall keine Abplatzungen aufweisen [24].

Die einfachste Lösung ist gegeben, wenn der Beton nachweislich nicht abplatzt. Finden nun aber trotzdem Abplatzungen statt, so stellt die Norm SN EN 1992-1-2:2004 mögliche Werte zur Reduktion des Stützenquerschnittes zur Verfügung:

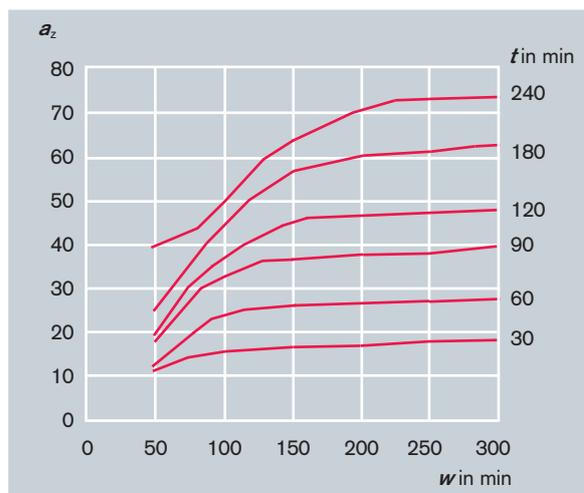


Bild 4: Reduktion a_z des Querschnitts einer Stütze mit quarzhaltigem Zuschlag, wobei a_z : geschädigte Zone, w : $\frac{1}{2}$ Stützenbreite
 Beispiel: Querschnitt 350 x 350 mm, R90 gemäss Diagramm:
 $a_z = 38$ mm bei $w = 175$ mm
 rechnerischer Restquerschnitt: 274 x 274 mm.

Die Werte der Tabelle 5.2a, Norm SN EN 1992-1-2:2004, reduziert um die geschädigte Zone gemäss Bild 4, zeigt eine gute Übereinstimmung mit den minimalen Bauteilabmessungen der Tabelle 16, Norm SIA 262:2013.

Brandbeständiger Beton mit Kunststofffasern

Alphabeton AG produziert sämtliche Stützen mit einem selbstverdichtenden, hochfesten Beton der Festigkeitsklasse C80/95. Dieser brandbeständige Beton ist eine patentierte Eigenentwicklung. Die Auswahl der einzelnen Komponenten, die Betonrezeptur, das Mischen wie auch die Verarbeitung wurden in den letzten Jahren stets weiter entwickelt und optimiert. Das Resultat ist ein hochfester Beton, welcher im Brandfall nicht abplatzt. Diese sehr positive Materialeigenschaft konnte an mehreren Prüfinstituten mit Brandversuchen nachgewiesen und bestätigt werden.

Die Basis für abplatzfreien Beton bildet die Verwendung eines geeigneten Zuschlages. Es ist seit langem bekannt, dass sich kalksteinhaltige Zuschläge (Kalkgehalt > 80 %), Basalt oder Diabas bei grosser Hitze besser eignen als Gesteine mit hohem Quarzanteil. Die Dekarbonatisierung von Kalkgestein findet bei einer Temperatur von etwa 800 °C statt. Die Mineralumbildung von Quarz (Volumenzunahme und damit Gefügezerstörung und Abplatzungen an den Gesteinskörnungen) treten bereits bei einer Temperatur von etwa 575 °C auf.

Ebenfalls hat sich das Beimischen von Kunststofffasern bewährt. Diese Kunststofffasern schmelzen im Brandfall bei einer Temperatur von etwa 165 °C, bilden damit Dampfentlastungskanäle und reduzieren so die Gefahr von explosionsartigen Abplatzungen (siehe auch Norm SIA 262:2013, Ziffer 4.3.10.6.1 und weitere Literatur).

