

Elementaire berekening brandwerendheid

ir. P. Lagendijk, Aronsohn Constructies raadgevende ingenieurs bv

Momenteel is NEN 6071:2001 [1] het document dat ten grondslag moet liggen aan het constructief ontwerp van betonconstructies tot en met sterkteklasse C53/65¹⁾ ingeval van brand. Deze norm geeft rekenregels voor de bepaling van de brandwerendheid met betrekking tot bezwijken en de brandwerendheid met betrekking tot de scheidende functie van bouwdelen. In dit artikel wordt alleen stilgestaan bij het eerste onderdeel, toegelicht met een rekenvoorbeeld.

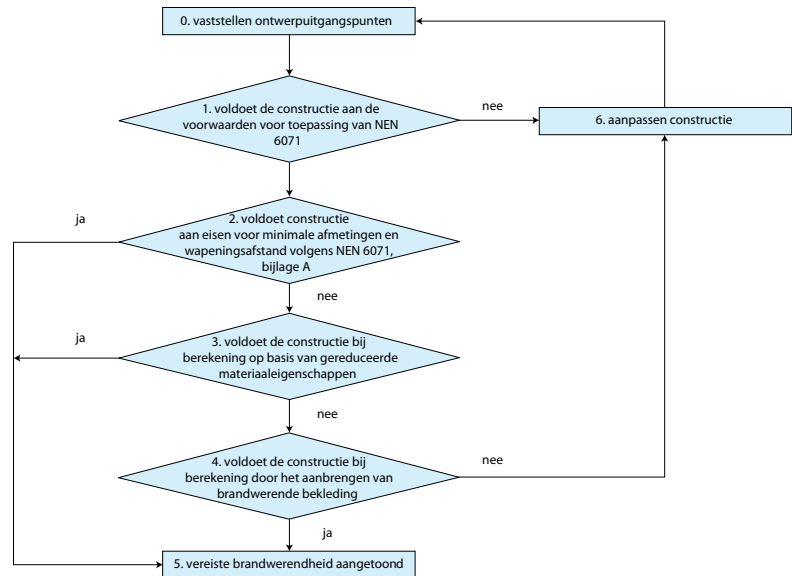
Het ontwerp van een betonconstructie wordt van oudsher bepaald op basis van de situatie bij kamertemperatuur. In de 'Voorschriften Beton VB 1974/1984' werd alleen gesteld dat bij betonoppervlakken die gedurende lange tijd blootgesteld kunnen worden aan hoge temperaturen, de dekking moet worden gehanteerd die hoort bij een agressief milieu. Met de introductie in 1991 van NEN 6071 werd voor het eerst op brede schaal de aandacht gevestigd op het feit dat de brandwerendheid tegen bezwijken van een betonconstructie geen vanzelfsprekendheid is. In veel gevallen is die eenvoudig aan te tonen.

In een aantal situaties is de kans groot dat het ontwerp op brandwerendheid maatgevend is:

- slanke constructies;
- kolommen met een hoge normaalspanning;
- hoge brandwerendheidseisen;
- voorgespannen beton.

Eenzijds legt NEN 6071 voor de materialen beton, betonstaal en voorspanstaal het effect van de temperatuurstijging op de diverse materiaaleigenschappen vast, anderzijds biedt de norm de mogelijkheid op diverse niveaus van complexiteit aan te tonen of aan de brandwerendheidseis met betrekking tot bezwijken wordt voldaan. De eenvoudigste rekenmethode leidt tot de meest conservatieve inschatting van het draagvermogen bij brand. Het hanteren van de meest complexe rekenmethode wordt beloond met de meest nauwkeurige inschatting van het draagvermogen. Toch is de 'vertaling' van de normtekst naar de ontwerpsituaties in de dagelijkse praktijk niet in alle gevallen even duidelijk. Doel van dit artikel is het gebruik van NEN 6071 te vereenvoudigen (fig. 1).

1) Voor hogere sterkteklassen zijn in CUR-Aanbeveling 95 [2] aanvullende eisen geformuleerd.



