

Research Fund
for Coal & Steel

MATICS⁺

Membranwerking van staal-beton constructies
tijdens brand

Ontwerp Handleiding

R. Hamerlinck
O. Vassart
B. Zhao

VOORWOORD

Membraanwerking bij het ontwerp bij brand van een staalplaat-betonvloer met stalen standaard liggers of liggers met ronde gaten - Valorisatie (MACS+)

Dit project is gefinancierd met steun van de Europese Commissie, Onderzoeks Fonds voor Kolen en Staal (RFCS).

Deze publicatie geeft slechts de zienswijze van de auteur weer en de Commissie kan niet aansprakelijk gesteld voor enig gebruik dat kan worden gemaakt van de hierin opgenomen informatie.

De publicatie is gemaakt als het resultaat van verschillende onderzoeksprojecten:

- het RFCS Project FICEB+
- het RFCS Project COSSFIRE
- het project Leonardo Da Vinci 'Fire Resistance Assessment of Partially Protected Composite Floors' (FRACOF).
- een eerder project gesponsord door ArcelorMittal en CTICM samen en uitgevoerd door een samenwerkingsverband van CTICM en SCI.

De eenvoudige ontwerpmethode was aanvankelijk ontwikkeld als een resultaat van brandproeven op grote schaal uitgevoerd op een meerverdiepinggebouw met een staalskelet op de testfaciliteit van het Building Research Establishment in Cardington in Groot-Brittannië. Veel van de theoretische basis van de ontwerpmethode bestaat sinds de late jaren 1950, met achtereenvolgende studies naar het constructieve gedrag van gewapend betonplaten bij kamer temperatuur. De eerste versie van de eenvoudige ontwerpmethode was beschikbaar in de SCI Design Guide P288 'Fire Safe Design: A new approach to Multi-story Steel Framed Buildings', 2 Ed.

Hoewel de toepassing van de methode bij het brandwerendheidsontwerp relatief nieuw is, is de constructieve basis van de methode algemeen bekend.

De eenvoudige ontwerpmethode werd geïmplementeerd in een software programma door SCI in 2000 en een geupdate versie werd uitgegeven in 2006, na verbeteringen in de eenvoudige ontwerpmethode.

Waardevolle bijdragen werden ontvangen van:

- Mary Brettle, The Steel Construction Institute
- Ian Sims, The Steel Construction Institute
- Louis Guy Cajot, ArcelorMittal
- Renata Obiala, ArcelorMittal
- Gisèle Bihina, CTICM
- Mohsen Roosefid, CTICM

Inhoud

	Pagina
VOORWOORD	i
SAMENVATTING	iii
1 INTRODUCTIE	1
2 ONTWERPBEGINSELEN	4
2.1 Brandveiligheid	4
2.2 Constructietype	4
2.2.1 Eenvoudige verbindingssystemen	5
2.2.2 Vloerplaten en liggers	6
2.3 Ontwerpzones van de vloer	7
2.4 Combinatie van belastingen	8
2.5 Blootstelling aan brand	10
2.5.1 Brandwerendheid	10
2.5.2 Natuurlijke brand (parametrische brandkromme)	12
3 AANBEVELINGEN VOOR CONSTRUCTIEVE ELEMENTEN	14
3.1 Ontwerpzones van de vloer	14
3.2 Vloerplaat en liggers	15
3.2.1 Temperatuurberekening van de vloerplaat	15
3.2.2 Temperatuurberekening van onbeschermd staal-betonliggers	17
3.2.3 Ontwerp bij brand van de vloerplaat	18
3.2.4 Ontwerp bij brand van liggers op de omtrek van de ontwerpzone van de vloer	20
3.3 Wapeningdetails	21
3.3.1 Detaillering van het wapeningsnet	21
3.3.2 Detailleringsvoorschriften voor de rand van een staalplaat-betonvloer	22
3.4 Ontwerp van niet-samenwerkende randliggers	24
3.5 Kolommen	25
3.6 Verbindingen	25
3.6.1 Classificatie van de verbinding	26
3.6.2 Kopplaatverbindingen	26
3.6.3 Lipverbindingen	27
3.6.4 Hoekstaalverbindingen	28
3.6.5 Brandwerende bescherming	28
3.7 Globale stabiliteit van het gebouw	28
4 COMPARTIMENTERING	30
4.1 Liggers boven brandwerende wanden	30
4.2 Stabiliteit	31
4.3 Vlamdichtheid en thermische isolatie	31
5 REKENVOORBEELD	33
5.1 Ontwerp van een staalplaat-betonvloer in brandomstandigheden	38
5.1.1 Vloerontwerp: Zone B	38
5.1.2 Vloerontwerp: Zone A	54
5.1.3 Vloerontwerp: Zone E	59
5.1.4 Vloerontwerp: Zone D	72
5.2 Wapeningdetails	80
5.3 Brandwerende bescherming van kolommen	80
LITERATUUR	82

SAMENVATTING

Brandproeven op grote schaal (uitgevoerd in een aantal landen) en waarnemingen van branden in gebouwen hebben laten zien dat de prestatie bij brand van gebouwen met een staalskelet en staalplaat-betonvloeren veel beter is dan de resultaten van standaardbrandproeven op afzonderlijke constructie-elementen. Het is duidelijk dat er grote reserves zitten in de brandwerendheid van moderne gebouwen met een staalskelet en dat standaardbrandproeven op elementen los van hun constructieve omgeving niet een bevredigende indicatie geven van de prestatie van dergelijke constructies.

Deze publicatie geeft een handleiding bij de toepassing van een eenvoudige ontwerpmethode, zoals geïmplementeerd in de MACS+ software. De aanbevelingen zijn conservatief en beperken zich tot constructies vergelijkbaar met de geteste, te weten geschoorde gebouwen met een staalskelet en staalplaat-betonvloeren en tot staalplaat-betonvloeren met liggers met ronde gaten. De handleiding geeft ontwerpers toegang tot het gedrag van een geheel gebouw en maakt het mogelijk te bepalen welke elementen onbeschermd kunnen blijven terwijl het veiligheidsniveau gehandhaafd blijft, vergelijkbaar met de traditionele methoden.

Omdat vele brandveiligheidsadviseurs tegenwoordig natuurlijke branden in beschouwing nemen, is er een natuurlijk brandmodel opgenomen naast het gebruik van het standaardbrand-model, beide uitgedrukt als temperatuur-tijd krommen in Eurocode 1.

In aanvulling op de ontwerphandleiding gegeven in deze publicatie, verschaft het afzonderlijke Constructieve Achtergronddocument details over brandtesten en eindige elementenanalyses als onderdeel van de FRACOF, COSSFIRE en FICEB projecten en enkele details van de Cardington testen die werden uitgevoerd op het gebouw van acht verdiepingen in Cardington. Het achtergronddocument zal de lezer behulpzaam zijn om de basis van de ontwerpaanbevelingen in deze publicatie te begrijpen.

1 INTRODUCTIE

De ontwerpaanbevelingen in deze publicatie zijn gebaseerd op het gedrag van staalplaat-betonvloeren, zoals geïnterpreteerd uit actuele branden in gebouwen en uit brandtesten op ware grootte^(1,1,2). Deze conservatieve aanbevelingen voor het ontwerp bij brand mogen beschouwd worden als equivalent met de geavanceerde methoden in de Eurocodes.

De constructieve elementen van verdiepinggebouwen moeten op basis van de nationale bouwregelgeving een brandwerendheid hebben. De brandwerendheid mag bepaald worden aan de hand van het gedrag in standaard brandwerendheidstesten of door berekeningen in overeenstemming met erkende normen, met name EN 1991-1-2⁽⁴⁾, EN 1993-1-2⁽⁵⁾ en EN 1994-1-2⁽⁵⁾. In een standaardbrandtest, kan van enkelvoudige, los van de rest van de constructieve beschouwde, onbeschermd stalen liggers uit I of H profielen slechts verwacht worden dat ze 15 tot 20 minuten brandwerendheid bereiken. Het is daarom de normale praktijk stalen liggers en kolommen te beschermen met behulp van brandwerende beplating, mortels of opschuimende coating, of, in vloerconstructies met geïntegreerde liggers, de constructieve elementen op te nemen in de vloer.

Natuurlijke brandtesten op grote schaal⁽⁷⁾, uitgevoerd in een aantal landen, hebben consistent aangetoond dat het brandgedrag van staalplaat-betonvloeren met onbeschermd stalen liggers van nature veel beter is dan de resultaten van standaard testen met afzonderlijke elementen suggereren. Bewijsvoering uit werkelijke branden geeft aan dat de hoeveelheid bescherming die wordt aangebracht op stalen elementen in sommige gevallen veel te groot is. Vooral de Cardington brandtesten presenteerden een mogelijkheid om het gedrag van een werkelijke constructie in een brand te onderzoeken en de brandwerendheid van onbeschermd samenwerkende constructies onder realistische omstandigheden te beoordelen.

Omdat de in deze publicatie gegeven ontwerpaanbevelingen gerelateerd zijn aan een gegeneraliseerde compartimentsbrand, kan deze gemakkelijk toegepast worden onder standaardbrandcondities zoals is gedemonstreerd door middel van de vloertest op werkelijke schaal in het kader van het FRACOF- en COSSFIRE-project. Deze mogelijkheid geeft overduidelijk een groot voordeel aan constructeurs in hun brandveiligheidsontwerp van verdiepinggebouwen met staalconstructies. De brandtest op grote schaal uitgevoerd in Ulster in het kader van het FICEB-project onderstreept dat de theorie van membraanwerking ook toegepast kan worden op liggers met ronde gaten.

Waar de nationale bouwregelgeving het prestatie-gebaseerde ontwerp van gebouwen bij brand toestaat, mag de ontwerpmethode gegeven in deze handleiding toegepast worden om de brandwerendheid van de constructie zonder toepassing van brandwerende bescherming te demonstreren. In sommige landen vereist de acceptatie van een dergelijke demonstratie de speciale toestemming van de nationale bouwregelgever of het lokale bevoegde gezag.

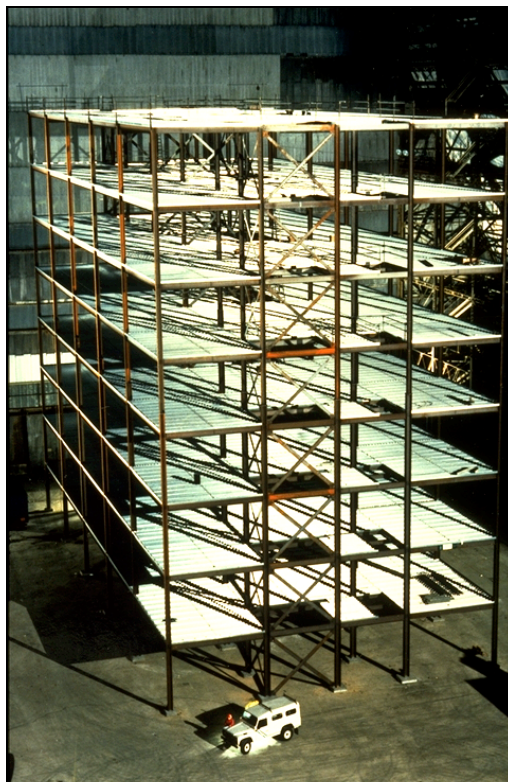
De aanbevelingen gepresenteerd in deze publicatie kunnen gezien worden als uitbreiding van de fire engineering benadering naar het terrein van het constructieve gedrag en de ontwikkeling van het concept van het brandveiligheidsontwerp. Het is de intentie dat ontwerpen uitgevoerd in overeenstemming met deze aanbevelingen

tenminste het brandveiligheidsniveau bereiken dat is vereist door de nationale regelgeving, terwijl enige besparingen in bouwkosten mogelijk zijn.

In aanvulling op de brandwerendheid bij de standaard temperatuur-tijd kromme, worden er aanbevelingen gepresenteerd voor gebouwen die worden ontworpen om een natuurlijke brand te weerstaan. Natuurlijke branden kunnen gedefinieerd worden in de MACS+ software met behulp van de parametrische brandkromme gegeven in EN 1991-1-2. Deze houdt rekening met de grootte van het compartiment, de grootte van alle openingen en de hoeveelheid brandbare materialen. Als een alternatief staat de MACS+ software temperatuur-tijd krommen toe die worden ingelezen uit een tekstfile, waarmee de output van andere brandmodellen gebruikt kan worden.

De aanbevelingen zijn van toepassing op samenwerkende staal-beton skeletten die in grote lijnen vergelijkbaar zijn met het gebouw van acht verdiepingen dat is getest in Cardington, zoals geïllustreerd in Figuur 1-1 en Figuur 1-2.

De ontwerpaanbevelingen worden gepresenteerd als handleiding bij de toepassing van de MACS+ software, die beschikbaar is als vrij te downloaden van www.arcelormittal.com/profielen.



Figuur 1-1 Cardington testgebouw vóór het betonstorten van de vloeren



Figuur 1-2 Overzicht van de onbeschermden staalconstructie

2 ONTWERPBEGINSELEN

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de ontwerpbeginselen en -aannamen bij de ontwikkeling van de eenvoudige ontwerpmethode; meer gedetailleerde informatie is gegeven in het bijbehorende achtergronddocument⁽⁷⁾. Het constructietype waarvoor de ontwerphandleiding toepasbaar is wordt eveneens uiteengezet.

De ontwerphandleiding is ontwikkeld uit onderzoek gebaseerd op de resultaten van brandtesten, testen bij kamertemperatuur en eindige elementenanalyses.

2.1 Brandveiligheid

De ontwerpaanbevelingen gegeven in de eenvoudige ontwerpmethode zijn zo samengesteld dat aan de volgende fundamentele brandveiligheidsvoorschriften voldaan wordt:

- Er mag geen stijging van het risico zijn van de persoonlijke veiligheid van gebruikers, brandweer en anderen in de nabijheid van het gebouw, in vergelijking met de huidige praktijk.
- Excessieve vervorming van de aan brand blootgestelde vloer mag niet bezwijken van van de compartimentering veroorzaken, met andere woorden, de brand moet binnen het compartiment waar het is ontstaan blijven en mag zich niet horizontaal of verticaal verspreiden.

2.2 Constructietype

De ontwerphandleiding gegeven in de eenvoudige ontwerpmethode geldt alleen voor gebouwen met een staalskelet en staal-betonliggers en staalplaat-betonvloeren van de volgende algemene vorm:

- geschoorde raamwerken niet gevoelig voor knik door zijdelingse verplaatsing (van het zijdelings ongesteunde raamwerk),
- raamwerken met verbindingen ontworpen met eenvoudige verbindingsmodellen,
- staalplaat-betonvloeren bestaande uit een staalplaat, een enkele laag wapeningsnet en normaal of lichtbeton, ontworpen in overeenstemming met EN 1994-1-1⁽⁹⁾,
- vloerliggers ontworpen om samen te werken met de vloerplaat en ontworpen volgens EN 1994-1-1.
- liggers met gaten voor leidingen.

De handleiding geldt niet voor:

- vloeren gemaakt van prefab betonnen vloerplaten,
- interne vloerliggers die niet-samenwerkend ontworpen zijn (liggers bij de rand van de vloerplaat mogen wel niet-samenwerkend zijn).

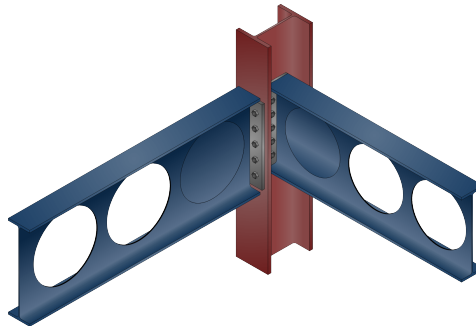
2.2.1 Eenvoudige verbindingsmodellen

De verbindingsmodellen aangehouden tijdens de ontwikkeling van de handleiding gegeven in deze publicatie nemen aan dat buigende momenten niet worden overgebracht door de verbinding. De verbindingen worden ‘eenvoudig’ (of ‘dwarskrachtverbinding’) genoemd.

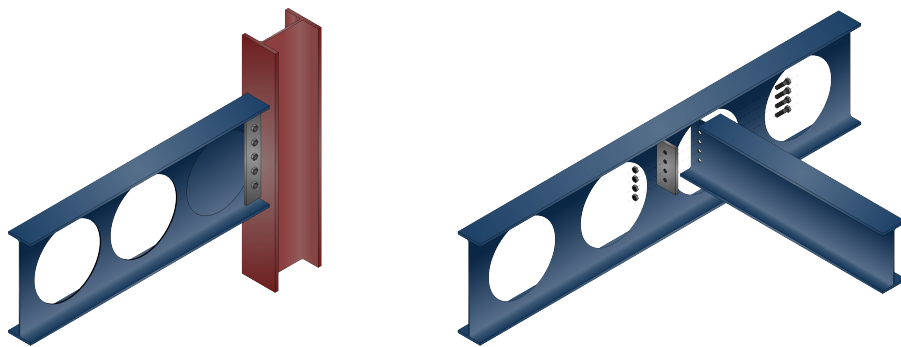
Kolom-ligger verbindingen die beschouwd mogen worden als ‘eenvoudig’ omvatten verbindingen met de volgende componenten:

- flexibele kopplaten (Figuur 2-1)
- lipverbindingen (Figuur 2-2)
- hoekstaalverbindingen (Figuur 2-3).

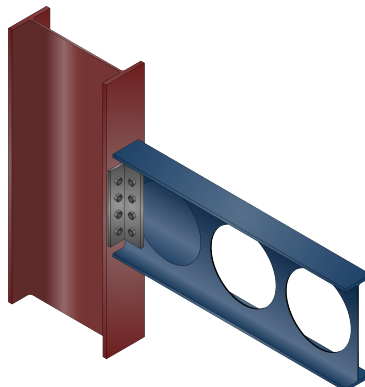
Verdere informatie over het ontwerp van de componenten van ‘eenvoudige’ verbindingen is gegeven in Hoofdstuk 3.6.



Figuur 2-1 Voorbeeld van flexibele kopplaatverbindingen



Figuur 2-2 Voorbeelden van lipverbindingen



Figuur 2-3 Voorbeeld van een hoekstaalverbinding

2.2.2 Vloerplaten en liggers

De ontwerpaanbevelingen gegeven in deze handleiding zijn toepasbaar op geprofileerde staalplaat tot en met 80 mm hoogte met een betondikte boven de staalplaat van 60 tot en met 130 mm. De weerstand van de staalplaat is verwaarloosd in de ontwerpmethode bij brand maar de aanwezigheid van de staalplaat voorkomt afspatten van het beton aan de onderzijde van de vloerplaat. Dit type vloerconstructie wordt geïllustreerd in Figuur 2-4.

De ontwerpmethode kan worden gebruikt met ofwel een isotroop ofwel een orthotroop wapeningsnet, dat is, wapeningsnetten met hetzij dezelfde hetzij verschillende doorsneden in de orthogonale richtingen. De staalsoort voor het wapeningsnet moet gespecificeerd worden in overeenstemming met EN 10080. De MACS+ software kan alleen gebruikt worden bij een gelast wapeningsnet en kan niet meer dan één laag wapening beschouwen. Wapeningstaven in de ribben van de staalplaat-betonvloer zijn niet vereist.

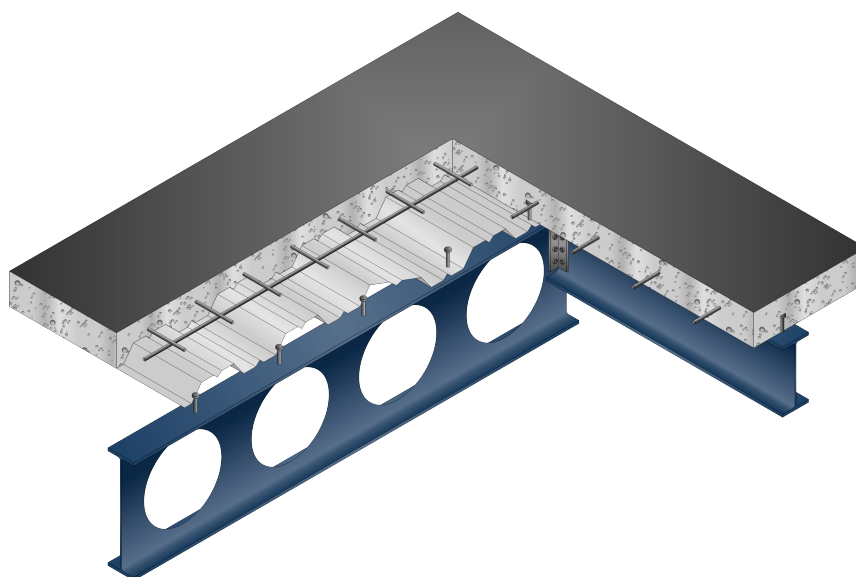
De software omvat standaard fabrieksnetten uit de A en B series, zoals gedefinieerd door nationale normen in de UK^(11,12) (Tabel 2-1) en een range van afmetingen van wapeningsnetten gedefinieerd door Franse nationale normen^(13,14) (Tabel 2-2), en algemeen gebruikt in de Franse constructiemarkt. Door de gebruiker gedefinieerde afmetingen van gelaste wapeningsnetten zijn ook toegestaan in de MACS+ software.

Tabel 2-1 Fabrieksnetten zoals gedefinieerd door BS 4483⁽¹¹⁾

Wapenings-net Referentie	Afmetingen van net (mm)	Gewicht (kg/m ²)	Langsstaven		Dwarsstaven	
			Ø (mm)	Opp. (mm ² /m)	Ø (mm)	Opp. (mm ² /m)
A142	200×200	2,22	6	142	6	142
A193	200×200	3,02	7	193	7	193
A252	200×200	3,95	8	252	8	252
A393	200×200	6,16	10	393	10	393
B196	100×200	3,05	5	196	7	193
B283	100×200	3,73	6	283	7	193
B385	100×200	4,53	7	385	7	193
B503	100×200	5,93	8	503	8	252

Tabel 2-2 Fabrieksnetten algemeen gebruikt in de Franse markt

Wapenings-net Referentie	Afmetingen van net (mm)	Gewicht (kg/m ²)	Langsstaven		Dwarsstaven	
			Ø (mm)	Opp. (mm ² /m)	Ø (mm)	Opp. (mm ² /m)
ST 20	150×300	2,487	6	189	7	128
ST 25	150×300	3,020	7	257	7	128
ST 30	100×300	3,226	6	283	7	128
ST 35	100×300	6,16	7	385	7	128
ST 50	100×300	3,05	8	503	8	168
ST 60	100×300	3,73	9	636	9	254
ST 15 C	200×200	2,22	6	142	6	142
ST 25 C	150×150	4,03	7	257	7	257
ST 40 C	100×100	6,04	7	385	7	385
ST 50 C	100×100	7,90	8	503	8	503
ST 60 C	100×100	9,98	9	636	9	636



Figuur 2-4 Opengewerkt overzicht van een typische staalplaat-betonvloer constructie

Het is belangrijk de in de constructie van de vloerplaat gebruikte liggerafmetingen te definiëren, omdat deze het brandgedrag van de vloerplaat zullen beïnvloeden. De ontwerper zal details nodig hebben van de profielgrootte, de staalsoort en de graad van afschuifverbinding, beschikbaar voor elke ligger in de vloerplaat. De MACS+ software interface staat de gebruiker toe te kiezen uit een voorgedefinieerde lijst van profielen, waaronder de normale Britse, Europese en Amerikaanse I en H profielen.

2.3 Ontwerpzones van de vloer

De ontwerpmethode vraagt van de ontwerper de vloerplaat op te splitsen in een aantal ontwerpzones van de vloer zoals getoond in Figuur 2-5. De liggers op de omtrek van deze ontwerpzones van de vloer moeten ontworpen zijn om de brandwerendheid vereist

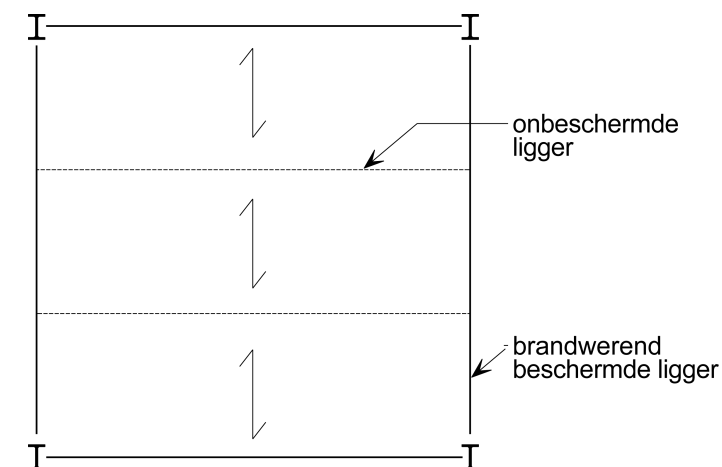
voor de vloerplaat te bereiken en zullen daarom normaal gesproken brandwerend beschermd worden.

Een ontwerpzone van de vloer moet aan de volgende criteria voldoen:

- Elke zone moet rechthoekig zijn.
- Elke zone moet aan alle zijden door liggers begrensd zijn.
- De liggers binnen een zone mogen slechts overspannen in één richting.
- Kolommen mogen niet geplaatst zijn binnen een ontwerpzone van de vloer; ze mogen geplaatst zijn op de omtrek van de ontwerpzone van de vloer.
- Voor brandwerendheden van meer dan 60 minuten, of wanneer de parametrische brandkromme gebruikt wordt, moeten alle kolommen zijn verbonden met tenminste één brandwerend beschermde ligger in elke orthogonale richting.

Alle interne liggers binnen de zone mogen onbeschermd blijven, op voorwaarde dat met behulp van de MACS+ software aangetoond wordt dat de brandwerendheid van de ontwerpzone van de vloer voldoende is. De grootte van en h.o.h. afstand tussen deze onbeschermden liggers zijn niet kritisch voor de constructieve prestatie in brandomstandigheden.

Een voorbeeld van een enkelvoudige ontwerpzone van de vloer is gegeven in Figuur 2-5.



Figuur 2-5 Voorbeeld van een ontwerpzone van de vloer

2.4 Combinatie van belastingen

De combinatie van belastingen voor buitengewone ontwerpsituaties gegeven in 6.4.3.3 en Tabel A1.3 van EN 1990⁽¹⁵⁾ moeten gebruikt worden voor verificaties van de grenstoestand brand. Met alleen ongunstig werkende permanente belastingen en geen belastingen door voorspanning aanwezig, is de combinatie van belastingen te beschouwen als:

$$\sum G_{k,j,\text{sup}} + A_d + (\psi_{1,1} \text{ or } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

met:

$G_{k,i,\text{sup}}$	ongunstig werkende permanent belasting
A_d	overheersende buitengewone belasting
$Q_{k,1}$ en $Q_{k,i}$	gelijktijdige veranderlijke belastingen, respectievelijk overheersende en overige
$\psi_{1,1}$	factor voor de frequente waarde van de overheersende veranderlijke belasting
$\psi_{2,i}$	factor voor de quasi-blijvende waarde van de i^{e} veranderlijke belasting

Het gebruik van ofwel $\psi_{1,1}$ of $\psi_{2,1}$ met $Q_{k,1}$ moet zijn gespecificeerd in de relevante Nationale Bijlage. De Nationale Bijlage voor het land waar het gebouw wordt gebouwd moet worden geraadpleegd om te bepalen welke factor gebruikt moet worden.

De waarden gebruikt voor de ψ factoren zijn gerelateerd aan de categorie van de veranderlijke belasting waarop ze toegepast worden. De in de Eurocode aanbevolen waarden voor de ψ factoren voor gebouwen zijn gegeven in Tabel A1.1 van EN 1990; Deze waarden zijn bevestigd of aangepast in de relevante Nationale Bijlage. De waarde van de ψ factor voor gebouwen in Nederland en België zijn samengevat in Tabel 2-3. Voor vloeren waarbij het mogelijk is belastingen in dwarsrichting te spreiden, zijn de volgende gelijkmatig verdeelde belastingen voor verplaatsbare scheidingswanden gegeven in 6.3.1.2(8) van EN 1991-1-1⁽¹⁶⁾:

Verplaatsbare scheidingswanden met een eigen gewicht $\leq 1,0$ kN/m wandlengte: $q_k = 0,5$ kN/m²

Verplaatsbare scheidingswanden met een eigen gewicht $\leq 2,0$ kN/m wandlengte: $q_k = 0,8$ kN/m²

Verplaatsbare scheidingswanden met een eigen gewicht $\leq 3,0$ kN/m wandlengte: $q_k = 1,2$ kN/m².

Verplaatsbare scheidingswanden met eigen gewicht groter dan 3,0 kN/m lengte moeten in rekening worden gebracht door hun plaats te beschouwen.

De in de Eurocode aanbevolen waarden voor veranderlijke opgelegde belastingen op vloeren zijn gegeven in Tabel 6.2 van EN 1991-1-1; deze waarden kunnen ook aangepast zijn in de relevante Nationale Bijlage.

Tabel 2-4 presenteert de in de Eurocode aanbevolen waarden en de waarden gegeven in de Nationale Bijlagen (NB) van Nederland en België voor de opgelegde belasting op een kantoorvloer.

Tabel 2-3 Waarden van ψ factoren

Belastingen	aanbevolen waarden in de Eurocode		waarden in Nederlandse NB		waarden in Belgische NB	
	ψ_1	ψ_2	ψ_1	ψ_2	ψ_1	ψ_2
Woningen, kantoren en verkeersgebied waar: $30 \text{ kN} < \text{voertuiggewicht} \leq 160 \text{ kN}$	0,5	0,3	0,5	0,3	0,5	0,3
Opslag	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8

Tabel 2-4 Opgelegde belasting op een kantoorvloer

Categorie van belaste gebied	aanbevolen waarden in de Eurocode		waarden in Nederlandse NB		waarden in Belgische NB	
	$q_k \text{ (kN/m}^2\text{)}$	$Q_k \text{ (kN)}$	$q_k \text{ (kN/m}^2\text{)}$	$Q_k \text{ (kN)}$	$q_k \text{ (kN/m}^2\text{)}$	$Q_k \text{ (kN)}$
B – Kantoren	3,0	4,5	2,5	3,0	3,0	3,0

2.5 Blootstelling aan brand

De aanbevelingen gegeven in de eenvoudige ontwerpmethode mogen worden toegepast op gebouwen waarin de constructieve elementen beschouwd worden te zijn blootgesteld aan een standaard temperatuur-tijd kromme of een parametrische brandkromme, beide zoals gedefinieerd in EN 1991-1-2. Het geavanceerde model mag ook gebruikt worden om een temperatuur-tijd kromme te definiëren voor een natuurlijk brandscenario. De resulterende temperatuur-tijd kromme mag als invoer gebruikt worden in de MACS+ software in de vorm van een tekstfile.

