

Comportement des structures en béton soumises au feu

schweizerischer
ingenieur- und
architektenverein

société suisse
des ingénieurs et
des architectes

società svizzera
degli ingegneri e
degli architetti

swiss society
of engineers and
architects

selnaustrasse 16
postfach
ch-8027 zürich
www.sia.ch

TABLE DE MATIÈRES

	Page
Avant-Propos	4
1 Introduction	5
2 Actions thermiques.....	6
3 Concept de vérification.....	7
3.1 Vérification selon la norme	7
3.2 Certification d'éléments de construction	8
4 Ecaillage du béton.....	9
5 Eléments de construction.....	11
5.1 Généralités	11
5.2 Colonnes	11
5.3 Poutres	12
5.4 Dalles	12
5.5 Particularités d'éléments spécifiques.....	13
6 Etapes futures	14
7 Publications	15

AVANT - PROPOS

Au cours du processus de la révision partielle de la SIA 262 Construction en béton, édition 2003, il s'est avéré nécessaire de compléter la norme relativement à la sécurité incendie. Comme cela dépassait le cadre de cette révision partielle, la Commission de la Norme (CN) SIA 262 a mis sur pied, début 2013, un groupe de travail (GT) «Incendie», dont l'objectif principal est d'élaborer des compléments à la situation d'incendie qui serviront de base à la prochaine révision de la norme SIA 262:2013. Dans le cadre des discussions susmentionnées, elle a chargé ce groupe de travail de résumer dans un article l'état actuel des connaissances et de présenter les principaux objectifs et les démarches à entreprendre. Cet article a été discuté lors de plusieurs séances du GT et la CN SIA 262. La publication de la version allemande a enfin été approuvée le 11 avril 2014. La traduction en français a ensuite été effectuée par Eric Tonicello, Ingénieur civil HES/SIA. L'article intégral peut désormais être consulté à l'adresse www.sia.ch/correctifs > SIA 262, et sera actualisé si nécessaire.

Les questions relatives à ce document sont à adresser au Président du GT « Incendie », Dr. Walter Borgogno.

Dr. Walter Borgogno, Dr. Hans Rudolf Ganz, Prof. Dr. Mario Fontana, Eric Tonicello

1 INTRODUCTION

L'expérience nous a montré que le béton offre une bonne protection contre l'action de températures élevées propres à un incendie, grâce à sa faible conductivité thermique et son importante capacité calorifique. Contrairement au béton d'usage courant, les bétons à haute résistance ou ultra haute résistance peuvent présenter un comportement moins favorable à des températures élevées [5]. Le développement et la compréhension, à température ambiante, de ces bétons à haute performance ont progressé rapidement ces dernières années, cependant leur comportement à des températures élevées n'est pas encore complètement compris. Cette problématique est prise en compte au chiffre 4.3.10.5.2 de la SIA 262:2013. Pour le traitement de ce sujet, un groupe de travail a été formé au début de 2013 au sein de la Commission de la norme SIA 262, dont la tâche principale est la révision du chapitre Incendie, et le lancement de programmes de recherche nécessaires. En parallèle, de nouveaux groupes de travail ont également été formés au niveau européen, avec des objectifs analogues.

Le comportement du béton lors de températures élevées est essentiellement influencé par deux phénomènes:

- Modification du comportement mécanique du matériau (résistance, élasticité, fluage, ...).
- Faible perméabilité susceptible d'induire un risque d'écaillage élevé de la surface du béton (en particulier, mais pas uniquement, pour les bétons denses).

Actuellement, le premier de ces deux phénomènes est bien documenté et peut être représenté à l'aide de modèles approchés [7, 9, 14]. Quant au second, il n'est pas complètement compris, et il n'existe aucun modèle fiable permettant de le représenter [23].