Für die Zugabe in den laufenden Mischer verwendet Alphabeton AG eine vollautomatische Faserdosieranlage mit hoher Dosiergenauigkeit. Eine gleichmässige Verteilung der Fasern in der Betonmatrix ist von zentraler Bedeutung. Diese Anforderung wird mit einem Planeten-Gegenstrommischer mit zusätzlichem Wirbler, in Abhängigkeit einer vorgegebenen Mischzeit, erreicht. Umfangreiche Versuche haben gezeigt, dass die Art des Mixers und die Mischdauer einen grossen Einfluss auf die Faserverteilung und damit auf den Brandwiderstand haben. Auch die Zugabe der Fasern mit vorab abgepackten Mengen für eine Charge bringt im Vergleich zu einer Dosieranlage eine unregelmässige Verteilung, und daher unsichere Lösungen.

Durchführung von unbelasteten und belasteten Brandversuchen

Der Feuerwiderstand eines Bauteiles kann nur mit Versuchen im Massstab 1:1 überprüft werden. Das Verfahren für die Bestimmung der Feuerwiderstandsdauer ist in der Norm SN EN 1365-4:1999 «Feuerwiderstandsprüfungen für tragende Bauteile – Teil 4: Stützen» [8] geregelt. Betonabplatzungen während eines Brandes verändern die Geometrie des Querschnittes und beeinflussen damit den Temperaturanstieg im Innern des Bauteils massiv. Die isolierende Wirkung der Betondeckung sinkt im Verhältnis zur Abplatztiefe. Die Folge ist ein schnelleres Ansteigen der Stahltemperatur (die Zug- und Druckfestigkeit von Stahl sinkt bei einer Temperatur von 500 °C bereits auf etwa 70 %). Im Weiterm verkleinert sich der Querschnitt, so dass bei konstanter Normalkraft die Spannungen grösser werden. Deshalb ist es zwingend erforderlich, dass bei tragenden Bauteilen die Grösse allfälliger Abplatzungen durch Brandversuche für jede Betonsorte und für jeden Querschnitt systematisch bestimmt werden.

Alphabeton AG hat in einer ersten Phase in einem aufwändigen Auswahlverfahren rund ein Dutzend Sorten Kunststofffasern (auf dem Markt werden unterschiedliche Materialien und Geometrien angeboten) auf ihre Wirksamkeit im Brandfall überprüft.

In einer zweiten Phase wurden Prüfkörper mit unterschiedlicher Fasermenge hergestellt und im Brandofen beheizt (ETK Einheits-Temperatur-Kurve ISO 834). Nach Abschluss dieser Versuchsserie konnte die optimale Fasermenge festgelegt werden.

In einem nächsten Schritt wurden orientierende, unbelastete Brandversuche unter thermischer Beanspruchung durch die Einheitstemperaturkurve (SIA 183.101 SN EN 1363-1:2012) [7] zur Bewertung des Abplatz- und Durchwärmungsverhaltens mit verschiedenen Durchmessern und Bewehrungsgehalten durchgeführt.

Vorgängig eingebaute Thermoelemente (bis 36 Stück pro Stütze) erlaubten während des ganzen Brandversuches Temperaturmessungen in Intervallen von 20 Sekunden. Über die gesamte Versuchsdauer von 120 Minuten Brandbeanspruchung durch die Einheitstemperaturkurve konnten keine Abplatzungen, Verformungen oder Risse festgestellt werden.

Damit war die Basis für Brandversuche unter Last gelegt. In Abstimmung mit den bereits erfolgreich durchgeführten Vorversuchen und den daraus gewonnenen Erkenntnissen wurde ein Prüfprogramm mit verschiedenen Querschnitten und Bewehrungsgehalten festgelegt. Pro Stütze wurden vor der Herstellung bis 34 Thermoelemente an der Bewehrung befestigt. Damit konnten die Temperaturen im

Prüfkörper während der gesamten Prüfdauer aufgezeichnet werden, welche wiederum interessante Rückschlüsse über das Durchwärmungsverhalten in Abhängigkeit der Zeit ergaben.

Anschliessend erfolgte die Herstellung der Stützen mit der patentierten Betonmischung «Alphapact P080». Die Brandprüfungen wurden nach einer normgerechten Konditionierung von 100 Tagen durchgeführt.



Bild 5: Arbeiten am offenen Stützenbrandofen an der BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung), Berlin (Foto: Alphabeton AG).

