

01+02/14 steeldoc

**Multiétage – systèmes
de planchers en acier**



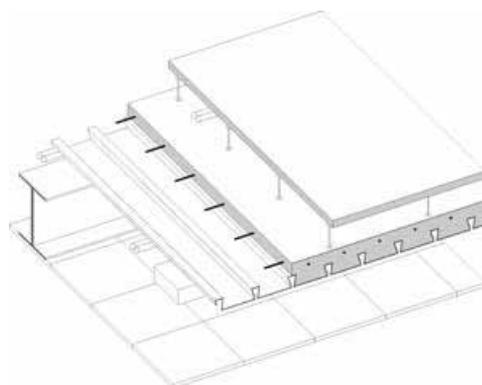
Multifonctionnel – nouvelles dimensions pour planchers d'étage

Un plancher d'étage n'est pas qu'un élément porteur d'un local mais en même temps un niveau multifonctionnel de distribution. Les planchers mixtes allient plusieurs fonctions en un seul élément. Avantage: plus de liberté, plus grande hauteur des locaux, poids réduit. L'article suivant donne un aperçu des systèmes courants et des chances de développement.

Evelyn C. Frisch*

Le caractère multifonctionnel du plancher d'étage pose des exigences complexes à leur conception et à leur exécution. Le plancher n'est pas uniquement une surface porteuse mais un niveau de distribution vital pour le bâtiment. C'est pourquoi il est avantageux que les éléments de la structure soient perméables aux installations techniques dans les deux directions horizontales ou même verticalement. Les systèmes de constructions en acier et en particulier les systèmes de planchers répondent à ces exigences à de nombreux égards. En outre, les planchers en acier permettent des grandes portées, donc de plus grandes surfaces utiles sans appuis, et en outre un poids plus faible que les planchers massifs, ce qui rend le système porteur à la fois plus efficace et plus économique. En termes de durabilité, les planchers métalliques répondent aux critères de flexibilité, de variabilité, d'accessibilité, de démontabilité et de séparabilité de tous les éléments et, partant, du recyclage de l'élément ou du matériau de construction lui-même.

Du point de vue de l'écobilan, les planchers mixtes, surtout en combinaison avec le bois, donnent les meilleurs résultats grâce à leur poids réduit. Mais en comparaison des dalles plates conventionnelles en béton, les planchers mixtes sont au moins équivalents. A cela s'ajoutent les avantages d'une progression rapide de la construction et de faibles émissions du chantier, qui prédestinent la construction en acier comme méthode efficace surtout en environnement urbain.¹⁾



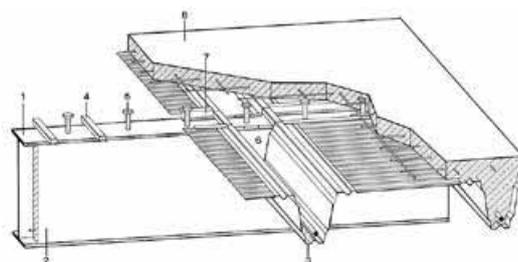
Dalle mixte acier-béton avec faux-plancher (Steeldoc 01/06)

Aperçu synoptique des systèmes de planchers en acier

1. Planchers mixtes avec tôle d'acier

Le plancher se compose d'une tôle profilée en acier et d'une couche de béton coulé sur place. Les tôles profilées trapézoïdales utilisées sont des tôles galvanisées de 0,5 à 1,5 mm d'épaisseur, qui servent en même temps de plateformes de travail au chantier. La poutrelle en acier qui supporte le plancher est généralement liée à la tôle et au béton au moyen de goujons connecteurs à tête. Ce système est considéré comme une construction mixte classique composée de poutres mixtes et d'une dalle mixte. Etant donné que la charge du béton frais est supportée par la tôle en acier seule, les portées sont limitées à 3 ou 4 mètres pour des raisons d'efficacité. Les poutres principales ont dans le cas typique une portée de 6 à 12 mètres. L'effet mixte a lieu mécaniquement et par frottement. La liaison en cisaillement de l'ensemble est obtenu par exemple par embossage de la tôle, par des plis ou par des nervures à section rentrante. Avec ce système, les conduites techniques de forte section ne peuvent être disposées que sous les poutres et en outre, un faux-plancher supplémentaire peut être nécessaire pour le câblage, ce qui aboutit à une hauteur de construction relativement importante.

