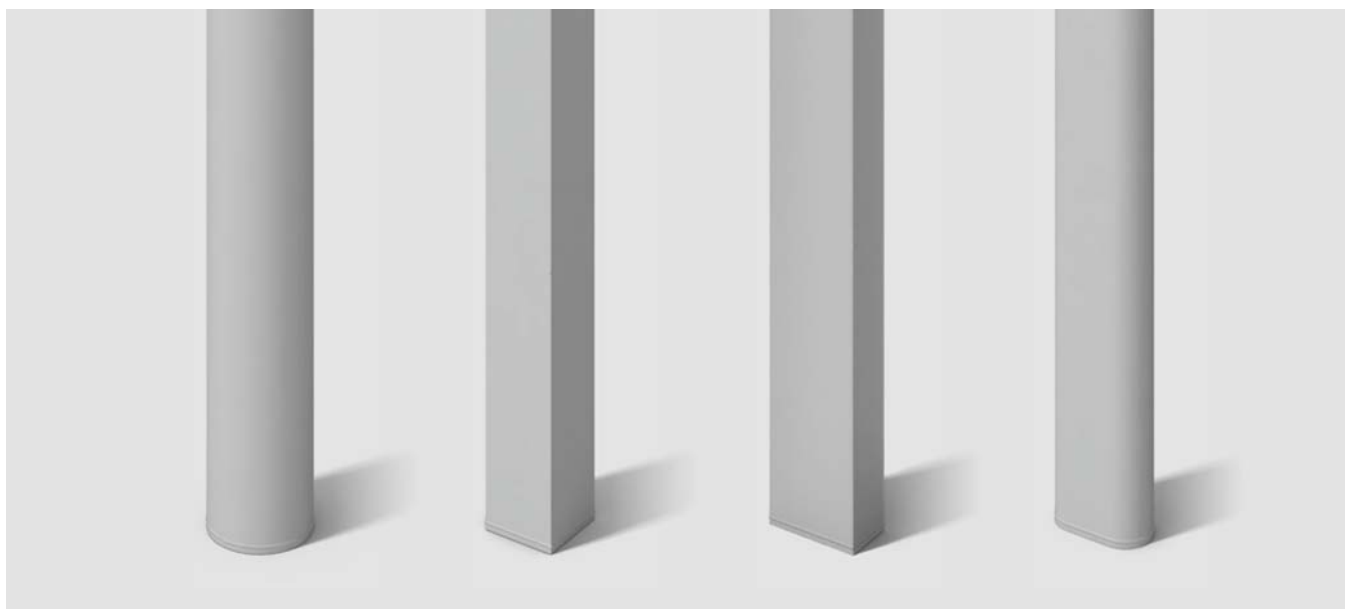


Colonnes en béton armé

Vérification de la résistance au feu des colonnes en béton armé ORSO-B



1. Introduction	Page 2	5. Approche globale	9
1.1 Norme SIA 262:2013 Construction en béton	2	6. Situation juridique	10
1.2 Norme SN EN 1992-1-2:2004, Eurocode 2	3	7. Conclusion	10
1.3 Béton à résistance normale – Béton à haute résistance	4	8. Vérifications	10
2. Procédé de fabrication d'éléments structuraux en béton à haute résistance	5	8.1 Vérification par test	10
2.1 Béton autoplaçant	5	8.2 Vérification à partir de la norme SIA 262:2013	10
2.2 Béton centrifugé	5	8.3 Vérification à partir de la norme SN EN 1992-1-2:2004	10
2.3 Béton vibré	6	9. Tableau synoptique	11
2.4 Éclatement du béton en cas d'incendie	6	10. Références bibliographiques et normes	12
2.5 Béton résistant au feu avec fibres en matière synthétique	7		
3. Réalisation d'essais de résistance au feu sans ou avec charge	7		
3.1 Simulation par la méthode des éléments finis (FEM)	8		
3.2 Résultats, expertises et rapports	8		
4. Champs d'application	9		
4.1 Champ d'application direct	9		
4.2 Champ d'application étendu	9		

1. Introduction

Les colonnes en béton armé ORSO-B satisfont aux exigences les plus sévères en matière statique et esthétique. En cours de conception, le calcul statique de colonnes préfabriquées ultrarésistantes est particulièrement complexe. En plus du dimensionnement des sections optimales et de l'inclusion des plaques de base et de tête, des éléments de transmission des charges, des couples de console ou des forces horizontales (choc), il faut en outre tenir compte des différentes conditions d'appui.

Pour plus d'informations, consultez notre site Internet www.aschwanden.com ou contactez Aschwanden Engineering & Services, e-mail engineering@aschwanden.com, téléphone +41 (0)32 387 95 95.

Le béton constitue une bonne protection contre les effets des températures élevées susceptibles d'apparaître en cas d'incendie. Il convient fondamentalement de respecter les normes en vigueur pour la vérification de la résistance au feu, comme du reste pour toutes les autres vérifications statiques. Les normes représentent l'état de la technique à une époque antérieure. Entre-temps, comme pour la vérification de la résistance au feu, peuvent apparaître de nouvelles connaissances qui établissent des règles plus restrictives que la norme. Précisément en ce qui concerne l'utilisation des éléments porteurs dans le bâtiment et les travaux publics, il convient de respecter en particulier la sécurité (incendie) en tenant compte de l'état actuel de la technique.

Fin 2012, l'AEAI (association des établissements cantonaux d'assurance incendie) a envoyé un courrier à SwissBeton (association pour les produits suisses en béton) qui représente la plus grande partie des fabricants de ce marché. Il y est stipulé sans équivoque que l'installation de produits en béton non fiables n'est pas acceptable. L'accent est mis principalement sur les colonnes en béton armé. Il est demandé à tous les fabricants de produire et de vendre uniquement des produits fiables (en matière de protection incendie). La date de ce courrier devrait constituer également le point de départ pour de possibles exigences en matière de garantie et de responsabilité concernant la vente de produits en béton non fiables et de l'incitation à les respecter. De plus ce message clair et sans équivoque de l'AEAI en cas de mise en danger de

la vie ou de l'intégrité physique des personnes par des produits en béton non fiables laisse clairement entendre que des sanctions pénales sont envisageables contre les responsables sur le chantier et les fabricants de produits en béton (art. 229 du Code pénal; mise en danger dû au non respect intentionnel ou par négligence des règles en matière de construction). En ce qui concerne les activités ainsi que l'estimation des différents fabricants vis-à-vis de cette problématique dans le passé, on constate diverses stratégies aux approches différentes.

1.1 Norme SIA 262:2013 Construction en béton

La vérification de la résistance au feu est définie dans la norme SIA 262:2013 [1] bien établie avec une exigence ou une démonstration de principe.

La résistance au feu exigée est définie dans la convention d'utilisation et en fonction du projet. L'ouvrage doit être conçu de manière qu'un incendie ne provoque pas une défaillance prématurée de la structure porteuse. Les méthodes de calcul d'ordre général sont acceptées. Il est possible d'effectuer la vérification à partir de tableaux à condition de pouvoir prouver de manière certaine que le béton n'éclatera pas (norme SIA 262:2013, paragraphe 4.3.10.5.2). Cette vérification doit être établie pour toutes les classes de résistance du béton, car cette norme est valable pour le béton normal de classe de résistance C8/10 à C100/115 [1], [4], [10]. Cette vérification est possible uniquement grâce à des essais longs, exhaustifs et coûteux sur les matériaux et les éléments structuraux avec charge.

