



CIVIL ENGINEERING

CONCRETE STRUCTURES AND STRUCTURAL DESIGN

DEPARTMENT OF EXPERIMENTAL CONCRETE CONSTRUCTION

Jun. Prof. Dr. – Ing. Catherina Thiele

Paul-Ehrlich-Straße

Gebäude 14, Zimmer 517

67663 Kaiserslautern

Phone (0631) 205 – 3833

Fax (0631) 205 – 3555

e-mail: catherina.thiele@bauing.uni-kl.de

Projekt: Verbunddübel im Brandfall

Kontakt: M.Sc. Mayur Patil
Dipl. Ing. Marie Reichert
www.massivbau-kl.de

Datum: 02/05/2017

Handwritten signature of C. Thiele in blue ink.

Jun.-Prof. Dr.-Ing. Catherina Thiele

Handwritten signature of M. Reichert in blue ink.

Dipl.-Ing. Marie Reichert

Handwritten signature of Mayur Patil in blue ink.

Mayur Patil, M. Sc.

Table de matières

1. Résumé	3
1.1. Analyse thermique.....	3
1.2. Test de résistance au feu selon la norme EAD 330087-00-0601	3
1.3. Calcul de la résistance au feu des chevilles chimiques	4
1.4. Proposition d'une méthode d'essai et d'évaluation	4
1.4.1. Modèle simplifié	4
1.4.2. Evaluations expérimentales et calculatoires de la résistance au feu	5
2. Littérature	10

1. Résumé

Le projet de recherche „Verbunddübel im Brandfall“ soutenu et financé par le Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) a été mené par l'université technique de Kaiserslautern de janvier 2015 à décembre 2016. En plus du DIBt, les entreprises Chemofast Anchoring GmbH, Fischerwerke GmbH & Co. KG et Hilti AG ont appuyé le projet en conseils et financement.

Le projet de recherche traite de l'évaluation de la résistance au feu des chevilles chimiques et étudie leur capacité de charge lorsqu'elles sont exposées au feu. Un résumé du travail de recherche ainsi que ses résultats sont donnés ci-dessous.

1.1. Analyse thermique

Les simulations thermiques numériques offrent la possibilité de déterminer l'évolution de la température en fonction de la profondeur d'ancrage des chevilles dans le scénario d'un incendie. Les résultats théoriques fournis par les simulations réalisées dans le cadre de ce projet et ceux provenant d'autres instituts sont en accord avec les températures directement mesurées lors des tests. Il est donc possible de simuler un profil de température avec une bonne précision. L'étude des paramètres a fourni les résultats suivant :

- La comparaison des résultats de température à l'interface acier/béton a montré que plus le diamètre de la cheville est grand, plus les températures sont élevées, et plus la profondeur d'ancrage est grande, plus les températures sont faibles.
- La présence de mortier accroît la température à la surface de l'acier lorsque les propriétés d'isolation du mortier sont supérieures à celles du béton.
- L'influence de l'humidité sur la distribution de température est négligeable pour un taux d'humidité inférieur à 3 %. L'évaporation et le transport d'eau subséquent ne peuvent être simulés pour le moment.
- Le type de pièces de fixation a une influence significative sur la distribution de température et doit être modélisé pour chacun des cas.
- Les résultats des simulations de températures ont été vérifiés en les comparant à ceux obtenus à l'aide de deux autres différents programmes de simulation, ainsi qu'en les comparant aux mesures de températures directement réalisées lors des tests de résistance au feu.

1.2. Test de résistance au feu selon la norme EAD 330087-00-0601

Les tests de résistance au feu selon la norme EAD 330087-00-0601 permettent de déterminer les propriétés du mortier à hautes températures. La relation entre la contrainte de liaison et la température mise en évidence lors de ces tests peut être utilisée comme base de calcul pour la résistance au feu des chevilles chimiques soumises à des charges dans le cas d'un incendie.