Cet article présente l'état de l'art au sujet du comportement des structures en béton exposées au feu, en termes généraux, de manière à combler les lacunes de la norme. De plus, il présente quelles méthodes de vérification s'appliquant à la résistance au feu d'une structure qui, selon les connaissances actuelles, sont suffisamment fiables.

2 ACTIONS THERMIQUES

La température des éléments est en règle générale déterminée à l'aide de courbes nominales températures-temps. Alors que pour les bâtiments la classification de résistance au feu est réalisée en appliquant la courbe de feu normalisée conformément à la norme ISO 834, dans le cas des tunnels on utilise la courbe d'hydrocarbures ou d'autres courbes température-temps spécifiques à un projet (courbe RWS ou courbe d'hydrocarbures majorée, selon fig. 1), voir aussi [6].

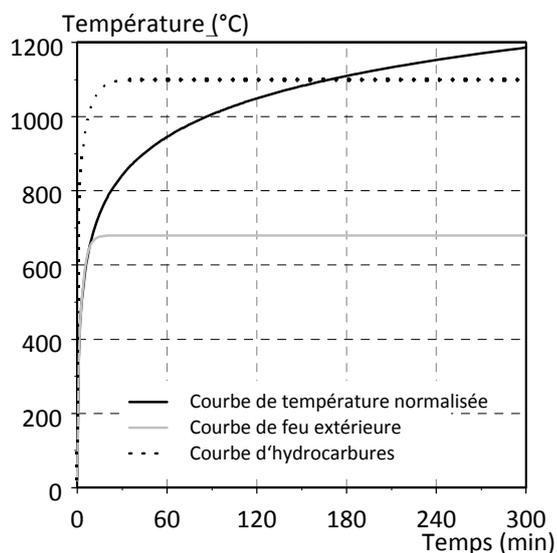


Figure 1 Courbes d'échauffement pour la normalisation de la résistance au feu [6]

La courbe de feu normalisée (ou standard), selon la norme ISO 834, est incontournable en Europe pour la standardisation des éléments de construction pour les bâtiments. La courbe température-temps est significative, parce qu'en fonction de vitesses d'échauffement différentes (selon la courbe de feu choisie) et des propriétés du béton, l'accumulation de pression de vapeur à l'intérieur du béton évolue plus ou moins rapidement, entraînant – ou pas – l'apparition d'écaillage [5, 10, 17].

3 CONCEPTS DE VERIFICATION

3.1 Vérification selon les normes

Les normes SIA 260, SIA 261 et SIA 262 [1, 2, 3] proposent plusieurs concepts permettant de vérifier la résistance en cas d'incendie. Aujourd'hui, les procédures de vérification reconnues en Suisse s'appliquent indépendamment des classes de résistance du béton utilisées.

Les prérequis pour l'application des concepts énumérées ci-dessous sont la prévention efficace et éprouvée de l'écaillage de l'enrobage, de la perte d'adhérence de l'armature, et du flambage de l'armature comprimée.

3.1.1 Vérification par les tables de dimensionnement

Pour divers éléments de construction, principalement soumis à des moments de flexion ou à l'effort normal, les dimensions minimales et l'enrobage minimal des armatures sont spécifiés pour chaque classe de résistance. Les données contenues dans les tableaux reposent sur l'expérience et sur les bonnes propriétés d'isolation du béton.

3.1.2 Vérification par les modèles d'ingénierie

On peut calculer la résistance R_d en tenant compte de la réduction des propriétés mécaniques des matériaux à haute température. Pour ce faire, on détermine la répartition de la température dans la section transversale. La prise en considération de l'écaillage localisé est autorisée s'il n'affecte pas l'intégrité de la structure, et est pris en compte dans un modèle éprouvé.

Il faut considérer les effets des actions réduites en cas d'incendie (selon SIA 260, chiffre 4.4.3.5) et prendre en compte, en fonction du type de structure et du modèle d'analyse, les contraintes résiduelles. La vérification se fait alors sous la forme $E_d \leq R_d$.