Cependant tant des essais que des simulations avec la méthode des éléments finis (FEM) [21] montrent que l'utilisation du tableau 16, norme SIA 262:2013, ne conduit pas toujours à des solutions fiables. Les colonnes à armature légère (taux d'armature jusqu'à environ 5%) n'atteignent pas, et parfois il s'en faut de beaucoup, la résistance au feu souhaitée, même si un éclatement est exclu et si les valeurs minimales prescrites en matière de dimensions des éléments structuraux et d'enrobage de l'armature sont respectées (voir tableau 1):

C50/60 QS [mm]	c_{nom} [mm]	Longueur [mm]	λ_0	A_s/A_c [%]	$R_{objectif}$ (SIA 262)	$R_{eff.}$
200 × 200	20	3500	60.6	3.14	R60	R45
250 × 250	30	3500	48.5	03:40	R90	R78
300 × 300	30	4000	46.2	0.68	R120	R66
350 × 350	40	5000	49.5	01:03	R180	R94

Tableau 1: L'absence de fiabilité de ces solutions est à imputer d'une part à la définition de l'enrobage d'armature et d'autre part à l'absence de prise en compte de la finesse. La durée effective de la résistance au feu $R_{eff.}$ a été déterminée par calcul [21].

L'enrobage de l'armature est défini dans la norme SIA 262:2013 comme la distance entre la surface du béton et le lit d'armature le plus à l'extérieur, dans le cas présent l'étrier d'armature. La comparaison (figure 1) montre l'influence directe de cette définition sur la durée de la résistance au feu.

Avec 30 mm, l'enrobage du béton est identique pour les deux colonnes (figure 1) et correspond à la préconisation de la norme SIA 262:2013. Mais ce qui apparaît de manière évidente, c'est l'entraxe différent de la tige d'armature longitudinale concernée par rapport à la surface de la colonne. Sur la colonne faiblement armée, la température moyenne de la tige d'armature est déjà d'environ 600°C au bout de 90 minutes; sur la colonne fortement armée, elle est seulement d'environ 500°C au même moment. Mais la température critique des fers d'armature longitudinaux ne doit pas dépasser 500°C. Pour aboutir à une solution fiable (toujours à condition que

tout éclatement puisse être exclu), il faut, pour la colonne à armature légère, augmenter de 15 mm minimum l'enrobage de l'armature par rapport à la norme SIA 262:2013 tout en respectant le critère propre à R90.

Selon la norme SIA 261:2003 [17], il est possible d'effectuer la vérification de la sécurité structurale pour la situation de calcul en matière d'incendie selon l'une des manières suivantes au choix:

- dans la plage de durée à l'aide de la durée de résistance au feu
- dans la zone de résistance à l'aide de la résistance ultime
- dans la plage de température

L'effet thermique doit être considéré comme un effet conducteur exceptionnel. La norme SIA 261/1 [18] renvoie pour cela à la norme SN EN 1991-1-2:2004.

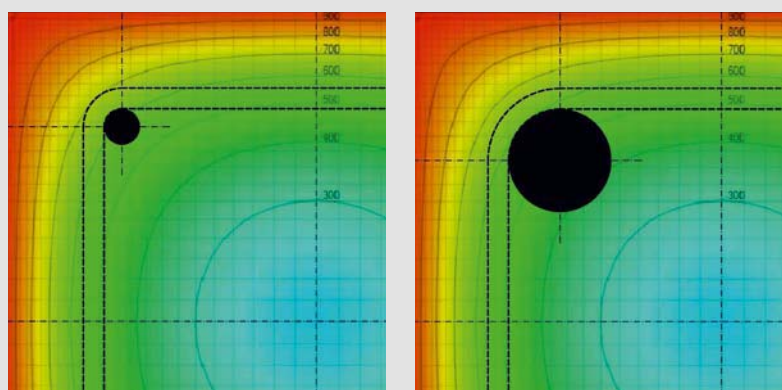


Figure 1: Profil des températures (calculé sans prise en compte de l'armature) pour colonne soumise à des sollicitations de plusieurs côtés 240 × 240 mm – R90. Répartition d'après SIA 262, étrier Ø 8 mm, à gauche avec fer longitudinal Ø 14 mm, à droite avec fer longitudinal Ø 40 mm.

1.2 Norme SN EN 1992-1-2:2004, Eurocode 2: Dimensionnement de la structure porteuse dans les cas d'incendie

Pour pouvoir appliquer actuellement la norme SN EN 1992-1-2:2004 [2] en Suisse, il est nécessaire qu'un accord soit conclu entre l'auteur du projet et le maître d'ouvrage. Les paramètres d'application nationaux (NDP) qui constituent la base sur laquelle repose le projet doivent être documentés et les dispositions locales prises en compte. L'annexe nationale (NA) ou les paramètres d'application nationaux indispensables existent en Suisse à l'état d'avant-projet et doivent être publiés fin mai/début juin 2014. De plus plusieurs méthodes ou procédés de vérification ne sont pas agréés à l'utilisation en Allemagne (par ex. vérification des colonnes selon la méthode B, tableaux de l'annexe C, etc.) [3], car ceux-ci conduiraient à des divergences trop importantes par rapport aux résultats expérimentaux [11], [12]. Malgré tout, cela vaut la peine d'étudier plus en détail les concepts de vérification de la norme SN EN 1992-1-2:2004, car y figurent le vaste champ de connaissances et l'expérience acquise au fil des ans dans l'ensemble de l'espace européen.

Les procédés de vérification des techniques de protection incendie se divisent en trois niveaux:

- niveau 1: Valeurs tabellaires
- niveau 2: Procédés de calcul simplifié
- niveau 3: Procédés de calcul d'ordre général

Les procédés de vérification au moyen des données tabellaires se limitent généralement à comparer la dimension des sections de l'élément structural à étudier (par ex. colonne, poutrelle, mur, etc.) et l'entraxe de l'armature aux valeurs qui sont nécessaires d'après les résultats des essais incendie normalisés pour atteindre la durée de résistance au feu prévue. Avec le procédé de calcul simplifié, on vérifie généralement que les effets mécaniques déterminants en cas d'incendie peuvent être absorbés par un élément structural pendant toute la durée stipulée de l'incendie. Pour cela, on procède entre autres à des simplifications lors de la détermination des températures des éléments structuraux et lors de la description de l'état de défaillance au cours de l'incendie.

Avec le procédé de calcul d'ordre général, il est possible de déterminer la résistance ultime et, le cas échéant, la tenue à la déformation d'un élément structural ou d'une structure porteuse pour une exposition au feu définie.

1.3 Béton à résistance normale – Béton à haute résistance

La limite entre le béton à résistance normale et le béton à haute résistance se situe pour la résistance à la compression caractéristique (cube de $150 \times 150 \times 150$ mm) à $f_{ck,cube} = 60 \text{ N/mm}^2$. Un béton de classe de résistance C50/60 est considéré dans l'Eurocode 2 comme un béton à résistance normale, et s'il est d'une classe C55/67 comme un béton à haute résistance. La norme SIA 262:2013 ne fait pas de différence entre béton à résistance normale et béton à haute résistance. Elle est valable pour toutes les classes de résistance de béton comme la norme SN EN 206-1:2000 [4], [5]. Cependant il s'agit alors logiquement d'effectuer une vérification de l'absence d'éclatement pour toutes les classes de résistance. Cette exigence

est utile, car la classe de résistance n'est qu'un critère possible permettant de juger de l'éclatement. De plus les considérations suivantes permettent d'étayer l'estimation:

- post-durcissement, $f_{cw,365}/f_{cw,28} > \text{environ } 1.10$
- surrésistance (selon la norme, il faut atteindre une résistance minimale. Mais pour la vérification de l'absence d'éclatement, il est utile de définir une valeur maximale). La classe de résistance du béton prévue est en moyenne supérieure d'une ou deux classes.