L'étude des paramètres a montré les résultats suivant :

- Le diamètre de la cheville peut avoir une influence sur la relation entre la contrainte de liaison et la température selon le type de mortier utilisé.
- L'humidité résiduelle du béton n'a pas d'effet sur les résultats (tests de comparaison entre du béton et de l'acier)
- Le type de cheville utilisé (tige filetée ou barre d'armature) a une influence sur la relation entre la contrainte de liaison et la température, particulièrement visible pour les fortes contraintes de liaison (températures de rupture proches de la température ambiante).

1.3. Calcul de la résistance au feu des chevilles chimiques

Sur la base des résultats fournis par les simulations numériques et les tests de résistance au feu selon la norme EAD 330087-00-0601, la résistance au feu peut être calculée pour toutes les combinaisons de diamètre et de profondeur d'ancrage des chevilles. La comparaison de ces calculs avec les résultats de tests réels montre que la méthode calculatoire fournit des résultats en accord avec ces tests.

- La relation entre la contrainte de liaison et la température déterminée par les « fire tests » selon la norme EAD 330087-00-0601 ne fournit pas de résultats à hautes températures ; on ne peut donc pas associer de contrainte de liaison sur la totalité de la profondeur d'ancrage.
- La distribution réelle de la contrainte de liaison sur la profondeur d'ancrage n'est pas connue.

1.4. Proposition d'une méthode d'essai et d'évaluation

La procédure décrite ci-après concerne uniquement les systèmes de chevilles chimiques composés d'une tige filetée ou d'une barre d'armature et d'un mortier d'ancrage.

Les connaissances acquises dans le cadre de ce projet de recherche, basées sur une combinaison d'essais et de calculs permettent de proposer une méthode pour la détermination de la résistance au feu des chevilles chimiques.

1.4.1. Modèle simplifié

La résistance au feu pour les chevilles chimiques sous contrainte axiale peut être déterminée à l'aide d'un modèle simplifié selon le chapitre 2.2 du document TR020. Cette approche n'est en revanche valide que pour les cas de rupture acier et de rupture par cône de béton. La résistance caractéristique au feu pour l'acier au carbone peut être utilisée comme indiqué dans le tableau 1-1. La résistance au feu pour la rupture de liaison doit être déterminée expérimentalement.

Tableau 1-1: Valeurs de résistance au feu pour la rupture acier au carbone dans le cas du nouveau modèle

thread diameter [mm]	anchorage depth h_{ef} [mm]	characteristic tension strength of an unprotected anchor made of C-steel in case of fire exposure in the time up to:			
		$\sigma_{Rk,s,fi}$ [N/mm ²]			
		30 min (R15 to R30)	60 min (45 and R60)	90 min (R90)	120 min (R120)
M6	≥ 30	14	12	9	7
M8	≥ 30	20	15	11	9
M10	≥ 40	25	19	14	11
M12 and greater	≥ 50	30	23	16	13

La détermination de la résistance au feu sous contrainte de cisaillement peut également être menée à l'aide du chapitre 2.2.2 du document TR020.

1.4.2. Evaluations expérimentales et calculatoires de la résistance au feu

a. Résistance au feu pour la rupture acier

La résistance au feu pour la rupture acier peut être déterminée d'après le chapitre 2.3.1.1 du document TR020.

b. Résistance au feu pour la rupture par cône de béton

La résistance au feu pour la rupture par cône de béton peut être déterminée par un modèle simplifié d'après le chapitre 2.2.1.3 du TR020.

c. Résistance au feu pour la rupture de liaison, pour des profondeurs d'ancrage constantes

La détermination expérimentale de la résistance au feu d'après le chapitre 2.3 du document TR020 est également possible. Ainsi l'installation expérimentale décrite dans le chapitre 2.3.1.1 doit être utilisée, car l'utilisation de l'installation décrite dans l'illustration 2.5 du chapitre 2.3.1.2 du document TR020 conduit à des températures plus faibles le long de la profondeur d'ancrage. Ces tests doivent être réalisés dans du béton fissuré.

d. Résistance au feu pour la rupture de liaison, pour des profondeurs d'ancrage variables

Pour l'évaluation de la résistance au feu pour la rupture de liaison dans le cas de chevilles chimiques sous contrainte axiale, une combinaison de simulations thermiques et d'essais feu doit être faite.