Une optimisation est possible grâce à une intégration des niveaux porteurs et des installations (ouvertures dans les poutres) ainsi qu'à une augmentation des distances entre les poutres secondaires ou solives. Les poutres Cellform (L/22) sont fabriquées à partir d'un profilé laminé à chaud partagé en deux longitudinalement (section en T), puis perforé et ressoudé, donnant ainsi une âme de poutre optimisée et légèrement plus haute (profilé en double té = L/24 pour solives). Les poutres Cellform sont particulièrement efficaces comme solives en cas de grandes portées. La grandeur



- | | |
|--------------------------|-------------------------|
| Dalle Hoesch Additiv: | 5 Goujon à tête |
| 1 Poutre mixte | 6 Capuchon en plastique |
| 2 Âme enrobée de béton | 7 Tôle profilée en Z |
| 3 Tôle profilée en acier | 8 Béton (≥ C20/25) |
| 4 Tasseau en acier | |

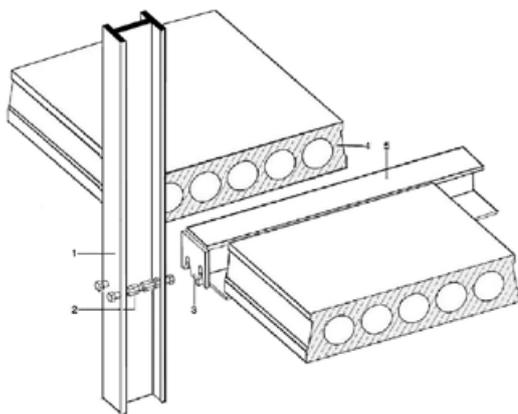
des ouvertures devrait se situer entre 60 et 80% de la hauteur de la poutre. Lorsque les poutres Cellform sont utilisées comme poutres principales (sommiers), il peut être nécessaire de remplir les ouvertures proches de l'appui étant donné les efforts tranchants élevés. On emploie souvent aussi des profilés en en double té conventionnels pour les poutres principales. Les portées typiques pour poutres Cellform sont de 10 à 18 mètres pour les poutres secondaires et de 9 à 12 mètres pour les poutres principales. En variante à l'utilisation des poutres Cellform standard, on peut également fabriquer des poutres adaptées individuellement aux besoins des conduites techniques.

2. Systèmes de planchers «additifs»

Avec les planchers additifs, la capacité portante de la tôle et celle du béton coulé sur place ne se combinent pas par effet mixte mais s'additionnent. Le plancher se compose d'une tôle trapézoïdale de 200 mm de hauteur, servant en même temps de plateforme de travail et de coffrage, et de béton armé. Les tôles profilées sont appuyées entre les poutres sur des consoles soudées, ce qui permet d'économiser sur la hauteur de la construction. Les poutres principales sont équipées de goujons connecteurs à tête et agissent en mixte avec la dalle en béton. La hauteur relativement importante des tôles profilées permet des portées sans appui jusqu'à 5,5 mètres (mailles maximales de la grille de poutres 5,8 mètres), jusqu'à 7 mètres en cas de coulage du béton en deux fois. En cas d'incendie, seule la dalle en béton armé est efficace. Ce système est souvent utilisé pour des parkings et désormais aussi pour des bâtiments commerciaux à étages.