Les études ont montré que l'écart-type du béton à partir d'environ $f_{ck,cube} = 30 \text{ N/mm}^2$ conserve une valeur constante d'environ 5 N/mm^2 [14]. Le fractile de 5% est donc la valeur moyenne moins 1,645 fois l'écart-type. On considère que:

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

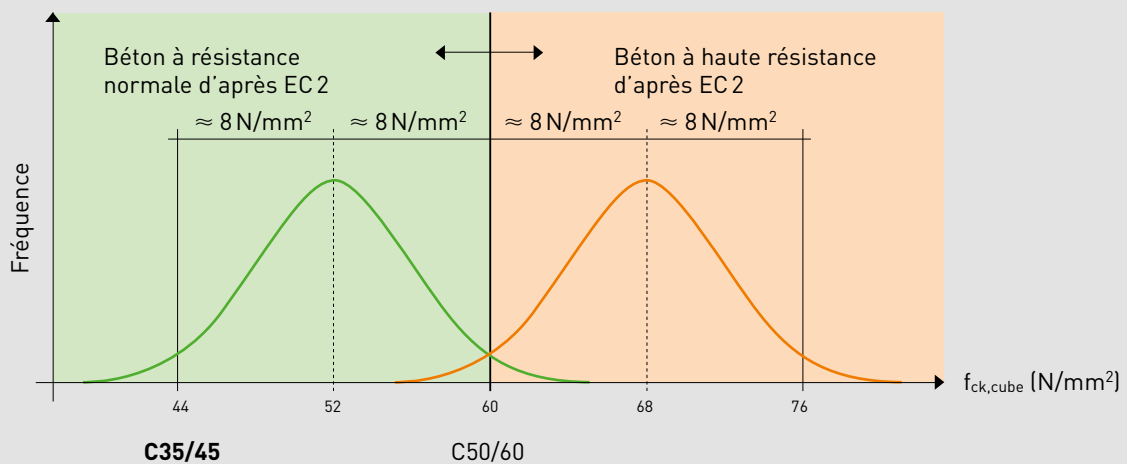


Figure 2: Vérification de la résistance: $f_{ck,cube}$ = courbe de fréquence rouge;
Vérification incendie, éclatement: $f_{ck,cube}$ = courbe de fréquence verte;
déterminant = cas défavorable = C35/45

Pour produire un béton à résistance normale avec une probabilité de 95%, il faut viser la classe de résistance C35/45 (post-durcissement et surrésistances non comprises!).

La norme SN EN 1992-1-2:2004 le régit en précisant que, si la résistance caractéristique du béton permet vraisemblablement de ranger celui-ci dans une classe supérieure, il convient d'appliquer les préconisations (réduction de la résistance à haute température, mesures contre l'éclatement, etc.) concernant cette classe plus élevée.

Concernant la vérification de l'absence d'éclatement, il n'existe actuellement pas encore de contrôles normalisés ni de préconisations bénéficiant d'une large reconnaissance. Par conséquent la vérification n'est possible qu'avec des tests complets et systématiques concernant le matériau et les éléments structuraux.

La norme SN EN 1992-1-2:2004 différencie le béton à résistance normale (C8/10 à C50/60) et le béton à résistance élevée (C55/65 à C100/115). Si on utilise des tableaux, une vérification supplémentaire n'est pas nécessaire pour un béton à résistance normale (4.5.1, § 4). En cas d'utilisation des tableaux disponibles (par ex. pour les colonnes le tableau 5.2a «Dimensions minimales des sections et des entraxes des colonnes à section rectangulaire ou circulaire»), il ne faut

cependant pas oublier de respecter toutes les restrictions suivantes:

- $\lambda_{0,fi} \leq 3 \text{ m}$ (longueur de remplacement de la colonne en cas d'incendie)
- taux d'armature $< 4\%$
- sections $200 \text{ mm} \leq b' \leq 450 \text{ mm}$
- rapport hauteur-largeur $h \leq 1.5 \times l$
- régulation d'après la norme SN EN 1992-1-1:
 - dimensionnement à froid
 - armature minimale plus importante
 - armature transversale plus importante
- nombre minimal de tiges d'armature longitudinales
- valables uniquement pour section rectangulaire ou circulaire

Ces restrictions sont le fruit de très nombreux essais de résistance au feu normalisés et de leur exploitation. Toutefois les indications géométriques du tableau 5.2a, norme SN EN 1992-1-2:2004, sont notablement plus conservatrices que les dimensions géométriques minimales prescrites dans la norme SIA 262, tableau 16, et comportent en outre d'autres restrictions. Cette différence importante est due au fait que la norme SIA 262:2013 exige une vérification de l'absence d'éclatement (définition de la section nette); la norme SN EN 1992-1-2:2004 n'exige cependant pas de contrôle de l'éclate-

ment (définition de la section brute). Les sections minimales mentionnées dans la norme SN EN 1992-1-2:2004 ont été définies de telle sorte que, en cas d'exposition au feu, de faibles éclatements superficiels sont possibles, mais que des éclatements destructeurs sont exclus. Le mélange des normes tel qu'il est pratiqué aujourd'hui par certains acteurs – le béton à résistance normale ne nécessite pas de vérification concernant l'absence d'éclatement (norme SN EN 1992-1-2:2004) et l'utilisation corrélative du tableau 16 (norme SIA 262:2013) –, n'est pas recevable et induit des solutions dont la fiabilité n'est pas incontestable. Cette «fausse solution» ne correspond pas à l'état de la technique et n'est pas non plus acceptée par différentes compagnies d'assurances immobilières comme vérification de la résistance au feu.

Sur le tableau 2, on constate que pour une même classe de résistance au feu la norme SIA 262 autorise généralement des sections minimales plus réduites.

Exemple:

Sections minimales pour la classe de résistance au feu R90 (R60) et utilisation de béton à résistance normale: norme SIA 262:2013: 240 mm (200 mm); vérification nécessaire de l'absence d'éclatement.

Norme SN EN 1992-1-2:2004: 350 mm (250 mm); vérification de l'absence d'éclatement non nécessaire.

Dans tous les cas, respecter les entraxes et les enrobages d'armature exigés.

Classe de résistance au feu	SN EN 1992-1-2 $f_{ck} < 60 \text{ N/mm}^2$ pas nécessaire	SIA 262
Vérification de l'éclatement		nécessaire en général
R30	200 / 32	150 / 37
R30	300 / 27	150 / 37
R60	250 / 46	200 / 39
R60	350 / 40	200 / 39
R90	350 / 53	240 / 51
R90	450 / 40	240 / 51
R120	350 / 57	280 / 53
R120	450 / 51	280 / 53
R180	450 / 70	360 / 68

Tableau 2: Dimension minimale des éléments structuraux/entraxe de l'armature longitudinale (pour mieux pouvoir comparer, on détermine l'entraxe selon les valeurs de la norme SIA 262 en prenant les hypothèses suivantes: armature transversale $\varnothing 8 \text{ mm}$, armature longitudinale $< 8\%$).