3.1.3 Vérification au moyen de simulations

Il est également possible de simuler le comportement sur la durée de tous les éléments ou structures en fonction des sollicitations et de l'action de l'incendie. Cela nécessite des modèles par éléments finis (EF) sophistiqués et des connaissances spécialisées approfondies. Les lois des matériaux intégrées aux modèles par EF doivent par ailleurs refléter le comportement du béton (et de l'acier d'armature). Des essais sont généralement nécessaires pour étalonner les lois des matériaux. Les incertitudes inhérentes aux modèles doivent être prises en compte, sans oublier d'adapter le concept de sécurité (facteurs de sécurité partiels ou globaux) au problème.

3.1.4 Vérification sur la base d'essais

Les normes SIA 260, 261 et 262 [1, 2, 3] autorisent également une vérification sur la base d'essais (ou de tests). Ceux-ci sont généralement réalisés sous feu normalisé (ISO-834) selon des spécifications d'essai [22] par des instituts de contrôle reconnus. Un essai en condition d'incendie n'est valable, et ne s'applique explicitement, que pour l'élément qui a été testé (selon le principe: «monté tel que testé»).

3.1.5 Vérification selon les Eurocodes

En Suisse, les vérifications en situation d'incendie peuvent également être effectuées selon les Eurocodes. S'agissant de la vérification par les modèles d'ingénierie, il existe des modèles simplifiés pour les différents éléments de construction. La vérification selon SN EN 1991-1-2 [7] sera détaillée au chapitre 4 de ce document.

Avec la publication par la SIA de la SN EN 1992-1-2/NA [8] en mai 2014, dans laquelle on ajoute les paramètres d'application nationaux à la SN EN 1991-1-2, cette norme et ses paramètres nationaux peuvent également être utilisée en Suisse (avant cela, les paramètres devaient être fixées dans la convention d'utilisation au cas par cas).

3.2 Certification des éléments de construction

Si les essais réalisés en situation d'incendie selon chiffre 3.1.4 sont concluants, une attestation d'utilisation AEAI peut être demandée pour l'élément de construction testé. En cas d'obtention, celle-ci autorise l'utilisation du produit pour le domaine d'application direct («monté tel que testé»), conformément aux dispositions suisses en matière de protection incendie, selon les points suivants :

- La version de l'élément testé.
- L'application directe : défini dans la norme d'essai et consigné par le laboratoire dans le rapport d'essai. Il décrit les modifications possibles de l'élément, qui sont autorisés sans preuve supplémentaire.
- L'application étendue : dans le cas où elle est explicitement mentionnée dans l'attestation de l'AEAII. Celle-ci valide des modifications de conception et des paramètres d'application, après expertise par un organe de contrôle reconnu.

Dans la pratique, cela signifie que pour reconnaître des éléments issus, par exemple, d'une usine de béton préfabriqué, chaque élément individuel avec reconnaissance AEAI doit avoir au moins une appréciation du champ d'application directe - qui a été testé dans les mêmes conditions de sollicitation, avec des valeurs similaires ou plus grandes de longueur/portée et de section transversale identique. Cela représente, pour une gamme de produits étendue, une grande quantité d'essais.

La situation est différente dans le cas d'une reconnaissance AEAI pour l'application étendue du produit (hors du cadre des conditions d'essai) : celle-ci valide des modifications de conception et des paramètres d'application, après expertise par un organe de contrôle reconnu. On peut ainsi par exemple demander une reconnaissance d'un produit en fournissant moins de résultats de tests, étant donné que les valeurs intermédiaires peuvent être interpolées. Dans ce cas, on utilise des lois (modèles) qui ont été suffisamment vérifiées par les résultats de tests. Une reconnaissance AEAI peut être appliqué à la fois pour la structure ainsi que des éléments non structurels.

