

Technisch Dossier #2

VLOEREN VAN KANAALPLATEN MET GEÏNTEGREERDE STALEN LIGGERS





Colofon

dr.ir. A.F. Hamerlinck
ir. B. Potjes

Ralph Hamerlinck is civiel ingenieur, senior adviseur bij Bouwen met Staal, Zoetermeer en brand-veiligheidsadviseur bij Adviesbureau Hamerlinck, Roosendaal. Bennie Potjes is civiel ingenieur en technisch adviseur bij Bouwen met Staal, Zoetermeer.

Uitgave Bouwen met Staal,
Zoetermeer

ISBN 987-90-72830-71-5

Redactie ir. Paul van Deelen

Vormgeving Klats+Poseidon, Delft

Foto omslag Hans Molenaar

Druk Salland de Lange, Deventer

Vrijwaring Uitgever, auteurs en redacteurs verklaren dat de inhoud van deze brochure zorgvuldig en naar beste weten is samengesteld. Zij aanvaarden geen aansprakelijkheid voor eventuele (zet)fouten en voor schade, van welke aard dan ook, die het gevolg is van handelingen en/of beslissingen die zijn gebaseerd op de geboden informatie.

© **Bouwen met Staal** 2007 Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vervoerd, in welke vorm dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Inhoud

1 • Interactie tussen geïntegreerde ligger en kanaalplaten	2
2 • Dimensionering en toetsing geïntegreerde ligger	4
1. Eisen en toetsingsprocedure	5
2. Doorsnedecontrole ligger.....	7
3. Rekenvoorbeeld	15
4. Ontwerpgrafieken	23
3 • Brandwerendheid geïntegreerde ligger	30
1. Berekeningsmethoden	31
2. Rekenmethode NEN 6072	34
3. Rekenmethode TNO	35
4. Rekenvoorbeeld	44
4 • Literatuur	48



Voorwoord

Dit Technisch Dossier vormt een aanvulling op CUR/BmS Aanbeveling 104 'Vloeren van kanaalplaten met geïntegreerde liggers' die in 2006 verscheen.

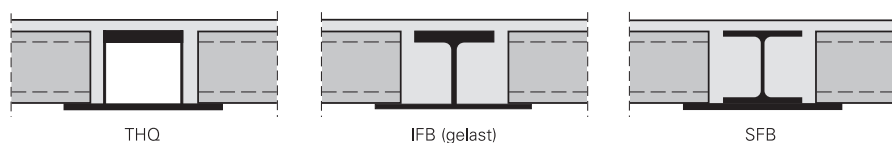
Aanbeveling 104 bevat onder andere aanvullende bepalingen en eisen op NEN 6770 voor vloerconstructies met kanaalplaten die loodrecht op hun overspanningsrichting aan één of twee einden door stalen geïntegreerde liggers worden ondersteund. Een belangrijke rol in dergelijke vloerconstructies speelt de interactie tussen stalen ligger en kanaalplaten. De stijfheid van de stalen ligger heeft namelijk invloed op de capaciteit van de kanaalplaat.

Deze aanvulling is toegespitst op de stalen ligger, die in Aanbeveling 104 globaal wordt behandeld.

De dimensionering en toetsing van de ligger worden uitvoerig bescheven; met de grafieken is de capaciteit van een vloersysteem voor verschillende vloer-liggercombinaties snel af te lezen. Ook zet dit dossier berekening van de brandwerendheid uiteen. Beide hoofdstukken – dimensionering en toetsing én brandwerendheid – worden toegelicht met een rekenvoorbeeld.

Dit dossier is voor de staalconstructeur een onmisbare aanvulling op CUR/BmS Aanbeveling 104 'Vloeren van kanaalplaten met geïntegreerde liggers'. Ook voor toetsende instanties en in het onderwijs zal deze uitgave zijn nut bewijzen.

Bouwen met Staal 191 (augustus 2006) bevat een inleidend artikel over de berekening van stalen geïntegreerde liggers. Dit artikel uit *Bouwen met Staal* 191 gaat niet in op de dimensionering en toetsing, wel worden ontwerpaspecten beschouwd en de achtergronden van de Aanbeveling uitgelegd.



1 • Interactie tussen geïntegreerde ligger en kanaalplaten





Bij een (geprefabriceerde) constructie met stalen geïntegreerde liggers en betonnen kanaalplaten worden beide elementen in principe afzonderlijk berekend ^[2, 3]. De stalen liggers vormen daarbij de ondersteuning voor de kanaalplaten. Wanneer de stalen ligger voldoende stijf is, is de ondersteuning van de kanaalplaat als star te beschouwen. In de moderne skeletbouw, zowel in staal als in beton, zijn de opleggingen van kanaalplaatvloeren echter niet per definitie als star te beschouwen. Daardoor kunnen de krachtwerving in kanaalplaten en liggers elkaar beïnvloeden.

Voor stalen geïntegreerde liggers is het een veilige aanname om in de berekening van de ligger de interactie met de aangestorte kanaalplaatvloer (en eventueel een druklaag) te verwaarlozen. In het geval er geen druklaag is, blijft de sterkte van de stalen ligger nagenoeg gelijk ondanks de bijdrage van het beton tussen de stalen ligger en de kanaalplaat. De stijfheid kan echter wel aanzienlijk toenemen, zo blijkt uit onderzoek ^[16]. Voor de kanaalplaten kan het verwaarlozen van de interactie tussen de kanaalplaatvloer en de stalen liggers in sommige situaties wel onveilig zijn. Heeft de ligger een

lage stijfheid, dan zal die doorbuigen, wat in de kanaalplaat extra spanningen evenwijdig aan de oplegging introduceert (afb. 1). Deze extra spanningen treden op in de kleinste doorsnede van de kanaalplaat (de lijven of dammen), gelijktijdig met de verticale schuifspanningen door de dwarskracht. Dit maakt de dwarskrachtcapaciteit van de kanaalplaat lager dan die bij een starre oplegging. Op deze combinatie van spanningen moet de kanaalplaat worden getoetst.

In de praktijk blijkt dat een niet-starre oplegging van een kanaalplaat constructief doorgaans weinig gevolgen heeft. Dat komt doordat bij de gebruikelijke combinaties van vloerdikte, vloeroverspanning en liggeroverspanning, stijfheden en ontwerpbelastingen niet de dwarskrachtcapaciteit van de kanaalplaat maatgevend is, maar de momentcapaciteit. Uit toetsing van het vloersysteem blijkt in de meeste gevallen dat ook de (verminderde) dwarskrachtcapaciteit ruim groter is dan de rekenwaarde van de optredende dwarskracht.

Toetsing kanaalplaten

CUR/BmS Aanbeveling 104 'Vloeren van kanaalplaten met geïntegreerde liggers' geeft regels voor de toetsing van kanaalplaten. Deze blijven in dit Technisch Dossier verder buiten beschouwing. Meer informatie hierover is te vinden onder meer in het artikel van H.W. Bennink en R. Klein Holte, 'Niet-star ondersteunde kanaalplaten', in *Cement* 58 (2006) ^[17].



1. Kanaalplaten moeten in dwarsrichting de vervorming van de ligger volgen.

2 • Dimensionering en toetsing geïntegreerde ligger





Dit artikel beschrijft gedetailleerd de dimensionering en toetsing van een geïntegreerde stalen ligger in een vloersysteem met kanaalplaten. Het vormt een aanvulling op CUR/BmS Aanbeveling 104 'Vloeren van kanaalplaten met geïntegreerde liggers'. De in dit artikel beschreven werkwijze is toegespitst op statisch bepaalde liggers op twee steunpunten en de gangbare profielen zoals IFB, SFB en THQ. Voor de verschillende vloer-lijgercombinaties zijn grafieken gegeven waarmee snel de capaciteit is van een vloersysteem kan worden bepaald waarbij wordt voldaan aan de bepalingen van de Aanbeveling.

1 Eisen en toetsingsprocedure

1.1 Prestatie eisen

In de gebruiksfase moeten de liggers volgens NEN 6702 ^[6] voldoen aan ten minste twee prestatie-eisen: de vervormingen moeten beperkt blijven (bruikbaarheidsgrenstoestand) en de kans op bezwijken dient voldoende klein te zijn (uiterste grenstoestand). Deze eisen worden als volgt toegespitst op dit type stalen ligger.

Bruikbaarheidsgrenstoestand

a) De bijkomende doorbuiging, veroorzaakt door het veranderlijke deel van een incidentele belastingcombinatie, mag ten hoogste 3‰ van de overspanning bedragen. Deze eis uit NEN 6702 wordt niet voorgeschreven vanuit het Bouwbesluit 2003 ^[7].

b) De zakking (de totale doorbuiging minus de zeeg) mag ten hoogste 4‰ van de overspanning bedragen. Deze eis uit NEN 6702 wordt niet voorgeschreven vanuit het Bouwbesluit 2003 ^[7].

- c) In het dagelijks gebruik mogen geen plastische vervormingen optreden; dat betekent dat de vervorming zuiver elastisch moet zijn. Deze eis staat niet in NEN 6702.
- d) Tijdens brand moet de vloer nog bepaalde tijd intact blijven. Voor een vloerconstructie geldt over het algemeen een eis van 60 minuten voor de Vweerstand tegen Branddoorslag en Brandoverslag (wbdbbo) volgens het Bouwbesluit. Deze eis is afhankelijk van het soort gebouw en de gebouwhoogte.

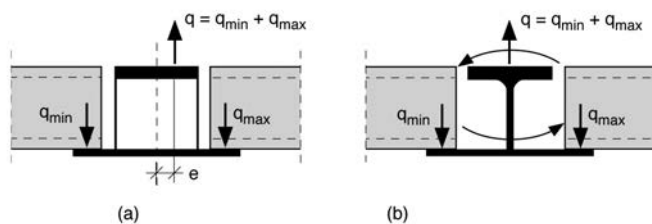
Uiterste grenstoestand

- e) Onder een fundamentele en een bijzondere belastingcombinatie mag nergens de capaciteit van de onderplaat worden overschreden. Deze eis heeft tot doel bezwijken van de oplegging van de kanaalplaten te voorkomen.
- f) Onder een fundamentele en een bijzondere belastingcombinatie mag nergens de capaciteit van de liggerdoorsnede worden overschreden. Deze eis heeft tot doel bezwijken van de ligger als geheel te voorkomen.

1.2 Toetsing bruikbaarheidsgrenstoestand

De eis dat nergens plastische vervorming mag optreden in de bruikbaarheidsgrenstoestand (eis c), is bij dit type ligger eerder maatgevend dan bij de meeste andere profielvormen. Dat komt doordat in de onderplaat relatief snel plastische vervorming ontstaat, door dubbele buiging. Bij geïntegreerde liggers kan de verhouding tussen de plastische en de elastische momentcapaciteit in de orde van 1,35 zijn. Dit betekent dat een ligger, gedimensioneerd op de uiterste grenstoestand (met een bijvoorbeeld een gewogen (overall) belastingfactor van 1,3), in de bruikbaarheidsgrenstoestand (met belastingfactor van 1,0) plastisch zal vervormen. Dit in tegenstelling tot I-profielen waarbij deze verhouding tussen plastisch en elastisch moment ongeveer 1,15 bedraagt: gedimensioneerd op sterkte zal het moment bij een belastingfactor van 1,0 niet tot plastische vervorming leiden. Toetsing van eis c gebeurt met de gebruikelijke mechaniecaregels.

Toetsing van eis c (plastische vervorming in gebruikstoestand)



2. Verwerking van excentrische oplegkrachten via (a) wringende momenten in de ligger en (b) negatieve momenten in de voegvulling en de platen.

gebeurt door een spanningscontrole (stap 6 van de toetsingsprocedure, par. 1.4). Toetsing van eis d (wdbdo) wordt elders in dit Technisch Dossier uitvoerig behandeld. Toetsing van de eisen a (bijkomende doorbuiging) en b (zakking) is eenvoudig uit te voeren met een berekening volgens de mechanica-regels.

1.3 Toetsing uiterste grenstoestand

Voor de toetsing van de capaciteit van de onderplaat (eis e) en de liggerdoorsnede (eis f) moet worden uitgegaan van dubbele buiging in de onderplaat. Daarnaast moet bij een SFB-profiel ook nog de onderflens op dubbele buiging worden beschouwd. In de praktijk blijkt de onderflens meestal niet maatgevend te zijn, omdat de onderflens vaak dikker is dan de onderplaat. De toetsing vindt plaats met een plastische doorsnedecontrole. Hiervoor moet de ligger in doorsnedeklasse 1 of 2 vallen.

Door de gelijktijdige werking van buigende momenten in de dwarsrichting (buiging van de onderplaat) en in de lengterichting (buiging van de ligger), ontstaat in de onderplaat een

vlakke spanningstoestand. Deze toestand leidt tot extreme spanningen in die punten, waar zowel het liggermoment als het plaatmoment extreme waarden bereiken.

De extreme waarde ligt bij een doorsnede met een positief liggermoment (trekspanning σ_x in lengterichting) aan de onderzijde van de onderplaat (buigdrukspanning $-\sigma_y$ in dwarsrichting). Bij een steunpuntmoment treedt de extreme waarde juist op aan de bovenzijde van de onderplaat.

Voor beide doorsneden dient als uitgangspunt het toetsingscriterium van Huber-Hencky waarbij de vloeigrens niet mag worden overschreden:

$$\frac{\sigma_i}{f_y} \leq 1 \quad (1)$$

Hierbij kan de vlakke spanningstoestand worden herschreven tot:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2} \quad (2)$$



Hierin is:

- σ_i ideële spanning (of vergelijkingsspanning);
- σ_x absolute waarde van de normaalspanning in de onderplaat in de lengterichting door het maximale liggermoment;
- σ_y absolute waarde van de maximale buigspanning in de onderplaat in de dwarsrichting;
- f_y vloeigrens (355 N/mm²).

De term τ_{xy} is vervallen omdat de schuifspanning aan de boven- en onderzijde van de onderplaat gelijk is aan nul.

1.4 Toetsingsprocedure

Voor statisch bepaalde liggers op twee steunpunten is de toetsingsprocedure kort. De middendoorsnede wordt getoetst op de vervormingaspecten doorbuiging en ideële spanning in de onderplaat, en op de bezwijkaspecten van de sterkte van de onderplaat in dwarsrichting en de sterkte van de effectieve liggerdoorsnede. Bij de oplegging wordt het aspect dwarskracht getoetst. De procedure voor toetsing van de ligger verloopt als volgt.

1. Bepaling van de krachtsverdeling en de keuze van het profiel (par. 2.1).
2. Bepaling van de doorsnedeklasse van het profiel (par. 2.2). Hierbij wordt gecontroleerd of het profiel in klasse 1 of 2 valt; zoniet dan mag toetsing volgens de stappen 3 en 4 niet worden toegepast.
3. Controle van de capaciteit van de onderplaat (par. 2.3). Hier wordt prestatie-eis e getoetst.
4. Controle van het buigend moment in de ligger (par. 2.4). Dit is onderdeel van toetsing van prestatie-eis f.
5. Controle van de dwarskracht (par. 2.5). Dit is onderdeel van toetsing van prestatie-eis f.
6. Spanningscontrole in de bruikbaarheidsgrenstoestand (par. 2.6). Hier wordt prestatie-eis c getoetst.
7. Controle van de doorbuiging (par. 2.7). Toetsing van de prestatie-eisen a en b.

Voor doorgaande liggers moet deze procedure voor verschillende veldoverspanningen worden herhaald. Als alle velden dezelfde overspanning hebben, is het eindveld maatgevend. Bovendien moeten de steunpuntoorsneden worden getoetst op de interactie van dwarskracht en buigend moment bij gelijktijdige dwarsbuiging van de onderplaat. Toetsing van statisch onbepaalde liggers worden verder niet behandeld. Informatie daarover is te vinden in de literatuur [3, 10].

2 Doorsnedecontrole ligger

2.1 Bepaling krachtsverdeling

De vloerplaten rusten op de onderplaat van de geïntegreerde ligger. De resulterende oplegkracht grijpt meestal niet aan in het zwaartepunt van de liggerdoorsnede, bijvoorbeeld doordat de vloervelden aan weerszijden van de ligger een ongelijke overspanning hebben of omdat de belastingen niet gelijk zijn. Er resteert dan een excentriciteitsmoment op de ligger.

Er kunnen zich nu twee extreme mogelijkheden voordoen.

- De ligger is oneindig torsiestijf, ontwikkelt een wringend moment en draagt dit af bij de oplegging. In dit geval grijpt de vloerbelasting excentrisch aan op de ligger.
- De ligger is oneindig torsieslap, tordeert (voor zover de oplegging van de vloer dat toestaat) en veroorzaakt een negatief steunpuntmoment in de vloerplaten. De vloerbelasting grijpt noodgedwongen aan in het (rotatie)centrum van de doorsnede.

THQ profielen met een afgesloten holle ruimte kunnen als torsiestijf worden aangemerkt; IFB- en SFB-profielen met aangestorte holle ruimten als torsieslap (afb. 2). In gereede toestand – na het leggen van de kanaalplaten en het aanstoren van de voegen in de vloer – kunnen de stalen liggers niet meer om hun lengte-as verdraaien [3]. Dat geldt zowel voor enkelsymmetrische IFB- en SFB-liggers als voor THQ-liggers.

Tabel 1. Doorsnedeklasse van IFB- en SFB ligger bij een veldmoment.

spanningsverdeling	relatieve slankheid	doorsnedeklasse
plastisch	$\beta_{rel} \leq 10$ en $\zeta_{rel} \leq 72$	klasse 1 (plastisch)
plastisch	$\beta_{rel} \leq 11$ en $\zeta_{rel} \leq 83$	klasse 2 (gedrongen)
elastisch	$\beta_{rel} \leq 15$ en $\zeta_{rel} \leq 124$	klasse 3 (semi-gedrongen)
elastisch	$\beta_{rel} > 15$ of $\zeta_{rel} > 124$	klasse 4 (slank)

Eventuele wringende momenten in de ligger worden dan dus door de vloerschijf opgenomen. Een belangrijke rol hierbij speelt de koppelwapening die de beide vloervelden met elkaar verbindt.

Tijdens de uitvoering zijn de voegen tussen ligger en vloerplaten nog niet aangestort en is er nog geen sprake van een vloerschijf. Dan kan er dus wel wringing in de ligger optreden, tenzij uitvoeringsmaatregelen worden genomen om dat te voorkomen, zoals bijvoorbeeld het om-en-om leggen van de kanaalplaten.