Weiter ist zu beachten, dass Stützenprüfungen gemäss SN EN 1365-4:1999 vorzugsweise an kleinen Querschnitten durchgeführt werden. Zum einen sind diese brandsensitiver (kleinere Wärmeaufnahme), zum andern wird für die geprüfte, planmässige Aussermittigkeit der Belastung (Exzentrizität) immer der kleinere Wert von Stützenlänge/500 bzw. 7 mm definiert, welcher für kleine Querschnitte verständlicherweise ungünstigere Werte liefert.



Bild 6: Brandversuch unter Last an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, Mai 2013. Blick in den Brandofen während der Befeuung (Foto: Alphabeton AG).

Sowohl während der unbelasteten Brandversuche als auch während der belasteten Brandprüfungen konnten an keiner der insgesamt 18 geprüften Stützen Abplatzungen festgestellt werden. Das heisst, bei allen Brandversuchen blieben die Stützen ohne Abplatzungen bis zum temperaturbedingten Kollaps.

Simulation mit Finite-Elemente-Methode (FEM)

Die Methode der Finiten Elemente ist ein im gesamten Ingenieurbereich zur Anwendung gelangendes Berechnungsverfahren zur numerischen Simulation des Verhaltens von Festkörpern. Damit können, unter Berücksichtigung temperaturabhängiger Materialparameter (welche vorgängig mit Materialversuchen im Brandprüfofen ermittelt werden), beliebige dreidimensionale Querschnitte, physikalisch und geometrisch nichtlinear, berechnet werden. Mit der Finite-Elemente-Methode kann das Verhalten eines Bauteils für eine beliebige Temperatur-Zeitkurve beurteilt werden. Damit eignet sich diese Methode auch für den Nachweis der Feuerwiderstandsdauer, kann aber nur von ausgewiesenen Spezialisten durchgeführt werden. Das nationale Anwendungsdokument zu DIN EN 1992-1-2:2004 legt für die Anwendung dieses Verfahrens ein umfangreiches Validierungsverfahren fest, welches vorgängig durchzuführen ist.

Resultate, Gutachten und Berichte

Der Auftrag für ein solches Validierungsverfahren wurde von der Alphabeton AG an ein von der VKF anerkanntes Prüf- und Forschungsinstitut [25] vergeben. Insgesamt konnte auf der Basis der erfolgreichen Prüfungen der Nachweis erbracht werden, dass die Finite-Elemente-Methode zur Bestimmung der Feuerwiderstandsdauer gegenüber der experimentellen Prüfung eine gute Übereinstimmung erzielt und aufgrund der getroffenen Annahmen auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse liefert. Alphabeton AG ist in der Lage, für jede Stütze, unter Berücksichtigung der variablen Parameter (Querschnittsgrösse, Überdeckung, Längsbewehrungsgehalt und Anordnung, Geometrie der Querbewehrung, Stützenlänge, Schlankheit, Lastausnutzung usw.), den Brandwiderstand nachzuweisen.

Direkter Anwendungsbereich

Der Brandwiderstand von Bauteilen kann durch zertifizierte Prüfinstitute nach genauen Vorschriften durchgeführt werden. Die Prüfergebnisse sind auf Stützen mit gleichem Querschnitt (gleicher Betonquerschnitt, gleiche Bewehrungsführung, gleicher Bewehrungsgehalt), geringerer Stützenlänge sowie geringerer Last anwendbar. Es ver-

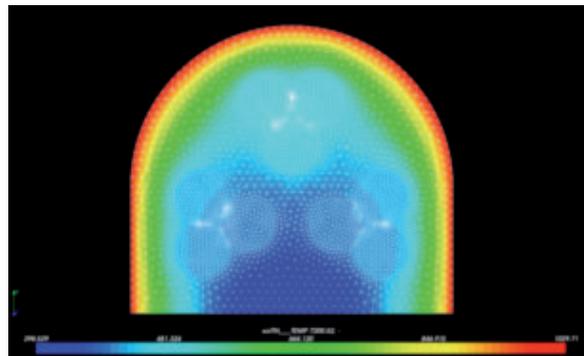


Bild 7: Simulation mit Finite-Elemente-Methode: Temperaturfeld ovale Stütze nach 120 Minuten; rot 1030 °C; gelb 847 °C; grün 664 °C; hellblau 481 °C; dunkelblau 298 °C. Resultat Brandversuch unter Last: effektive Feuerwiderstandsdauer 175 Minuten.