4 ECAILLAGE DU BÉTON

Le maintien de l'intégrité de la structure porteuse est la condition préalable pour l'utilisation des concepts de vérification énumérés précédemment. Lorsque l'écaillage du béton intervient, ce n'est généralement – partiellement ou en totalité – plus le cas. Il existe différents types d'écaillage : celui des agrégats, l'écaillage explosif, l'écaillage de surface, l'éclatement des arêtes, ou celui qui apparaît au cours du refroidissement, etc. L'écaillage explosif et de surface sont les principaux responsables de la perte d'intégrité de la structure [18].

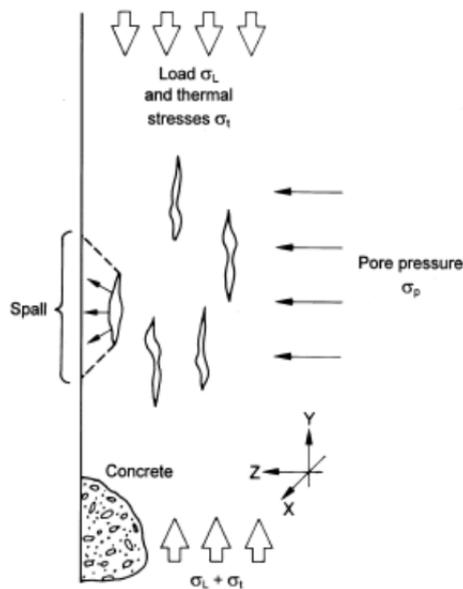


Figure 2 Contraintes dans les éléments en béton échauffés, selon [14, 25]

L'écaillage est influencé par plusieurs propriétés, comme la répartition des températures (sur la valeur maximale et son évolution dans le temps), le degré de chargement, l'état de contrainte, la composition du béton, le type d'agrégats, les propriétés du béton (résistance, perméabilité, porosité, teneur en humidité, etc.), taux et principe d'armature, etc. [16, 17]. Parmi tous ces paramètres, les causes principales de l'écaillage sont : la pression de la vapeur issue de l'humidité du béton suite à l'augmentation des températures, les contraintes thermiques résiduelles et l'état de contrainte dû aux charges (Figure 2).

Alors que le SIA 262 exige généralement des mesures pour éviter l'écaillage du béton, la SN EN 1992-1-2 [7] distingue les bétons de classe de résistance jusqu'à C 50/60 et ceux à haute résistance à partir de la classe C 55/67. Pour le béton jusqu'à C50/60 aucune vérification n'est nécessaire. Pour les bétons à haute résistance, des mesures sont proposées pour éviter l'écaillage :

- A. Treillis d'armature supplémentaire,
- B. Béton qui a été testé et n'a montré aucun écaillage (essais, expérience),
- C. Enrobage supplémentaire de protection contre les incendies
- D. Mélange de béton ayant plus de 2 kg/m^3 de fibres PP.

Il a été démontré que ces mesures, prises seules et indépendamment d'autres propriétés / conditions aux limites sont insuffisamment différenciées et ne peuvent exclure l'apparition d'écaillage [21]. Les mesures suivantes ont finalement montré une influence favorable contre l'écaillage :

- Une bonne conception constructive de l'armature, avec des étriers rapprochés et bien ancrés.
- Un treillis d'armature supplémentaire bien ancré.
- L'ajout de fibres PP [14, 24]. La teneur minimale en fibres, le point de fusion des fibres, leur longueur et diamètre sont des paramètres importants.

- Le type d'agrégats et l'état de contrainte influencent également l'écaillage. Par exemple, les agrégats contenant du quartz sont moins favorables que les agrégats calcaires ou basaltiques [18].

Il n'est aujourd'hui pas encore possible de donner des règles quantitatives précises, propres à éviter totalement l'écaillage.

Si la norme SIA 262 est appliquée, il faut prendre des mesures contre l'écaillage dans tous les cas. Si on utilise la SN 1992-1-2 (à condition que cela soit spécifié dans la convention d'utilisation), l'utilisation d'un béton jusqu'à la classe de résistance C50/60 est possible, sans mesures contre l'écaillage (l'application du tableau 16 de la SIA 262 n'est pas possible).