In alle gevallen moeten de normale voorzieningen voor vluchtroutes uit de nationale regelgeving opgevolgd zijn.

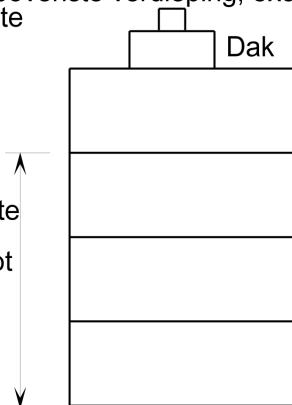
2.5.1 Brandwerendheid

De volgens de nationale regelgeving vereiste brandwerendheden voor constructieve elementen in de verschillende bouwtypen zijn gegeven in Tabel 2-5 en Tabel 2-6.

De volgende aanbevelingen zijn voor gebouwen waar aan de constructie-elementen een brandwerendheid wordt vereist van maximaal 180 minuten. Vooropgesteld dat deze worden opgevolgd, zullen gebouwen met een samenwerkend staalskelet hun stabiliteit gedurende deze periode van brandwerendheid behouden wanneer een brandcompartiment wordt onderworpen aan de standaard temperatuur-tijd kromme⁽¹⁾.

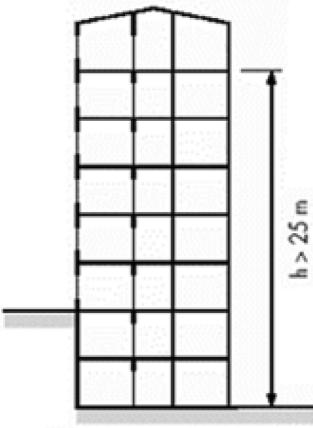
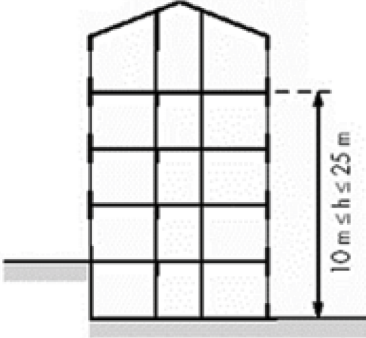
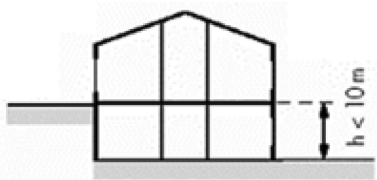
Van gebouwen met een samenwerkend staalskelet en staalplaat-betonvloeren mag aangenomen worden dat ze 15 minuten brandwerendheid bereiken zonder brandwerende bescherming, en derhalve worden geen specifieke aanbevelingen gegeven voor dat geval.

Tabel 2-5 Samenvatting van brandwerendheidseisen in Nederland

	Brandwerendheid (min) afh. van hoogte bovenste verblijfsvloer (m)				
	<5	≤7	≤13	>13	
Woningen		30	90	120	Hoogte van de bovenste verdieping, exclusief technische ruimte  Hoogte van de bovenste verdieping gemeten van bovenkant vloer tot het meetniveau op de begane grond bij de toegang van het gebouw
Hotels, Ziekenhuizen	30		60	90	
Kantoren, winkels, scholen, sport, industrie en parkeergarages	-*		60	60	
De brandwerendheidseisen in dit overzicht zijn waar toegestaan gereduceerd met 30 minuten in verband met de doorgaans lage permanente vuurbelasting (< 500 MJ/m²). *In verband met vluchten of compartimentering kan een 30-minuteneis gelden. Boven 70 m zijn vaak sprinklers vereist, maar blijven de brandwerendheidseisen hetzelfde.					

Tabel 2-6 Samenvatting van brandwerendheidseisen in België

Niet-industriële gebouwen, nieuwbouw en uitbreidingen			Draagkracht van de constructieve elementen		
			Onder Ei ^(*)	Vloer Ei en hogere niveau's	Dak
lage gebouwen met h < 10 m	Open parkeergarage met vloer R 60		R0	R0	R0
	Andere	1 bouwlaag	R30	R30	R30
		meerdere bouwlagen	R60	R60	R30
middelhoge gebouwen	10 m ≤ h ≤ 25 m		R120	R60	R60
hoge gebouwen	h > 25 m		R120	R120	R120

A. Hoge gebouwen (BE) ($h > 25$ m)  B. Middelhoge gebouwen (BM) ($10 \text{ m} \leq h \leq 25$ m)  C. Lage gebouwen (BB) ($h < 10$ m) 			
Gebouwen waarin personeel aanwezig is in het kader van werkzaamheden (bijeenkomstzalen, grote winkels)			
		Alles met uitzondering van het dak	Dak
Gebouw met ruimten uit de 2 ^e groep	1 bouwlaag	R0	R0
	2 bouwlagen	R30	R0
	meer dan 2 bouwlagen	R120	R0
Gebouw met ruimten uit de 1 ^e groep	1 of 2 bouwlagen	R30	R30
	meer dan 2 bouwlagen	R120	R30
1^e groep : ruimten met een verhoogd brandrisico (opslag van grote hoeveelheden brandbare materialen, winkels met meer dan 2000 m²) 2^e groep : ruimten met een minder hoog brandrisico (opslag van brandbare materialen in minder grote hoeveelheden)			
Industriële gebouwen			
Klasse	A	B	C
Karakteristieke vuurbelasting $q_{fi,d}$ [MJ/m ²]	$q_{fi,d} \leq 350$	$350 < q_{fi,d} \leq 900$	$900 < q_{fi,d}$
Brandwerendheid op bezwijken van de constructieve elementen	R60	R120	R120
Tussenvloeren en hun draagconstructie: tenminste R30			

2.5.2 Natuurlijke brand (parametrische brandkromme)

De MACS+ software maakt het mogelijk het effect van een natuurlijke brand op de vloerplaat te beschouwen met behulp van de parametrische brandkromme zoals gedefinieerd in EN 1991-1-2 Annex A⁽⁴⁾. Er moet worden opgemerkt dat dit een Informatieve Annex is en het gebruik ervan mogelijk niet is toegestaan in sommige Europese landen, zoals Frankrijk. Voor het definitieve ontwerp wordt gemaakt, moet de ontwerper de relevante Nationale Bijlage raadplegen.

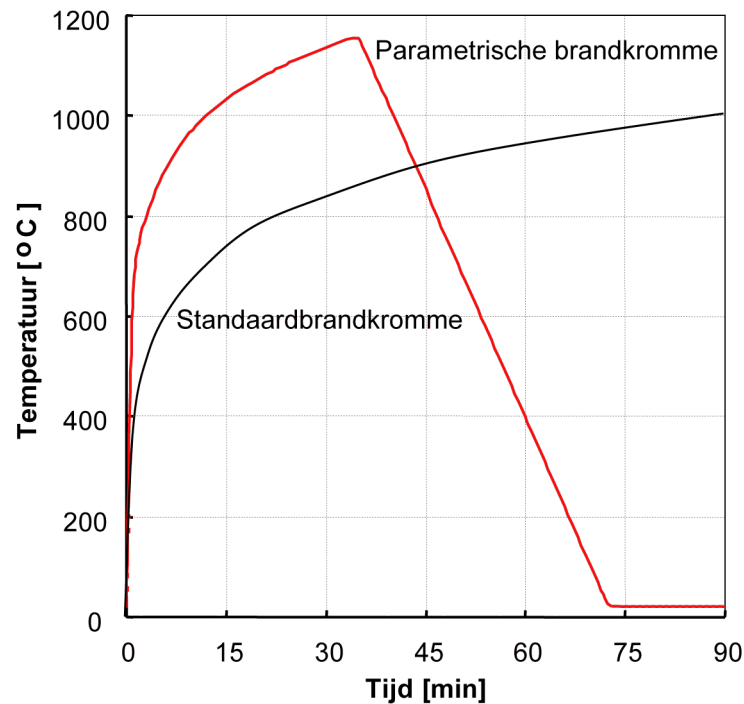
Met gebruik making van deze parametrische brandkromme, defineert de software de temperatuur in het compartiment rekening houdend met:

- De grootte van het compartiment:
 - compartimentlengte
 - compartimentbreedte
 - compartimenthoogte

- De hoogte en oppervlakte van ramen:
 - raamhoogte
 - raambreedte
 - percentage open raam
- De hoeveelheid brandbare materialen en hun verdeling in het compartiment:
 - vuurbelasting
 - verbrandingsfactor
 - de afbrandsnelheid
- De thermische eigenschappen van de begrenzings van het compartiment.

De temperatuur van een parametrische brand zal vaak sneller stijgen dan de standaardbrand in de vroege fasen, maar zodra de brandbare materialen opgebrand zijn zal de temperatuur snel dalen. De standaardbrand stijgt voortdurend en oneindig in temperatuur.

De standaard temperatuur-tijd kromme en een typische parametrische brandkromme zijn getoond in Figuur 2-6.



Figuur 2-6 Vergelijking van een typische parametrische en de standaard temperatuur-tijd kromme

3 AANBEVELINGEN VOOR CONSTRUCTIEVE ELEMENTEN

3.1 Ontwerpzones van de vloer

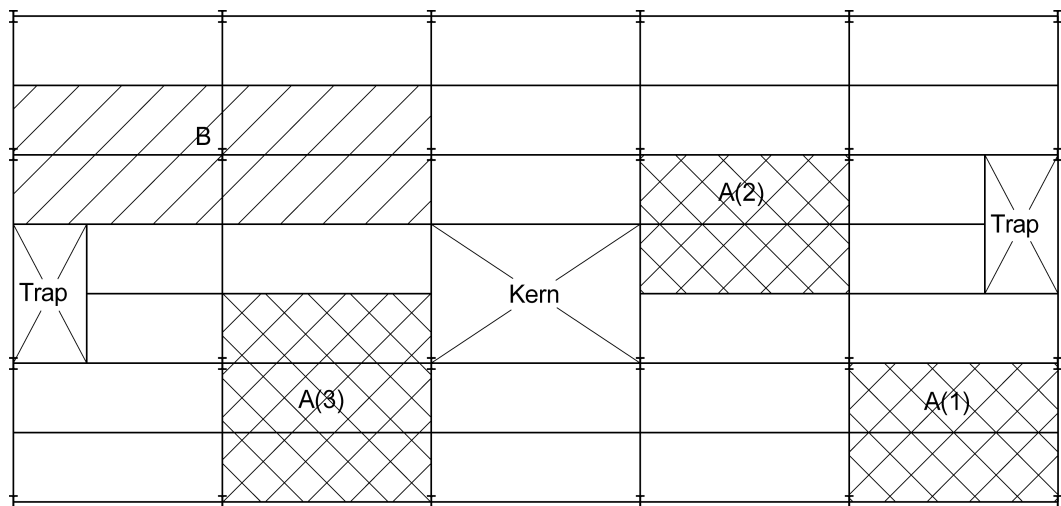
Elke vloer moet zijn verdeeld in ontwerpzones die voldoen aan de criteria gegeven in Hoofdstuk 2.3.

De verdeling van een vloer in ontwerpzones wordt geïllustreerd in Figuur 3-1. Vloerzones aangeduid als 'A' zijn binnen het toepassingsgebied van de MACS+ software en hun draagkracht in brandomstandigheden mag bepaald worden met MACS+. De zone aangeduid als 'B' is buiten het toepassingsgebied van de software omdat deze een kolom bevat en de liggers binnen de zone niet allen in dezelfde richting overspannen.

Een enkelvoudige vloerzone wordt geïllustreerd in Figuur 3-2 die de aanduidingen van de liggeroverspanningen toont, die worden gebruikt in de MACS+ software. In een normaal ontwerp worden de vloerbelastingen gedragen door kinderbalken die op hun beurt worden gedragen door de moerbalken.

De ontwerpmethode bij brand neemt in de grenstoestand brand aan dat de weerstand van de onbeschermden interne liggers significant afneemt, waarbij de staalplaat-betonvloer overblijft als een in twee richtingen overspannend element dat eenvoudig is opgelegd rondom zijn omtrek. Om er voor te zorgen dat zich in de vloer membraanwerking kan ontwikkelen, geeft de MACS+ software het moment uitgeoefend op elke ligger op de omtrek als een gevolg van de belastingen op de ontwerpzone van de vloer. Om de verticale oplegging op de omtrek van de ontwerpzone van de vloer in praktijk te behouden, berekent de software de benuttingsgraad en hieruit de kritieke temperatuur van deze liggers op de omtrek. De brandwerende bescherming voor deze liggers moet zijn ontworpen op basis van deze kritieke temperatuur en de brandwerendheid die is vereist voor de vloerplaat in overeenstemming met de nationale regelgeving. De kritieke temperatuur en de benuttingsgraad wordt voor elke ligger op de omtrek gerapporteerd, voor zijde A tot en met D van de ontwerpzone van de vloer zoals getoond door Figuur 3-2.

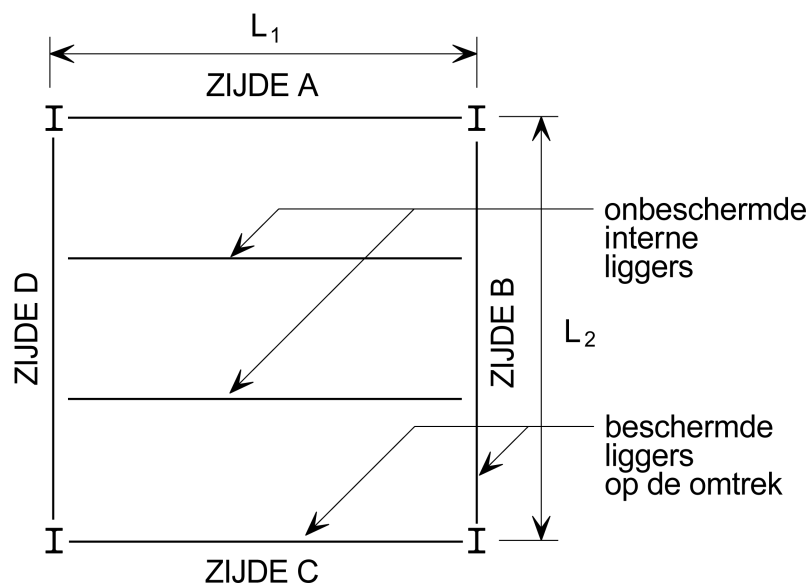
Zoals is opgemerkt in Hoofdstuk 2.2.2, is het een beperking voor het gebruik van de MACS+ software, dat de zonegrenzen voor 60 minuten of meer brandwerendheid moeten samenvallen met het kolomraster en de randliggers brandwerend moeten zijn beschermd. Voor 30 minuten brandwerendheid geldt deze beperking niet en de zonegrenzen hoeven niet samen te vallen met het kolomraster. Bijvoorbeeld: in Figuur 3-1 hebben zones A2 en A3 kolommen op slechts twee van hun hoeken en kunnen alleen beschouwd worden als ontwerpzones voor een vloer waarvoor niet meer dan 30 minuten brandwerendheid vereist is.



Legenda bij figuur

A: Deze zones mogen worden ontworpen met MACS+ B: Buiten het toepassingsgebied van MACS+
 A(1) Elke brandwerendheid
 A(2) & A(3) alleen 30 minuten brandwerendheid

Figuur 3-1 Mogelijke ontwerpzones van de vloer



Figuur 3-2 Definitie van overspanning 1 (L_1) en overspanning 2 (L_2) en de liggerlayout voor een ontwerpzone van de vloer in een gebouw met een eis aan de brandwerendheid van 60 minuten of meer.

3.2 Vloerplaat en liggers

De MACS+ software berekent de draagkracht van de vloerplaat en onbeschermd liggers in de grenstoestand brand. Omdat de eenvoudige ontwerpmethode, die is geïmplementeerd in de software, aanneemt dat de vloer adequate opleggingen heeft op zijn omtrek, berekent de software ook de kritieke temperatuur voor elke ligger op de omtrek, die wordt gebaseerd op de draagkracht van de ontwerpzone van de vloer.

3.2.1 Temperatuurberekening van de vloerplaat

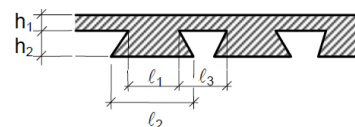
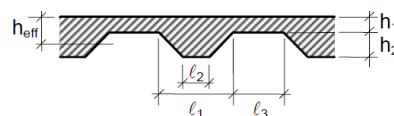
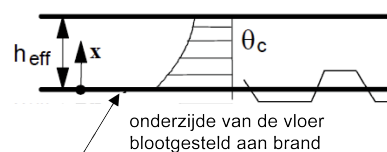
De temperatuurverdeling in een staalplaat-betonvloer kan worden bepaald met een berekeningsmodel met eindige differenties of eindige elementen waarbij de exacte vorm

van de vloer in de berekening meegenomen wordt en de beginselen en rekenregels uit 4.4.2 van EN 1994-1-2⁽⁶⁾ gerespecteerd worden.

Als een alternatief kan de temperatuurverdeling in een onbeschermd staalplaatbetonvloer onderworpen aan de standaardbrand worden bepaald met de waarden gegeven in Tabel 3-1, die is samengesteld in overeenstemming met EN 1992-1-2⁽¹⁹⁾ en zijn Nationale Bijlage, afhankelijk van de effectieve dikte h_{eff} van de vloer gedefinieerd door D.4 van Annex D van EN 1994-1-2⁽⁶⁾.

Tabel 3-1 Temperatuurverdeling in een vloer ($h_{\text{eff, max}} = 150\text{mm}$) voor blootstelling aan de standaardbrand van 30 tot en met 180 min

Afstand x [mm]	Temperatuur in de betonvloer θ_c [°C]				
	30 min	60 min	90 min	120 min	180 min
2,5	675	831	912	967	1 042
10	513	684	777	842	932
20	363	531	629	698	797
30	260	418	514	583	685
40	187	331	423	491	591
50	135	263	349	415	514
60	101	209	290	352	448
70	76	166	241	300	392
80	59	133	200	256	344
90	46	108	166	218	303
100	37	89	138	186	267
110	31	73	117	159	236
120	27	61	100	137	209
130	24	51	86	119	186
140	23	44	74	105	166
150	22	38	65	94	149



$$\Phi = \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \frac{2h_2}{l_1 + l_3 - l_2}$$

Uit de bovenstaande temperatuurverdeling kunnen de drie volgende parameters worden bepaald:

- θ_2 : temperatuur van de blootgestelde zijde van de vloer;
- θ_1 : temperatuur van de niet-blootgestelde zijde van de vloer;
- θ_s : temperatuur van de vloer op het niveau van het wapeningsnet.

Onder standaardbrandomstandigheden moeten de volgende waarden van x gebruikt worden om de temperaturen θ_1 , θ_2 , en θ_s van Tabel 3-1 te bepalen:

- Voor $\theta_2, x = 2,5 \text{ mm}$;
- Voor $\theta_1, x = h_{\text{eff}}$;
- Voor $\theta_s, x = h_1 - d + 10 \Phi$ (d : afstand tussen het hart van het wapeningsnet en de niet-blootgestelde zijde van het beton; Φ : zie Tabel 3-1).

3.2.2 Temperatuurberekening van onbeschermden staal-betonliggers

De temperatuur van een onbeschermden stalen ligger bij een standaardbrand kan worden bepaald in overeenstemming met 4.3.4.2.2 van EN 1994-1-2. Om het gebruik van de berekeningsmethode gemakkelijk te maken, zijn er voor onbeschermden stalen profielen temperaturen gegeven in Tabel 3-2 als een functie van de resulterende profielfactor (dat is de profielfactor vermenigvuldigd met de correctiefactor voor het schaduweffect) en de brandblootstellingsduur).

Als een alternatief kan de temperatuurverdeling in een onbeschermden staalplaat-betonvloer onderworpen aan de standaardbrand worden bepaald met de waarden gegeven in Tabel 3-1, die is samengesteld in overeenstemming met EN 1992-1-2⁽¹⁹⁾ en zijn Nationale Bijlage, afhankelijk van de effectieve dikte h_{eff} van de vloer gedefinieerd door D.4 van Annex D van EN 1994-1-2⁽⁶⁾.

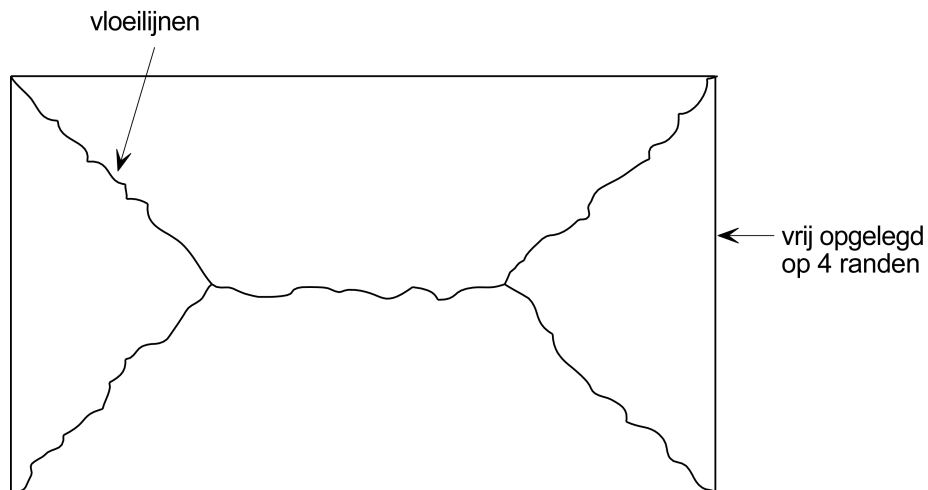
Tabel 3-2 Temperatuur van een onbeschermden stalen doorsnede bij een standaardbrand

Resulterende profielfactor $k_{sh} \left(\frac{A_l}{V_i} \right) [\text{m}^{-1}]$	Temperatuur van het staalprofiel θ_a [°C]				
	30 min	60 min	90 min	120 min	180 min
20	432	736	942	1 030	1 101
30	555	835	987	1 039	1 104
40	637	901	995	1 042	1 106
50	691	923	997	1 043	1 106
60	722	931	999	1 044	1 107
70	734	934	1 000	1 045	1 107
80	742	936	1 001	1 046	1 108
90	754	937	1 001	1 046	1 108
100	768	938	1 002	1 046	1 108
110	782	939	1 002	1 047	1 108
120	793	939	1 003	1 047	1 108
130	802	940	1 003	1 047	1 109
140	810	940	1 003	1 047	1 109
150	815	941	1 003	1 047	1 109
200	829	942	1 004	1 048	1 109
500	838	944	1 005	1 048	1 109

3.2.3 Ontwerp bij brand van de vloerplaat

Draagkracht van de staalplaat-betonvloer

Wanneer de draagkracht van elke ontwerpzone van de vloer berekend wordt, worden de weerstanden van de staalplaat-betonvloer en de onbeschermden liggers separaat berekend. De vloer wordt niet doorgaand aangenomen langs de omtrek van de ontwerpzone van de vloer. De belasting die kan worden opgenomen door de buigingscapaciteit van de staalplaat-betonvloer binnen de ontwerpzone van de vloer is berekend gebaseerd op een ondergrensmechanisme onder aanname van een vloeilijnenpatroon zoals getoond in Figuur 3-3.



Figuur 3-3 Aangenomen vloeilijnenpatroon gebruikt om de weerstand van de vloer te berekenen

De waarde van de weerstand berekend met behulp van het ondergrensmechanisme wordt verhoogd door beschouwing van het gunstige effect van trekmembraanwerking bij grote verplaatsingen. Deze verbetering neemt toe met toenemende verticale doorbuiging van de vloer tot bezwijken optreedt als gevolg van breuk van de wapening over de lange vloeroverspanning of bezwijken op druk van het beton in de hoeken van de vloer, zoals getoond by Figuur 3-4. Omdat de ontwerpmethode het punt van bezwijken niet kan voorspellen, wordt de doorbuiging die wordt beschouwd bij de berekening van de verbetering gebaseerd op een conservatieve schatting van de doorbuiging van de vloer met inbegrip van het effect van de thermische kromming van de vloer en de rek in de wapening, zoals getoond hieronder.

$$w = \frac{\alpha(T_2 - T_1)l^2}{19.2h_{eff}} + \sqrt{\left(\frac{0.5f_y}{E_a}\right) \frac{3L^2}{8}}$$

De doorbuiging die mogelijk is als gevolg van verlenging van de wapening is ook beperkt door de volgende uitdrukking.

$$w \leq \frac{\alpha(T_2 - T_1)l^2}{19.2h_{eff}} + \frac{l}{30}$$

waar:

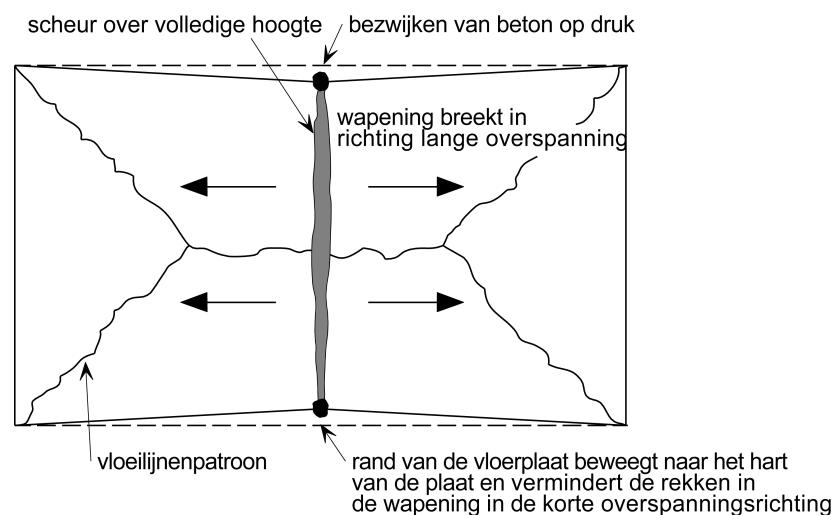
$(T_2 - T_1)$ is het temperatuurverschil tussen de boven- en onderzijde van de vloer

L	is de langere afmeting van de ontwerpzone van de vloer
l	is de kortere afmeting van de ontwerpzone van de vloer
f_y	is de vloeigrens van het wapeningsnet
E	is de elasticiteitsmodulus van het staal
h_{eff}	is de effectieve dikte van de staalplaat-betonvloer
α	is de thermische uitzettingscoëfficiënt van beton.

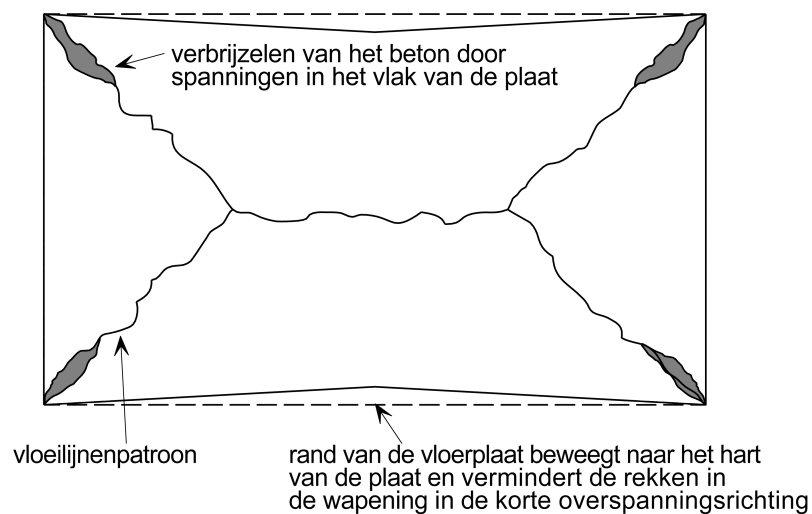
Alle beschikbare bewijsvoering uit testen laat zien dat deze doorbuiging overschreden zal worden vóór bezwijken van de vloer optreedt. Dit betekent dat de weerstand voorspeld met behulp van de ontwerpmethodode conservatief zal zijn vergeleken met zijn werkelijke prestatie.

De totale doorbuiging van de vloer is ook beperkt door de volgende uitdrukking:

$$w \leq \frac{L + l}{30}$$



(a) Bezwijken van de wapening op trek



(b) Bezwijken van het beton op druk

Figuur 3-4 Bezwijkvormen

De resterende buigweerstand van de onbeschermden staal-betonliggers is vervolgens opgeteld bij de verbeterde weerstand van de vloer om de totale weerstand van het complete systeem te verkrijgen.

Vlamdichtheid en thermische isolatie prestatie van de staalplaat-betonvloer

De MACS+ software controleert niet expliciet de brandwerendheid van de vloerplaat op het criterium thermische isolatie of vlamdichtheid. De ontwerper moet daarom zorgen dat de gekozen vloerdikte voldoende is om de benodigde prestatie te behalen op het criterium thermische isolatie in overeenstemming met de aanbevelingen gegeven in EN 1994-1-2.

Om te zorgen dat de staalplaat-betonvloer zijn vlamdichtheid tijdens de brand behoudt en dat membraanwerking kan ontwikkelen, moet aandacht worden geschonken aan de borging dat het wapeningsnet voldoende overlappend is uitgevoerd. Dit is speciaal belangrijk in het gebied van de onbeschermden liggers en bij de kolommen. Verdere informatie over de vereiste overlappingslengten en de plaatsing van het wapeningsnet is gegeven in Hoofdstuk 3.3.

3.2.4 Ontwerp bij brand van liggers op de omtrek van de ontwerpzone van de vloer

De liggers langs de omtrek van de ontwerpzone van de vloer, aangeduid met A tot en met D in Figuur 3-2, moeten de brandwerendheid hebben die is vereist voor de vloerplaat, teneinde de vereiste verticale ondersteuning op de omtrek van de ontwerpzone van de vloer te kunnen leveren. Dit resulteert er gewoonlijk in dat deze liggers brandwerend beschermd worden.

De MACS+ software berekent het ontwerpeffect van de belastingen op deze liggers op de omtrek en de momentweerstand van de ligger bij kamertemperatuur, om de benuttingsgraad voor elke ligger op de omtrek te kunnen berekenen, die is berekend met behulp van de handleiding gegeven in EN 1993-1-2 § 4.2.4, zoals getoond hieronder.

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}}$$

waar:

$E_{fi,d}$ is het ontwerpeffect van de belastingen op de ligger bij brand

$R_{fi,d,0}$ is de ontwerp weerstand van de ligger op tijdstip $t = 0$.

Na berekening van de benuttingsgraad kan de software de kritieke temperatuur van de onderflens van de liggers op de omtrek berekenen. Deze kritieke temperatuur wordt gerapporteerd in de MACS+ software uitvoer om te gebruiken bij de specificatie van de brandwerende bescherming die is vereist op elke ligger op de omtrek van de ontwerpzone van de vloer. Volledige details van de berekeningsmethode kunnen worden gevonden in het MACS+ Achtergronddocument⁽⁷⁾.

Voor liggers op de omtrek met ontwerpzones van de vloer aan beide zijden, moet de laagste waarde van de kritieke temperatuur gegeven door het ontwerp van de aangrenzende ontwerpzones van de vloer gebruikt worden bij het ontwerp van de brandwerende bescherming voor die ligger op de omtrek. De ontwerpmethode voor een

ligger op de omtrek die wordt gedeeld door twee ontwerpzones van de vloer wordt geïllustreerd in het uitgewerkte voorbeeld, zie Hoofdstuk 5.

Bij de specificatie van de brandwerende bescherming voor de liggers op de omtrek, moeten aan de leverancier van de brandwerende bescherming de profielfactor voor het element dat moet worden beschermd, de vereiste brandwerendheid en de kritieke temperatuur van het element worden gegeven. Gerespecteerde fabrikanten van brandwerende bescherming hebben een multi-temperatuur beoordeling voor hun product dat zal zijn beoordeeld in overeenstemming met EN 13381-4⁽¹⁷⁾ voor niet-reactieve materialen of EN 13381-8⁽¹⁸⁾ voor reactieve materialen (opschuimende coating). Ontwerptabellen voor brandwerende bescherming welke de profielfactor relateren aan de bekledingsdikte zijn gebaseerd op één enkele waarde van de beoordeelde temperatuur. Deze beoordeelde temperatuur moet kleiner zijn dan of gelijk aan de kritieke temperatuur van het element.

3.3 Wapeningdetails

De vloeigrens en vervormingscapaciteit van het wapeningstaal moeten zijn gespecificeerd in overeenstemming met de voorschriften van EN 10080. De karakteristieke vloeigrens van wapening volgens EN 10080 zal liggen tussen 400 en 600 MPa (N/mm²), afhankelijk van de nationale markt.

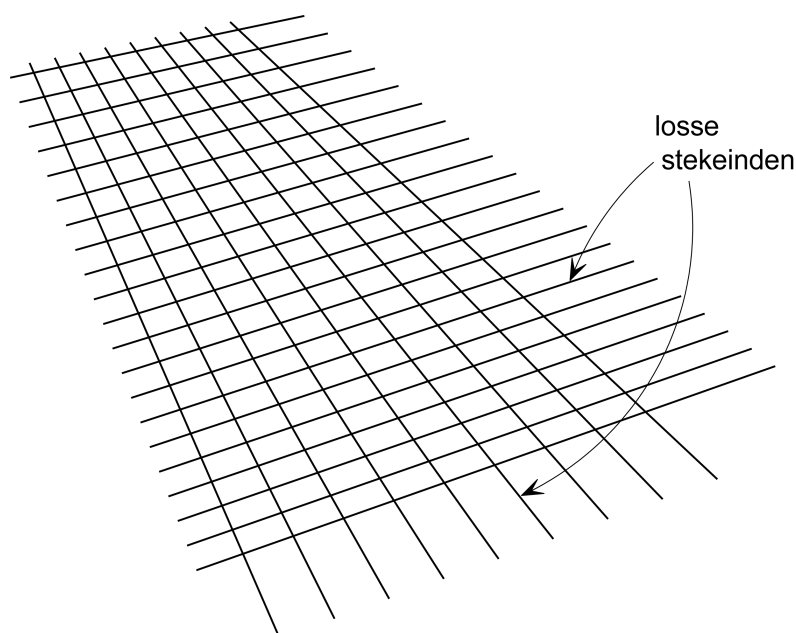
In de meeste landen mogen de nationale normen voor de specificatie van wapening nog steeds bestaan als niet-tegenstrijdige aanvullende informatie (NCCI), omdat een algemene range van staalsoorten niet akkoord is bevonden voor EN 10080.

In staalplaat-betonvloeren is de primaire functie van het wapeningsnet om het scheuren van het beton te beperken. Daarom neigt men ernaar het wapeningsnet zo dicht mogelijk te plaatsen bij het betonoppervlak waarbij de minimum betondekking gerealiseerd wordt die is vereist om de juiste duurzaamheid te leveren, in overeenstemming met EN 1992-1-1⁽¹⁹⁾. In brandomstandigheden zal de positie van het wapeningsnet invloed hebben op de temperatuur van het wapeningsnet en de hefboomsarm bij de berekening van de buigweerstand. Doorgaans wordt adequaat gedrag bij brand bereikt met het wapeningsnet geplaatst tussen 15 mm en 45 mm onder het bovenoppervlak van het beton.

Hoofdstuk 3.3.1 geeft algemene informatie over wapeningdetails. Verdere handleiding en informatie kan worden verkregen in EN 1994-1-1⁽⁹⁾ en EN 1994-1-2⁽⁶⁾ of nationale specificaties zoals gegeven in referentie⁽²⁰⁾.

3.3.1 Detaillering van het wapeningsnet

Typische wapeningsnetten zijn 4,8 m bij 2,4 m en moeten daarom overlappen om continuïteit van de wapening te bereiken. Voldoende overlappingslengte moet daarom gespecificeerd worden en adequate controle op de bouwplaats moet worden ingesteld om te verzekeren dat dergelijke details worden geïmplementeerd op de bouwplaats. Aanbevolen overlappingslengten zijn gegeven in hoofdstuk 8.7.5 van EN 1992-1-1⁽¹⁹⁾ of kunnen worden gekozen in overeenstemming met Tabel 3-3. De minimum overlappingslengte voor wapeningsnetten is 250 mm. Idealiter moet het wapeningsnet zijn gespecificeerd met ‘losse stekeinden’, zoals getoond in Figuur 3-5, om stapeling van staven bij overlappingsen te vermijden. Het zal vaak economisch zijn ‘op maat gemaakte netten’ te bestellen om afval te reduceren.



Figuur 3-5 Wapeningsnet met losse stekeinden

Tabel 3-3 Aanbevolen trekoverlappingsen en verankeringslengten voor gelaste wapeningsnetten

Wapeningstype	Staaftype	Betonsterkteklasse					
		LC 25/28	NC 25/30	LC 28/31	NC 28/35	LC 32/35	NC 32/40
staafdiameter d van Staalsoort 500	Geribd	50d	40d	47d	38d	44d	35d
6 mm staven	Geribd	300	250	300	250	275	250
7 mm staven	Geribd	350	300	350	275	325	250
8 mm staven	Geribd	400	325	400	325	350	300
10 mm staven	Geribd	500	400	475	400	450	350

Toelichting:

Deze aanbevelingen kunnen conservatief worden toegepast bij een ontwerp in overeenstemming met EN 1992-1-1.

Waar een overlapping optreedt bij de bovenzijde van een profiel en de minimum dekking minder is dan tweemaal de diameter van de overlappende wapening, moet de overlappingslengte worden vergroot met een factor 1,4.

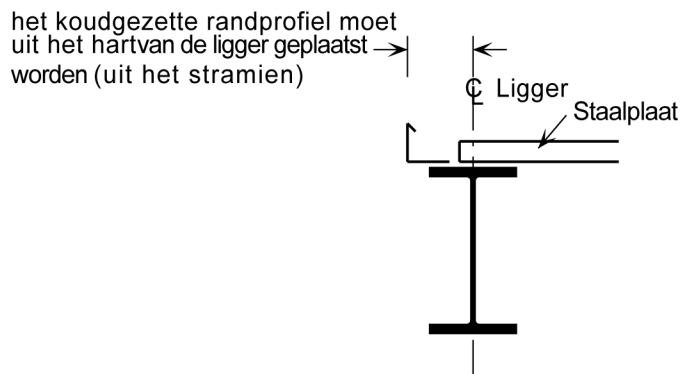
Geribde staven/draden zijn gedefinieerd in EN 10080.

De minimum overlappings-/verankeringslengte voor staven en netten moet 300 mm, respectievelijk 250 mm zijn.

3.3.2 Detailleringvoorschriften voor de rand van een staalplaat-betonvloer

De detaillering van de wapening bij de rand van de staalplaat-betonvloer zal een significant effect hebben op het gedrag van de randliggers en de vloerplaat in brandomstandigheden. De volgende handleiding is gebaseerd op de praktijkaanbevelingen voor het ontwerp en de uitvoering van staalplaat-betonvloeren om aan de voorschriften voor kamertemperatuurontwerp te voldoen. De methode en handleiding

voor het ontwerp bij brand, die wordt gepresenteerd in dit document, gaat ervan uit dat de staalplaat-betonvloer wordt uitgevoerd in overeenstemming met deze aanbevelingen.

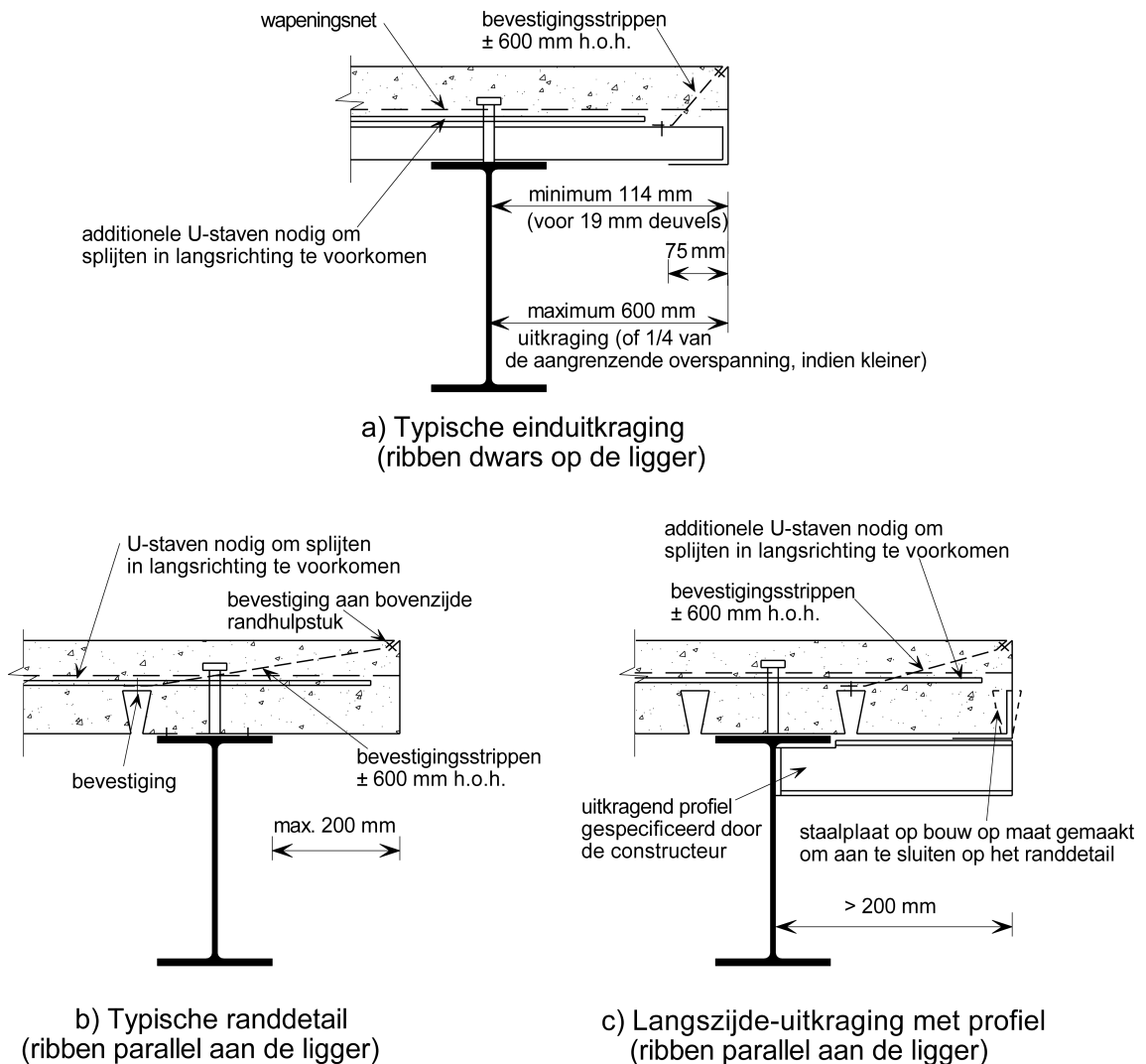


Figuur 3-6 Het uitsteken van het koudgezette randprofiel

De rand van de staalplaat-betonvloer wordt doorgaans uitgevoerd met behulp van 'randprofielen' gemaakt van strippen van dunne verzinkte staalplaat die op dezelfde manier wordt bevestigd aan de ligger als de staalplaat, zoals getoond in Figuur 3-6. In gevallen waar de randligger is ontworpen als samenwerkend met de betonvloer, zijn U-vormige wapeningstaven vereist om longitudinaal spleten van de betonvloer te voorkomen. Deze wapeningstaven zorgen er ook voor dat de randligger goed is verankerd aan de vloer bij gebruik van deze eenvoudige ontwerpmethode.

Enkele typische vloerranddetails voor de twee richtingen van de staalplaat zijn gegeven in Figuur 3-7. Waar de staalplaatribben dwars op de randligger staan en over een korte afstand uitkragen, kan het randprofiel worden bevestigd op de wijze zoals gesuggereerd in Figuur 3-7 (a). De uitkraging mag niet meer zijn dan 600 mm, afhankelijk van de dikte van de vloer en het gebruikte type staalplaat.

De moeilijkere situatie is waarbij de staalplaatribben evenwijdig zijn aan de randligger, en de afgewerkte vloer een korte afstand moet overbruggen, waarbij de langsrand van de staalplaat niet ondersteund is, zie Figuur 3-7 (b). Wanneer de vloeruitkraging hierbij meer is dan ongeveer 200 mm (afhankelijk van de specifieke details), moet het randprofiel overspannen tussen liggertjes bevestigd aan de randligger, zoals getoond in Figuur 3-7 (c). Deze liggen doorgaans hart-op-hart minder dan 3 m van elkaar, en moeten zijn ontworpen en gespecificeerd door de constructief ontwerper als onderdeel van het staalconstructiewerkpakket.



Figuur 3-7 Typische randdetails

3.4 Ontwerp van niet-samenwerkende randliggers

Het is algemene praktijk om de liggers bij de rand van de vloerplaten te ontwerpen als niet-samenwerkende stalen liggers. Dit omdat de kosten om te voldoen aan de voorschriften voor afschuifwapening meer zijn dan de meerkosten van het toepassen van een iets zwaardere niet-samenwerkende stalen ligger. Voor het ontwerp bij brand is het belangrijk dat de vloerplaat goed is verankerd aan de randliggers, omdat deze liggers zich bij de randen van de ontwerpzones van de vloer bevinden. Hoewel doorgaans niet vereist voor het ontwerp bij kamertemperatuur van niet-samenwerkende randliggers, beveelt deze handleiding aan dat stiftdeuvels worden toegepast op hart-op-hartafstanden van niet meer dan 300 mm en U-vormige wapeningstaven geplaatst om de stiftdeuvels, zoals beschreven in Hoofdstuk 3.3.2.

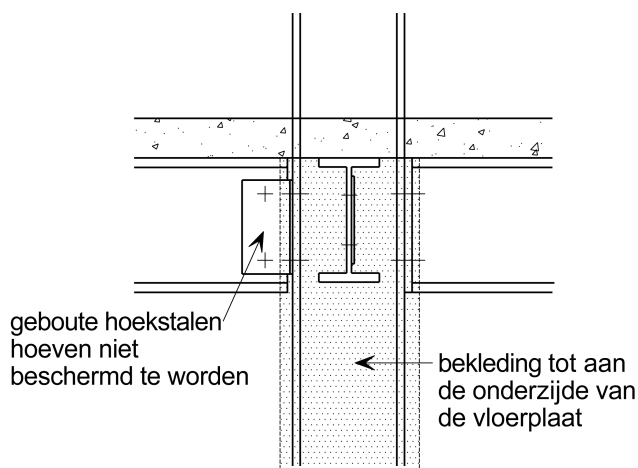
Randliggers hebben als dubbele functie het dragen van zowel de vloer als de gevel. Het is belangrijk dat de doorbuiging van de randliggers geen negatief effect heeft op de stabiliteit van de gevel omdat dit het gevaar kan vergroten voor brandweermensen en anderen in de omgeving. Dit heeft geen betrekking op het gevaar van vallend glas als gevolg van de thermische schok, wat alleen kan worden voorkomen met behulp van speciale materialen of sprinklers. Excessieve vervorming van de gevel kan het gevaar

vergroten, vooral wanneer een gebouw hoog is en bekleed is met metselwerk, als gevolg van loslatende stenen.

3.5 Kolommen

De ontwerphandleiding in dit document is bedoeld om constructieve schade en branduitbreiding naar het brandcompartiment zelf te beperken. Om dit te bereiken moeten de kolommen (met uitzondering van die op de bovenste verdieping) zijn ontworpen voor de vereiste periode van brandwerendheid of ontworpen om de geselecteerde natuurlijke (parametrische) brand te weerstaan.

Elke toegepaste brandwerende bescherming op een stalen kolom moet zich uitstrekken over de volledige hoogte van de kolom, inclusief de verbingszone (zie Figuur 3-8). Dit zal ervoor zorgen dat geen lokaal bezwijken van de kolom optreedt en dat de constructieve schade beperkt wordt tot één vloer.



Figuur 3-8 Volledige brandwerende bescherming op de kolommen

Als staal-betonekolommen worden gebruikt, moet de brandwerende bescherming op de stalen liggers die verbonden zijn met deze kolommen de verbingszone van elke kolom bedekken over een hoogte overeenkomstig de maximum hoogte van alle aangesloten stalen liggers. De dikte van de brandwerende bescherming moet het maximum zijn van die op de aangesloten stalen liggers.

3.6 Verbindingen

Zoals aangegeven in Hoofdstuk 2.2.1 relateren de waarden gegeven door de ontwerpmethode met 'eenvoudige' verbindingen zoals met flexibele kopplaten, lipverbindingen en hoekstaalverbindingen.

Het staalskeletgebouw getest in Cardington bevatte flexibele kopplaat- en lipverbindingen. Partieel en volledig bezwijken van enkele verbindingen werd waargenomen tijdens de afkoelingsfase van de Cardington brandtesten; er trad echter geen bezwijken van de constructie op als gevolg hiervan.

In het geval waar de kopplaat afgescheurd was aan het eind van de ligger, trad geen bezwijken op, omdat de vloerplaat de dwarskracht overbracht via andere belastingpaden. Dit onderstreept de belangrijke rol van de staalplaat-betonvloer, die kan worden bereikt met een juiste overlapping van de wapening.

De weerstanden van de eenvoudige verbindingen moeten zijn geverifieerd met behulp van de regels gegeven in EN 1993-1-8⁽²³⁾.

3.6.1 Classificatie van de verbinding

Verbindingsdetails moeten zo zijn dat ze voldoen aan de aannamen gemaakt in het ontwerpmodel. Drie classificaties van verbindingen zijn gegeven in EN 1993-1-8:

- scharnierend
 - verbindingen die de interne dwarskrachten overdragen zonder significante momenten over te dragen;
- flexibel
 - verbindingen die niet voldoen aan de criteria van scharnierende noch van stijve verbindingen;
- stijf
 - verbindingen die volledige continuïteit leveren.

EN 1993-1-8 §5.2 geeft beginselen voor de classificatie van verbindingen gebaseerd op hun stijfheid en sterkte; de rotatiecapaciteit (vervormingscapaciteit) van de verbinding moet ook beschouwd worden.

Zoals gesteld in Hoofdstuk 2.2.1 zijn de waarden gegeven door de eenvoudige ontwerpmethode tot stand gekomen onder aanname van het gebruik van scharnierende (eenvoudige) verbindingen. Om te verzekeren dat een verbinding geen significante buigende momenten overdraagt en dat het aldus een ‘eenvoudige’ verbinding is, moet deze voldoende vervormingscapaciteit hebben om een zekere hoekverdraaiing te kunnen ondergaan. Dit kan worden bereikt door zodanige detaillering van de verbinding die voldoet binnen de geometrische grenzen. Handleiding over de geometrische grenzen en initiële afmetingen om voldoende vervormingscapaciteit van de verbinding te verzekeren, is gegeven in Access-steel documenten⁽²⁵⁾.

3.6.2 Kopplaatverbindingen

Er zijn twee basistypen kopplaatverbindingen; partiële en volledige. SN013 beveelt het gebruik aan van:

partiële kopplaten wanneer $V_{Ed} \leq 0.75 V_{c,Rd}$

volledige kopplaten wanneer $0.75 V_{c,Rd} < V_{Ed} \leq V_{c,Rd}$

waar:

V_{Ed} is de ontwerp dwarskracht werkend op de verbinding

$V_{c,Rd}$ is de ontwerp dwarskrachtweerstand van de aansluitende ligger.

De weerstand van de componenten van de verbinding moet zijn geverifieerd met de voorschriften gegeven in EN 1993-1-8. Voor blijvende en tijdelijke ontwerpstoestanden moeten de volgende ontwerpweerstand geverifieerd worden bij normale temperaturen:

- het aangesloten element op stuik
- kopplaat in dwarskracht (bruto doorsnede)

- kopplaat in dwarskracht (netto doorsnede)
- kopplaat in dwarskracht (dwarskrachtblok)
- kopplaat in buiging
- liggerlijf in dwarskracht*.

Voor de volledigheid moeten alle hierboven gegeven ontwerpverificaties worden uitgevoerd. In de praktijk zullen echter voor ‘normale’ verbindingen de verificaties gemarkeerd met * doorgaans kritiek zijn. Handleiding over het voldoen aan de voorschriften van EN 1993-1-8 is gegeven in de Access-steel documenten⁽²⁶⁾.

EN 1993-1-8 geeft geen aanwijzing voor het ontwerp voor ‘tying’ weerstand van kopplaten (in verband met robuustheid van gebouwen). Handleiding is gegeven in SN015⁽²⁶⁾ voor de bepaling van de ‘tying’ weerstand van een kopplaat.

3.6.3 Lipverbindingen

Enkele en dubbele verticale lijnen van bouten mogen gebruikt worden in lipverbindingen. SN014⁽²⁶⁾ beveelt het gebruik aan van:

Enkele verticale lijnen van bouten wanneer: $V_{Ed} \leq 0.50 V_{c,Rd}$

Twee verticale lijnen van bouten wanneer: $0.50 V_{c,Rd} < V_{Ed} \leq 0.75 V_{c,Rd}$

Gebruik een kopplaat wanneer: $0.75 V_{c,Rd} < V_{Ed}$

waar:

V_{Ed} is de ontwerp dwarskracht werkend op de verbinding

$V_{c,Rd}$ is de ontwerp dwarskrachtweerstand van de aansluitende ligger.

Voor blijvende en tijdelijke ontwerptoestanden moeten de volgende ontwerpweerstand van de lipverbinding geverifieerd worden bij normale temperaturen:

- bouten in dwarskracht*
- lipverbinding op stuik*
- lipverbinding in dwarskracht (bruto doorsnede)
- lipverbinding in dwarskracht (netto doorsnede)
- lipverbinding in dwarskracht (dwarskrachtblok)
- lipverbinding in buiging
- lipverbinding in knik (kip)
- liggerlijf op stuik*
- liggerlijf in dwarskracht (bruto doorsnede)
- liggerlijf in dwarskracht (netto doorsnede)
- liggerlijf in dwarskracht (dwarskrachtblok)

- aansluitende element (ponsdwarskracht) (deze modus is niet geschikt voor lipverbindingen bevestigd aan kolomflenzen).

Voor de volledigheid moeten alle hierboven gegeven ontwerpverificaties worden uitgevoerd. In de praktijk zullen echter voor ‘normale’ verbindingen de verificaties gemarkeerd met * doorgaans kritiek zijn. Handleiding over het voldoen aan de voorschriften van EN 1993-1-8 is gegeven in de Access-steel documenten⁽²⁷⁾.

Evenals voor kopplaten geeft EN 1993-1-8 geen aanwijzing voor het ontwerp voor ‘tying’ weerstand van lipverbindingen. (in verband met robuustheid van gebouwen). Handleiding zoals gegeven in SN018⁽²⁷⁾ mag daarom gebruikt worden om de tying weerstand van een lipverbinding te bepalen.

3.6.4 Hoekstaalverbindingen

Hoewel er geen hoekstaalverbindingen gebruikt werden in het Cardington skelet, heeft SCI een aantal testen uitgevoerd op samenwerkende en niet-samenwerkende hoekstaalverbindingen bij brand⁽²⁷⁾. Deze verbindingen bestonden uit twee stalen hoekstalen, gebout aan elke zijde van het liggerlijf met behulp van twee bouten in elk been van het hoekstaal, die vervolgens ook met behulp van twee bouten werden bevestigd aan de flens van de kolom. De verbindingen bleken ductiel te zijn bij de rotaties onder brandomstandigheden en grote hoekverdraaiingen traden op. Deze vervormingscapaciteit was als gevolg van plastische scharnieren die zich vormden in het been van het hoekstaal grenzend aan de kolomzijde. Er trad geen bezwijken van bouten op tijdens de brandtest. De samenwerkende hoekstaalverbinding had een beter gedrag bij brand dan de niet-samenwerkende verbinding.

Voor niet-samenwerkende hoekstaalverbindingen wordt aanbevolen dat een enkele verticale lijn van bouten alleen gebruikt mag worden wanneer:

$$V_{Ed} \leq 0.50 V_{c,Rd}$$

De ontwerpweerstand van de hoekstaalverbinding moet zijn geverifieerd met behulp van de ontwerpregels gegeven in Hoofdstuk 3 van EN 1993-1-8. Tabel 3.3 van EN 1993-1-8 geeft de maximum en minimum waarden voor de rand, eind en hart-op-hart afstanden waaraan moet worden voldaan bij de detaillering van de boutposities.

3.6.5 Brandwerende bescherming

In gevallen waar beide aan te sluiten constructieve elementen brandwerend beschermd worden, moet de op elk element benodigde bescherming worden toegepast op de delen van de platen of hoekstalen die in contact zijn met dat element. Als slechts één element brandwerende bescherming nodig heeft, mogen de platen of hoekstalen die in contact zijn met de onbeschermd elementen onbeschermd blijven.

3.7 Globale stabiliteit van het gebouw

Teneinde bezwijken door zijdelingse verplaatsing (knikvorm voor een zijdelings ongesteund raamwerk) te voorkomen, moet het gebouw gestabiliseerd worden door stabiliteitsschijven of andere stabiliteitssystemen. Stabiliteitsschijven van metselwerk of gewapend beton moeten worden uitgevoerd met de vereiste brandwerendheid.

Als verbanden een belangrijke rol spelen in het verzorgen van de algehele stabiliteit van het gebouw, moeten deze worden beschermd volgens de geldende norm.

In gebouwen met twee verdiepingen, is het mogelijk de algehele stabiliteit te verzorgen zonder eisen aan de brandwerendheid van alle delen van het stabiliteitssysteem. In hogere gebouwen moeten alle delen van het stabiliteitssysteem op de juiste wijze brandwerend beschermd worden.

Eén wijze waarop die brandwerendheid kan worden bereikt zonder toepassing van brandwerende bescherming is om het stabiliteitssysteem in een beschermde kern te plaatsen, zoals een trappenhuis of een lift- of leidingenschacht. Het is belangrijk dat de wanden om zulke schacht voldoende brandwerend zijn om de uitbreiding van een brand te voorkomen. Stalen liggers, kolommen en verbanden die volledig binnen de schacht liggen kunnen onbeschermd zijn. Andere staalconstructies die de wanden van zulke schachten dragen moeten de vereiste brandwerendheid hebben.

4 COMPARTIMENTERING

Nationale regelgeving eist dat compartimentswanden die een brandcompartiment afscheiden van een ander brandcompartiment voor de vereiste brandwerendheidsperiode stabiliteit, vlamdichtheid en thermische isolatie hebben.

Stabiliteit is het vermogen van een wand om niet to bezwijken. Voor dragende wanden moet de dragende functie behouden blijven.

Vlamdichtheid is het vermogen om de doorgang van vlammen en hete gassen tegen te gaan.

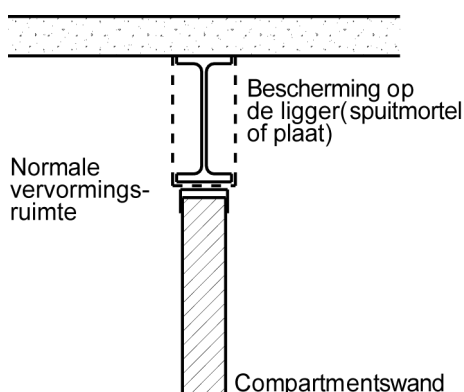
Thermische isolatie is het vermogen om weerstand te bieden tegen te grote overdracht van warmte van de aan brand blootgestelde zijde naar de niet blootgestelde zijde.

4.1 Liggers boven brandwerende wanden

Wanneer een ligger onderdeel is van een brandwerende wand, moet het scheidende element met de combinatie van wand en ligger voldoende thermische isolatie en vlamdichtheid hebben, evenals zijn dragende functie blijven vervullen. Voor een optimale prestatie bij brand, moeten compartimentswanden, voor zover mogelijk, geplaatst worden onder en in lijn met de liggers.

Liggers in het vlak van de wand

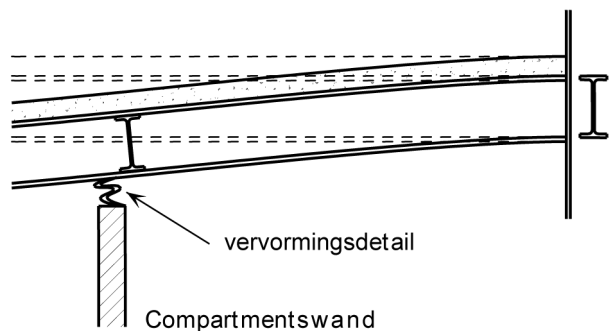
De Cardington testen lieten zien dat onbeschermde liggers boven en in hetzelfde vlak als de scheidingswanden (zie Figuur 4-1), die slechts aan een zijde opgewarmd worden, niet doorbuigen in een mate dat de vlamdichtheid van het compartiment aangetast wordt, en de normale doorbuigingseisen zijn hierbij voldoende. Aan de voorschriften voor thermische isolatie moet worden voldaan en bescherming voor 30 of 60 minuten zal nodig zijn; alle spleten en leidingdoorvoeringen moeten zijn brandwerend worden uitgevoerd. Liggers beschermd met opschuimende coating vereisen additionele thermische isolatie omdat de temperatuur aan de niet-brandzijde gemakkelijk de limieten overschrijdt die zijn geëist in de normen voor brandwerendheidstesten^(29,30).



Figuur 4-1 Liggers boven en in lijn met wanden

Liggers door wanden

De Cardington testen maakten duidelijk dat de stabiliteit van een vloer kan worden verzekerd zelf wanneer onbeschermden liggers grote doorbuigingen ondergaan. Wanneer echter wanden zijn geplaatst buiten het kolomraster, kunnen grote doorbuigingen van onbeschermden liggers de vlamdichtheid aantasten door vervorming van of scheuren in de wanden waar ze doorheen gaan. In zulke gevallen moeten de liggers hetzij beschermd worden hetzij van voldoende vervormingsmogelijkheid voorzien zijn. Er wordt aanbevolen dat een doorbuiging van $L/30$ moet kunnen optreden in wanden dwars op het midden van een onbeschermden ligger. Voor wanden dwars op een kwart van de liggeroverspanning, mag deze eis lineair gereduceerd worden tot nul bij de eindopleggingen (zie Figuur 4-2). De compartimentswand moet uitgevoerd worden tot de onderzijde van de vloer.



Figuur 4-2 Vervorming van liggers dwars op de wanden

4.2 Stabiliteit

Wanden die een verdieping in meerdere brandcompartimenten verdelen moeten zo worden ontworpen dat ze de te verwachten constructieve vervormingen zonder bezwijken kunnen ondergaan (stabiliteit). Waar de liggers boven en in het vlak van de wand overspannen, kunnen de vervormingen, zelfs van onbeschermden liggers, klein zijn en er kan volstaan worden met de normale doorbuigingseisen. Als een wand zich niet bij een liggerpositie bevindt, zal de doorbuiging van de vloer die de wand moet kunnen ondergaan groot kunnen zijn. Er wordt daarom aanbevolen dat brandwerende wanden voor zover mogelijk geplaatst moeten worden bij liggerposities.

In sommige gevallen kan de doorbuiging opgevangen worden in de vorm van een glijdverbinding. In andere gevallen is de potentiële doorbuiging mogelijk te groot en kan een vervormbare plaat of gordijn nodig zijn, zoals geïllustreerd in Figuur 4-2.

Nationale aanbevelingen moeten worden geraadpleegd voor de constructieve vervormingen die moeten worden beschouwd om te verzekeren dat de compartimentering gewaarborgd is.

4.3 Vlamdichtheid en thermische isolatie

Stalen liggers boven brandcompartimentswanden zijn onderdeel van de wand en moeten aan dezelfde brandscheidende eisen als de wand voldoen. Een stalen ligger zonder doorboringen zal vlamdicht zijn. Elke leidingdoorvoering en alle spleten boven de staal-betonliggers moeten echter op de juiste wijze brandwerend worden afgedicht.

Een onbeschermdde ligger in het vlak van een compartimentswand heeft niet de vereiste thermische isolatie en zal doorgaans van een brandwerende bescherming voorzien moeten worden. Er wordt aanbevolen dat alle liggers bij compartimentsgrenzen brandwerend beschermd worden, zoals getoond in Figuur 4-1.

5 REKENVOORBEELD

Om de toepassing van de uitvoer van de MACS+ software te illustreren, bevat dit hoofdstuk een rekenvoorbeeld gebaseerd op een realistische staal-beton vloerplaat en een op een staal-beton vloerplaat met liggers met ronde gaten.

Het beschouwde gebouw is een kantoorgebouw van 4 verdiepingen met een staalskelet. Voor het gebouw is 60 minuten brandwerendheid vereist volgens de nationale regelgeving (Bouwbesluit).

De vloerplaat bestaat voor elke verdieping uit een staalplaat-betonvloer uitgevoerd met behulp van Cofraplus 60 trapeziumvormige staalplaat, beton van normaal gewicht en een enkele laag wapeningsnet. De vloer overspant tussen 9 m lange kinderbalken die ontworpen zijn als samenwerkend met de vloerplaat. Deze kinderbalken worden ook op hun beurt ondersteund door samenwerkende moerbalken van 9 m en 12 m overspanning. De liggers op de rand van het gebouw zijn ontworpen als niet-samenwerkend in overeenstemming met EN 1993-1-1. Sommige van de interne liggers (tussen as 1 en 2) zijn samenwerkende standaard profielen en de liggers tussen as 2 en 3 zijn samenwerkende liggers met ronde gaten.

De constructie van de vloerplaat is getoond in Figuur 5-3 tot en met Figuur 5-6.

Figuur 5-3 toont de algemene opbouw van de staalconstructie op vloerniveau over de volledige breedte van het gebouw en twee beuken over zijn lengte. Er wordt aangenomen dat deze algemene opzet wordt herhaald in aangrenzende beuken over de lengte van het gebouw. De kolommen zijn HD 320×158, ontworpen als niet-samenwerkende kolommen in overeenstemming met EN 1993-1-1.

De beschouwde vloerbelasting was als volgt:

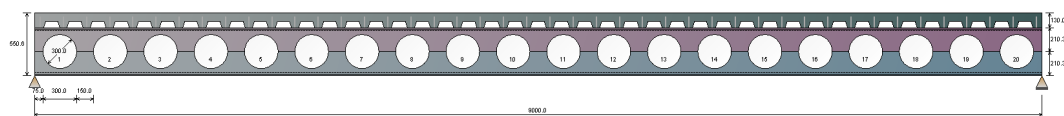
- veranderlijke belasting door het gebruik: 4 kN/m^2
- veranderlijke belasting door lichte scheidingswanden: 1 kN/m^2
- permanente belasting door plafond en leidingen: $0,7 \text{ kN/m}^2$
- eigen gewicht van de ligger: $0,5 \text{ kN/m}^2$

Voor de randliggers werd een additionele gevelbelasting van 2 kN/m beschouwd in het ontwerp.

De liggerafmetingen vereist om te voldoen aan de normale belastingcombinaties voor deze waarden van belastingen zijn getoond in Figuur 5-3. De interne liggers zijn samenwerkend en de graad van de afschuifverbinding is getoond voor elke ligger in Tabel 5-1.

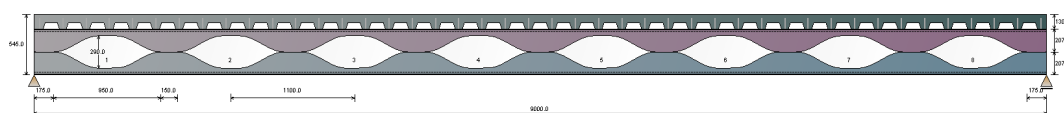
Figuur 5-4 toont een doorsnede over de staalplaat-betonvloer. De vloer is van beton C25/30 van normaal gewicht met een totale dikte van 130 mm. De vloer is gewapend met een ST 15C wapeningsnet met een vloeigrens van 500 N/mm^2 , die voldoet aan de voorschriften voor het ontwerp bij normale temperatuur, maar het wapeningsnet moet mogelijk verzaamd worden als het gedrag in brandomstandigheden niet voldoet.

De vloerzone E is ontworpen met behulp van samenwerkende liggers met ronde gaten gemaakt uit een warmgewalste IPE 300 in staalsoort S355 (zie Figuur 5-1).

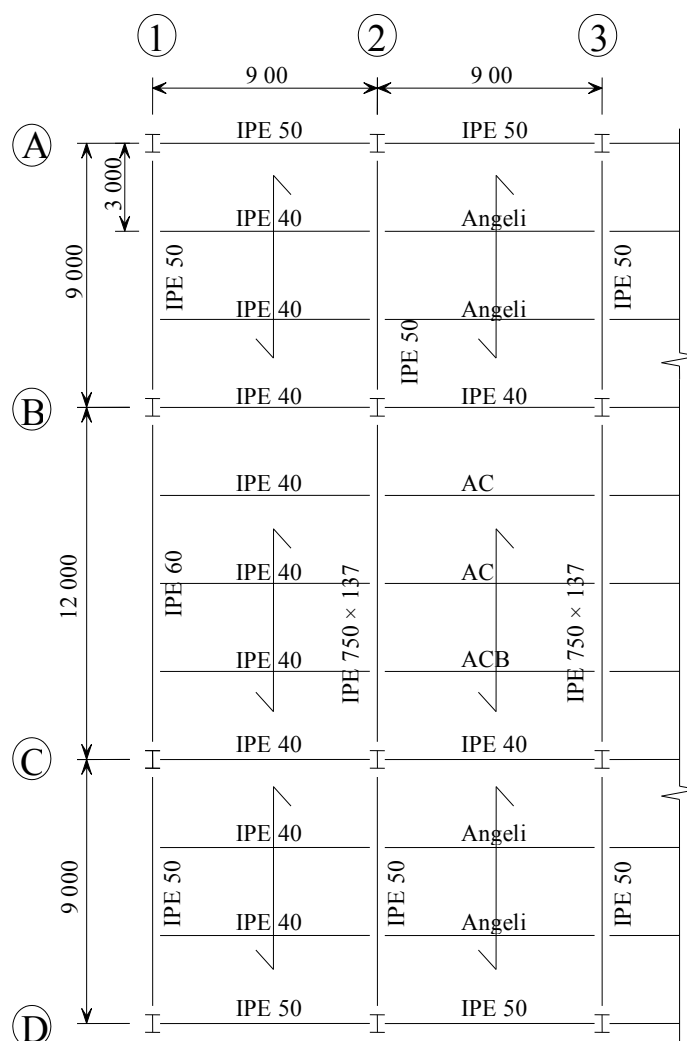


Figuur 5-1 Geometrie van de doorsnede van de samenwerkend ligger met ronde gaten

De vloerzones D en F zijn ontworpen met behulp van samenwerkende AngelinaTM liggers met sinusvormige openingen gemaakt uit een warmgewalste IPE 270 in S355 (zie Figuur 5-2).



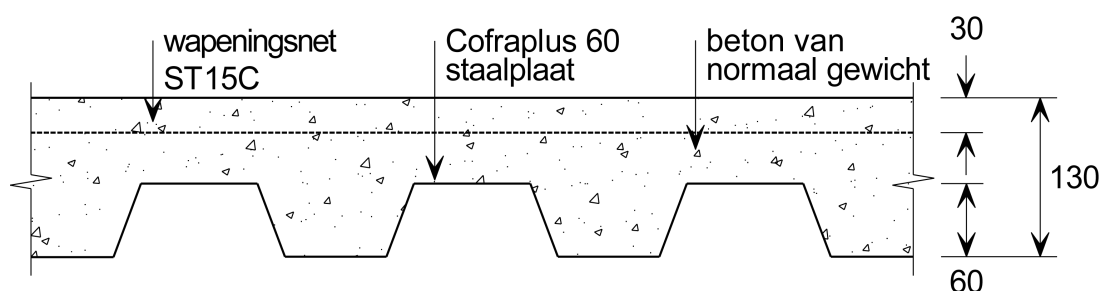
Figuur 5-2 Geometrie van de doorsnede van de samenwerkend ANGELINATM ligger



Figuur 5-3 Algemene opzet van de staalconstructie op vloerniveau

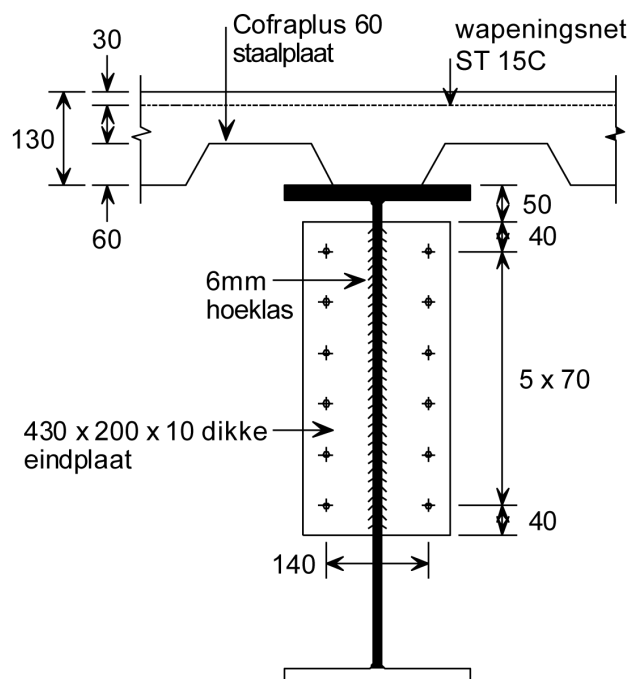
Tabel 5-1 Liggerdetails

Liggerprofiel (S355)	Locatie van de ligger	Constructietype	Graad van afschuifverbinding (%)	Aantal stiftdeuvels per groep en h.o.h. afstand
IPE 400	Secundaire interne ligger	Samenwerkend	51	1 @ 207mm
IPE 500	Secundaire randligger	Niet-samenwerkend	-	
IPE 500	Primaire interne ligger	Samenwerkend	72	2 @ 207mm
IPE 750 × 137	Primaire interne ligger	Samenwerkend	71	2 @ 207 mm
IPE 600	Primaire randligger	Niet-samenwerkend	-	
ACB IPE 300+IPE 300	Secundaire interne ligger	Samenwerkend	52	2 @ 207 mm
Angelina IPE270 + IPE 270	Secundaire interne ligger	Samenwerkend	52	2 @ 207 mm

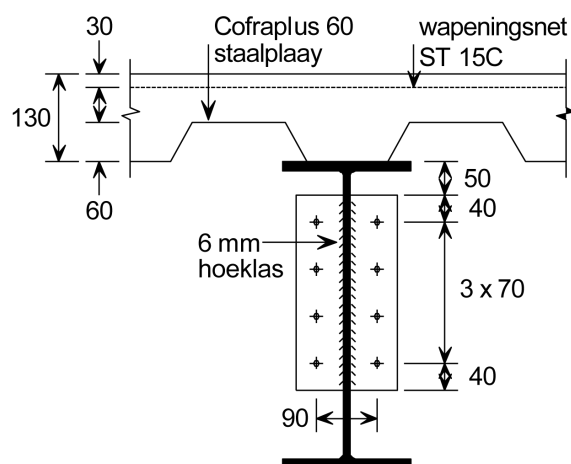


Figuur 5-4 Constructie van de vloerplaat

Alle verbindingen tussen de elementen van de stalen hoofddraagconstructie gebruiken flexibele kopplaatdetails en zijn ontworpen als scharnierend in overeenstemming met EN 1993-1-8. Figuur 5-5(a) toont de verbinding gebruikt tussen de moerbalken en de kolommen. De kolom-liggerverbindingen voor de kinderbalken zijn zoals getoond in Figuur 5-5(b). Figuur 5-6 toont de kopplaatverbinding tussen de kinderbalken en de moerbalken.

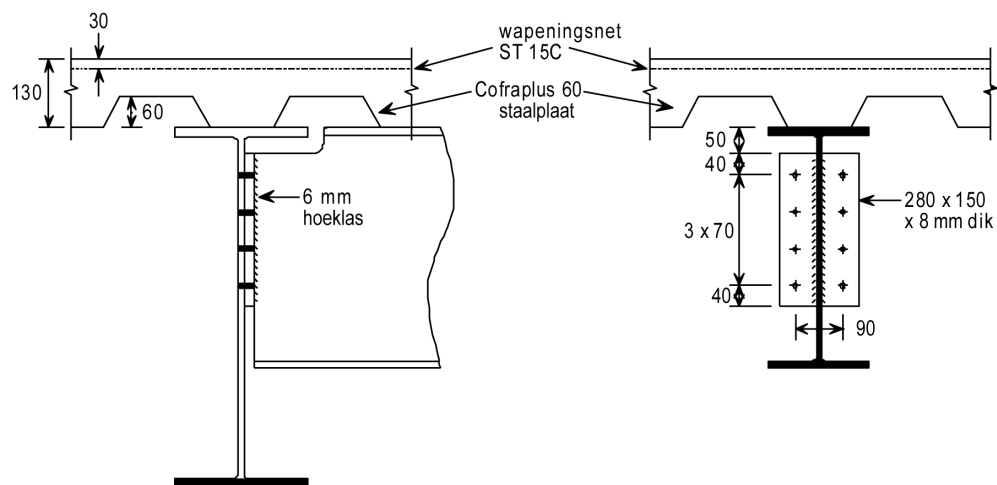


(a) Verbinding tussen de kolom en de primaire ligger



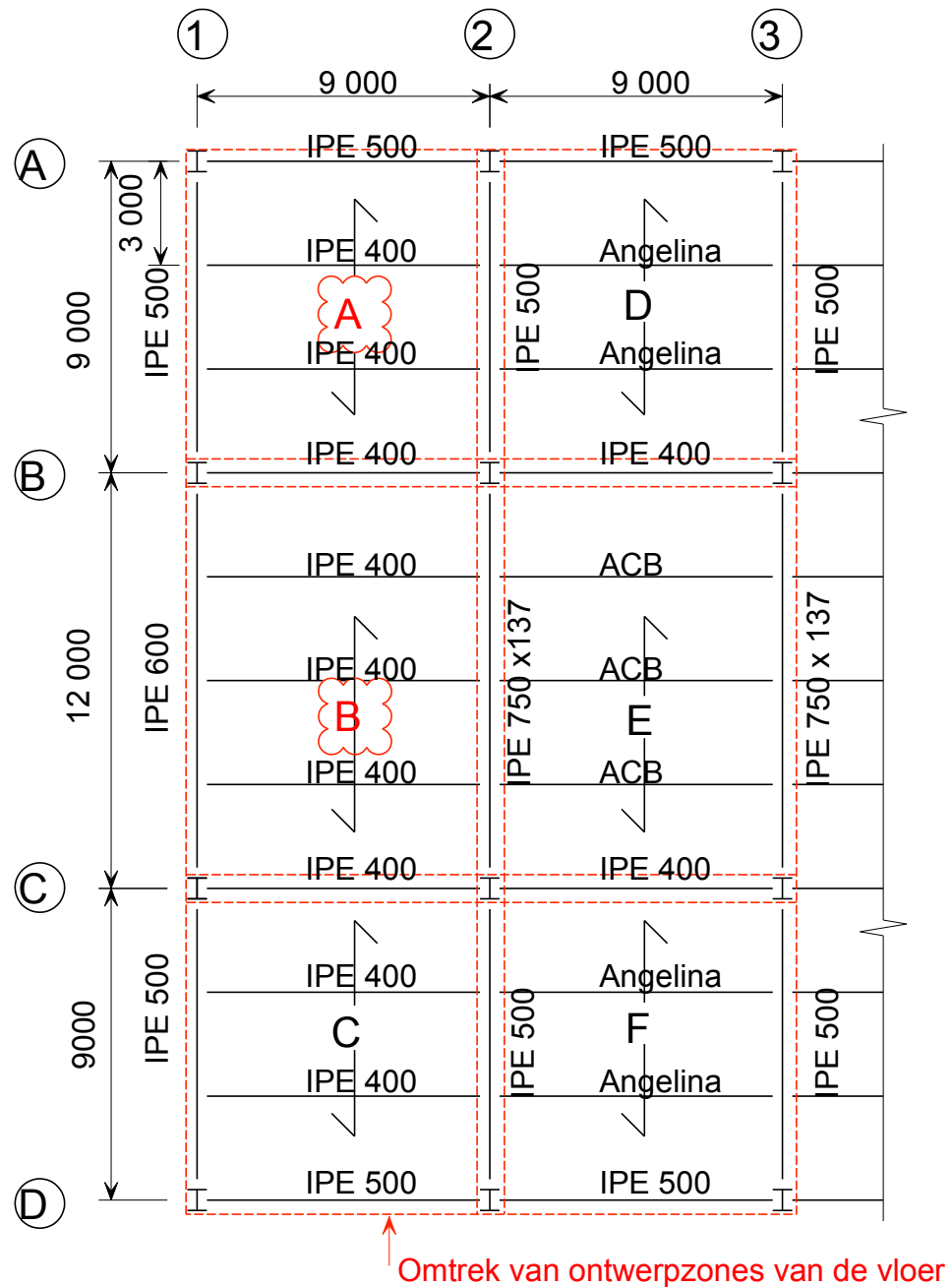
(b) Verbinding van de kinderbalk aan de kolom

Figuur 5-5 Kolom-ligger verbindingen



Figuur 5-6 Kinderbalk-moerbalk verbinding

Figuur 5-7 toont de vloerplaat verdeeld in ontwerpzones van de vloer. Het is te verwachten dat ontwerpzones A en B van de vloer de meeste ongunstige ontwerpomstandigheden zullen geven. Het ontwerp van beide zones zal beschouwd worden.



Figuur 5-7 Ontwerpzones van de vloer (A – F)

5.1 Ontwerp van een staalplaat-betonvloer in brandomstandigheden

De volgende ontwerpcontroles die zijn uitgevoerd op de ontwerpzones van de vloer zijn gebaseerd op de vloerconstructie die is vereist voor ontwerpcontroles bij kamertemperatuur. Als deze constructie niet blijkt te voldoen voor brandomstandigheden, dan zal de afmeting van het wapeningsnet en/of de vloerdikte worden vergroot om het gedrag onder brandomstandigheden te verbeteren. Omdat de ontwerpzone B kritischer lijkt dan ontwerpzone A als gevolg van zijn grotere overspanning, draaien we het programma eerst met ontwerpzone B.

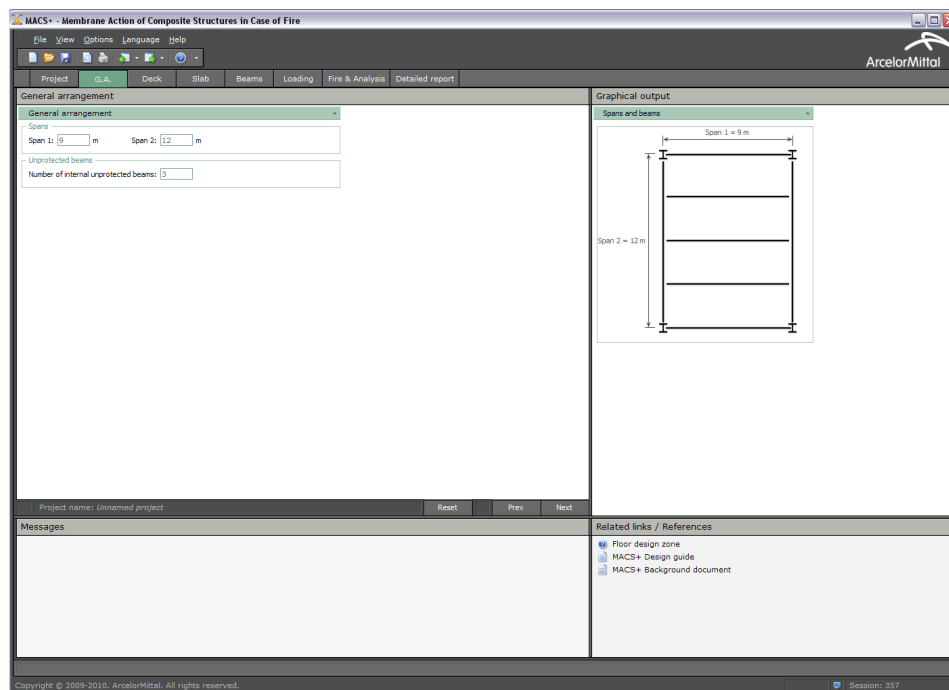
5.1.1 Vloerontwerp: Zone B

Tabel 5-2 toont de inputdata voor ontwerpzone van de vloer B, die 9 m bij 12 m is met als wapeningsnet ST 15C. Binnen deze ontwerpzone van de vloer zijn er 3 onbeschermd staal-betonliggers.

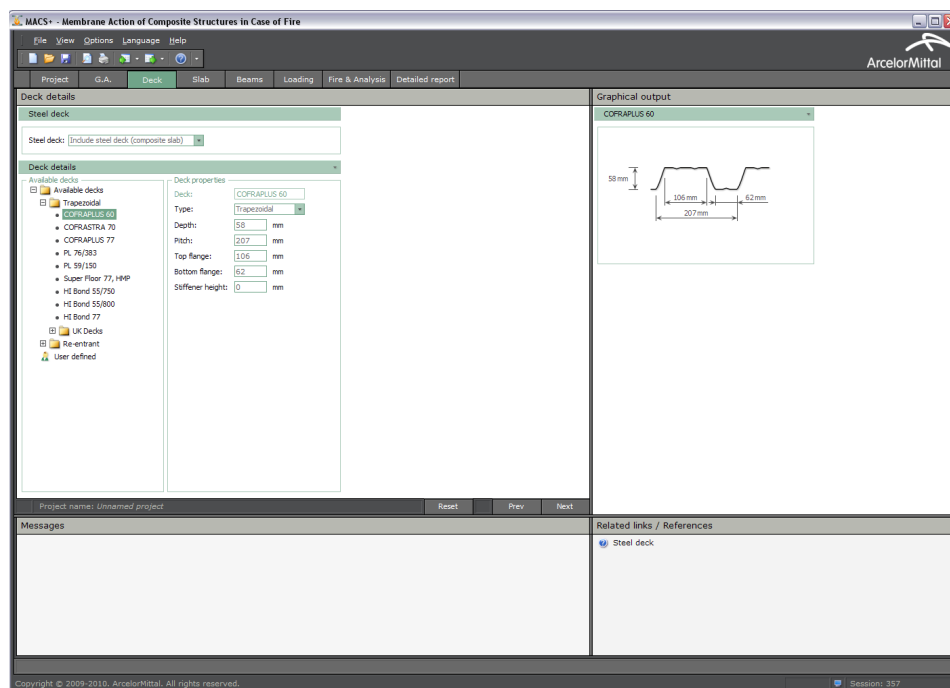
Tabel 5-2 Inputdata voor ontwerpzone van de vloer B

L (mm)	ℓ (mm)	f_c (N/mm ²)	A_s (mm ² /m)	f_{sy} (N/mm ²)	Onbeschermdeliggers	Staalplaat	Totale dikte van de vloer (mm)	d : asafstand wapeningsnet (mm)
12 000	9 000	25	142	500	IPE400	Cofraplus60	130	30

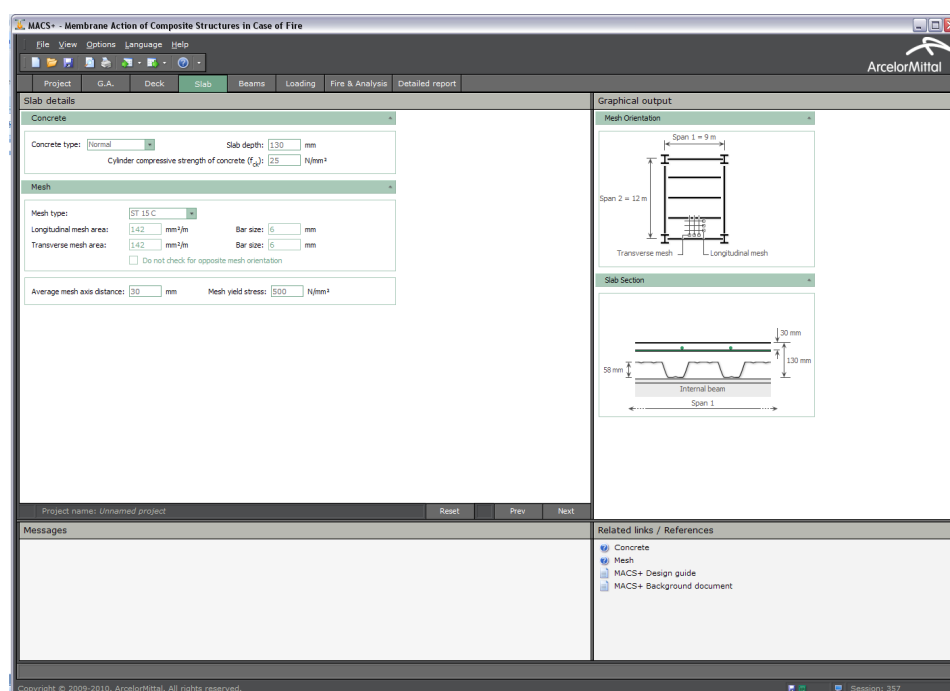
Figuur 5-8 tot en met Figuur 5-11 tonen dezelfde informatie in de invoerschermen van de MACS+ Software.



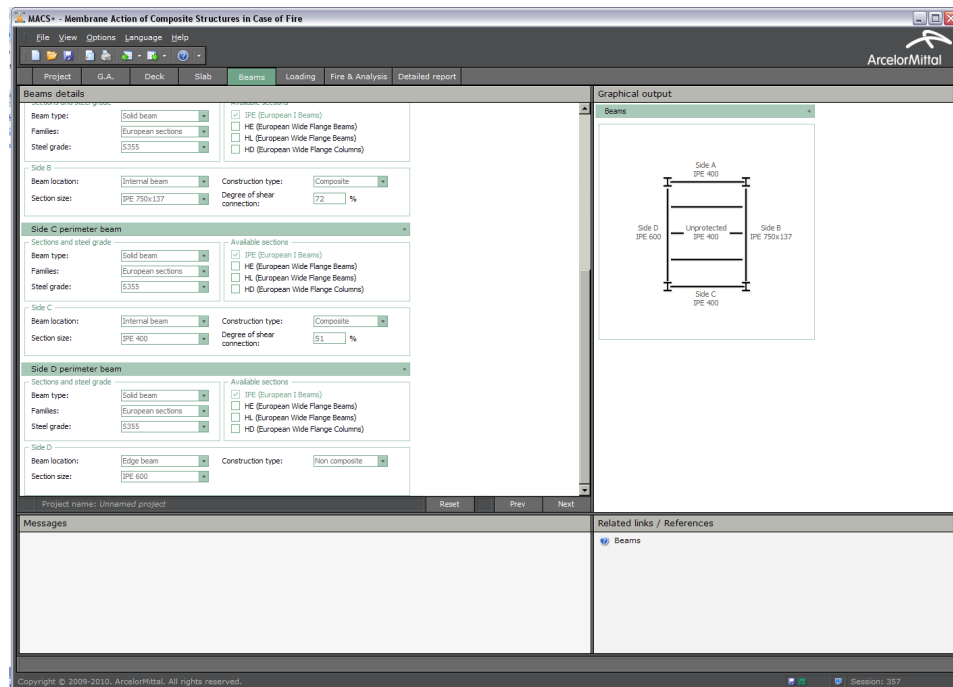
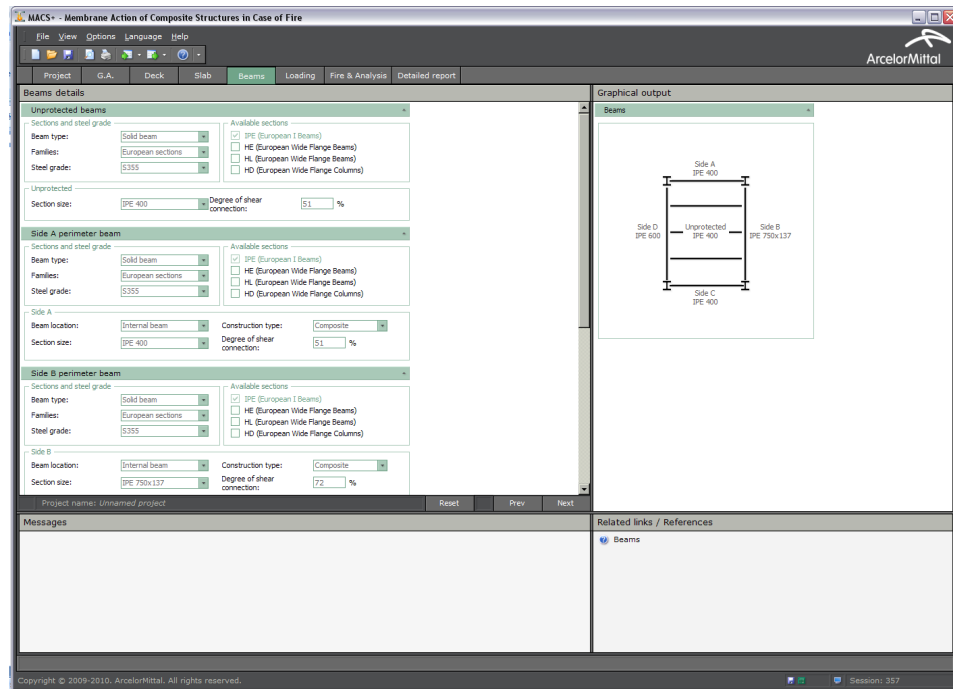
Figuur 5-8 Inputdata met behulp van de MACS+ software – Algemene opzet



Figuur 5-9 Inputdata met behulp van de MACS+ software - Staalplaat



Figuur 5-10 Inputdata met behulp van de MACS+ software - Vloer



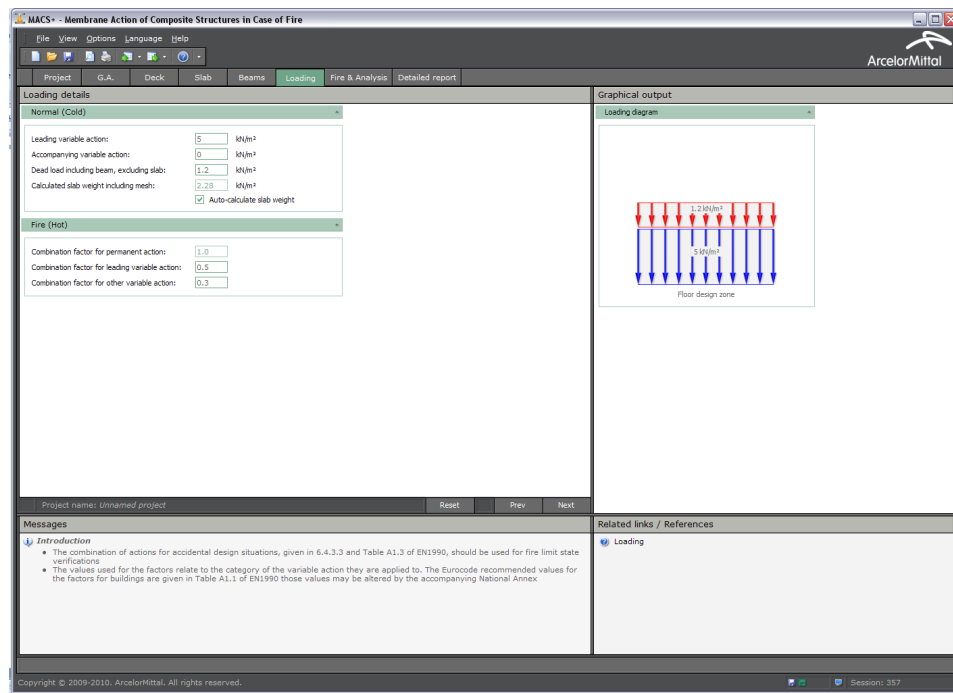
Figuur 5-11 Inputdata met behulp van de MACS+ software – Liggers in Zone B

De toepassing van het eenvoudige model is als volgt gedaan in verschillende stappen:

Stap 1: Berekening van de aangebrachte belasting op de vloer in geval van brand

De aangebrachte belasting op de vloer met een eigen gewicht voor de vloer van 2,28 kN/m² kan in geval van brand worden bepaald met:

$$q_{fi, Sd} = G + 0.5Q = (2.28 + 0.7 + 0.5) + 0.5 \times (4.0 + 1.0) = 5.98 \text{ kN/m}^2$$



Figuur 5-12 Inputdata met behulp van de MACS+ software - Belastingen

Stap 2: Berekening van de warmte-overdracht in de Cofraplus 60staalplaat-betonvloer

Van formule D.15a van Annex D van EN 1994-1-2⁽⁶⁾, kan de effectieve dikte van de vloer worden uitgedrukt door:

$$h_{eff} = h_1 + 0.5 h_2 \left(\frac{\ell_1 + \ell_2}{\ell_1 + \ell_3} \right) = 72 + 0.5 \times 58 \times \left(\frac{101 + 62}{101 + 106} \right) \approx 95 \text{ mm}$$

Deze effectieve dikte maakt het mogelijk te verifiëren dat de vloer voldoet aan de criteria voor EI60 die een effectieve dikte voor de staalplaat-betonvloer (inclusief afwerklaag) vereisen van minimum 80 mm.

Deze effectieve dikte leidt bovendien tot de volgende temperaturen θ_1 , θ_2 en θ_s (zie Tabel 3-1). Voor een blootstellingsduur van 60 minuten standaardbrand:

$$\theta_1 = 99 \text{ °C}; \theta_2 = 831 \text{ °C en } \theta_s = 288 \text{ °C}.$$

Volgens Tabel 3-4 van EN 1994-1-2 is er geen reductie van de effectieve vloeigrens voor het gelaste stalen wapeningsnet:

$$f_{sy, \theta_s} = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$\gamma_{M, fi, s} = 1.0$$

Daarnaast geldt bovendien:

$$\gamma_{M, fi, c} = 1.0$$

Stap 3: Berekening van de momentweerstand van de vloerplaatdoorsnede $M_{fi,0}$

Voor deze berekeningszone:

$L_1 = 9\,000\text{ mm}$ (overspanning van de kinderbalken)

$L_2 = 12\,000\text{ mm}$ (overspanning van de moerbalken)

Dus, $L = \max \{L_1; L_2\} = 12\,000\text{ mm}$ en $\ell = \min \{L_1; L_2\} = 9\,000\text{ mm}$.

Er kan worden afgeleid:

$$(g_0)_1 = 1 - \frac{2KA_s f_{sy,\theta_s} / \gamma_{M,f_i,s}}{0.85 f_c / \gamma_{M,f_i,c} d} = 1 - \frac{2 \times 1.0 \times \frac{142}{1000} \times 500 / 1.0}{0.85 \times 25 / 1.0 \times 30} = 0.777$$

$$(g_0)_2 = 1 - \frac{2A_s f_{sy,\theta_s} / \gamma_{M,f_i,s}}{0.85 f_c / \gamma_{M,f_i,c} d} = 1 - \frac{2 \times 1.0 \times \frac{142}{1000} \times 500 / 1.0}{0.85 \times 25 / 1.0 \times 30} = 0.777$$

Er moet worden opgemerkt dat de parameter K gelijk is aan 1,0 omdat het wapeningsnet dezelfde doorsnede heeft in beide richtingen.

De positieve momentweerstand van de vloerplaatdoorsnede is derhalve:

$$M_{f_i,0} = A_s f_{sy,\theta_s} / \gamma_{M,f_i,s} d \frac{3 + (g_0)_2}{4} = \frac{142}{1000} \times 500 / 1.0 \times 30 \times \frac{3 + 0.777}{4} = 2\,011.4\text{ Nmm/mm}$$

Tegelijk is het ook mogelijk de andere benodigde parameters te bepalen:

$$\mu = K \frac{3 + (g_0)_1}{3 + (g_0)_2} = 1.0 \times \frac{3 + 0.777}{3 + 0.777} = 1.0$$

$$a = \frac{L}{\ell} = \frac{12\,000}{9\,000} = 1.333$$

$$n = \frac{1}{2\mu a^2} \left(\sqrt{3\mu a^2 + 1} - 1 \right) = \frac{1}{2 \times 1.0 \times 1.333^2} \times \left(\sqrt{3 \times 1.0 \times 1.333^2 + 1} - 1 \right) = 0.427$$

Stap 4: Bepaling van de referentie draagkracht van de vloer

De referentiedraagkracht van de vloer kan worden bepaald:

$$p_{f_i} = 6 \frac{M_{f_i,0}}{n^2 a^2 \ell^2} = 6 \times \frac{2\,011.4}{0.427^2 \times 1.333^2 \times 9\,000^2} = 0.461 \times 10^{-3}\text{ N/mm}^2 = 0.461\text{ kN/m}^2$$

Stap 5: Bepaling van de doorbuiging voor de berekening van de membraanwerking

De doorbuiging van de vloer in de brandsituatie nodig om membraanwerking in rekening te kunnen brengen, kan worden verkregen uit:

$$\begin{aligned}
w &= \min \left\{ \frac{\alpha(\theta_2 - \theta_1)\ell^2}{19.2h_{eff}} + \min \left[\sqrt{\left(\frac{0.5f_{sy}}{E_a\gamma_{M,f\bar{t},s}} \right) \frac{3L^2}{8}}; \frac{\ell}{30} \right]; \frac{L + \ell}{30} \right\} \\
&= \min \left\{ \frac{1.2 \times 10^{-5}(831 - 99) \times 9000^2}{19.2 \times 95} + \min \left[\sqrt{\left(\frac{0.5 \times 500}{210000 \times 1.0} \right) \frac{3 \times 12000^2}{8}}; \frac{9000}{30} \right]; \frac{12000 + 9000}{30} \right\} \\
&= \min \{ 391.0 + \min[253.5; 300] ; 700 \} = 644.6 \text{ mm}
\end{aligned}$$

Stap 6: Berekening van de parameters om de membraanwerking te bepalen

De bepaling van de verschillende vermenigvuldigingsfactoren voor de membraanwerking is gebaseerd op de verschillende parameters α_1 , α_2 , β_1 , β_2 , A , B , C , D , k en b die moeten worden bepaald. De waarden van deze parameters zijn samengevat in Tabel 5-3.

Tabel 5-3 Parameters gebruikt voor de beoordeling van de membraanwerking in Zone B

Vergelijking	Verkregen waarde
$\alpha_1 = \frac{2(g_0)_1}{3 + (g_0)_1}$	0,412
$\beta_1 = \frac{1 - (g_0)_1}{3 + (g_0)_1}$	0,059
$\alpha_2 = \frac{2(g_0)_2}{3 + (g_0)_2}$	0,412
$\beta_2 = \frac{1 - (g_0)_2}{3 + (g_0)_2}$	0,059
$k = \frac{4na^2(1 - 2n)}{4n^2a^2 + 1} + 1$	1,194
$A = \frac{1}{2(1+k)} \left[\frac{\ell^2}{8n} - \left(\frac{1-2n}{2n} + \frac{1}{3(1+k)} \right) \left((nL)^2 + (\ell/2)^2 \right) \right]$	1 978 359 mm ²
$B = \frac{k^2}{2(1+k)} \left[\frac{nL^2}{2} - \frac{k}{3(1+k)} \left((nL)^2 + (\ell/2)^2 \right) \right]$	7 242 376 mm ²
$C = \frac{\ell^2}{16n} (k - 1)$	2 305 602 mm ²
$D = \frac{L^2}{8} (1 - 2n)^2$	388 465 mm ²
$b = \min \left[\frac{\ell^2}{8K(A + B + C - D)}, \frac{\gamma_{M,fi,s}}{kKA_s f_{sy,th}} \left(0,85 \frac{f_c}{\gamma_{M,fi,c}} \times 0,45d - A_s \frac{f_{sy,th}}{\gamma_{M,fi,s}} \frac{K + 1}{2} \right) \right]$	0,909

Stap 7: Berekening van de verbeteringsfactoren voor de membraanwerking

De verbeteringsfactoren e_{1b} , e_{2b} , e_{1m} en e_{2m} kunnen worden bepaald:

Tabel 5-4 Verbeteringsfactoren voor de beoordeling van de membraanwerking in Zone B

Vergelijking	Verkregen waarde
$e_{1b} = 2n \left(1 + \alpha_1 b \frac{k-1}{2} - \frac{\beta_1 b^2}{3} (k^2 - k + 1) \right) + (1-2n)(1 - \alpha_1 b - \beta_1 b^2)$	0,952
$e_{1m} = \frac{4b}{3 + (g_0)_1} \frac{w}{d} \left((1-2n) + n \frac{2+3k-k^3}{3(1+k)^2} \right)$	5,407
$e_1 = e_{1b} + e_{1m}$	6,360
$e_{2b} = 1 + \frac{\alpha_2 b K}{2} (k-1) - \frac{\beta_2 b^2 K}{3} (k^2 - k + 1)$	1,016
$e_{2m} = \frac{4bK}{3 + (g_0)_2} \frac{w}{d} \frac{2+3k-k^3}{6(1+k)^2}$	2,777
$e_2 = e_{2b} + e_{2m}$	3,794

Vervolgens wordt de globale verbeteringsfactor e bepaald:

$$e = e_1 - \frac{e_1 - e_2}{1 + 2\mu a^2} = 6.360 - \frac{6.360 - 3.7948}{1 + 2 \times 1.0 \times 1.333^2} = 5.796$$

Stap 8: Totale draagkracht van de vloer bij brand

De in de totale draagkracht van de vloer bij brand in de berekening meegenomen membraanwerking kan worden verkregen:

$$q_{fi,Rd,slab} = e \times p_{fi} = 5.796 \times 0.461 = 2.670 \text{ kN/m}^2$$

Stap 9: Draagkracht van de vloer waarbij de bijdrage van de onbeschermd staal-betonliggers in de berekening meegenomen wordt

Met paragraaf 4.3.4.2.2 van EN 1994-1-2 is het mogelijk om de temperatuur van de onbeschermd staal-betonliggers te bepalen. In een eerste stap is het nodig de profielfactor van het staalprofiel IPE400 te berekenen. De berekende waarden zijn samengevat in Tabel 5-5.

Uit Tabel 3-2 zijn de temperaturen van de stalen onderdelen van de samenwerkende doorsnede als volgt af te lezen:

- temperatuur van de flenzen: 938,6 °C;
- temperatuur van het lijf: 941,5 °C in Tabel 3-2 maar 938,6 °C is aangehouden, omdat de hoogte van het staalprofiel niet groter is dan 500 mm;
- temperatuur van de stiftdeuvels (zie 4.3.4.2.5 van EN 1994-1-2): $938,6 \times 0,8 = 750,9$ °C.

Tabel 5-5 Profielfactor van de onbeschermd staal-betonligger

Onderdeel staalprofiel	$k_{sh} = 0.9 \left(\frac{H + 0.5B}{H + 1.5B - t_w} \right)$	$\left(\frac{A_i}{V_i} \right) \text{ (m}^{-1}\text{)}$	$k_{sh} \left(\frac{A_i}{V_i} \right) \text{ (m}^{-1}\text{)}$
Onderflens	0,668	$\frac{2(B+t_f)}{Bt_f} = 159$	106
Lijf		$\frac{2}{t_w} = 233$	155
Bovenflens		$\frac{2(B+t_f)}{Bt_f} = 159$	106
Met: H : hoogte van het staalprofiel; B : breedte van het staalprofiel; t_f : dikte van de flens; t_w : dikte van het lijf.			

De temperaturen van het staalprofiel en van de stalen stiftdeuvels maken het mogelijk de momentweerstand van de interne niet-samenwerkende onbeschermd liggers te bepalen. De berekende waarden zijn gegeven in Tabel 5-6.

Tabel 5-6 Momentweerstand voor onbeschermde staal-betonliggers in Zone B

Parameters	Berekende waarden
Effectieve breedte van de vloer	$b_{eff} = \min\{9\,000/4; 3\,000\} = 2\,250 \text{ mm}$
Oppervlakte van het staalprofiel A_i	$A_i = 8\,446 \text{ mm}^2$
Reductiefactor voor de staalsterkte-eigenschappen	$k_{y,\theta} = 0.0523$
Reductiefactor voor de stiftdeugel sterkte-eigenschappen	$k_{u,\theta} = 0.17$
Dikte van de vloer onder druk in de brandsituatie $h_u = \frac{\sum A_i f_y k_{y,\theta} / \gamma_{M,fi,a}}{b_{eff} f_c / \gamma_{M,fi,c}}$	$h_u = \frac{8\,446 \times 355 \times 0.0523 / 1.0}{2\,250 \times 25 / 1.0} = 2.787 \text{ mm}$
Verbindingsgraad van de ligger bij 20°C	$n_{c,20^\circ C} = 0.51$
Verbindingsgraad van de ligger in de brandsituatie $n_{c,\theta} = \frac{n_{c,20^\circ C} k_{u,\theta} \gamma_{M,v}}{k_{y,\theta} \gamma_{M,fi,v}}$	$n_{c,\theta} = \frac{0.51 \times 0.17 \times 1.25}{0.0523 \times 1.0} = 2.09 > 1.0$ Dus volledige dwarskrachtverbinding
Positieve momentweerstand $M_{fi,Rd} = \frac{A_i f_y k_{y,\theta}}{\gamma_{M,fi,a}} \left(\frac{H}{2} + h_c - \frac{h_u}{2} \right)$	$M_{fi,Rd} = \frac{8\,446 \times 355 \times 0.0523}{1.0} \left(\frac{400}{2} + 130 - \frac{2.787}{2} \right)$ $= 51.51 \times 10^6 \text{ Nmm} = 51.51 \text{ kNm}$
Met: h_c : totale dikte van de vloer; $\gamma_{M,fi,a}$, $\gamma_{M,v}$ en $\gamma_{M,fi,v}$ partiële veiligheidsfactor voor het staalprofiel, de stalen stiftdeugel in normale omstandigheden en in brandomstandigheden.	

Vervolgens kan de draagkracht van de vloer dankzij de bijdrage van de onbeschermde staal-betonligger worden verkregen uit:

$$q_{fi,Rd,ub} = \frac{8M_{fi,Rd}}{L_1^2} \frac{1+n_{ub}}{L_2} = \frac{8 \times 51.5}{9^2} \times \frac{(1+3)}{12} = 1.70 \text{ kN/m}^2$$

Stap 10: Totale draagkracht van de vloer in brandomstandigheden en verificatie van de brandwerendheid van de vloer

De totale draagkracht van de vloer is:

$$q_{fi,Rd} = q_{fi,Rd,slab} + q_{fi,Rd,ub} = 2.67 + 1.70 = 4.37 \text{ kN/m}^2$$

Met betrekking tot de aangebrachte belasting op de vloer in de brandsituatie:

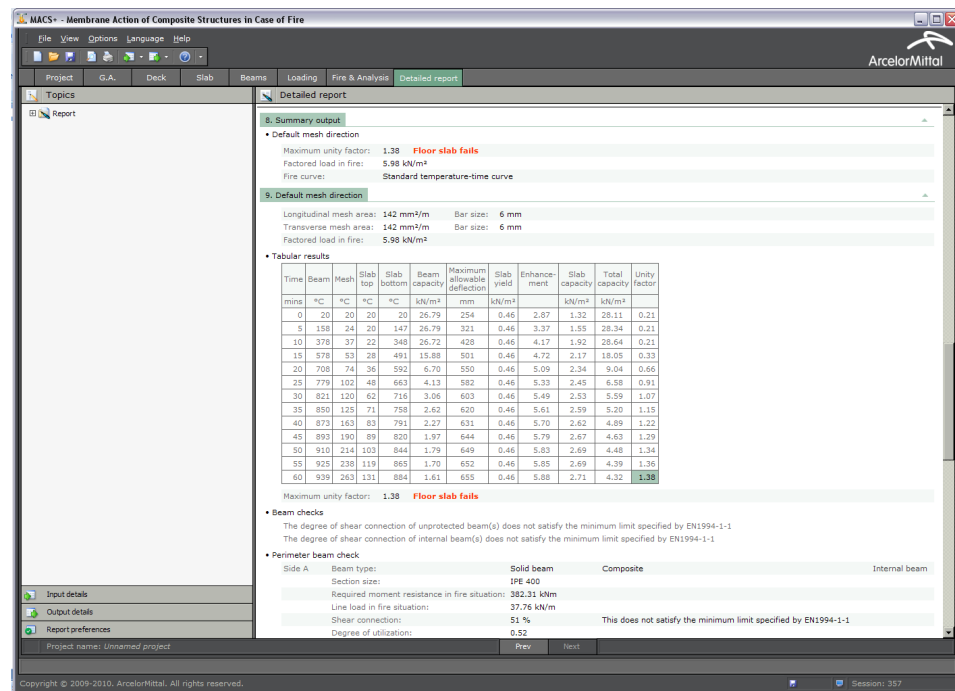
$$q_{fi,Sd} = 5.98 \text{ kN/m}^2 > q_{fi,Rd} = 4.37 \text{ kN/m}^2$$

Conclusie 1

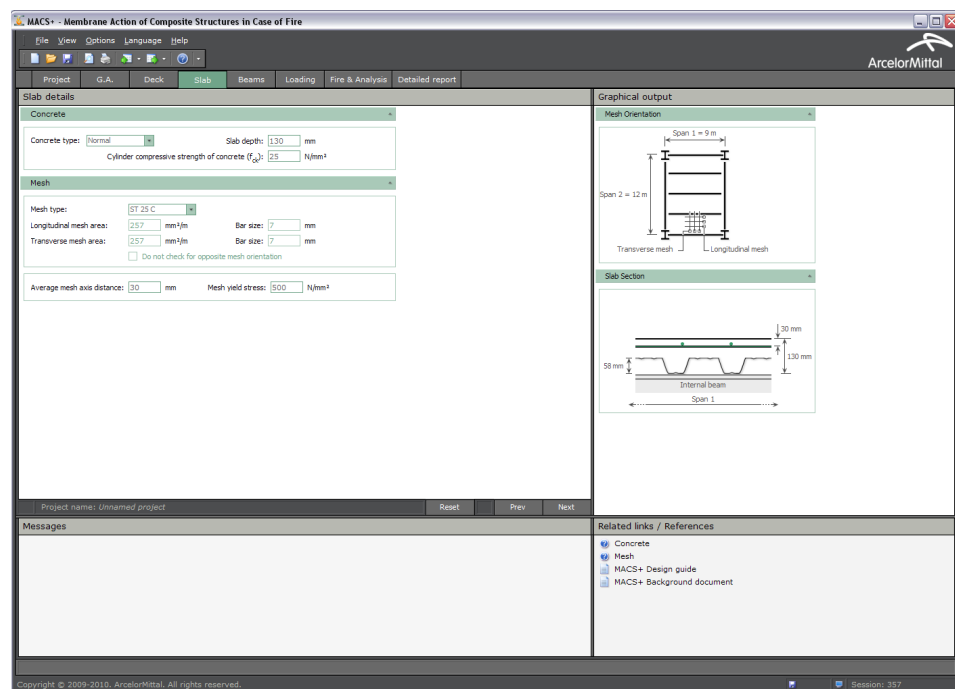
De conclusie is dat de stabiliteit van het vloersysteem in Zone B voor R60 niet kan worden verzorgd met zijn actuele afmetingen. Dus is het nodig de constructieve parameters te wijzigen.

Een adequate oplossing kan zijn de zwaarte van het wapeningsnet te vergroten en daarmee meer weerstand in de vloer te brengen. Daarom werd de zwaarte van het gelaste wapeningsnet vergroot van ST 15C (142 mm²/m) naar ST 25C (257 mm²/m).

Een nieuwe berekening moet worden gemaakt met de nieuwe inputdata. Maar het is alleen nodig de draagkracht van de vloer opnieuw te berekenen, omdat de onbeschermden staal-betonliggers onveranderd blijven.



Figuur 5-13 Outputdata met behulp van de MACS+ software - Gedetailleerd rapport



Figuur 5-14 Inputdata met behulp van de MACS+ software - Vloer

Stap 2a: Berekening van de warmte-overdracht in de Cofraplus 60 staalplaat-betonvloer Cofraplus 60

De resultaten zijn identiek aan stap 2 omdat de afmetingen van de vloer onveranderd blijven.

Stap 3a: Berekening van het resterende buigende moment van de vloerplaatdoorsnede $M_{fi,0}$

Er kan worden afgeleid:

$$(g_0)_1 = 1 - \frac{2KA_s f_{sy,\theta_s} / \gamma_{M,f_i,s}}{0.85 f_c / \gamma_{M,f_i,c} d} = 1 - \frac{2 \times 1.0 \times \frac{257}{1000} \times 500 / 1.0}{0.85 \times 25 / 1.0 \times 30} = 0.597$$

$$(g_0)_2 = 1 - \frac{2A_s f_{sy,\theta_s} / \gamma_{M,f_i,s}}{0.85 f_c / \gamma_{M,f_i,c} d} = 1 - \frac{2 \times 1.0 \times \frac{257}{1000} \times 500 / 1.0}{0.85 \times 25 / 1.0 \times 30} = 0.597$$

Er moet worden opgemerkt dat de parameter K gelijk is aan 1,0 omdat het wapeningsnet dezelfde doorsnede heeft in beide richtingen.

Dus, de positieve momentweerstand van de vloerplaatdoorsnede is:

$$M_{fi,0} = A_s f_{sy,\theta_s} / \gamma_{M,f_i,s} d \frac{3 + (g_0)_2}{4} = \frac{257}{1000} \times 500 / 1.0 \times 30 \times \frac{3 + 0.597}{4} = 3466.5 \text{ Nmm/mm}$$

Tegelijk is het ook mogelijk de andere benodigde parameters te bepalen:

$$\mu = K \frac{3 + (g_0)_1}{3 + (g_0)_2} = 1.0 \times \frac{3 + 0.597}{3 + 0.597} = 1.0$$

$$a = \frac{L}{\ell} = \frac{12000}{9000} = 1.333$$

$$n = \frac{1}{2\mu a^2} \left(\sqrt{3\mu a^2 + 1} - 1 \right) = \frac{1}{2 \times 1.0 \times 1.333^2} \times \left(\sqrt{3 \times 1.0 \times 1.333^2 + 1} - 1 \right) = 0.427$$

Stap 4a: Bepaling van de referentiedraagkracht van de vloer

De referentiedraagkracht van de vloer kan worden bepaald uit:

$$p_{fi} = 6 \frac{M_{fi,0}}{n^2 a^2 \ell^2} = 6 \times \frac{3466.5}{0.427^2 \times 1.333^2 \times 9000^2} = 0,794 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2 = 0,794 \text{ kN/m}^2$$

Stap 5a: Bepaling van de doorbuiging voor de berekening van de membraanwerking

De doorbuiging van de vloer in de brandsituatie om membraanwerking in rekening te brengen, kan worden verkregen uit:

$$\begin{aligned}
w &= \min \left\{ \frac{\alpha(\theta_2 - \theta_1)\ell^2}{19.2h_{eff}} + \min \left[\sqrt{\left(\frac{0.5f_{sy}}{E_a\gamma_{M,f1,s}} \right) \frac{3L^2}{8}}; \frac{\ell}{30} \right]; \frac{L+\ell}{30} \right\} \\
&= \min \left\{ \frac{1.2 \times 10^{-5}(831-992) \times 9000^2}{19.2 \times 95} + \min \left[\sqrt{\left(\frac{0.5 \times 500}{210000 \times 1.0} \right) \frac{3 \times 12000^2}{8}}; \frac{9000}{30} \right]; \frac{12000+9000}{30} \right\} \\
&= \min \{ 391.0 + \min[253.5; 300] 700 \} = 644.5 \text{ mm}
\end{aligned}$$

Stap 6a: Berekening van de parameters die de membraanwerking bepalen

De bepaling van de verschillende vermenigvuldigingsfactoren voor de membraanwerking is gebaseerd op de verschillende parameters α_1 , α_2 , β_1 , β_2 , A , B , C , D , k en b die moeten worden bepaald. De waarden van deze parameters worden samengevat in Tabel 5-7.

Tabel 5-7 Parameters gebruikt voor de beoordeling van de membraanwerking in Zone B

Vergelijking	Verkregen waarden
$\alpha_1 = \frac{2(g_0)_1}{3 + (g_0)_1}$	0,332
$\beta_1 = \frac{1 - (g_0)_1}{3 + (g_0)_1}$	0,112
$\alpha_2 = \frac{2(g_0)_2}{3 + (g_0)_2}$	0,332
$\beta_2 = \frac{1 - (g_0)_2}{3 + (g_0)_2}$	0,112
$k = \frac{4na^2(1-2n)}{4n^2a^2 + 1} + 1$	1,194
$A = \frac{1}{2(1+k)} \left[\frac{\ell^2}{8n} - \left(\frac{1-2n}{2n} + \frac{1}{3(1+k)} \right) \left((nL)^2 + (\ell/2)^2 \right) \right]$	1 978 359 mm ²
$B = \frac{k^2}{2(1+k)} \left[\frac{nL^2}{2} - \frac{k}{3(1+k)} \left((nL)^2 + (\ell/2)^2 \right) \right]$	7 242 376 mm ²
$C = \frac{\ell^2}{16n} (k-1)$	2 305 602 mm ²
$D = \frac{L^2}{8} (1-2n)^2$	388 465 mm ²
$b = \min \left[\frac{\ell^2}{8K(A+B+C-D)}, \frac{\gamma_{M,fi,s}}{kK A_s f_{sy,th}} \left(0.85 \frac{f_c}{\gamma_{M,fi,c}} \times 0.45d - A_s \frac{f_{sy,th}}{\gamma_{M,fi,s}} \frac{K+1}{2} \right) \right]$	0,909

Stap 7a: Berekening van de verbeteringsfactoren voor de membraanwerking

De verbeteringsfactoren e_{1b} , e_{2b} , e_{1m} en e_{2m} kunnen worden bepaald:

Tabel 5-8 Verbeteringsfactoren voor de beoordeling van de membraanwerking in Zone B

Vergelijking	Verkregen waarden
$e_{1b} = 2n \left(1 + \alpha_1 b \frac{k-1}{2} - \frac{\beta_1 b^2}{3} (k^2 - k + 1) \right) + (1 - 2n)(1 - \alpha_1 b - \beta_1 b^2)$	0,935
$e_{1m} = \frac{4b}{3 + (g_0)_1} \frac{w}{d} \left((1 - 2n) + n \frac{2 + 3k - k^3}{3(1 + k)^2} \right)$	5,679
$e_1 = e_{1b} + e_{1m}$	6,614
$e_{2b} = 1 + \frac{\alpha_2 b K}{2} (k - 1) - \frac{\beta_2 b^2 K}{3} (k^2 - k + 1)$	0,991
$e_{2m} = \frac{4bK}{3 + (g_0)_2} \frac{w}{d} \frac{2 + 3k - k^3}{6(1 + k)^2}$	2,917
$e_2 = e_{2b} + e_{2m}$	3,908

Vervolgens wordt de globale verbeteringsfactor e bepaald:

$$e = e_1 - \frac{e_1 - e_2}{1 + 2\mu a^2} = 6.614 - \frac{6.614 - 3.908}{1 + 2 \times 1.0 \times 1.333^2} = 6.020$$

Stap 8a: Totale draagkracht van de vloer bij brand

De totale draagkracht van de vloer bij brand, waarbij de membraanwerking in de berekening meegenomen wordt, kan worden verkregen:

$$q_{fi,Rd,slab} = e \times p_{fi} = 6.020 \times 0.794 = 4.78 \text{ kN/m}^2$$

Stap 9a: Draagkracht van de vloer waarbij de bijdrage van de onbeschermde staal-betonliggers in de berekening meegenomen wordt

Hetzelfde als Stap 9

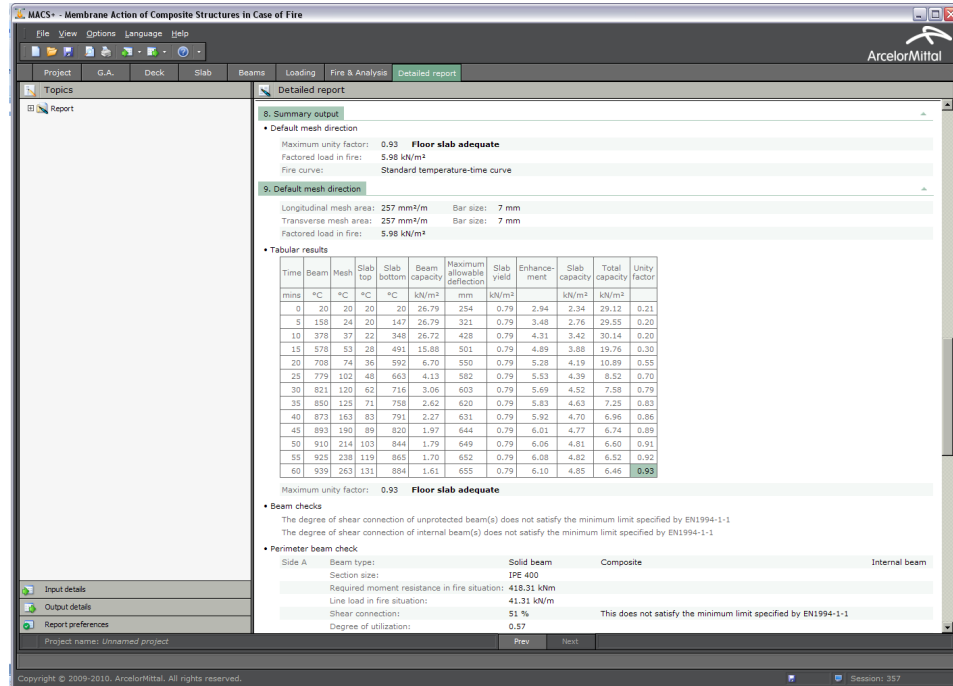
Stap 10a: Totale draagkracht van de vloer in brandomstandigheden en verificatie van de brandwerendheid van de vloer

De totale draagkracht van de vloer is:

$$q_{fi,Rd} = q_{fi,Rd,slab} + q_{fi,Rd,ub} = 4.78 + 1.70 = 6.48 \text{ kN/m}^2$$

Met betrekking tot de aangebrachte belasting op de vloer in de brandsituatie:

$$q_{fi,Sd} = 5.98 \text{ kN/m}^2 < q_{fi,Rd} = 6.48 \text{ kN/m}^2$$



Figuur 5-15 Outputdata met behulp van de MACS+ software – Gedetailleerd rapport

Conclusie 2

De conclusie is dat de stabiliteit van het vloersysteem met zijn actuele afmetingen in Zone B is verzekerd voor R60.

Stap 11: Aangebrachte belasting in de brandsituatie voor de liggers op de omtrek

De aangebrachte belastingen in de brandsituatie op de kinderbalken en de liggers op de omtrek van Zone B worden berekend van de volgende vergelijkingen:

- Voor de kinderbalken op de omtrek

$$M_{fi,Sd,b,1} = \frac{q_{fi,Rd} L_1^2 L_2 - 8 \left(M_{fi,0} \left(L_2 - n_{ub} b_{eff,ub} - \sum_{i=1}^2 b_{eff,1,i} \right) + n_{ub} M_{fi,Rd} \right)}{c_M}$$

$$= \frac{6.48 \times 9^2 \times 12 - 8 \times \left\{ 3466.5 \times 10^{-3} \times [12 - 3 \times 2.25 - (0 + 2.25/2)] + 3 \times 51.5 \right\}}{12}$$

$$= 412.3 \text{ kNm}$$

$$V_{fi,Sd,b,1} = \frac{4M_{fi,Sd,b,1}}{L_1} = \frac{4 \times 412.3}{9} = 183.3 \text{ kN}$$

- Voor de moerbalken op de omtrek

$$M_{fi,Sd,b,2} = \frac{q_{fi,Rd} L_1 L_2^2 - 8 \mu M_{fi,0} \left(L_1 - \sum_{i=1}^2 b_{eff,2,i} \right)}{c_M} = \frac{6.48 \times 9 \times 12^2 - 8 \times 1.0 \times 3466.5 \times 10^{-3} \times (9 - (12/8 + 12/8))}{12}$$

$$= 686.0 \text{ kNm}$$

$$V_{fi,Sd,b,2} = \frac{4M_{fi,Sd,b,2}}{L_2} = \frac{4 \times 686.0}{12} = 228.7 \text{ kN}$$

Een van de moerbalken van deze zone is een randligger bij de gevel, die een additionele belasting van 2,0 kN/m van de gevelelementen moet dragen, hetgeen een modificatie betekent van de aangebrachte belasting bij brand, volgens de volgende vergelijkingen:

$$M_{fi,Sd,b,2} = 686.0 + \frac{2.0 \times 12^2}{8} = 722.0 \text{ kNm}$$

$$V_{fi,Sd,b,2} = 228.7 + \frac{2.0 \times 12}{2} = 234.8 \text{ kN}$$

De brandwerende bescherming van deze ligger moet hiermee worden bepaald om te verzekeren dat de berekende draagkracht in de brandsituatie voor de vereiste brandduur niet lager is dan de aangebrachte belastingen.

5.1.2 Vloerontwerp: Zone A

De toegepaste berekeningsprocedure is dezelfde als die toegepast voor Zone B. Hier zijn de afmetingen 9 m bij 9 m. Om de uitvoering te vereenvoudigen zal het wapeningsnet ST 25C ook gebruikt worden in deze zone om dezelfde doorsnede te hebben voor het gehele vloeroppervlak. Daarom zal Zone A ook geverifieerd worden met deze wapeningsdoorsnede. Deze berekeningszone bestaat uit 2 onbeschermde staal-betonliggers. De details van de berekening zijn hieronder gegeven:

Stap 1: Berekening van de aangebrachte belasting op de vloer in geval van brand

Hetzelfde als de berekening voor Zone B

Stap 2: Berekening van de warmte-overdracht in de staalplaat-betonvloer Cofraplus 60

Hetzelfde als de berekening voor Zone B.

Stap 3: Berekening van de momentweerstand van de vloerplaatdoorsnede $M_{fi,0}$

Voor deze berekeningszone:

$$L_1 = 9\,000 \text{ mm}$$

$$L_2 = 9\,000 \text{ mm}$$

Dus, $L = \max \{L_1; L_2\} = 9\,000 \text{ mm}$ en $\ell = \min \{L_1; L_2\} = 9\,000 \text{ mm}$.

Er kan worden afgeleid:

$$(g_0)_1 = 1 - \frac{2KA_s f_{sy,\theta_s} / \gamma_{M,f_i,s}}{0.85 f_c / \gamma_{M,f_i,c} d} = 1 - \frac{2 \times 1.0 \times \frac{257}{1000} \times 500 / 1.0}{0.85 \times 25 / 1.0 \times 30} = 0.597$$

$$(g_0)_2 = 1 - \frac{2A_s f_{sy,\theta_s} / \gamma_{M,f_i,s}}{0.85 f_c / \gamma_{M,f_i,c} d} = 1 - \frac{2 \times 1.0 \times \frac{257}{1000} \times 500 / 1.0}{0.85 \times 25 / 1.0 \times 30} = 0.597$$

Er moet worden opgemerkt dat de parameter K gelijk is aan 1,0 omdat het wapeningsnet dezelfde doorsnede heeft in beide richtingen.

De positieve momentweerstand van de vloerplaatdoorsnede is aldus:

$$M_{f_i,0} = A_s f_{sy,\theta_s} / \gamma_{M,f_i,s} d \frac{3 + (g_0)_2}{4} = \frac{257}{1000} \times 500 / 1.0 \times 30 \times \frac{3 + 0.597}{4} = 3466.5 \text{ Nmm/mm}$$

Tegelijk is het ook mogelijk de andere benodigde parameters te bepalen:

$$\mu = K \frac{3 + (g_0)_1}{3 + (g_0)_2} = 1.0 \times \frac{3 + 0.597}{3 + 0.597} = 1.0$$

$$a = \frac{L}{\ell} = \frac{9000}{9000} = 1.0$$

$$n = \frac{1}{2\mu a^2} \left(\sqrt{3\mu a^2 + 1} - 1 \right) = \frac{1}{2 \times 1.0 \times 1.0^2} \times \left(\sqrt{3 \times 1.0 \times 1.0^2 + 1} - 1 \right) = 0.50$$

Stap 4: Bepaling van de referentiedraagkracht van de vloer

De referentiedraagkracht van de vloer kan worden bepaald met:

$$p_{fi} = 6 \frac{M_{f_i,0}}{n^2 a^2 \ell^2} = 6 \times \frac{3466.5}{0.5^2 \times 1.0^2 \times 9000^2} = 1.027 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2 = 1.027 \text{ kN/m}^2$$

Stap 5: Bepaling van de doorbuiging voor de berekening van de membraanwerking

De doorbuiging van de vloer in de brandsituatie om membraanwerking in rekening te brengen, kan worden verkregen uit:

$$\begin{aligned} w &= \min \left\{ \frac{\alpha(\theta_2 - \theta_1)\ell^2}{19.2h_{eff}} + \min \left[\sqrt{\left(\frac{0.5f_{sy}}{E_a \gamma_{M,f_i,s}} \right) \frac{3L^2}{8}}; \frac{\ell}{30} \right]; \frac{L + \ell}{30} \right\} \\ &= \min \left\{ \frac{1.2 \times 10^{-5} (831 - 99) \times 9000^2}{19.2 \times 95} + \min \left[\sqrt{\left(\frac{0.5 \times 500}{210000 \times 1.0} \right) \frac{3 \times 9000^2}{8}}; \frac{9000}{30} \right]; \frac{9000 + 9000}{30} \right\} \\ &= \min \{ 391.0 + \min [190.2; 300] 600 \} = 581.2 \text{ mm} \end{aligned}$$

Stap 6: Berekening van de parameters om de membraanwerking te bepalen

De bepaling van de verschillende vermenigvuldigingsfactoren voor de membraanwerking is gebaseerd op de verschillende parameters α_1 , α_2 , β_1 , β_2 , A , B , C ,

D , k en b die moeten worden bepaald. De waarden van deze parameters worden samengevat in Tabel 5-9.

Tabel 5-9 Parameters gebruikt voor de beoordeling van de membraanwerking in Zone A

Vergelijking	Verkregen waarde
$\alpha_1 = \frac{2(g_0)_1}{3 + (g_0)_1}$	0,332
$\beta_1 = \frac{1 - (g_0)_1}{3 + (g_0)_1}$	0,112
$\alpha_2 = \frac{2(g_0)_2}{3 + (g_0)_2}$	0,332
$\beta_2 = \frac{1 - (g_0)_2}{3 + (g_0)_2}$	0,112
$k = \frac{4na^2(1-2n)}{4n^2a^2 + 1} + 1$	1,0
$A = \frac{1}{2(1+k)} \left[\frac{\ell^2}{8n} - \left(\frac{1-2n}{2n} + \frac{1}{3(1+k)} \right) \left((nL)^2 + (\ell/2)^2 \right) \right]$	3 375 000 mm ²
$B = \frac{k^2}{2(1+k)} \left[\frac{nL^2}{2} - \frac{k}{3(1+k)} \left((nL)^2 + (\ell/2)^2 \right) \right]$	3 375 000 mm ²
$C = \frac{\ell^2}{16n} (k-1)$	0 mm ²
$D = \frac{L^2}{8} (1-2n)^2$	0 mm ²
$b = \min \left[\frac{\ell^2}{8K(A+B+C-D)}, \frac{\gamma_{M,f1,s}}{kK A_s f_{sy,th}} \left(0,85 \frac{f_c}{\gamma_{M,f1,c}} \times 0,45d - A_s \frac{f_{sy,th}}{\gamma_{M,f1,s}} \frac{K+1}{2} \right) \right]$	1,232

Stap 7: Berekening van de verbeteringsfactoren voor de membraanwerking

De verbeteringsfactoren e_{1b} , e_{2b} , e_{1m} en e_{2m} kunnen worden bepaald:

Tabel 5-10: Verbeteringsfactoren voor de beoordeling van de membraanwerking in Zone A

Vergelijking	Verkregen Waarde
$e_{1b} = 2n \left(1 + \alpha_1 b \frac{k-1}{2} - \frac{\beta_1 b^2}{3} (k^2 - k + 1) \right) + (1-2n)(1 - \alpha_1 b - \beta_1 b^2)$	0,943
$e_{1m} = \frac{4b}{3 + (g_0)_1} \frac{w}{d} \left((1-2n) + n \frac{(2+3k-k^3)}{3(1+k)^2} \right)$	4,425
$e_1 = e_{1b} + e_{1m}$	5,368
$e_{2b} = 1 + \frac{\alpha_2 b K}{2} (k-1) - \frac{\beta_2 b^2 K}{3} (k^2 - k + 1)$	0,943
$e_{2m} = \frac{4bK}{3 + (g_0)_2} \frac{w}{d} \frac{(2+3k-k^3)}{6(1+k)^2}$	4,425
$e_2 = e_{2b} + e_{2m}$	5,368

Vervolgens wordt de globale verbeteringsfactor e bepaald door:

$$e = e_1 - \frac{e_1 - e_2}{1 + 2\mu a^2} = 5.368 - \frac{5.368 - 5.368}{1 + 2 \times 1.0 \times 1.0^2} = 5.368$$

Stap 8: Totale draagkracht van de vloer bij brand

De totale draagkracht van de vloer bij brand, waarbij de membraanwerking in de berekening meegenomen wordt, kan worden afgeleid:

$$q_{fi,Rd,slab} = e \times p_{fi} = 5.368 \times 1.027 = 5.51 \text{ kN/m}^2$$

Stap 9: Draagkracht van de vloer waarbij de bijdrage van de onbeschermden staal-betonliggers in de berekening meegenomen wordt

De momentweerstand van de liggers heeft dezelfde waarde als in Zone A, maar de berekening van hun draagkracht is gewijzigd als gevolg van een verschillend aantal interne onbeschermden liggers, en een verschillende overspanning van de moerbalken:

$$q_{fi,Rd,ub} = \frac{8M_{fi,Rd}}{L_1^2} \frac{1 + n_{ub}}{L_2} = \frac{8 \times 51.5}{9^2} \times \frac{(1+2)}{9} = 1.70 \text{ kN/m}^2$$

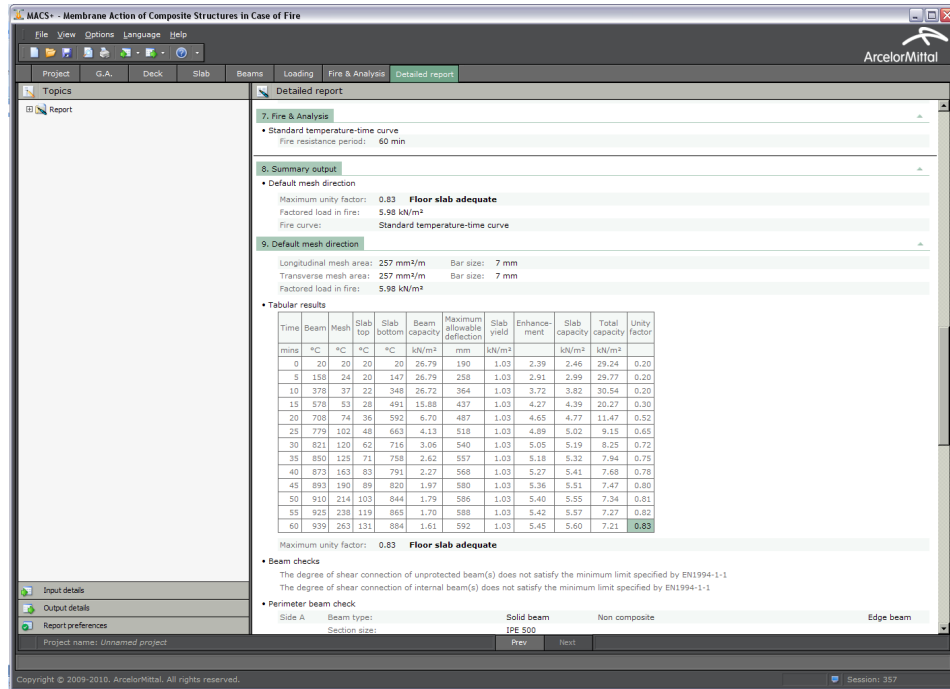
Stap 10: Totale draagkracht van de vloer in brandomstandigheden en verificatie van de brandwerendheid van de vloer

De totale draagkracht van de vloer is:

$$q_{fi,Rd} = q_{fi,Rd,slab} + q_{fi,Rd,ub} = 5.51 + 1.70 = 7.21 \text{ kN/m}^2$$

Met betrekking tot de aangebrachte belasting op de vloer in de brandsituatie

$$q_{fi,Sd} = 5.98 \text{ kN/m}^2 < q_{fi,Rd} = 7.21 \text{ kN/m}^2$$



Figuur 5-16 Outputdata met behulp van de MACS+ software – Gedetailleerd rapport

De conclusie is dat de stabiliteit van het vloersysteem voor R60 is verzekerd met zijn actuele afmetingen in Zone A.

Stap 11: Aangebrachte belasting in de brandsituatie voor de liggers op de omtrek

De aangebrachte belastingen in de brandsituatie op de kinderbalken en de liggers op de omtrek van Zone A worden berekend met de volgende vergelijkingen:

- Voor de kinderbalken op de omtrek

$$M_{fi,Sd,b,1} = \frac{q_{fi,Rd} L_1^2 L_2 - 8 \left(M_{fi,0} \left(L_2 - n_{ub} b_{eff,ub} - \sum_{i=1}^2 b_{eff,1,i} \right) + n_{ub} M_{fi,Rd} \right)}{c_M}$$

$$= \frac{7.21 \times 9^2 \times 9 - 8 \times \left\{ 3466.5 \times 10^{-3} \times [9 - 2 \times 2.25 - (0 + 2.25/2)] + 2 \times 51.5 \right\}}{12}$$

$$= 361.5 \text{ kNm}$$

$$V_{fi,Sd,b,1} = \frac{4M_{fi,Sd,b,1}}{L_1} = \frac{4 \times 361.5}{9} = 160.7 \text{ kN}$$

- Voor de moerbalken op de omtrek

$$M_{f_i, Sd, b, 2} = \frac{q_{f_i, Rd} L_1 L_2^2 - 8 \mu M_{f_i, 0} \left(L_1 - \sum_{i=1}^2 b_{eff, 2, i} \right)}{c_M} = \frac{7.21 \times 9 \times 9^2 - 8 \times 1.0 \times 3466.5 \times 10^{-3} \times (9 - (0 + 9/8))}{12}$$

$$= 419.8 \text{ kNm}$$

$$V_{f_i, Sd, b, 2} = \frac{4 M_{f_i, Sd, b, 2}}{L_2} = \frac{4 \times 419.8}{9} = 186.6 \text{ kN}$$

Twee van de liggers op de omtrek van deze zone zijn hoekbalken bij de gevel, die een additionale belasting van 2,0 kN/m van de gevelelementen moet dragen, hetgeen een modificatie van de aangebrachte belasting bij brand betekent volgens de volgende vergelijkingen:

- Voor de secundaire randligger op de omtrek

$$M_{f_i, Sd, b, 1} = 361.5 + \frac{2.0 \times 9^2}{8} = 381.7 \text{ kNm} \quad \text{and} \quad V_{f_i, Sd, b, 1} = 160.7 + \frac{2.0 \times 9}{2} = 169.7 \text{ kN}$$

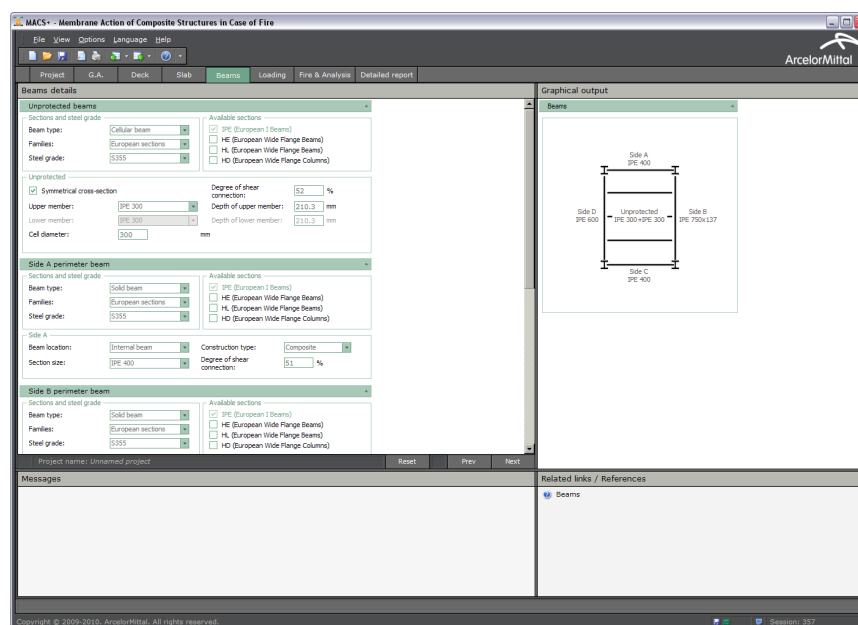
- Voor de primaire randligger op de omtrek

$$M_{f_i, Sd, b, 2} = 419.8 + \frac{2.0 \times 9^2}{8} = 440.0 \text{ kNm} \quad \text{and} \quad V_{f_i, Sd, b, 2} = 186.6 + \frac{2.0 \times 9}{2} = 195.6 \text{ kN}$$

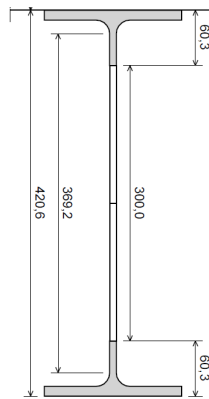
De brandwerende bescherming van deze liggers moet hiermee worden bepaald om te verzekeren dat de berekende draagkracht in de brandsituatie voor de vereiste brandduur niet lager is dan de aangebrachte belastingen.

5.1.3 Vloerontwerp: Zone E

In Zone E hebben de afmetingen van de staalplaat-betonvloer en de overspanningen van de liggers dezelfde waarden as in Zone B. Standaard liggers worden echter vervangen door IPE 300+IPE 300 ACB liggers met ronde gaten (zie doorsnede in Figuur 5-18).



Figuur 5-17 Inputdata met behulp van de MACS+ software – Liggers in Zone E



Figuur 5-18 Netto doorsnede van ACB ligger met ronde gaten in Zone E

Als gevolg hiervan moet alleen de draagkracht van de onbeschermden liggers worden bepaald.

Stappen 1 tot en met 8: Hetzelfde als Zone B

Stap 9: Draagkracht van de vloer waarbij de bijdrage van de onbeschermden staalbetonliggers in de berekening meegenomen wordt

De waarden van de profielfactoren van het staalprofiel worden samengevat in Tabel 5-11.

Uit Tabel 3-2 afgelezen, zijn de temperaturen van de stalen onderdelen van de samenwerkende doorsnede als volgt:

- temperatuur van de flenzen: 940,0 °C;
- temperatuur van het onderste lijf: 942,1 °C in Tabel 3-2 maar 940,0 °C is aangehouden, omdat de hoogte van het staalprofiel niet groter is dan 500 mm;
- temperatuur van het onderste lijf: 942,1 °C;
- temperatuur van de stiftdeuvels (zie 4.3.4.2.5 van EN 1994-1-2): $940,0 \times 0,8 = 752,0$ °C.

Met de temperaturen van het staalprofiel en van de stalen stiftdeuvels is het mogelijk de momentweerstand van de interne niet-samenwerkende onbeschermden liggers te bepalen. Voor liggers met ronde gaten wordt de bijdrage van het onderste element verwaarloosd omdat zijn temperatuur 600°C overschrijdt. De berekende waarden worden gegeven in Tabel 5-12.

Tabel 5-12

Tabel 5-11 Profielfactor van de onbeschermden staal-betonligger

Staalprofiel- onderdeel	$k_{sh} = 0.9 \left(\frac{0.5B_1 + t_{f1} + t_{f2} + \sqrt{h_w^2 + (B_1 - B_2)^2 / 4}}{H + B_1 + B_2/2 - (t_{w1} + t_{w2})/2} \right)$	$\left(\frac{A_i}{V_i} \right) \text{ (m}^{-1}\text{)}$	$k_{sh} \left(\frac{A_i}{V_i} \right) \text{ (m}^{-1}\text{)}$
Onderflens	0,699	$\frac{2(B_1 + t_{f1})}{B_1 t_{f1}} = 200$	140
Onderste lijf		$\frac{2h_{w1} + t_{w1}}{h_{w1} t_{w1}} = 302$	211
Onderste lijf		$\frac{2h_{w2} + t_{w2}}{h_{w2} t_{w2}} = 302$	211
Bovenflens		$\frac{2(B_2 + t_{f2})}{B_2 t_{f2}} = 200$	140
Met:	H : hoogte van het staalprofiel; h_w : volledige hoogte van het lijf; B_1 : breedte van de onderflens; t_{f1} : dikte van de onderflens; t_{w1} : dikte van het onderste lijf; h_{w1} : hoogte van het onderste lijf (netto doorsnede); B_2 : breedte van de bovenflens; t_{f2} : dikte van de bovenflens; t_{w2} : dikte van het onderste lijf; h_{w2} : hoogte van het onderste lijf (netto doorsnede).		

Tabel 5-12 Momentweerstand voor onbeschermden staal-betonliggers in Zone E

Parameters	Berekende waarden
Effectieve breedte van de vloer	$b_{eff} = \min\{9000/4; 3000\} = 2250 \text{ mm}$
Oppervlakte van de bovenflens A_{f2}	$A_{f2} = 1605 \text{ mm}^2$
Oppervlakte van het onderste lijf A_{w2}	$A_{w2} = 352 \text{ mm}^2$
Reductiefactor voor de staalsterkte-eigenschappen	$k_{y,\theta} = 0.052$
Reductiefactor voor de sterkte-eigenschappen van de stiftdeugel	$k_{u,\theta} = 0.17$
Trekkracht $T^+ = \sum A_i f_y k_{y,\theta} / \gamma_{M,fi,a}$	$T^+ = (1605 + 352) \times 355 \times 0.052 / 1.0 = 36.08 \text{ kN}$
Dikte van de vloer onder druk in de brandsituatie $h_u = \frac{T^+}{b_{eff} f_c / \gamma_{M,fi,c}}$	$h_u = \frac{36.08}{2250 \times 25 / 1.0} = 0.641 \text{ mm}$
Verbindingsgraad van de ligger bij 20° C	$n_{c,20^\circ C} = 0.52$
Verbindingsgraad van de ligger in de brandsituatie $n_{c,\theta} = \frac{n_{c,20^\circ C} k_{u,\theta} \gamma_{M,y}}{k_{y,\theta} \gamma_{M,fi,y}}$	$n_{c,\theta} = \frac{0.52 \times 0.17 \times 1.25}{0.052 \times 1.0} = 2.05 > 1.0$ Dus volledige dwarskrachtverbinding
Trekkracht aangrijpingspunt $y_T = \frac{\sum A_i y_i f_y k_{y,\theta}}{T^+ \gamma_{M,fi,a}}$	$y_T = \frac{(352 \times 6.45 + 1605 \times 29.63) \times 355 \times 0.052}{36.08 \times 1.0} = 409.86 \text{ mm}$
Drukkracht aangrijpingspunt $y_F = H + h_c - h_u / 2$	$y_F = 420.6 + 130 - 0.641 / 2 = 550.28 \text{ mm}$
Positieve moment-weerstand $M_{fi,Rd} = T^+ (y_F - y_T)$	$M_{fi,Rd} = 36.08 \times (550.28 - 409.86) = 5.07 \times 10^6 \text{ Nmm} = 5.07 \text{ kNm}$
Met: h_c : totale dikte van de vloer; $\gamma_{M,fi,a}$, $\gamma_{M,y}$ en $\gamma_{M,fi,y}$ partiële veiligheidsfactor voor het staalprofiel, de stalen stiftdeugel in normale omstandigheden en in brandomstandigheden.	

Vervolgens kan de draagkracht van de vloer door de bijdrage van de onbeschermde staal-betonligger worden verkregen uit:

$$q_{fi,Rd,ub} = \frac{8M_{fi,Rd}}{L_1^2} \frac{1+n_{ub}}{L_2} = \frac{8 \times 5.07}{9^2} \times \frac{(1+3)}{12} = 0.17 \text{ kN/m}^2$$

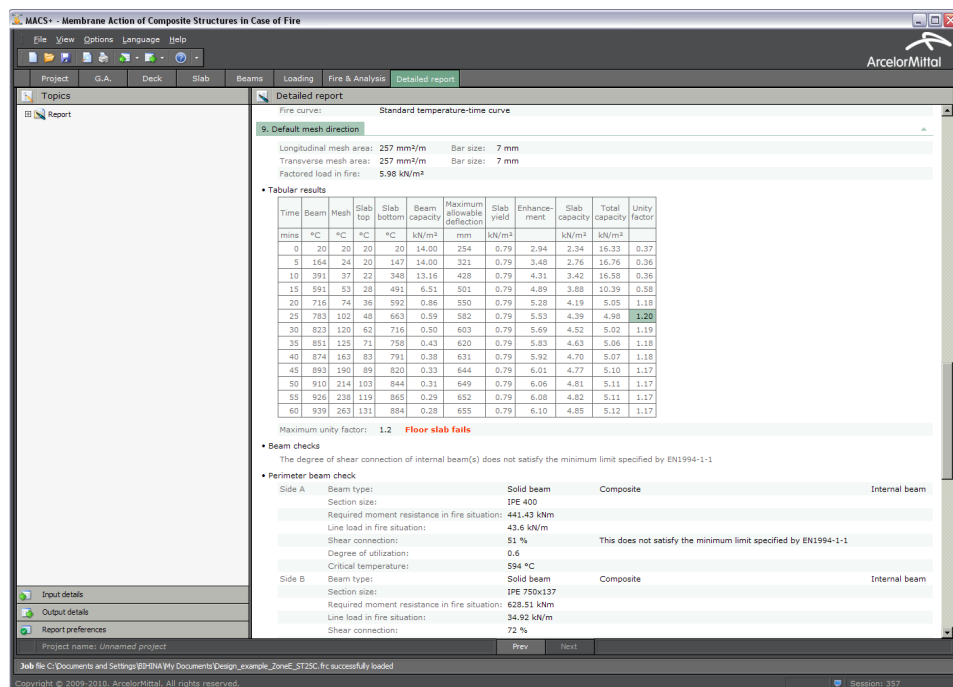
Stap 10: Totale draagkracht van de vloer in brandomstandigheden en verificatie van de brandwerendheid van de vloer

De totale draagkracht van de vloer is:

$$q_{fi,Rd} = q_{fi,Rd,slab} + q_{fi,Rd,ub} = 4.78 + 0.17 = 4.95 \text{ kN/m}^2$$

Met betrekking tot de aangebrachte belasting op de vloer in de brandsituatie:

$$q_{fi,Sd} = 5.98 \text{ kN/m}^2 > q_{fi,Rd} = 4.95 \text{ kN/m}^2$$



Figuur 5-19 Outputdata met behulp van de MACS+ software – Gedetailleerd rapport

Conclusie 1

De conclusie is dat de stabiliteit van het vloersysteem voor R60 niet verzekerd kan worden met zijn actuele afmetingen in Zone E. Het is dus nodig de constructieve parameters te wijzigen.

Een adequate oplossing kan het vergroten van of de asafstand van het wapeningsnet of de zwaarte van het wapeningsnet zijn.

De dichtstbij zijnde oppervlakte van het wapeningsnet in de verkrijgbare serie wapeningsnetten is gelijk aan 385 mm²/m, wat veel groter is dan dat van het huidige ST 25C wapeningsnet. Daarom is de eerste optie het vergroten van de asafstand van het wapeningsnet op dusdanige wijze dat zijn temperatuur onder 400 °C blijft en de vloiegrens zo min mogelijk gereduceerd hoeft te worden. De asafstand van het wapeningsnet wordt vergroot van 30 mm tot 40 mm. In dit geval neemt de temperatuur

van het wapeningsnet toe van 288° C tot 363° C. Volgens Tabel 3-4 van EN 1994-1-2, is de effectieve vloeigrens van het wapeningsnet dan gereduceerd tot 96% van zijn waarde bij kamertemperatuur.

Ter informatie, deze vergrote asafstand van het wapeningsnet leidt tot de volgende draagkrachten:

- Zone A: $q_{fi,Rd} = q_{fi,Rd,vloer} + q_{fi,Rd,ub} = 6,60 + 1,70 = 8,30 \text{ kN/m}^2 > 7,21 \text{ kN/m}^2$;
- Zone B: $q_{fi,Rd} = q_{fi,Rd,vloer} + q_{fi,Rd,ub} = 4,88 + 1,70 = 6,58 \text{ kN/m}^2 > 6,48 \text{ kN/m}^2$.

Als gevolg van de toename van deze asafstand van het wapeningsnet neemt de totale draagkracht van Zone A en Zone B toe.

Stap 2a

Volgens Tabel 3-4 van EN 1994-1-2 is de effectieve vloeigrens van het wapeningsnet gereduceerd tot:

$$f_{sy,\theta_s} = 500 \times 0,962 = 481 \text{ MPa}.$$

Stap 3a: Berekening van de momentweerstand van de vloerplaatdoorsnede $M_{fi,0}$

Voor deze berekeningszone:

$$L_1 = 9\,000 \text{ mm (overspanning van de kinderbalken)}$$

$$L_2 = 12\,000 \text{ mm (overspanning van de moerbalken)}$$

$$\text{Dus, } L = \max \{L_1; L_2\} = 12\,000 \text{ mm en } \ell = \min \{L_1; L_2\} = 9\,000 \text{ mm}.$$

Er kan worden afgeleid:

$$(g_0)_1 = 1 - \frac{2K A_s f_{sy,\theta_s} / \gamma_{M,f,i,s}}{0.85 f_c / \gamma_{M,f,i,c} d} = 1 - \frac{2 \times 1.0 \times \frac{257}{1000} \times 481 / 1.0}{0.85 \times 25 / 1.0 \times 40} = 0.709$$

$$(g_0)_2 = 1 - \frac{2A_s f_{sy,\theta_s} / \gamma_{M,f,i,s}}{0.85 f_c / \gamma_{M,f,i,c} d} = 1 - \frac{2 \times 1.0 \times \frac{257}{1000} \times 481 / 1.0}{0.85 \times 25 / 1.0 \times 40} = 0.709$$

De positieve momentweerstand van de vloerplaatdoorsnede is derhalve:

$$M_{fi,0} = A_s f_{sy,\theta_s} / \gamma_{M,f,i,s} d \frac{3 + (g_0)_2}{4} = \frac{257}{1000} \times 0.962 \times 500 / 1.0 \times 40 \times \frac{3 + 0.709}{4} = 4\,586.51 \text{ Nmm/mm}$$

Tegelijk is het ook mogelijk de andere benodigde parameters te bepalen:

$$\mu = K \frac{3 + (g_0)_1}{3 + (g_0)_2} = 1.0 \times \frac{3 + 0.709}{3 + 0.709} = 1.0$$

$$a = \frac{L}{\ell} = \frac{12\,000}{9\,000} = 1.333$$

$$n = \frac{1}{2\mu a^2} \left(\sqrt{3\mu a^2 + 1} - 1 \right) = \frac{1}{2 \times 1.0 \times 1.333^2} \times \left(\sqrt{3 \times 1.0 \times 1.333^2 + 1} - 1 \right) = 0.427$$

Stap 4a: Bepaling van de referentiedraagkracht van de vloer

De referentiedraagkracht van de vloer kan worden bepaald met:

$$p_{fi} = 6 \frac{M_{fi,0}}{n^2 a^2 \ell^2} = 6 \times \frac{4\,586.51}{0.427^2 \times 1.333^2 \times 9\,000^2} = 1.050 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2 = 1.050 \text{ kN/m}^2$$

Stap 5a: Hetzelfde als Stap 5

Stap 6a: Berekening van de parameters om de membraanwerking te bepalen

De bepaling van de verschillende vermenigvuldigingsfactoren voor de membraanwerking is gebaseerd op de verschillende parameters α_1 , α_2 , β_1 , β_2 , A , B , C , D , k en b die moeten worden bepaald. De waarden van deze parameters worden samengevat in Tabel 5-13.

Tabel 5-13 Parameters gebruikt voor de beoordeling van de membraanwerking in Zone E

Vergelijking	Verkregen waarden
$\alpha_1 = \frac{2(g_0)_1}{3 + (g_0)_1}$	0,382
$\beta_1 = \frac{1 - (g_0)_1}{3 + (g_0)_1}$	0,078
$\alpha_2 = \frac{2(g_0)_2}{3 + (g_0)_2}$	0,382
$\beta_2 = \frac{1 - (g_0)_2}{3 + (g_0)_2}$	0,078
$k = \frac{4na^2(1-2n)}{4n^2a^2 + 1} + 1$	1,194
$A = \frac{1}{2(1+k)} \left[\frac{\ell^2}{8n} - \left(\frac{1-2n}{2n} + \frac{1}{3(1+k)} \right) \left((nL)^2 + (\ell/2)^2 \right) \right]$	1 978 359 mm ²
$B = \frac{k^2}{2(1+k)} \left[\frac{nL^2}{2} - \frac{k}{3(1+k)} \left((nL)^2 + (\ell/2)^2 \right) \right]$	7 242 376 mm ²
$C = \frac{\ell^2}{16n} (k-1)$	2 305 602 mm ²
$D = \frac{L^2}{8} (1-2n)^2$	388 465 mm ²
$b = \min \left[\frac{\ell^2}{8K(A+B+C-D)}, \frac{\gamma_{M,fi,s}}{kKA_s f_{sy,th}} \left(0.85 \frac{f_c}{\gamma_{M,fi,c}} \times 0.45d - A_s \frac{f_{sy,th}}{\gamma_{M,fi,s}} \frac{K+1}{2} \right) \right]$	0,909

Stap 7a: Berekening van de verbeteringsfactoren voor de membraanwerking

De verbeteringsfactoren e_{1b} , e_{2b} , e_{1m} en e_{2m} kunnen worden bepaald:

Tabel 5-14 Verbeteringsfactoren voor de beoordeling van de membraanwerking in Zone E

Vergelijking	Verkregen waarden
$e_{1b} = 2n \left(1 + \alpha_1 b \frac{k-1}{2} - \frac{\beta_1 b^2}{3} (k^2 - k + 1) \right) + (1 - 2n)(1 - \alpha_1 b - \beta_1 b^2)$	0,946
$e_{1m} = \frac{4b}{3 + (g_0)_1} \frac{w}{d} \left((1 - 2n) + n \frac{2 + 3k - k^3}{3(1 + k)^2} \right)$	4,130
$e_1 = e_{1b} + e_{1m}$	5,076
$e_{2b} = 1 + \frac{\alpha_2 b K}{2} (k - 1) - \frac{\beta_2 b^2 K}{3} (k^2 - k + 1)$	1,007
$e_{2m} = \frac{4bK}{3 + (g_0)_2} \frac{w}{d} \frac{2 + 3k - k^3}{6(1 + k)^2}$	2,121
$e_2 = e_{2b} + e_{2m}$	3,129

Vervolgens wordt de globale verbeteringsfactor e bepaald:

$$e = e_1 - \frac{e_1 - e_2}{1 + 2\mu\alpha^2} = 5.076 - \frac{5.076 - 3.129}{1 + 2 \times 1.0 \times 1.333^2} = 4.648$$

Stap 8a: Totale draagkracht van de vloer bij brand

De totale draagkracht van de vloer bij brand, waarbij de membraanwerking in de berekening meegenomen wordt, kan worden verkregen met behulp van:

$$q_{fi,Rd,slab} = e \times p_{fi} = 4.648 \times 1.050 = 4.88 \text{ kN/m}^2$$

Stap 9a: Draagkracht van de vloer waarbij de bijdrage van de onbeschermde staal-betonliggers in de berekening meegenomen wordt

Hetzelfde als Stap 9

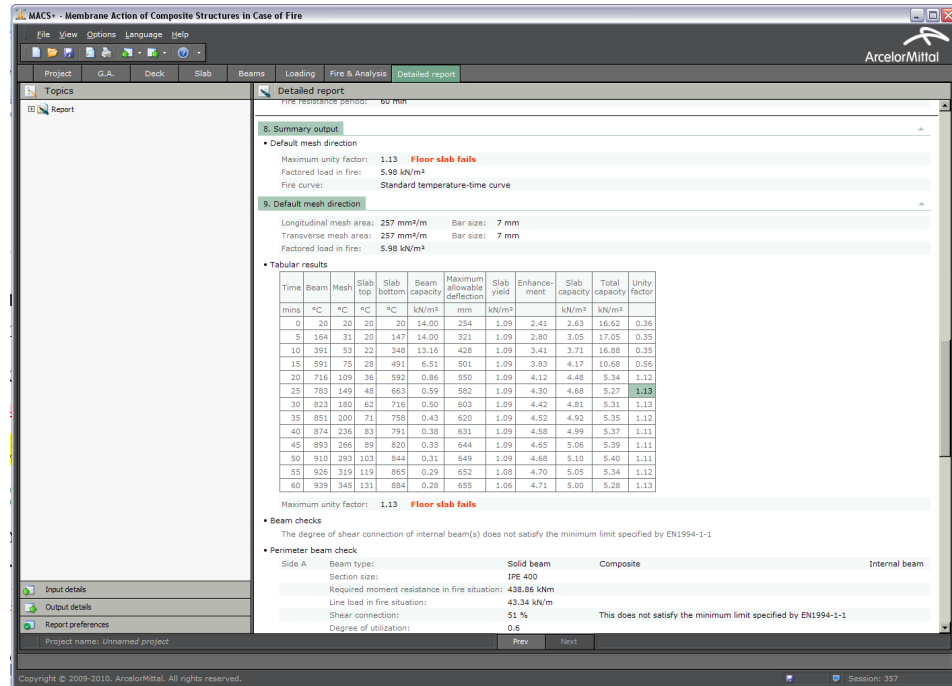
Stap 10a: Totale draagkracht van de vloer in brandomstandigheden en verificatie van de brandwerendheid van de vloer

De totale draagkracht van de vloer is:

$$q_{fi,Rd} = q_{fi,Rd,slab} + q_{fi,Rd,ub} = 4.88 + 0.17 = 5.05 \text{ kN/m}^2$$

Met betrekking tot de aangebrachte belasting op de vloer in de brandsituatie:

$$q_{fi, Sd} = 5.98 \text{ kN/m}^2 > q_{fi, Rd} = 5.05 \text{ kN/m}^2$$



Figuur 5-20 Outputdata met behulp van de MACS+ software – Gedetailleerd rapport

Conclusie 2

De conclusie luidt dat de stabiliteit van het vloersysteem voor R60 niet verzekerd kan worden met zijn actuele afmetingen in Zone E. Daarom is het nodig de constructieve parameters te wijzigen, bijvoorbeeld een grotere doorsnede van het wapeningsnet.

De doorsnede van het gelaste wapeningsnet werd vergroot van ST 25C (257 mm²/m) tot ST 40C (385 mm²/m).

Stap 2b: Hetzelfde als Stap 2a

Stap 3b: Berekening van de momentweerstand van de vloerplaatdoorsnede $M_{fi,0}$

Voor deze berekeningszone:

$$L_1 = 9\,000 \text{ mm (overspanning van de kinderbalken)}$$

$$L_2 = 12\,000 \text{ mm (overspanning van de moerbalken)}$$

$$\text{Dus, } L = \max \{L_1; L_2\} = 12\,000 \text{ mm en } \ell = \min \{L_1; L_2\} = 9\,000 \text{ mm.}$$

Er kan worden afgeleid:

$$(g_0)_1 = 1 - \frac{2KA_s f_{sy, \theta_s} / \gamma_{M, fi, s}}{0.85 f_c / \gamma_{M, fi, c} d} = 1 - \frac{2 \times 1.0 \times \frac{385}{1000} \times 481 / 1.0}{0.85 \times 25 / 1.0 \times 40} = 0.564$$

$$(g_0)_2 = 1 - \frac{2A_s f_{sy,\theta_s} / \gamma_{M,f_i,s}}{0.85 f_c / \gamma_{M,f_i,c} d} = 1 - \frac{2 \times 1.0 \times \frac{385}{1000} \times 481 / 1.0}{0.85 \times 25 / 1.0 \times 40} = 0.564$$

De positieve momentweerstand van de vloerplaatdoorsnede is daardoor:

$$M_{f_i,0} = A_s f_{sy,\theta_s} / \gamma_{M,f_i,s} d \frac{3 + (g_0)_2}{4} = \frac{385}{1000} \times 0.962 \times 500 / 1.0 \times 40 \times \frac{3 + 0.564}{4} = 6\,602.40 \text{ Nmm/mm}$$

Tegelijk is het ook mogelijk de andere benodigde parameters te bepalen:

$$\mu = K \frac{3 + (g_0)_1}{3 + (g_0)_2} = 1.0 \times \frac{3 + 0.564}{3 + 0.564} = 1.0$$

$$a = \frac{L}{\ell} = \frac{12\,000}{9\,000} = 1.333$$

$$n = \frac{1}{2\mu a^2} \left(\sqrt{3\mu a^2 + 1} - 1 \right) = \frac{1}{2 \times 1.0 \times 1.333^2} \times \left(\sqrt{3 \times 1.0 \times 1.333^2 + 1} - 1 \right) = 0.427$$

Stap 4b: Bepaling van de referentiedraagkracht van de vloer

De referentiedraagkracht van de vloer kan worden bepaald met:

$$p_{f_i} = 6 \frac{M_{f_i,0}}{n^2 a^2 \ell^2} = 6 \times \frac{6\,602.40}{0.427^2 \times 1.333^2 \times 9\,000^2} = 1.512 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2 = 1.512 \text{ kN/m}^2$$

Stap 5b: Hetzelfde als Stap 5

Stap 6b: Berekening van de parameters om de membraanwerking te bepalen

De bepaling van de verschillende vermenigvuldigingsfactoren voor de membraanwerking is gebaseerd op de verschillende parameters α_1 , α_2 , β_1 , β_2 , A , B , C , D , k en b die moeten worden bepaald. De waarden van deze parameters worden samengevat in Tabel 5-15.

Tabel 5-15 Parameters gebruikt voor de beoordeling van de membraanwerking in Zone E

Vergelijking	Verkregen waarden
$\alpha_1 = \frac{2(g_0)_1}{3 + (g_0)_1}$	0,317
$\beta_1 = \frac{1 - (g_0)_1}{3 + (g_0)_1}$	0,122
$\alpha_2 = \frac{2(g_0)_2}{3 + (g_0)_2}$	0,317
$\beta_2 = \frac{1 - (g_0)_2}{3 + (g_0)_2}$	0,122
$k = \frac{4na^2(1-2n)}{4n^2a^2 + 1} + 1$	1,194
$A = \frac{1}{2(1+k)} \left[\frac{\ell^2}{8n} - \left(\frac{1-2n}{2n} + \frac{1}{3(1+k)} \right) \left((nL)^2 + (\ell/2)^2 \right) \right]$	1 978 359 mm ²
$B = \frac{k^2}{2(1+k)} \left[\frac{nL^2}{2} - \frac{k}{3(1+k)} \left((nL)^2 + (\ell/2)^2 \right) \right]$	7 242 376 mm ²
$C = \frac{\ell^2}{16n} (k-1)$	2 305 602 mm ²
$D = \frac{L^2}{8} (1-2n)^2$	388 465 mm ²
$b = \min \left[\frac{\ell^2}{8K(A+B+C-D)}, \frac{\gamma_{M,fi,s}}{kK A_s f_{sy,th}} \left(0.85 \frac{f_c}{\gamma_{M,fi,c}} \times 0.45d - A_s \frac{f_{sy,th}}{\gamma_{M,fi,s}} \frac{K+1}{2} \right) \right]$	0,892

Stap 7b: Berekening van de verbeteringsfactoren voor de membraanwerking

De verbeteringsfactoren e_{1b} , e_{2b} , e_{1m} en e_{2m} kunnen worden bepaald:

Tabel 5-16 Verbeteringsfactoren voor de beoordeling van de membraanwerking in Zone E

Vergelijking	Verkregen waarden
$e_{1b} = 2n \left(1 + \alpha_1 b \frac{k-1}{2} - \frac{\beta_1 b^2}{3} (k^2 - k + 1) \right) + (1 - 2n)(1 - \alpha_1 b - \beta_1 b^2)$	0,934
$e_{1m} = \frac{4b}{3 + (g_0)_1} \frac{w}{d} \left((1 - 2n) + n \frac{2 + 3k - k^3}{3(1 + k)^2} \right)$	4,216
$e_1 = e_{1b} + e_{1m}$	5,150
$e_{2b} = 1 + \frac{\alpha_2 b K}{2} (k - 1) - \frac{\beta_2 b^2 K}{3} (k^2 - k + 1)$	0,988
$e_{2m} = \frac{4bK}{3 + (g_0)_2} \frac{w}{d} \frac{2 + 3k - k^3}{6(1 + k)^2}$	2,165
$e_2 = e_{2b} + e_{2m}$	3,153

Vervolgens wordt de globale verbeteringsfactor e bepaald:

$$e = e_1 - \frac{e_1 - e_2}{1 + 2\mu\alpha^2} = 5.150 - \frac{5.150 - 3.153}{1 + 2 \times 1.0 \times 1.333^2} = 4.711$$

Stap 8b: Totale draagkracht van de vloer bij brand

De totale draagkracht van de vloer bij brand, waarbij de membraanwerking in de berekening meegenomen wordt, kan worden verkregen met:

$$q_{fi,Rd,slab} = e \times p_{fi} = 4.711 \times 1.512 = 7.123 \text{ kN/m}^2$$

Stap 9b: Draagkracht van de vloer waarbij de bijdrage van de onbeschermde staal-betonliggers in de berekening meegenomen wordt

Hetzelfde als Stap 9

Stap 10b: Totale draagkracht van de vloer in brandomstandigheden en verificatie van de brandwerendheid van de vloer

De totale draagkracht van de vloer is:

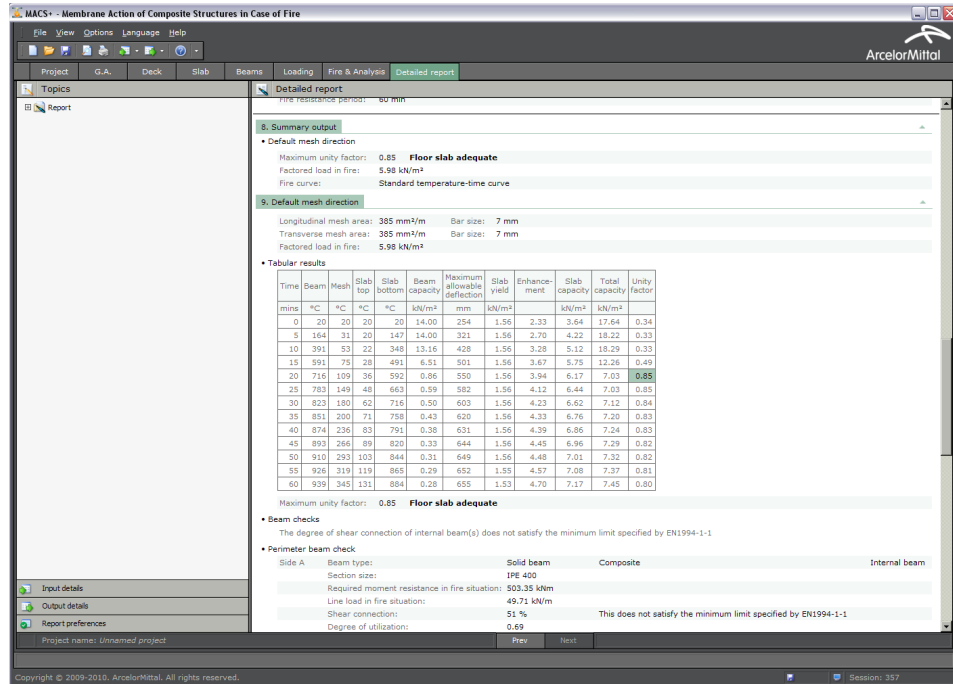
$$q_{fi,Rd} = q_{fi,Rd,slab} + q_{fi,Rd,ub} = 7.12 + 0.17 = 7.29 \text{ kN/m}^2$$

Met betrekking tot de aangebrachte belasting op de vloer in de brandsituatie:

$$q_{fi,Sd} = 5.98 \text{ kN/m}^2 < q_{fi,Rd} = 7.29 \text{ kN/m}^2$$

Conclusie 3

De conclusie is dat de stabiliteit van het vloersysteem voor R60 is verzekerd met zijn actuele afmetingen in Zone E.



Figuur 5-21 Outputdata met behulp van de MACS+ software – Gedetailleerd rapport

Stap 11: Aangebrachte belasting in de brandsituatie voor liggers op de omtrek

De aangebrachte belastingen in de brandsituatie op de kinderbalken en de liggers op de omtrek van Zone E worden berekend met de volgende vergelijkingen:

- Voor de kinderbalken op de omtrek

$$M_{fi,Sd,b,1} = \frac{q_{fi,Rd} L_1^2 L_2 - 8 \left(M_{fi,0} \left(L_2 - n_{ub} b_{eff,ub} - \sum_{i=1}^2 b_{eff,1,i} \right) + n_{ub} M_{fi,Rd} \right)}{c_M}$$

$$= \frac{7.29 \times 9^2 \times 12 - 8 \times \left\{ 6602.40 \times 10^{-3} \times [12 - 3 \times 2.25 - (2.25/2 + 2.25/2)] + 3 \times 5.1 \right\}}{12}$$

$$= 567.08 \text{ kNm}$$

$$V_{fi,Sd,b,1} = \frac{4M_{fi,Sd,b,1}}{L_1} = \frac{4 \times 567.08}{9} = 252.04 \text{ kN}$$

- Voor de moerbalken op de omtrek

$$M_{f_i, Sd, b, 2} = \frac{q_{f_i, Rd} L_1 L_2^2 - 8 \mu M_{f_i, 0} \left(L_1 - \sum_{i=1}^2 b_{eff, 2, i} \right)}{c_M} = \frac{7.29 \times 9 \times 12^2 - 8 \times 1.0 \times 6602.40 \times 10^{-3} \times (9 - (12/8 + 12/8))}{12}$$

$$= 760.91 \text{ kNm}$$

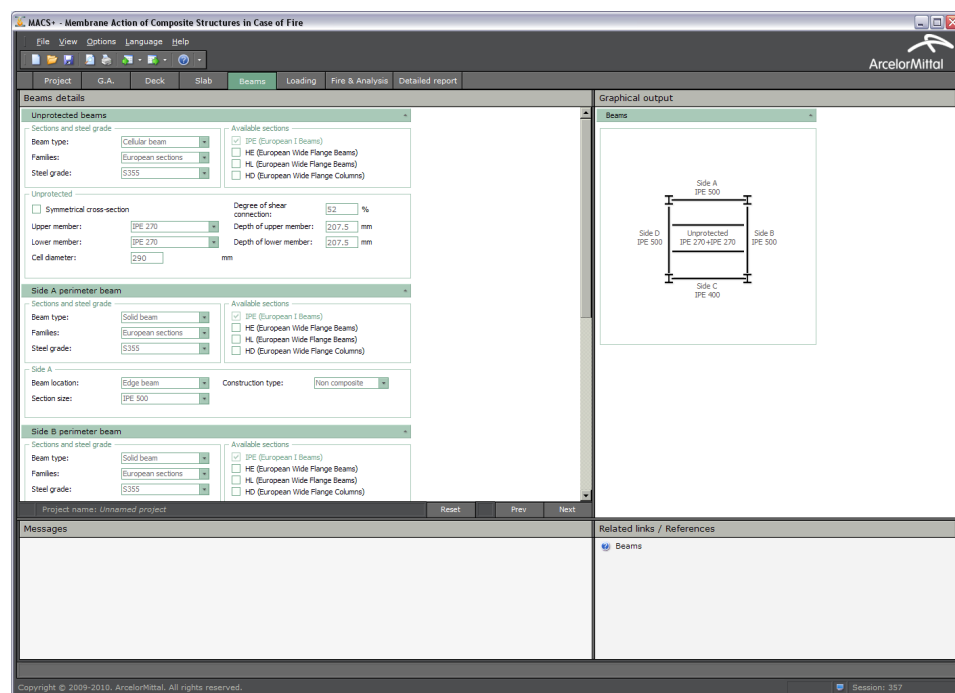
$$V_{f_i, Sd, b, 2} = \frac{4 M_{f_i, Sd, b, 2}}{L_2} = \frac{4 \times 760.91}{12} = 253.64 \text{ kN}$$

De brandwerende bescherming van deze liggers moet hiermee worden bepaald om te verzekeren dat de berekende draagkracht in de brandsituatie voor de vereiste brandduur niet lager is dan de aangebrachte belastingen.

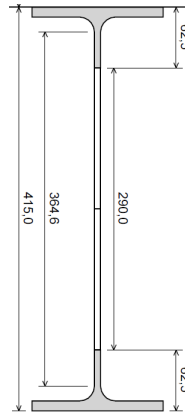
5.1.4 Vloerontwerp: Zone D

In Zone D hebben de afmetingen van de staalplaat-betonvloer en de overspanningen van de liggers dezelfde waarden als in Zone A. Standaard liggers worden echter vervangen door IPE 270+IPE 270 Angelina™ liggers (zie doorsnede in Figuur 5-23).

Als gevolg hiervan moet alleen de draagkracht van de onbeschermde liggers worden bepaald.



Figuur 5-22 Inputdata met behulp van MACS+ software – Liggers in Zone D



Figuur 5-23 Net doorsnede van Angelina ligger in Zone D

Stap 2: Hetzelfde als Zone E

Stappen 3 tot en met 8: Dezelfde als Zone A

Stap 9: Draagkracht van de vloer, waarbij de bijdrage van de onbeschermd staal-betonliggers in de berekening meegenomen wordt

De waarden van de profielfactoren van het staalprofiel worden samengevat in Tabel 5-17.

Uit Tabel 3-3 afgeleid, zijn de temperaturen van de stalen onderdelen van de samenwerkende doorsnede als volgt:

- temperatuur van de flenzen: 941,0 °C;
- temperatuur van het onderste lijf: 942,2 °C in Tabel 3-3 maar 941,0 °C is aangehouden, omdat de hoogte van het staalprofiel niet groter is dan 500 mm;
- temperatuur van het onderste lijf: 942,2 °C;
- temperatuur van de stiftdeuvels (zie 4.3.4.2.5 van EN 1994-1-2): $941,0 \times 0,8 = 752,8$ °C.

Tabel 5-17 Profielfactor van de onbeschermd staal-betonligger in Zone D

Staalprofiel- onderdeel	$k_{sh} = 0.9 \left(\frac{0.5B_1 + t_{f1} + t_{f2} + \sqrt{h_w^2 + (B_1 - B_2)^2/4}}{H + B_1 + B_2/2 - (t_{w1} + t_{w2})/2} \right)$	$\left(\frac{A_i}{V_i} \right) \text{ (m}^{-1}\text{)}$	$k_{sh} \left(\frac{A_i}{V_i} \right) \text{ (m}^{-1}\text{)}$
Onderflens	0.711	$\frac{2(B_1 + t_{f1})}{B_1 t_{f1}} = 211$	150
Onderste lijf		$\frac{2h_{w1} + t_{w1}}{h_{w1} t_{w1}} = 322$	229
Onderste lijf		$\frac{2h_{w2} + t_{w2}}{h_{w2} t_{w2}} = 322$	229
Bovenflens		$\frac{2(B_2 + t_{f2})}{B_2 t_{f2}} = 211$	150
Met:	H : hoogte van het staalprofiel; h_w : totale hoogte van het lijf; B_1 : breedte van de onderflens; t_{f1} : dikte van de onderflens; t_{w1} : dikte van het onderste lijf; h_{w1} : hoogte van het onderste lijf (netto doorsnede); B_2 : breedte van de bovenflens; t_{f2} : dikte van de bovenflens; t_{w2} : dikte van het onderste lijf; h_{w2} : hoogte van het onderste lijf (netto doorsnede).		

Met de temperaturen van het staalprofiel en van de stalen stiftdeuvels is het mogelijk de momentweerstand van de interne, niet-samenwerkende, onbeschermden liggers te bepalen. Voor liggers met ronde gaten wordt de bijdrage van het onderste element verwaarloosd, omdat zijn temperatuur 600 °C overschrijdt. De berekende waarden worden gegeven in Tabel 5-18.

Tabel 5-18 Momentweerstand voor de onbeschermden staal-betonliggers in Zone D

Parameters	Berekend waarden
Effectieve breedte van de vloer	$b_{eff} = \min\{9000/4; 3000\} = 2250 \text{ mm}$
Oppervlakte van de bovenflens A_{f2}	$A_{f2} = 1377 \text{ mm}^2$
Oppervlakte van het onderste lijf A_{w2}	$A_{w2} = 229.0 \text{ mm}^2$
Reductiefactor voor de staalsterkte-eigenschappen	$k_{y,\theta} = 0.052$
Reductiefactor voor de stiftdeuvel sterkte-eigenschappen	$k_{u,\theta} = 0.17$
Trekkracht $T^+ = \sum A_i f_y k_{y,\theta} / \gamma_{M,f,i,a}$	$T^+ = (1377 + 229) \times 355 \times 0.052 / 1.0 = 31.64 \text{ kN}$
Dikte van de vloer onderdruk in de brandsituatie $h_u = \frac{T^+}{b_{eff} f_c / \gamma_{M,f,i,c}}$	$h_u = \frac{31.64}{2250 \times 25 / 1.0} = 0.562 \text{ mm}$
Verbindingsgraad van de ligger bij 20°C	$n_{c,20^\circ C} = 0.52$
Verbindingsgraad van de ligger in de brandsituatie $n_{c,\theta} = \frac{n_{c,20^\circ C} k_{u,\theta} \gamma_{M,y}}{k_{y,\theta} \gamma_{M,f,i,y}}$	$n_{c,\theta} = \frac{0.52 \times 0.17 \times 1.25}{0.052 \times 1.0} = 2.04 > 1.0$ Dus volledige dwarskrachtverbinding
Trekkracht aangrijpingspunt $y_T = \frac{\sum A_i y_i f_y k_{y,\theta}}{T^+ \gamma_{M,f,i,a}}$	$y_T = \frac{(229 \times 6.32 + 1377 \times 25.32) \times 355 \times 0.052}{31.64 \times 1.0} = 403.66 \text{ mm}$
Drukkracht aangrijpingspunt $y_F = H + h_c - h_u / 2$	$y_F = 415 + 130 - 0.562 / 2 = 544.72 \text{ mm}$
Positieve momentweerstand $M_{fi,Rd} = T^+ (y_F - y_T)$	$M_{fi,Rd} = 31.64 \times (544.72 - 403.66) = 4.46 \times 10^6 \text{ Nmm} = 4.46 \text{ kNm}$
Met: h_c : totale dikte van de vloer; $\gamma_{M,f,i,a}$, $\gamma_{M,y}$ en $\gamma_{M,f,i,y}$ partiële veiligheidsfactor voor het staalprofiel, de stalen stiftdeuvel in normale omstandigheden en in brandomstandigheden.	

Vervolgens kan de draagkracht van de vloer door de bijdrage van de onbeschermden staal-betonligger worden verkregen met:

$$q_{fi,Rd,ub} = \frac{8M_{fi,Rd}}{L_1^2} \frac{1+n_{ub}}{L_2} = \frac{8 \times 4.46}{9^2} \times \frac{(1+2)}{9} = 0.15 \text{ kN/m}^2$$

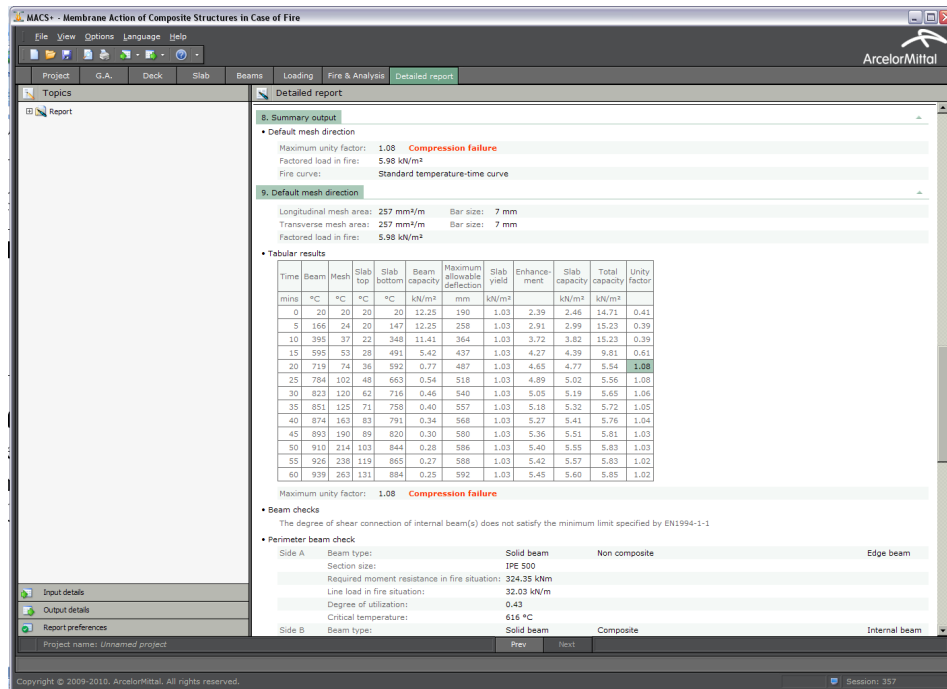
Stap 10: Totale draagkracht van de vloer in brandomstandigheden en verificatie van de brandwerendheid van de vloer

De totale draagkracht van de vloer is:

$$q_{fi,Rd} = q_{fi,Rd,slab} + q_{fi,Rd,ub} = 5.51 + 0.15 = 5.66 \text{ kN/m}^2$$

Met betrekking tot de aangebrachte belasting op de vloer in de brandsituatie:

$$q_{fi,Sd} = 5.98 \text{ kN/m}^2 > q_{fi,Rd} = 5.66 \text{ kN/m}^2$$



Figuur 5-24 Outputdata met behulp van de MACS+ software – Gedetailleerd rapport

Conclusie 1

De conclusie luidt dat de stabiliteit van het vloersysteem voor R60 niet kan worden verzekerd met zijn actuele afmetingen in Zone D. Het is daarom nodig de constructieve parameters te wijzigen.

Een adequate oplossing kan het vergroten van of de asafstand van het wapeningsnet of de zwaarte van het wapeningsnet zijn.

Daarom werd de asafstand van het wapeningsnet vergroot van 30 mm tot 40 mm, waardoor de temperatuur van het wapeningsnet wijzigt van 288 °C naar 362 °C.

Stap 2a

Volgens Tabel 3-4 van EN 1994-1-2 reduceert de effectieve vloeigrens van het wapeningsnet tot:

$$f_{sy,\theta_s} = 500 \times 0,962 = 481 \text{ MPa}$$

Stap 3a: Berekening van de momentweerstand van de vloerplaatdoorsnede $M_{fi,0}$

Voor deze berekeningszone:

$$L_1 = 9\,000 \text{ mm (overspanning van de kinderbalken)}$$

$$L_2 = 9\,000 \text{ mm (overspanning van de moerbalken)}$$

Dus, $L = \max \{L_1; L_2\} = 9\,000 \text{ mm}$ en $\ell = \min \{L_1; L_2\} = 9\,000 \text{ mm}$.

Er kan worden afgeleid:

$$(g_0)_1 = 1 - \frac{2KA_s f_{sy,\theta_s} / \gamma_{M,f_i,s}}{0.85 f_c / \gamma_{M,f_i,c} d} = 1 - \frac{2 \times 1.0 \times \frac{257}{1000} \times 481 / 1.0}{0.85 \times 25 / 1.0 \times 40} = 0.709$$

$$(g_0)_2 = 1 - \frac{2A_s f_{sy,\theta_s} / \gamma_{M,f_i,s}}{0.85 f_c / \gamma_{M,f_i,c} d} = 1 - \frac{2 \times 1.0 \times \frac{257}{1000} \times 481 / 1.0}{0.85 \times 25 / 1.0 \times 40} = 0.709$$

De positieve momentweerstand van de vloerplaatdoorsnede is daardoor:

$$M_{f_i,0} = A_s f_{sy,\theta_s} / \gamma_{M,f_i,s} d \frac{3 + (g_0)_2}{4} = \frac{257}{1000} \times 481 / 1.0 \times 40 \times \frac{3 + 0.709}{4} = 4\,586.51 \text{ Nmm/mm}$$

Tegelijk is het ook mogelijk de andere benodigde parameters te bepalen:

$$\mu = K \frac{3 + (g_0)_1}{3 + (g_0)_2} = 1.0 \times \frac{3 + 0.709}{3 + 0.709} = 1.0$$

$$a = \frac{L}{\ell} = \frac{9000}{9000} = 1.0$$

$$n = \frac{1}{2\mu a^2} \left(\sqrt{3\mu a^2 + 1} - 1 \right) = \frac{1}{2 \times 1.0 \times 1.0^2} \times \left(\sqrt{3 \times 1.0 \times 1.0^2 + 1} - 1 \right) = 0.5$$

Stap 4a: Bepaling van de referentiedraagkracht van de vloer

De referentiedraagkracht van de vloer kan worden bepaald met:

$$p_{fi} = 6 \frac{M_{f_i,0}}{n^2 a^2 \ell^2} = 6 \times \frac{4\,586.51}{0.427^2 \times 1.0^2 \times 9000^2} = 1,359 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2 = 1,359 \text{ kN/m}^2$$

Stap 5a: Hetzelfde als Stap 5

Stap 6a: Berekening van de parameters om de membraanwerking te bepalen

De bepaling van de verschillende vermenigvuldigingsfactoren voor de membraanwerking is gebaseerd op de verschillende parameters α_1 , α_2 , β_1 , β_2 , A , B , C , D , k en b die moeten worden bepaald. De waarden van deze parameters worden samengevat in Tabel 5-19.

Tabel 5-19 Parameters gebruikt voor de beoordeling van de membraanwerking in Zone D

Vergelijking	Verkregen waarden
$\alpha_1 = \frac{2(g_0)_1}{3 + (g_0)_1}$	0,382
$\beta_1 = \frac{1 - (g_0)_1}{3 + (g_0)_1}$	0,078
$\alpha_2 = \frac{2(g_0)_2}{3 + (g_0)_2}$	0,382
$\beta_2 = \frac{1 - (g_0)_2}{3 + (g_0)_2}$	0,078
$k = \frac{4na^2(1-2n)}{4n^2a^2 + 1} + 1$	1,0
$A = \frac{1}{2(1+k)} \left[\frac{\ell^2}{8n} - \left(\frac{1-2n}{2n} + \frac{1}{3(1+k)} \right) \left((nL)^2 + (\ell/2)^2 \right) \right]$	3 375 000 mm ²
$B = \frac{k^2}{2(1+k)} \left[\frac{nL^2}{2} - \frac{k}{3(1+k)} \left((nL)^2 + (\ell/2)^2 \right) \right]$	3 375 000 mm ²
$C = \frac{\ell^2}{16n} (k-1)$	0 mm ²
$D = \frac{L^2}{8} (1-2n)^2$	0 mm ²
$b = \min \left[\frac{\ell^2}{8K(A+B+C-D)}, \frac{\gamma_{M,fi,s}}{kK A_s f_{sy,th}} \left(0,85 \frac{f_c}{\gamma_{M,fi,c}} \times 0,45d - A_s \frac{f_{sy,th}}{\gamma_{M,fi,s}} \frac{K+1}{2} \right) \right]$	1,5

Stap 7a: Berekening van de verbeteringsfactoren voor de membraanwerking

De verbeteringsfactoren e_{1b} , e_{2b} , e_{1m} en e_{2m} kunnen worden bepaald:

Tabel 5-20 Verbeteringsfactoren voor de beoordeling van de membraanwerking in Zone D

Vergelijking	Verkregen waarden
$e_{1b} = 2n \left(1 + \alpha_1 b \frac{k-1}{2} - \frac{\beta_1 b^2}{3} (k^2 - k + 1) \right) + (1 - 2n)(1 - \alpha_1 b - \beta_1 b^2)$	0,941
$e_{1m} = \frac{4b}{3 + (g_0)_1} \frac{w}{d} \left((1 - 2n) + n \frac{2 + 3k - k^3}{3(1 + k)^2} \right)$	3,917
$e_1 = e_{1b} + e_{1m}$	4,858
$e_{2b} = 1 + \frac{\alpha_2 b K}{2} (k - 1) - \frac{\beta_2 b^2 K}{3} (k^2 - k + 1)$	0,941
$e_{2m} = \frac{4bK}{3 + (g_0)_2} \frac{w}{d} \frac{2 + 3k - k^3}{6(1 + k)^2}$	3,917
$e_2 = e_{2b} + e_{2m}$	4,858

Vervolgens wordt de globale verbeteringsfactor e bepaald:

$$e = e_1 - \frac{e_1 - e_2}{1 + 2\mu\alpha^2} = 4.858 - \frac{4.858 - 4.858}{1 + 2 \times 1.0 \times 1.0^2} = 4.858$$

Stap 8a: Totale draagkracht van de vloer bij brand

De totale draagkracht van de vloer bij brand, waarbij de membraanwerking in de berekening meegenomen wordt, kan worden verkregen met:

$$q_{fi,Rd,slab} = e \times p_{fi} = 4.858 \times 1.359 = 6.60 \text{ kN/m}^2$$

Stap 9a: Draagkracht van de vloer waarbij de bijdrage van de onbeschermde staal-betonliggers in de berekening meegenomen wordt

Hetzelfde als Stap 9

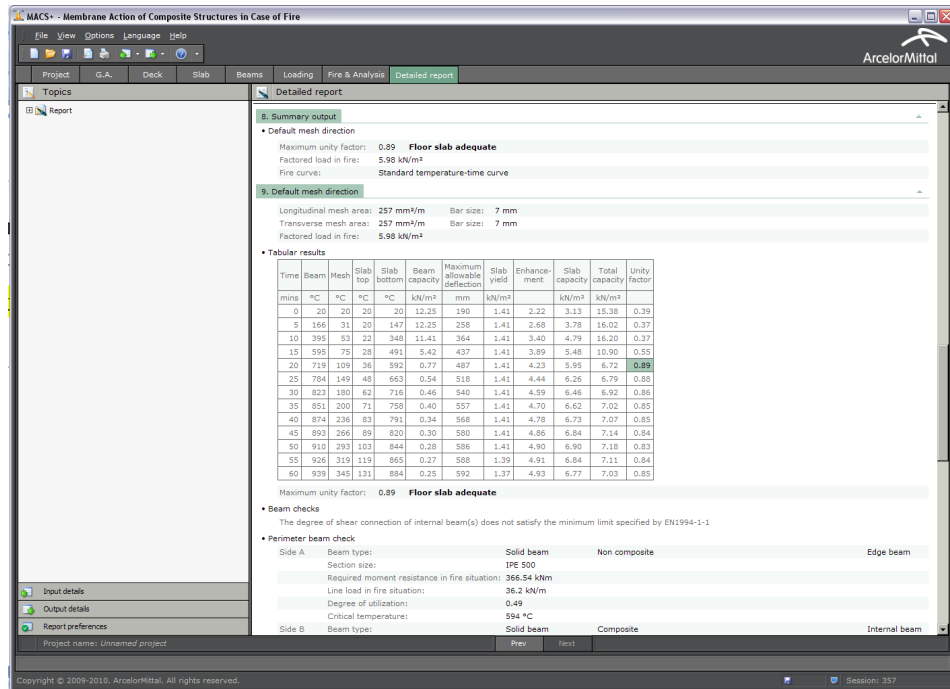
Stap 10a: Totale draagkracht van de vloer in brandomstandigheden en verificatie van de brandwerendheid van de vloer

De totale draagkracht van de vloer is:

$$q_{fi,Rd} = q_{fi,Rd,slab} + q_{fi,Rd,ub} = 6.60 + 0.15 = 6.75 \text{ kN/m}^2$$

Met betrekking tot de aangebrachte belasting op de vloer in de brandsituatie:

$$q_{fi,Sd} = 5.98 \text{ kN/m}^2 < q_{fi,Rd} = 6.75 \text{ kN/m}^2$$



Figuur 5-25 Outputdata met behulp van de MACS+ software – Gedetailleerd rapport

Conclusie 2

De conclusie luidt dat de stabiliteit van het vloersysteem voor R60 is verzekerd met zijn actuele afmetingen in Zone D.

Stap 11: Aangebrachte belasting in de brandsituatie voor liggers op de omtrek

De aangebrachte belastingen in de brandsituatie op de kinderbalken en de liggers op de omtrek van Zone D worden berekend met de volgende vergelijkingen:

- Voor de kinderbalken op de omtrek

$$M_{fi,Sd,b,1} = \frac{q_{fi,Rd} L_1^2 L_2 - 8 \left(M_{fi,0} \left(L_2 - n_{ub} b_{eff,ub} - \sum_{i=1}^2 b_{eff,1,i} \right) + n_{ub} M_{fi,Rd} \right)}{c_M}$$

$$= \frac{6.75 \times 9^2 \times 9 - 8 \times \left\{ 4 \times 586.51 \times 10^{-3} \times [9 - 2 \times 2.25 - (0 + 2.25/2)] + 2 \times 4.5 \right\}}{12}$$

$$= 393.74 \text{ kNm}$$

$$V_{fi,Sd,b,1} = \frac{4M_{fi,Sd,b,1}}{L_1} = \frac{4 \times 393.74}{9} = 175.00 \text{ kN}$$

- Voor de moerbalken op de omtrek

$$M_{fi,Sd,b,2} = \frac{q_{fi,Rd} L_1 L_2^2 - 8 \mu M_{fi,0} \left(L_1 - \sum_{i=1}^2 b_{eff,2,i} \right)}{c_M} = \frac{6.75 \times 9 \times 9^2 - 8 \times 1.0 \times 4 \times 586.51 \times 10^{-3} \times (9 - (9/8 + 9/8))}{12}$$

$$= 389.42 \text{ kNm}$$

$$V_{fi,Sd,b,2} = \frac{4M_{fi,Sd,b,2}}{L_2} = \frac{4 \times 389.42}{9} = 173.08 \text{ kN}$$

Een van de liggers op de omtrek van deze zone is een randligger bij de gevel, die een additionele belasting van 2,0 kN/m van de gevelelementen moet dragen, hetgeen een modificatie betekent van de aangebrachte belasting bij brand, volgens de volgende vergelijkingen:

$$M_{fi,Sd,b,1} = 393.74 + \frac{2.0 \times 9^2}{8} = 414.00 \text{ kNm}$$

$$V_{fi,Sd,b,1} = 175.00 + \frac{2.0 \times 9}{2} = 184.00 \text{ kN}$$

De brandwerende bescherming van deze ligger moet hiermee worden bepaald om te verzekeren dat de berekende draagkracht in de brandsituatie voor de vereiste brandduur niet lager is dan de aangebrachte belastingen.

5.2 Wapeningdetails

Omdat de uitvoer bevestigt dat de draagkracht van zones A en B beide voldoende is, is het toegepaste ST 25C wapeningsnet geschikt voor het ontwerp bij brand.

Dit wapeningsnet heeft een oppervlakte van 257 mm²/m in beide richtingen en heeft ø 7 mm staven hart-op-hart 150 mm in beide richtingen.

Het wapeningsnet in dit voorbeeld heeft een vloeigrens van 500 N/mm². Voor het ontwerp bij brand moet de klasse van wapening zijn gespecificeerd als Klasse A in overeenstemming met EN 10080.

Bij verbindingen tussen de wapeningsnetten moeten deze zijn adequaat overlappen om te verzekeren dat de volledige trekweerstand kan worden ontwikkeld in geval van een brand in het gebouw. Voor de ø 7 mm staven van het ST 25C wapeningsnet, is de vereiste minimum overlappingslengte 300 mm, zoals getoond in Tabel 3-3. Om stapeling van staven bij overlapte verbindingen te vermijden, moeten wapeningsnetten met losse stekeinden worden gespecificeerd zoals getoond in Figuur 3-5.

Additionele wapening in de vorm van U-vormige staven moet worden aangebracht bij de randliggers om adequate verbinding (in het kader van robuustheid) te verzekeren tussen deze liggers en de staalplaat-betonvloer.

5.3 Brandwerende bescherming van kolommen

Brandwerende bescherming moet ook worden gespecificeerd voor alle kolommen in dit voorbeeld. De volgende informatie moet worden gegeven bij de specificatie van de brandwerende bescherming.

Brandwerendheid	60 minuten
Profiel	HD 320×158
Profielfactor	63 m ⁻¹ kokervormige bekleding bij vierzijdige verhitting
	89 m ⁻¹ profielvolgende bekleding bij vierzijdige verhitting

Kritieke temperatuur 500 °C of 80 °C lager dan de kritieke temperatuur berekend op basis van de EN 1993-1-2 ontwerp regels, voor zover deze lager is.

De aangebrachte brandwerende bekleding moet zich uitstrekken over de volledige hoogte van de kolom, tot aan de onderzijde van de staalplaat-betonvloer.

LITERATUUR

1. BAILEY, C. G. en MOORE, D. B.
The structural behaviour of steel frames with composite floor slabs subject to fire,
Part 1: Theory
The Structural Engineer, June 2000
2. BAILEY, C. G. en MOORE, D. B.
The structural behaviour of steel frames with composite floor slabs subject to fire,
Part 2: Design
The Structural Engineer, June 2000
3. BAILEY, C. G.
Membrane action of slab/beam composite floor systems in fire
Engineering Structures 26
4. EN 1991-1-2:2002 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1 2: General actions.
Actions on structures exposed to fire
CEN
5. EN 1993-1-2:2005 Eurocode 3. Design of steel structures. General rules. Structural
fire design
CEN
6. EN 1994-1-2:2005 Eurocode 4. Design of composite steel and concrete structures.
Structural fire design
CEN
7. HAMERLINCK R., VASSART O. en ZHAO B.
Membraanwerking van staal-beton constructies tijdens brand, Constructieve
Achtergronddocument, Editie 2012-1.
8. The Building Regulations 2000, Approved Document B (Fire safety) 2006 Edition:
Volume 2: Buildings other than dwelling houses, Department of Communities and
Local Government, UK, 2006.
9. EN 1994-1-1:2004 Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures –
Part 1 1: General rules and rules for buildings
CEN
10. EN 10080:2005 Steel for the reinforcement of concrete - Weldable reinforcing steel
– General, CEN.
11. BS 4483:2005 Steel fabric for the reinforcement of concrete. Specification. BSI
12. BS 4449:1:2005 Steel for the reinforcement of concrete. Weldable reinforcing steel.
Bar, coil and decoiled product. Specification
BSI
13. NF A 35-016-2 : Aciers pour béton armé – Aciers soudables à verrous – Partie 2 :
Treillis soudés (novembre 2007) (AFNOR)
14. NF A 35-019-2 : Aciers pour béton armé – Aciers soudables à empreintes – Partie
2 : Treillis soudés (novembre 2007) (AFNOR)
15. EN 1990:2002 Eurocode – Basis of structural design
CEN

16. EN 1991-1-1:2003 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-1: General actions – Densities, self-weight, imposed loads for buildings
CEN
17. EN 13381-4 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Applied passive protection to steel members, CEN, (To be published 2009)
18. EN 13381-8 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Applied reactive protection to steel members, CEN, (To be published 2009)
19. EN 1992-1-1 Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rule for buildings
BSI
20. COUCHMAN, G. H , HICKS, S. J. en RACKHAM, J, W
Composite Slabs and Beams Using Steel Decking: Best Practice for Design & Construction (2nd edition)
SCI P300, The Steel Construction Institute, 2008
21. BS 8110-1 Structural use of concrete. Code of practice for design and construction,
BSI, London, 1997.
22. BAILEY, C. G.
The influence of thermal expansion of beams on the structural behaviour of columns in steel framed buildings during a fire
Engineering Structures Vol. 22, July 2000, pp 755 768
23. EN 1993-1-8:2005 Eurocode 3: Design of steel structures – Design of joints
BSI
24. Brown, D.G. Steel building design: Simple connections. SCI P358, The Steel Construction Institute, (To be published 2009)
25. Initial sizing of simple end plate connections
Access-steel document SN013a
Initial sizing of fin plate connections
Access-steel document SN016a
www.access-steel.com
26. Shear resistance of a simple end plate connection
Access-steel document SN014a and SN015a
Tying resistance of a simple end plate connection
Access-steel document SN015a
www.access-steel.com
27. Shear resistance of a fin plate connection
Access-steel document SN017a
Tying resistance of a fin plate connection
Access-steel document SN018a
www.access-steel.com
28. LAWSON, R. M.
Enhancement of fire resistance of beams by beam to column connections
The Steel Construction Institute, 1990
29. EN 1363-1:1999 Fire resistance tests. General requirements
CEN

30. EN 1365 Fire resistance tests for load-bearing elements.
EN 1365-1:1999 Walls
EN 1365-2:2000 Floors and roofs
EN 1365-3:2000 Beams
EN 1365-4:1999 Columns
CEN