Toetsing constructie volgens NEN 6071

De eerste stap in het controleren van een constructie ingeval van brand is, hoe triviaal dit ook mag klinken, het helder vastleggen van alle relevante ontwerpuitgangspunten:

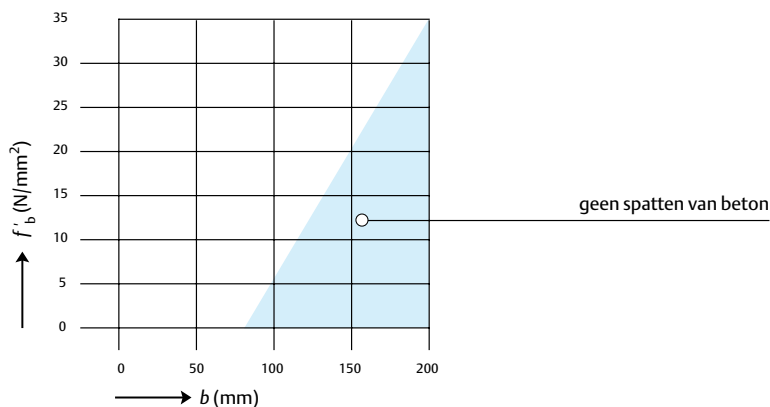
- geometrie van de constructie (afmetingen, wapening, wapeningsafstand enz.);
- materiaalgegevens (beton, betonstaal, voorspanstaal);
- vereiste brandwerendheid met betrekking tot bezwijken;
- krachtsverdeling bij kamertemperatuur;
- krachtsverdeling bij brand.

Bij het optreden van de bijzondere belastingscombinatie met daarin het belastingsgeval brand, mag volgens NEN 6702 [3] met momentane veranderlijke belastingen worden gerekend en met belastingsfactoren gelijkgesteld aan 1,0. Hierdoor zijn de optredende rekenbelastingen aanzienlijk lager dan bij de fundamentele combinaties die moeten worden gehanteerd bij het ontwerp bij kamertemperatuur.

Bij de bepaling van de krachtsverdeling tijdens brand hoeft geen rekening te worden gehouden met de krachten die ontstaan door verlengingen en krommingen ten gevolge van wijziging in temperatuur van de constructie.

Alvorens er überhaupt aan de brandwerendheid kan worden gerekend, moet worden vastgesteld of wordt voldaan aan de randvoorwaarden die aan de toepassing van NEN 6071 worden gesteld:

1 | Toetsing constructie volgens NEN 6071



2 | Toetsing op spatten

volgens NEN 6071

b is de minimale breedte van toegepaste betonelement

- de afmetingen van de betonconstructie moeten zodanig zijn dat spatten niet kan optreden (fig. 2);
- als de brandwerendheidseis met betrekking tot bezwijken 90 of 120 minuten is, worden aanvullende eisen gesteld aan de beugelafstand in kolommen en balken;
- aan de geometrie van rechthoekige kanalen in kanaalplaten worden eisen gesteld; deze aanvullende eisen zijn niet van toepassing voor de in Nederland gebruikelijke kanaalplaten met min of meer ronde kanaalvorm;
- aan de detaillering van voegen tussen met name prefab elementen worden eisen gesteld die moeten waarborgen dat geen branddoorslag kan optreden; bij deze detailleringseisen wordt onderscheid gemaakt tussen voegen die geen en die wel schuifkrachten moeten kunnen overbrengen;
- bij in één richting dragende, gewapende vloeren met twee velden moet aan aanvullende randvoorwaarden worden voldaan als met het optreden van steunpuntsmomenten rekening wordt gehouden.

De eenvoudigste toetsingsmogelijkheid die NEN 6071 biedt, is het vergelijken van de constructieafmetingen en de toegepaste wapeningsafstand²⁾ met de minimumwaarden die voor platen, balken, wanden en kolommen in bijlage A van de norm worden weergegeven. Hoewel bijlage A niet normatief is, kan deze wel worden gebruikt. De waarden in bijlage A hebben bij balken en vloeren betrekking op het toetsen van de momentcapaciteit. De toetsing op dwarskracht zal, zeker bij balken, apart moeten worden beschouwd omdat voor de beugelwapening een kleinere wapeningsafstand geldt dan voor de hoofdwapening en daardoor de temperatuur relatief snel hoog kan oplopen. Is de toegepaste afmeting en wapeningsaf-

2) Wapeningsafstand 'a' is de afstand van het zwaartepunt van een wapeningsstaaf, wapeningsbundel of het voerspanstaaf tot het dichtstbijzijnde verhitte betonoppervlak; de wapeningsafstand is een maat voor de temperatuurontwikkeling in het staal en behoort dus te worden betrokken op het staal dat in de beschouwde krachtsverdeling een rol speelt.

stand groter dan deze minimumwaarden, dan is daarmee de brandwerendheid aangetoond.