Le programme d'essais ci-dessous doit être réalisé pour un système de chevilles chimiques avec des profondeurs d'ancrage variables.

Tableau 1-2: Programme d'essais

	But des tests	Largeur de fissure	Nombre minimal de tests par taille de cheville					description du test
			s	i	m	i	l	
	[-]	[mm]						[-]
1	Tests pour la confirmations des résultats de température de la simulation	-	-	-	3	-	-	Chevilles non chargées avec thermocouples
2	Tests pour la confirmation de la realtion entre la contrainte de liaison et la température pour les tiges filetées	-	-	-	5	-	-	"fire test" selon EAD 330087-00-0601 avec tiges filetée
3	Optionnel : Tests pour augmenter le domaine de température, $\tau < 0,5 \text{ N/mm}^2$	-	-	-	1	-	-	"fire test" selon EAD 330087-00-0601 avec tiges filetée
4	Optionnel : Tests pour augmenter la limite de contrainte de la partie supérieure de la liaison, $\tau > 10 \text{ N/mm}^2$	-	-	-	1	-	-	"fire test" selon EAD 330087-00-0601 avec tiges filetée
5	Essais feu pour la confirmation des résultats obtenus par calcul	-	3	2	5	2	3	Essai feu selon TR020 paragraphe 2.3.1.1
6	Essais feu dans du béton fissuré	0,3	3	-	5	-	-	Essai feu selon TR020 paragraphe 2.3.1.1 + fissure

Remarques concernant la ligne 1 du tableau 1-2:

Pour la vérification des résultats des tests, les profils de températures définis par les simulations thermiques peuvent être utilisés. La pièce de fixation utilisée lors des tests doit être prise en compte pour les simulations. Généralement, la simulation du mortier peut être omise si les tests de la ligne 1 confirment les résultats des simulations, c'est-à-dire qu'il peut être considéré que les propriétés isolantes du mortier sont si grandes qu'elles n'ont aucun impact sur le profil de température le long de la cheville.

Les essais de la ligne 1 du tableau doivent confirmer les résultats des simulations. Trois chevilles avec un diamètre moyen et une profondeur d'ancrage minimale doivent être utilisées, ainsi que trois thermocouples TC1 (profondeur 10 mm), TC2 (profondeur $0,5 \cdot h_{ef}$) et TC3 (profondeur $h_{ef} - 10 \text{ mm}$). La cheville doit être installée selon les préconisations du fabricant. Les conditions ci-dessous doivent être vérifiées afin de pouvoir comparer les températures mesurées et simulées.

- Les températures le long de la profondeur d'ancrage ainsi que la distribution de température en fonction du temps doivent avoir un profil similaire.
- La relation ci-dessous décrivant entre les résultats des simulations et les résultats d'essais doit être vérifiée pour chaque valeur :

$$\frac{1}{1,5} < \frac{T_{sim}}{T_{test}} < 1,5$$

- La valeur moyenne des températures mesurées lors des essais au même endroit et à un même moment ($T_{test,m}$) doit être inférieure à celle fournie par méthode de simulation ($T_{sim,m}$) majorée de 10 % :

$$T_{test,m} < T_{sim,m} \cdot 1,1$$

- Des essais supplémentaires peuvent être conduits, mais cela n'est pas obligatoire.