La limite fixée dans la norme SN EN 1992-1-2:2004 entre le béton à résistance normale (jusqu'à C50/60) et le béton à résistance élevée (à partir C55/65) ne peut pas servir seule pour vérifier la résistance au feu. Dans la zone Europe, cette limite – fixée arbitrairement – est un sujet de discussion.

Ceux qui fabriquent encore aujourd'hui des éléments structuraux porteurs en béton normal de classe de résistance supérieure sans prendre de mesures spéciales et sans vérifier que le béton d'enrobage n'éclatera pas, agissent à l'encontre des règles de la technique.

2. Procédé de fabrication d'éléments structuraux en béton à haute résistance

2.1 Béton autoplaçant

Le SVB (béton autoplaçant) est un nouveau produit innovant qui a été développé au Japon dans les années 80 du 20e siècle. Ce béton se caractérise par une plasticité particulièrement importante. Même en présence d'éléments structuraux à géométrie compliquée, ce matériau à forte viscosité comble automatiquement les cavités et se désaère sans nécessité de faire appel à une énergie de compactage supplémentaire [6].

2.2 Béton centrifugé

Le procédé de centrifugation permet de fabriquer des corps creux en béton symétriques (tubes, colonnes, mâts, poteaux, etc.) Le béton, plastique à mou, est centrifugé dans des formes fermées. Il se produit toujours une ségrégation (granulation grossière vers l'extérieur, mortier riche en eau vers l'intérieur).

Les propriétés caractéristiques que possède le béton centrifugé s'avèrent problématiques en cas d'incendie:

- Surface lisse sans porosité: lors de la centrifugation du béton, les parties les plus légères (air) sont tassées vers l'intérieur. Le résultat est une surface du béton très dense, lisse et sans porosité – esthétiquement séduisante, mais avec un inconvénient en cas d'incendie: les bétons très denses ont tendance à éclater en cas d'incendie.
- L'adjonction de fibres en matière synthétique est possible, mais leur répartition sur toute la section est très incertaine. Du fait de leur poids spécifique réduit (masse volumique apparente $< 1000 \text{ kg/m}^3$), les fibres migrent majoritairement vers l'intérieur de la section lors de la centrifugation – ce qui n'est pas optimal en cas d'incendie.
- Creux: les creux sont une propriété caractéristique du béton centrifugé; ils sont indissociables du processus de fabrication. C'est également un inconvénient en cas d'incendie: la colonne monte plus rapidement en température du fait de l'absence de masse du noyau ou encore le volume manquant a une influence négative sur la capacité d'absorption thermique de la section.

2.3 Béton vibré

Le compactage s'effectue généralement à l'aide de vibrateurs (vibreurs, plateau vibrant). La quantité de ciment, les additifs, la proportion eau-ciment ainsi que la composition pétrographique ont une influence sur la résistance au feu. Indépendamment du processus de fabrication, il est indispensable de disposer d'informations précises sur la tenue à la diffusion de la chaleur et à l'éclatement pour chaque béton avec lequel les colonnes en béton doivent être fabriquées. Pour obtenir ces informations essentielles, il est indispensable d'effectuer des essais exhaustifs sur les matériaux et les éléments structuraux dans des fours d'essai adaptés.

2.4 Éclatement du béton en cas d'incendie

Les raisons qui provoquent d'éventuels éclatements du béton en cas d'incendie n'ont pas encore été étudiées pour tous les éléments. Mais il s'est avéré que certains facteurs, seuls ou en interaction les uns avec les autres, ont une influence sur l'éclatement. La seule limitation de la résistance conduit le plus souvent à des solutions incertaines. Il convient par

exemple de tenir compte par ailleurs des éléments suivants:

- composition du béton (teneur en ciment, type de ciment, proportion eau-ciment, etc.)
- propriétés du béton durci (perméabilité, teneur en air occlus, résistance, etc.)
- nature du compactage (compacité, ségrégation, section non homogène)
- proportion d'additifs (inertes, pouzzoloniques, hydrauliques latents, hydrauliques)
- composition pétrographique des adjuvants (par ex. quartzite, calcaire), forme des grains, répartition par taille
- armature (teneur, répartition, solidité)
- teneur en humidité
- effets (couples), utilisation de la charge
- mesures concernant la technologie du béton (adjonction de fibre en matière synthétique, aération supplémentaire, etc.)
- mesures structurelles (filet de protection, formation armature transversale, forme des étriers et écartement, etc.)
- vitesse d'échauffement, évolution de la température en cas d'incendie



Figure 3: Béton C25/30, teneur en ciment 325 kg/m³, proportion eau-ciment 0.42, teneur en air occlus 1.5%, teneur en fibres en PP 1.0 kg/m³ [15]

Ces informations sont également étayées par une abondante bibliographie. Il existe ainsi de très nombreux rapports qui montrent que des bétons, même avec des résistances réduites (en partie avec adjonction de fibres en matière synthétique), présentent des éclatements en cas d'incendie [15], [16]. D'autre part, il est possible de fabriquer des bétons à haute ou ultra haute résistance d'une extrême densité ne présentant pas d'éclatements en cas d'incendie [24].

La solution la plus simple est celle où le béton n'éclate pas de manière incontestable. Si, malgré tout, des éclatements se produisent, la norme SN EN 1992-1-2:2004 donne des valeurs possibles permettant de réduire la section de colonnes.

Les valeurs du tableau 5.2a, Norme SN EN 1992-1-2:2004, réduit à la zone endommagée selon la figure 4, montrent une bonne concordance avec les dimensions minimales des éléments structuraux du tableau 16, norme SIA 262:2013.

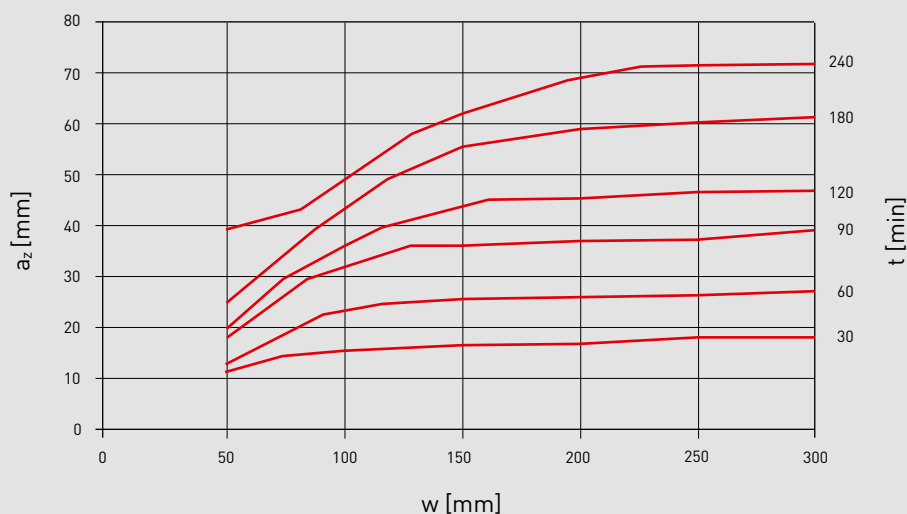


Figure 4: Réduction a_z de la section d'une colonne avec adjuvant à base de quartz, avec a_z : zone endommagée, w : $\frac{1}{2}$ largeur de colonne
Exemple: section 350 × 350 mm, R90 d'après le diagramme: $a_z = 38$ mm avec $w = 175$ mm
section résiduelle obtenue par calcul: 274 × 274 mm

2.5 Béton résistant au feu avec fibres en matière synthétique

Aschwanden produit toutes les colonnes en béton autoplaçant à haute résistance de classe C80/95. Ce béton résistant au feu est un produit breveté développé en interne. Le choix des différents composants, la recette du béton, son mélange ainsi que son élaboration ont fait l'objet au cours des dernières années d'un développement et d'une optimisation permanents. Le résultat est un béton à haute résistance qui n'éclate pas en cas d'incendie. Cette propriété très favorable du matériau a pu être vérifiée et confirmée par plusieurs instituts d'essai lors de tests de résistance au feu.