Als aan deze toets niet wordt voldaan, moet op basis van de in de constructie optredende temperaturen rekening worden gehouden met de teruglopende sterkte van beton en (voerspan-)wapening. Voor alleen op buiging belaste onderdelen (vloeren en balken) is dit een relatief eenvoudige exercitie. Voor op druk en buiging belaste onderdelen (wanden en kolommen) is dit veel lastiger. Door in die gevallen te rekenen met een fictieve gereduceerde doorsnede (betondelen met betontemperatuur $\theta_b > 500\text{ }^\circ\text{C}$ leveren geen bijdrage aan de sterkte; in de betondelen met $\theta_b \leq 500\text{ }^\circ\text{C}$ treedt geen reductie van de sterkte op) wordt het berekenen weer toegankelijk met relatief eenvoudige hulpmiddelen.

Als met het rekenen met de gereduceerde materiaaleigenschappen nog steeds de vereiste brandwerendheid niet wordt aangetoond, rest slechts een aantal opties:

1. vergroten wapeningsafstand;
2. verhogen betonsterkteklasse;
3. vergroten hoeveelheid wapening;
4. vergroten uitwendige afmetingen;
5. brandwerend bekleden betonconstructie.

Rekenvoorbeeld

Om de toetsing van een betonconstructie op basis van NEN 6071 te illustreren, wordt voor een fictieve kolomdoorsnede een controleberekening uitgevoerd.

Ontwerpuitgangspunten:

- systeemlengte kolom 3600 mm;
- geschoorde kolom;
- kolomafmeting 300 x 300 mm²;
- betonsterkteklasse C20/25;
- kolom alleen voorzien van betonstaalwapening FeB 500;
- langswapening 8Ø20 ($\omega_0 = 2,8\%$);
- wapeningsafstand 'a' hoofdwapening kolom 48 mm;
- kolom bij brand vierzijdig verhit;
- vereiste brandwerendheid met betrekking tot bezwijken 120 minuten;
- optredende belastingen bij fundamentele belastingscombinatie en bijzondere belastingscombinatie brand zijn weergegeven in figuur 3.

De enige voorwaarde in NEN 6071 die voor het berekenen van de kolom relevant is, is de controle op spatten. Bij een minimale afmeting van 300 mm bestaat geen risico op spatten. De beugelwapening zal moeten worden afgestemd op de aanvullende detailleringseisen in NEN 6071.

De meest eenvoudige toets op brandwerendheid met betrekking tot bezwijken kan worden gedaan op basis

van NEN 6071, bijlage A. Volgens bijlage A, tabel A.4 zou de minimale afmeting 400 mm moeten bedragen. Omdat de kolomafmeting hier echter niet aan voldoet, is verdere berekening noodzakelijk.

Voor de verdere berekening is het noodzakelijk inzicht te hebben in de temperatuurverdeling in de betonconstructie. Die kan op verschillende manieren worden bepaald:

- NEN 6071, 10.2.1 geeft de formules en data die benodigd zijn om volgens de wetten van de thermodynamica het temperatuurverloop in de doorsnede zelf numeriek te bepalen;
- NEN 6071, 10.2.2 en NEN-EN 1992-1-2 [4] geven voor een beperkt aantal specifieke constructieafmetingen de optredende temperatuurverdeling in de vorm van isothermen;
- NEN 6071, 10.2.2.3 geeft een drietal figuren op basis waarvan de temperatuurstijging in rechthoekige kolomdoorsneden kan worden bepaald. Deze figuren zijn echter niet goed bruikbaar bij een brandduur van 90 minuten of langer, omdat het gebied waar de temperaturen boven 500 °C stijgen, niet ondubbelzinnig is vast te leggen;
- CUR-rapport 153 [5] geeft voor rechthoekige kolommen een relatie tussen de brandduur en de optredende doorsnede-remming.

