

Geïntegreerde liggers 60 minuten brandwerend zonder bekleding!?



Kantoorgebouw Equinox Office in Den Haag:
een modern kantoorgebouw met geïntegreerde
liggers en kanaalplaatvloeren.

ir. A.J. Breunese en ir. J.H.H. Fellingner

Arnoud Breunese en Joris Fellingner werken als onderzoeker bij het Centrum voor Brandveiligheid van TNO Bouw, Rijswijk.

dr.ir. A.F. Hamerlinck

Ralph Hamerlinck is senior adviseur bij Bouwen met Staal, Rotterdam en directeur van Adviesbureau Hamerlinck, Roosendaal.

De toepassing van staal als draagconstructie in de verdiepingbouw – gebouwen met twee of meer bouwlagen – heeft de afgelopen tien jaar een sterke ontwikkeling doorgemaakt. De tendens van de laatste jaren gaat naar meer toepassing in gebouwen met drie tot vijf bouwlagen (*afb. 1*). Een belangrijke impuls voor deze ontwikkeling was de introductie in 1990 van een nieuwe bouwwijze met een geïntegreerd vloersysteem bestaande uit geïntegreerde stalen liggers met kanaalplaten. Bij geïntegreerde stalen liggers met kanaalplaten is de ligger in de vloerhoogte opgenomen en steekt de ligger niet onder de vloer uit. De kanaalplaten liggen op een verbrede onderflens van zo'n 15 mm dikte. Het grote voordeel van deze bouwwijze is dat er onder de vloer een obstakelvrije zone ontstaat, waar de installateur zijn installaties gemakkelijk kan aanleggen. Doordat de stalen ligger aan drie zijden door beton wordt omsloten, verloopt de opwarming tijdens brand aanzienlijk trager dan bij stalen liggers die onder de vloer uitsteken. De brandwerendheid bedraagt meestal 30 minuten en voor sommige typen geïntegreerde liggers zelfs 60 minuten. Met eenvoudige maatregelen is aan hogere eisen te voldoen. Hierbij is de dunst verkrijgbare brandwerende bekleding, bespuiting of verf vaak al voldoende voor een brandwerendheid van 120 minuten. De kosten voor brandwerende bekleding liggen in de orde van een factor 5 lager dan bij een traditionele staalconstructie. Dit verklaart, samen met de geringe constructiehoogte en de vrijheid voor installaties, het succes van deze bouwwijze. In de afgelopen jaren zijn vooral de in *afbeelding 2* aangegeven liggertypen toegepast in Nederland. De THQ- of hoedligger is opgebouwd uit vier stalen platen die aan elkaar zijn gelast. De IFB-ligger is een gehalveerd walsprofiel met een ondergelaste plaat en de SFB-ligger is een walsprofiel met een ondergelaste plaat. Dit artikel beperkt zich in het vervolg tot deze drie typen liggers.

Bouwbesluit 2003

Het Bouwbesluit 2003 – dat per 1 januari 2003 van kracht wordt – stelt voor verdiepinggebouwen eisen aan onder meer de brandwerendheid van de hoofdconstructie. Het bezwijken hiervan door brand kan namelijk resulteren in voortschrijdend bezwijken ('kaartenhuiseffect') en dit laatste wordt vermeden door het stellen van brandwerendheidseisen. De eisen voor de hoofdconstructie van utiliteitsgebouwen hangen af van de gebouwhoogte en van de gebruiksfunctie.

In de verdiepingbouw heeft de stalen geïntegreerde ligger zich inmiddels een stevige positie verworven. De combinatie met kanaalplaten komt veelvuldig voor, maar ook de variant met de hoge staalplaat-betonvloer wint terrein. Met het van kracht worden van het nieuwe Bouwbesluit in 2003 zal de toepassing van geïntegreerde liggers verder toenemen in het segment utiliteitsbouw met vier of meer bouwlagen. Met het beschikbaar komen van nieuwe rekenregels wordt het namelijk mogelijk om in bepaalde gevallen zonder extra maatregelen te voldoen aan een brandwerendheidseis van 60 minuten.

Voor 'slaapgebouwen' (hotels, ziekenhuizen, gevangenissen) liggen de eisen hoger dan voor 'niet-slaapgebouwen' (kantoren, bedrijfsgebouwen, scholen, winkels). Hoe hoger het gebouw, hoe hoger de eisen. De eisen gaan telkens omhoog met 30 minuten bij een hoogtegrens van 5 m en van 13 m. Het gaat hierbij om het hoogteverschil (h) tussen de hoogste vloer van een verblijfsgebied van de beschouwde gebruiksfunctie en het aansluitende terrein, doorgaans het maaiveld. Voor gebouwen (zonder woonfunctie) met verdiepinghoogten van 3,3 à 4,2 m staan de brandwerendheidseisen voor de hoofddraagconstructie in *tabel 1*.

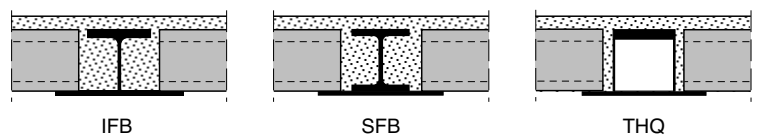
Lage permanente vuurbelasting

De eisen uit *tabel 1* zijn 30 minuten lager, indien de permanente vuurbelasting aantoonbaar minder is dan 500 MJ/m^2 vloeroppervlak. De permanente vuurbelasting is de verbrandingswaarde van alle (reguliere) vergunningplichtige brandbare bouwdeelen. Afbouwdeelen zoals plafonds, niet-dragende scheidingswanden en binnendeuren horen daar niet bij. De waarde van 500 MJ komt overeen met 25 kg vurenhout. Een bouwwijze met onbrandbare bouwmaterialen zoals beton en staal voldoet vrijwel altijd aan dit criterium. Hiermee rekening houdend staan de eisen aan de hoofddraagconstructie voor verdiepinggebouwen in *afbeelding 3*. Eventueel verdere reductie van de eisen is bijvoorbeeld mogelijk bij toepassing van een sprinklerinstallatie.

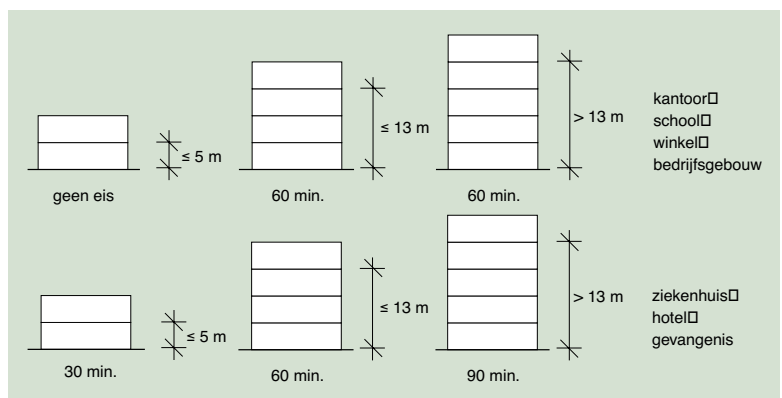
Naast eisen voor de hoofddraagconstructie, kunnen er eisen gelden voor (onderdelen van) de draagconstructie. Bijvoorbeeld wanneer deze draagconstructie een rookvrije vluchtroute in stand moet houden óf nodig is bij het voorkomen van brandoverslag naar andere gebouwen. Constructiedelen die hierbij een functie vervullen, moeten doorgaans 30 minuten brandwerend zijn. In twee gevallen moeten de constructiedelen 60 minuten brandwerend zijn: namelijk wanneer ze een functie vervullen bij een brandscheiding in een gebouw met drie of meer bouwlagen (een hoogste verdiepingvloer op meer dan 5 m) én wanneer ze het veiligheidstrappenhuis tegen branddoorslag moeten beschermen.

(Nieuwe) rekenregels

De Nederlandse regelgeving voorziet niet in goede rekenregels om de brandwerendheid van geïntegreerde liggers te bepalen. Door de thermische bescherming die de vloer aan de ligger



2. Typen geïntegreerde stalen liggers.

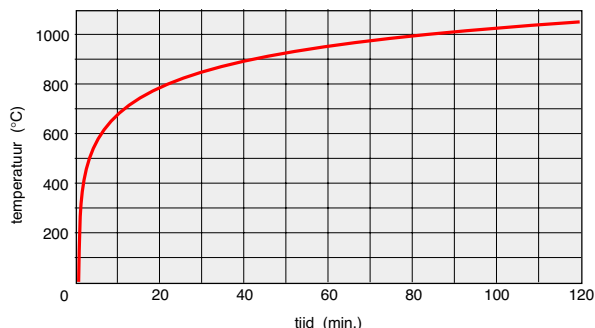


3. Brandwerendheidseisen voor de hoofddraagconstructie van utiliteitsgebouwen wanneer de eisen met 30 minuten mogen worden gereduceerd vanwege een lage permanente vuurbelasting.

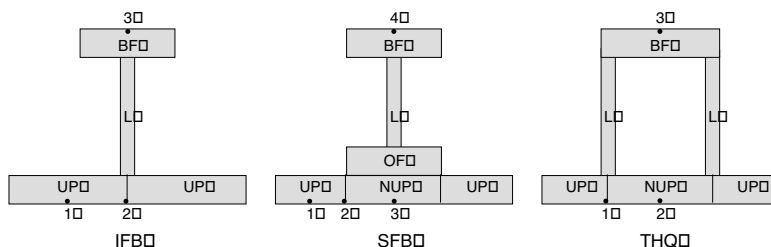
Tabel 1. Brandwerendheidseisen aan de hoofddraagconstructie van verdiepinggebouwen.

type gebouw	aantal bouwlagen	hoogste vloer	eis
niet-slaapgebouwen	1-2	$h \leq 5 \text{ m}$	geen
	≥ 3	$h > 5 \text{ m}$	90 min.
slaapgebouwen	1-2	$h \leq 5 \text{ m}$	60 min.
	3-4	$5 \text{ m} < h < 13 \text{ m}$	90 min.
	≥ 5	$h \geq 13 \text{ m}$	120 min.

4. Temperatuurverloop van de standaardbrand.



5. Ligging van de karakteristieke punten.



geeft, ontstaat een sterke niet-uniforme temperatuurverdeling in de ligger, terwijl NEN 6072 juist uitgaat van een uniforme temperatuurverdeling in het staal.

Voor een alternatieve bepaling van de brandwerendheid van geïntegreerde liggers heeft de constructeur slechts de beschikking over een beperkt arsenaal aan eenvoudige rekenregels^[1]. Met de temperatuurverdeling die met behulp van deze rekenregels wordt bepaald kan vervolgens in een plastische doorsnede-berekening de draagkracht bij brand worden gecontroleerd.

Onderzoek

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. Het onderzoek is beperkt tot de in Nederland meest gangbare typen, te weten IFB, SFB en THQ (afb. 2).

Van deze liggertypen zijn alle gebruikelijke afmetingen, zoals opgenomen in de database van het programma Brawesta, gesimuleerd. Nieuwe typen geïntegreerde liggers – met name de GL-ligger met schuine lijfplaat – lijken voor wat betreft de brandwerendheid sterk op THQ-liggers en kunnen derhalve op analoge wijze worden berekend.

Het opstellen van de nieuwe rekenregels is ondersteund met eindige-elementen simulaties 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. Bovendien

vermelden deze tabellen 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.

Geldigheid

De hier gepresenteerde rekenregels zijn uitsluitend geldig voor statisch bepaalde geïntegreerde liggers. Getoetst wordt het buigend moment in het veld en de krachtsafdracht in dwarsrichting. Bij statisch onbepaalde liggers kunnen steunpuntsmomenten niet worden getoetst wegens gebrek aan kennis 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. Dwarskracht is niet getoetst omdat dit meestal niet maatgevend is. Maatregelen om bezwijken van de kanaalplaatvloer te voorkomen zijn beschreven in [2].

Temperatuurontwikkeling

De berekeningen van de temperaturen zijn gebaseerd op de thermische eigenschappen van normaal grindbeton en staal volgens de Eurocode. Voor stalen liggers die zijn omstort met beton met een lichte toeslag, zijn de resultaten niet geldig. Voor de materiaaleigenschappen van staal en beton – met name: thermische geleiding, specifieke warmte, soortelijke warmte, dichtheid, vochtgehalte en emissiecoëfficiënt – is gebruikt gemaakt van de waarden uit NEN 6072, ENV 1992-1-2, prEN 1992-1-2, prEN 1993-1-2 en prEN 1994-1-2.

Voor de thermische geleiding en soortelijke warmte van beton wordt gebruik gemaakt van de ENV 1992-1-2, omdat deze norm heeft bewezen een betrouwbare voorspelling voor de warmte-indringing te geven voor Nederlandse betonsoorten^[3]. De overgangsweerstand van het oppervlak (convectie) staat in prEN 1991-1-2, NEN 6071 en NEN 6072. Voor het temperatuurverloop wordt de standaardbrand aangehouden (afb. 4).

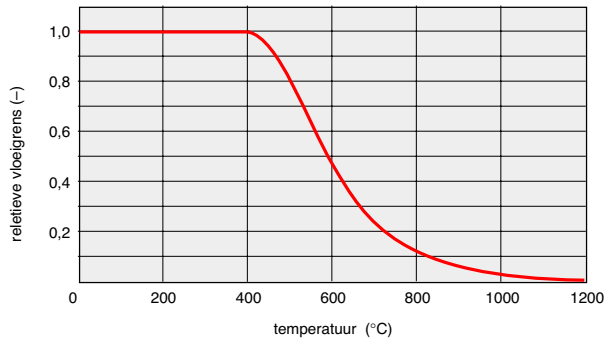
Karakteristieke temperaturen

Als invoer voor de rekenregels dienden de karakteristieke temperaturen die verkregen zijn uit de eindige-elementen simulaties.

Tabel 2. Gebruik van de karakteristieke punten (zie ook afb. 6).

		IFB	SFB	THQ
UP	controle dwarsbuiging plaat	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

6. Afname van de vloeigrens van staal bij hoge temperaturen volgens NEN 6072.



Deze temperaturen zijn gerelateerd aan bepaalde maatgevende punten in de doorsnede. De ligging van deze punten in de doorsneden is aangegeven in *afbeelding 5*. Deze punten worden in de rekenregels gebruikt zoals staat aangegeven in *tabel 2*.

De resultaten van de simulaties zijn in tabelvorm beschikbaar. *Tabel 3* geeft een voorbeeld met enkele karakteristieke waarden. De complete set tabellen zijn op www.bouwenmetstaal.nl te downloaden. Zie de button 'download' op de startpagina. De gemeten en de berekende temperaturen komen goed overeen. 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.

Draagvermogen bij brand

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. Ook deze plastische momenten zijn in tabelvorm beschikbaar op www.bouwenmetstaal.nl. Ze kunnen worden gebruikt wanneer is voldaan aan het criterium voor dwarsbuiging, zie formule (2). Hieronder volgt de afleiding van de rekenmethode met gereduceerde doorsneden waarmee de plastische momenten zijn te bepalen die in de tabellen en in de toetsing op de dwarsbuiging zijn gebruikt.

- Het verloop van de vloeigrens van de stalen ligger als functie van de tijd wordt bepaald volgens NEN 6072 (*afb. 6*), waarbij T de staaltemperatuur is:

$$f_y(T) = \psi(T) f_y(20\text{ °C}) \quad (1)$$

met:

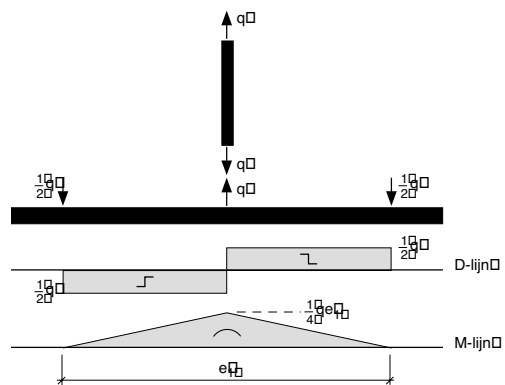
$$\psi(T) = 1 \quad T \leq 400\text{ °C}$$

$$\psi(T) = \frac{1,03}{(e^\beta + 1)^{0,26}} \quad 400\text{ °C} < T \leq 1200\text{ °C}$$

$$\beta = \frac{T - 482}{39,2}$$

- Doel van de controle van de draagkracht in dwarsrichting is om te bepalen of de plaat (en bij een SFB-ligger ook de onderflens) voldoende sterk is om de oplegreactie van de vloer naar

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



het liggerlijf te brengen. Hierdoor ontstaan spanningen door buiging en afschuiving in dwarsrichting in de plaat (en bij een SFB-ligger ook de onderflens). Deze controle gebeurt door bij de karakteristieke temperatuur in het maatgevende punt de vloeigrens van het staal te bepalen en te toetsen of de constructie genoeg sterkte heeft. Dit gebeurt volgens de algemene formule:

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

Hierin is:

- q_{\max} grootste waarde van de dwarskracht van de twee opleg-zijden. Bij gelijke oplegreactie aan weerszijden van de ligger is dit gelijk aan $q/2$ (de helft van de totale dwarskracht);
- e_1, e_2 volgen uit *afbeelding 7, 8 en 9*.
- $f_y(T_n)$ vloeigrens bij de karakteristieke temperatuur in punt n volgens formule (1);
- t_u dikte van de onderflens of plaat.

Hieronder wordt de toepassing van deze formule voor de drie genoemde liggertypen toegelicht.

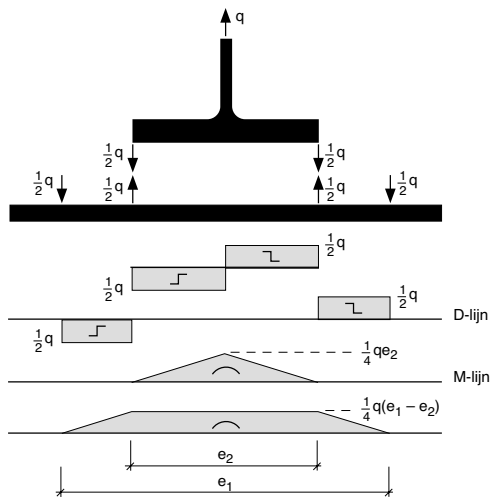
IFB

De krachtsafdracht in de onderflens van de IFB-ligger staat getekend in *afbeelding 7*. Het maatgevende punt is voor IFB-liggers punt 2 (zie *tabel 2*). Met deze temperatuur wordt de

Tabel 3. Karakteristieke temperaturen (in °C) voor enkele SFB-liggers.

type	t = 30 min.				t = 60 min.			
	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-400x10	575	522	464	30	820	784	732	70
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

8. Krachtsafdracht in de onderflens en plaat van een SFB-ligger.



vloegrens van het staal $f_y(T_2)$ bepaald. Formule (2) kan worden gehanteerd met $e_2 = 0$. Verder geldt $q_{\max} = q/2$.

SFB

De krachtsafdracht in onderflens en plaat van de SFB-ligger staat getekend in *afbeelding 8*. Bij de SFB-ligger moeten zowel de onderflens als de plaat worden gecontroleerd volgens formule (2). Het karakteristieke punt voor de plaat is punt 2. Voor de onderflens kan de temperatuur worden bepaald door lineaire interpolatie tussen de punten 3 en 4. Voor de vloegrens moet dus voor de controle van de plaat $f_y(T_2)$ worden genomen; voor de onderflens kan $f_y(T_{\text{flens}})$ worden genomen, óf als veilige waarde $f_y(T_3)$. De temperatuur van de onderflens wordt als volgt geïnterpoleerd:

$$T_{\text{flens}} = T_3 - \frac{\frac{1}{2}t_{\text{flens}} + t_{\text{plaat}}}{h_{\text{tot}}} (T_3 - T_4) \quad (3)$$

Hierin is:

- T_{flens} temperatuur in het hart van de onderflens;
- T_3, T_4 temperatuur in punten 3 en 4;
- t_{flens} dikte van de onderflens;
- t_{plaat} dikte van de plaat;
- h_{tot} totale hoogte van de doorsnede.

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

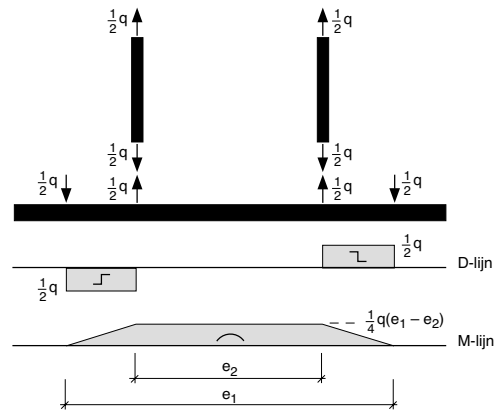
THQ

De krachtsafdracht in de onderflens van de THQ-ligger staat getekend in *afbeelding 9*. Bij de THQ-ligger is punt 1 maatgevend voor de karakteristieke temperatuur. Daarmee wordt de vloegrens $f_y(T_1)$ bepaald. De doorsnedecontrole wordt gedaan met formule (2), waarbij geldt $q_{\max} = q/2$.

Doorsnedereductie plastisch (axiaal) moment

Voor het bepalen van het plastisch moment van een geïntegreerde ligger zijn twee methoden mogelijk, namelijk: een vereenvoudigde bepaling met een tabel én een doorsnede-beschouwing. In beide gevallen moet het plastisch (axiaal) moment worden gereduceerd.

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



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 als een uitkragende ligger te beschouwen 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 Huber-Hencky vloEICriterium te overschrijden kan in gebied $A_{\sigma+}$ de volledige vloegrens in axiale richting worden toegelaten (*afb. 10*). De doorsnede van de onderflens moet worden gereduceerd met $A_{\sigma-}$ en A_{τ} . In het overige gebied kan de volledige vloegrens in axiale richting worden toegelaten.

De doorsnede wordt opgedeeld in stukken met elk een karakteristieke temperatuur (*afb. 5*). De bijbehorende temperaturen zijn in de tabellen opgenomen.

Voor het bepalen van de doorsnedereductie wordt 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 $A_{\sigma-}$ van het totaal af te trekken.

Aangezien de temperatuur in het lijf langzamer toeneemt dan in de onderflens, loopt de momentcapaciteit bij brand sneller terug dan de dwarskrachtcapaciteit. Daarom is een toetsing uitsluitend op buigend moment voldoende, mits de momentcapaciteit bij kamertemperatuur maatgevend was en niet de dwarskrachtcapaciteit.

IFB

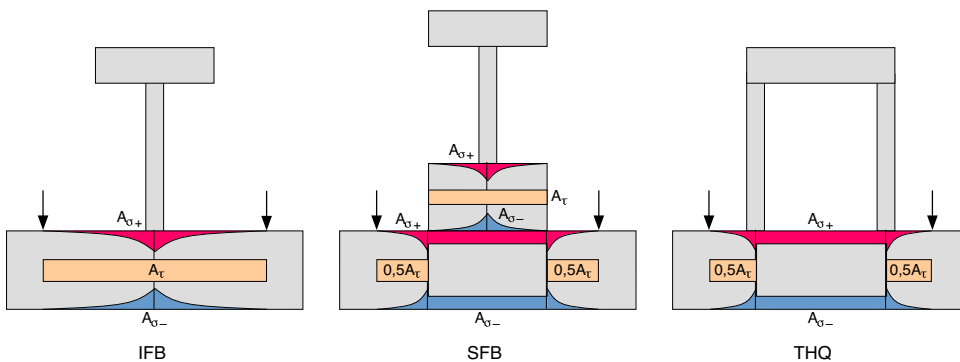
De werkzame doorsnede van het uitstekende plaatdeel (UP) in axiale richting mag worden bepaald volgens:

$$A_{\text{uitst.plaat,ef}} = \left(1 - C \left(\frac{1}{6} - \frac{10}{b_{\text{plaat}}} \right) \right) t_{\text{plaat}} b_{\text{plaat}} \quad (4)$$

Hierin is:

- C volgt uit formule (2);
- b_{plaat} totale breedte van de plaat in mm;
- t_{plaat} dikte van de plaat in mm.

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



SFB

Bij een geïntegreerde ligger bestaande uit een walsprofiel waar- onder een uitkragende plaat is gelast, moet zowel de doorsnede van de aangelaste plaat worden gereduceerd als de doorsnede van de onderflens van het walsprofiel.

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

$$A_{\text{uitst.plaat,ef}} = \left(1 - C_{\text{plaat}} \left(\frac{1}{6} - \frac{10}{b_{\text{plaat}} - e_2} \right) \right) t_{\text{plaat}} (b_{\text{plaat}} - e_2) \quad (5a)$$

$$A_{\text{niet-uitst.plaat,ef}} = \left(1 - \frac{1}{2} C_{\text{plaat}} \right) t_{\text{plaat}} e_2 \quad (5b)$$

Hierin is:

- C_{plaat} volgt uit formule (2);
- b_{plaat} totale breedte van de plaat in mm;
- e_2 totale breedte van de onderflens in mm;
- t_{plaat} dikte van de plaat in mm.

- Voor de *onderflens* geldt:

$$A_{\text{uitst.plaat,ef}} = \left(1 - \frac{1}{6} C_{\text{flens}} \right) t_{\text{flens}} e_2 \quad (5c)$$

Hierin is:

- C_{flens} volgt uit formule (2);
- e_2 totale breedte van de onderflens in mm;
- t_{flens} dikte van de onderflens in mm.

THQ

De werkzame doorsnede in axiale richting mag worden bepaald volgens:

$$A_{\text{uitst.plaat,ef}} = \left(1 - C \left(\frac{1}{6} - \frac{10}{b_{\text{plaat}} - e_2} \right) \right) t_{\text{plaat}} (b_{\text{plaat}} - e_2) \quad (6a)$$

$$A_{\text{niet-uitst.plaat,ef}} = \left(1 - \frac{1}{2} C \right) t_{\text{plaat}} e_2 \quad (6b)$$

Hierin is:

- C volgt uit formule (2);
- b_{plaat} totale breedte van de plaat in mm;
- e_2 hart-op-hart afstand tussen de lijfplaten in mm;
- t_{plaat} dikte van de plaat in mm.

Doorsnedebeschouwing

Nadat A_{ef} (gereduceerde doorsnede) is bepaald, kan het plastisch moment worden berekend 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 plaat. Omdat de temperatuur van de plaat over de breedte varieert, is de plaat opgedeeld in een uitstekend plaatdeel (UP) en een niet-uitstekend plaatdeel (NUP). Elk oppervlak heeft een uniforme temperatuur. De vloeigrens in de vlakken in het lijf en in de onderflens wordt vereenvoudigd bepaald door de temperaturen in deze vlakken lineair over de hoogte te interpoleren tussen punt 3 en punt 4 (*afb. 11*).

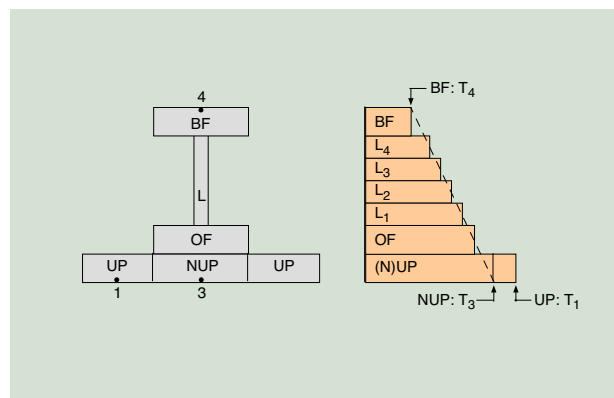
De waarden van $f_y(T)$ worden bepaald volgens formule (1). Met de gereduceerde oppervlakten kan nu de ligging van de neutrale lijn in de doorsnede worden berekend voor het bepalen van het plastisch moment. De kracht per gedeelte van het oppervlak is:

$$N = A_{\text{ef}} f_y$$

Hierin is:

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

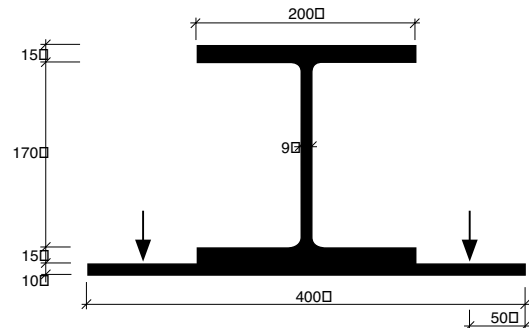
11. Bepaling van de vloeigrens in een opgedeelde doorsnede voor een SFB-ligger.



Tabel 4. Reductie van het plastische weerstandsmoment (in %) van enkele SFB-liggers.

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-400x10	94,6%	42,3%	23,9%	17,7%	97,7%	51,2%	27,9%	20,2%
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%

12. SFB-ligger HE200B-400x10.



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: $\Sigma N = 0$.

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.

Vereenvoudigde bepaling met tabel

In de opgestelde tabellen (beschikbaar op www.bouwenmetstaal.nl) zijn de plastische weerstandsmomenten (in verticale richting) gegeven voor $C = 0,0$ en $C = 1,0$. Deze weerstandsmomenten zijn weergegeven als percentage van het plastische weerstandsmoment bij kamertemperatuur. In tabel 4 zijn van enkele SFB-liggers de waarden gegeven. De plastische momenten M_{pl} voor $C = 0,0$ en $C = 1,0$ kunnen als volgt bepaald worden:

$$M_{pl} = \text{tabelwaarde} \cdot W_{pl,20} f_y \quad (7)$$

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 . In het geval van SFB-liggers zijn er twee waarden voor C , namelijk C_{plaat} en C_{flens} . In dit 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.

Rekenvoorbeeld

Gegeven is een kantoorgebouw met geïntegreerde liggers type SFB HE200B-400x10 (afb. 12) in S355 en kanaalplaten. Het eigen gewicht van de liggers bedraagt 0,9 kN/m; ze liggen onderling op afstanden van 7,2 m en overspannen 4,6 m. Het eigen gewicht van de kanaalplaatvloer bedraagt 5,5 kN/m². Gerekend wordt met een momentane variabele belasting van 0,5-2,5 = 1,25 kN/m². Geëist wordt een brandwerendheid van 60 minuten.

Tabel 5. Temperatuur en vloeigrens in de karakteristieke punten voor een SFB-ligger.

	punt	1	2	3	4
T_n (60 min.) (°C)		820	784	732	70
$f_y(T)$ (N/mm ²)		38,9	49,3	69,6	355,0

Uit deze gegevens volgen de belasting op de ligger bij brand $q_d = 7,2(5,5 + 1,25) + 0,9 = 49,5$ kN/m en het moment $M_d = 49,5 \cdot 4,6^2 / 8 = 130,9$ kNm. Het gewicht van de vloer op de liggers is $q_{max} = 48,6$ kN/m.

Voor een brandwerendheid van 60 minuten kunnen de temperaturen van de karakteristieke punten uit een tabel worden afgelezen (tabel 3). Met formule (1) wordt hiermee voor elk van deze punten de vloeigrens bepaald. De resultaten staan in tabel 5.

Controle moment dwarsrichting

• **Plaat.** Voor punt 2 geldt: $f_y = 49,3$ N/mm². C_{plaat} volgt uit formule (2):

$$C_{plaat} = 3 \left(\frac{q_{max}}{f_y(T_n) t_u} \right)^2 + 2 \frac{e_1 - e_2}{t_u} \frac{q_{max}}{f_y(T_n) t_u}$$

$$= 3 \left(\frac{\frac{1}{2} 48,6}{49,3 \cdot 10} \right)^2 + 2 \frac{300 - 200}{10} \frac{\frac{1}{2} 48,6}{49,3 \cdot 10} = 0,993 \leq 1 \text{ (voldoet)}$$

• **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 overbodig.

Zonder temperatuurinterpolatie geldt voor punt 3: $f_y = 69,6$ N/mm². C_{flens} volgt uit formule (2):

$$C_{flens} = 3 \left(\frac{\frac{1}{2} 48,6}{69,6 \cdot 15} \right)^2 + 2 \frac{400 - 200}{15} \frac{\frac{1}{2} 48,6}{69,6 \cdot 10} = 0,622 \leq 1 \text{ (voldoet)}$$

Mét temperatuurinterpolatie wordt dan gevonden:

$$T_{flens} = T_3 - \frac{\frac{1}{2} t_{flens} + t_{plaat}}{h_{tot}} (T_3 - T_4)$$

$$= 732 - \frac{\frac{1}{2} 15 + 10}{210} (732 - 70) = 677 \text{ °C}$$

Voor de onderflens geldt: $f_y = 100,1$ N/mm². C_{flens} volgt uit formule (2):

$$C_{flens} = 3 \left(\frac{\frac{1}{2} 48,6}{100,1 \cdot 15} \right)^2 + 2 \frac{400 - 200}{15} \frac{\frac{1}{2} 48,6}{100,1 \cdot 10}$$

$$= 0,432 \leq 1 \text{ (voldoet)}$$

Normen en literatuur

1. A.W.A.M.J. van de Bogaard en C.H. van Eldik, *Verdiepingbouw in staal en beton*, Rotterdam 1995.
2. J.W.P.M. Brekelmans, B.W.E.M. van Hove en J.H.H. Fellingner, *Vloeren van kanaalplaten met geïntegreerde stalen liggers. Ontwerp, vervaardiging en toetsing* (CUR-BmS rapport 2001-2), Gouda 2001.
3. C. Both, *The fire resistance of composite steel-concrete slabs*, proefschrift TU-Delft, Delft 2001.
4. *NEN 6071* (Rekenkundige bepaling van de brandwerendheid van bouwdeelen. Betonconstructies) 2001.
5. *NEN 6072* (Rekenkundige bepaling van de brandwerendheid van bouwdeelen. Staalconstructies) 1991, met wijzigingsblad A2, 2002.
6. *NEN 6072* (Rekenkundige bepaling van de brandwerendheid van bouwdeelen. Staalconstructies) 1991, met wijzigingsblad A2, 2002.
7. *NVN-ENV 1992-1-2* (Eurocode 2. Ontwerp en berekening van betonconstructies. Deel 1-2. Algemene regels. Constructieve brandveiligheid) 1996, met correctieblad C1, 1997.
8. *prEN 1993-1-2* (Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1.2. General rules. Structural fire design) 2002.
9. *prEN 1994-1-2* (Eurocode 4. Design of composite steel and concrete structures. Part 1.2. Structural rules. Structural fire design) 2000.
10. *prEN 1991-1-2* (Eurocode 1. Actions and structures. Part 1.2. General actions. Actions on structures exposed to fire) 2002.

Axiaal moment

Het axiaal moment kan worden bepaald met een vereenvoudigde methode of handmatig met tabellen.

• *Vereenvoudigde methode.* In een tabel zijn de plastische weerstandsmomenten gegeven voor $C = 0,0$ en $C = 1,0$. Een veilige benadering is het weerstandsmoment voor $C = 0,993$ (de grootste waarde van C_{plaat} en C_{flens}) te bepalen via lineaire interpolatie.

Uit tabel 4 volgt voor $C = 0,0$: $M_{\text{pl}} = W_{\text{pl}} f_y = 0,512 W_{\text{pl};20} f_y$. Voor $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$ en $W_{\text{pl};20} = 7,83 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$ leidt dit tot $M_{\text{pl}} = 142,3 \text{ kNm}$. Voor $C = 1,0$ volgt: $M_{\text{pl}} = W_{\text{pl}} f_y = 0,423 W_{\text{pl};20} f_y = 117,6 \text{ kNm} < M_d = 130,9 \text{ kNm}$.

Voor $C = 0,993$ wordt dan door interpolatie gevonden $M_{\text{pl}} = 117,8 \text{ kNm}$.

Omdat de waarde van C voor de plaat duidelijk hoger ligt dan van de onderflens is de interpolatie erg veilig en kan in dit geval winst worden behaald met een handmatige berekening.

• *Handmatige berekening met tabellen.* De doorsnedereductie volgens formule (5) leidt tot:

$$A_{\text{UP;ref}} = \left(1 - C_{\text{plaat}} \left(\frac{1}{6} - \frac{10}{b_{\text{plaat}} - e_2} \right) \right) t_{\text{plaat}} (b_{\text{plaat}} - e_2)$$

$$= \left(1 - 0,933 \left(\frac{1}{6} - \frac{10}{400 - 200} \right) \right) 10(400 - 200) = 1768 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{NUP;ref}} = \left(1 - \frac{1}{2} C_{\text{plaat}} \right) t_{\text{plaat}} e_2 = \left(1 - \frac{1}{2} 0,933 \right) 10 \cdot 200 = 1007 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{flens;ref}} = \left(1 - \frac{1}{6} C_{\text{flens}} \right) t_{\text{flens}} e_2 = \left(1 - \frac{1}{6} 0,622 \right) 15 \cdot 200 = 2689 \text{ mm}^2$$

Doorsnedebeschouwing

Per gedeelte van het oppervlak kan de plastische normaalkracht worden bepaald, zie tabel 6.

De totale plastische doorsnede kracht is de som van de plastische normaalkrachten in de afzonderlijke vlakjes en bedraagt $1940,4 \text{ kN}$. Omdat meer dan de helft van deze kracht wordt geleverd door de bovenflens, ligt de neutrale lijn dus in de bovenflens:

$$z = h_{\text{tot}} - t_{\text{flens}} \frac{0,5 N_{\text{pl;tot}}}{N_{\text{pl;flens}}} = 210 - 15 \frac{0,5 \cdot 1940,4}{1065} = 196,3 \text{ mm}$$

Een sommering van de bijdragen van de normaalkrachten aan het plastisch moment (waarbij de bovenflens deels in het trek- en deels in het drukgebied ligt) resulteert in $M_{\text{pl}} = 117,1 \text{ kNm}$ ($\geq M_d$).

Beide methoden voor het axiaal moment leveren een moment M_{pl} op dat kleiner is dan M_d . In dit geval blijkt dus dat de gekozen ligger niet voldoet voor een brandwerendheid van 60 minuten.

Een mogelijke oplossing is de keuze voor een stalen plaat van 15 mm dikte in plaats van 10 mm. Het plastisch weerstandsmoment van dit type ligger bij kamertemperatuur is $W_{\text{pl};20} = 8,22 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$. Het rekenmoment bedraagt dan $M_d = q \ell^2 / 8 = 49,7 \cdot 4,6^2 / 8 = 131,4 \text{ kNm}$.

• *Controle dwarsrichting.* In punt 2 geldt: $T = 768 \text{ }^\circ\text{C}$ en $f_y = 54,8 \text{ N/mm}^2$. Hiermee wordt gevonden: $C_{\text{plaat}} = 0,397 \leq 1$ (voldoet).

In punt 3 geldt: $T = 721 \text{ }^\circ\text{C}$ en $f_y = 74,9 \text{ N/mm}^2$. Hiermee wordt gevonden: $C_{\text{flens}} = 0,578 \leq 1$ (voldoet).

• *Controle axiaal moment.* Voor $C = 1,0$ en $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$ geldt $M_{\text{pl}} = W_{\text{pl}} f_y = 0,501 W_{\text{pl};20} f_y = 146,2 \text{ kNm} \geq M_d$ (voldoet).

Een ligger SFB HE200B-400x15 voldoet dus wel aan de vereiste brandwerendheid!

Tabel 6. Bepaling van de plastische normaalkracht en het plastisch moment per deel van het oppervlak.

	A_{ef} (mm^2)	T ($^\circ\text{C}$)	f_y (N/mm^2)	N_{pl} (kN)	z (mm)	M_{pl} (kNm)
BF	3000	70	355,0	1065,0	6,2	6,6
L1	382,5	184	355,0	135,8	22,6	3,1
L2	382,5	318	355,0	135,8	65,1	8,8
L3	382,5	452	330,9	126,6	107,6	13,6
L4	382,5	586	180,0	68,8	150,1	10,3
OF	2689	677	100,2	269,6	178,8	48,2
NUP	1007	732	69,6	70,1	191,3	13,4
UP	1768	820	38,9	68,7	191,3	13,1