Le groupe de travail « incendie » recommande, sur la base des connaissances actuelles dans les bétons denses (à faible rapport eau/ciment par exemple, béton avec microsilice) d'examiner le comportement à l'écaillage au moyen d'essais réalisés avec de la courbe de feu normalisée, selon la norme ISO 834. Cela est également valable pour les bétons jusqu'à la classe de résistance C 50/60, en cas de doute sur le comportement face à l'écaillage. Au-delà, pour les bétons à haute résistance selon SN EN 1992-1-2 (dès C 55/67), seules les méthodes B et C peuvent être utilisées toute sécurité. Pour les méthodes A et D, on a le choix entre réaliser des essais ou effectuer la vérification détaillée. Le traitement du durcissement à long terme du béton n'est actuellement pas réglementé dans les normes en vigueur.

5 ELEMENTS DE CONSTRUCTION

5.1 Généralités

Les éléments de construction se différencient par leurs sollicitations (compression, flexion, cisaillement, traction) et conditions d'appuis, qui influencent le comportement global de la structure en cas d'incendie. La redondance de la structure est d'une grande importance. Les éléments de construction doivent être évalués sur la base de leur fonction et leur emplacement dans la structure globale (par exemple, colonnes, poutres, etc.). Cela sera discuté ci-après du point de vue conceptuel. Pour approfondir ces explications, une vaste bibliographie est disponible, en particulier les deux publications de la *fib* [18, 19].

5.2 Colonnes

Les colonnes présentent généralement peu ou pas de redondance dans la structure et sont sollicitées de façon défavorable en cas de contraintes uniaxiales couplées à une déformation radiale due à l'effet de Poisson. La redistribution des charges n'est possible que dans des cas exceptionnels.

Une ruine précoce d'une colonne (Fig. 3) peut avoir des conséquences catastrophiques. Cependant, en plus des mesures proposées au chapitre 4, une conception optimisée de l'armature et/ou une diminution des sollicitations dues aux charges sont recommandées.



Figure 3 Réduction de l'écaillage par le resserrement des étriers bien ancrés [13]

Si l'écaillage est empêché de façon éprouvée (Fig. 4), les méthodes de vérification au moyen de méthodes d'ingénierie ou par calcul aux éléments finis [7, 14] sont possibles. Les lois des matériaux doivent être basées sur des hypothèses solides et vérifiées. Comme alternative, les autorités peuvent reconnaître l'utilisation directe sur la base d'essais. Le champ d'application directe comprend, par exemple, une colonne avec la même section transversale, une charge équivalente ou plus faible et une longueur identique ou inférieure à celle de la colonne testée.



Figure 4 Essai au feu d'une colonne chargée, durant lequel aucun écaillage ne s'est produit après 150 minutes (BAM Berlin)

L'extension du champ d'application nécessite les connaissances des principes fondamentaux et la combinaison des modèles éprouvés. Des demandes pour l'extension du périmètre d'application sont en préparation chez plusieurs producteurs ou sont actuellement soumis à l'examen de l'AEAI.

Comme alternative à la certification, on peut avoir recours aux tables de dimensionnement. Les prérequis sont décrits au chapitre 4. En cas d'utilisation des tableaux de la SN EN 1992-1-2, il faut noter que pour la méthode de calcul A (méthode A, à ne pas confondre avec les méthodes A à D contre l'écaillage décrites ci-dessus) le taux d'armature est inférieur à 4%, la longueur des pièces en cas d'incendie est inférieure ou égale à 3,0 m et que les dimensions minimales et maximales sont limitées. La méthode A a été validée par de nombreux essais. Les valeurs des tableaux de la méthode de calcul B (Méthode B) et de l'Annexe C peuvent présenter des écarts importants par rapport à la méthode A [26]. C'est pourquoi, l'emploi de la méthode B n'est pas autorisé par la SN EN 1992-1-2/NA. Lors d'un dimensionnement en cas d'incendie selon SN 1992-1-2, il faut naturellement aussi vérifier le dimensionnement « à froid » selon SN EN 1992-1-1.

