Op 1 oktober jl. is het Bouwbesluit van kracht geworden, waardoor voor het eerst eisen en bepalingsmethoden voor de brandwerendheid eenduidig zijn vastgelegd. Brand is daardoor een belastinggeval geworden, waarmee de constructeur bij de aanvraag voor een bouwvergunning rekening moet houden. De rekenkundige bepaling van de brandwerendheid van staalconstructies blijkt betrekkelijk eenvoudig te zijn.

Brandwerendheid van staalconstructies

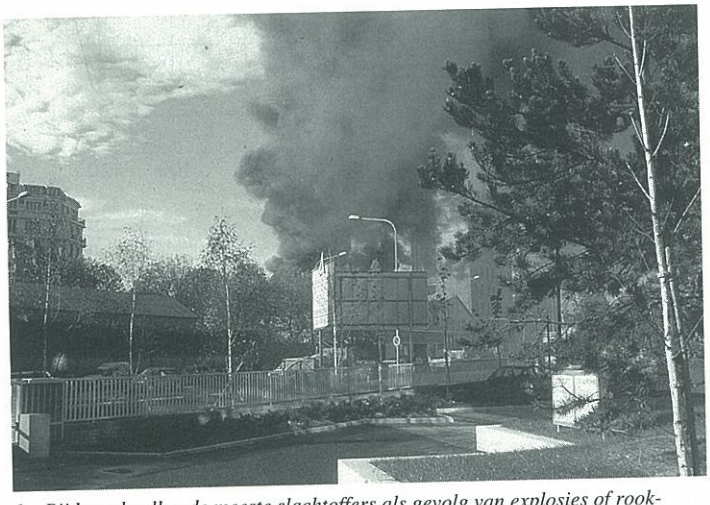
Berekeningsmethode volgens NEN 6072

dr.ir. A.F.Hamerlinck
Project Analyse Bureau, Rotterdam

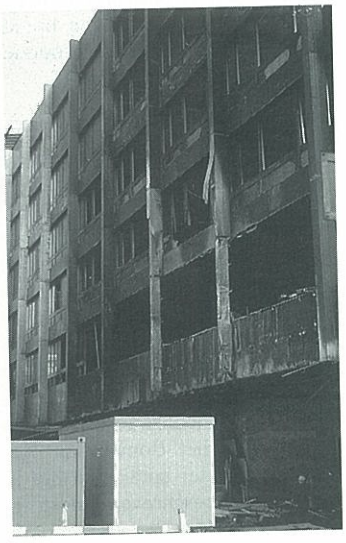
ir. L. Twilt
TNO-Bouw, Centrum voor Brandveiligheid, Rijswijk

Inleiding

De benadering van het gedrag van staalconstructies bij brand is tot op de dag van vandaag niet geheel vrij van emoties. Iedereen kent de beelden van afgebrande industriehallen en landbouwloodsen: rokende puinhopen met tot spaghetti-slierten verwrongen stalen profielen. De nieuwslezer verklaart meestal dat er geen slachtoffers zijn te betreuren, hetgeen een geluk bij een ongeluk lijkt. Maar zo toevallig is dat niet, omdat bij brand de aanwezige personen gemakkelijk en snel kunnen vluchten bij dergelijke gebouwen. Als er al slachtoffers vallen, is dat zelden het gevolg van instorting, maar vaker van explosie of rook (*afb. 1*).



1. Bij brand vallen de meeste slachtoffers als gevolg van explosies of rookontwikkeling en niet door door het instorten van de constructie.



2. Geblakerd kantoorgebouw in Wenen na brand. De staalconstructie is nog volledig intact omdat deze voldoende brandwerend is uitgevoerd.

Het heeft daarom weinig zin bij hallen en loodsen eisen te stellen aan de constructieve veiligheid bij brand; dat verhoogt de veiligheid voor mensen niet en verlaagt ook de brandschade niet. De brandschade wordt voornamelijk bepaald door de aard van de gebouwinhoud en is vrijwel onafhankelijk van het constructiemateriaal. Na brand volgt vrijwel altijd sloop, ongeacht het bouwmateriaal en de brandwerendheid van de constructie. Extra kosten om de brandwerendheid te verhogen zijn daarom kapitaalvernietiging. Effectiever is het deze gebouwen te compartimenteren of een sprinklerinstallatie aan te leggen.