Remarques concernant la ligne 2 du tableau 1-2:

Les essais décrits dans la ligne 2 du tableau servent à confirmer la transférabilité de la relation entre la contrainte de liaison et la température déterminée lors des « fire tests » selon la norme EAD 330087-00-0601 aux tiges filetées. Cinq essais avec une cheville du diamètre moyen doivent être réalisés selon le chapitre 2.2.3 « resistance to fire » de la norme EAD 330087-00-0601. Les tiges filetées doivent être utilisées à la place des barres d'armature qui sont utilisées dans la norme EAD. Les trous doivent être percés selon la méthode limitant la capacité de charge, et de même nettoyés selon la méthode limitante. Les charges pour chaque test doivent être choisies de manière à ce que les résultats puissent s'étendre sur toute la gamme de températures. La relation liant la contrainte de liaison et la température issue « fire tests » selon la norme EAD 330087-00-0601 peut être utilisée pour le calcul si les conditions ci-dessous sont vérifiées :

- Pour chaque résultat d'essai, l'écart avec la courbe contrainte de liaison/température ne doit pas dépasser 50 °C.
- La courbe de tendance déterminée à partir des cinq nouveaux essais ne doit pas dévier de la courbe de tendance déjà existante de plus de 20 degrés. Dans le cas contraire, la relation entre la contrainte de liaison et la température doit être déterminée à nouveau pour les tiges filetées. Quinze essais supplémentaires doivent ainsi être menés selon les spécifications de la norme EAD 330084-00-0601 afin de respecter les différences minimales pour la température et la force de liaison.

Pour étendre le domaine de validité de la relation liant la contrainte de liaison et la température au-delà des limites données par la norme EAD 330087-00-0601 (contrainte de liaison maximale 10 N/mm², minimale 0,5 N/mm²), d'autres tests peuvent être réalisés avec les valeurs suivantes :

- 10 N/mm² < T_{sust} ≤ T_{Rk,0} (ligne 4), et/ou
- 0,2 N/mm² < T_{sust} ≤ 0,5 N/mm² (ligne 3)

Remarques concernant la ligne 5 du tableau 1-2:

A l'aide de la relation contrainte de liaison/température (lignes 2 à 5) et des simulations de températures selon la profondeur d'ancrage, un calcul de la résistance au feu est possible pour toutes les combinaisons de diamètres de cheville et de profondeurs d'ancrage. Pour confirmer les résultats, des essais feu doivent être réalisés selon le chapitre 2.3.1.1 de TR020. Les points ci-dessous doivent être considérés pour les paramètres d'installation des essais:

- Deux tests par taille (diamètre) de cheville doivent être réalisés (pour choisir la charge, les résultats des calculs à 60 min et 90 min peuvent être utilisés).
- La plus petite profondeur d'ancrage doit être testée
- Pour une taille (diamètre) moyenne de cheville, au minimum cinq tests doivent être réalisés. La durée à la rupture pour quatre d'entre eux doit être supérieure à 60 minutes et l'un d'entre eux doit avoir une durée à la rupture de moins de 60 minutes.

Pour l'utilisation de différents types de chevilles (par exemple différents matériaux) et différents types de perçage, les points ci-dessous doivent être considérés :

- Pour l'utilisation de chevilles en acier inoxydable, les mêmes valeurs de résistance au feu que pour l'acier au carbone peuvent être utilisées sans réaliser de nouveaux tests.

- Les résultats des calculs ne peuvent pas être directement appliqués aux autres types de chevilles ou de perçage.

Remarques concernant la ligne 6 du tableau 1-2:

Les essais feu avec des chevilles dans du béton fissuré doivent être réalisées afin d'évaluer l'influence des fissures sur la tenue des chevilles. Au début de l'essai, la fissure doit être de 0,3 millimètre. La charge doit être choisie de manière similaire aux tests de la ligne 5 avec les plus petits diamètres et diamètre moyen de la cheville. Les charges des tests pour le diamètre de cheville moyen dans du béton fissuré et non fissuré doivent être représentées en fonction de la durée à la rupture, et une fonction puissance suivant l'équation ci-dessous doit être déterminée :

$$\sigma_{b1} = c_1 + \frac{c_2}{t}$$

Le quotient minimum des deux fonctions à $t = 30$ min et $t = 120$ min fournit le facteur de réduction γ_{cr} pour le béton fissuré (voir figure 9-1). Ce facteur de réduction est limité à une valeur entre 0 et 0,75.