5.3 Poutres

Les poutres sont principalement sollicitées en flexion, et souvent de façon hyperstatique. En raison de la formation de fissures à la flexion, une réduction de la pression de vapeur, qui contribuerait sinon à l'écaillage, est possible. Un appui hyperstatique entraîne une augmentation de la redondance, en réduisant le risque d'un effondrement par le dépassement de la résistance en une seule section (Figure 5) à condition qu'une armature constructive qui assure un comportement ductile soit prévue. Une redistribution des charges devient ainsi possible.

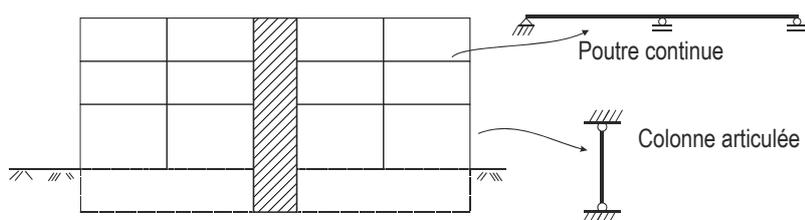


Figure 5 Les systèmes de poutres hyperstatiques entraînent une augmentation de la robustesse et de l'intégrité statique, ce qui se traduit par une sécurité améliorée contre un effondrement [18, 19, 20]

Pour des poutres préfabriquées, le stade définitif, qui diffère souvent du stade de montage, est décisif. Afin de créer une redondance du système hyperstatique, il faut concevoir des détails monolithiques.

5.4 Dalles

Les dalles en béton armé portent en général dans les deux directions, ce qui permet une redondance du système porteur. De plus, les déformations importantes en cas d'incendie engendrent une redistribution des efforts (par exemple par effet membranaire). A l'opposé, l'influence des contraintes résiduelles suite à l'augmentation de température est augmentée, en raison de la minceur de la section transversale (fort gradient de température, et donc des contraintes induites). Afin d'assurer un comportement ductile, une armature qui permet le développement de multiples fissures est nécessaire.

Les éléments de dalle préfabriqués sont généralement minces, avec un système porteur isostatique, et donc doivent donc être considérés comme des poutres. C'est pourquoi la problématique des éléments minces et élancés doit être traitée avec vigilance.

5.5 Particularités d'éléments spécifiques

5.5.1 Poinçonnement

Le cas d'incendie crée de nouveaux états de contraintes et une redistribution des sollicitations dans les dalles. Cela favorise une défaillance par poinçonnement - phénomène éminemment fragile - qui peut être entravée en disposant une armature de poinçonnement avec enrobage suffisant. Dans ce cas particulier, un écaillage localisé ne conduit pas nécessairement à la ruine.

Les actions thermiques produisent des déformations (rotations sur la colonne, dilatation de la colonne ou de la dalle), qui peuvent conduire à une redistribution des charges sur les colonnes. Pour tenir compte de ce phénomène, des projets de modèles existent, mais doivent être confirmés sur la base d'essais [11].

5.5.2 Tunnels

Les tunnels diffèrent à bien des égards de la construction de bâtiments et/ou des ponts. Dans le cas des incendies accidentels dans les tunnels, et lors des simulations, nous savons que de très hautes températures sont rapidement atteintes. Cela engendre un gradient de températures très élevé à travers la section transversale du tunnel. En raison des exigences de durabilité (notamment les émissions corrosives, sels de déverglaçage, etc.), les bétons denses qui sont utilisés peuvent favoriser le risque d'écaillage en cas d'incendie.

