

Brandwerendheid van betonconstructies volgens de Eurocodes

prof.dr.ir. L. Taerwe, Universiteit Gent, Vakgroep Bouwkundige Constructies / Laboratorium Magnel voor Betononderzoek

Om bij het ontwerp van een betonconstructie rekening te houden met brand, werden vroeger hoofdzakelijk semi-empirische methoden gebruikt. Door de invoering van de Eurocodes kan de brandwerendheid ook worden 'berekend' op basis van mechanische en thermische modellen met verschillende graad van complexiteit. In dit artikel worden enkele algemene invalshoeken, modellen en rekenregels uit de brandgedeelten van de Eurocodes 1 en 2 toegelicht [1,2].

Traditioneel is de controle van de veiligheid van constructies bij brand gebaseerd op allerlei voorgeschreven maatregelen. In het geval van betonconstructies betreft dit typisch regels voor minimumdwarsafmetingen, minimumbetondekking en wapeningsschikking, meestal gebaseerd op brandproeven volgens de ISO 834-kromme. De laatste decennia evolueerde de kennis omtrent de modellering van een brand, zodat de temperatuurontwikkeling van de verbrandingsgasen beter kan worden ingeschat, rekening houdend met een aantal specifieke parameters. Bovendien maakte de ontwikkeling van eindige-elementenprogramma's het mogelijk zowel het thermisch als het mechanisch gedrag van constructie-elementen realistischer na te rekenen. Deze laatste ontwikkelingen leidden tot ontwerpprocedures gebaseerd op prestatiecriteria (*performance based design*), waarbij de constructie dusdanig is ontworpen dat met een aanvaardbare faalkans wordt voldaan aan de vooropgestelde prestatiecriteria.

Voor enkele algemene concepten van brandveiligheid wordt verwezen naar het artikel op blz. 25 van deze uitgave [3].

Prestatiecriteria

In het algemeen wordt onderscheid gemaakt tussen de hiernavolgende prestatiecriteria:

- Wanneer voor een constructie gedurende een brand mechanische sterkte wordt vereist, moet deze zodanig worden ontworpen en uitgevoerd dat ze gedurende de blootstelling aan brand haar draagvermogen behoudt. Dit is *criterium 'R'*.
- Wanneer compartimentering is vereist, moeten de scheidings-elementen, inclusief de voegen, zodanig worden ontworpen en uitgevoerd, dat ze gedurende

de blootstelling aan brand hun scheidende functie behouden. Dit vereist:

1. geen falen van de integriteit ten gevolge van het ontstaan van scheuren, gaten of andere openingen die groot genoeg zijn om de brand door te laten in de vorm van hete gassen of vlammen. Dit is *criterium 'E'*.
2. geen falen van de isolerende functie waardoor de temperatuur aan de niet-blootgestelde zijde zou oplopen tot de ontbrandingstemperatuur. Dit is *criterium 'I'*. Aangenomen wordt dat hieraan is voldaan indien voor de niet-blootgestelde zijde de gemiddelde temperatuurstijging niet hoger wordt dan 140 K en de maximum-temperatuurstijging niet hoger dan 180 K.

Bouwelementen moeten op de volgende wijze voldoen aan de criteria *R*, *E* en *I*:

- enkel scheidende functie: *E* en *I* (indien vereist);
- enkel dragende functie: *R*;
- scheidende en dragende functie: *R*, *E* en *I* (indien vereist).

Met de aanduiding *R 30*, *R 60*, *E 30*, *E 60* en *I 30*, *I 60* wordt aangegeven dat een element gedurende 30, 60 of meer minuten voldoet aan de respectievelijke criteria *R*, *E* of *I* bij blootstelling aan de standaardvoorwaarden. De aanduiding *REI 30* geeft aan dat het element gedurende minstens 30 minuten gelijktijdig aan de drie criteria voldoet. Hierbij is uiteraard het meest kritieke criterium bepalend.

Vervormingscriteria zijn aan de orde wanneer elementen met een scheidende functie of beschermingsmaterialen worden beïnvloed door de vervormingen van de dragende elementen. Hierbij zijn relevante productspecificaties van belang.

De prestatiecriteria worden getoetst in het kader van het constructief ontwerp bij brand, waarbij de volgende stappen worden doorlopen:

- keuze van de relevante brandscenario's;
- bepaling van de overeenkomstige rekenbranden;
- berekening van de temperatuurontwikkeling binnen de constructie-elementen;
- berekening van het mechanisch gedrag van de constructie die blootgesteld is aan brand.

De rekenbrand moet telkens in één brandcompartiment worden beschouwd, tenzij in het brandscenario

anders is voorgeschreven. Een brandcompartiment is een ruimte binnen een gebouw die zich uitstrekt over één of meer verdiepingen en die is omsloten door scheidings-elementen die de uitbreiding van de brand beletten gedurende de beschouwde blootstellingsduur.

Modellering van een brand

Bij de modellering van een brand komen verschillende parameters aan de orde, met name:

- de geometrische karakteristieken van het compartiment;
- de thermische eigenschappen van de wanden van het compartiment;
- de ligging en grootte van de openingen in de wanden van het compartiment die bepalend zijn voor de ventilatievoorwaarden;
- de verbrandingswaarde van de aanwezige goederen in het compartiment.

Naarmate in de modellering van de brand meer parameters worden betrokken, zal het brandverloop realistischer worden weergegeven, maar zal de complexiteit van het rekenmodel toenemen. De beschikbare modellen zijn ingedeeld naar toenemende mate van complexiteit.

Nominale temperatuur-tijdkrommen

Deze genormaliseerde temperatuur-tijdkrommen geven het tijd/temperatuur verloop voor een brand in een compartiment. Geen enkele parameter eigen aan het beschouwde compartiment komt in deze modellering aan de orde. Het is dan ook duidelijk dat het hier gaat om een zeer vereenvoudigd model voor de voorstelling van een brand.

- Standaardbrandkromme (ISO 834: Fire Resistance Tests – Elements of Building Construction)

Deze genormaliseerde temperatuur-tijdkromme is de brandkromme die normaal wordt toegepast voor beproeving (en bijhorende classificatie) van constructieve elementen bij brand en wordt tevens gebruikt voor de berekening van constructies bij brand. De kromme is gebaseerd op de verbranding van celluloseachtige materialen die gebruikelijk voorkomen in gebouwen. Toepassing van deze vereenvoudigde modellering van brand levert meestal conservatieve resultaten op in vergelijking tot echte branden.

De temperatuur van de verbrandingsgassen als functie van de tijd wordt gegeven door de betrekking (fig. 1):

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (^\circ\text{C}) \quad (1)$$

waarin:

- θ_g is de temperatuur van de verbrandingsgassen in $^\circ\text{C}$;
- t is de tijd in minuten.

- Kromme voor uitwendige brand

Deze genormaliseerde temperatuur-tijdkromme wordt gebruikt voor branden die zich in de buitenatmosfeer voordoen (bijvoorbeeld brand onder een brug). De temperatuur van de verbrandingsgassen in de nabijheid van de blootgestelde elementen als functie van de tijd wordt gegeven door de betrekking (fig. 1):

$$\theta_g = 20 + 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) \quad (^\circ\text{C}) \quad (2)$$

- Koolwaterstofkrommen

Voor brandhaarden veroorzaakt door ontbranding van koolwaterstoffen (tankwagens of opslagplaatsen met stookolie, dieselolie enz.) moet een strengere brandkromme dan de ISO 834-kromme worden aangenomen. De brandstof heeft in deze gevallen immers een zeer hoge verbrandingswaarde. Voor de standaardkromme wordt de temperatuur van de verbrandingsgassen als functie van de tijd gegeven door de betrekking (fig. 1):

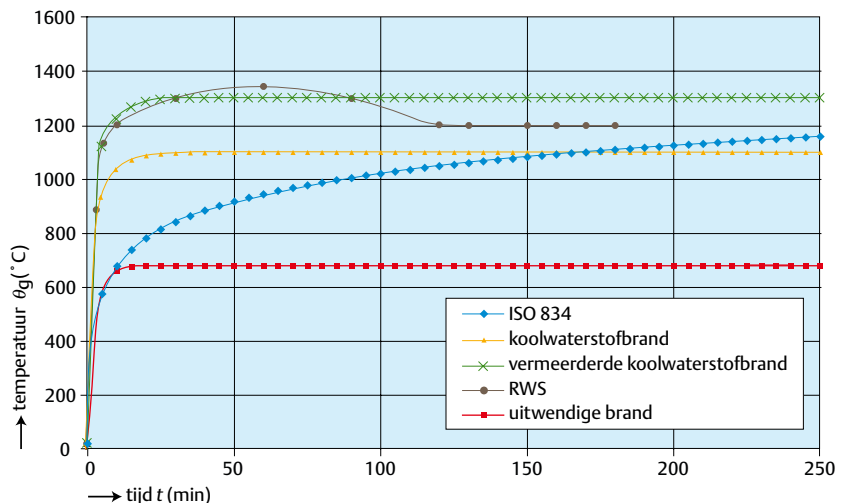
$$\theta_g = 20 + 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) \quad (^\circ\text{C}) \quad (3)$$

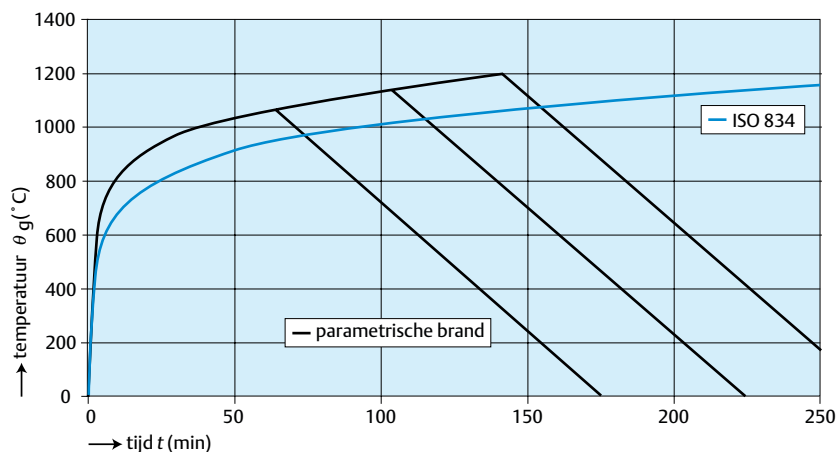
In de Franse regelgeving is de zogenoemde verhoogde koolwaterstofkromme (HCM – Hydrocarbon Modified Curve) opgenomen, waarbij de maximumtemperatuur wordt verhoogd van 1100 naar 1300 $^\circ\text{C}$. Ten slotte wordt nog de RWS-kromme vermeld, ontwikkeld door Rijkswaterstaat op basis van onderzoek bij TNO voor specifieke toepassing bij branden in tunnels.

Vereenvoudigde natuurlijke brandmodellen

Vereenvoudigde brandmodellen zijn gebaseerd op een beperkt aantal specifieke fysische parameters met een afgebakend toepassingsgebied. Zo wordt in bijlage E van EN 1991-1-2 een methode gegeven voor de bepaling van de rekenwaarde van de brandbelasting $q_{f,d}$ uitgedrukt in MJ/m^2 . Hierbij wordt uitgegaan van de netto verbrandingswaarden van de in het compartiment aanwezige materialen en worden verschillende ‘risicofactoren’ ingevoerd. Hierbij

1 | Verschillende temperatuur-tijdkrommen





2 | Vergelijking enkele parametrische temperatuurmodellen met ISO 834-kromme

worden ook actieve brandbeveiligingsystemen (sprinkler, detectie, automatisch alarm, brandweer) in rekening gebracht. Verder wordt ook rekening gehouden met de ventilatievoorwaarden en de geometrische karakteristieken van het compartiment. De formules voor het berekenen van de zogenoemde parametrische temperatuur-tijdcurven zijn opgenomen in bijlage A van EN 1991-1-2. Enkele voorbeelden zijn gegeven in figuur 2.

Geavanceerde natuurlijke brandmodellen

Voor meer geavanceerde berekeningen kan gebruik worden gemaakt van:

- één-zonemodellen, waarbij een gelijkmatige, tijdsafhankelijke temperatuurverdeling in het compartiment wordt verondersteld;
- twee-zonemodellen, waarbij een bovenlaag met een tijdsafhankelijke dikte en een tijdsafhankelijke gelijkmatige temperatuurverdeling wordt verondersteld en een onderlaag met een tijdsafhankelijke, gelijkmatige en lagere temperatuur;
- veldmodellen (CFD: computational fluid dynamics) voor de bepaling van de temperatuurontwikkeling in het compartiment als functie van de tijd en de plaats in het compartiment.

Constructieve analyse

Belastingseffecten

Voor een accidentele ontwerpsituatie, in casu brand, wordt de volgende belastingscombinatie beschouwd voor de berekening van het belastingseffect $E_{d,fi}$ (EN 1990):

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P_k + A_d + \psi_{x,1} Q_{k1} + \sum_{i>1} \psi_{2,i} Q_{ki} \quad (4)$$

waarbij het plusteken en het sommatieteken als betekenis hebben ‘te combineren met’ en waarbij $\psi_{x,1} = \psi_{1,1}$ in de Belgische Nationale Bijlage en $\psi_{x,1} = \psi_{2,1}$ in de Nederlandse. Opgemerkt wordt dat in EN 1991-1-2 voor Q de quasi-blijvende waarde wordt aanbevolen ($\psi_{2,1}$). Er wordt aldus één accidentele belasting beschouwd met rekenwaarde A_d , die wordt gecombineerd met de

karakteristieke waarden van de permanente belastingen en eventuele voorspanning, de frequente (B) of quasi-blijvende (NL) waarde van de overheersende veranderlijke belasting en de quasi-blijvende waarde van de andere veranderlijke belastingen.

Bij brand heeft A_d betrekking op de indirecte acties ten gevolge van uitwendig of inwendig verhinderde vervormingen. Ten gevolge van inwendige vervormingsverhindering ontstaan langse trekspanningen in het centrale deel van een ongescheurde doorsnede. Ten gevolge van uitwendige vervormingsverhindering (verbinding met naburige elementen) ontstaan buigende momenten (zie verder) en soms aanzienlijke langskrachten in balken en platen die eventueel ook schade in niet aan de brand blootgestelde elementen kunnen veroorzaken [4]. Deze problematiek wordt via numerieke simulatie bestudeerd in ‘fib Working Party 4.3.2: Fire Design of Concrete Structures – Structural Applications’, waarvan de auteur coördinator is.

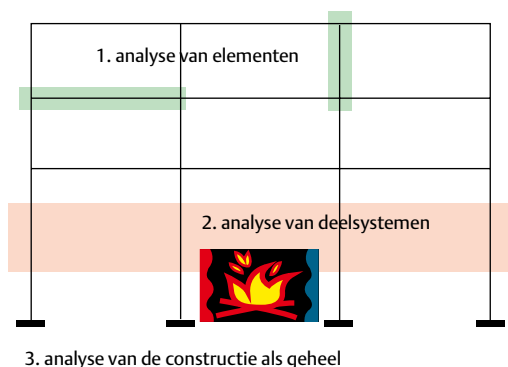
Belastingscombinatie (4) geeft aanleiding tot belastingseffecten $E_{d,fi}$ die duidelijk kleiner zijn dan de corresponderende waarden E_d die geldig zijn voor de blijvende ontwerpsituatie. Niet alleen zijn in dit laatste geval $\gamma_c > 1$, $\gamma_Q > 1$ en $\gamma_p < 1$, doch voor gebouwen is ψ_1 begrepen tussen 0,5 en 0,9 en ψ_2 tussen 0,3 en 0,8, waarbij deze laatste waarden moeten worden vergeleken met ψ_0 begrepen tussen 0,7 en 1,0 (belastingscombinatie voor de blijvende ontwerpsituatie). De verhouding

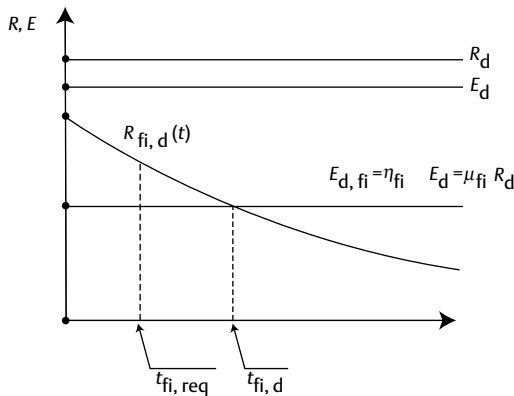
$$\eta_{fi} = E_{d,fi} / E_d \quad (5)$$

is steeds kleiner dan 0,7 en kan, afhankelijk van de waarde van $\psi_{x,1}$ en de verhouding van de veranderlijke belasting tot de totale belasting, afnemen tot 0,3. De partiële veiligheidsfactoren voor de materialen γ_c en γ_s worden in de accidentele brandsituatie gelijkgesteld aan 1.

Controle

In de Eurocodes wordt onderscheid gemaakt tussen een analyse van elementen, een analyse van deelsystemen en een analyse van de constructie als geheel





(fig. 3). Voor de controle van standaard-brandweerstandseisen is, over het algemeen, een analyse van elementen voldoende. De effecten van thermische uitzettingen moeten over het algemeen niet in aanmerking worden genomen, doch wel indien deze resulteren uit thermische gradiënten. Meestal wordt nagegaan of in elke doorsnede

$$E_{d,fi}(t) \leq R_{d,fi}(t) \text{ voor } t \leq t_{fi,req} \quad (6)$$

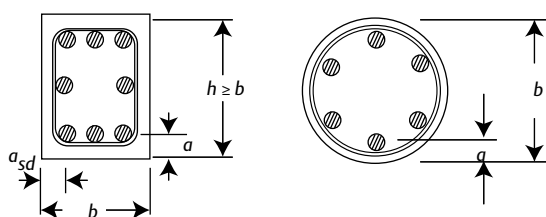
waarin:

- $E_{d,fi}(t)$ is de rekenwaarde van het beschouwde belastingseffect (meestal een snedekracht) op het tijdstip t , inclusief indirecte acties;
- $R_{d,fi}(t)$ is de rekenwaarde van de corresponderende weerstand in de brandsituatie op het tijdstip t ;
- t is de beschouwde tijdsduur sinds de aanvang van de brand;
- $t_{fi,req}$ is de voorgeschreven of vereiste brandwerendheid in minuten (criterium R).

Wanneer geen rekening wordt gehouden met indirecte acties ten gevolge van verhinderde thermische vervormingen is $E_{d,fi}(t)$ quasi onafhankelijk van de brandduur. Anderzijds is $R_{d,fi}(t)$ een dalende functie van de tijd (fig. 4), die kan worden berekend op basis van de materiaalwetten die de materiaaldegradatie weergeven onder invloed van de toenemende temperatuur (zie artikel op blz. yy in deze uitgave [5]).

Voor de controle van (6) voor betonconstructies kan gebruik worden gemaakt van de volgende methoden:

- detaillering volgens erkende methoden op basis van tabellen of via beproeving;
- vereenvoudigde rekenmethoden voor specifieke elementen;



- geavanceerde berekeningsmethoden waarbij een nauwkeurige thermische en mechanische analyse wordt uitgevoerd van elementen, deelsystemen of de volledige constructie.

Controle met tabellen

Toepassingsgebied

De methode is van toepassing voor de controle van afzonderlijke elementen. In de tabellen worden minimumwaarden gegeven voor de dwarsafmetingen van betonelementen en voor de asafstand van de hoofdwapening voor brandweerstanden tot 240 minuten. Bovendien worden nog enkele specifieke bijkomende detailleringsregels vermeld. Een voordeel van de tabelwaarden is dat de ontwerper zeer vlug ziet of de afmetingen van elementen, die volgen uit de berekening bij normale temperatuur, tot problemen kunnen leiden bij hoge temperaturen.

Bij toepassing van de methode geldt het volgende:

- de gegeven waarden zijn gebaseerd op de standaardbrandvoorwaarden (ISO-kromme);
- de tabellen zijn empirisch afgeleid, doch zijn getoetst aan de hand van proeven en theoretische evaluaties. Meestal werd vertrokken van eerder conservatieve aannamen;
- de tabelwaarden zijn van toepassing op beton met kiezelhoudende granulaten. Indien kalksteenachtige of lichte granulaten worden gebruikt, kan de minimumafmeting van de dwarsdoorsnede met 10% worden gereduceerd;
- de tabelwaarden houden rekening met explosief spatten [5] voor alle milieuklassen en in principe is in dit verband geen verdere controle nodig;
- tenzij anders vermeld, hoeven geen bijkomende controles plaats te hebben met betrekking tot dwarskracht, wrijving en verankering.

Algemene regels

1. Voor wat het draagvermogen betreft (prestatiecriterium R), werden de minimumafmetingen van de dwarsdoorsnede en de asafstanden van de wapening zo bepaald dat $E_{d,fi}(t) \leq R_{d,fi}(t)$ voor $t \leq t_{fi,req}$. De tabelwaarden zijn gebaseerd op $\eta_{fi} = 0,7$ met η_{fi} volgens (5), tenzij anders vermeld.
2. In de tabellen wordt de minimumbetondekking uitgedrukt als afstand van de as van de hoofdwapening tot het dichtstbij gelegen betonoppervlak (fig. 5). Het verband tussen de asafstand a en de betondekking c volgens EN 1992-1-1 is algemeen $a = c + \phi/2$. De vermelde asafstanden zijn nominale waarden waarbij geen tolerantietoeslag moet worden geteld. De betekenis van b en h is eveneens aangeduid in figuur 5.
3. Voor de afname van de karakteristieke sterkte van betonstaal en voorspanstaal als functie van de tem-

4 | Schematisch verloop

$E_{d,fi}$ en $R_{d,fi}(t)$

5 | Asafstand hoofdwapening en afmetingen dwarsdoorsnede

6 | Verloop factoren $k_s(\theta_{cr})$ en $k_p(\theta_{cr})$ als functie van temperatuur θ

- a. betonstaal
- b. voorspanstaven
- c. voorspanraden en -strengen

peratuur kunnen, voor gebruik bij de tabellen, de wetmatigheden voorgesteld in figuur 6 worden gebruikt. Hierbij zijn

$$k_s(\theta_{cr}) = f_{yk}(\theta_{cr}) / f_{yk}(20^\circ\text{C})$$

$$k_p(\theta_{cr}) = f_{pk}(\theta_{cr}) / f_{p0,1k}(20^\circ\text{C})$$

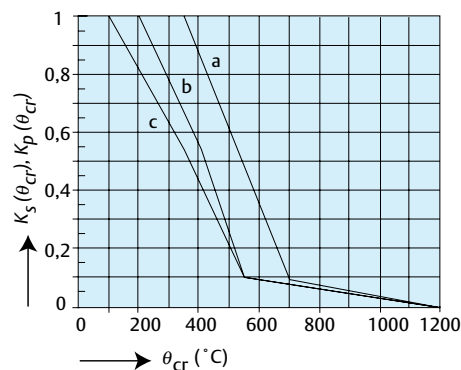
4. De minimumbetondekking van het wapeningsstaal dat zich bevindt in de getrokken zone van eenvoudig opgelegde elementen, werd berekend op basis van een kritieke staaltemperatuur $\theta_{cr} = 500^\circ\text{C}$. De kritieke temperatuur is die temperatuur waarbij de wapening vloeit onder de optredende staalspanning $\sigma_{s,fi}$. Deze laatste grootheid wordt berekend op basis van

$$\sigma_{s,fi} = \frac{E_{d,fi}}{E_d} \cdot \frac{f_{yk}(20^\circ\text{C})}{\gamma_s} \cdot \frac{A_{s,req}}{A_{s,prov}} \quad (7)$$

Stelt men hierin $E_{d,fi} = 0,7 E_d$; $\gamma_s = 1,15$ en $A_{s,req} = A_{s,prov}$ dan is $\sigma_{s,fi} = 0,6 f_{yk}$. Volgens curve a in figuur 6 stemt dit resultaat overeen met $\theta_{cr} = 500^\circ\text{C}$.

Voor voorspanstaal wordt als kritieke temperatuur aangenomen: 350°C voor draden en strengen en 400°C voor staven. Deze aanname correspondeert met $E_{d,fi} = 0,7 E_d$; $f_{p0,1k}/f_{pk} = 0,9$; $\gamma_s = 1,15$ en $\sigma_{p,fi} = 0,55 f_{p0,1k}$ (fig. 6, curven b en c).

Voor elementen onderworpen aan trek of buiging (eenvoudig opgelegd) kan de minimumwaarde van



a worden gewijzigd voor een kritieke temperatuur verschillend van 500°C die wordt berekend op basis van (7) en figuur 6.

5. De tabelwaarden zijn minima, bijkomend aan de waarden vermeld in de detailleringregels van EN 1992-1-1. Sommige tabelwaarden van de asafstand van het wapeningsstaal zijn echter kleiner dan vereist volgens EN 1992-1-1 en moeten enkel worden gebruikt bij interpolatie. Voor hogesterktebeton zijn specifieke correctiefactoren van toepassing.

Kolommen

Er worden twee methoden (A en B) vermeld die van toepassing zijn binnen bepaalde grenzen van de invloedsparameters. In de bijhorende tabellen worden combinaties vermeld van de minimumafmeting b_{min} van de kolomdoorsnede en de asafstand a van de hoofdwapening (fig. 5).

Tabel 1 | Combinaties b_{min}/a voor kolommen met rechthoekige of cirkelvormige dwarsdoorsnede (afmetingen in mm)

standaard-brandweerstand	meerzijdige blootstelling			eenzijdige blootstelling
	$\mu_{fi} = 0,2$	$\mu_{fi} = 0,5$	$\mu_{fi} = 0,7$	$\mu_{fi} = 0,7$
R 30	200/25	200/25	200/32 300/27	155/25
R 60	200/25	200/36 300/31	250/46 350/40	155/25
R 90	200/31 300/25	300/45 400/38	350/53 450/40	155/25
R 120	250/40 350/35	350/45 450/40	350/57 450/51	175/35
R 180	350/45	350/63	450/70	230/55
R 240	350/61	450/75	-	295/70

Tabel 2 | Minimumdikte en -asafstand voor eenvoudig opgelegde platen dragend in één of twee richtingen

standaard-brandweerstand	plaatdikte h_s (mm)	asafstand a (mm)		
		één richting	twee richtingen	
			$l_y/l_x \leq 1,5$	$1,5 < l_y/l_x \leq 2$
REI 30	60	10	10	10
REI 60	80	20	10	15
REI 90	100	30	15	20
REI 120	120	40	20	25
REI 180	150	55	30	40
REI 240	175	65	40	50

Tabel 1 hoort bij methode A. Het belastingsniveau in de brandsituatie wordt in deze tabel gekarakteriseerd door de factor

$$\mu_{fi} = \frac{N_{Ed,fi}}{N_{Rd}} = \frac{\eta_{fi} N_{Ed}}{N_{Rd}} \quad (8)$$

waarin:

$N_{Ed,fi}$ is de rekenwaarde van de aangrijpende langskracht in de brandsituatie bepaald op basis van (4)

$N_{Rd} = A_s f_{yd} + A_c f_{cd} = A_s f_{yk} / \gamma_s + A_c \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c$, de rekenwaarde van de weerstandbiedende langskracht bij normale omgevingstemperatuur.

In figuur 4 is de relatieve positie van $R_d = N_{Rd}$, $E_d = N_{Ed}$ en $E_{d,fi} = N_{Ed,fi}$ aangegeven. Tabel 1 is gebaseerd op $\alpha_{cc} = 1,0$ terwijl in de Belgische Nationale Bijlage van EN 1992-1-1 $\alpha_{cc} = 0,85$ wordt gesteld.

Bij methode A is ook een formule opgenomen die toelaat de brandweerstand R te berekenen voor andere dan de in tabel 1 vermelde waarden van de invloedsparameters. Voor slanke kolommen (tot $\lambda = 80$) zijn in bijlage C van de norm bijkomende tabellen opgenomen.

Andere elementen

In EN 1992-1-2 zijn analoge tabellen opgenomen voor dragende en niet-dragende wanden, getrokken elementen, statisch bepaalde en doorgaande balken, platen op een balkenrooster, vlakke plaatvloeren en ribvloeren. Bij wijze van voorbeeld is tabel 2 weergegeven die betrekking heeft op eenvoudig opgelegde gewapende of voorgespannen betonplaten. Voor wat betreft doorgaande balken en platen moet worden opgemerkt dat tijdens de opwarming, thermische momenten $M\theta$ ontstaan ten gevolge van de verhinderende van de thermische krommingen. Dit zijn de belastingseffecten veroorzaakt door de indirecte acties. Het verschijnsel is in figuur 7 schematisch voorgesteld voor een tweezijdig ingeklemde ligger waarbij gedurende de brand, en dit vooral tijdens de eerste 30 minuten, de momentenlijn opschuift in de richting van de negatieve momenten (lijn 1 in fig. 7). Eventueel kan in het midden van de balk de zone met positieve momenten volledig verdwijnen (lijn 2 in fig. 7). Indien aldaar geen bovenwapening is voorzien, kan een scharnier ontstaan in de middendoorsnede. In dit verband wordt voor doorgaande balken en platen vereist dat nog ten minste 25% van de bovenwapening, voorzien ter plaatse van de tussensteunpunten, doorloopt tot over een afstand $0,3 l_{eff}$ naar de naburige velden toe.

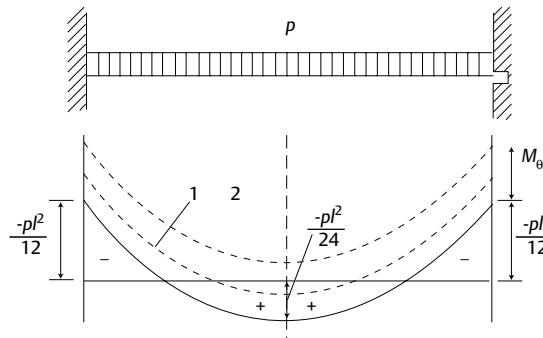
Vereenvoudigde rekenmethoden

Vereenvoudigde rekenmethoden worden gebruikt om het draagvermogen van een opgewarmd betonelement te bepalen. In EN 1992-1-2 zijn de volgende methoden vermeld:

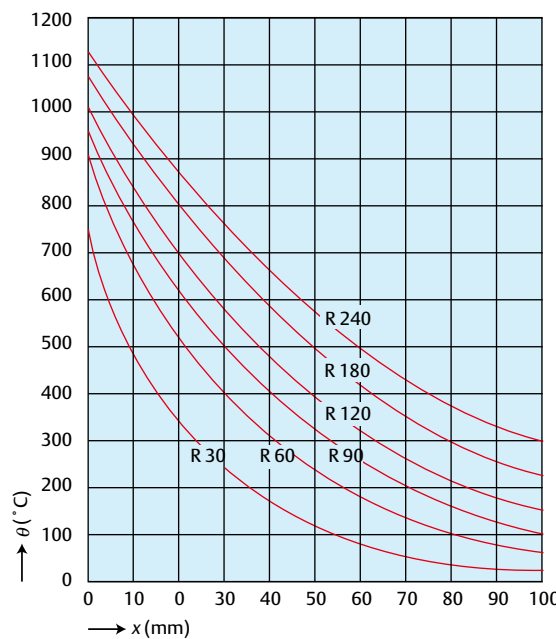
- bijlage B geeft twee methoden om de weerstand tegen buiging en langskracht te bepalen. Het betreft de ‘methode met de isotherme van 500 °C’ en de ‘zonemethode’;
- bijlage C geeft een zonemethode voor de analyse van kolommen met belangrijke tweede-orde-effecten;
- bijlage D geeft een vereenvoudigde methode voor controle van dwarskracht, wringing en verankering;
- bijlage E geeft een methode voor het ontwerpen van balken en platen.

Temperatuurprofielen

De temperatuur in een betonelement blootgesteld aan brand kan worden bepaald uitgaande van proeven of via berekening. In bijlage A van EN 1992-1-2 zijn temperatuurverdelingen gegeven voor een aantal dwarsdoorsneden, berekend voor beton op basis van kiezelhoudende granulat. De temperatuurprofielen zijn conservatief voor andere types granulat. Figuur 8 geeft de temperatuurverdeling over de hoogte van een éénzijdig aan brand blootgestelde plaat (resp. over de dikte van een éénzijdig blootgestelde wand) na 30, 60, 90, 120, 180 en 240 min. Verder worden voor verschillende balk- en kolomdoorsneden isothermen gegeven op verschillende tijd-



7 | Verschuiving momentenlijn in tweezijdig ingeklemde ligger tijdens brand



8 | Temperatuurontwikkeling in een plaat eenzijdig blootgesteld aan brand (x gemeten vanaf aan brand blootgestelde zijde)

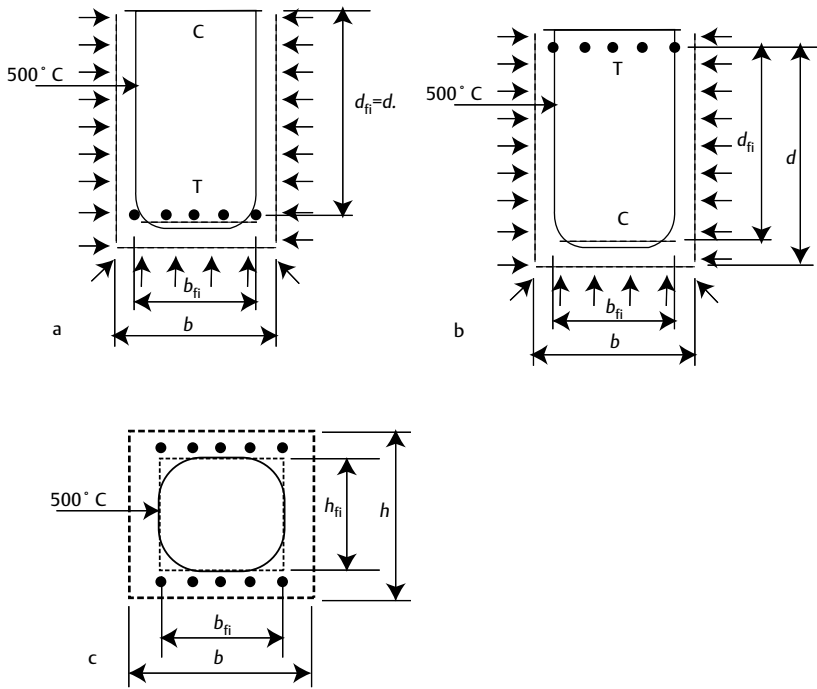
stippen voor een kwart van de dwarsdoorsnede. Voor sommige gevallen wordt eveneens de ontwikkeling van de 500 °C-isotherme getekend.

Gereduceerde dwarsdoorsnede op basis van de isotherme van 500 °C

Er wordt van uitgegaan dat beton dat werd opgewarmd boven 500 °C, kan worden verwaarloosd terwijl voor beton dat deze temperatuur niet heeft bereikt, wordt aangenomen dat het de oorspronkelijke sterkte (kamertemperatuur) heeft behouden. Dit stemt overeen met $k_c(\theta) = 1$ voor $\theta < 500$ °C en $k_c(\theta) = 0$ voor $\theta \geq 500$ °C. Staven en voorspanelementen die zich buiten de gereduceerde betondoorsnede bevinden worden in aanmerking genomen voor de berekening van het weerstandbiedend moment op basis van hun specifieke temperatuur.

Voor een doorsnede onderworpen aan buiging en langskracht wordt als volgt te werk gegaan (fig. 9):

- bepaal de isotherme van 500 °C voor de beschouwde blootstellingstijd op basis van de gra-



9 | Gereduceerde dwarsdoorsneden; T is trek, C is druk

- a. driezijdige blootstelling aan brand aan trekzijde
- b. driezijdige blootstelling aan brand aan drukzijde
- c. vierzijdige blootstelling aan brand (balk of kolom)

- fieken opgenomen in bijlage A van EN 1992-1-2 of andere equivalente informatie;
- bepaal de gereduceerde breedte b_{fi} en de gereduceerde nuttige hoogte d_{fi} door het beton buiten de isotherme van 500 °C weg te laten (fig. 9). De afrondingen van de isothermen worden benaderd met rechte hoeken zoals aangegeven in fig. 9;
- bepaal de temperatuur van de getrokken en gedrukte wapening aan de hand van de beschikbare temperatuurprofielen;
- bereken $f_{yk}(\theta)$ op basis van de beschikbare materiaalmodellen [5];
- bereken het weerstandbiedend moment op basis van de methoden vermeld in EN 1992-1-1 met de aangepaste afmetingen en materiaaleigenschappen;
- ga na of $M_{Rd,fi} \geq M_{Ed,fi}$.

Doorgaande balken en platen

De controle wordt gebaseerd op de bezwijkanalyse waarbij wordt aangenomen dat voldoende rotatiecapaciteit beschikbaar is op de tussensteunpunten. Nagegaan moet worden of voldaan is aan (fig. 10):

$$\frac{|M_{Rd1,fi}| + |M_{Rd2,fi}|}{2} + M_{Rd,fi,span} \geq M_{Ed,fi} \quad (9)$$

10 | Controle doorgaande ligger

met $M_{Ed,fi}$ volgens:

$$M_{Ed,fi} = \frac{w_{Ed,fi} l_{eff}^2}{8} \quad (10)$$

waarbij $w_{Ed,fi}$ wordt berekend uitgaande van de belastingcombinatie (4). Vergelijking (9) drukt uit dat de

statisch bepaalde parabolische momentenlijn 1 binnen de grenswaarden $M_{Rd1,fi}$, $M_{Rd2,fi}$ en $M_{Rd,fi,span}$ moet zijn gelegen.

De rekenwaarde van het weerstandbiedend moment $M_{Rd,fi,span}$ in het midden van het veld kan worden berekend volgens:

$$\begin{aligned} M_{Rd,fi,span} &= \frac{\gamma_s}{\gamma_{s,fi,span}} k_s(\theta) M_{ed} \frac{A_{s,prov}}{A_{s,req}} \\ &= k_s(\theta) f_{yk} A_{s,prov} z_{20^\circ} \end{aligned} \quad (11)$$

met M_{Ed} en z_{20° volgens het ontwerp bij normale temperatuur.

Voor de tussensteunpunten geldt:

$$\begin{aligned} M_{Rd,fi} &= \frac{\gamma_s}{\gamma_{s,fi}} M_{ed} \frac{A_{s,prov}}{A_{s,req}} \frac{d-a}{d} = f_{yk} A_{s,prov} z_{fire} \\ &= f_{yk} A_{s,prov} z_{20^\circ} \frac{d-a}{d} \end{aligned} \quad (12)$$

waarbij a de vereiste asafstand is voor de onderwapening. Bovenstaande formule is slechts geldig indien de temperatuur van het betonstaal boven het steunpunt niet meer bedraagt dan 350 °C. Voor hogere temperaturen moet $k_s(\theta_{cr})$ als bijkomende factor worden ingevoerd in (12). ■

Literatuur

1. EN 1991-1-2, Eurocode 1: Belastingen op constructies, Deel 1-2: Algemene belastingen – Belasting bij brand. November 2002.
2. EN 1992-1-2, Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies, Deel 1-2: Algemene regels – Ontwerp en berekening bij brand. December 2004.
3. Rabaut, D., Prestatiegericht brandveilig ontwerpen. *Cement* 2006 nr. 7.
4. Van Acker, A., Richtlijnen voor het ontwerpen van brandveilige betonnen gebouwen. *Cement* 2000, nr. 6.
5. Denoël, J.-F., Beton en brand. *Cement* 2006 nr. 7.