Les résultats des essais obtenus pour le cas du diamètre de cheville moyen doivent au moins confirmer le facteur de réduction, c'est-à-dire que le quotient des résultats expérimentaux et des résultats de simulation doit être pour chaque essai supérieur à 1 (voir figure 9-1).

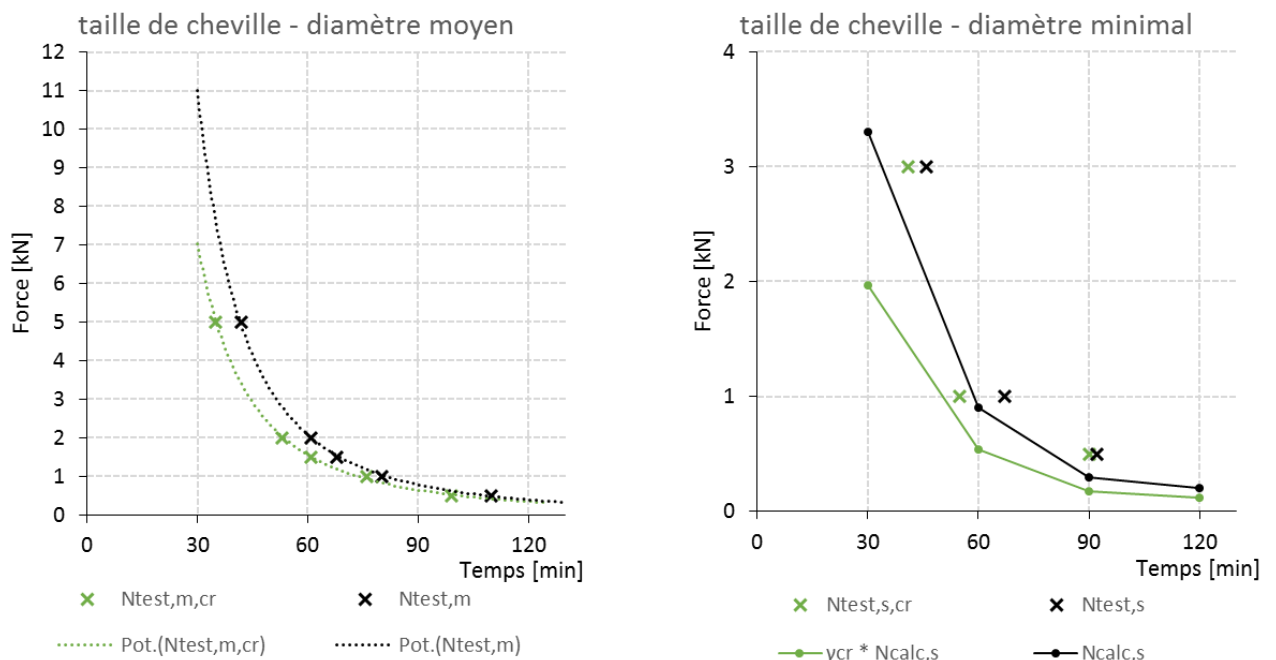


Figure 1-1: Exemple de calcul et de confirmation du facteur de réduction γ_{cr}

Les tableaux 9-3 et 9-4 montrent la démarche pour un exemple. Pour une cheville de diamètre moyen, les résultats d'essais dans du béton non fissuré et fissuré sont représentés dans le tableau 9-3 respectivement par $N_{test,m}$ et $N_{test,m,cr}$. Les lignes désignées par $N_{trend,m}$ et $N_{trend,m,cr}$ sont les résistances correspondantes à 30, 60, 90 et 120 minutes déterminées à l'aide d'une fonction puissance (Pot. Figure 9-1) adéquate.