En raison des différentes typologies de sections de tunnel, composées d'éléments très disparates dans leur section transversale, le comportement au feu doit être considéré de façon différenciée : chargé - à vide, circulaire – rectangulaire, principalement membranaire – principalement fléchi, béton coulé en place – projeté – préfabriqué, coque extérieure – plafond suspendu, etc. Un élément critique de la section des tunnels est souvent le plafond suspendu. Afin d'améliorer le comportement au feu de manière fiable (généralement sur la base d'essais) des fibres de PP sont de plus en plus souvent mélangées au béton. Dans les endroits critiques on appliquera, comme alternative, des systèmes de protection contre l'incendie (plaques, enduits projetés, etc.). Dans tous les cas, les exigences et les concepts de solutions correspondants doivent être prescrits spécifiquement pour chaque projet de tunnel.

5.5.3 Constructions existantes

La vérification statique des constructions existantes peut être effectuée avec les modèles ou tableaux disponibles ainsi qu'avec les normes de la série SIA 269 *Maintenance des structures porteuses* [25]. Les bâtiments qui présentent une résistance à l'incendie insuffisante peuvent être ainsi mis en conformité par :

- protection du béton afin que l'armature ne dépasse pas 500 °C et le béton 200 °C (écaillage),
- refroidissement de l'environnement ou des éléments au moyen d'une installation sprinkler.

5.5.4 Béton précontraint

La température critique des aciers de précontrainte formés à froid est inférieure à celle de l'armature passive. En conséquence, l'enrobage de l'armature de précontrainte ou l'entraxe requis par les normes est augmenté pour les éléments en béton précontraint, par rapport aux éléments non précontraints. La conformité des éléments, basée uniquement sur des règles purement géométriques doit être remise en question (par exemple pour la pré-tension), en particulier pour les éléments minces et les bétons avec un durcissement rapide. Des facteurs tels que le comportement à l'écaillage, les contraintes résiduelles, la dégradation de la longueur d'ancrage et la réduction de la force de précontrainte peuvent influencer le comportement au feu de façon cruciale.

6 ETAPES FUTURES

Pour une compréhension globale du comportement des structures en béton à des températures élevées, de nombreuses questions restent ouvertes. Actuellement, l'examen de l'écaillage du béton ne peut être fait avec certitude que sur la base d'essais. En fonction du type d'élément de structure, des essais à grande échelle sont nécessaires.

La standardisation du comportement à l'écaillage des éléments de structure pouvant être vérifiée sur une plus petite échelle est un des buts du GT « incendie ».

A cet effet, un programme doit être lancé afin de vérifier l'écaillage de certains éléments en béton sur la base de campagne d'essais restreinte ou d'essais de plus petite taille. Ceux-ci sont en effet plus économiques, nécessitent moins de matériaux et de temps que les essais à grande échelle.

L'objectif à long terme du GT « incendie » est qu'il soit possible de déterminer quantitativement les propriétés du béton afin de s'assurer que l'écaillage en cas d'incendie ne se produise pas. Les procédures à suivre pour que ces propriétés puissent être déterminées, sur le béton ou des éléments, sont à développer.

Les partenaires envisagés pour ce projet de recherche sont l'ETHZ, l'EPFL, l'EMPA, l'AEAI, les hautes écoles spécialisées (HES), ainsi que divers partenaires industriels. Des discussions préliminaires ayant déjà eu lieu, une définition spécifique de projets devrait se concrétiser prochainement, en y intégrant les travaux actuellement menés à l'étranger, afin d'éviter la répétition, entre autres, d'essais qui ont déjà été réalisés.