3. Systèmes de plancher-dalle à profilés en acier intégrés

La tendance aux planchers minces a abouti au développement de systèmes de planchers-dalles. Les



Construction Slimfloor:
 1 Poteau
 2 Boulonnage
 3 Plaque frontale tendue
 4 Élément de dalle alvéolaire
 5 Poutre Slimfloor



Integrated Floor Beam (IFB) Slimfloor Beam (SFB) Profilé creux

Immeuble de bureaux Karl-Arnoldplatz Dusseldorf (2002) avec système de dalle Slimfloor. (Steeldoc 04/04)

poutres en acier sont intégrées dans le plan du plancher. Les avantages par rapport aux solutions conventionnelles résident en une hauteur de construction réduite ainsi qu'en une face inférieure plane, simplifiant le tracé des conduites techniques et la libre disposition des cloisons de séparation. De plus, le plancher-dalle donne sans mesure supplémentaire une résistance au feu de R60 étant donné que la poutre en acier est déjà enrobée de béton.

La caractéristique principale de tous les systèmes de plancher-dalle est l'aile inférieure du profilé élargie, qui sert d'appui à la dalle. Ces planchers en acier peuvent être réalisés avec ou sans effet mixte avec le béton coulé en place ou en construction à sec. Dans le système Slimfloor, des éléments alvéolés en béton précontraint sont posés sur l'aile inférieure élargie d'un profilé en acier asymétrique. Les poutres se composent d'un demi-profilé IPE ou HE, sur l'âme duquel une tôle inférieure (IFB) est soudée ou d'un profilé en double té complet sous lequel une tôle inférieure plus large est soudée (SFB). Pour les poutres de bord, on utilise également des profilés creux avec une seule

tôle inférieure soudée. Afin que les éléments de béton agissent en diaphragme, une chape de béton armé est recommandée. En général, les planchers Slimfloor sont réalisés sans effet mixte, mais c'est cependant possible si la couverture de béton sur les poutres est suffisante (plus de 85 mm).

En cas d'utilisation d'éléments alvéolés en béton précontraint (épaisseur 15 à 40 cm), leur portée, jusqu'à 15 mètres, est en général supérieure à la portée des poutres intégrées. Le plancher Slimfloor est une construction quasiment sèche aux assemblages optimisés, à haut degré de préfabrication et permettant des temps de montage courts. Il existe quelques formes spéciales de construction Slimfloor utilisant des éléments partiellement préfabriqués ou des tôles profilées et un grand complément de béton coulé sur place, afin d'obtenir un effet mixte entre le profilé en acier et la dalle en béton.

4. Systèmes inverses

Dans le but de rendre les installations facilement accessibles depuis le haut, on a développé des solutions innovantes de structures porteuses, le panneau de béton séparant les étages étant disposé à la membrure inférieure des poutres en acier. Le système de plancher préfabriqué Slimline se compose de poutres en acier disposées parallèlement, à intervalles de 0,6 à 1,2 mètres selon la charge et dont la membrure inférieure est enrobée de béton. Des ouvertures régulières sont pratiquées dans les âmes des poutres pour les conduites techniques. Au-dessus, on monte un faux-plancher dans le sens transversal, permettant d'accéder aux installations. Les éléments de plancher Slimline permettent en général des portées de 4,5 à 9,6 mètres pour une largeur de 2,4 mètres, des portées jusqu'à 12 mètres étant aussi possibles. La dalle en béton sert uniquement à la séparation des étages au niveau de la physique du bâtiment mais n'agit pas en liaison mixte avec les poutres en acier (voir à ce sujet Topfloor Integral).