Bij berekening volgens de doorsnedereductiemethode wordt verondersteld dat die delen van de betondoor-snede waarvan de temperatuur hoger dan 500 °C is, geen bijdrage meer leveren aan het draagvermogen. Om het draagvermogen van een kolom te kunnen berekenen is het niet alleen belangrijk te weten welke delen van de betonconstructie warmer dan 500 °C zijn, maar ook de optredende temperatuur in de wapening moet bekend zijn. Daarom is het gebruik van figuren met isothermen het meest praktisch. Uit figuur 4 [4] blijkt dat de gereduceerde doorsnede cirkelvormig is met een diameter van 220 mm.

Voor de situatie brand kan de kniklengte worden gereduceerd (VBC-figuur 38):

- voor tussenverdiepingen $l_c = 0,5 \cdot l_{syst}$;
- voor de bovenste verdieping $l_c = 0,7 \cdot l_{syst}$.

Deze reductie geldt alleen als er sprake is van een horizontale brandcompartimentering. De stijfheid van de kolommen buiten het brandcompartiment is in verhouding tot de kolommen in het brandcompartiment, relatief groot en zal daardoor werken als een inklemming.

NEN 6071, 9.2.2 geeft een formule voor een vereenvoudigde bepaling van de respons van excentrisch belaste kolommen. De optredende combinatie van normaalkracht en moment wordt 'vertaald' in een centrisch aangrijpende normaalkracht:

$$N_{eq;centr;\theta;d} = N_{excentr;\theta;d} \cdot N_{centr;u;d} / N_{eq;centr;u;d}$$

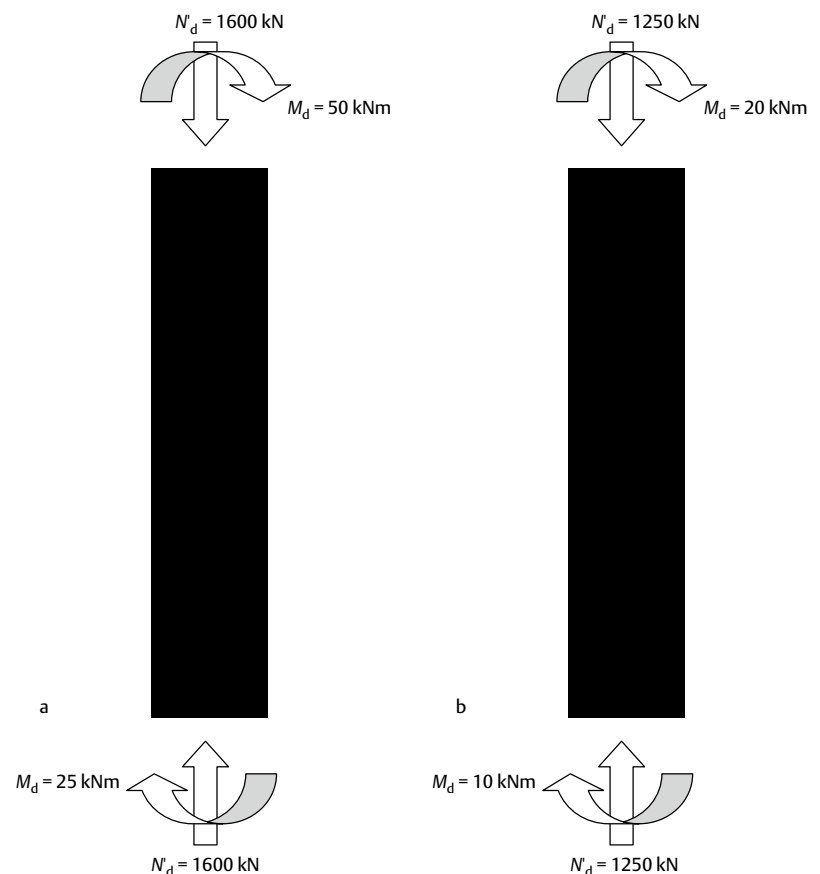
waarin:

- $N_{eq;centr;\theta;d}$ is de equivalente centrische normaalkracht bij brand;
- $N_{excentr;\theta;d}$ is de rekenwaarde van de excentrische normaalkracht zoals deze volgt uit de respons van de constructie bij brand;
- $N_{centr;u;d}$ is het draagvermogen van het centrisch belaste bouwdeel bij kamertemperatuur;
- $N_{excentr;u;d}$ is het draagvermogen van het excentrisch belaste bouwdeel bij kamertemperatuur.