Treedt er wringing op in de stalen ligger, dan moet die daarop worden beoordeeld ^[10].

Bij statisch bepaalde liggers volgt de krachtsverdeling direct uit het evenwicht. De overspanning van eenveldsliggers is gelijk aan de dagmaat tussen de opleggingen.

2.2 Bepaling doorsnedeklasse ligger

De doorsnedeklasse van een profiel hangt af van de relatieve slankheid van de op druk belaste profieldelen, van de toegepaste staalsoort en van de fabricagemethode (gewalst

of gelast). NEN 6770 ^[8] definieert uitsluitend doorsnedeklassen voor dubbelsymmetrische profielen met een symmetrische spanningsverdeling. Deze definitie is afgeleid van de algemene formulering voor op druk en buiging belaste doorsneden in NEN 6771 ^[9]; de definitie geldt ook voor IFB- en SFB-profielen en THQ profielen. De staalsoort van geïntegreerde liggers is standaard S355.

Omdat het bovenste en het onderste deel van enkelsymmetrische liggers verschillend zijn, is een onderscheid nodig tussen doorsneden met een positief moment (in het veld) en doorsneden met een negatief moment (boven het steunpunt). Omdat statisch onbepaalde liggers hier niet worden behandeld, wordt hier alleen de doorsnedeklasse voor een positief veldmoment bepaald.

IFB- en SFB-ligger

In het veld, tussen steunpunten, hangt de doorsnedeklasse af van de plooi gevoeligheid van het bovenste deel van de ligger. Bij IFB- en SFB-ligger is dat een warmgewalst profiel(deel), waardoor het profiel vrijwel altijd tot doorsnede-



Tabel 2. Doorsnedeklasse van THQ-liggers bij een veldmoment.

spanningsverdeling	relatieve slankheid	doorsnedeklasse
plastisch	$\beta_{rel} \leq 33$ en $\zeta_{rel} \leq 72$	klasse 1 (plastisch)
plastisch	$\beta_{rel} \leq 38$ en $\zeta_{rel} \leq 83$	klasse 2 (gedrongen)
elastisch	$\beta_{rel} \leq 42$ en $\zeta_{rel} \leq 124$	klasse 3 (semi-gedrongen)
elastisch	$\beta_{rel} > 42$ of $\zeta_{rel} > 124$	klasse 4 (slank)

klasse 1 (plastische doorsneden) mag worden gerekend. De doorsnedeklasse voor gewalste IFB- en SFB-profielen volgt uit *tabel 1*.

De relatieve slankheid β_{rel} voor de uitstekende plaat wordt als volgt gedefinieerd:

$$\beta_{rel} = \frac{\frac{1}{2}b_o}{t_o} \sqrt{\frac{355}{235}} = 1,23 \frac{\frac{1}{2}b_o}{t_o} \quad (3)$$

De relatieve slankheid ζ_{rel} voor de lijven van de IFB- en SFB-liggers is afhankelijk van de beschouwde spanningsverdeling en van de ligging van de neutrale lijn of halveringslijn:

$$\zeta_{rel} = 2,46 \frac{h_o}{t_w} \left(= \frac{2h_o}{t_w} \sqrt{\frac{355}{235}} \right) \quad \text{plastisch; } h_o \leq h_u \quad (4)$$

$$\zeta_{rel} = 2,46 \frac{h_o}{t_w} \left(\frac{12 - h_u/h_o}{11} \right) \quad \text{plastisch; } h_o > h_u \quad (5)$$

$$\zeta_{rel} = 2,46 \frac{h_o}{t_w} \sqrt{\frac{h_o}{h_u}} \quad \text{elastisch; } h_o \leq h_u \quad (6)$$

$$\zeta_{rel} = 2,46 \frac{h_o}{t_w} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h_u}{h_o} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h_u}{h_o} \right)^2 \right] \quad \text{elastisch; } h_o > h_u \quad (7)$$

Hierin is:

b_o breedte van de flens van een IFB- of SFB-profiel;

h_o hoogte van het gedrukte deel van het lijf, gemeten tot het begin van de afronding met de bovenflens;

h_u hoogte van het getrokken deel van het lijf, gemeten tot het begin van de afronding met de onderplaat (IFB) of onderflens (SFB);

t_o dikte van de bovenflens;

t_w dikte van het lijf.

THQ-ligger

In het veld, tussen steunpunten, hangt de doorsnedeklasse af van de plooi gevoeligheid van het bovenste deel van de ligger. Voor THQ-liggers met een gelaste bovenflens volgt de doorsnedeklasse uit *tabel 2*.

De relatieve slankheid β_{rel} voor de bovenflens wordt als volgt gedefinieerd:

$$\beta_{rel} = \frac{b_o}{t_o} \sqrt{\frac{355}{235}} = 1,23 \frac{b_o}{t_o} \quad (8)$$

De relatieve slankheid ζ_{rel} voor de lijven van THQ-liggers is afhankelijk van de beschouwde spanningsverdeling en van de ligging van de neutrale lijn of halveringslijn (deze formules zijn overigens gelijk aan de formules (4) t/m (7)):

$$\zeta_{rel} = 2,46 \frac{h_o}{t_w} \left(= \frac{2h_o}{t_w} \sqrt{\frac{355}{235}} \right) \quad \text{plastisch; } h_o \leq h_u \quad (9)$$

$$\zeta_{rel} = 2,46 \frac{h_o}{t_w} \left(\frac{12 - h_u/h_o}{11} \right) \quad \text{plastisch; } h_o > h_u \quad (10)$$

$$\zeta_{rel} = 2,46 \frac{h_o}{t_w} \sqrt{\frac{h_o}{h_u}} \quad \text{elastisch; } h_o \leq h_u \quad (11)$$

$$\zeta_{rel} = 2,46 \frac{h_o}{t_w} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h_u}{h_o} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h_u}{h_o} \right)^2 \right] \quad \text{elastisch; } h_o > h_u \quad (12)$$

Hierin is:

b_o breedte van de aangelaste bovenflens tussen twee lijven;

h_o hoogte van het gedrukte deel van het lijf, gemeten tot het begin van de lasverbinding met de bovenflens;

h_u hoogte van het getrokken deel van het lijf, gemeten tot het begin van de lasverbinding met de onderplaat;

t_o dikte van de bovenplaat;

t_w dikte van het lijf.

Voor THQ-liggers is in de praktijk de verhouding b_o/t_o ten hoogste $300/12 = 25$ en geldt $\beta_{rel} \leq 31$, zodat de gelaste bovenplaat over voldoende vervormingcapaciteit beschikt om in de doorsnede een volplastische spanningsverdeling te laten ontstaan.

Gelet op de slankheid van de lijven is echter enig voorbehoud geboden. De hoeveelheid materiaal in de lijven kan, in verhouding tot die in de flenzen, betrekkelijk gering zijn. De halveringslijn van een enkelsymmetrische doorsnede met een plastische spanningsverdeling kan dan in de onderplaat

komen te liggen. In dat geval wordt het gehele lijf gedrukt en zou de hoogte-dikte verhouding van het lijf beperkt moeten blijven tot ongeveer 31 (klasse 1 of 2).

2.3 Controle capaciteit onderplaat

Gecontroleerd moet worden of de onderplaat voldoende sterk is om de spanningen op te nemen die ontstaan uit buiging en afschuiving in de dwarsrichting in de onderplaat door de oplegging van de kanaalplaat. De toetsing kan volgens twee methoden plaatsvinden.

Methoden 1

Berekend wordt de minimaal benodigde dikte van de onderplaat voor het opnemen van de dwarskracht en het moment. Het verloop van de dwarskrachten V_z en de momenten M_x in de onderplaat van een SFB-profiel zijn weergegeven in *afbeelding 3*. Bij de aansluiting tussen de onderplaat en de onderflens van het profiel is de combinatie van V_z en M_x maatgevend:

$$M_x = -\frac{1}{4} q (e_1 - e_2)$$

$$V_z = \frac{1}{2} q$$

Vervolgens wordt de onderplaat verdeeld in vier denkbeeldige plastische gebieden (*afb. 4*). De gebieden met plaatdikten t_z en t_y zijn nodig om V_z en M_x in de maatgevende doorsnede op te nemen. Een mogelijkheid om te controleren of de onderplaat voldoende dik is, is om de benodigde plaatdikten t_z en t_y uit te rekenen.

In gebied 1 wordt de dwarskracht V_z opgenomen en in de gebieden 2 en 4 het moment in dwarsrichting. Vanwege het toenemend moment in dwarsrichting hoort bij een lineair momentenverloop (*afb. 3*) een parabolische spanningsverdeling. Bij een positief moment (veldmoment) M_y kan er door langsbuiging een trekspanning ontstaan van maximaal f_y in gebied 2, naast de trekspanning door dwarsbuiging van



eveneens maximaal f_y . De gebieden 2 en 3 zijn bij een positief moment volledig beschikbaar voor langsbuiging. De gegeven formules zijn afgeleid in [10].

De plaatdikte t_z volgt uit:

$$t_z = \frac{|V_z| \cdot \sqrt{3}}{f_y}$$

De plaatdikte t_y volgt uit de evenwichtvergelijking $|M_x| - (t_u - t_y)t_y f_y = 0$. Dat leidt tot de vergelijking $t_y^2 - t_u t_y + |M_x| / f_y = 0$. Hieruit volgt voor t_y :

$$t_y = \frac{1}{2}t_u \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4|M_x|}{f_y t_u^2}} \right)$$

Methode 2

De draagkracht van de onderplaat kan ook direct worden getoetst met formule (13):

$$3 \left(\frac{q_{\max}}{f_y t_u} \right)^2 + 2 \frac{(e_1 - e_2)}{t_u} \frac{q_{\max}}{f_y t_u} \leq 1 \quad (13)$$

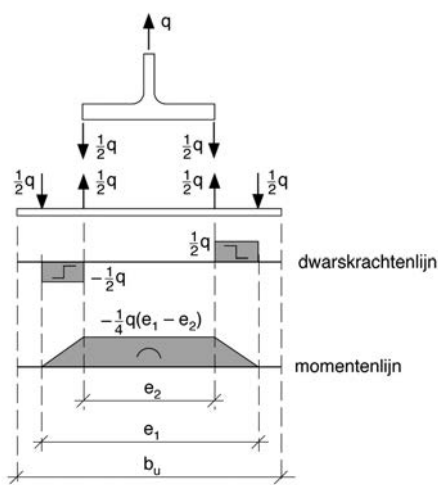
waarin:

$q_{\max}$ is de grootste waarde van de dwarskracht van de twee oplegzijden; bij gelijke oplegreacties aan weerszijden van de ligger is dit dus gelijk aan $\frac{1}{2}q$, de helft van de totale dwarskracht;

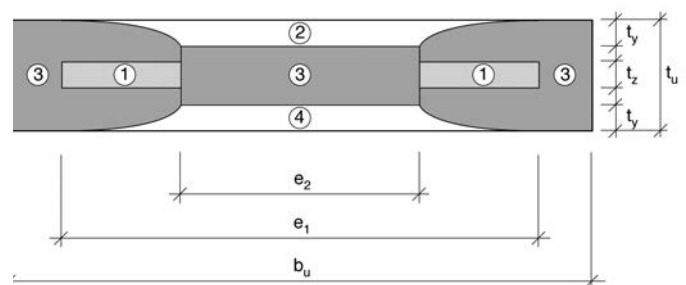
e_1, e_2 volgen uit *afbeelding 5*;

f_y is de vloeigrens;

t_u is de dikte van de onderplaat.



3. Krachtswerking in de onderplaat in dwarsrichting.



4. Verdeling van de onderplaat in vier denkbeeldige plastische gebieden. De plaatdikten t_z en t_y zijn nodig om V_z en M_x in de maatgevende doorsnede op te kunnen nemen.

2.4 Controle buigend moment ligger

Bij het bepalen van het uiterste moment van de liggerdoorsnede moet rekening worden gehouden met de dwarsbuiging van de onderplaat. Daardoor is een deel van de capaciteit van de plaat niet beschikbaar om ook bij te dragen aan de doorsnedecapaciteit in lengterichting van de ligger. Daarom moet de bruto doorsnede rekenkundig worden gereduceerd; van de overblijvende effectieve doorsnede wordt vervolgens de capaciteit bepaald. In de praktijk zal de afname van de momentcapaciteit in de ligger niet meer bedragen dan zo'n 5%. De achterliggende theorie ^[3] beschrijft de vlakke spanningstoestand in de onderplaat als gevolg van buiging in twee richtingen ^[11]. Daarbij wordt uitgegaan van een volplastisch materiaalgedrag in de onderplaat. Het krachteenwicht van een tweezijdige belasting op de onderplaat van een geïntegreerde ligger kan voor dit doel worden beschreven zoals aangegeven in *afbeelding 5*.

De effectieve doorsnede van de plaat onder deze belasting-situatie volgt uit:

$$A_{u,eff} = \psi \cdot A_u \quad (14)$$

$$A_u = b_u \cdot t_u \quad \text{brutodoorsnede onderplaat} \quad (15)$$

$$\psi = 1 - \frac{3\mu^2 \sqrt{3} \cdot t_u + \lambda \cdot \mu \left(2e_1 + e_2 \right) - \lambda^2 \left(e_1 - e_2 \right)}{6\mu \cdot b_u} \quad (16)$$

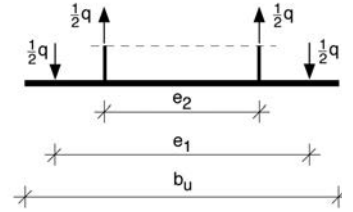
met:

$$\mu = \frac{q(e_1 - e_2)}{f_y \cdot t_u^2} \quad (17)$$

$$\lambda = 1 - \sqrt{1 - \mu} \quad (18)$$

In de praktijk komen drie verschillende 'ophangsystemen' van de onderplaat voor (*afb. 6*).

- Voor THQ-liggers volgt de factor ψ uit de substitutie $e_2 = b_o$.



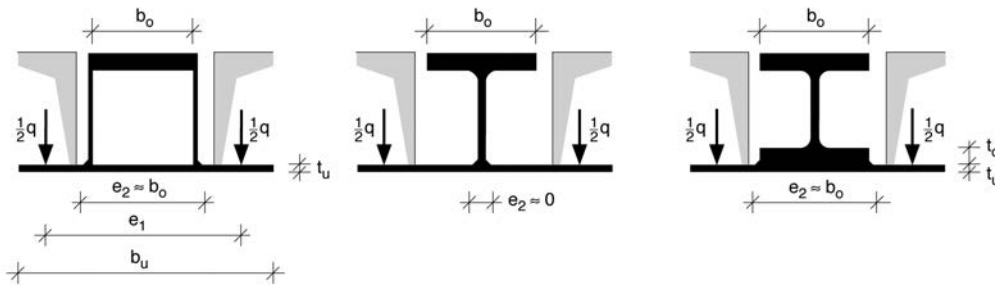
5. Evenwichtsituatie van de onderplaat in dwarsrichting.

- Voor IFB-liggers kan praktisch worden aangehouden $e_2 = 0$.
- Bij SFB-liggers is sprake van een gecombineerde onderplaat met een bruto doorsnede $A_o + A_u$, waarin A_o de flensdoorsnede van het profiel is en A_u de doorsnede van de aangelaste plaat. De effectieve doorsnede kan geschreven worden als $\psi_o A_o + \psi_u A_u$. De factor ψ_o wordt bepaald met formule (16) door substitutie van $b_u = b_o$, $e_1 = b_o$, $t_u = t_o$ en $e_2 \approx 0$, terwijl de factor ψ_u met dezelfde formule wordt bepaald door substitutie van $e_2 = b_o$, zoals voor THQ liggers.

De invloed van dwarsbuiging op de momentcapaciteit van de liggerdoorsnede is meestal verwaarloosbaar gering. Alleen bij liggers van het type IFB is dit aspect significant. De momentcapaciteit bedraagt in alle gevallen:

$$M_{pl} = W_{pl} \cdot f_y \quad (19)$$

met hierin W_{pl} betrokken op de effectieve profieldoorsnede en $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$.



6. 'Ophanging' van de onderplaat aan de ligger.

2.5 Controle dwarskracht

Bij een statisch bepaalde ligger op twee steunpunten is de dwarskracht maximaal bij de steunpunten. Daar moet dus de controle plaatsvinden. Er is geen sprake van interactie met het buigend moment omdat daar het moment gelijk is aan 0. Voor het opnemen van de maximale dwarskracht bij de opleggingen wordt uitgegaan van het lijf en een deel van de beide flenzen:

$$A_z = A_{\text{profiel}} - 2t_o(b_o - t_w - 2r)$$

De dwarskrachtcapaciteit volgt uit onderstaande formule:

$$V_{z,pl} = \frac{1}{3} \sqrt{3} A_z \cdot f_y \quad (20)$$

2.6 Spanningscontrole bruikbaarheidsgrenstoestand

De kritieke spanningscombinatie van een statisch bepaalde ligger treedt op in de uiterste vezel aan de bovenzijde van de ligger of aan de onderzijde bij de aansluiting van de

onderplaat met het lijf; bij een SFB-ligger waar de onderplaat is verbonden met de onderflens. De maatgevende doorsnede is bij de lassen; daar werkt in de onderplaat een langspanning $+\sigma_x$ (trek), een dwarsspanning $-\sigma_y$ (druk) en een schuifspanning τ .

Er moeten twee toetsingen plaatsvinden. De eerste toetsing is in de uiterste vezel (over de dikte gezien) van de onderplaat en de tweede toetsing is de toetsing in het hart van de onderplaat.

Toetsing spanning in uiterste vezel onderplaat

De dwarskracht is hier gelijk aan 0. Er zijn in de onderplaat alleen spanningen door het moment in langsrichting en in dwarsrichting.