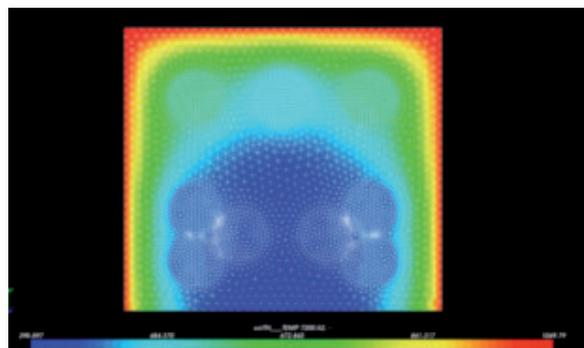


Bild 8: Simulation mit Finite-Elemente-Methode: Temperaturfeld rechteckige Stütze nach 120 Minuten; rot 1050 °C; gelb 861 °C; grün 673 °C; hellblau 484 °C; dunkelblau 296 °C. Resultat Brandversuch unter Last: effektive Feuerwiderstandsdauer 191 Minuten.

steht sich von selbst, dass der Baustoff bzw. die geprüfte Betonmischung nicht verändert werden darf.

Die für den direkten Anwendungsbereich geltenden Regeln wurden auf der Grundlage von einzelnen Prüfergebnissen entwickelt. Der Umfang zulässiger Abweichungen ist konservativ, weil sie auf dem Mindestmass an allgemeiner Übereinstimmung beruhen.

Wurde als Beispiel die UG-Stütze eines mehrgeschossigen Bauwerkes geprüft, so heisst dies, dass bei gleichen oder kleineren Längen in den oberen Geschossen dieselbe Stütze bis zum Dachgeschoss verwendet werden muss. Diese Lösung ist zwar nicht unbedingt wirtschaftlich, dafür aber sicher.

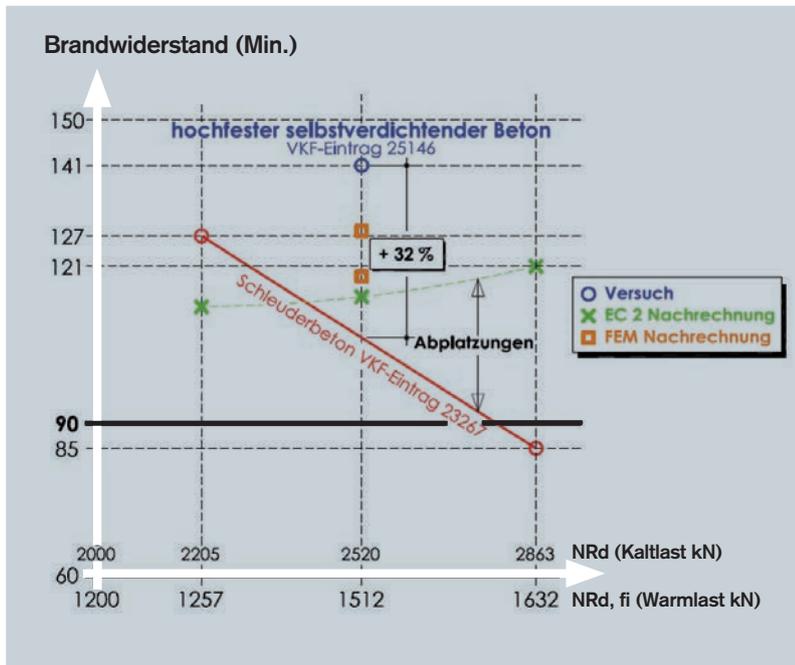


Bild 9: Ausgehend von bestehenden Versuchsergebnissen (Differenzen in Querschnitt, Länge: < 5 %) kann mittels Vergleich und Nachrechnungen aufgezeigt werden, dass hochfester, selbstverdichtender Beton einen bedeutend grösseren Brandwiderstand als Schleuderbeton aufweist [19], [20], [22].

Erweiterter Anwendungsbereich

Zur Erlangung eines erweiterten Anwendungsbereiches sind Überlegungen zur Interpolation und Extrapolation aus einer Reihe von Prüfergebnissen an unterschiedlichen Grössen und/oder Varianten erforderlich. Die beim erweiterten Anwendungsbereich benutzten Methoden beruhen auf Berechnungsverfahren oder Expertenbeurteilungen. Die Ausstellung eines entsprechenden Zertifikates darf nur durch eine akkreditierte Prüf- und Zertifizierungsstelle erfolgen. Alphabeton AG ist aufgrund der umfangreichen und überaus erfolgreichen Brandversuche in der Lage, für das ganze Stützensortiment den geforderten Brandwiderstand nachzuweisen. Der erweiterte Anwendungsbereich wird durch ein «Gutachten zur Beurteilung der Feuerwiderstandsdauer von Stahlbetonstützen der Alphabeton AG aus selbstverdichtendem hochfestem Beton mit PP-Fasern» [21] bestätigt.

Zusammenfassender Lösungsansatz

Für brandsensitive statisch bedeutende Bauteile wie Stützen ist es unabdingbar, dass durch den Hersteller zweifelsfrei nachgewiesen werden kann, dass der verwendete Beton im Brandfall nicht abplatzt und die geforderte Feuerwiderstandsdauer im Brandfall erreicht wird. Der Nachweis gegen Betonabplatzen ist bei konservativer Auslegung der Normen für alle Betonsorten > C35/45 zu erbringen. Damit werden effektive Betonfestigkeiten $f_{c,k}$

> 60 N/mm² weitgehend ausgeschlossen und ein Abplatzen im Brandfall höchst wahrscheinlich verhindert. Der Nachweis gemäss Tabelle 16, Norm SIA 262, führt nicht generell zu sicheren Werten, vor allem bei Bewehrungsgehalten < 5 %, Schlankheiten > 50 und zusätzlichen Momenteneinwirkungen. Hier sind jeweils die entsprechenden Nachweise durch den Stützenhersteller zu erbringen.

Rechtliche Situation

Das heute gültige Bauproduktengesetz wie auch das vermutlich in Zukunft anzuwendende europäische Bauproduktengesetz fordern bei Inverkehrbringen von Bauprodukten zwingend die Einhaltung wesentlicher Eigenschaften (u. a. Brandschutz). Diese Anforderungen sind zu erfüllen, ansonsten darf ein Produkt nicht mehr verkauft werden.

Der Brief der VKF an SwissBeton vom Dezember 2012 wird auch als Schnittstelle für mögliche Garantie-, Gewährleistungs- und/oder Haftpflichtforderungen dienen. Ebenfalls sind strafrechtliche Sanktionen gegen die Verantwortlichen am Bau sowie die Betonproduktehersteller aufgrund von Gefährdungen von Leib und Leben durch unsichere Betonprodukte vorstellbar (Art. 229 StGB; Gefährdung durch vorsätzliche oder fahrlässige Verletzung der Regeln der Baukunde).

Wer nach Ende 2012 gemäss dem aktuellen Stand der Technik nicht brandsichere Produkte herstellte und verkaufte, wird sich kaum der zivil- und strafrechtlichen Verantwortung entziehen können. Aber auch die kantonalen Gebäudeversicherer und ihr Dachverband VKF sowie die Berufsverbände stehen in der Pflicht. Sie müssen die berechnete Forderung nach sicheren Produkten kontrollieren und durchsetzen. Es ist Aufgabe der verantwortlichen Stellen, die Produzenten umgehend auf Risiken hinzuweisen, damit diese ohne Verzögerung reagieren könnten. Andernfalls könnte eine verspätete Warnung und damit verbundene Mehrkosten der Produzenten zumindest anzulasten versucht werden.

Schlussfolgerung

Stahlbetonstützen werden heute in der Regel vorfabriziert. Gründe sind die hohe Qualität, welche mit der Vorfabrikation erreicht wird, der grosse Termindruck auf der Baustelle sowie das hervorragende Preis-Leistungs-Verhältnis im Vergleich zu anderen Materialien.