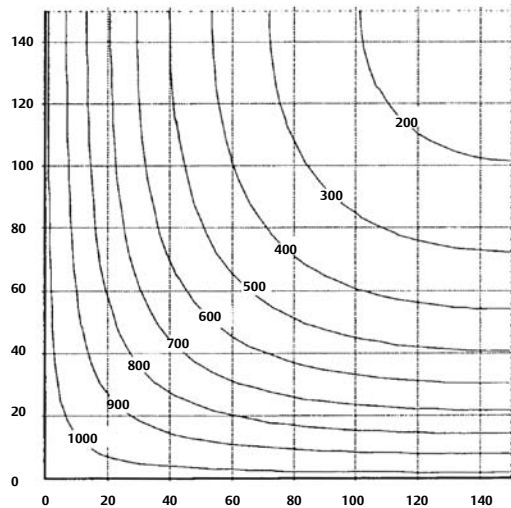
Voor het bepalen van het draagvermogen van een centrisch belaste kolom moet wel rekening worden gehouden met de in de VBC [6] voorgeschreven minimum-excentriciteit van 0,1 h. Voor de excentrisch belaste kolom kan worden berekend wat het draagvermogen is bij het maximaal optredende rekenmoment. Van deze vereenvoudiging wordt hier geen gebruikge-maakt.

Getoetst zal moeten worden of de kolom met de gereduceerde doorsnede in staat is de optredende belastingen op te nemen. In CUR-rapport 153 is een rekenmethodiek uitgewerkt waarmee een door brand verzwakte kolomdoorsnede op basis van de GTB-tabellen kan worden getoetst. In deze rekenmethode zijn zowel normaalkracht als moment eenvoudig mee te nemen.

3 | Belastingen op voorbeeldconstructie
 a. fundamentele belastingcombinatie
 b. bijzondere belastingcombinatie brand



4 | Isothermen (°C) voor een kolom 300 x 300 mm², vereiste brandwerendheid met betrekking tot bezwijken 120 minuten



De gemiddelde druksterkte van de betondoorsnede tijdens brand wordt bepaald uit:

$$f_{b;\theta;d}^* = f_b^* A_{b\theta} / A_b$$

waarin:

$f_{b;\theta;d}^*$ is de gemiddelde druksterkte van beton bij hogere temperaturen, in N/mm²;

f_b^* is de rekenwaarde van de druksterkte van beton, in N/mm²;

$A_{b\theta}$ is het oppervlak van de gereduceerde doorsnede tijdens brand op grond van de 500 °C-regel, in N/mm²;

A_b is het oppervlak van de volledige kolomdoorsnede, in N/mm².

Omdat brand niet als langdurige belasting is aan te merken en de materiaalfactor gelijk mag worden gesteld aan 1,0, geldt:

$$f_b^* = 0,85 \cdot 25 = 21,25 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{b;\theta;d}^* = f_b^* A_{b\theta} / A_b = 21,25 \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot 220^2 / 90\,000 = 9,0 \text{ N/mm}^2$$

Op basis van de gehanteerde isothermen kan worden vastgesteld dat er een verschil is in de optredende temperatuur in de hoekstaven enerzijds en de middenstaven anderzijds bij de hoofdwapeningsafstand van 48 mm. Omdat sprake is van een symmetrische verdeling is rekenen met de gemiddelde vloeigrens van 239 N/mm² verantwoord.

	hoekstaven	middenstaven
temperatuur (in °C)	620 °C	450 °C
$f_{s;\theta;d}$ (in N/mm ²)	145 N/mm ²	333 N/mm ²

Om de GTB-grafieken te kunnen gebruiken, moet de volgende correctie op de β -waarde worden uitgevoerd:

$$\beta_0 = \beta (f_{b;\theta;d}^* / f_b^*) / (f_b^* / f_{s;\theta;d}) = 1,0 \cdot (9,0 \cdot 500) / (21,25 \cdot 239) = 0,89$$

beginexcentriciteit

$$e_0 = M / N = 20 \cdot 10^6 / 1250 \cdot 10^3 = 16 \text{ mm} < 0,5 h$$

toeslagexcentriciteit

$$e_c = 3 [1,5 h + e_0 (4 \psi - 3)] (\rho l_c / 100 h)^2 = 3 [1,5 \cdot 220 + 16 (4 \cdot 1,31 - 3)] (0,5 \cdot 3600 / 100 \cdot 220)^2 = 7 \text{ mm}$$