De vergelijkingsspanning σ_i moet kleiner of gelijk zijn aan de vloeispanning f_y . De volgende toetsing moet plaatsvinden:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2} \leq f_y$$

De bijbehorende extreme langs- en dwarsspanningen zijn:

$$\sigma_x = \frac{M_y}{I_y} \left(\frac{1}{2}h - z + t_u \right)$$

$$\sigma_y = \frac{M_x}{I_x} \cdot \frac{1}{2}t_u = \frac{M_x}{\frac{1}{12}bh^3} \cdot \frac{1}{2}t_u$$

Voor de incidentele belastingcombinatie zijn de langs- en dwarsmomenten:

$$M_y = \frac{1}{8}ql^2 \text{ kNm}$$

$$M_x = \frac{1}{2}q \cdot \frac{1}{2}(e_1 - e_2)$$

Toetsing spanning in hart onderplaat

In het midden van de onderplaat onder de las is de dwarsbuigspanning σ_y gelijk aan 0, de langsspanning is gelijk aan de vorige situatie en de schuifspanning τ is maximaal:

De vergelijkingsspanning σ_i moet kleiner of gelijk zijn aan de vloeispanning f_y . De volgende toetsing moet plaatsvinden:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau^2} \leq f_y$$

$$\tau = \frac{3}{2} \cdot \frac{\frac{1}{2}q}{t_u}$$

2.7 Controle doorbuiging

Getoetst moeten worden de bijkomende doorbuiging (doorbuiging door veranderlijke belasting) en de einddoorbuiging (doorbuiging door totale belasting). De einddoorbuiging is de totale doorbuiging minus een eventuele zeeg. Als een zeeg wordt toegepast om aan de eis voor de einddoorbuiging te voldoen, is de eis voor de bijkomende doorbuiging maatgevend. Voor de einddoorbuiging geldt als eis:

$$u_{\text{eind}} \leq 0,004l$$

Voor de bijkomende doorbuiging geldt als eis:

$$u_{\text{bijk.}} \leq 0,003l$$

Bij het ontwerpen van een ligger kan ook worden gedimensioneerd op de bijkomende doorbuiging. Dan is controle achteraf overbodig en kan worden volstaan met het bepalen van de zeeg. Als geen zeeg wordt toegepast moet bij deze werkwijze de totale doorbuiging worden gecontroleerd.

De bijkomende doorbuiging hoeft niet te worden gecontroleerd omdat dit criterium al is meegenomen bij de bepaling van de profielkeuze.

De doorbuiging in de eindtoestand u_{eind} door de permanente en de veranderlijke belasting is:

$$u_{\text{eind}} = \frac{5q_{\text{rep}}l^4}{384EI_y}$$



3 Rekenvoorbeeld

Gegeven

SFB-ligger in een kantoorgebouw. De ligger hangt vrij tussen de kolommen en overspant 7,2 m. Op de ligger rusten aan weerszijden 260 mm dikke kanaalplaten met elk een overspanning van 9,0 m. Voor het eigen gewicht van de kanaalplaten wordt $3,8 \text{ kN/m}^2$ aangehouden en voor de overige permanente belasting (dekvloer en eigen gewicht ligger) $1,7 \text{ kN/m}^2$. Voor de veranderlijke belasting wordt 4 kN/m^2 aangehouden. De aansluitingen en uitvoering zijn zodanig dat mag worden aangenomen dat er geen wringend moment in de ligger aanwezig is. Aangenomen wordt ook dat het belastingsgeval brand niet maatgevend is.

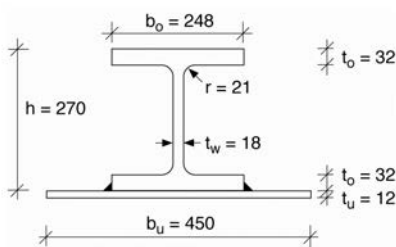
Gevraagd

Bepaal het juiste SFB-profiel en voer een doorsnedecontrole uit van de ligger.

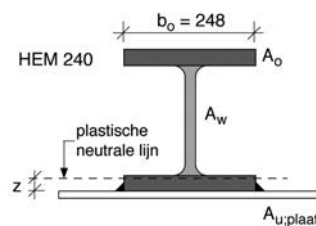
Uitwerking

De uitwerking bestaat uit de volgende onderdelen (volgens par. 1.4).

1. Bepaling krachtsverdeling en keuze profiel.
2. Bepaling doorsnedeklasse ligger.
3. Controle capaciteit onderplaat.
4. Controle buigend moment ligger.
5. Controle dwarskracht.
6. Spanningscontrole bruikbaarheidsgrenstoestand.
7. Controle doorbuiging.



7. SFB-ligger 270-HE240M+450x12.



$$\begin{aligned} A_{\text{HEM}} &= 19960 \text{ mm}^2 \\ A_o &= b_o t_o = 7936 \text{ mm}^2 \\ A_w &= A_{\text{HEM}} - 2A_o = 4088 \text{ mm}^2 \\ A_u &= b_u t_u = 5400 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

8. De halveringslijn (plastische neutrale lijn) ligt in de onderflens van het profiel HEM 240, zodat het volledige lijf onder druk staat.

1. Bepaling krachtsverdeling en keuze profiel

De permanente en veranderlijke belasting op de ligger zijn:

$$\text{permanente belasting: } q_g = 9,0(3,8 + 1,7) = 49,5 \text{ kN/m}$$

$$\text{veranderlijke belasting: } q_q = 9,0 \cdot 4,0 = 36,0 \text{ kN/m}$$

De volgende twee belastingcombinaties zijn voor de ligger van belang:

$$\begin{aligned} \text{fundamentele combinatie: } q_d &= \gamma_{f,g} q_g + \gamma_{f,q} q_q \\ q_d &= 1,2 \cdot 49,5 + 1,5 \cdot 36,0 = 113,4 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{incidentele combinatie: } q_{rep} &= \gamma_{f,g} q_g + \gamma_{f,q} q_q \\ q_{rep} &= 1,0 \cdot 49,5 + 1,0 \cdot 36,0 = 85,5 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Voor de bijkomende doorbuiging geldt: $q_{rep,bij} = 36,0 \text{ kN/m}$.

Bij het ontwerp wordt rekening gehouden met een reductie van de momentcapaciteit van 5% door dwarsbuiging van de onderplaat (zie par. 2.4). Dat wordt gedaan door het ontwerpmoment met eenzelfde percentage te verhogen. Ook krijgt de ligger een zeeg, waardoor slechts de bijkomende doorbuiging van belang is ($u_{bijk} \leq 0,003l$). Er geldt:

$$M_y = 1,05 \cdot \frac{1}{8} q_d l^2 = 1,05 \cdot \frac{1}{8} \cdot 113,4 \cdot 7,2^2 = 772 \text{ kNm}$$

$$V_z = \frac{1}{2} q_d l = \frac{1}{2} \cdot 113,4 \cdot 7,2 = 408 \text{ kN}$$

$$I_y \geq \frac{5q_{rep,bij} l^4}{384E\delta} = \frac{5q_{rep,bij} l^3}{384 \cdot E \cdot 0,003} = \frac{5 \cdot 36,0 \cdot 7200^3}{384 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 0,003} = 278 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Voor deze waarden voldoet de volgende ligger: SFB 270-HE240M+450x12 (afb. 7) met

$M_{y,pl} = 892 \text{ kNm}$; $V_{z,pl} = 1626 \text{ kN}$ en $I_y = 327 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$. Op basis van dit profiel wordt de ligger vervolgens getoetst.



2. Bepaling doorsnedeklasse ligger

Voor de classificatie van de doorsnede van een statisch bepaald opgelegde ligger zijn de bovenflens en het gedrukte deel van het lijf in het veld van belang. Voor de bovenflens geldt formule (3):

$$\beta_{rel} = 1,23 \frac{\frac{1}{2} b_o}{t_o} = 1,23 \frac{\frac{1}{2} \cdot 248}{32} = 4,8 < 10$$

De slankheid van de bovenflens voldoet aan het criterium voor klasse 1 (tabel 1).

Voor het gedrukte deel van het lijf is het nodig de ligging van de neutrale lijn te bepalen. De halveringslijn (plastische neutrale lijn) van de doorsnede ligt in de onderflens van het profiel HEM 240. Er geldt immers: $A_o + A_w < A_o + A_{u;plaat}$ en $A_{u;plaat} < A_{HEM}$, zie afbeelding 8. De afstand z tussen de halveringslijn en de bovenkant van de onderflens volgt uit:

$$A_{HEM} - b_o z = b_o z + A_{u;plaat}$$

$$z = \frac{A_{HEM} - A_{u;plaat}}{2b_o} = \frac{19960 - 5400}{2 \cdot 248} = 29,4 \text{ mm}$$

Het gehele lijf ligt dus in de drukzone. Voor de doorsnede met een plastische spanningsverdeling en $h_o > h_u$ geldt formule (5). Hierin is h_o de hoogte van het gedeelte van het lijf onder druk, gemeten tot de afronding van de bovenflens en h_u de hoogte van het gedeelte van het lijf onder trek.

$$h_o = h - 2t_o - 2r = 270 - 2 \cdot 32 - 2 \cdot 21 = 164 \text{ mm}$$

$$h_u = 0 \text{ mm}$$

$$\zeta_{rel} = 2,46 \frac{h_o}{t_w} \left(\frac{12 - h_u/h_o}{11} \right) = 2,46 \cdot \frac{164}{18} \left(\frac{12 - 0/164}{11} \right) = 24,5$$

Voor de slankheid van het lijf geldt $\zeta_{rel} = 24,5 < 72$, waardoor wordt voldaan aan het criterium voor klasse 1 (tabel 1).

Zowel de bovenflens als het lijf vallen dus in klasse 1, zodat voor het gehele SFB-profiel een plastische spanningsverdeling mag worden aangenomen.

3. Controle capaciteit onderplaat

Methode 1

Bepaling van de minimaal benodigde plaatdikte voor overbrengen moment en dwarskracht.

Eerst worden moment en dwarskracht bepaald (afbeelding 5):

$$M_x = -\frac{1}{4}q(e_1 - e_2) = -\frac{1}{4} \cdot 113(0,370 - 0,248) = -3,45 \text{ kNm/m}$$

$$|V_z| = \frac{1}{2}q = \frac{1}{2} \cdot 113 = 56,7 \text{ kN/m}$$

De plaatdikte t_z volgt uit:

$$t_z = \frac{|V_z| \cdot \sqrt{3}}{f_y} = \frac{56,7 \sqrt{3}}{355} = 0,28 \text{ mm}$$

De plaatdikte t_y volgt uit de evenwichtvergelijking $|M_x| - (t_u - t_y)t_y f_y = 0$. Dat leidt tot de vergelijking

$t_y^2 - t_u t_y + |M_x| / f_y = 0$. Hieruit volgt voor t_y :

$$t_y = \frac{1}{2}t_u \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4|M_x|}{f_y t_u^2}} \right) = \frac{1}{2} \cdot 12 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 3,45 \cdot 10^3}{355 \cdot 12^2}} \right) = 0,87 \text{ mm}$$

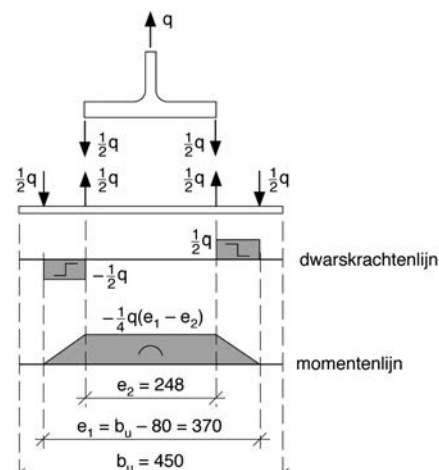
Met deze gevonden dikten geldt: $t_z + 2t_y = 0,28 + 2 \cdot 0,87 = 2,0 \text{ mm} < t_u = 12 \text{ mm}$. De onderplaat is dus voldoende dik om de spanningen door dwarsbuiging op te nemen.

Methode 2

Een andere mogelijkheid was om direct de toetsingsformule (13) te gebruiken:

$$3 \left(\frac{q_{\max}}{f_y t_u} \right)^2 + 2 \frac{(e_1 - e_2) q_{\max}}{t_u f_y} \leq 1$$

$$3 \left(\frac{56,7}{355 \cdot 12} \right)^2 + 2 \frac{(370 - 248)}{12} \frac{56,7}{355 \cdot 12} = 0,27 \leq 1$$



9. Krachtswerking in de onderplaat in dwarsrichting.



4. Controle buigend moment ligger

Bij het controleren van de momentcapaciteit van de middendoorsnede moet rekening worden gehouden met de effecten van dwarsbuiging op de onderplaat en op de onderflens van het HEM-profiel. Doordat er dwarsbuiging optreedt, is van de onderplaat en van de onderflens slechts een gereduceerd gebied beschikbaar voor langsbuiging.

In dit voorbeeld wordt een plastische spanningsverdeling in de doorsnede aangenomen. Dat mag bij een doorsnede van klasse 1 of 2; hier is de klasse 1.

- **Reductie van de onderplaat.** Voor de onderplaat worden de formules (14) tot (18) gebruikt:

$$\mu = \frac{q(e_1 - e_2)}{f_y \cdot t_u^2} = \frac{113,4(370 - 248)}{355 \cdot 12^2} = 0,271$$

$$\lambda = 1 - \sqrt{1 - \mu} = 1 - \sqrt{1 - 0,271} = 0,146$$

$$\psi = 1 - \frac{3\mu^2 \sqrt{3} \cdot t_u + \lambda \cdot \mu (2e_1 + e_2) - \lambda^2 (e_1 - e_2)}{6\mu \cdot b_u}$$

$$\psi = 1 - \frac{3 \cdot 0,271^2 \sqrt{3} \cdot 12 + 0,146 \cdot 0,271 (2 \cdot 370 + 248) - 0,146^2 (370 - 248)}{6 \cdot 0,271 \cdot 450} = 0,944$$

$$A_{u,eff} = \psi \cdot b_u \cdot t_u = 0,944 \cdot 450 \cdot 12 = 5097 \text{ mm}^2$$

- **Reductie van de onderflens.** Ook voor de onderflens mogen de formules (14) tot en met (18) worden gebruikt, echter met $t_u = t_o$; $e_1 = b_o$; $b_u = b_o$ $e_n = e_2 = t_w$:

$$\mu = \frac{q(e_1 - e_2)}{f_y \cdot t_u^2} = \frac{q(b_o - t_w)}{f_y \cdot t_u^2} = \frac{113,4(248 - 18)}{355 \cdot 32^2} = 0,072$$

$$\lambda = 1 - \sqrt{1 - \mu} = 1 - \sqrt{1 - 0,072} = 0,037$$

$$\psi = 1 - \frac{3\mu^2 \sqrt{3} \cdot t_u + \lambda \cdot \mu (2e_1 + e_2) - \lambda^2 (e_1 - e_2)}{6\mu \cdot b_u}$$

$$\psi = 1 - \frac{3 \cdot 0,072^2 \sqrt{3} \cdot 32 + 0,037 \cdot 0,072 (2 \cdot 248 + 18) - 0,037^2 (248 - 18)}{6 \cdot 0,072 \cdot 248} = 0,982$$

$$A_{o,eff} = \psi b_o t_o = 0,982 \cdot 248 \cdot 32 = 7793 \text{ mm}^2$$

De halveringslijn van de effectieve doorsnede ligt ook nu in de onderflens van het profiel HEM 240 omdat $A_o + A_w < A_{o,eff} + A_{u,eff}$ en $tA_{u,eff} < A_o + A_w + A_{o,eff}$. De afstand z tussen de halveringslijn en de bovenkant van de onderplaat volgt weer uit het horizontale plastische evenwicht:

$$z = \frac{A_o + A_w + A_{o,eff} - A_{u,eff}}{\frac{2A_{o,eff}}{t_o}} = \frac{7936 + 4088 + 7793 - 5097}{\frac{2 \cdot 7793}{32}} = 30,2 \text{ mm}$$

Het plastische weerstandsmoment van de effectieve doorsnede $W_{y,pl}$ wordt berekend ten opzichte de halveringslijn:

$$W_{y,pl} = \left(z + \frac{1}{2}t_u\right)A_{u,eff} + \frac{1}{2}z\left(\frac{z}{t_o}A_{o,eff}\right) + \frac{1}{2}(t_o - z) \cdot \left(\frac{t_o - z}{t_o}A_{o,eff}\right) + \left(\frac{1}{2}h - z\right)A_w + \left(h - z - \frac{1}{2}t_o\right)A_o$$

$$W_{y,pl} = \left(30,2 + \frac{1}{2} \cdot 12\right) \cdot 5097 + \frac{1}{2} \cdot 30,2 \cdot \left(\frac{30,2}{32} \cdot 7793\right) + \frac{1}{2}(32 - 30,2) \cdot \left(\frac{32 - 30,2}{32} \cdot 7793\right) + \left(\frac{1}{2} \cdot 270 - 30,2\right) \cdot 4088 + \left(270 - 30,2 - \frac{1}{2} \cdot 32\right) \cdot 7930$$

$$W_{y,pl} = 2,500 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Volgens het tabellenboek is het plastische weerstandsmoment van de volledige, niet-gereduceerde doorsnede $2,513 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$. De reductie van de momentcapaciteit door dwarsbuiging bedraagt in dit voorbeeld slechts 0,5%. De momentcapaciteit van de effectieve doorsnede bedraagt:

$M_{y,pl} = W_{y,pl} \cdot f_y = 2,500 \cdot 10^6 \cdot 355 \cdot 10^{-6} = 888 \text{ kNm}$. Voor de rekenwaarde van het optredend moment geldt: $M_y = 1/8q_d l^2 = 735 \text{ kNm}$. De momentcapaciteit is voldoende.

5. Controle dwarskracht

Voor het opnemen van de maximale dwarskracht bij de opleggingen wordt uitgegaan van het lijf en een deel van van de beide flenzen:

$$A_z = A_{HEM} - 2t_o(b_o - t_w - 2r) = 19960 - 2 \cdot 32(248 - 18 - 2 \cdot 21) = 7928 \text{ mm}^2$$

De dwarskrachtcapaciteit volgt uit formule (20):

$$V_{z,pl} = \frac{1}{3}\sqrt{3}A_z \cdot f_y = \frac{1}{3}\sqrt{3} \cdot 7928 \cdot 355 \cdot 10^{-3} = 1625 \text{ kN}$$

Voor de rekenwaarde van de optredende dwarskracht geldt: $V_z = 408 \text{ kN}$. De dwarskrachtcapaciteit is voldoende.