L'emploi d'un adjuvant approprié est nécessaire pour obtenir un béton qui n'éclate pas. On sait depuis longtemps que les adjuvants à base de calcaire (teneur en calcaire > 80%), de basalte ou de diabase sont plus appropriés par grosse chaleur que les roches à forte proportion de quartz. La décarbonatation de la roche calcaire s'effectue à une température d'environ 800°C. La transformation minérale du quartz (augmentation du volume entraînant la disparition de la grainure et des éclatements de la granulation) se produit à partir d'environ 575°C.

3. Réalisation d'essais de résistance au feu sans ou avec charge

La résistance au feu d'un élément structural peut se vérifier uniquement sur la base d'essais à l'échelle 1:1. Le procédé pour déterminer la durée de la résistance au feu est défini dans la norme SN EN 1365-4:1999 «Essais de résistance au feu des éléments porteurs – Partie 4: Poteaux» [8]. L'éclatement du béton en cours d'incendie modifie la géométrie de la section et a donc une influence importante sur l'élévation de la température au sein de l'élément structural. L'effet isolant de l'enrobage en béton diminue en fonction de la profondeur d'éclatement. La conséquence est une augmentation plus rapide de la température de l'acier (la résistance à la traction et à la compression de l'acier diminue déjà à environ 70% à une température de 500°C). Par ailleurs la section se réduit si bien qu'avec une force normale constante les tensions augmentent. Par conséquent il est impératif que pour les éléments structuraux porteurs la taille des éclatements éventuels dus au feu soit systématiquement déterminée pour chaque type de béton et pour chaque section.

Dans une première phase, Aschwanden a contrôlé, au cours d'une procédure de sélection rigoureuse, l'efficacité en cas d'incendie d'une douzaine de types de fibres de matière syn-

L'adjonction de fibres de matière synthétique a là aussi fait ses preuves. Ces fibres de matière synthétique fondent en cas d'incendie à une température d'environ 165°C, forment ainsi des canaux de décharge de vapeur et réduisent les risques d'éclatements de type explosif (voir aussi Norme SIA 62:2013, paragraphe 4.3.10.6.1 et autre bibliographie).

Pour l'ajout dans le malaxeur en marche, Aschwanden utilise un dispositif de dosage entièrement automatique d'un dosage de grande précision. La répartition homogène des fibres dans la matrice du béton est d'une importance primordiale. Cette exigence est respectée grâce à un malaxeur planétaire à contrecourant avec un cyclone supplémentaire en lien avec une durée de mélange prédéfinie. De très nombreux essais ont montré que le type du malaxeur et la durée de mélange ont une grande influence sur la répartition des fibres et par conséquent sur la résistance au feu. Même l'ajout des fibres avec des quantités préalablement emballées pour un lot conduit, comparativement à un dispositif de dosage, à une répartition irrégulière et par conséquent à des solutions non fiables.

thétique (on trouve sur le marché différents matériaux et différentes géométries).

Dans une seconde phase, des échantillons ont été fabriqués avec différentes quantités de fibres, puis chauffés dans le four d'essai (courbe de température-temps ETK ISO 834). A l'issue de cette série d'essais, il a été possible de fixer la quantité optimale de fibres.

Au cours de l'étape suivante, on a effectué des essais de résistance au feu sans charge sous sollicitation thermique conformes à la courbe de température-temps (SIA 183.101 SN EN 1363-1:2012) [7] afin d'analyser la tenue à la diffusion de la chaleur et à l'éclatement avec différents diamètres et différents taux d'armature.

Des éléments thermiques préalablement installés (jusqu'à 36 unités par colonne) ont permis pendant toute la durée de l'essai de résistance au feu d'effectuer des mesures de température à intervalles de 20 secondes. Pendant les 120 minutes qu'a duré l'essai de résistance au feu conforme à la courbe de température-temps, on n'a pas constaté d'éclatements, de déformations ni de fissures.



Figure 5: Opérations dans le four d'essai ouvert pour colonnes dans la Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin (photo: Aschwanden SA)



Figure 6: Essai de résistance au feu en charge dans la Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, mai 2013. Vue du four d'essai pendant le chauffage (photo: Aschwanden SA)

La base pour des essais de résistance au feu en charge fut ainsi établie. En adéquation avec les essais préalables couronnés de succès et avec les résultats ainsi obtenus, il a été établi un programme de vérification avec différentes sections et différents taux d'armature. Pour chaque colonne, jusqu'à 34 éléments thermiques ont été fixés à l'armature avant la fabrication. Il a ainsi été possible d'établir une courbe des températures de l'échantillon pendant toute la durée de l'essai; elles ont permis à leur tour de tirer des conclusions intéressantes sur la tenue à la diffusion de la chaleur en fonction du temps.

Il a alors été possible de fabriquer les colonnes avec le mélange de béton breveté «Alphapact P080». Les contrôles de résistance au feu ont été effectués selon un traitement normalisé sur 100 jours.

Il convient également de réaliser le contrôle des colonnes selon la norme SN EN 1365-4:1999 de préférence sur de faibles sections. D'une part celles-ci sont plus sensibles au feu (absorption de chaleur plus faible), d'autre part on définit toujours pour l'excentrement prévu vérifié de la charge (excentricité) la plus petite valeur pour la longueur de la colonne/500 ou 7 mm, laquelle fournit pour des petites sections, on l'aura compris, des valeurs moins favorables.

Aussi bien pendant les essais de résistance au feu sans charge que pendant les essais de résistance au feu avec charge, on n'a pas constaté d'éclatements sur aucune

des 18 colonnes contrôlées au total. C'est-à-dire que, lors de l'ensemble des essais de résistance au feu, les colonnes n'ont pas présenté d'éclatements jusqu'à l'affaissement lié au niveau de température.

3.1 Simulation par la méthode des éléments finis (FEM)

La méthode des éléments finis est un mode de calcul applicable dans tout ce qui concerne l'ingénierie pour une simulation numérique du comportement des corps solides. En tenant compte des paramètres du matériau liés à la température (qui sont déterminés préalablement au cours d'essais des matériaux dans le four d'essai), elle permet de dimensionner n'importe quelle section tridimensionnelle, physiquement et géométriquement non linéaire.