Etant donné qu'il n'y a pas de faux-plafond suspendu, la capacité thermique du plancher en béton peut servir à la régulation de la température intérieure (activation). En cas d'incendie, la face inférieure atteint une résistance au feu de 120 minutes sans mesure supplémentaire. Un exemple de l'application de ce système de plancher développé aux Pays-Bas est le Kraanspoor Building à Amsterdam, qui obtenu le MIPIM Green Building Award 2008 en raison de sa construction en éléments recyclables et de l'intégration du refroidissement aux planchers. Le système Slimline a été utilisé aux Pays-Bas pour une multitude de bâtiments de bureaux et résidentiels ainsi que d'hôtels et convient également à la surélévation des bâtiments par construction d'étages supérieurs supplémentaires étant donné sa simplicité et sa légèreté.

Une solution spéciale de ce système a été développée pour la tour Westend Duo à Francfort. Ici, les niveaux d'installation technique supérieure et inférieure sont intégrés à la hauteur de construction. La portée des poutres est de 12 mètres, le plancher en béton coulé sur place (à armature passive) est réduit à 15 cm d'épaisseur sur les bords et augmenté au milieu du bâtiment. Les installations techniques de plancher et de plafond sont disposées dans les espaces creux ainsi obtenus de chaque étage, ne nécessitant pas de percements problématiques du point de vue de l'isolation phonique et de la protection incendie. Dans les zones où les poutres en acier ne sont pas déjà intégrées à la dalle, un revêtement a permis d'atteindre une résistance au feu de R120 même dans les espaces creux. Le système ne nécessite pas d'appuis intermédiaires et permet d'obtenir la souplesse requise, deux étages supplémentaires (pour 27 étages au total), des charges minimales et des économies dans les fondations, l'intégration de la technique domotique et des opérations de construction économiques. Aux dires du maître de l'ouvrage, les coûts de construction plus élevés ont été compensés par une meilleure rentabilité du projet.

L'immeuble Kraanspoor a été érigé sur le pont roulant d'un ancien chantier naval dans le port d'Amsterdam. (Steeldoc 02/10)



Le système de plancher Topfloor Integral perfectionné en Suisse reprend les avantages du système Slimline tout en liant structurellement la dalle en béton aux poutres en acier. Ceci permet de faire des économies de matériau et ainsi de gagner du poids. Des demi-poutres ajourées sont liées à la dalle en béton (épaisseur 90 à 100 mm) située en dessous (ou en dessus) à intervalles de 1,25 mètres par une connexion sans glissement. L'utilisation de poutres ajourées améliore l'efficacité des matériaux utilisés et la souplesse de pose des installations techniques. En cas d'utilisation en position négative, on peut constituer en partie supérieure également des planchers doubles et à espaces creux, permettant d'utiliser le plancher comme élément refroidisseur actif. Le bâtiment scolaire Lindenplatz à Baden, présenté dans ce fascicule, a été réalisé selon ce système

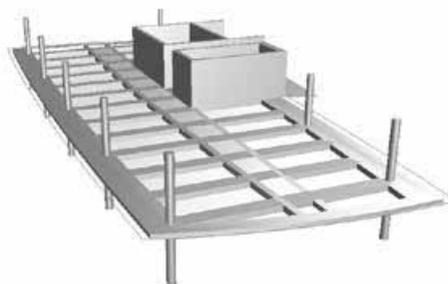
Comportement structural

Tandis qu'en Scandinavie, aux Pays-Bas et dans les pays anglo-saxons les systèmes de plancher-dalle en construction mixte sont déjà très répandus par rapport aux dalles conventionnelles en béton, ils sont considérés la plupart du temps comme des solutions spéciales dans des pays comme l'Allemagne, la France et la Suisse. Des analyses récemment effectuées par des instituts de recherche montrent cependant que les planchers mixtes sont plus simples à dimensionner que ce n'est le cas généralement. Les planchers mixtes peuvent être réalisés comme des dalles à comportement uni- ou biaxial. Dans les systèmes à comportement biaxial, les poutres en acier sont généralement disposées dans deux directions. En cas d'utilisation d'éléments partiellement préfabriqués (par exemple les éléments alvéolés en béton), le transfert des charges n'est possible que dans une seule direction au stade de construction. En construction à sec, les charges sont transmises par les éléments de plancher dans le sens perpendiculaire aux poutres en acier. Habituellement, il suffit de remplir les joints entre les éléments préfabriqués sans couche de couverture