6. Spanningscontrole bruikbaarheidsgrenstoestand

De kritieke spanningscombinatie van een statisch bepaalde SFB-ligger treedt op in de uiterste vezel aan de bovenzijde van de ligger of aan de onderzijde van de onderplaat bij de lassen. In deze lassen werkt een langsspanning $+\sigma_x$ (trek) en een dwarsspanning $-\sigma_y$ (druk). Voor de incidentele belastingcombinatie zijn de langs- en dwarsmomenten:

$$M_y = \frac{1}{8}ql^2 = \frac{1}{8} \cdot 85,5 \cdot 7,2^2 = 554 \text{ kNm}$$

$$M_x = \frac{1}{2}q \cdot \frac{1}{2}(e_1 - e_2) = -\frac{1}{2} \cdot 85,5 \cdot \frac{1}{2}(370 - 248) \cdot 10^{-3} = -2,61 \text{ kNm/m}$$

De bijbehorende extreme langs- en dwarsspanningen zijn:

$$\sigma_x = \frac{M_y}{I_y} \left(\frac{1}{2}h - z + t_u \right) = \frac{554 \cdot 10^6}{327 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot 270 - 30 + 12 \right) = 198 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_y = \frac{M_x}{I_x} \cdot \frac{1}{2}t_u = \frac{M_x}{\frac{1}{12}bh^3} \cdot \frac{1}{2}t_u = \frac{-2,61 \cdot 10^6}{\frac{1}{12} \cdot 1000 \cdot 12^3} \cdot \frac{1}{2} \cdot 12 = -109 \text{ N/mm}^2$$

Substitutie van de waarden van σ_x en σ_y in formule (2) levert:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2} = \sqrt{198^2 + 198 \cdot 109 + 109^2} = 269 \text{ N/mm}^2 \leq f_y = 355 \text{ N/mm}^2$$

De spanning in de uiterste vezel van de bovenflens is

$$(165/117) \cdot 198 = 279 \text{ N/mm}^2 \leq f_y = 355 \text{ N/mm}^2.$$

In het midden van de onderplaat onder de las is de dwarsbuigspanning σ_y gelijk aan 0, maar de schuifspanning τ is maximaal:

$$\tau = \frac{3}{2} \cdot \frac{\frac{1}{2}q}{t_u} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\frac{1}{2} \cdot 85,5}{12} = 5,3 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau^2} = \sqrt{198^2 - 198 \cdot 0 + 0^2 + 3 \cdot 5,3^2} = 198 \text{ N/mm}^2 \leq f_y = 355 \text{ N/mm}^2$$

Er treedt in geen enkel punt van de doorsnede dus plastische vervorming op tijdens het gebruik.

Daarmee voldoet het profiel aan deze eis.

7. Controle doorbuiging

De bijkomende doorbuiging hoeft niet te worden gecontroleerd omdat dit criterium al is meegenomen bij de bepaling van de profielkeuze.

De doorbuiging in de eindtoestand u_{eind} door de permanente en de veranderlijke belasting is:

$$u_{\text{eind}} = \frac{5q_{\text{rep}} l^4}{384EI_y} = \frac{5 \cdot 85,5 \cdot 7200^4}{384 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 327 \cdot 10^6} = 44 \text{ mm} > 0,004l = 0,004 \cdot 7200 = 29 \text{ mm}$$

De doorbuiging in de eindtoestand voldoet niet, zodat de ligger een zeeg moet krijgen van minimaal 15 mm.



4 Ontwerpgrafieken

Om het ontwerpen van een vloersysteem van kanaalplaten en geïntegreerde ligger te vergemakkelijken zijn grafieken opgesteld. Daaruit kan snel kan worden afgelezen welk stalen profiel benodigd is, of wat de maximale vloer- of liggeroverspanning is bij een gekozen profiel. De grafieken zijn bedoeld als hulp bij het ontwerpen van een vloersysteem. Voor het aanvragen van een bouwvergunning is het altijd noodzakelijk om berekeningen van de stalen liggers en de kanaalplaten te overhandigen.

Onderverdeling

De ontwerpgrafieken zijn onderverdeeld in drie reeksen voor verschillende veranderlijke belastingen (2,5 kN/m², 4,0 kN/m² en 10 kN/m²). In de reeksen staat aparte grafieken voor IFB-, SFB- en THQ-profielen voor twee typen kanaalplaten (200 mm dik en 260 mm dik). Voor de permanente belasting is uitgegaan van een dekvloer van 60 mm die niet constructief samenwerkt met de kanaalplaat en lichte scheidingswanden met een belasting van 0,5 kN/m². Er is aangenomen dat de liggers worden uitgevoerd met een zeeg.

In de grafieken is de invloed van de niet-starre ondersteuning volgens CUR/BmS Aanbeveling 104 meegenomen. De grafieken zijn gemaakt in samenwerking met VBI.

Vloeiende en geknikte curven

De curven zijn het resultaat van twee toetsingscriteria, namelijk: de capaciteit van de geïntegreerde ligger en de capaciteit van de kanaalplaat. De capaciteit van de geïntegreerde ligger loopt via een glijdende schaal. Dit geeft een vloeiende curve.

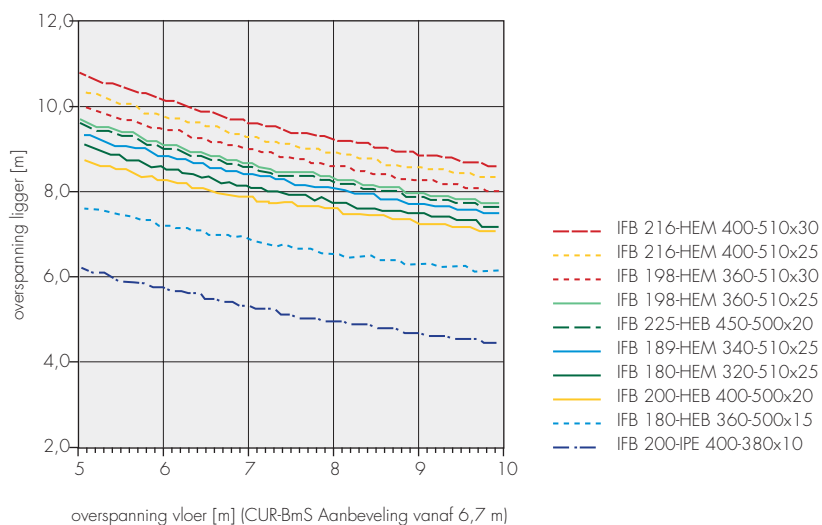
De capaciteit van een kanaalplaat loopt niet via een glijdende schaal. De capaciteit is afhankelijk van het aantal voorspanstrengen. Als bij een bepaalde belasting de capaciteit van de kanaalplaat niet voldoende is, zal er een extra voorspanstreng worden toegevoegd zodat de capaciteit

sprongsgewijs omhoog gaat.

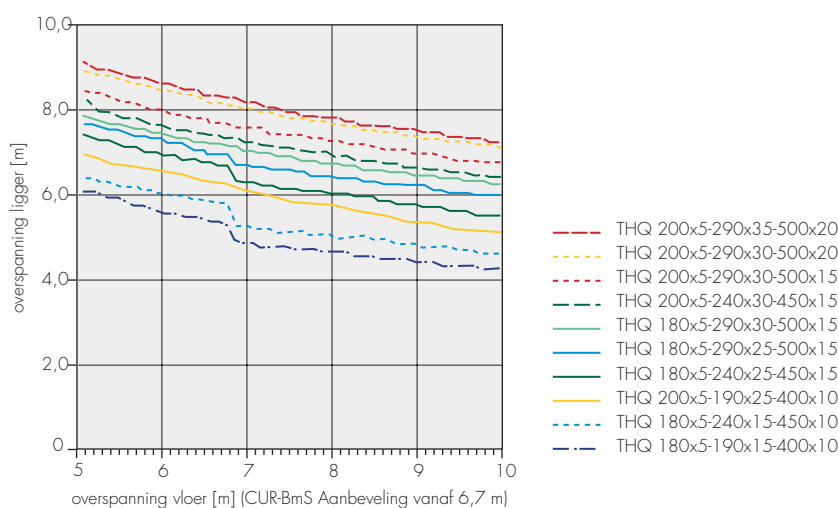
Bij kleine vloeroverspanningen waar de dwarskracht in de kanaalplaat lager of gelijk is aan 35% van de dwarskrachtcapaciteit is alleen het criterium van de ligger beschouwd.

Bij lage dwarskrachten hoeft de CUR/BmS Aanbeveling namelijk niet te worden toegepast en mag worden aangenomen dat de kanaalplaat sterk genoeg is. Bij sommige curven is dit te zien aan een knik in de curve.

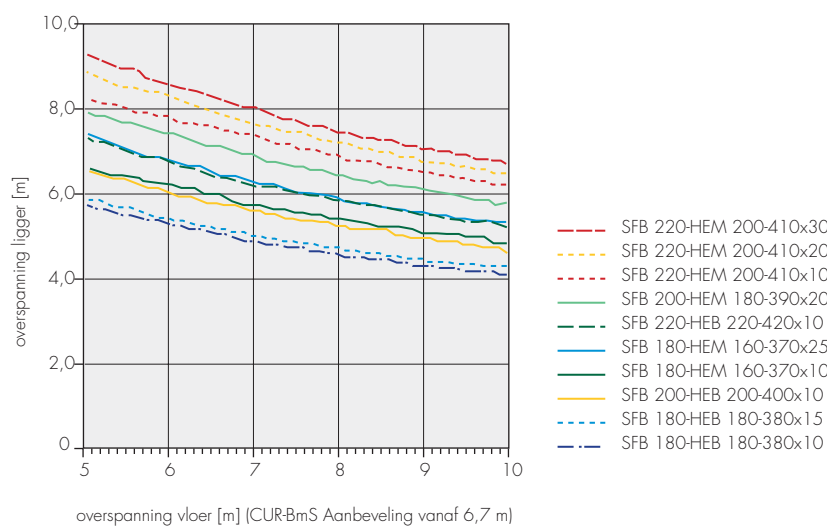
Kanaalplaat 200 / IFB / 2,5 kN/m² (met toog)



Kanaalplaat 200 / THQ / 2,5 kN/m² (met toog)

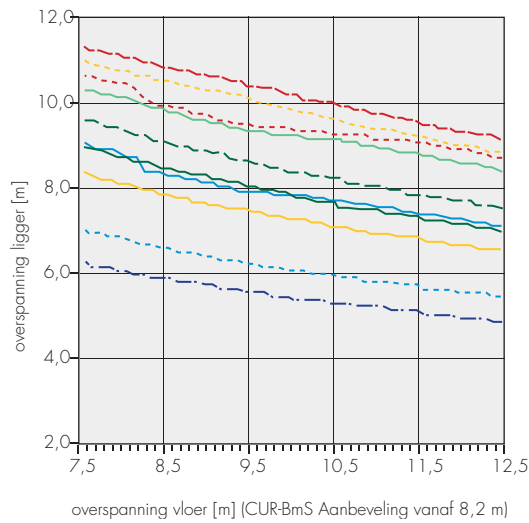


Kanaalplaat 200 / SFB / 2,5 kN/m² (met toog)



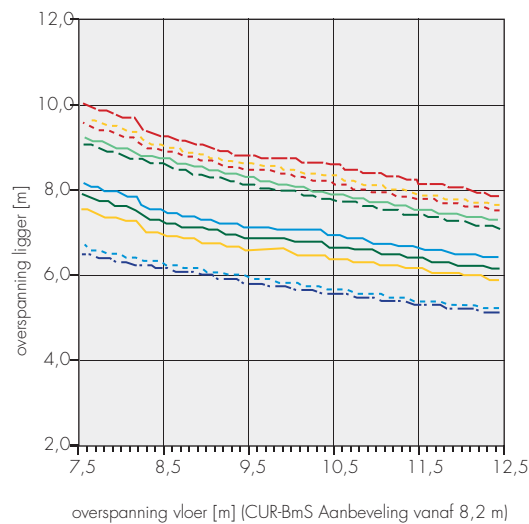


Kanaalplaat 260 / IFB / 2,5 kN/m² (met toog)



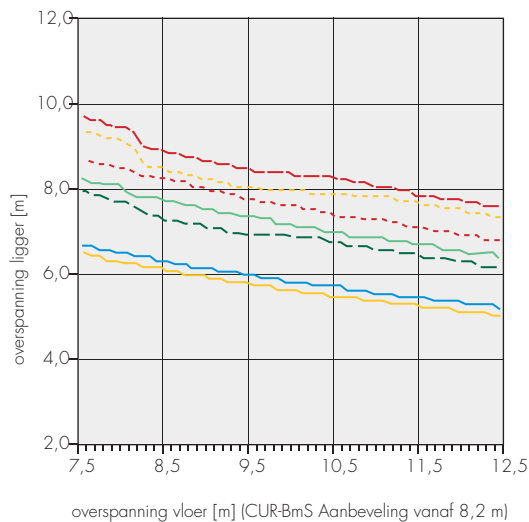
- IFB 286-HEM 550-510x30
- IFB 286-HEM 550-510x25
- IFB 262-HEM 500-510x30
- IFB 262-HEM 500-510x25
- IFB 275-HEB 550-500x20
- IFB 250-HEB 500-500x20
- IFB 270-HEA 550-500x20
- IFB 245-HEA 500-500x20
- IFB 275-IPE 550-420x15
- IFB 250-IPE 500-410x15

Kanaalplaat 260 / SFB / 2,5 kN/m² (met toog)



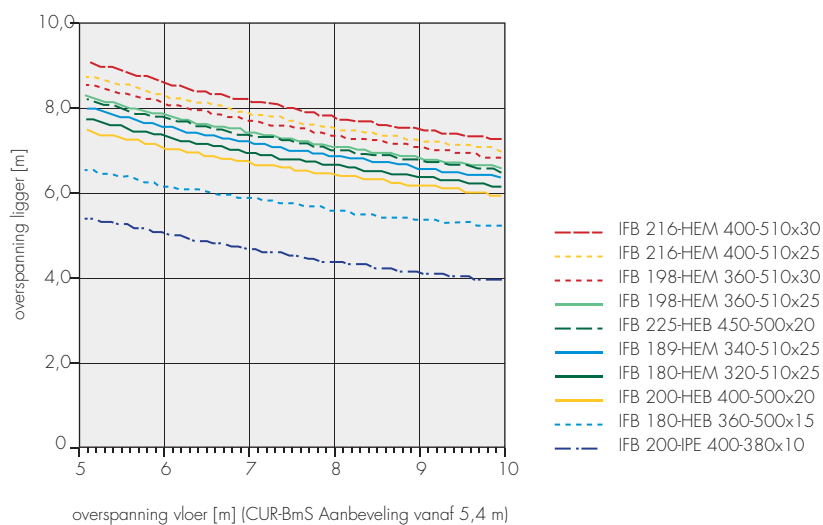
- SFB 240-HEM 240-450x40
- SFB 270-HEM 240-450x30
- SFB 270-HEM 240-450x25
- SFB 270-HEM 240-450x15
- SFB 270-HEM 240-450x10
- SFB 240-HEM 220-430x30
- SFB 240-HEM 220-430x20
- SFB 270-HEM 220-430x10
- SFB 240-HEB 240-440x15
- SFB 240-HEB 240-440x10

Kanaalplaat 260 / THQ / 2,5 kN/m² (met toog)

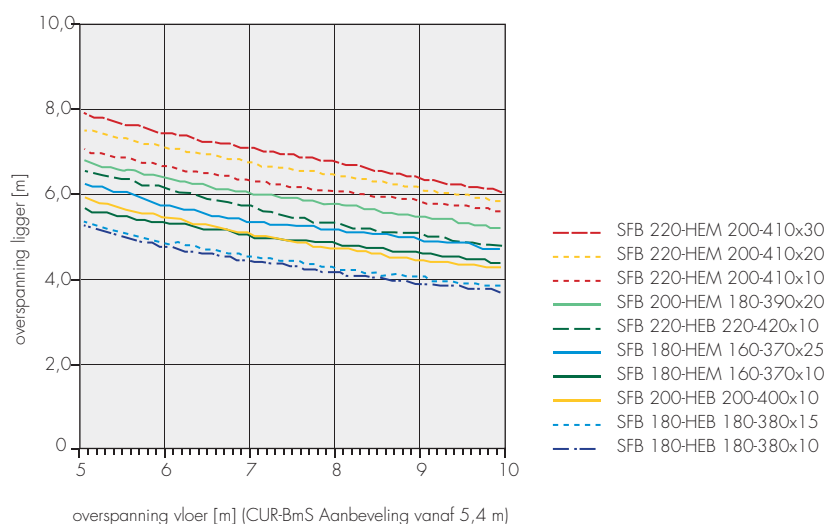


- THQ 265x6-290x35-500x20
- THQ 265x6-290x30-500x20
- THQ 265x6-290x30-500x15
- THQ 265x6-240x30-450x15
- THQ 265x6-240x25-450x15
- THQ 265x6-190x25-400x10
- THQ 265x6-190x20-400x10

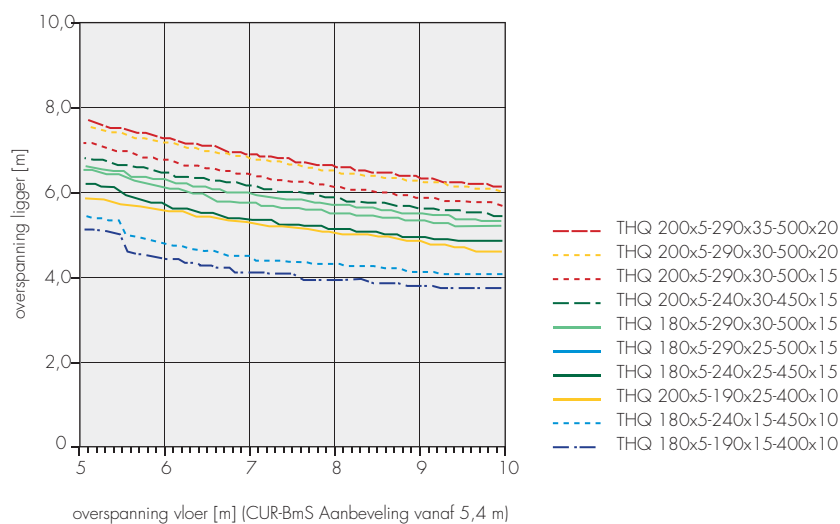
Kanaalplaat 200 / IFB / 4 kN/m² (met toog)



Kanaalplaat 200 / SFB / 4,0 kN/m² (met toog)