Bij verdiepinggebouwen – zoals kantoren, hotels en ziekenhuizen – hanteert men echter bij brand een geheel andere veiligheidsfilosofie. Omdat het moeilijker is snel uit gebouwen met meer verdiepingen te vluchten, is het hier wel noodzakelijk eisen te stellen aan de constructieve veiligheid bij brand. Daartoe beschikt de ontwerper over vele technische en praktische oplossingen. In ons land heerst bij velen nog de onterechte gedachte – gevoed door beelden van brandende, ingestorte loodsen – dat staal en brandveiligheid niet samen gaan. De talloze verdiepinggebouwen met een staalskelet in het buitenland bewijzen het tegendeel. Natuurlijk ontstaat ook in deze gebouwen wel eens brand. Bezweken of verwrongen staalconstructies zijn dan vrijwel nooit te zien, omdat deze constructies voldoende brandwerend zijn uitgevoerd (*afb. 2*).

Rationele benadering

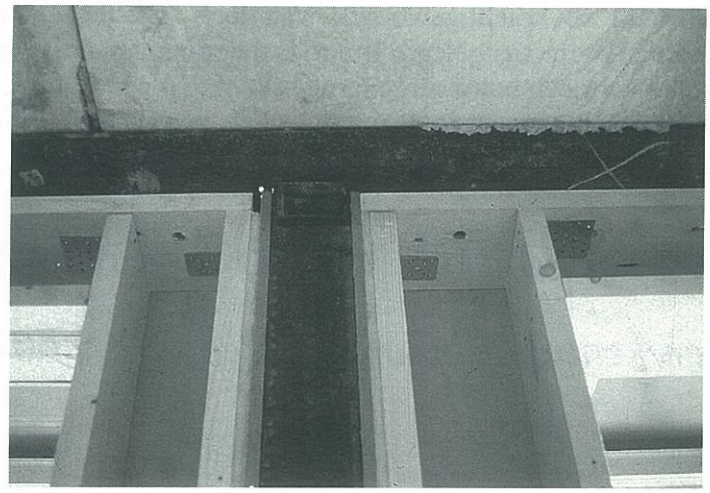
Inmiddels is in Nederland de weg vrijgemaakt voor een meer rationele benadering van de constructieve veiligheid bij brand. Het Bouwbesluit dat met ingang van 1 oktober 1992 van kracht is geworden, geeft een eenduidig pakket van eisen en bepalingsmethoden [1]. Daardoor komt een einde aan de, in sommige gevallen grote, plaatselijke verschillen in de gemeentelijke eisen. Het Bouwbesluit geeft ook voor het eerst de mogelijkheid de brandwerendheid van (staal)constructies rekenkundig te bepalen volgens een wettelijk erkende norm. Het is nu veel eenvoudiger aan-

toonbaar dat ook met staalconstructies elke geëiste brandwerendheid te bereiken is. Uiteraard zal dit in vele gevallen niet met een onbeschermde staalconstructie mogelijk zijn. Om te voldoen aan de gestelde prestatieeisen kan de ontwerper kiezen uit:
- het aanbrengen van een isolerende bekleding;
- een uitvoering als staal-betonconstructie;
- zorgen voor een bouwkundige integratie.

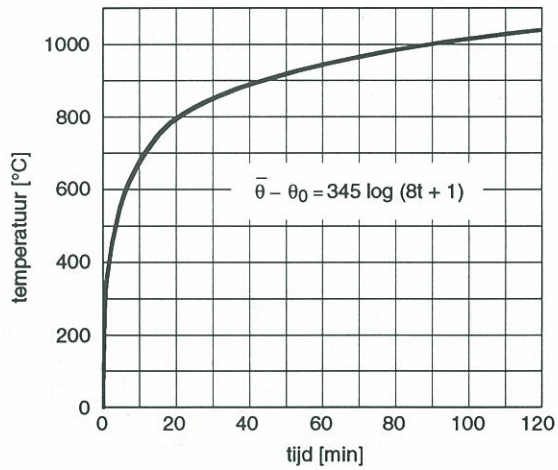
De beschikbare technieken en de nieuwe normen maken het mogelijk de brandwerendheid van staalconstructies op een rationele wijze te bepalen. Brand is nu een apart belastinggeval geworden, waarmee de constructeur rekening moet houden bij de dimensionering [2]. Bij de keuze voor een bepaalde constructie dienen uiteraard de eventuele kosten van brandwerende voorzieningen in de prijsvergelijking meegenomen te worden. Optimaal daarbij is de brandwerendheidseis integraal in het (constructief) ontwerpproces mee te nemen (*afb. 3*). Dit leidt in een groot aantal gevallen tot een kostenbesparing in vergelijking met de huidige gegroeide situatie, waarbij de constructie bij kamertemperatuur is ontworpen en pas daarna in overleg met de brandweer de brandwerende voorzieningen worden 'toegevoegd'.