La tour Westend Duo à Francfort avec le système doublement inversé Slimline.

supplémentaire en béton. La construction humide présente l'avantage que la dalle en béton agit comme un disque et peut être ainsi réalisée plus mince que les systèmes à travées isostatiques de la construction à sec. Les systèmes de plancher-dalle ont un comportement structural très proche de celui d'une dalle en béton armé. Ce qui est déterminant pour le comportement structural en cas d'incendie, c'est la sécurité du transfert des forces ainsi que la sécurité de l'appui de la dalle sur la poutre en acier. Comme mesure de protection incendie, on a recours à la protection conventionnelle avec revêtement incendie (face inférieure), à la protection passive par dimensionnement à chaud



Westend Duo à Francfort: Ici, les niveaux d'installation technique supérieur et inférieur sont intégrés à la hauteur de construction. Les installations techniques de plancher et de plafond sont disposées dans les espaces creux.

TOPfloor Intégral

Position positive et négative



Tab. C-40 – Valeurs statiques indiquées par le fabricant

L m	h mm	profilé	g_k kN/m ²	q_{Rd} kN/m ²	$w_{pos}^{(1)}$ mm	$f_{1pos}^{(2)}$ Hz	$w_{neg}^{(1)}$ mm	$f_{1neg}^{(2)}$ Hz	Ø mm
6.00	200	HEA 220	2.7	11.5	2.23	8.1	2.36	6.9	30
	240	IPE 270	2.6	15.8	1.97	8.4	2.04	7.4	70
	260	HEA 280	2.8	14.2	0.93	12.3	1.12	9.9	90
	310	IPE 330	2.7	15.0	0.89	12.0	1.01	10.4	130
7.00	220	HEA 260	2.8	13.5	2.77	7.3	3.19	5.9	30
	280	IPE 300	2.7	12.0	2.30	7.6	2.51	6.6	100
	300	HEA 340	2.9	16.7	1.05	11.8	1.36	9.1	110
	360	IPE 400	2.8	21.5	0.96	11.6	1.17	9.7	160
8.00	250	HEA 280	2.8	13.1	3.22	6.2	3.89	5.4	70
	310	IPE 330	2.7	11.3	2.80	6.8	3.19	5.9	130
	360	HEA 400	3.0	20.6	1.09	11.6	1.47	8.6	170
	400	IPE 450	2.8	22.1	1.19	10.5	1.49	8.6	190
9.00	280	HEA 320	2.9	14.0	3.48	6.6	4.45	5.1	90
	335	IPE 360	2.7	11.9	3.40	6.2	4.00	5.3	150
	420	HEA 450	3.1	18.6	1.17	11.0	1.61	8.2	240
	480	IPE 500	2.9	24.1	1.08	11.3	1.50	8.4	250
10.00	330	HEA 360	2.9	14.0	3.38	6.6	4.47	4.9	150
	400	IPE 450	2.8	18.0	2.91	6.8	3.63	5.6	190
	500	HEA 550	3.2	23.1	1.13	11.3	1.61	8.2	300
	560	IPE 600	3.0	21.8	1.09	10.8	1.46	8.5	360
11.00	370	HEA 400	3.0	14.1	3.64	6.4	4.92	4.7	190
	450	IPE 500	2.9	18.9	3.01	6.7	3.85	5.4	240
	540	HEA 600	3.2	22.3	1.37	10.4	1.96	7.5	330
	560	IPE 600	3.0	19.8	1.60	9.1	2.14	7.1	360
12.00	420	HEA 500	3.1	16.2	3.58	6.7	5.04	4.7	190
	530	IPE 550	2.9	11.7	2.78	6.8	3.62	5.5	350
	610	HEA 700	3.3	23.2	1.43	10.5	2.09	7.3	370

(1) Les effets du fluage sont déjà considérés dans la flèche pour l'élément en position positive. Pour les sollicitations de courte durée, on peut considérer une plus grande rigidité de flexion. Pour les éléments en position négative, il faut en outre considérer une flèche de $L/1000$ due au retrait du béton. Les éléments peuvent être livrés avec une contreflèche (la contreflèche standard pour les éléments en position positive est de $L/450$).