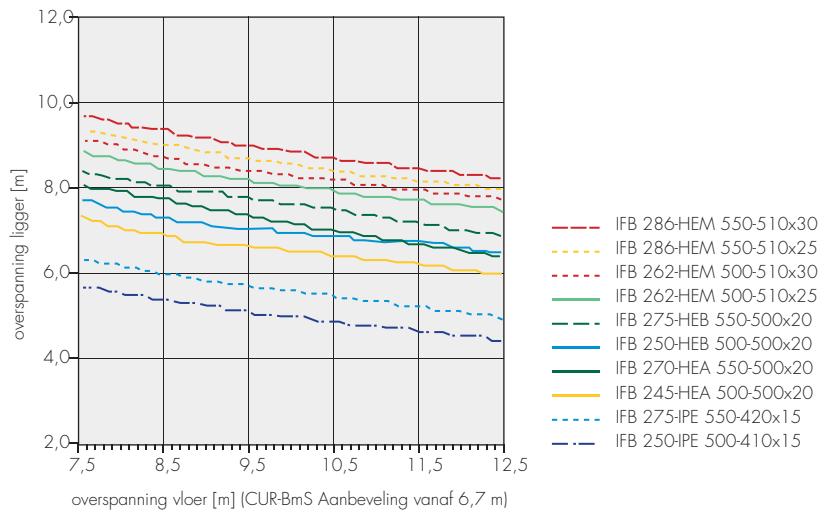


Kanaalplaat 200 / THQ / 4,0 kN/m² (met toog)

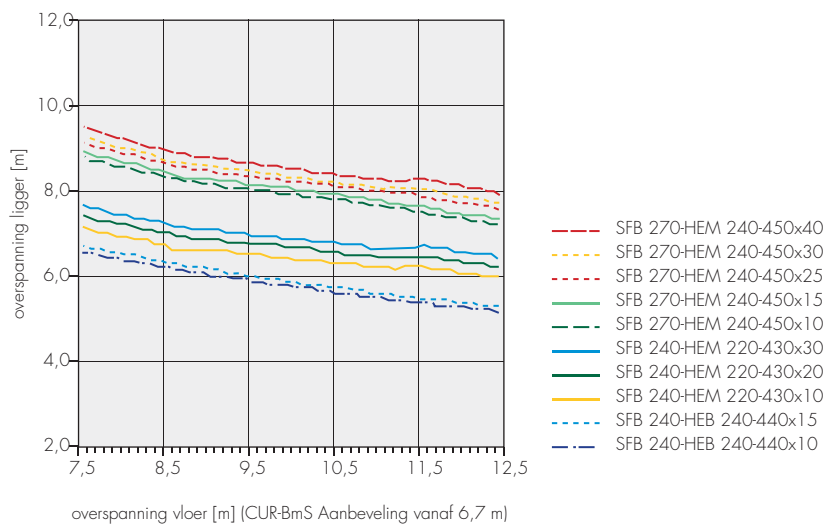




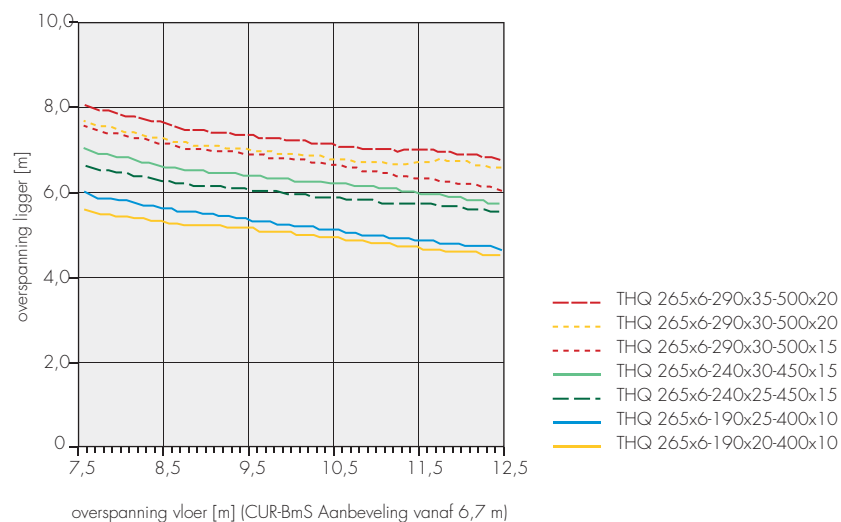
Kanaalplaat 260 / IFB / 4,0 kN/m² (met toog)



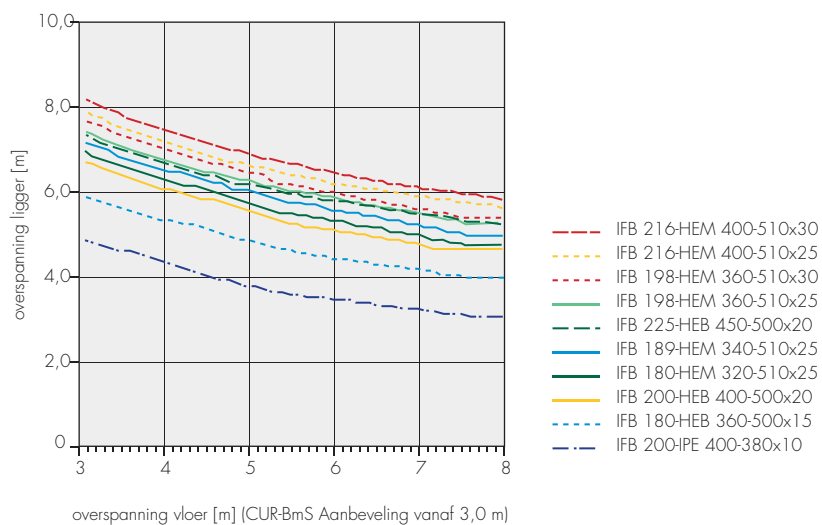
Kanaalplaat 260 / SFB / 4 kN/m² (met toog)



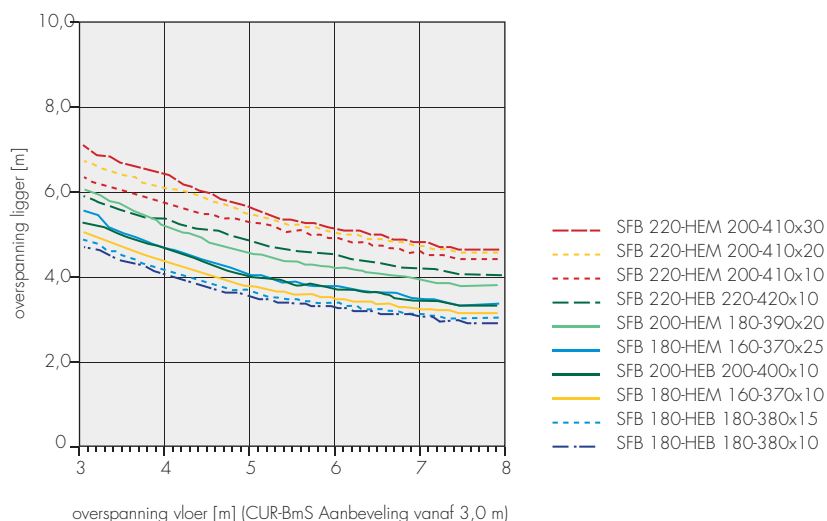
Kanaalplaat 260 / THQ / 4,0 kN/m² (met toog)



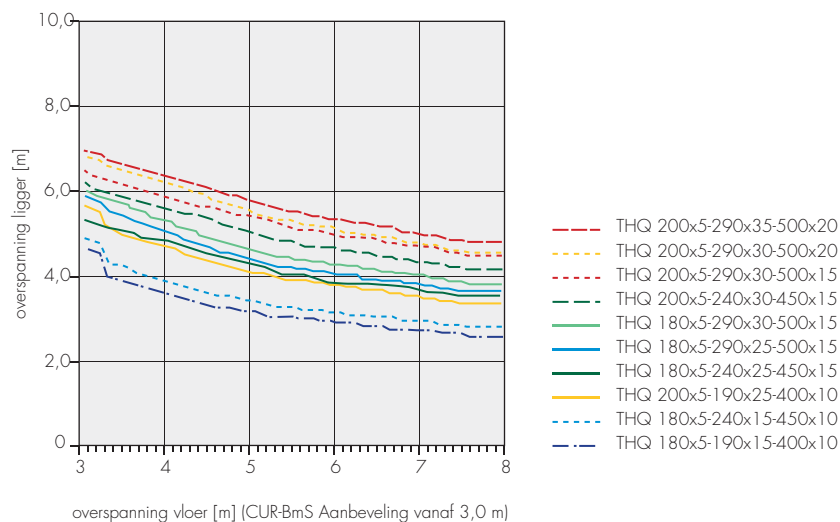
Kanaalplaat 200 / IFB / 10 kN/m² (met toog)



Kanaalplaat 200 / SFB / 10 kN/m² (met toog)

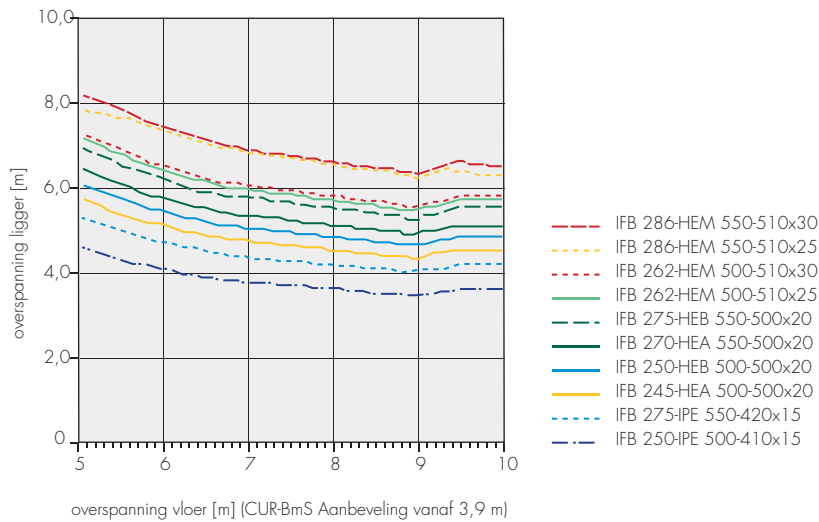


Kanaalplaat 200 / THQ / 10 kN/m² (met toog)

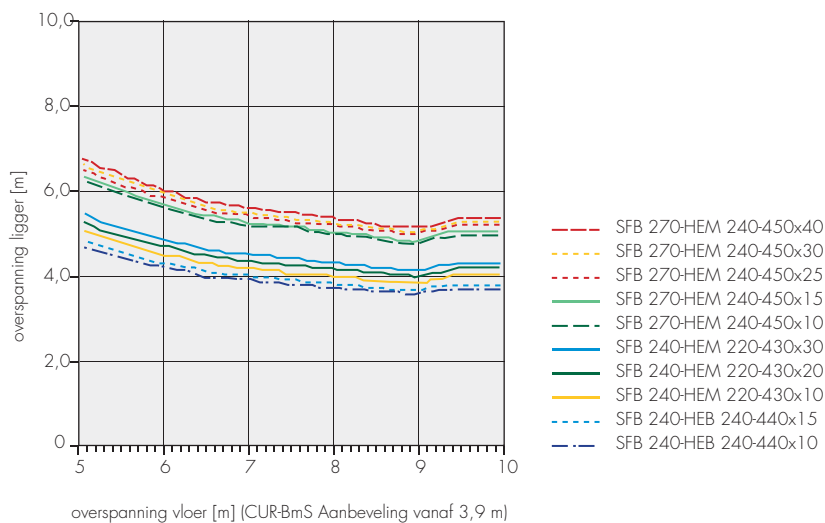




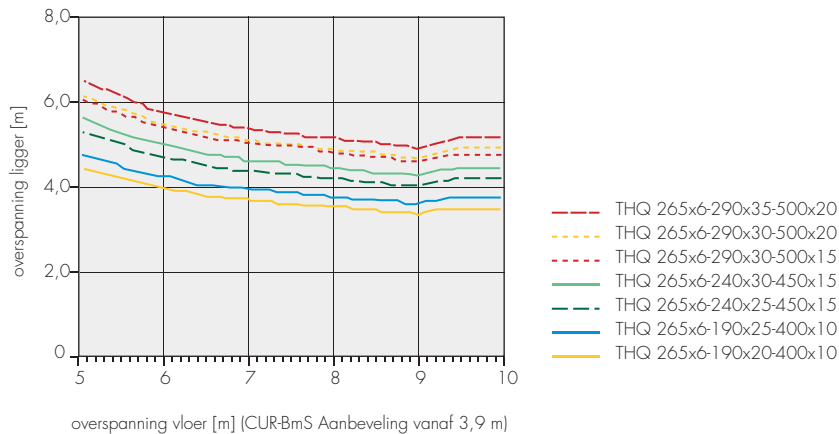
Kanaalplaat 260 / IFB / 10,0 kN/m² (met toog)



Kanaalplaat 260 / SFB / 10 kN/m² (met toog)



Kanaalplaat 260 / THQ / 10,0 kN/m² (met toog)



3 • Brandwerendheid geïntegreerde ligter





Eén van de sterke punten van geïntegreerde stalen liggers in combinatie met kanaalplaten of (hoge) staalplaat-betonvloeren is de brandwerendheid. Dit doordat de liggers aan drie zijden thermisch worden beschermd door het omhullende beton. Dit artikel behandelt de prestaties op het gebied van de brandwerendheid, eerst met een grove benaderingsmethode in aansluiting op NEN 6072 en vervolgens met een genuanceerde door TNO ontwikkelde methode. Met laatstgenoemde methode is scherper te rekenen en kan worden aangetoond dat bepaalde profielen (bijvoorbeeld SFB) 60 minuten kunnen halen zonder brandwerende bescherming van de ligger.

Zonder verdere maatregelen zijn geïntegreerde liggers in combinatie met de vloerplaten minstens 30 minuten brandwerend, sommige typen vaak zelfs 60 minuten. De kanaalplaten zijn 60 minuten brandwerend mits de voorspanning voldoende hoog is geplaatst en de samenhang van de totale vloerconstructie is verzekerd. Deze samenhang is noodzakelijk, omdat de samenhang van de totale constructie de weerstand tegen bezwijken op dwarskracht gunstig beïnvloedt. Een vloerconstructie van kanaalplaten met geïntegreerde stalen liggers kan een brandwerendheid van 120 minuten bereiken [2]. De vloerplaten zelf kunnen vanaf een dikte van 160 mm voldoen aan deze eis door de hoeveelheid en ligging van de voorspanwapening gunstig te kiezen. Dergelijke hogere brandwerendheden kunnen ook door de stalen geïntegreerde liggers worden bereikt indien de belastinggraad voldoende laag is en/of aanvullende maatregelen worden getroffen. De belastinggraad is de belasting bij brand, gedeeld door de opneembare belasting in de uiterste grenstoestand onder normale omstandigheden.

Een effectieve maatregel ter verhoging van de brandveiligheid is het thermisch beschermen van de direct aan brand blootgestelde onderplaat van de ligger met isolatie. Dit verbetert het constructieve gedrag van zowel de geïntegreerde ligger als de kanaalplaten bij de oplegging. Andere oplossing om de brandwerendheid van de ligger te verhogen is langswapening in het om de ligger gestorte beton.

1 Berekeningsmethoden

De vloeigrens – en dus ook de opneembare belasting – van staal neemt af bij temperaturen boven 400 °C [3].

Een gelijkmatig verhit staalprofiel met een belastinggraad $\eta = 0,5$ bezwijkt bij een temperatuur van ongeveer 600 °C. Deze bezwijktemperatuur heet de kritieke temperatuur. Het verband tussen de vloeigrens bij een temperatuur Θ_a en die bij kamertemperatuur luidt (afb. 1):

$$\psi = 1 \quad (\Theta_a \leq 400 \text{ °C}) \quad (1a)$$

$$\psi = \frac{f_{y;\Theta}}{f_{y;20}} = \frac{1,03}{\left(e^{\beta} + 1\right)^{0,26}} \quad (\Theta_a > 400 \text{ °C}) \quad (1b)$$

$$\beta = \frac{\Theta_a - 482}{39,2} \quad (1c)$$

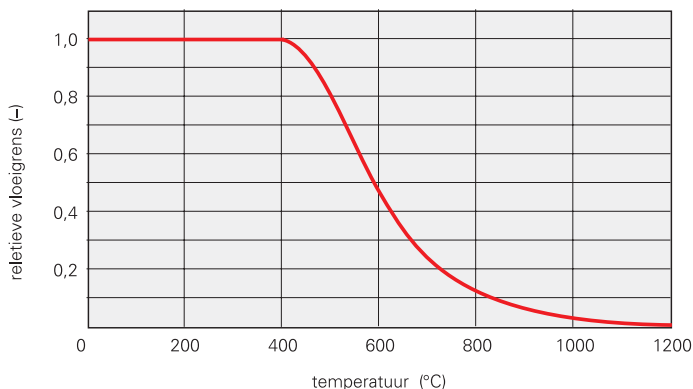
Hierin is:

$f_{y;\Theta}$ vloeigrens bij een staaltemperatuur Θ_a

$f_{y;20}$ vloeigrens bij kamertemperatuur (20 °C)

ψ temperatuurafhankelijke correctiefactor op de vloeigrens

Wanneer de ligger niet in de vloer is geïntegreerd, maar onder de vloer uitsteekt, is de staaltemperatuur gelijkmatig verdeeld met uitzondering van de bovenflens, waar de temperatuur 100 tot 200 °C lager is. Na 30 minuten brand bedraagt de staaltemperatuur ongeveer 800 °C en is de vloeigrens gereduceerd tot ongeveer 12% van de vloeigrens bij kamertemperatuur (afb. 1). Bij een dergelijke 'traditionele'

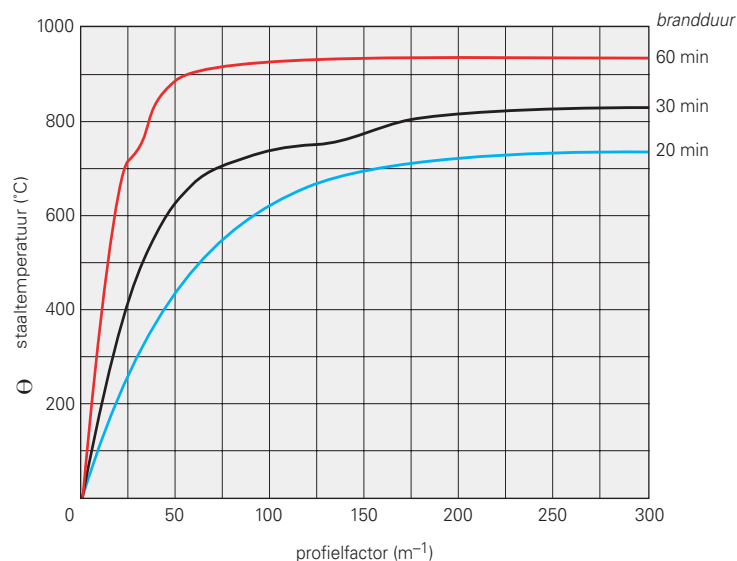


1. Afname van de vloeigrens van staal bij hoge temperaturen.

toepassing van stalen liggers is een brandwerendheid van 30 minuten daarom slechts in uitzonderingssituaties haalbaar. Bij een ligger die in de vloer is geïntegreerd, is de temperatuurverdeling bij brand ongelijkmatig. De bovenflens en een groot deel van het lijf zijn door beton omgeven en blijven daardoor sterk achter in temperatuur. Bij een brand van 120 minuten worden deze delen van het profiel niet warmer dan 400 °C en behouden ze dus volledig hun draagkracht. De onderflens bereikt na 30 minuten brand een temperatuur van ongeveer 500 °C.