7 PUBLICATIONS

- [1] SIA 260 (2013). *Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses*; Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- [2] SIA 261 (2003). *Action sur les structures porteuses*; Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- [3] SIA 262 (2013). *Construction en béton*; Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- [4] SIA 269 (2011). *Bases pour la maintenance des structures porteuses*; Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- [5] Kordina, Meyer-Ottens; *Beton Brandschutz-Handbuch*; 1999; Verlag Bau und Technik GmbH, Düsseldorf.
- [6] SN EN 1991-1-2 (2002). *Eurocode 1: Actions sur les structures - Partie 1-2: Actions générales - Actions sur les structures exposées au feu*; Schweizer Ingenieur- und Architektenverein.
- [7] SN EN 1992-1-2 (2004). *Eurocode 2: Calcul des structures en béton - Partie 1-2: Règles générales - Calcul du comportement au feu.* ; Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- [8] SN EN 1992-1-2/NA (2014). *Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design – National annex NA to SN EN 1992-1-2:2004*; Schweizer Ingenieur- und Architektenverein.
- [9] Background Document to EN 1992-1-2 (2003). *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules – Structural fire design*. 05.07.2004, CEN European Committee for Standardization.
- [10] Klingsch, E., Frangi, A., Fontana, M.; *Explosive Spalling of Concrete – Test Report*; 17.06.2013; Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich.
- [11] Bamonte, P., Fernández Ruiz, M., Muttoni, A.: *Punching Shear Strength of R/C Slabs Subjected to Fire*. 7th International Conference on Structures in Fire, Zurich, Switzerland, June 6-8, 2012
- [12] Bundesamt für Strassen: *Einflussfaktoren auf den Brandwiderstand von Beton*. V 500 0245, Versuchsstollen Hagerbach AG, Flums, 16.02.2009
- [13] Kodur, V.K.R., Phan, L.: *Critical factors governing the fire performance of high strength concrete systems*. Fire Safety Journal 42 (2007), p. 482 – 488.
- [14] Huismann, S.: *Materialverhalten von hochfestem Beton unter thermomechanischer Beanspruchung*. Dissertation, Technische Universität Wien, 2010, Berlin
- [15] Hertz, K.: *Limits of spalling of fire-exposed concrete*. Fire Safety Journal 38 (2003), p. 103 - 116.
- [16] Raut, N., Kodur, V.: *Response of High-Strength Concrete Columns under Design Fire Exposure*. Journal of Structural Engineering, ASCE, January 2011, p. 69 - 79.
- [17] Dwaikat, M., Kodur, V.: *Hydrothermal model for predicting fire-induced spalling in concrete*. Fire Safety Journal 44 (2009), p. 425 – 434.
- [18] fib Bulletin 38: *Fire design of concrete structures - materials, structures and modelling*. State-of-art report, Lausanne, April 2007.
- [19] fib Bulletin 46: *Fire design of concrete structures - structural behaviour and assessment*. State-of-art report, Lausanne, July 2008.
- [20] Knoll, F., Vogel, T.: *Design for Robustness*. Structural Engineering Documents 11, IABSE, Zürich, 2011.
- [21] CEN TC 250 / SC 2 / WG 1 / TG 5: *Draft report of 1st meeting*. 24.05.2013, Paris. N98
- [22] SN EN 1365-1 bis -4: *Feuerwiderstandsprüfungen für tragende Bauteile – Wände / Decken und Dächer / Balken / Stützen*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- [23] Pimienta, P., Meftah, F.: *Concrete Spalling due to Fire Exposure – Proceedings of the 3rd International Workshop*. Paris, 2013.
- [24] Pistol, K., Weise, F. Meng, B.: *Polypropylen-Fasern im Hochleistungsбетон – Wirkungsmechanismen im Brandfall*. Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012), Heft 7.
- [25] Khoury, G.A., Anderberg, Y.: *Concrete Spalling Review*. Swedish National Road Administration, 2000.
- [26] Hosser, D.: *Brandschutz in Europa – Bemessung nach Eurocodes; Erläuterungen und Anwendungen zu den Brandschutzteilen der Eurocodes 1 bis 5*. 2. und vollständig überarbeitete Auflage 2012, Beuth Verlag.