(2) La première fréquence d'oscillation f_1 donnée considère comme masse uniquement le poids propre g_k de la poutre. Pour une autre répartition de la masse m (par exemple due aux charges permanentes ou à une partie des charges de trafic) la fréquence propre f_{m1} est calculée comme suit: $f_{m1} = f \cdot \sqrt{g_k/m}$



Tables de dimensionnement Topfloor-Integral de: Steelwork C1/12, p. 272. A gauche: position négative, à droite: position positive.

et à la protection intégrée avec barres d'armature incorporées (voir C1/12, chapitre dimensionnement en situation d'incendie en construction mixte).

Economie

L'étude économique comparative des planchers mixtes et des dalles plates en béton montre qu'un plancher Slimfloor (poutres Slimfloor avec éléments préfabriqués et béton de couverture) ne coûte qu'environ 1% de plus qu'une dalle plate en béton. La raison en est que le plancher mixte ne nécessite pas de coffrage et que ceci compense les coûts supplémentaires de l'acier de construction pour les planchers mixtes. Les variantes sèches sont en général les moins coûteuses, étant donné que les coûts des éléments préfabriqués représentent jusqu'à 50% des coûts totaux de fabrication.

La comparaison du temps de construction n'est en principe possible que sur la base d'un exemple concret étant donné qu'il y a ici une foule de facteurs déterminants. On peut néanmoins déduire que la construction sèche permet d'éviter les laborieux travaux de coffrage et de pose de l'armature. Ainsi, les faibles coûts supplémentaires d'un plancher mixte compensent-ils le temps de construction plus long de la dalle plate en béton.

Développement et recherche

La recherche actuelle dans le domaine des systèmes de plancher se consacre à l'utilisation optimisée de divers matériaux et à leurs effets mixtes. En particulier, la combinaison de poutres en acier à des éléments en bois est intéressante. En comparaison des planchers

en bois uniquement, les planchers mixtes en panneaux de bois recouverts de béton présentent l'avantage d'être plus résistants au feu et mieux insonorisants. Étant donné l'orientation des fibres, les planchers en panneaux de bois ne supportent la charge que dans une seule direction, c'est pourquoi la pose des éléments de planchers sur poutres en acier Slimfloor offre une solution optimale. Une construction mixte acier-bois permet des plus grandes distances entre appuis que dans le cas d'une dalle en béton (pour la même épaisseur), étant donné que le poids de l'ensemble est réduit. (Steeldoc Acier&Bois; rapport VDI Kuhlmann).

Des essais sont effectués également avec des aciers à haute résistance (S690), de façon à permettre d'augmenter la capacité portante et de réduire le poids. L'objectif du projet de recherche est de développer des systèmes mixtes légers en construction par éléments et modules présentant un haut degré de préfabrication, ainsi que des systèmes de planchers mixtes à armature externe en acier sur toute la surface. L'activation thermique des planchers est un sujet important du point de vue de l'optimisation énergétique des bâtiments. La protection du climat et la préservation des ressources sont des objectifs politiques qui concernent de très près la branche de la construction. La protection thermique estivale n'est pas obtenue que par la construction massive. Les planchers en tôle profilée ont, en construction purement passive, une plus grande capacité de stockage de la chaleur que les dalles plates en béton coulé sur place de même épaisseur. Étant donné que des tubes de refroidissement sont posés près de la surface, les planchers nervurés en construction mixte permettent une meilleure performance

des systèmes actifs de refroidissement, ces derniers étant plus souples à régler étant donné leur faible inertie thermique. Un principe de fonctionnement prometteur est l'utilisation de ce qu'on appelle des PCM (Phase Changing Materials) exploitant le changement de phase. Ces matériaux généralement liquides ont une densité 10 à 20 fois plus élevée que les matériaux de construction massive conventionnels (projet de recherche ZUTECH-Forschungsvorhaben Bauen im Bestand – Potentiale und Chancen der Stahlleichtbauweise).