Avec la méthode des éléments finis, il est possible de juger du comportement d'un élément structural pour n'importe quelle courbe de température-temps. Cette méthode se prête par conséquent aussi à la vérification de la durée de la résistance au feu, mais ne peut être utilisée que par des spécialistes avertis. Le document national concernant l'application de la norme DIN EN 1992-1-2:2004 définit un procédé de validation complexe, à mettre préalablement en œuvre, en vue de l'application de cette méthode.

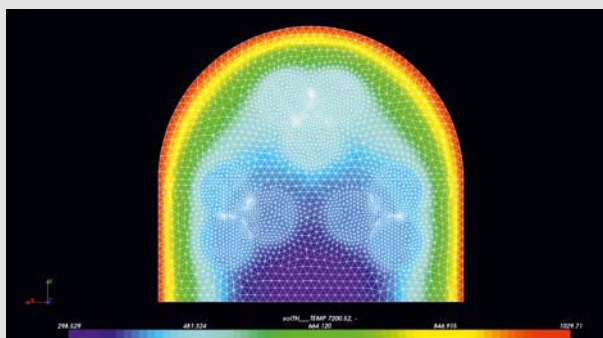


Figure 7: Simulation avec la méthode des éléments finis: champ de température d'une colonne ovale au bout de 120 minutes; rouge 1030°C; jaune 847°C; vert 664°C; bleu clair 481°C; bleu foncé 298°C. Résultat de l'essai de résistance au feu en charge: durée de la résistance au feu effective 175 minutes

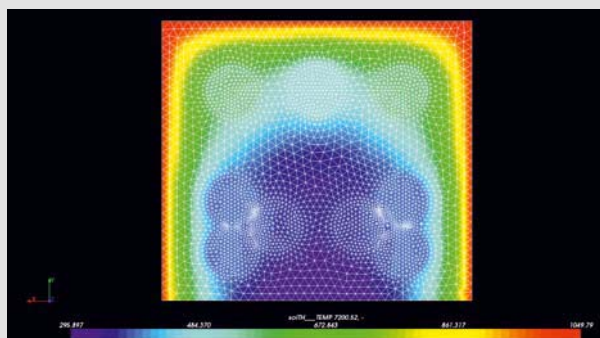


Figure 8: Simulation avec la méthode des éléments finis: champ de température d'une colonne rectangulaire au bout de 120 minutes; rouge 1050°C; jaune 861°C; vert 673°C; bleu clair 484°C; bleu foncé 296°C. Résultat de l'essai de résistance au feu en charge: durée de la résistance au feu effective 191 minutes

3.2 Résultats, expertises et rapports

La commande d'un tel procédé de validation a été passée par nos soins à un institut d'essai et de recherche agréé par l'AEAI [25]. Finalement la réussite des contrôles a permis de vérifier que la méthode des éléments finis permet d'obtenir une bonne cohérence avec le contrôle expérimental dans la détermination de la durée de la résistance au feu et apporte

des résultats plutôt fiables à partir des hypothèses retenues. Aschwanden est en mesure de démontrer la résistance au feu de chaque colonne en tenant compte des paramètres variables (dimension de la section, enrobage, taux d'armature longitudinale et répartition, géométrie de l'armature transversale, longueur de la colonne, finesse, utilisation de la charge, etc.).

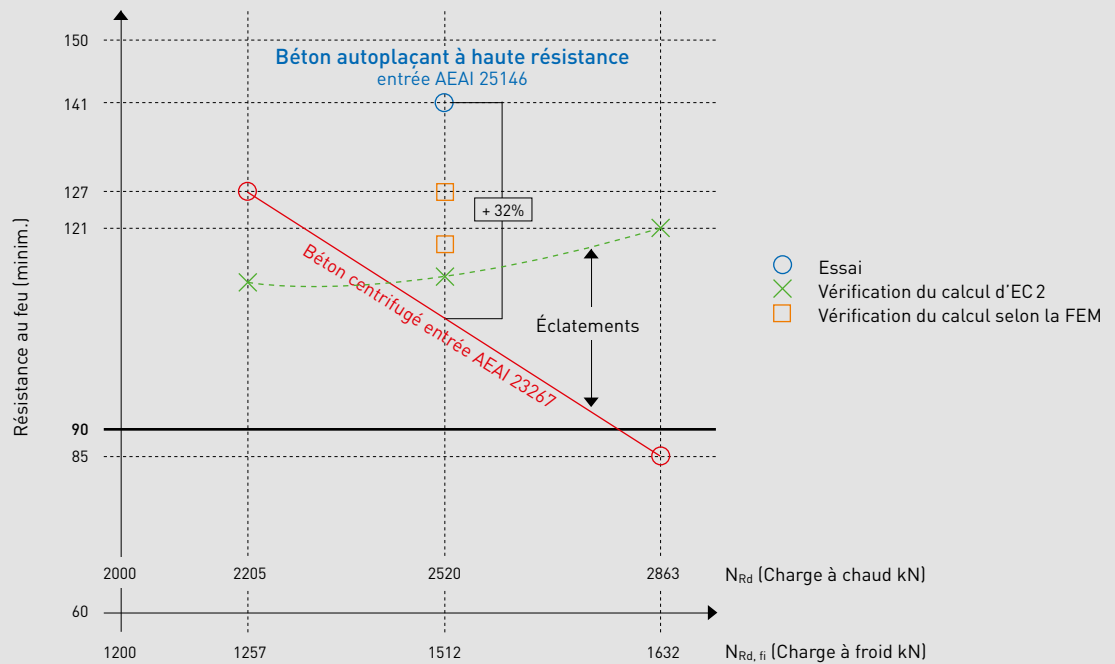


Figure 9: A partir des résultats des tests existants (différences de section, longueur: < 5%), il est possible par comparaison et en vérifiant les calculs de démontrer que le béton autoplaçant à haute résistance présente une résistance au feu notablement supérieure à celle du béton centrifugé [19], [20], [22].

4. Champs d'application

4.1 Champ d'application direct

La résistance au feu des éléments structuraux peut être vérifiée par des instituts d'essai agréés selon des préconisations précises. Les résultats des tests sont applicables sur les colonnes de même section (même section du béton, même guidage de l'armature, même taux d'armature), de longueur inférieure ainsi que celles de charge inférieure. Il va de soi que le matériau de construction ou le mélange de béton contrôlé ne doit pas être modifié.

Les règles en vigueur pour le champ d'application direct ont été élaborées à partir des différents résultats des tests. Toutes les divergences admissibles sont conservatrices, car elles reposent au strict minimum sur une cohérence globale. Si, à titre d'exemple, la colonne en sous-sol d'un bâtiment de plusieurs étages a été testée, cela signifie que, pour des longueurs identiques ou inférieures, il faut utiliser la même colonne dans les étages supérieurs jusqu'au dernier étage sous le toit. Cette solution n'est sans doute pas très économique, mais elle est fiable.

4.2 Champ d'application étendu

Pour pouvoir étendre le champ d'application, il est indispensable de réfléchir à l'interpolation et à l'extrapolation à partir des résultats d'une série de tests avec différentes dimensions et/ou versions. Les méthodes utilisées dans le champ d'application étendu reposent sur des procédés de calcul ou sur des évaluations d'experts. La présentation d'un certificat approprié est réservée à un institut d'essai et de certification accrédité. Grâce à ses essais de résistance au feu exhaustifs et couronnés d'un énorme succès, Aschwanden est en mesure de justifier la résistance au feu exigée sur l'ensemble de son assortiment de colonnes. Le champ d'application étendu est validé par une «expertise visant à évaluer la durée de la résistance au feu des colonnes en béton armé d'Aschwanden SA en béton autoplaçant à haute résistance avec fibres en PP» [21].

5. Approche globale

Pour les éléments structuraux importants pour la statique sensibles au feu tels que les colonnes, il est indispensable que le fabricant puisse justifier sans aucun doute possible que le béton utilisé n'éclate pas en cas d'incendie et que la durée de résistance au feu exigée soit atteinte. Il faut apporter la justification de l'absence d'éclatement du béton pour tous les types de béton > C35/45 pour une interprétation conservatrice des normes. Sont ainsi largement exclues des résistances effectives du béton $f_{c,k} > 60 \text{ N/mm}^2$, alors qu'un éclat-

tement en cas d'incendie sera très probablement évité. La vérification d'après le tableau 16, norme SIA 262, ne donne généralement pas de valeurs fiables, surtout pour des taux d'armature < 5%, une finesse > 50 et des effets de couples supplémentaires.

Les vérifications correspondantes doivent être effectuées et justifiées par le fabricant des colonnes.

6. Situation juridique

La loi sur les produits pour le bâtiment actuellement en vigueur, tout comme la loi européenne sur les produits pour le bâtiment vraisemblablement applicable dans le futur, exige impérativement, pour la mise en circulation des produits pour le bâtiment, le respect des propriétés essentielles (entre autres la protection incendie). Ces exigences doivent être remplies, sinon le produit concerné ne pourra plus être vendu.

Le courrier de décembre 2012 de l'AEAI à SwissBeton servira également d'interface pour de possibles exigences en matière de garantie et/ou de responsabilité. Sont également envisageables des sanctions pénales contre les responsables sur le chantier et les fabricants de produits en béton en raison de la mise en danger de la vie ou de l'intégrité physique des personnes par des produits en béton non fiables (art. 229 du

Code pénal; mise en danger due au non respect intentionnel ou par négligence des règles en matière de construction).

Tous ceux qui, depuis fin 2012, ont fabriqué et vendu des produits anti-feu non fiables selon l'état actuel de la technique auront du mal à échapper à leurs responsabilités en matière civile et pénale. Cependant même les assureurs immobiliers cantonaux et leur organisme de coordination, l'AEAI, ainsi que les syndicats professionnels sont soumis à cette obligation. Ils doivent contrôler et mettre en œuvre l'exigence légitime de produits fiables. Il est du ressort des services compétents d'attirer immédiatement l'attention des fabricants sur les risques afin qu'ils puissent réagir sans délai. Sinon on pourrait pour le moins tenter d'imputer aux fabricants un retard dans la mise en garde et les surcoûts qu'il entraînerait.

7. Conclusion

En règle générale, les colonnes en béton armé sont actuellement préfabriquées. Les raisons en sont l'excellente qualité obtenue avec le préfabriqué, la forte pression des délais sur le chantier ainsi que l'excellent rapport qualité-prix comparativement aux autres matériaux.

En cas d'incendie, les colonnes en béton armé doivent atteindre la durée de résistance au feu exigée. L'ingénieur concepteur suppose toujours, lors du dimensionnement selon la norme SIA 262:2013, que, même sous l'influence de la chaleur produite en cas d'incendie, la dimension des sections ne sera pas modifiée, c'est-à-dire qu'en cas d'incendie le béton n'éclatera pas.

L'Association des établissements cantonaux d'assurance incendie (AEAI) exige depuis décembre 2012 de la part des fabricants de colonnes un justificatif de la résistance au feu. Toutefois le contrôle et la mise en œuvre de cette exigence revient aux différents cantons. Plusieurs assureurs immobiliers exigent ce justificatif avant le début du chantier car, en cas d'absence de justificatif ou de non acceptation, de coûteuses opérations d'agrément seront à effectuer avant livraison.

8. Vérifications

A ce jour, les vérifications possibles sont:

8.1 Vérification par test

Pour des projets importants, il peut être judicieux de tester certaines colonnes en charge et en situation d'incendie. Le champ d'application direct permet l'utilisation de colonnes de même dimension d'élément structural, de même taux et de même disposition d'armature, de même charge ou de charge inférieure et de même longueur ou de longueur inférieure. De telles solutions sont souvent peu économiques, mais par contre fiables.

8.2 Vérification à partir de la norme SIA 262:2013

L'utilisation du tableau 16 (sections minimales et enrobage de béton minimal) est possible si on peut vérifier de manière incontestable que le béton d'enrobage n'éclate pas en cas d'incendie. Cette exigence est valable pour toutes les classes de résistance de béton de C8/10 à C100/115. Malgré cette vérification, il convient, pour obtenir des solutions fiables d'après les règles de l'architecture, d'augmenter pour des taux d'armature < 5% environ l'enrobage de béton minimal de 15 mm au minimum. L'augmentation seule de l'épaisseur d'enrobage de béton, sans essais systématiques de résistance au feu afin de déterminer la profondeur d'éclatement éventuelle, n'est pas pertinente. En outre il faut limiter la finesse à $\lambda < 50$ sans vérification particulière, et des effets importants des couples sont à exclure.

8.3 Vérification à partir de la norme SN EN 1992-1-2:2004

L'application de la norme SN EN 1992-1-2:2004 a du sens pour l'utilisation du béton à résistance normale, c'est-à-dire jusqu'à une classe de résistance maximale du béton de C35/45.

Jusqu'à cette classe de résistance du béton (c'est-à-dire 95% de toutes les valeurs ponctuelles sont $f_{c,k} < 60 \text{ N/mm}^2$), l'éclatement est exclu avec une grande probabilité. Cependant les restrictions préconisées dans la norme sont à respecter impérativement:

- sections et entraxe d'après le tableau 5.2a
- $\lambda_{0,fi} \leq 3 \text{ m}$ (longueur de remplacement de la colonne en cas d'incendie)
- taux d'armature < 4%
- sections $200 \text{ mm} \leq b' \leq 450 \text{ mm}$
- rapport hauteur-largeur $h \leq 1.5 \times b$
- régulation d'après la norme SN EN 1992-1-1
 - dimensionnement à froid
 - armature minimale plus importante
 - armature transversale plus importante
- nombre minimal de tiges d'armature longitudinales
- valables uniquement pour section rectangulaire ou circulaire

Cette procédure est par exemple même en Allemagne la seule possibilité de vérifier la résistance au feu.

Le tableau 5.2a a donc été transféré sans aucune modification dans le cahier technique n° 7 concernant les exigences en matière de protection incendie des éléments préfabriqués en béton [11/2012] [9] dans le tableau 6 et correspond à l'état actuel de la technique avec les restrictions prédéfinies.

9. Vérification de la résistance au feu du béton armé – tableau synoptique

Vérifications à partir de tableaux

Normes	Validité	Résistances	Vérification positive de l'absence d'éclatement en cas d'incendie	Restrictions	Résultat	Remarques	
SIA 262:2013 tableau 16	introduite	↑ C8/10 à C100/115	oui	↑	Vérification Classe de résistance au feu	Vérification de l'absence d'éclatement pour toutes les classes de résistance	
			non	⊘			
Eurocode 2: SN EN 1992-1-2:2004, tableau 5.2a Méthode A	NAD manquant	⊘				en suspens	
	Paramètres d'application définis dans l'avant-projet	↑	Béton à résistance normale $f_{c,k} < 60 \text{ N/mm}^2$ [95%] Béton \leq C35/45	pas nécessaire	↑	Dimensionnement à chaud Niveau de vérification 1	Calcul à partir du tableau (Méthode A)
			Béton à haute résistance $f_{c,k} \geq 60 \text{ N/mm}^2$ [95%]	oui	↑		
non	⊘		non	⊘			
Eurocode 2: SN EN 1992-1-2:2004, tableau 5.2b Méthode B	non agréée	⊘				Méthode B non agréée du fait des divergences importantes par rapport aux essais	

Vérifications à partir de tests

Normes	Validité	Résistances	Vérification positive de l'absence d'éclatement en cas d'incendie	Restrictions	Résultat	Remarques	
SN EN 1363-1:2012 SN EN 1365-4:1999	Avec vérification par tests de la part d'un institut d'essai et de certification accrédité	↑ C8/10 à C100/115	Contrôle de plusieurs colonnes en béton armé pour déterminer la résistance au feu	↑	Même section; même taux d'armature; même disposition de l'armature; longueur de colonne inférieure; charge inférieure	Champ d'application direct (inscription au registre de protection incendie de l'AEA)	Adapté dans la pratique seulement de manière limitée (testé comme installé)
	Avec vérification par tests de la part d'un institut d'essai et de certification accrédité + expertise	↑ C8/10 à C100/115	Contrôle d'une série de colonnes en béton armé pour déterminer la résistance au feu	↑	Aucune restriction	Champ d'application étendu (inscription au registre de protection incendie de l'AEA)	Vaut la peine, mais très long et coûteux

Vérifications par le calcul

Normes	Validité	Résistances	Vérification positive de l'absence d'éclatement en cas d'incendie	Restrictions	Résultat	Remarques	
SIA 262:2013	introduite	↑ C8/10 à C100/115	oui	↑	L'éclatement de l'enrobage de béton est évité grâce à certaines mesures techniques	Mesure de la chaleur	Vérification de l'absence d'éclatement pour toutes les classes de résistance
Eurocode 2: SN EN 1992-1-2:2004	Paramètres d'application définis dans l'avant-projet	↑ C8/10 à C100/115	oui, sinon réduction de la section	↑	Les programmes de calcul de statique des tiges conviennent à peine actuellement au dimensionnement à chaud des colonnes en béton. Les validations nécessaires donnent lieu dans la plupart des cas à des divergences importantes par rapport aux valeurs préalablement fixées. Par ailleurs leur application est très compliquée.	Dimensionnement à chaud Niveau de vérification 2	
		↑ C8/10 à C100/115	oui, sinon réduction de la section	↑		Dimensionnement à chaud Niveau de vérification 3	Simulation numérique (méthode des éléments finis)

10. Références bibliographiques et normes

- [1] Norme SIA 262:2013 SN 505 262 Construction en béton, 1^e édition. Version 2013.
- [2] Norme SN EN 1992-1-2:2004 SIA 262.002 (2004-12) Eurocode 2: Calcul des structures en béton – Partie 1-2: Règles générales – Calcul du comportement au feu.
- [3] DIN EN 1992-1-2/NA:2010-12 Annexe nationale – Paramètres définis au niveau national (Nationally Determined Parameters NDP)
- [4] Norme SN EN 206-1:2000 SIA 162.051(2000-12), Béton – Partie 1: Spécification, performances, production et conformité.
- [5] Norme SN EN 206-1:2000/A1 SIA 162.051(2005-02), Béton – Partie 1: Spécification, performances, production et conformité.
- [6] Norme SN EN 206-9 SIA 262.059, Béton – Partie 9: Règles complémentaires pour le béton autoplaçant, version 2010.
- [7] Norme SN EN 1363-1:2012 SIA 183.101: Essais de résistance au feu – Partie 1: Exigences générales, version 2012.
- [8] Norme SN EN 1365-4:1999 Norme SIA 183.124: Essais de résistance au feu des éléments porteurs – Partie 4: Poteaux. Valable à partir du 1.3.2000.
- [9] Merkblatt Nr. 7 über Brandschutzanforderungen von Betonfertigteilen (11/2012), Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilebau e.V.
- [10] Courrier de la Commission de normalisation SIA 262 Construction en béton, Zurich, du 18.9.2013 à Alphabeton AG, Büron, concernant le béton à résistance normale /à haute résistance, le béton autoplaçant, vérification de l'absence d'éclatement, etc.
- [11] Manuel Eurocode – Cahier spécial: Calcul du comportement au feu des structures en béton. Deutsches Institut für Normung, 1^e édition 2012.
- [12] Brandschutz in Europa – Bemessung nach Eurocodes. DIN Deutsches Institut für Normung, 2^e édition 2012 entièrement remaniée et enrichie.
- [13] Betonkalender 2013, XI Normen und Regelwerk, Frank Fingerloos, Berlin.
- [14] Statistische Auswertung der Betondruckfestigkeit, Nguyen Viet Tue, Johannes Schwarz, Gunter Schenck, Lancer N° 10, 2005, pages 341 et suiv.
- [15] Einflussfaktoren auf den Brandwiderstand von Betonkonstruktionen, Versuchsstollen Hagerbach AG, Forschungsauftrag (FGU 2003-004) sur demande du groupe spécialisé dans les travaux souterrains.
- [16] Ein Beitrag zur Bemessung von Stahlbetonstützen im Brandfall, août 2011, mémoire de Marion Gelien, Bergische Universität, Wuppertal.
- [17] Norme SIA 261:2003; SN 505 261(2003-01), Actions sur les structures porteuses.
- [18] Norme SIA 261/1:2003 SN 505 261/1 (2003-01), Actions sur les structures porteuses – Spécifications complémentaires.
- [19] Inscription dans le registre AEAI (Association des établissements cantonaux d'assurance incendie), registre protection incendie n° 23267.
- [20] Inscription dans le registre AEAI (Association des établissements cantonaux d'assurance incendie), registre protection incendie n° 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)». Confidentiel – visé par l'AEAI.
- [22] Rapport «Sichere Stützen im Brandfall», cahier: Der Bauingenieur, n° avril/13.
- [23] Versuche zum Abplatzverhalten und zur Heissfestigkeit von Beton (Prof. Dr. M. Fontana, E. Klingsch), rapport concernant les essais 14.2.2012.
- [24] Explosive spalling of concrete. Test report. Institute of Structural Engineering, ETH Zurich. (E. Klingsch, A. Frangi, M. Fontana), juin 2003.
- [25] MFPA Leipzig GmbH, Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH, Leipzig.
- [26] Alphabeton, Nachweis des Feuerwiderstandes von Stahlbetonstützen (Alphabeton, vérification de la résistance au feu des colonnes en béton armé), Christoph Ruch, Hans-Peter Felder.

Remarques concernant le présent document

La documentation fait l'objet de modifications constantes en raison de la mise à jour des normes et du développement permanent de notre gamme de produits. La dernière version en vigueur de cette documentation papier se trouve sur notre site Internet.

2.2016 Copyright © by
F.J. Aschwanden AGCH-3250 LyssSwitzerland
Téléphone 032 387 95 95Fax 032 387 95 99
E-mail info@aschwanden.com
www.aschwanden.com

Certifié: ISO 9001, OHSAS 18001, EN 1090

Aschwanden