Gezien de geringe afname van de sterkte bij deze temperatuur (*afb. 1*) hebben geïntegreerde liggers een brandwerendheid van ten minste 30 minuten. Bij enkelsymmetrische liggers (IFB- en SFB-profielen) is zelfs 60 minuten haalbaar indien de belastinggraad voldoende laag is ($\eta \leq 0,35$). Extra maatregelen zijn nodig bij niet-I-vormige liggers (THQ-profielen), bij I-vormige liggers met $\eta > 0,35$, of bij hogere eisen van 90 of 120 minuten. Deze maatregelen kunnen bestaan uit bescherming in de vorm van een isolerende bekleding, brandwerende coating of versterking met extra wapening.

Een globale beoordeling van de brandwerendheid van

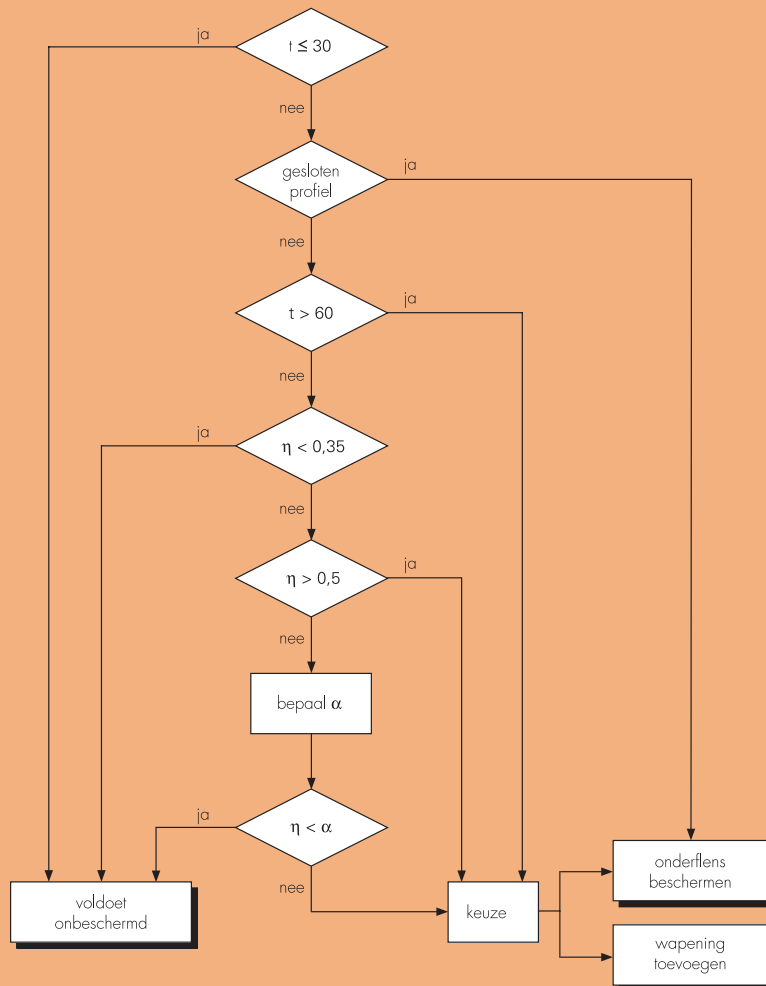


2. Verband tussen de profielfactor P en de staaltemperatuur Θ_a na een brandduur van 20, 30 en 60 minuten.

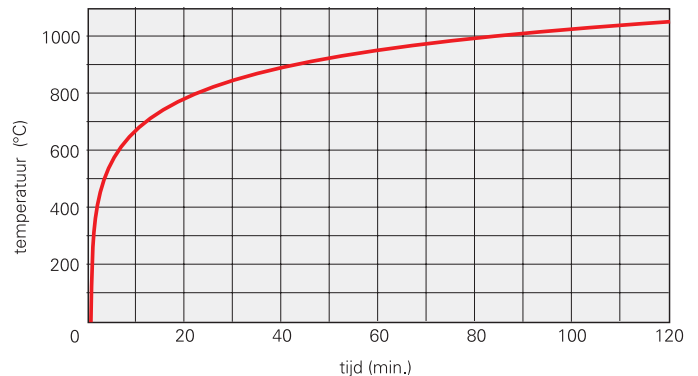
geïntegreerde liggers kan worden uitgevoerd volgens het stroomschema van *afbeelding 3*. Dit geeft drie mogelijke oplossingen:

- onbeschermde onderflens;
- onderflens beschermd met een isolerende bekleding;
- onbeschermde onderflens met extra wapening.

Als uit het stroomschema blijkt dat zonder maatregelen niet wordt voldaan aan de brandwerendheidseis, kan nog een berekening worden gemaakt om de specifieke situatie te beoordelen. Met een berekening is te bepalen of de bescherming achterwege kan blijven of dat toch brandwerende voorzieningen nodig zijn: bekleding, coating of extra wapening. De brandwerendheid van de onbeschermde ligger kan worden berekend met de rekenmethode volgens NEN 6072 ^[13] (paragraaf 4.3.1) of met de rekenmethode volgens TNO ^[14, 15] (paragraaf 4.3.2). Met de rekenmethode volgens NEN 6072 kan behalve de onbeschermde ligger ook de benodigde brandwerende bekleding of coating worden uitgerekend. Bij de methode volgens TNO wordt bij een onbeschermde ligger de draagkracht berekend voor een gegeven brandwerendheidseis.



3. Stroomschema voor de bepaling van de brandwerendheid van geïntegreerde liggers (t = geëiste brandwerendheid; η = belastinggraad, zie formule 2; α = sterktereductie zijnde de momentcapaciteit bij brand gedeeld door de momentcapaciteit bij kamertemperatuur).



4. Temperatuurverloop van de standaardbrand.

2 Rekenmethode NEN 6072

2.1 Algemene opzet

NEN 6072 ^[13] geeft een methode waarmee de brandwerendheid van staalconstructies kan worden bepaald. Deze methode maakt gebruik van profielfactoren en bestaat uit acht stappen ^[18].

1. Bepaal de belasting op de constructie bij brand q_θ .
2. Bepaal de maximaal opneembare belasting bij kamertemperatuur q_{20} .
3. Bepaal de belastinggraad:

$$\eta = \frac{q_\theta}{q_{20}} \quad (2)$$

4. Bepaal de correctiefactor κ , afhankelijk van de wijze van belasten en van de wijze van verhitten. Voor driezijdig verhitte liggers geldt: $\kappa = 0,7$ (statisch bepaald) en $\kappa = 0,6$ (statisch onbepaald).
5. Bepaal de kritieke temperatuur Θ_{kr} (> 400 °C), zie ook *afbeelding 1*:

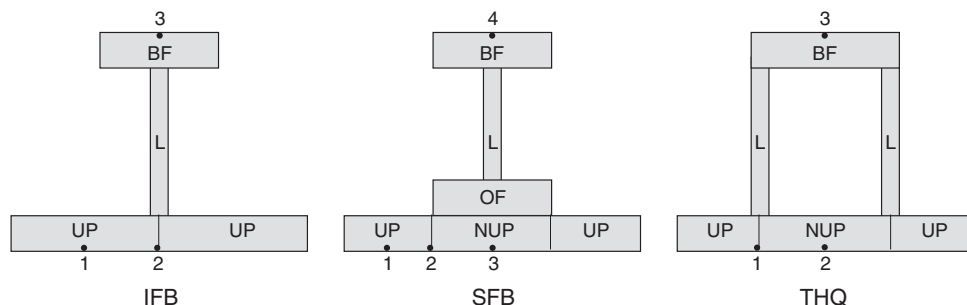
$$\theta_{kr} = 392 \ln \left[\left(\frac{1}{0,8925 (\kappa \eta)^{3,846}} \right) - 1 \right] + 482 \quad (3)$$

6. Bepaal de profielfactor P (m^{-1}), dat is de verhouding tussen de aan verhitting blootgestelde oppervlakte van het staalprofiel en het volume. Hoe hoger de profielfactor P is, des te sneller warmt het profiel op. Voor de meest gangbare profielen is de profielfactor in tabellen te vinden.

7. Bepaal de staaltemperatuur Θ_a bij de vereiste brandwerendheid. Een dergelijke berekening is met de hand niet goed mogelijk; daarvoor is de hulp van computerprogramma's als Brawesta nodig.

8. Controleer of $\Theta_a \leq \Theta_{kr}$.

Computerberekeningen conform NEN 6072 laten een verband zien tussen de profielfactor P en de staaltemperatuur Θ_a , zoals in *afbeelding 2*. Hieruit blijkt onder meer dat, indien de kritieke temperatuur 600 °C bedraagt (corresponderend met een belastinggraad $\eta = 0,5$), de profielfactor P kleiner dan $45 m^{-1}$ moet zijn om 30 minuten brandwerendheid te halen.



5. Ligging van de karakteristieke punten.

2.2 Geïntegreerde liggers

De methode met profielfactoren geeft nauwkeurige resultaten voor constructie-elementen met een gelijkmatige temperatuurverdeling over de doorsnede. Bij geïntegreerde liggers is de verdeling van de temperatuur over de profieldoorsnede echter niet gelijkmatig. Om deze methode voor geïntegreerde liggers toch te kunnen gebruiken, moeten vereenvoudigde, conservatieve aannamen voor de profielfactor worden gedaan.

De profielfactor van alleen de onderflens van een geïntegreerde ligger volgt uit:

$$P = \frac{b_u + 2t_u}{b_u t_u} \quad (4)$$

Voor de gangbare liggers volgt hieruit een profielfactor $P = 50$ à 80 m^{-1} . Dit is weliswaar laag vergeleken met de profielfactor van gewalste liggers die onder de vloer uitsteken, maar niet in alle gevallen voldoende laag om met onbeklede geïntegreerde liggers een brandwerendheid van 30 minuten te halen. Dit komt, omdat de methode met profielfactoren geen rekening houdt met het warmteaccumulerende vermogen van het beton en ook niet met de lagere

temperaturen in het lijf en in de bovenflens. Dit leidt tot een onderschatting van de brandwerendheid en daarmee tot een niet-optimaal ontwerp.

Een betere bepaling van de brandwerendheid van onbeklede geïntegreerde liggers is mogelijk met computerprogramma's die zijn gebaseerd op de eindige-elementenmethode. Hierbij is een onderscheid te maken tussen gesloten en open profielen. De rekenmethode volgens TNO (zie hoofdstuk 3) is gebaseerd op zo'n computerprogramma.

3 Rekenmethode TNO

Bouwen met Staal heeft begin 2002 aan TNO Bouw de opdracht gegeven tot het opstellen van eenvoudige rekenregels voor het bepalen van de brandwerendheid van geïntegreerde liggers. De Nederlandse regelgeving voorziet namelijk niet in goede rekenregels om de brandwerendheid van geïntegreerde liggers te bepalen ^[14, 15] zoals hierboven is toegelicht.

Doel van de door TNO ontwikkelde rekenmethode is dat deze niet uitgaat van een uniforme temperatuurverdeling in de ligger zoals NEN 6072 voorschrijft, maar van een meer

Tabel 1. Gebruik van de karakteristieke punten.

		IFB	SFB	THQ
UP	controle dwarsbuiging onderplaat	2	2	1
(N)UP	doorsnedereductie axiaal moment	2	2	1
UP	bijdrage aan axiaal moment	1	1	1
NUP	bijdrage aan axiaal moment	-	3	2
OF	controle dwarsbuiging onderflens (temperatuur lineair interpoleren)	-	3-4	-
OF	doorsnedereductie axiaal moment onderflens (temperatuur lineair interpoleren)	-	3-4	-
L	lijf (temperatuur lineair interpoleren)	2-3	3-4	2-3
BF	bovenflens	3	4	3

Tabel 2. Karakteristieke temperaturen (in °C) voor karakteristieke punten in enkele SFB-liggers.

type	<i>t = 30 minuten</i>				<i>t = 60 minuten</i>			
	1	2	3	4	1	2	3	4
HE140M-350x10	557	486	438	58	800	745	700	152
HE140M-350x15	523	468	425	55	780	735	694	148
HE160B-360x10	581	531	480	46	821	785	739	119
HE160M-370x15	519	462	413	47	777	730	684	128
HE180B-380x10	578	527	472	36	821	785	736	91
HE180M-390x10	551	477	418	40	798	741	687	105
HE200B-400x15	540	497	445	29	800	768	721	68
HE200M-410x10	549	473	411	33	798	741	683	84
HE220B-420x10	572	517	456	26	819	782	728	56
HE220M-430x10	546	470	404	29	797	739	679	67
HE240B-440x10	567	510	441	26	816	776	713	53
HE240M-450x25	451	404	345	26	724	685	629	55



realistische temperatuurverdeling. Daardoor zijn de voordelen van dit type liggers beter te benutten. Bij deze rekenmethode kan met een plastische doorsnede-berekening de draagkracht bij brand worden gecontroleerd.

Hieronder (par. 3.1) worden eerst het toepassingsgebied en achtergronden van de rekenmethode toegelicht. Daarna worden de rekenregels behandeld:

- temperatuurverdeling in de doorsnede (par. 3.2);
- sterkte van de onderdelen van de doorsnede (par. 3.3);
- toetsing van de onderplaat (par. 3.4);
- toetsing van de plastisch-momentcapaciteit (par. 3.5). Dit kan met een eenvoudige methode met een tabel (par. 3.5.1) of met een doorsnede-berekening (par. 3.5.2).

3.1 Toepassingsgebied en achtergronden van het onderzoek

De rekenmethode beperkt zich tot de in Nederland meest gangbare liggertypen, te weten IFB, SFB en THQ. Van deze typen zijn alle gebruikelijke afmetingen, zoals opgenomen in de database van het programma Brawesta, benaderd; de afrondingsstralen zijn verwaarloosd. Nieuwe typen geïntegreerde liggers – met name de GL-ligger met schuine lijfplaat – lijken wat betreft de brandwerendheid sterk op THQ-liggers en kunnen dan ook op analoge wijze worden berekend.

Het opstellen van de nieuwe rekenregels is ondersteund met eindige-elementensimulaties met het programma DIANA, waarin het temperatuurverloop in de doorsneden afhankelijk van de tijd is gesimuleerd, uitgaande van de standaardbrand (*afb. 4*). Aan de hand van deze simulaties zijn ontwerptabellen met karakteristieke temperaturen opgesteld die kunnen worden gebruikt in de berekening van het buigend moment. Deze tabellen vermelden ook de karakteristieke temperaturen om de draagkracht te toetsen in dwarsrichting: de afdracht van de oplegreactie van de vloer naar het liggerlijf via de onderplaat van de ligger. De temperaturen in de tabellen zijn bepaald voor 30, 60, 90 en 120 minuten blootstelling aan de standaardbrand.

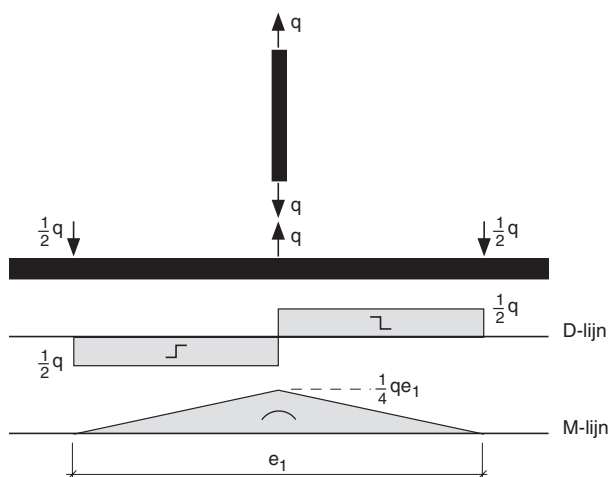
De hier gepresenteerde rekenregels zijn uitsluitend geldig voor statisch bepaalde geïntegreerde liggers op twee steunpunten. De constructeur toetst of het buigend moment in het veld kan worden opgenomen en controleert de krachtsafdracht in dwarsrichting. De rekenmethode voorziet niet in regels voor de toetsing van steunpuntsmomenten bij statisch onbepaalde liggers omdat er onvoldoende kennis is over plooi bij het steunpunt in combinatie met verhoogde temperaturen. De verwachting is dat bij hogere temperaturen de gevoeligheid voor plooi toeneemt. Hier staat tegenover dat bij het steunpunt de temperaturen in de ligger vaak lager zijn dan in het veld. Een genuanceerde uitspraak was in het kader van de onderzoeksopdracht niet mogelijk, zodat de rekenmethode zich moet beperken tot statisch bepaalde geïntegreerde liggers. Dwarskracht hoeft niet te worden getoetst omdat deze meestal niet maatgevend is; de dwarskracht is niet maatgevend als deze bij kamertemperatuur ook niet maatgevend is.

3.2 Rekenregels voor de temperatuurverdeling in de doorsnede

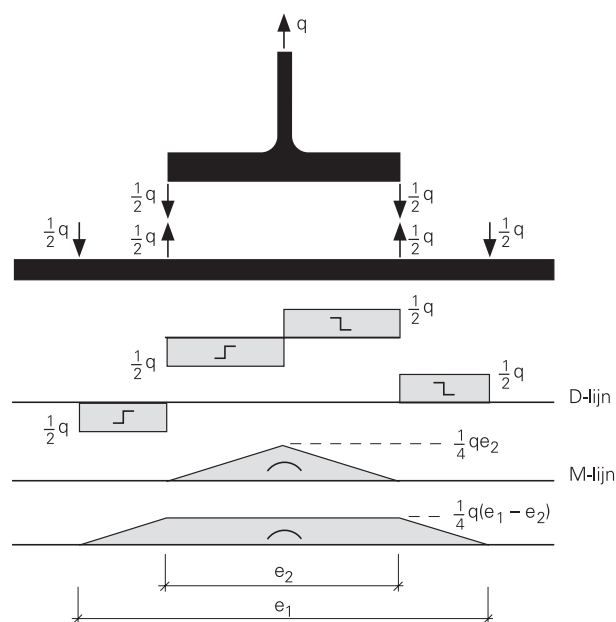
Als invoer voor de rekenregels dienen de karakteristieke temperaturen die verkregen zijn uit de eindige-elementensimulaties. Deze temperaturen zijn bepaald voor de maatgevende punten in de doorsnede. De ligging van deze punten in de doorsneden is aangegeven in *afbeelding 5*.

De karakteristieke punten worden in de rekenregels gebruikt zoals staat aangegeven in *tabel 1*. De karakteristieke temperaturen die met de simulaties zijn bepaald, zijn in tabelvorm beschikbaar (zie *Bouwen met Staal 169* voor een samenvatting; zie het TNO-rapport ^[14] voor de volledige serie tabellen; ze zijn ook te downloaden van www.bouwenmetstaal.nl).

Tabel 2 geeft een voorbeeld met enkele karakteristieke temperaturen. De gemeten en de berekende temperaturen komen goed overeen, zo is in het onderzoek aangetoond ^[14].



6. Krachtsafdracht in de onderflens van een IFB-ligger.



7. Krachtsafdracht in de onderflens en onderplaat van een SFB-ligger.

Doordat meetresultaten variëren kan de voorspelde temperatuur soms hoger of lager liggen, maar over het algemeen geven de aangenomen thermische eigenschappen een goed beeld van de warmte-indringing.

De rekenmethode voor het bepalen van de draagkracht van geïntegreerde liggers bij brand maakt gebruik van de karakteristieke temperaturen om het plastisch moment te berekenen. Deze plastische momenten zijn in tabelvorm beschikbaar [14]. Ze kunnen worden gebruikt wanneer is voldaan aan het criterium voor dwarsbuiging (formule 5).

3.3 Rekenregels voor de sterkte van de onderdelen van de doorsnede

Het verloop van de vloeigrens van de stalen ligger als functie van de tijd is beschreven in NEN 6072 (afb. 1) met formule (1). Voor elk onderdeel van de doorsnede waarvoor een temperatuur is bepaald (tabel 2) kan zo de gereduceerde vloeigrens worden bepaald.

3.4 Rekenregels voor de toetsing van de onderplaat

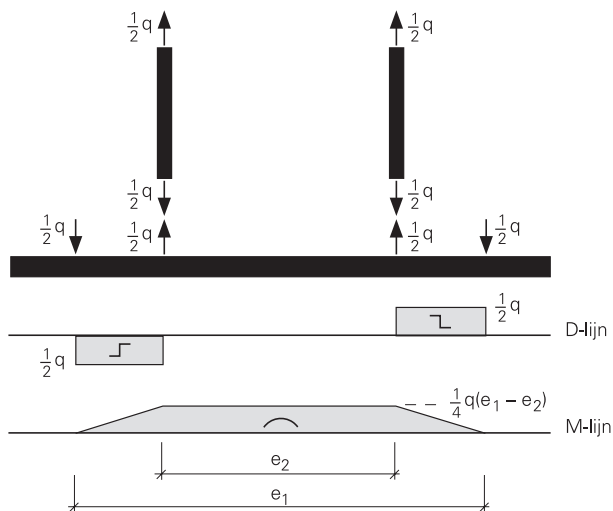
Doel van de controle van de draagkracht in dwarsrichting is

om te bepalen of de onderplaat (en bij een SFB-ligger ook de onderflens) voldoende sterk is om de oplegreactie van de vloer naar het liggerlijf te brengen. Door de krachtsafdracht van de oplegging van de kanaalplaat via de onderplaat naar het lijf ontstaan namelijk spanningen door buiging en afschuiving in dwarsrichting in de onderplaat en bij een SFB-ligger ook in de onderflens.

De controle van de onderplaat verloopt als volgt:

1. Bepaal uit tabel 1 waar het maatgevende punt in de onderplaat zit voor het gekozen liggertype (UP, dus punt 2 bij IFB of SFB en punt 1 bij THQ), zie afbeelding 5.
2. Lees de temperatuur in het maatgevende punt voor de geëiste brandwerendheid uit de tabel (bijvoorbeeld tabel 2, zie de uitgebreide tabellen op www.bouwenmetstaal.nl).
3. Bepaal de bij de temperatuur in het maatgevende punt horende gereduceerde vloeigrens $f_y(\theta_n)$ volgens formule (1).
4. Toets of de C-waarde ≤ 1 volgens formule (5):

$$C = 3 \left(\frac{q_{\max}}{f_y(\theta_n)t_u} \right)^2 + 2 \frac{(e_1 - e_2)}{t_u} \frac{q_{\max}}{f_y(\theta_n)t_u} \leq 1 \quad (5)$$



8. Krachtsafdracht in de onderflens van een THQ-ligger.

Hierin is:

- $q_{\max}$ grootste waarde van de dwarskracht van de twee oplegzijden;
- e_1, e_2 volgen uit *afbeelding 6, 7 en 8*;
- $f_y(\Theta_n)$ vloeigrens bij de karakteristieke temperatuur in punt n volgens formule (1);
- t_u dikte van de onderflens of onderplaat.

Deze formule is hetzelfde als formule (13) uit hoofdstuk 2 van dit Technisch Dossier, alleen nu wordt de vloeispanning van het staal onder brandomstandigheden gereduceerd. Hieronder wordt de toepassing van formule (5) voor de drie genoemde liggertypen uitgewerkt.

IFB-ligger

De krachtsafdracht in de onderflens van de IFB-ligger staat getekend in *afbeelding 6*. Het maatgevende punt is voor IFB-liggers punt 2 (zie *tabel 1*). Met deze temperatuur wordt de vloeigrens van het staal $f_y(\Theta_2)$ bepaald. Formule (5) kan worden gehanteerd met $e_2 = 0$. Verder geldt $q_{\max} = q/2$.

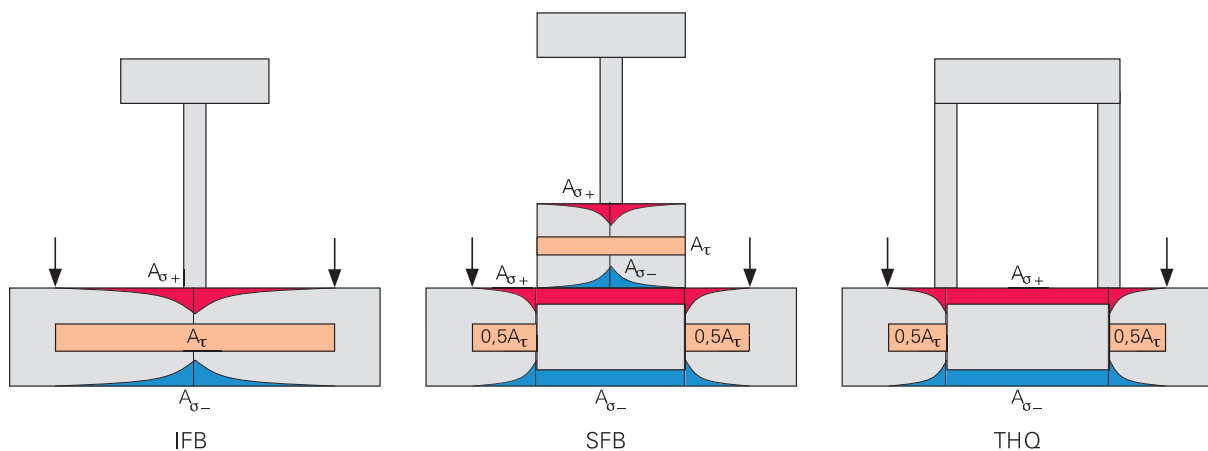
SFB-ligger

De krachtsafdracht in onderflens en onderplaat van de SFB-ligger staat getekend in *afbeelding 7*. Bij de SFB-ligger moeten zowel de onderflens als de onderplaat worden gecontroleerd volgens formule (5). Het karakteristieke punt voor de onderplaat is punt 2. Voor de onderflens kan de temperatuur worden bepaald door lineaire interpolatie tussen de punten 3 en 4. Voor de vloeigrens moet dus voor de controle van de onderplaat $f_y(\Theta_2)$ worden genomen; voor de onderflens kan $f_y(\Theta_{\text{flens}})$ worden genomen, óf als veilige waarde $f_y(\Theta_3)$. De temperatuur van de onderflens wordt als volgt geïnterpoleerd:

$$\Theta_{\text{flens}} = \Theta_3 - \frac{\frac{1}{2} t_{\text{flens}} + t_{\text{plaat}}}{h_{\text{tot}}} (\Theta_3 - \Theta_4) \quad (6)$$

Hierin is:

- Θ_{flens} temperatuur in het hart van de onderflens;
- Θ_3, Θ_4 temperatuur in punten 3 en 4;
- t_{flens} dikte van de onderflens;
- t_{plaat} dikte van de onderplaat;
- h_{tot} totale hoogte van de doorsnede.



9. Doorsnedereductie door buiging en afschuiving in dwarsrichting (profiel niet op schaal getekend).

Tabel 3. Reductie van het plastisch weerstandsmoment (in %) van enkele SFB-liggers bij verschillende brandwerendheden.

type	C = 1,0				C = 0,0			
	30	60	90	120	30	60	90	120
HE140M-350x10	92,5	47,2	25,2	16,7	97,0	56,2	29,1	19,1
HE140M-350x15	92,5	53,1	26,9	17,6	97,5	63,9	31,7	20,4
HE160B-360x10	93,4	43,1	24,2	17,2	96,7	52,4	28,6	20,0
HE160M-370x15	93,3	54,5	27,9	18,7	98,0	65,4	32,8	21,6
HE180B-380x10	94,2	42,6	24,2	17,6	97,3	51,6	28,3	20,2
HE180M-390x10	93,1	48,9	26,4	18,7	98,1	58,2	30,3	21,0
HE200B-400x15	94,4	50,1	26,2	18,9	98,1	62,1	31,3	22,1
HE200M-410x10	93,1	49,3	26,5	19,0	98,4	58,6	30,2	21,3
HE220B-420x10	94,8	42,1	23,8	17,6	98,1	50,9	27,6	20,0
HE220M-430x10	93,1	49,7	26,6	19,1	98,7	59,0	30,3	21,4
HE240B-440x10	95,1	43,8	24,2	18,0	98,5	53,0	28,1	20,4
HE240M-450x25	94,6	69,9	34,9	22,2	99,6	82,1	41,8	25,8



Voor zowel de onderplaat als de onderflens geldt $q_{\max} = q/2$. Uit de geometrie volgt dat voor de onderflens in formule (5) de term $e_1 - e_2$ moet worden vervangen door e_2 .

THQ-ligger

De krachtsafdracht in de onderflens van de THQ-ligger staat getekend in *afbeelding 8*. Bij de THQ-ligger is punt 1 maatgevend voor de karakteristieke temperatuur. Daarmee wordt de vloeigrens $f_{y1}(\Theta_1)$ bepaald. De doorsnedecontrole wordt gedaan met formule (5), waarbij geldt $q_{\max} = q/2$.

3.5 Rekenregels voor de toetsing van de plastisch-momentcapaciteit

Voor het bepalen van de plastisch-momentcapaciteit van een geïntegreerde ligger zijn er twee methoden: een vereenvoudigde bepaling met een tabel, en een doorsnedeberkening. In beide gevallen moet het plastisch (axiaal) moment worden gereduceerd door de sterkteafname bij verhoogde temperatuur.

In beide gevallen moet worden getoetst of de plastisch-momentcapaciteit groter is dan het bij het belastinggeval brand (volgens NEN 6702) optredende maximale moment in het veldmidden.

3.5.1 Vereenvoudigde bepaling van de plastisch-momentcapaciteit met een tabel

In de tabellen zijn per profiel de plastische weerstandsmomenten (als functie van de brandwerendheid) gegeven voor $C = 0,0$ en $C = 1,0$. Deze weerstandsmomenten zijn weer gegeven als percentage van het plastisch weerstandsmoment bij kamertemperatuur. In *tabel 3* zijn van enkele SFB-liggers de waarden gegeven.

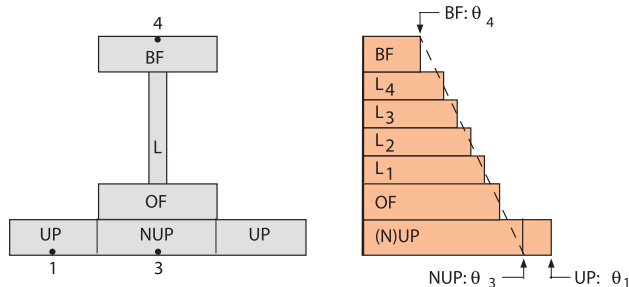
De plastische momenten M_{pl} voor $C = 0,0$ en $C = 1,0$ kunnen als volgt worden bepaald:

$$M_{pl} = \text{tabelwaarde} \cdot W_{pl;20} \cdot f_{y;20} \quad (7)$$

Indien M_{pl} voor $C = 0,0$ en $C = 1,0$ bekend zijn, volgt door lineaire interpolatie de waarde van M_{pl} bij de werkelijke waarde van C , die bepaald is met formule (5). In het geval van SFB-liggers zijn er twee waarden voor C , namelijk C_{plaat} en C_{flens} . In dat geval is het een veilige benadering om van deze twee waarden de grootste te nemen en daarmee te interpoleren. Tevens geldt voor alle liggertypen dat het bepalen van M_{pl} bij $C = 1,0$ een veilige waarde oplevert.

3.5.2 Doorsnedeberkening van de plastisch-momentcapaciteit

De bijdrage van de onderflens aan de momentcapaciteit van de ligger moet worden gereduceerd vanwege de spanningen in dwarsrichting. De spanningsverdeling in de onderflens door buiging en afschuiving in dwarsrichting moet worden bepaald door de flens te beschouwen als een uitkragende ligger met de aansluiting op het lijf als oplegpunt. Voor het beoordelen van de positieve momentcapaciteit (in het veld) mag worden uitgegaan van de plastische spanningsverdeling in de onderflens, omdat deze flens in axiale richting onder trek staat. Zonder het vloeicriterium volgens Huber-Hencky te overschrijden kan in gebied $A_{\sigma+}$ de volledige vloeigrens in axiale richting worden toegelaten (*afb. 9*). De doorsnede van de onderflens moet worden gereduceerd met $A_{\sigma-}$ en A_{τ} . In het overige gebied kan de volledige vloeigrens in axiale richting worden toegelaten. De doorsnede wordt opgedeeld gedacht in stukken met elk een karakteristieke temperatuur (*afb. 5*). De bijbehorende temperaturen zijn uit de tabellen af te lezen. Voor het bepalen van de doorsnedereductie mag worden aangenomen dat de reductie door dwarskracht verwaarloosbaar klein is. De doorsnedereductie in het uitstekende plaatdeel (UP) kan worden bepaald door het oppervlak onder de parabolische kromme te bepalen. In het niet-uitstekende plaatdeel (NUP) kan de doorsnedereductie worden bepaald door $A_{\sigma-}$ van het totaal af te trekken.



10. Bepaling van de vloeigrens in een opgedeelde doorsnede voor een SFB-ligger.

Per liggertype verloopt de bepaling van de gereduceerde doorsnede van de onderplaat (en onderflens bij SFB) – die nodig is ter bepaling van de plastisch-momentcapaciteit – verschillend, zoals hieronder beschreven.

IFB, bepaling van de gereduceerde doorsnede

De werkzame doorsnede van het uitstekende plaatdeel (UP) in axiale richting mag worden bepaald volgens:

$$A_{\text{uitst.plaat;eff}} = \left(1 - C \left(\frac{1}{6} - \frac{10}{b_{\text{plaat}}} \right) \right) t_{\text{plaat}} b_{\text{plaat}} \quad (8)$$

Hierin is:

- C volgt uit formule (5);
- b_{plaat} totale breedte van de onderplaat in mm;
- t_{plaat} dikte van de onderplaat in mm.

SFB, bepaling van de gereduceerde doorsnede

Bij een geïntegreerde ligger bestaande uit een walsprofiel waaronder een onderplaat is gelast, moet zowel de doorsnede van de onderplaat worden gereduceerd als de doorsnede van de onderflens van het walsprofiel.



- Voor de *plaat* (het uitstekende plaatdeel en het niet-uitstekende plaatdeel) geldt:

$$A_{\text{uitst.plaat;eff}} = \left(1 - C_{\text{plaat}} \left(\frac{1}{\delta} - \frac{10}{b_{\text{plaat}} - e_2} \right) \right) t_{\text{plaat}} (b_{\text{plaat}} - e_2) \quad (9a)$$

$$A_{\text{nietuitst.plaat;eff}} = \left(1 - \frac{1}{2} C_{\text{plaat}} \right) t_{\text{plaat}} e_2 \quad (9b)$$

Hierin is:

- C_{plaat} volgt uit formule (5);
- b_{plaat} totale breedte van de onderplaat in mm;
- e_2 totale breedte van de onderflens in mm;
- t_{plaat} dikte van de onderplaat in mm.

- Voor de onderflens geldt:

$$A_{\text{uitst.plaat;eff}} = \left(1 - \frac{1}{\delta} C_{\text{flens}} \right) t_{\text{flens}} e_2 \quad (9c)$$

Hierin is:

- C_{flens} volgt uit formule (5);
- e_2 totale breedte van de onderflens in mm;
- t_{flens} dikte van de onderflens in mm.

THQ, bepaling van de gereduceerde doorsnede

De werkzame doorsnede in axiale richting mag worden bepaald volgens:

$$A_{\text{uitst.plaat;eff}} = \left(1 - C \left(\frac{1}{\delta} - \frac{10}{b_{\text{plaat}} - e_2} \right) \right) t_{\text{plaat}} (b_{\text{plaat}} - e_2) \quad (10a)$$

$$A_{\text{nietuitst.plaat;eff}} = \left(1 - \frac{1}{2} C \right) t_{\text{plaat}} e_2 \quad (10b)$$

Hierin is:

- C volgt uit formule (5);
- b_{plaat} totale breedte van de onderplaat in mm;
- e_2 hart-op-hart afstand tussen de lijfplaten in mm;
- t_{plaat} dikte van de onderplaat in mm.

Plastisch-momentcapaciteit op basis van de gereduceerde doorsnede

Nadat A_{eff} (gereduceerde doorsnede) is bepaald, is de plastisch-momentcapaciteit te berekenen door de doorsnede op te delen in de bovenflens, het lijf (in vier gelijke lagen), de onderflens (in het geval van de SFB ligger), en de onderplaat. Omdat de temperatuur van de onderplaat over de breedte varieert, is de onderplaat opgedeeld in een uitstekend plaatdeel (UP) en een niet-uitstekend plaatdeel (NUP). Elk oppervlak heeft een uniforme temperatuur. De vloeigrens in de oppervlakken in het lijf en in de onderflens wordt bepaald door de temperaturen in deze vlakken lineair over de hoogte te interpoleren tussen punt 3 en punt 4 (*afb. 10*). De waarden van $f_y(\Theta)$ worden bepaald volgens formule (1). Met de gereduceerde oppervlakken kan nu de ligging van de neutrale lijn in de doorsnede worden berekend voor het bepalen van het plastisch moment.

De kracht per gedeelte van het oppervlak is:

$$N = A_{\text{eff}} f_y \quad (11)$$

Hierin is:

- N resulterende kracht voor een gedeelte van de doorsnede;
- A_{eff} effectieve oppervlakte van een gedeelte van de doorsnede;
- f_y vloeigrens in het gedeelte van de doorsnede.

De hoogte van de neutrale lijn is zodanig dat de resulterende kracht boven deze lijn (druk) en onder deze lijn (trek) even groot zijn, waardoor de totale normaalkracht gelijk aan nul is: $\sum N = 0$.

Wanneer de ligging van de neutrale lijn bekend is, wordt het plastisch moment M_{pl} bepaald als som van de bijdragen aan het moment door de verschillende krachten in de doorsnede.

4 Rekenvoorbeeld

Gegeven

Een kantoorgebouw met geïntegreerde liggers type SFB HE200B-400x15 (afb. 11) in S355 en kanaalplaten. Het eigen gewicht van de liggers bedraagt $1,1 \text{ kN/m}$; ze liggen onderling op afstanden van $7,2 \text{ m}$ en overspannen $4,6 \text{ m}$. Het eigen gewicht van de kanaalplaatvloer bedraagt $5,5 \text{ kN/m}^2$. Gerekend wordt met een momentane variabele belasting van $0,5 \cdot 2,5 = 1,25 \text{ kN/m}^2$.

Gevraagd

Geëist wordt een brandwerendheid van 60 minuten. Er moet gebruik worden gemaakt van de methode van TNO.

Uitwerking

De brandwerendheid wordt getoetst met de rekenmethode van TNO.

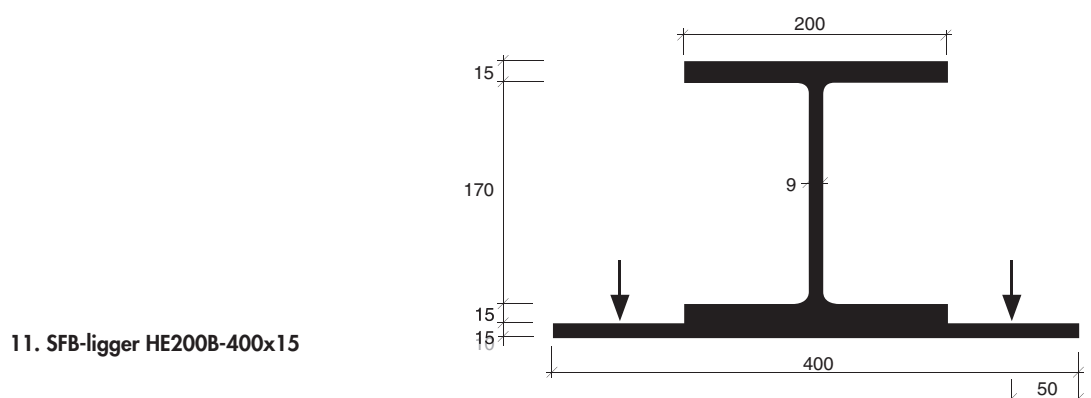
Uit de gegevens volgen de belasting op de ligger bij brand

$q_d = 7,2(5,5 + 1,25) + 1,1 = 49,7 \text{ kN/m}$ en het moment $M_d = 49,7 \cdot 4,6^2 / 8 = 131 \text{ kNm}$. Het gewicht van de vloer op de liggers is $q_{\max} = 48,6 \text{ kN/m}$.

Voor een brandwerendheid van 60 minuten kunnen de temperaturen van de karakteristieke punten uit een tabel worden afgelezen (tabel 2). Met formule (1) wordt hiermee voor elk van deze punten de vloeigrens bepaald. De resultaten staan in tabel 4.

Tabel 4. Temperatuur en vloeigrens in de karakteristieke punten voor SFB-ligger HE200B-400x15.

punt	1	2	3	4
$\Theta_{\text{punt}} (60 \text{ min.})$ (°C)	800	768	721	68
$f_y(\Theta)$ (N/mm ²)	44,4	54,8	74,9	355





4.1 Toetsing onderplaat en onderflens

Onderplaat

Voor punt 2 geldt: $f_y = 54,8 \text{ N/mm}^2$. C_{plaat} volgt uit formule (5):

$$C_{\text{plaat}} = 3 \left(\frac{q_{\text{max}}}{f_y(\theta_n) t_u} \right)^2 + 2 \frac{(e_1 - e_2)}{t_u} \frac{q_{\text{max}}}{f_y(\theta_n) t_u} = 3 \left(\frac{\frac{1}{2} 48,6}{54,8 \cdot 15} \right)^2 + 2 \frac{300 - 200}{15} \frac{\frac{1}{2} 48,6}{54,8 \cdot 15} = 0,397 \leq 1$$

(voldoet)

Onderflens

Voor de onderflens moet de temperatuur worden bepaald door lineaire interpolatie tussen de punten 3 en

4. Indien de controle met de temperatuur in punt 3 al voldoet, is deze interpolatie in principe overbodig.

Echter de juiste waarde van C_{plaat} is wel van belang voor het toepassen van de vereenvoudigde methode voor de bepaling van het axiaal moment.

Zonder temperatuurinterpolatie geldt voor punt 3: $f_y = 74,9 \text{ N/mm}^2$. C_{flens} volgt uit formule (5).

(De term $(e_1 - e_2)$ moet voor de onderflens worden vervangen door e_2):

$$C_{\text{flens}} = 3 \left(\frac{q_{\text{max}}}{f_y(\theta_n) t_u} \right)^2 + 2 \frac{e_2}{t_u} \frac{q_{\text{max}}}{f_y(\theta_n) t_u} = 3 \left(\frac{\frac{1}{2} 48,6}{74,9 \cdot 15} \right)^2 + 2 \frac{200}{15} \frac{\frac{1}{2} 48,6}{74,9 \cdot 15} = 0,578 \leq 1$$

(voldoet)

Mét temperatuurinterpolatie wordt dan gevonden:

$$\theta_{\text{flens}} = \theta_3 - \frac{\frac{1}{2} t_{\text{flens}} + t_{\text{plaat}}}{h_{\text{tot}}} (\theta_3 - \theta_4)$$

$$\theta_{\text{flens}} = 721 - \frac{\frac{1}{2} 15 + 15}{215} (721 - 68) = 653 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Voor de onderflens geldt: $f_y = 117 \text{ N/mm}^2$. C_{flens} volgt dan uit formule (5):

$$C_{\text{flens}} = 3 \left(\frac{\frac{1}{2} 48,6}{117 \cdot 15} \right)^2 + 2 \frac{200}{15} \frac{\frac{1}{2} 48,6}{117 \cdot 15} = 0,370 \leq 1$$

(voldoet)

4.2 Toetsing plastisch-momentcapaciteit

De capaciteit van het plastisch moment kan worden bepaald met een vereenvoudigde methode met tabellen of een handmatige doorsnede-berekening.

Vereenvoudigde methode met tabel

In een tabel [14] zijn de plastische weerstandsmomenten gegeven voor $C = 0,0$ en $C = 1,0$. Een veilige benadering is het weerstandsmoment voor $C = 0,397$ (de grootste waarde van C_{plaat} en C_{flens}) te bepalen via lineaire interpolatie.

Uit tabel 3 volgt voor $C = 0,0$: $M_{\text{pl}} = W_{\text{pl}} f_y = 0,621 W_{\text{pl};20} f_y$. Voor $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$ en $W_{\text{pl};20} = 8,22 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$ leidt dit tot $M_{\text{pl}} = 181 \text{ kNm}$. Voor $C = 1,0$ volgt: $M_{\text{pl}} = W_{\text{pl}} f_y = 0,501 W_{\text{pl};20} f_y = 146 \text{ kNm} > M_d = 131 \text{ kNm}$.

Voor $C = 0,397$ wordt dan door interpolatie gevonden $M_{\text{pl}} = 167 \text{ kNm}$.

Indien de waarde van C voor de onderplaat duidelijk hoger ligt dan van de onderflens is de interpolatie zeer veilig en kan in dat geval winst worden behaald met een handmatige berekening.

Handmatige doorsnede-berekening

De doorsnedereductie volgens formule (9) leidt tot:

$$A_{\text{UP;ef}} = \left(1 - C_{\text{plaat}} \left(\frac{1}{6} - \frac{10}{b_{\text{plaat}} - e_2} \right) \right) t_{\text{plaat}} (b_{\text{plaat}} - e_2) =$$
$$\left(1 - 0,397 \left(\frac{1}{6} - \frac{10}{400 - 200} \right) \right) 15 \cdot (400 - 200) = 2861 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{NUP;ef}} = \left(1 - \frac{1}{2} C_{\text{plaat}} \right) t_{\text{plaat}} e_2 = \left(1 - \frac{1}{2} 0,397 \right) 15 \cdot 200 = 2405 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{flens;ef}} = \left(1 - \frac{1}{6} C_{\text{flens}} \right) t_{\text{flens}} e_2 = \left(1 - \frac{1}{6} 0,370 \right) 15 \cdot 200 = 2815 \text{ mm}^2$$

Doorsnede-beschouwing:

Per gedeelte van het oppervlak kan de plastische normaalkracht worden bepaald (zie tabel 5).

De totale plastische doorsnedekracht is de som van de plastische normaalkrachten in de afzonderlijke vlakjes en bedraagt 2181,5 kN. De helft van deze kracht (1090,8 kN) is iets groter dan de kracht die bovenflens levert (1065,0 kN). Hiermee valt de neutrale lijn in het lijf. Voor de ligging de neutrale lijn vanaf de bovenzijde van het profiel geldt:

$$z_{\text{tot}} = t_{\text{flens}} + \left(\frac{0,5 N_{\text{pl,tot}} - N_{\text{pl,BF}}}{N_{\text{pl,l1}}} \right) \frac{170}{4} = 15 + \left(\frac{1090,8 - 1065,0}{135,6} \right) \frac{170}{4} = 23,1 \text{ mm}$$

Een somming van de bijdragen van de normaalkrachten aan het plastisch moment resulteert in $M_{\text{pl}} = 162 \text{ kNm} (> M_d)$.



4.3 Conclusie

Het lijkt vreemd dat met een doorsnedeberkening een lagere waarde voor M_{pl} wordt gevonden dan met de vereenvoudigde methode. Het verschil wordt veroorzaakt doordat bij de doorsnedeberkening de afrondingsstralen niet zijn meegenomen. Hierdoor valt M_{pl} zo'n 3% lager uit. Indien de waarden voor C_{plaat} en C_{flens} sterk verschillen zal met de doorsnedeberkening een gunstiger waarde voor M_{pl} worden verkregen. Beide methoden voor het axiaal moment leveren een moment M_{pl} op dat groter is dan M_d . De ligger SFB HE200B-400x15 voldoet dus voor een brandwerendheid van 60 minuten.

Bij een toetsing van de brandwerendheid volgens NEN 6072 zou de brandwerendheid uitkomen op slechts 26 minuten.

Tabel 5. Bepaling van de plastische normaalkracht en het plastisch moment per deel van het oppervlak.

	A_{ef} (mm ²)	θ (°C)	f_y (N/mm ²)	N_{pl} (kN)	z (mm)	M_{pl} (kNm)
BF	3000	68	355	1065	15,6	16,6
L1	382	178	355	136	13,2	1,8
L2	383	307	355	136	55,7	7,6
L3	382	436	341	130	97,9	12,7
L4	383	566	204	78,1	141	11,0
OF	2815	653	117	329	169	55,6
NUP	2405	721	74,9	180	184	33,1
UP	2861	800	44,4	127	184	23,4



In 2007 brengt Bouwen met Staal een spreadsheet uit waarmee een snelle en eenvoudige toetsing van geïntegreerde stalen liggers kan worden uitgevoerd bij brand én onder normale omstandigheden. Deze spreadsheet zal zijn te downloaden van www.bouwenmetstaal.nl

Foto: Christiaan Richters



Literatuur

1. A.H. Hamerlinck en W.H. Verburg, *Praktijkhandboek Staalbouw. Toepassingen en details in staal*, paragraaf 6.4 Staalskeletverdiepingbouw, uitgave WEKA Business Publishers, 2000.
2. J.W.P.M. Brekelmans, B.W.E.M. van Hove en J.H.H. Fellingner, *Vloeren van kanaalplaten met geïntegreerde liggers. Ontwerp, vervaardiging en toetsing* (CUR-BmS rapport 2001-2), uitgave CUR en Bouwen met Staal, Gouda, 2001.
3. A.W.A.M.J. van de Bogaard en C.H. van Eldik, *Verdiepingbouw in staal en beton – Staalskelet en kanaalplaatvloeren*, manuscript tweede herziene druk, uitgave Bouwen met Staal, Rotterdam, 2004.
4. *Voegen in geprefabriceerde vloeren* (CUR rapport 136), uitgave CUR, Gouda, 1988.
5. *NEN 6720* (TGB 1990. Voorschriften beton. Constructieve eisen en rekenmethoden (VBC 1995)), 1995.
6. *NEN 6702* (TGB 1990. Belastingen en vervormingen), 2001.
7. Vraag & Antwoord, vraag 175, *Bouwen met Staal* 173 (2003), p. 53.
8. *NEN 6770* (TGB 1990. Staalconstructies. Basiseisen en basisrekenregels voor overwegend statisch belaste constructies), tweede druk, 1997.
9. *NEN 6771* (TGB 1990. Staalconstructies. Stabiliteit), 2000.
10. *Multi-Storey Buildings in Steel. Design Guide for Slim Floors with Built-in Beams* (rapport 83), uitgave ECCS, 1995.
11. W.H. Verburg, 'Geïntegreerde liggers. Rekenmodel voor de doorsnedecontrole volgens NEN 6770', *Bouwen met Staal* 107 (1992), p. 7-12.
12. *Produktrichtlijn voor de toepassing van Dycore spanvloeren in de utiliteitsbouw* (dossier 2075), uitgave Dycore, Oosterhout, 1989.
13. *NEN 6072* (Rekenkundige bepaling van de brandwerendheid van bouwdelen. Staalconstructies), 1991, met wijzigingsblad A2, 2002.
14. A.J. Breunese en J.H.H. Fellingner, *Brandwerendheid van geïntegreerde liggers* (TNO-rapport 2002-CVB-R06136), uitgave TNO, Delft, 2002.
15. A.J. Breunese, J.H.H. Fellingner en A.F. Hamerlinck, 'Geïntegreerde liggers 60 minuten brandwerend zonder bekleding I?', *Bouwen met Staal* 169 (2002), p. 46-53.
16. H. Bode en J. Stengel, *Untersuchung des Tragverhaltens bei Flachendecken-Systemen (Slim Floor Konstruktionen) mit verschiedener Ausbildung der Platten und Verschiedener Lage der Stahlträger* (Forschungs für die Praxis P261), uitgave Studiengesellschaft Stahlanwendung, Düsseldorf, 1997.
17. H.W. Bennenk en R. Klein Holte, 'Niet-star ondersteunde kanaalplaten', *Cement* 58 (2006), p. 63-67.
18. A.F. Hamerlinck en L. Twilt, Brandwerendheid van staalconstructies, *Bouwen met Staal* 110 (1993), p. 9-14



Technisch Dossier #2

Vloeren van kanaalplaten met geïntegreerde stalen liggers

Technische Dossiers informeren constructeurs, (bouwkundig) ontwerpers, overheden en studenten over constructieve en bouwtechnische vraagstukken. Deskundigen vertellen over de achtergrond van de onderwerpen, de bestaande, nieuwe of vernieuwde rekenregels en normen én over hun omgang met het onderwerp in de praktijk. Het eerste deel uit deze reeks, Wateraccumulatie, verscheen in februari 2006.

Vloeren van kanaalplaten met geïntegreerde stalen liggers

Dit Technisch Dossier vormt een aanvulling op CUR/BmS Aanbeveling 104 'Vloeren van kanaalplaten met geïntegreerde liggers' uit 2006.

Deze aanvulling is toegespitst op de stalen ligger, die in Aanbeveling 104 globaal wordt behandeld. De dimensionering en toetsing van de ligger worden uitvoerig beschreven; met grafieken is de capaciteit van een vloersysteem voor verschillende vloer-liggercombinaties snel af te lezen. Ook zet dit dossier berekening van de brandwerendheid uiteen. Beide berekeningsmethoden – dimensionering en toetsing én brandwerendheid – worden toegelicht met een rekenvoorbeeld.



Bouwen met Staal
Boerhaavelaan 40
2713 HX Zoetermeer
Postbus 190
2700 AD Zoetermeer
tel. (079) 353 12 77
fax (079) 353 12 78
info@bouwenmetstaal.nl
www.bouwenmetstaal.nl

ISBN 978-90-72830-71-5



9 789072 830715

BOUWEN MET STAAL

Bouwen met Staal stimuleert het gebruik van staal in de bouw en is dé onafhankelijke kennisorganisatie, die alle partijen in de bouw ondersteunt bij het toepassen van staal. Bouwen met Staal initieert onderzoek voor de kwaliteitsverbetering van stalen bouwproducten en ontwerp- en bouwprocessen met staal en werkt mee aan de totstandkoming van regelgeving voor staaltoepassingen. Daarnaast verzorgt Bouwen met Staal de promotie, voorlichting en educatie voor een breder én beter gebruik van staal. Tot de producten en diensten behoren opleidingen en cursussen, studieboeken, het vakblad *Bouwen met Staal*, projectadvies en de Helpdesk, de Nationale Staalprijs en de Nationale Staalbouwdag.

Bouwen met Staal: platform en partner voor het bouwen met staal.