$$\gamma_{cr} = \text{MIN} \left\{ \frac{N_{trend,m,cr,30}}{N_{trend,m,30}}; \frac{N_{trend,m,cr,60}}{N_{trend,m,60}}; \frac{N_{trend,m,cr,90}}{N_{trend,m,90}}; \frac{N_{trend,m,cr,120}}{N_{trend,m,120}} \right\}$$

Le tableau 9-4 contient les résultats des essais obtenus pour une cheville de diamètre minimal dans du béton non fissuré et fissuré, respectivement $N_{test,s}$ et $N_{test,s,cr}$. La ligne désignée par $N_{calc,s}$ contient les valeurs de résistance au feu pour le diamètre minimal de cheville calculées selon la méthode décrite dans ce rapport à 30, 60, 90 et 120 minutes. La mise en relation de ces résultats avec le facteur de réduction défini dans l'équation ci-dessus permet de calculer la résistance au feu dans le cas de béton fissuré pour le diamètre minimal $N_{calc,s,cr}$. La relation suivante doit ensuite être vérifiée :

$$\frac{N_{test,s,cr}}{N_{calc,s,cr}} \geq 1$$

Tableau 1-1: Exemple de calcul du facteur de réduction γ_{cr}

Résultats des tests, non fissuré, diamètre moyen										
t [min]	30	42	-	60	61	68	80	90	110	120
$N_{trend,m}$ [kN]	10,97	-	-	2,07	-	-	-	0,78	-	0,39
$N_{test,m}$ [kN]	-	5	-	-	2	1,5	1	-	0,5	-

Résultats des tests, fissuré, diamètre moyen										
t [min]	30	35	53	60	61	76	-	90	99	120
$N_{trend,m,cr}$ [kN]	6,52	-	-	1,42	-	-	-	0,58	-	0,31
$N_{test,m,cr}$ [kN]	-	5	2	-	1,5	1	-	-	0,5	-

$N_{trend,m,cr}/N_{trend,m}$	0,59	-	-	0,69	-	-	-	0,74	-	0,79
γ_{cr}	0,59									

Tableau 1-2: Exemple de confirmation du facteur de réduction γ_{cr}

Résultats des tests et des calculs, fissuré, diamètre minimal								
t [min]	30	46	-	60	67	90	92	120
$N_{calc,s}$ [kN]	3,3	-	-	0,9	-	0,3	-	0,2
$N_{test,s}$ [kN]	-	3	-	-	1	-	0,5	-

Résultats des tests et des calculs, non fissuré, diamètre minimal								
t [min]	30	41	55	60	-	90	90	120
$\gamma_{cr} * N_{calc,s}$ [kN]	1,96	1,44	0,78	0,54	-	0,18	0,18	0,12
$N_{test,s,cr}$ [kN]	-	3	1	-	-	-	0,5	-

$N_{test,s,cr}/N_{calc,s,cr}$	-	2,08	1,29	-	-	-	2,78	-
> 1 ?	-	oui	oui	-	-	-	oui	-

La valeur de résistance au feu menant à la rupture de la liaison doit être comparée à la résistance au feu concernant les autres modes de rupture (rupture acier et rupture par cône de béton) afin de déterminer le mode de rupture limitant.

2. **Littérature**

- [1] TR 020: Feuerwiderstandsfähigkeit von Metalldübeln.
- [2] DIN EN 1363-1: Feuerwiderstandsprüfungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen.
- [3] EAD 330087-00-0601: systems for post-installed rebar connections with mortar.
- [4] Pinoteau, N.; Pimienta, P.; Guillet, T. et al.: Effect of heating rate on bond failure of rebars into concrete using polymer adhesives to simulate exposure to fire. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 31 (2011), Heft 8, S. 851–861.
- [5] Reick, M.: Brandverhalten von Befestigungen mit großem Randabstand in Beton bei zentrischer Zugbeanspruchung. Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Stuttgart, 2001.
- [6] DIN EN 1993-1-2: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall.
- [7] DIN EN 1992-1-2: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall.