



Inleiding

De brandwerendheid van staalplaat-betonvloeren is naar verhouding hoog, zelfs indien geen bijzondere brandveiligheidsvoorzieningen zijn getroffen. Indien nodig kan de brandwerendheid worden vergroot tot praktisch elk gewenst niveau met behulp van eenvoudige en betrouwbare middelen. Tot voor kort kon de brandwerendheid echter uitsluitend worden bepaald aan de hand van experimenteel onderzoek. Dit is tijdrovend en kostbaar. Er is daarom behoefte aan een praktische ontwerpmethode waarmee de brandwerendheid van staalplaat-betonvloeren rekenkundig kan worden bepaald. Een dergelijke methode leidt tot een eenvoudiger en systematischer ontwerpprocedure waardoor de toepassing van samengestelde vloeren wordt bevorderd.

Door Commissie T3 'Fire safety of steel structures' van de Europese Conventie voor Staalbouw is een methode ontwikkeld voor de berekening van de brandwerendheid van in één richting dragende staalplaat-betonvloeren met grindbeton. Door het Centrum voor Brandveiligheid van TNO-IBBC is deze methode, in het kader van de werkzaamheden ten behoeve van de commissie CUR-VB C48/SG TC-10-2 'Staalplaat-betonvloeren' bewerkt tot voorlopige Nederlandse richtlijn [2].

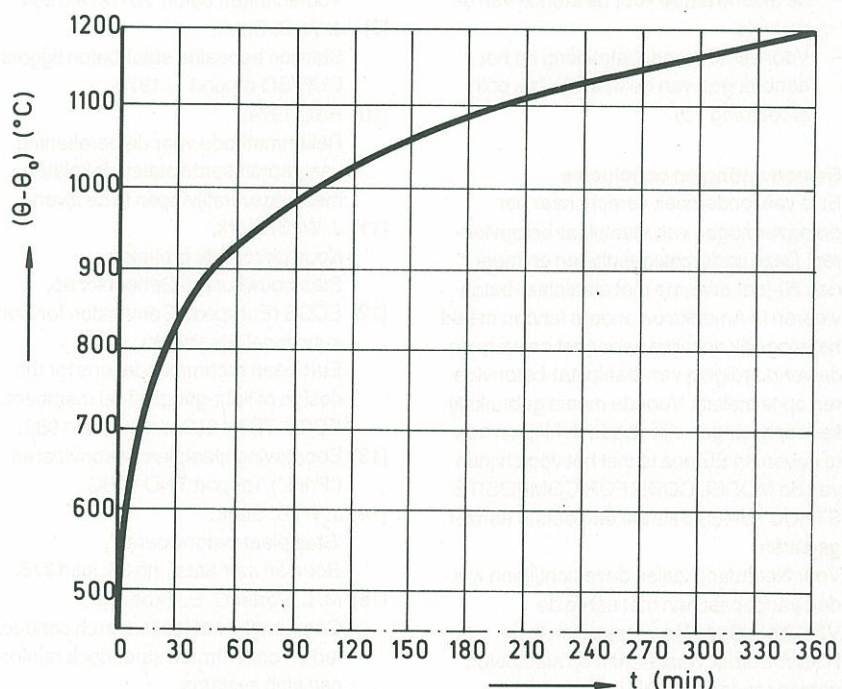
Criteria voor de brandwerendheid

De brandwerendheid van een constructie-onderdeel is de tijd gedurende welke dit onderdeel weerstand kan bieden aan de standaardbrand. De standaardbrand wordt gekarakteriseerd door een temperatuur-tijdverloop als weergegeven in afbeelding 1.

Een constructie-onderdeel wordt niet meer geacht weerstand te kunnen bieden aan de voorgeschreven verhitte wanneer:

- de constructie bezwijkt;
- de constructie vlammen of hete gassen doorlaat;
- de niet-verhitte zijde een bepaalde temperatuur overschrijdt.

Staalplaat-betonvloeren hebben zowel een



Afbeelding 1. De standaard-brandkromme

dragende als een scheidende functie. Bijgevolg moet in beginsel rekening gehouden worden met elk van de drie hierboven genoemde criteria.

Het is gebruikelijk de brandwerendheid van staal-betonvloeren langs experimentele weg te bepalen. Hiertoe wordt een belast proefstuk aan de onderzijde blootgesteld aan een verhitte volgens de standaard-brandkromme. Overspanning en wijze van opleggen worden zoveel mogelijk in overeenstemming met de praktijkomstandigheden gekozen. Uitgegaan wordt van de gebruikelijke belasting. Hiervoor wordt in beginsel de karakteristieke waarde van de belasting genomen, zoals bijvoorbeeld wordt voorgeschreven in NEN 3850.

Draagkracht

Het criterium voor de draagkracht houdt in dat de vloer gedurende de vereiste brandwerendheid in staat moet zijn de belasting te dragen waarvoor zij is ontworpen. In NEN 3884 [3] worden daarnaast met betrekking tot de brandwerendheid op bezwij-

ken nog vervormingscriteria genoemd. Deze houden met name verband met het voorkomen van schade aan de oven en de beproevingsapparatuur. Bij een rekenkundige benadering vallen de praktische bezwaren die hebben geleid tot het stellen van grenswaarden aan de vervormingen echter weg. Daarom zal in het navolgende de brandwerendheid op bezwijken uitsluitend worden beoordeeld op basis van het verlies aan draagkracht.

Vlamdichtheid

De brandwerendheid met betrekking tot de vlamdichtheid is beëindigd indien watten, gehouden op enige afstand voor de niet-verhitte zijde van de vloer, tot ontbranding komen ten gevolge van hete gassen die via de constructie ontwijken. Ook mag geen vuur zichtbaar zijn. Bij staalplaat-betonvloeren is de vlamdichtheid in het algemeen niet relevant. Eén van de redenen is dat het vloersysteem praktisch altijd in het werk wordt vervaardigd. De aansluitingen zullen daarom in het alge-

meen afdoende zijn gedicht. Natuurlijk kunnen tijdens brand scheuren ontstaan. De staalplaat zal dan echter voorkomen dat hete gassen en vlammen door de constructie heen dringen.

In de berekening zal daarom de vlamdichtheid verder buiten beschouwing blijven.

Thermische isolatie

Bij de beoordeling van de brandwerendheid met betrekking tot de thermische isolatie moet overeenkomstig NEN 3884 [3] worden aangehouden dat de temperatuurstijging aan de niet-direct verhitte zijde van de vloer gemiddeld niet meer dan 140°C en plaatselijk niet meer dan 180°C mag bedragen. Vanwege de geprofileerde vorm van de vloer kan dit criterium bij een rekenkundige beoordeling tot complicaties leiden. Theoretisch moet worden verwacht dat de temperatuur op de bovenzijde van de vloer gemeten juist boven een rib, lager zal zijn dan die voor een meetplaats juist tussen twee ribben in. Uit proeven is evenwel gebleken dat de temperatuurverschillen gering zijn. In de berekeningen wordt daarom uitgegaan van een gelijkmatig temperatuurverloop ter plaatse van de niet-direct verhitte zijde. Als criterium is dientengevolge aangehouden dat de toename van de temperatuur niet meer mag bedragen dan 140°C.

Gedrag van staalplaat-betonvloeren bij brand

Bij het ontwerpen van staalplaat-betonvloeren wordt er in het algemeen van uitgegaan dat de trekspanningen tengevolge van de positieve buigende momenten geheel door de staalplaat worden opgenomen. Indien blootgesteld aan brand, zal de temperatuur van de staalplaat stijgen. Als gevolg hiervan nemen de sterkte- en stijfheidseigenschappen van het staal af. Bij een temperatuur, welke afhankelijk is van het belastingniveau en het statische systeem, is de staalplaat niet langer in staat de aangeboden trekkracht over te dragen. Het gevolg is dat de vloer bezwijkt en de brandwerendheid (op bezwijken) is bereikt. Afhankelijk van de afmetingen van de dwarsdoorsnede, kan het bezwijken van de vloer worden voorafgegaan door het overschrijden van de kritische temperatuurstijging met betrekking tot de thermische isolatie.

In tabel 1 zijn de resultaten opgenomen van brandwerendheidproeven op staalplaat-betonvloeren, uitgevoerd in een aantal Europese laboratoria. Bij géén van de proeven zijn extra voorzieningen getroffen om de brandwerendheid te verhogen. De proeven beslaan een praktisch toepassingsgebied. Het blijkt dat in alle gevallen de brandwerendheid op bezwijken meer dan 30 minuten bedroeg. De aanzienlijke spreiding in beproevingsresultaten wordt veroorzaakt door verschillen in berekeningsgrondslag voor kamertemperaturomstandigheden en de wijze van opleggen. Alle proeven, met uitzondering van 1 en 10, betroffen vrij opgelegde vloeren in één richting dragend. Een dergelijke statisch sys-

Laboratorium Rapportnr.	Doorsnede (afm. in mm)	Statisch systeem (overspanning in m)	Veranderlijk belasting (kN/m ²)	Brandwerendheids criterium m.b.t. bezwijken	Brandwerendheid op bezwijken min.
1 TNO BV-73-74			2700	$\frac{d\bar{\theta}}{dt} > \frac{q^2}{9000h_c}$	40
2 ENFA 66356/1			4800	$\frac{\delta}{L} > \frac{1}{20}$	55
3 ENFA 66356/2			10100	$\frac{\delta}{L} > \frac{1}{20}$	69
4 CTICH 74V58/T41			2500	$\frac{\delta}{L} > \frac{1}{20}$	33
5 CTICH 74V64/T47			2500	$\frac{\delta}{L} > \frac{1}{30}$	35
6 CTICH 74V59/T42			2500	$\frac{\delta}{L} > \frac{1}{30}$	37
7 CSTB 66.2385D			3830	$\frac{\delta}{L} > \frac{1}{30}$	38
8 CSTB 66.2478A			3800	$\frac{\delta}{L} > \frac{1}{30}$	44
9 CSTB 70.4018			6880	$\frac{\delta}{L} > \frac{1}{30}$	38
10 CSTB 69.3595			10100	$\frac{\delta}{L} > \frac{1}{30}$	40
11 ENFA 11009			3300	$\frac{\delta}{L} > \frac{1}{30}$	40

* De staalplaat is ter plaatse van de oplegging vastgeschoten op een stalen frame

Tabel 1. De brandwerendheid op bezwijken van staalplaat-betonvloeren zonder extra brandveiligheidsvoorzieningen

teem gedraagt zich bij brand relatief ongunstig omdat een herverdeling van momenten niet mogelijk is.

De in tabel 1 weergegeven proefresultaten hebben daarom geleid tot de volgende praktijkregel:

'De brandwerendheid op bezwijken van staalplaat-betonvloeren bedraagt tenminste 30 minuten, ook indien géén extra brandveiligheidsmaatregelen zijn getroffen'.

De toepassing van deze regel is beperkt tot die gevallen waarin het ontwerp bij kamertemperatuur is gebaseerd op de RSBV [4]. Daarnaast blijft een controle van de brandwerendheid met betrekking tot de thermische isolatie noodzakelijk.

Een direct gevolg van bovengenoemde ontwerpregel is dat een aparte beoordeling van de brandwerendheid op bezwijken alleen nodig is indien een eis gesteld wordt van meer dan 30 minuten. Speciale voorzieningen kunnen dan noodzakelijk zijn.

Voorzieningen ter verhoging van de brandwerendheid

Ter verhoging van de brandwerendheid kunnen de volgende voorzieningen worden onderscheiden:

- betonstaalbewapening
 - aanwezige of extra veldwapening aangebracht in de ribben;
 - aanwezige steunpuntwapening met eventueel bijlegwapening (doorgaande vloeren).
- brandwerende bekleding;
- brandwerende plafonds.

Betonstaalbewapening

In staalplaat-betonvloeren wordt gewoonlijk een geringe onderwapening aangebracht in verband met het krimpen en kruipen van het beton. Deze wapening wordt in het algemeen direct op de staalplaat gelegd, waarna het beton wordt gestort. In het geval van brand zal de temperatuurstijging in het wapeningstaal tussen de ribben daarom nagenoeg gelijk zijn aan die in de geprofileerde staalplaat. De bijdrage van deze wapening aan de brandwerendheid op bezwijken is daarom slechts marginaal. Extra wapening geplaatst in het midden van de ribben kan echter een belangrijke bijdrage aan de brandwerendheid leveren (afbeelding 2). Dit geldt ook voor (extra) bovenwapening ter plaatse van de steunpunten in doorgaande vloeren.

Brandwerende bekledingen

Brandwerende kledingen kunnen noodzakelijk zijn indien uitzonderlijk zware eisen worden gesteld of indien het van belang is de vervormingen van de vloer tijdens brand tot een minimum te beperken.

Spuitsmaterialen, bijvoorbeeld op basis van minerale vezels of vermiculiet, worden direct op het oppervlak van de staalplaat aangebracht. Om een goede hechting te verkrijgen is het noodzakelijk dat de staalplaat voor het spuiten goed wordt schoongemaakt.

Ook kunnen platen worden gebruikt, bijvoorbeeld op basis van gipskarton, vermiculiet of calcium silicaat. Deze platen worden direct gelijmd op de ribben van de geprofileerde staalplaat. Ook nu moet het staal zorgvuldig worden gereinigd in verband met een goede hechting. Speciale aandacht moet worden besteed aan de toe te passen lijmsort en aan een adequate afdichting van de naden tussen de platen onderling. Deze afdichting dient ook bij brand intact te blijven. In het algemeen zullen proeven nodig zijn om de gekozen oplossing goed te kunnen beoordelen.

Een relatief geringe dikte kan al een aanzienlijke brandwerendheid opleveren [5]. Desondanks zal de toepassing van brandwerende bekledingen extra kosten betekenen ten opzichte van een oplossing met extra betonstaalwapening.

Brandwerende plafonds

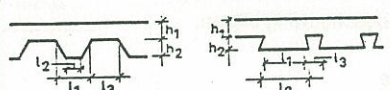
Het principe van een zogenaamd brandwerend plafond is dat het functioneert als een hittedeksel voor de draagconstructie die zich erboven bevindt. In de spouw tussen plafond en vloer zal de temperatuur zich ontwikkelen volgens een gereduceerde brandkromme, dat wil zeggen, minder snel dan bij de standaardbrand. Voorwaarde is dat zich in de (ongeventileerde) spouw niet te veel brandbare materialen bevinden. De temperatuurstijging in de spouw hangt, behalve van het plafond, ook af van de dikte en de samenstelling (normaal beton, lichtgewicht beton) van de vloer.

Het gedrag van een brandwerend plafond is echter kritisch, aangezien dit in belangrijke mate afhangt van de detaillering en het vakmanschap bij de uitvoering. Voor een beoordeling van de beschermende werking van een brandwerend plafond zal daarom in het algemeen experimenteel onderzoek noodzakelijk zijn.

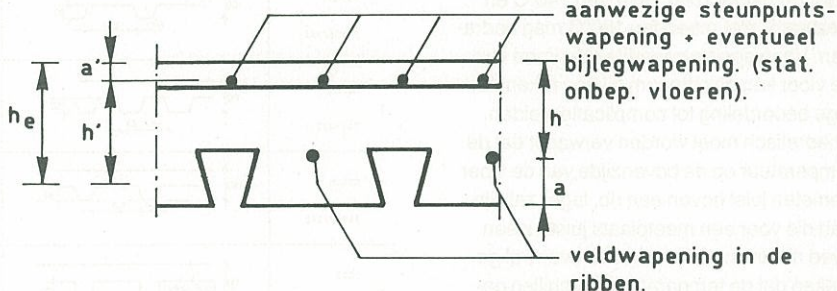
Samenvattend kan worden geconcludeerd dat van de verschillende voorzieningen om de brandwerendheid van staalplaat-betonvloeren te verhogen, het aanbrengen van extra wapening een relatief eenvoudige en betrouwbare methode is. Bovendien blijkt dat deze methode – anders dan het toepassen van een brandwerend plafond of een bekleding – zich leent tot een theoretische benadering.

Rekenregels voor de minimum plaatdikte

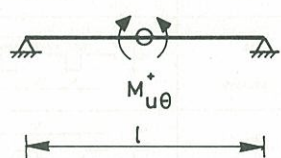
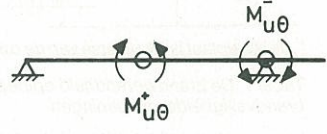
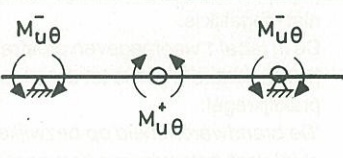
De brandwerendheid op thermische isolatie wordt bereikt indien de temperatuurstijging aan de bovenkant van de vloerplaat (=

Vereiste brandwerendheid [min]	Minimum effectieve dikte h_{e*} [mm]	Effectieve dikte h_e	Beperkingen
30	60	$h_e = h_1 + \frac{h_2}{2} \cdot \frac{l_1 + l_2}{l_1 + l_3}$ 	- indien $h_2/h_1 > 1,5$: $h_e = h_1$ - $h_1 > 50$ mm
60	70		
90	90		
120	110		

Tabel 2. Benodigde effectieve dikte voor staalplaat-betonvloeren als functie van de vereiste brandwerendheid



Afbeelding 2. Betonstaalwapening in staalplaat-betonvloer ter verhoging van de brandwerendheid

	Statisch systeem	Gelijkmatig verdeelde bezwijkbelasting
vrij opgelegde vloer		$q_{u0} = 8 \cdot \frac{M_{u0}^+}{l^2}$
eindveld		$q_{u0} = \frac{8 M_{u0}^+ + 4 M_{u0}^-}{l^2}$
doorgaande vloer		$q_{u0} = \frac{8(M_{u0}^+ + M_{u0}^-)}{l^2}$

Tabel 3. Bezwijkbelastingen voor in een richting dragende platen

niet-direct verhitte zijde) 140°C bedraagt. Dit betekent dat, afhankelijk van de gestelde eis, een zekere effectieve plaatdikte ten minste in acht moet worden genomen. De in de voorlopige richtlijnen [2] gegeven regels – gebaseerd op proeven [6] – zijn weergegeven in tabel 2.

Zoals blijkt uit de formule voor de effectieve plaatdikte ($= h_e$), is deze op te vatten als een gemiddelde dikte, rekening houdend met het profiel van de plaat.

Rekenregels voor benodigde betonstaalwapening

Bezwijkvoorwaarden

De draagkracht van een staalplaat-betonvloer onder brandomstandigheden kan worden bepaald op basis van de elementaire plasticiteitstheorie. Voor enkele veel voorkomende statische systemen zijn de op basis hiervan te formuleren bezwijkbelastingen gegeven in tabel 3.

In tabel 3 is de volgende notatie gebruikt:
 M_{u0}^+ , M_{u0}^- – absolute waarde van het positieve resp. negatieve plastische moment na verhitting gedurende een periode overeenkomende

met de geëiste brandwerendheid;

- q_{u0} – bezwijkbelasting;
 ℓ – overspanning.

Als voorwaarde is gesteld in [2]:

$$q_{u0} \geq 0,85 q_k$$

waarin:

q_k = de aan te houden belasting tijdens brandomstandigheden (eigengewicht + karakteristieke veranderlijke belasting).

Ter nadere uitwerking van de bezwijkvoorwaarden is het noodzakelijk de plastische momenten M^+_{u0} en M^-_{u0} te berekenen. Karakteristieke spanningsverdeling met de bijbehorende formules voor de plastische momenten zijn gegeven in afbeeldingen 3 en 4.

De reductiefactor 0,85 is ingevoerd in verband met de verschillende – in het navolgende te bespreken – vereenvoudigingen. Zonder deze reductiefactor leidt de berekening tot conservatieve uitkomsten vergeleken met resultaten van brandwerendheidsproeven.

De volgende uitgangspunten zijn gehanteerd (zie ook afbeeldingen 3 en 4).

Algemeen:

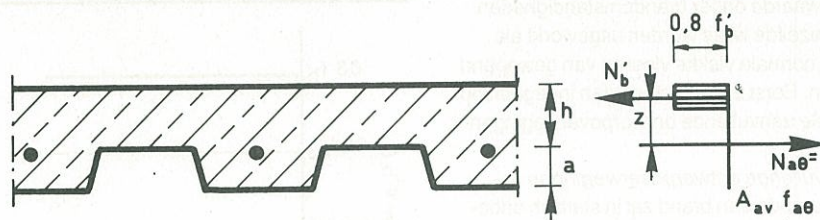
- het beton in de trekzone levert geen bijdrage aan de draagkracht van de vloer onder brandomstandigheden;
- de geprofileerde staalplaat levert bij hoge temperaturen geen bijdrage aan de draagkracht van de vloer onder brandomstandigheden.

Met betrekking tot het positieve plastische moment (veldmoment):

- het verband tussen de drukspanning en stuik van het beton in de drukzone wordt niet beïnvloed door temperatuur en uitgegaan mag worden van het diagram volgens afbeelding 5 voor $\theta_b = 20^\circ\text{C}$ ($\alpha_b = 1,0$);
- de effectieve vloeispanning van de onderwapening in het veld wordt beïnvloed door de temperatuur. Voor het verband tussen $\sigma_{a,0}$ en $\varepsilon_{a,0}$ wordt het in afbeelding 6a gegeven diagram voorgeschreven; voor het verband tussen de rekenwaarde van de treksterkte en de temperatuur, zie afbeelding 6b.

Met betrekking tot het negatieve plastische moment (steunpuntmoment):

- de geprofileerde vloerplaat mag worden vervangen door een plaat met een constante dikte gelijk aan de effectieve plaatdikte h_0 zoals gedefinieerd in tabel 2 (pag. 42.);
- voor het verband tussen de drukspanning en stuik van het beton in de drukzone (= direct verhitte zijde) moet worden uitgegaan van het diagram volgens afbeelding 5a; de druksterkte f_{b0} wordt beïnvloed door de temperatuur volgens afbeelding 5b.
- de effectieve vloeispanning van de trek-



$$M^+_{u0} = A_{av} \cdot f_{a,0} \cdot 10^{-6} \left[h - 0,625 \frac{A_{av} \cdot f_{a,0} \cdot 10^{-3}}{f'_b} \right] \quad [\text{kNm/m}']$$

waarin:

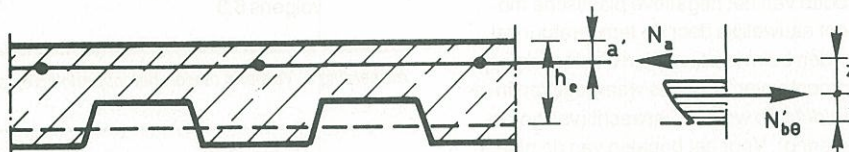
$$A_{av} = \text{de doorsnede van de veldwapening per m' plaatbreedte} \quad [\text{mm}^2/\text{m}']$$

$$f_{a,0} = \text{de rekenwaarde voor de treksterkte van het betonstaal bij brand (afbeelding 6)} \quad [\text{N/mm}^2]$$

$$f'_b = \text{de rekenwaarde voor de betondruksterkte bij normale temperatuur omstandigheden} \quad [\text{N/mm}^2]$$

$$h = \text{de nuttige plaat hoogte} \quad [\text{mm}]$$

Afbeelding 3. Berekening van het positieve plastische moment



$$M^-_{u0} = A_{as} \cdot f_{a,0} \cdot 10^{-6} [h_0 - a' - e] \\ = A_{b0} \cdot 10^{-6} \cdot f'_b [h_0 - a' - e] \quad [\text{kNm/m}']$$

waarin:

$$A_{as} = \text{de doorsnede van de steunpuntwapening per m' plaatbreedte} \quad [\text{mm}^2/\text{m}']$$

$$f_{a,0} = \text{de rekenwaarde voor staaltreksterkte bij normale temperatuur omstandigheden} \quad [\text{N/mm}^2]$$

$$h_0 = \text{de effectieve dikte volgens 5 (zie tabel 2; zonder de dikte van de afwerkvloer)} \quad [\text{mm}]$$

$$a' = \text{de afstand van de bovenzijde van de plaat tot de zwaartelijns van de trekwapening} \quad [\text{mm}]$$

$$e = \text{de afstand van de uiterst gedrukte vezel van de geschematiseerde vloerplaat met dikte } h_0 \text{ tot het aangrijpingspunt van de betondrukresultante} \quad [\text{mm}]$$

$$A_{b0} = \frac{N'_{b0}}{f'_b} = \text{het gereduceerde oppervlak van de betondrukzone betrokken op } f'_b \text{ volgens 6.3} \quad [\text{mm}^2/\text{m}']$$

$$N'_{b0} = \text{de betondrukresultante} \quad [\text{N}]$$

$$f'_b = \text{de rekenwaarde voor de betondruksterkte bij normale temperatuur omstandigheden} \quad [\text{N/mm}^2]$$

Afbeelding 4. Berekening van het negatieve plastische moment

wapening boven het steunpunt wordt niet beïnvloed door de temperatuur en uitgegaan mag worden van het diagram volgens afbeelding 6a voor $\theta_a = 20^\circ\text{C}$ ($\alpha_a = 1,0$).

Op basis van genoemde uitgangspunten en gebruikmakende van de gegeven informatie met betrekking tot de temperatuur in de betondrukzone en in het betonstaal (zie temperatuur verdeling) kan de bezwijk-

voorwaarde onder brandomstandigheden op dezelfde wijze worden uitgewerkt als voor normale vlakke vloeren van gewapend beton. Eerst zal echter worden ingegaan op enkele aanvullende ontwerpoverwegingen.

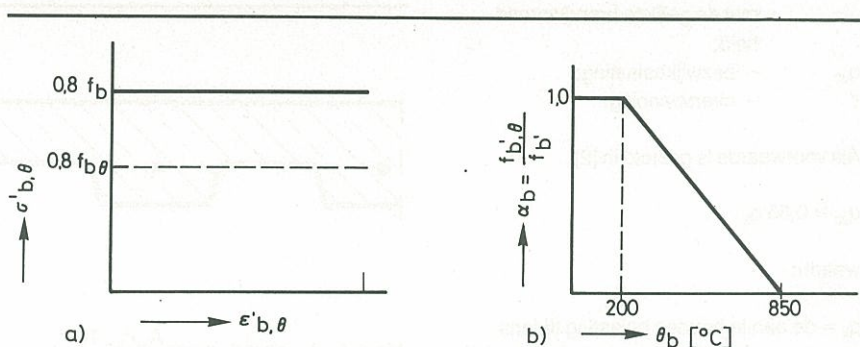
Aanvullende ontwerpoverwegingen

Gedurende een brand zal in statisch onbepaald opgelegde vloeren een herverdeling van momenten optreden. Dit verschijnsel zal worden besproken voor een tussenveld van een doorgaande plaat als weergegeven in *afbeelding 7a*. In *afbeelding 7b* is de momentenverdeling getekend voor de gebruiksbelasting, zoals deze onder kamertemperaturomstandigheden optreedt.

Direct na het begin van de brand zal een zeer aanzienlijke temperatuurvariatie optreden over de hoogte van de plaat. Dit is een gevolg van de relatief geringe warmtegeleiding van het beton. Omdat de plaat bij de opleggingen is ingeklemd, ontstaan extra negatieve buigende momenten waardoor het positieve veldmoment afneemt. De negatieve momenten ter plaatse van de opleggingen nemen echter toe. Omdat, zeker in de eerste fase van de verhitting, de grootte van het negatieve plastische moment nauwelijks door de temperatuur zal worden beïnvloed, moet in dit stadium een momentenverdeling als weergegeven in *afbeelding 7c* worden verwacht (veilige benadering). Voor het bepalen van de plaats waar de steunpuntwapening geheel of gedeeltelijk kan worden beëindigd dient volgens [2] uitgegaan te worden van deze momentenverdeling. Tevens is echter gesteld dat minstens 20% van de voor de brandweerstand vereiste steunpuntwapening over de gehele lengte van de velden moet doorlopen.

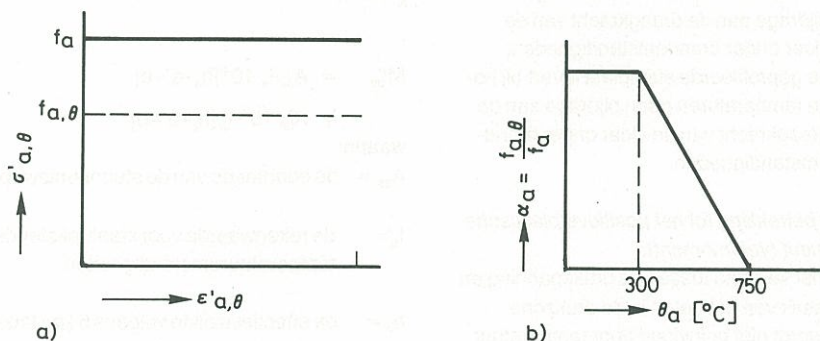
De benodigde verankeringslengten kunnen bepaald worden volgens de VB 1974, art. A-703.

Bij voortgaande verhitting zullen zowel de waarden van het (positieve) plastische veldmoment als van het (negatieve) plastische steunpuntmoment afnemen. De momentverdeling tijdens bezwijken is weergegeven in *afbeelding 7d* en correspondeert met de bezwijkvoorwaarde volgens *tabel 3*. Om een dergelijke momentenverdeling te kunnen bereiken is voldoende rotatiecapaciteit noodzakelijk, met name ter plaatse van de opleggingen. Op grond van de huidige stand van kennis kunnen nog geen ontwerprijtlijnen worden geformuleerd welke zijn afgeleid voor brandomstandigheden. In de RSBV [4] wordt echter een eis gesteld aan de maximale hoogte van de betondrukzones in verband met de rotatiecapaciteit bij normale temperaturomstandigheden. In afwachting van verder onderzoek, is daarom gesteld dat voorlopig mag worden aangenomen dat ook bij brand herverdeling van momenten mogelijk is, indien aan deze regels wordt voldaan. Voor de noodzakelijke vervormingscapaciteit van het wapeningsstaal wordt voorlopig uitgegaan van een soortgelijke regeling.



$f'_{b,\theta} = \alpha_b \cdot f'_b$
 waarin:
 $f'_{b,\theta}$ = de rekenwaarde van de druksterkte bij verhoogde temperatuur [N/mm²]
 f'_b = de rekenwaarde van de druksterkte bij normale temperaturomstandigheden [N/mm²]
 $\alpha_b = 1,0$ als: $\theta_b \leq 200$ °C
 $\alpha_b = 1,0 - \frac{\theta_b - 200}{650}$ als: 200 °C $\leq \theta_b \leq 850$ °C
 $\alpha_b = 0$ als: $\theta_b \geq 850$ °C
 θ_b = de temperatuur in het beton welke bepaald kan worden volgens 6.3 [°C]

Afbeelding 5. Verband tussen betonspanning en stuijk



$f_{a,\theta} = \alpha_a \cdot f_a$
 waarin:
 $f_{a,\theta}$ = de rekenwaarde voor de treksterkte bij verhoogde temperatuur [N/mm²]
 f_a = de rekenwaarde voor de treksterkte bij normale temperaturomstandigheden [N/mm²]
 $\alpha_a = 1,0$ als: $\theta_a \leq 250$ °C
 $\alpha_a = 1,0 - \frac{\theta_a - 300}{450}$ als: 250 °C $\leq \theta_a \leq 750$ °C
 $\alpha_a = 0$ als: $\theta_a \geq 750$ °C
 θ_a = de temperatuur in het betonstaal welke bepaald kan worden volgens 6.3 [°C]

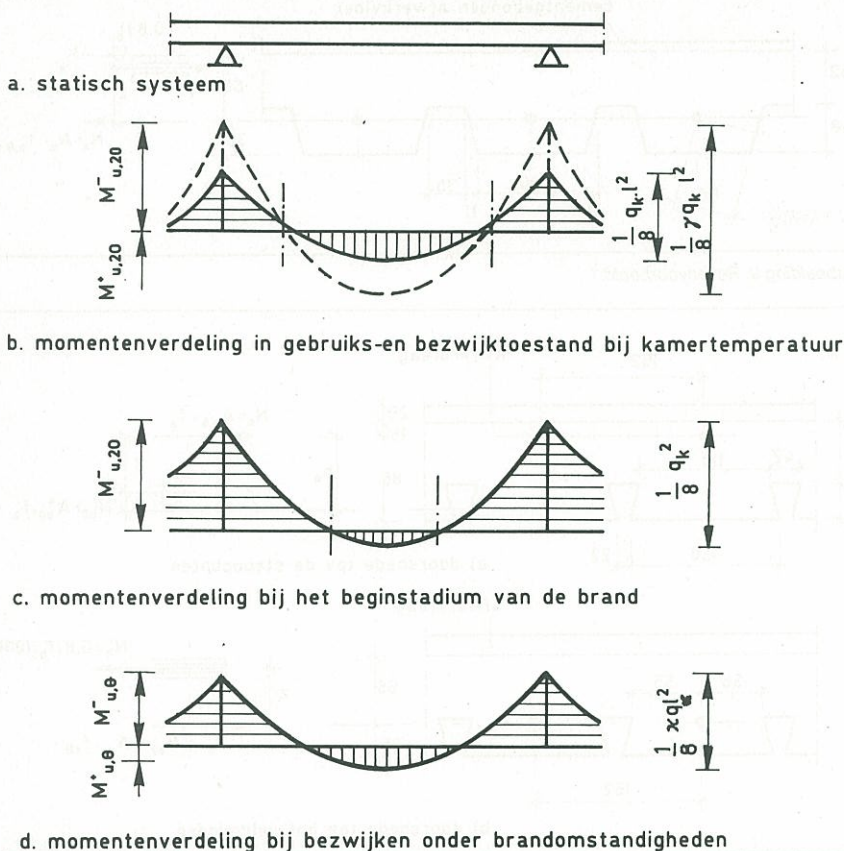
Afbeelding 6. Verband tussen staalspanning en rek

Temperatuurverdeling

Beton.

Zoals opgemerkt wordt bij de berekening van het negatieve plastische moment de geprofileerde betonplaat geschematiseerd tot een vlakke plaat met een dikte gelijk aan

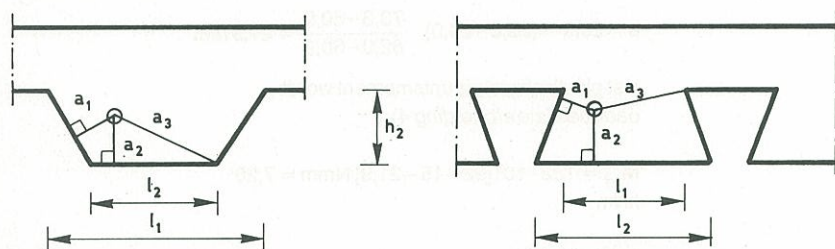
de effectieve dikte h_b . Verder is voorlopig aangenomen dat de temperatuurverdeling in deze geschematiseerde plaat gelijk is aan die in een werkelijk vlakke plaatvloer van grindbeton. De in de voorlopige richtlijnen [2] gegeven temperatuurverdelingen, zijn onder meer een benadering van de



Afbeelding 7. Hervreiding van momenten in een doorgaande staalplaat-betonvloer tijdens brand

Hoogte x van de betondrukzone [mm]	Waarden van $A_{b\theta}^*$ [mm ²] en e [mm] na een branduur van:					
	60 min.		90 min.		120 min.	
	$A_{b\theta}^*$ $\times 10^{-2}$	e	$A_{b\theta}^*$ $\times 10^{-2}$	e	$A_{b\theta}^*$ $\times 10^{-2}$	e
10	18,5	5,5				
15	33,2	8,6	14,8	10,0		
20	51,7	12,0	27,1	13,4	12,0	15,6
25	73,4	15,0	42,6	16,7	22,9	18,9
30	97,8	18,1	60,9	20,0	36,6	22,1
35	125,1	21,2	82,0	23,2	53,1	25,3
40	155,1	24,4	106,8	26,4	72,3	28,6
45	187,2	27,5	132,5	29,6	94,3	31,8
50	223,4	30,7	161,8	32,9	119,1	35,1
55	261,7	33,9	194,0	36,1	146,6	38,3
60	301,7	37,0	228,9	39,4	176,9	41,6
65			265,3	42,6	209,2	44,9
70			304,0	45,7	242,8	48,0
75			343,4	48,8	277,5	51,1
80			383,4	51,8	313,5	54,1

Tabel 4. De sterkte van de betondrukzone bij verhoogde temperatuur

Afbeelding 8. Berekening van coëfficiënt γ in grindbeton

waarden gegeven in [8]. Uitgaande van deze temperatuurverdelingen zijn waarden berekend voor het gereduceerd oppervlak ($A_{b\theta}^*$) van de betondrukzone en de ligging (e) van de betondrukresultante, zie tabel 4. Met behulp van de in afbeelding 4 gegeven formule zijn de negatieve plastische steunpuntsmomenten dan op eenvoudige wijze te berekenen.

Wapening.

Het temperatuurverloop in de (aanvullende) wapening in de ribben hangt af van de positie van de wapeningsstaven en van de vorm van de staalplaat. Beide factoren komen tot uitdrukking in de coëfficiënt γ , waarvoor op grond van onderzoek beschreven in [6] is aangehouden (zie afbeelding 8).

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{1}{\sqrt{a_1}} + \frac{1}{\sqrt{a_2}} + \frac{1}{\sqrt{a_3}}$$

De afstanden a_1 , a_2 en a_3 moeten worden uitgedrukt in mm.

De temperatuur van de wapeningsstaven kan nu worden berekend met behulp van de volgende uitdrukkingen:

- brandduur 60 min: $\theta_a = 1175 - 350 \cdot \gamma \leq 810^\circ\text{C}$ ($\gamma \leq 3,3$)
- brandduur 90 min: $\theta_a = 1285 - 350 \cdot \gamma \leq 880^\circ\text{C}$ ($\gamma \leq 3,6$)
- brandduur 120 min: $\theta_a = 1370 - 350 \cdot \gamma \leq 930^\circ\text{C}$ ($\gamma \leq 3,8$)

Rekenvoorbeelden

Vrij opgelegde plaat

Aannamen.

Uitgegaan wordt van een vrij opgelegde plaat, met een doorsnede zoals weergegeven in afbeelding 9. De karakteristieke waarde van de belasting is $q_k = 4500 \text{ N/m}^2$. De overspanning bedraagt 3m. Betonstaalwapening 1 $\phi 8$ in elke rib, FeB 400 ($f_a = 400 \text{ N/mm}^2$). Betonkwaliteit B22,5 ($f'_b = 18 \text{ N/mm}^2$).

Eis: Een brandwerendheid van 90 minuten.

Controle 1: Thermische isolatie

Minimale vereiste effectieve plaatdikte (zie tabel 2): $h_e = 90 \text{ mm}$.

Met:

$$h_1 = 52 \text{ mm} (> 50 \text{ mm}); h_2 = 48 \text{ mm}$$

$$\ell_1 = 122 \text{ mm}; \ell_2 = 100 \text{ mm}; \ell_3 = 35 \text{ mm}$$

volgt:

$$h_e = 52 + \frac{48(122 + 100)}{2(122 + 35)} = 86 \text{ mm} < 90 \text{ mm}$$

De dikte van de cementgebonden afwerkvloer is meer dan 4 mm zodat de brandwerendheid met betrekking tot de thermische isolatie voldoende is.

Controle 2: Draagkracht

Maximaal optredend moment:

$$M = \frac{1}{8} \kappa \cdot q_k \cdot \ell^2 = \frac{1}{8} \cdot 0,85 \cdot 4,5 \cdot 3^2 = 4,30 \text{ kNm}$$

Temperatuur in betonstaalwapening (zie afbeelding 8):

$$a_2 = 35$$

$$a_1 = a_3 = 56,6 \text{ mm}$$

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{1}{\sqrt{56,6}} + \frac{1}{\sqrt{56,6}} + \frac{1}{\sqrt{35}} = 0,435$$

$$\gamma = 2,30$$

$$\theta_a = 1285 - 350 \times 2,30 = 480^\circ \text{C}$$

Rekenwaarde voor de treksterkte van het betonstaal (zie afbeelding 6):

$$f_{a0} = 400 \left(1 - \frac{480-300}{450}\right) = 240 \text{ N/mm}^2$$

Plastisch veldmoment (zie afbeelding 3):

$$A_a = 320 \text{ mm}^2/\text{m}^1 (1 \phi 8 \text{ per } 0,157 \text{ m})$$

$$M_{u0}^+ = 320 \cdot 240 \cdot 10^{-6}$$

$$(65 - 0,625 \frac{320 \cdot 240 \cdot 10^{-3}}{18}) = 4,78 \text{ kNm}$$

Dus $M_{u0}^+ > M$.

Doorgaande plaat

Aannamen

Uitgegaan wordt van een over meerdere steunpunten doorgaande staalplaatbetonvloer met een dwarsdoorsnede, zoals aangegeven in afbeelding 10. Overspanning $\ell = 5 \times 2,80 \text{ m}$. Karakteristieke belasting: $q_k = 7500 \text{ N/m}^2$. Steunpuntswapening: $1 \phi 8$ ter plaatse van iedere rib, Feb 400 ($f_a = 400 \text{ N/mm}^2$). Betonkwaliteit B 22,5 ($f'_b = 18 \text{ N/mm}^2$).

Vereist

Een brandwerendheid van 90 minuten.

Controle 1: Thermische isolatie

Minimale vereiste effectieve plaatdikte (zie tabel 2): $h_e = 90 \text{ mm}$.

Met:

$$h_1 = 62 \text{ mm} (\geq 50 \text{ mm}); h_2 = 38 \text{ mm}$$

$$\ell_1 = 110 \text{ mm}; \ell_2 = 130 \text{ mm}; \ell_3 = 42 \text{ mm}$$

volgt voor de aanwezige effectieve plaatdikte:

$$h_e = 62 + \frac{38(110 + 130)}{2(110 + 42)} = 92 \text{ mm} \geq 80 \text{ mm}.$$

Zonder de afwerklaag is dus de dikte h_e reeds groter dan benodigd.

Controle 2: Draagkracht

Momentensom van alle velden:

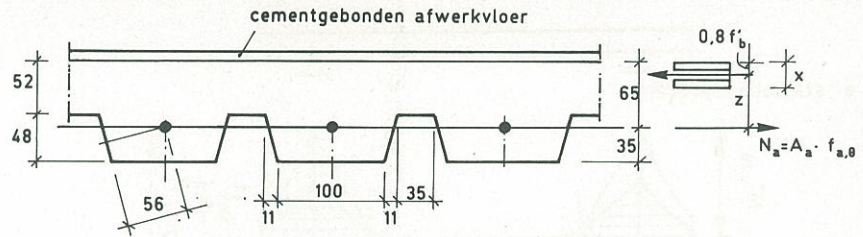
$$M = \frac{1}{8} \cdot \kappa \cdot q_k \cdot \ell^2 = \frac{1}{8} \cdot 0,85 \cdot 7,5 \cdot 2,8^2 = 6,25 \text{ kNm}$$

Steunpuntswapening (alle tussensteunpunten):

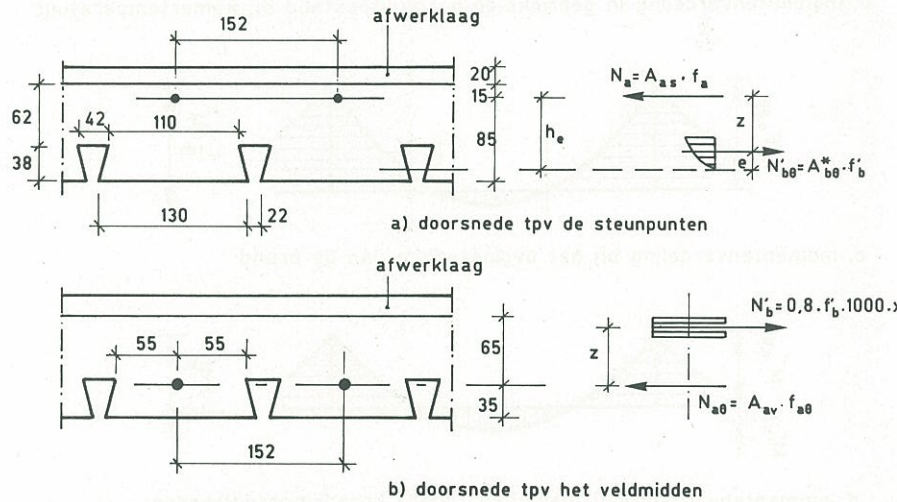
$$A_{as} = 330 \text{ m}^2 (1 \phi 8 \text{ per } 0,152 \text{ m})$$

Hieruit volgt:

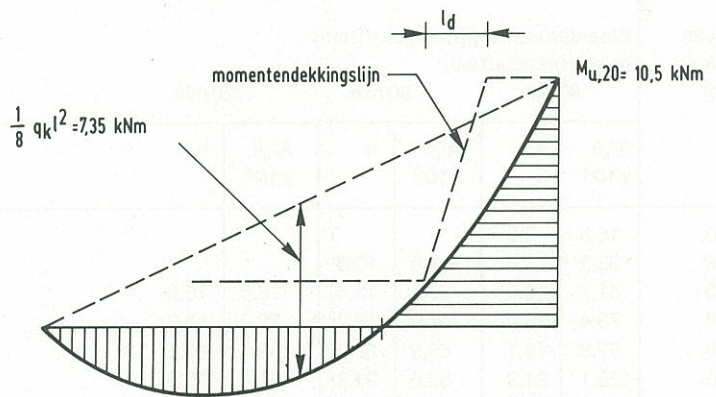
$$N_a = A_{as} \cdot f_a = 300 \cdot 400 \cdot 10^{-3} = 132 \text{ kN}$$



Afbeelding 9. Rekenvoorbeeld 1



Afbeelding 10. Rekenvoorbeeld 2



Afbeelding 11

Uit $N'_{b0} = N_a$ volgt voor het gereduceerde oppervlak van de betondrukzone (verhitte zijde - zie afbeelding 4):

$$A_{b0}^* = \frac{N_a}{f'_b} = \frac{132 \cdot 10^3}{18} = 73,3 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Uit tabel 4 volgt met behulp van lineaire interpolatie:

$$e = 20,0 + (23,2 - 20,0) \cdot \frac{73,3 - 60,9}{82,0 - 60,9} = 21,9 \text{ mm}$$

Het plastisch steunpuntsmoment wordt daarmee (zie afbeelding 4):

$$M_{u0}^- = 132 \cdot 10^3 [92 - 15 - 21,9] \text{ Nmm} = 7,28 \text{ kNm}$$

Eindvelden

Het plastisch veldmoment moet gelijk of groter zijn dan

$$M_{u0}^+ = M - \frac{1}{2} M_{u,0}^- = 6,25 - \frac{7,28}{2} = 2,61 \text{ kNm}$$

Temperatuur in de veldwapening
(zie afbeelding 8):

$$a_2 = 35 \text{ mm}$$

$$a_1 = a_3 = 55,1 \text{ mm}$$

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{2}{\sqrt{55,1}} + \frac{1}{\sqrt{35}} = 0,438$$

$$\gamma = 2,28 (< 3,6)$$

$$\Theta_a = 1285 - 350 \cdot 2,28 = 487^\circ\text{C}$$

Rekenwaarde voor de treksterkte van het
betonstaal (zie afbeelding 6):

$$f_{a0} = 400 \left(1 - \frac{487-300}{450}\right) = 234 \text{ N/mm}^2$$

Benodigde wapening met $z = 0,95h = 62 \text{ mm}$:

$$A_{av} \geq \frac{M_{u0}^+}{f_{a0} \cdot z} = \frac{2,61 \cdot 10^6}{234 \cdot 62} = 180 \text{ mm}^2/\text{m}$$

gekozen 1 $\phi 8$ in iedere rib: $A_{av} = 330 \text{ mm}^2/\text{mm}$

Plastisch veldmoment (zie afbeelding 3):

$$M_{u0}^+ = 330 \cdot 234 \cdot 10^{-6}$$

$$(65 - 0,625 \cdot \frac{330 \cdot 234 \cdot 10^{-3}}{18}) = 4,81 \text{ kNm}$$

Tussenvelden

Omdat $M_{u0}^- = 7,28 \text{ kNm}$ groter is dan $\frac{1}{8} \kappa q_k \ell^2 = 6,25 \text{ kNm}$, is geen aanvullende positieve wapening nodig in de tussenvelden.

Opmerking

Het plastisch steunpuntmoment bij normale temperaturomstandigheden bedraagt (bij verwaarlozing van de staalplaat):

$$M_{u,20}^- = A_{as} \cdot f_a \cdot 10^{-6} (h' - e) = 330 \cdot 400 \cdot 10^{-6} (85 - 5,4) \text{ kNm} = 10,5 \text{ kNm}$$

In afbeelding 11 is de bijbehorende momentenlijn voor de eindvelden getekend. Deze momentenlijn is maatgevend voor de beëindiging van de steunpuntwapening in het eindveld waarbij 20% over de gehele veldlengte moet doorlopen. De verankeringslengten (ℓ_a) kunnen worden bepaald met behulp van art. A-703 van de VB 1974.

Literatuur

- [1] European Convention for constructional steelwork, Committee T3, 1984. 'Calculation of the fire resistance of composite concrete slabs with profiled steel sheet exposed to the standard fire'.

- [2] 'Voorlopige richtlijnen met betrekking tot de rekenkundige bepaling van de brandwerendheid van staalplaat-betonvloeren' (concept, 1984).
- [3] NEN 3884: Bepaling van de brandwerendheid van bouwdeelen.
- [4] RSBV: Richtlijnen voor het ontwerp en de vervaardiging van staalplaat-betonvloeren (concept).
- [5] Mues, H., 'Brandverhalten von beklebten Stahlbauteilen'. Stahlbau-Verlages-GmbH, Köln 1978.
- [6] Kruppa, J., 'Echauffement des planches béton à bac acier soumis à l'incendie conventionnel', CTICM-Paris, 1983.
- [7] Petterson, O. en Witteveen, J., 'On the critical temperatures of steel elements derived for conventional fire resistance tests and from calculations'. Fire Safety Journal, 2, 1979/1980, Elsevier Sequoia SA, Lausanne.
- [8] FIP/CEB Report on methods of assessment of the fire resistance of concrete structural members'. FIB Commission on the fire resistance of prestressed concrete structures, 1978.
- [9] Comité Euro-International du Béton. 'Design of concrete structures for fire resistance'. (First draft of an appendix to the CEB/FIP Model Code for Concrete Structures), Bulletin 145, Parijs 1982.

Toelichting op de bijlage van Bouwen met Staal, nr. 69

Richtlijnen voor de keuze van de staalkwaliteit voor overwegend statisch belaste bouwconstructies

In veel gevallen geschiedt de keuze van een A, B, C, of D kwaliteit bij een bepaalde staalsoort (Fe 360 of Fe 510) nog gevoelsmatig of wordt alleen de diktemaat van het materiaal als criterium gehanteerd. Een direct verband tussen de overgangstemperatuur van $+20,0$ of -20°C en de toepassing van de kwaliteit wordt zelden gelegd. Vandaar dat het Staalbouwkundig Genootschap een tweetal jaren geleden aan de Technische Commissie 26 heeft gevraagd richtlijnen voor de keuze van de staalkwaliteit op te stellen waarbij men zich tot overwegend statisch bepaalde constructies heeft beperkt. De commissie heeft getracht de relatie met de overgangstemperatuur bij de kwaliteitskeuze vast te leggen met de invloeden die deze keuze kunnen beïnvloeden. Het doel van het keuzesysteem is tot een verantwoord materiaalgebruik te komen waarbij tijdens de levensduur van de constructie het materiaal een plastisch gedrag blijft houden. De overgangstemperatuur geeft aan waar

het plastisch gedrag van het materiaal, met zijn mogelijkheid om te waarschuwen of om het krachtenverloop langs een andere weg te leiden, gevoelig wordt voor broos bezwijken. Vanuit de literatuur is een aantal invloeden op de hoogte van de overgangstemperatuur bekend, waarbij vooral de snelheid van belasten belangrijk blijkt te zijn. Tevens is een aantal keuzesystemen bekend, waarbij de verschillende invloeden door middel van vermenigvuldigingscoëfficiënten naar numerieke materiaalkeuzetabellen leiden. Een directe relatie met de overgangstemperatuur wordt echter zelden gelegd. De commissie heeft gemeend voor een sommatiesysteem te moeten kiezen waarbij alle invloeden rechtstreeks zijn uitgedrukt in een aantal graden Celsius waarmee de overgangstemperatuur in zowel positieve als negatieve zin gecorrigeerd kan of moet worden. Als basis voor deze correctieinvloeden heeft men gebruik gemaakt van een door het Franse AFNOR ingevoerd en door IRSID ontwikkeld keuzesysteem voor materiaalqualiteiten. De tabellen zijn vervolgens aan een aantal praktijkvoorbeelden getoetst, waarbij redelijke uitkomsten geconstateerd werden. Bij deze toetsing heeft men rekening gehouden met recente ontwikkelingen bij de staalproducenten waarbij op korte termijn de kwaliteiten Fe 360 B-FN en Fe 510 - C als minimale kwaliteit geproduceerd zullen gaan worden.

Naar de mening van de commissie geeft dit keuzesysteem nu een helder inzicht naar de invloed van de diverse factoren en is het nu ook mogelijk wijzigingen in het ontwerp aan te brengen waardoor het toch mogelijk is een bepaalde kwaliteit toe te passen. Als voorzitter van de commissie dank ik alle leden voor de bijzonder prettige samenwerking, de enthousiaste inzet en de leerzame inbreng van alle betrokkenen, waardoor deze richtlijn mede door het werk van de secretaris op zo'n korte termijn kon worden samengesteld. Ik hoop namens allen dat de richtlijn in de praktijk bij zal dragen tot een veilig gebruik van staal als constructiemateriaal waarbij de snelle verspreiding van deze richtlijn door het Staalbouwkundig Genootschap zeker bij zal dragen. Indien u op- of aanmerkingen met betrekking tot deze richtlijn mocht hebben, verzoeken wij u vriendelijk deze aan ons kenbaar te maken, zodat wij deze eventueel in volgende uitgaven kunnen verwerken.

prof. ir J. Berenbak