Potentiel d'innovation du secteur

Les structures mixtes offrent un vaste potentiel en vue de répondre aux exigences des systèmes de construction actuels. L'utilisation coordonnée de l'acier, du béton et du bois dans des procédés autant que possible secs aboutit à des constructions épurées et durables. La construction purement massive doit être réexaminée du point de vue actuel de la diminution des ressources – en particulier de l'exploitation abusive des gisements de sable naturel dans le monde. L'utilisation de matériaux renouvelables et recyclables et leur intégration à des systèmes de construction souples et légers comptent actuellement parmi les grandes tâches de l'industrie de la construction.

* Evelyn C. Frisch est architecte ETH et depuis 2003 directrice du Centre suisse de la construction métallique. Dans ses articles spécialisés, elle traite surtout de la durabilité des systèmes de construction mixte. L'article se réfère à divers articles spécialisés consacrés au thème «des systèmes de planchers en acier» (Ungermann, Strohmman, Mensinger et al.), qui sont mentionnés dans la bibliographie.

Bibliographie

1) Littérature coucernant l'écologie des constructions en acier:

Stroetmann R., Podgorski Ch.: Zur Nachhaltigkeit von Stahl- und Verbundkonstruktionen bei Büro- und Verwaltungsgebäuden, Teil 1: Tragkonstruktionen. Stahlbau 83(2014), Heft 4, S. 245ff. Sur la base de: Mensinger M., Stroetmann R. et al.: Abschlussbericht AiF-Vorhaben 373 ZGB (2014) FOSTA P881

Mensingher, M., Stroetmann, R., Eisele, J., Feldmann, M., Lingnau, V., Zink, J., et al: Nachhaltige Büro- und Verwaltungsgebäude in Stahl- und Stahlverbundbauweise, Stahlbau 80 (2011), Heft 10 S. 740ff.

Voir également EPD (Déclaration environnementale de produit pour profilés ouverts en acier SZS, 2014 en préparation) ainsi que EPD-IFBS-20130094-IBG1-DE Déclaration environnementale de produit – Aciers de construction: profilés laminés ouverts et tôles fortes. Institut für Bauen und Umwelt e.V., bauforumstahl 2013.

Système d'évaluation pour construction durable (BNB) société allemande pour la construction durable (2012)

Steelwork C1/12 Tables de dimensionnement pour la construction mixte et en cas d'incendie, SZS, Centre suisse de la construction métallique (éditeur), Zurich 2012

Steeldoc 03+04/12 Acier et bois – la nouvelle légèreté, SZS, Centre suisse de la construction métallique (éditeur), Zurich 2012

Kuhlmann U., Hauf G., Aldi P. (Universität Stuttgart): Verbundflachdecken – neue Lösungen mit Stahl und Holz Institut für Konstruktion und Entwurf. VDI-Berichte Nr. 2084, 2009. VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (ISBN 978-3-18-092084-9)

Ungermann D., Strohmman I., Brune B.: Stahldeckensysteme, Stahlbau 79 (2010), Heft 10, S. 729–740. Berlin: Ernst & Sohn 2010

Mensingher M., Fontana M., Frangi A.: Entwicklung eines multifunktionalen Deckensystems mit erhöhter Ressourceneffizienz. Stahlbau 79 (2010), Heft 10. Sonderdruck/S. 282–297. Berlin: Ernst & Sohn 2010