Im Brandfall müssen Stahlbetonstützen die geforderte Feuerwiderstandsdauer erreichen. Der planende Ingenieur geht bei der Dimensionierung nach Norm SIA 262:2013 immer davon aus, dass auch infolge Hitzeeinwirkung im Brandfall die Querschnittsabmessungen erhalten bleiben, d.h., dass im Brandfall der Beton nicht abplatzt.

Die Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF) verlangt von den Stützenherstellern seit Dezember 2012 einen Nachweis des Brandwiderstandes. Die Kontrolle und Durchsetzung dieser Forderung liegt aber bei den einzelnen Kantonen. Verschiedene Gebäudeversicherer verlangen diesen Nachweis vor Baubeginn, da bei fehlendem Nachweis oder Nichtakzeptanz schon vor Bezug teure Ertüchtigungsarbeiten durch den Lieferanten zu leisten sind.

Als mögliche Nachweise haben sich heute etabliert:

Nachweis durch Prüfung

Bei grösseren Projekten kann es vernünftig sein, einzelne Stützen unter Last und Brand zu prüfen. Der direkte Anwendungsbereich ermöglicht die Anwendung von Stützen mit gleicher Bauteilabmessung, gleichem Bewehrungsgehalt und -anordnung, mit gleicher oder kleinerer Last und mit gleicher oder kleinerer Länge. Solche Lösungen sind oft nicht wirtschaftlich, dafür aber sicher.

Nachweis nach Norm SIA 262:2013

Die Verwendung von Tabelle 16 (Mindestquerschnitte und Mindestbetonüberdeckung) ist möglich, wenn zwei-

felsfrei nachgewiesen werden kann, dass der Überdeckungs-beton im Brandfall nicht abplatzt. Diese Forderung gilt für alle Betonfestigkeitsklassen C8/10 bis C100/115. Trotz dieses Nachweises sollten für sichere Lösungen nach den Regeln der Baukunst die Mindestbetonüberdeckungen bei Bewehrungsgehalten etwa $< 5\%$ um minimal 15 mm erhöht werden. Eine grössere Betondeckung allein, ohne systematische Brandversuche zwecks Ermittlung der allfälligen Abplatztiefe, ist nicht zielführend. Zusätzlich sind ohne speziellen Nachweis die Schlankheit auf $\lambda < 50$ zu beschränken und grössere Momenteneinwirkungen auszuschliessen.

Nachweis nach Norm SN EN 1992-1-2:2004

Die Anwendung der Norm SN EN 1992-1-2:2004 macht bei der Verwendung von normalfestem Beton, d.h. bis zu einer maximalen Betonfestigkeitsklasse C35/45, Sinn. Bis zu dieser Betonfestigkeitsklasse (d.h. 95 % aller Einzelwerte sind $f_{c,k} < 60 \text{ N/mm}^2$) ist das Abplatzen mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen. Die in der Norm vorgegebenen Einschränkungen sind aber strikte zu beachten:

- Querschnitte und Achsabstand gemäss Tabelle 5.2a
- $l_{o,fi} \leq 3 \text{ m}$ (Ersatzlänge der Stütze im Brandfall)
- Bewehrungsgehalt $< 4\%$
- Querschnitte $200 \text{ mm} \leq b' \leq 450 \text{ mm}$
- Seitenverhältnis $h \leq 1,5 \times b$
- Regeln nach Norm SN EN 1992-1-1
 - Kaltbemessung
 - Grössere Minimalbewehrung
 - Grössere Querbewehrung
- minimale Anzahl Längsbewehrungsstäbe
- gültig nur für Rechteck- und Kreisquerschnitt

Dieses Verfahren ist zum Beispiel auch in Deutschland die zurzeit einzige Möglichkeit, den Brandwiderstand nachzuweisen. Die Tabelle 5.2a wurde daher auch unverändert im Merkblatt Nr. 7 über Brandschutzanforderungen von Betonfertigteilen (11/2012) [9] in Tabelle 6 überführt und entspricht mit den vorgegebenen Einschränkungen dem aktuellen Stand der Technik.

Literaturhinweise und Normen

- [1] Norm SIA 262:2013 SN 505 262 Betonbau, 1. Auflage. Ausgabe 2013.
- [2] Norm SN EN 1992-1-2:2004 SIA 262.002 (2004-12) Eurocode 2: Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall.
- [3] DIN EN 1992-1-2/NA:2010-12 Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter (Nationally Determined Parameters NDP)
- [4] Norm SN EN 206-1:2000 SIA 162.051(2000-12), Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität.
- [5] Norm SN EN 206-1:2000/A1 SIA 162.051/A1 (2005-02) Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität.
- [6] Norm SN EN 206-9 SIA 262.059, Beton – Teil 9: Ergänzende Regeln für selbstverdichtenden Beton (SVB), Ausgabe 2010.
- [7] Norm SN EN 1363-1:2012 SIA 183.101: Feuerwiderstandsprüfungen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Ausgabe 2012.
- [8] Norm SN EN 1365-4:1999 Norm SIA 183.124: Feuerwiderstandsprüfungen für tragende Bauteile – Teil 4: Stützen. Gültig ab 1.3.2000.
- [9] Merkblatt Nr. 7 über Brandschutzanforderungen von Betonfertigteilen (11/2012), Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilebau e.V.
- [10] Schreiben Normkommission SIA 262 Betonbau, Zürich, vom 18.9.2013 an Alphabeton AG, Büron, betreffend normalfester/hochfester Beton, selbstverdichtender Beton, Nachweis gegen Abplatzungen usw.
- [11] Handbuch Eurocode – Spezialband Tragwerksbemessung für den Brandfall. Deutsches Institut für Normung, 1. Auflage 2012
- [12] Brandschutz in Europa – Bemessung nach Eurocodes. DIN Deutsches Institut für Normung, 2. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage 2012
- [13] Betonkalender 2013, XI Normen und Regelwerk, Frank Fingerloos, Berlin
- [14] Statistische Auswertung der Betondruckfestigkeit, Nguyen Viet Tue, Johannes Schwarz, Gunter Schenck, Lancer No. 10, 2005, Seiten 341 ff.
- [15] Einflussfaktoren auf den Brandwiderstand von Betonkonstruktionen, Versuchsstellen Hagerbach AG, Forschungsauftrag (FGU 2003-004) auf Antrag der Fachgruppe für Untertagebau
- [16] Ein Beitrag zur Bemessung von Stahlbetonstützen im Brandfall, August 2011, Dissertation von Marion Geliem, Bergische Universität, Wuppertal
- [17] Norm SIA 261:2003; SN 505 261(2003-01), Einwirkungen auf Tragwerke.
- [18] Norm SIA 261/1:2003 SN 505 261/1 (2003-01), Einwirkungen auf Tragwerke – Ergänzende Festlegungen.
- [19] Eintrag VKF (Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen), Brandschutzregister Nr. 23267
- [20] Eintrag VKF (Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen), Brandschutzregister Nr. 25146
- [21] Gutachten G 6.1/13-036 MFPA Leipzig GmbH (Univ.-Prof. Dr. Ing. Frank Dehn): «Gutachten zur Beurteilung der Feuerwiderstandsdauer von Stahlbetonstützen der Fa. Alphabeton AG aus selbstverdichtendem hochfestem Beton mit PP-Fasern (erweiterter Anwendungsbereich gemäss EN 1363-1:2012)». Vertraulich – von der VKF eingesehen.
- [22] Bericht «Sichere Stützen im Brandfall», Heft: Der Bauingenieur, Ausgabe April/13
- [23] Versuche zum Abplatzverhalten und zur Heissfestigkeit von Beton (Prof. Dr. M. Fontana, E. Klingsch), Versuchsbericht 14.2.2012.
- [24] Explosive spalling of concrete. Test report. Institute of Structural Engineering, ETH Zurich. (E. Klingsch, A. Frangi, M. Fontana), June 2003.
- [25] MFPA Leipzig GmbH, Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH, Leipzig.

Brandsicher!

Brandsichere Stützen bis R180



Limmat Tower Dietikon
Architekten: huggenbergerries
Bauherrschaft: Halter AG Entwicklungen

- Garantierter Feuerwiderstand für gesamtes Stützensortiment
- Brandsicherer Beton alphapact P080 (Patent ang.)
- Riesiges Sortiment für jeden Hoch- und Tiefbau

alphabeton

Alphabeton AG
Murmattenstrasse 6 · 6233 Büron
Telefon 041 496 02 00 · Fax 041 496 02 01
info@alphabeton.ch · www.alphabeton.ch

Nachweis des Feuerwiderstandes von Stahlbetonstützen – Übersichtstabelle

Nachweise	Normen	Gültigkeit		Festigkeiten	erfolgreicher Nachweis gegen Abplatzen im Brandfall		Einschränkungen	Resultat	Bemerkungen
mit Tabellen	SIA 262:2013, Tabelle 16	eingeführt	↑	C8/10 bis C100/115	ja	↑	Bewehrung < 8 %, zusätzlicher Nachweis: $\lambda > 50$, Momenteneinwirkung, Minimalbewehrung	Nachweis Feuerwiderstandsklasse	Nachweis gegen Abplatzen für alle Festigkeitsklassen
					nein	⊘			
	Eurocode 2: SN EN 1992-1-2:2004, Tabelle 5.2a Methode A	NAD fehlend	⊘						in Vernehmlassung
		Anwendungsparameter in Projektbasis definiert	↑	Beton normalfest $f_{c,k} < 60 \text{ N/mm}^2$ (95%) Beton $\leq \text{C35/45}$	nicht erforderlich	↑	$l_{0,fl} \leq 3 \text{ m}$; $A_s/A_c < 4\%$; Querschnitt: $200 \text{ mm} \leq b'$, $h \leq 450 \text{ mm}$; Seitenverhältnis $h \leq 1,5 \cdot b$; Bewehrungsregeln n. EN 1992-1-1; min. Anzahl Längsbewehrungsstäbe; gültig nur für Rechteck- u. Kreisquerschnitt	Heissbemessung Nachweisstufe 1	tabellarische Bemessung (Methode A)
				Beton hochfest $f_{c,k} \geq 60 \text{ N/mm}^2$ (95%)	ja	↑			
nein	⊘								
Eurocode 2: SN EN 1992-1-2:2004, Tabelle 5.2b Methode B	nicht zugelassen	⊘						Methode B nicht zugelassen, da grosse Abweichungen zu Versuchen	
mit Versuchen	SN EN 1363-1:2012 SN EN 1365-4:1999	mit Prüfnachweis von akkreditierter Prüf- und Zertifizierungsstelle	↑	C8/10 bis C100/115	Prüfung einzelner Stahlbetonstützen zur Bestimmung des Feuerwiderstandes	↑	gleicher Querschnitt; gleicher Bewehrungsgehalt; gleiche Bewehrungsanordnung; geringere Stützenlänge; geringere Belastung	direkter Anwendungsbereich (Eintrag VKF Brandschutzregister)	in der Praxis nur beschränkt tauglich (geprüft wie eingebaut)
		mit Prüfnachweis v. akkreditierter Prüf- und Zertifizierungsstelle + Gutachten	↑	C8/10 bis C100/115	Prüfung einer Serie von Stahlbetonstützen zur Bestimmung des Feuerwiderstandes	↑	keine Einschränkungen	erweiterter Anwendungsbereich (Eintrag VKF Brandschutzregister)	erstrebenswert, jedoch sehr zeit- und kostenintensiv
rechnerisch	SIA 262:2013	eingeführt	↑	C8/10 bis C100/115	ja	↑	Abplatzen des Überdeckungsbetons ist mit technischen Massnahmen verhindert	Warmbemessung	Nachweis gegen Abplatzen für alle Festigkeitsklassen
	Eurocode 2: SN EN 1992-1-2:2004	Anwendungsparameter in Projektbasis definiert	↑	C8/10 bis C100/115	ja, sonst Reduktion des Querschnittes	↑	Stabstatik-Bemessungsprogramme eignen sich zur Zeit kaum für die Heissbemessung von Betonstützen. Die notwendigen Validierungen ergeben in den meisten Fällen zu grosse Abweichungen zu vorgegebenen Werten. Zudem ist deren Anwendung äusserst komplex.	Heissbemessung Nachweisstufe 2	
			↑	C8/10 bis C100/115	ja, sonst Reduktion des Querschnittes	↑		Heissbemessung Nachweisstufe 3	numerische Simulation (Finite-Elemente-Methode)