$$\xi = 0,75$$

$$e_t = \max(0,1 h; e_0; \xi (e_0 + e_c))$$

$$= \max(0,1 \cdot 220; 16; 0,75 \cdot (16 + 7)) = 22 \text{ mm}$$

$$e_t / h = 0,10$$

$$r = \omega_0 / \beta = 2,8 / 0,89 = 3,15$$

Uit GTB-grafiek 10.3.b kan worden afgeleid (fig. 5):

$$N_{d;\theta} = 1,46 \cdot 9,0 \cdot 300 \cdot 300 \cdot 10^{-3} = 1182 \text{ kN} < 1250 \text{ kN}$$

Conclusie: de constructie is niet in staat de vereiste brandwerendheid te leveren en zal moeten worden aangepast; de beschikbare mogelijkheden:

- wapeningsafstand aanpassen (als $a = 55 \text{ mm}$ kan het vereiste draagvermogen worden bereikt);
- betonsterkteklasse verhogen naar C28/35;
- wapeningshoeveelheid opvoeren naar 3,2%;
- afmetingen aanpassen (vierkant 320 mm zou juist wel de vereiste brandwerendheid leveren);
- betonconstructie brandwerend bekleden.

In sommige gevallen kan het interessant zijn om bij het doorrekenen van de bijzondere belastingscombinatie met brand, de buigstijfheid in het compartiment met brand op basis van de optredende temperatuur in de betonconstructie te reduceren. Hierdoor zullen de doorsnedekrachten in het aan brand blootgestelde gedeelte van de constructie afnemen.

Wijzigingen door introductie Eurocode

Binnenkort zal de nationale annex bij NEN-EN 1992-1-2 - Eurocode 2 worden geïntroduceerd. Hierdoor wordt het mogelijk om op basis van de Eurocode te rekenen aan de brandwerendheid van betonconstructies. Zie hiervoor het artikel van prof.dr.ir. L. Taerwe in dit nummer van *Cement*.

In de basis wijkt NEN-EN-1992-1-2 niet wezenlijk af van NEN 6071. Ook hier worden de materiaaleigenschappen in relatie tot de optredende temperatuur gespecificeerd en worden gegevens aangedragen voor het bepalen van de temperatuurverdeling in de betonconstructie.

Waar het Bouwbesluit 2003, en daarmee ook NEN 6071, zich beperkt tot een brandwerendheidseis met betrekking tot bezwijken van maximaal 120 minuten, biedt de Eurocode rekenregels die het mogelijk maken de constructie te toetsen op een brandwerendheid tot en met 240 minuten.

Ook NEN-EN 1992-1-2 biedt evenals NEN 6071, de mogelijkheid op basis van minimale afmetingen en minimale wapeningsafstand vast te stellen of de ontworpen constructie aan de gestelde brandwerendheidseis voldoet. Waar in NEN 6071 in bijlage A voor kolommen één relatief eenvoudige tabel wordt gegeven, toont NEN-EN 1992-1-2, naast de 'eenvoudige' tabellen 5.2.a en 5.2.b, in annex C een negental

uitgebreide tabellen. Om vast te stellen of de vereiste brandwerendheid met betrekking tot bezwijken wordt gehaald, zijn als invoerparameters nodig:

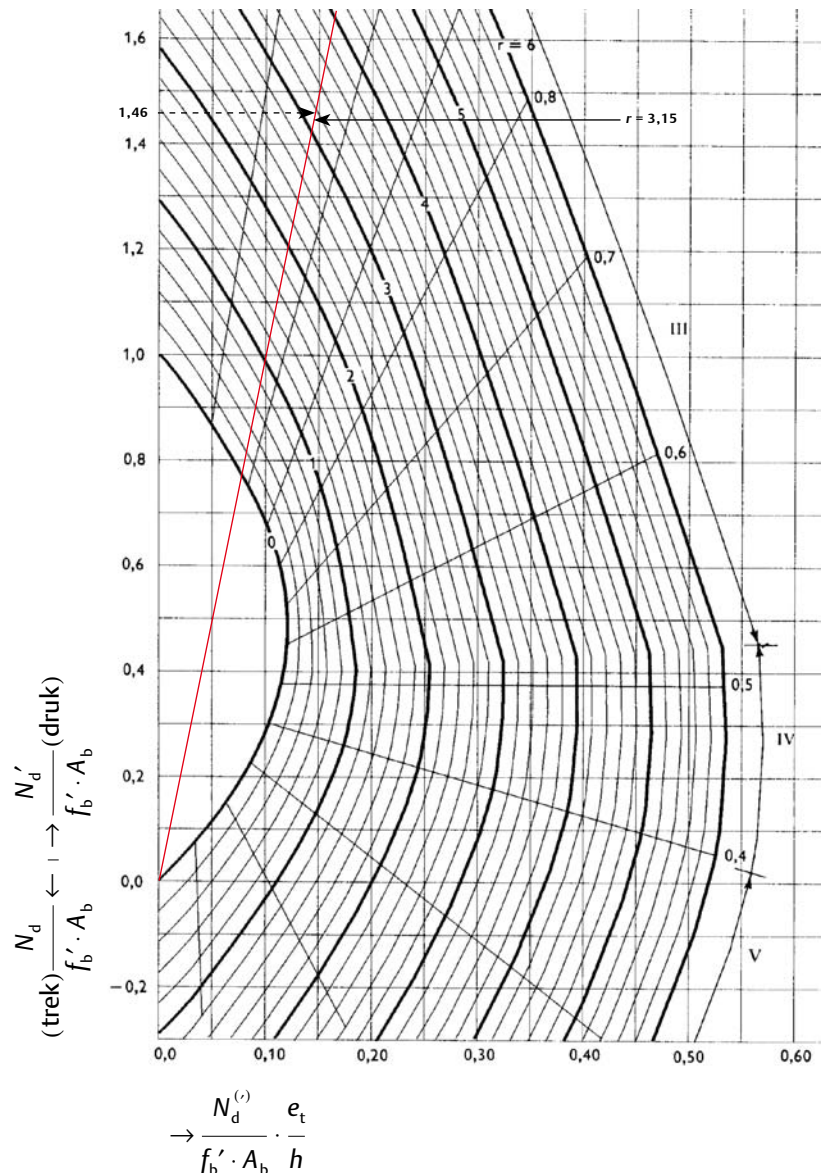
- slankheid;
- uitnuttingsgraad;
- wapeningspercentage;
- beginexcentriciteit.

NEN-EN 1992-1-2 voegt ook nog een aantal aanvullende regels toe voor hogesterktebeton.

Samenvattend kan worden gesteld dat de rekenregels voor het bepalen van de brandwerendheid van beton langzaam maar zeker meer concreet vorm hebben gekregen (foto 6). Voor de in de utiliteitsbouw gangbare constructieafmetingen zal zeker bij een lange brandduur het ontwerp bij brand bepalend kunnen zijn voor de constructieafmetingen en integraal deel van het ontwerp worden.

Literatuur

1. NEN 6071:2001 - Rekenkundige bepaling van de brandwerendheid van bouwdelen – Betonconstructies. NEN, Delft.
2. CUR-Aanbeveling 95 - Rekenkundige bepaling van de brandwerendheid van bouwdelen in hogesterktebeton. Aanvullende bepalingen op NEN 6071:2001. Gouda, 2003.
3. NEN 6702:2001 - Technische grondslagen voor bouwconstructies - TGB 1990 - Belastingen en vervormingen, met aanvullingsblad A1:2005. NEN, Delft.
4. NEN-EN 1992-1-2 - Eurocode 2 - Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-2: Algemene regels - Ontwerp en berekening van constructies bij brand. NEN, Delft, april 2005.
5. CUR-rapport 153 - Brandwerendheid van betonconstructies - Deel 2: Rekenkundige bepaling en vervormingen. Gouda, 1994.
6. NEN 6720:1995 - Voorschriften Beton - TGB 1990 - Constructieve eisen en rekenmethoden, met aanvullingsblad A3:2004 en correctieblad C1:2005. NEN, Delft.
7. CUR-rapport 149 - Brandwerendheid van betonconstructies - Deel 1: Uitgangspunten en gegevens voor een rekenkundige beoordeling. Gouda, 1991.



5 | GTB-grafiek 10.3.b: lijn door 0,0-0,0 en 1,0-0,10 snijdt kromme $r = 3,15$ in $N'_d / f'_b A_b = 1,46$

6 | Brandwerendheid tegen bezwijken is in veel gevallen aantoonbaar