Dit artikel beschrijft voor de constructeur de berekeningsmethode volgens NEN 6072 [3], toegelicht met twee rekenvoorbeelden. NEN 6072 vertoont grote gelijkenis met Eurocode 3 [4], waardoor de toekomstige invoering van de Eurocodes in Nederland op dit punt vrij probleemloos zal verlopen. Alvorens in te gaan op de berekening van de brandwerendheid van staalconstructies, komen eerst de in het Bouwbesluit gestelde eisen ter sprake èn het in NEN 6702 beschreven belastinggeval brand.
De officiële normteksten spreken steeds van de 'brandwerendheid met betrekking tot bezwijken'. Deze benaming wordt in dit artikel verkort weergegeven als de 'brandwerendheid'.

Brandwerendheidseisen
Het Bouwbesluit stelt per gebouwcategorie eisen aan de brandveiligheid van gebouwen. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen de volgende drie soorten bouwwerken:
a. tot bewoning bestemde gebouwen (woningen, woongebouwen);
b. niet tot bewoning bestemde gebouwen (bijvoorbeeld kantoren, hotels en ziekenhuizen);
c. bouwwerken, geen gebouw zijnde (bijvoorbeeld tunnels, bruggen en masten).



3. Bouwkundige integratie van de draag- en afbouwconstructie is een mogelijkheid om voldoende brandwerendheid te verkrijgen en leidt veelal tot een kostenbesparing.

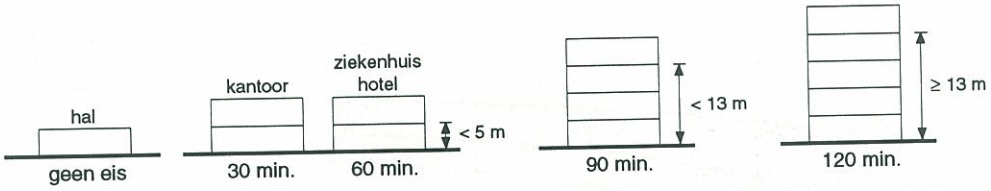


4. De standaardbrandkromme beschrijft het veronderstelde verloop van de temperatuur in de tijd.

Het onderdeel constructieve veiligheid van het Bouwbesluit beschrijft de eisen, die aan de brandwerendheid van constructiedelen worden gesteld. De brandwerendheid is daarin gedefinieerd als 'de tijd gedurende welke een constructie-onderdeel bij verhitting volgens de standaardbrand weerstand kan bieden aan de erop werkende belasting'. De standaardbrandkromme beschrijft het veronderstelde verloop van de temperatuur in de tijd (*afb. 4*).
Voor elke gebouwsoort wordt onderscheid gemaakt tussen eisen waaraan bij nieuwbouw moet zijn voldaan, en eisen geldend voor bestaande gebouwen. Voor bouwwerken, geen gebouw zijnde, wordt volstaan met functionele eisen. De concrete invulling wordt daarmee overgelaten aan de gemeenten. Voor de overige bouwwerken (*a* en *b*) worden eenduidige prestatie-eisen gesteld aan de brandwerendheid met betrekking tot bezwijken.

Hoofddraagconstructie
Als basis geldt een eis van 20 minuten brandwerendheid voor vloeren en trappen; 30 minuten wordt geëist voor constructiedelen, waarbij bezwijken leidt tot het onbruikbaar worden van een vluchtmogelijkheid. Daarnaast kunnen eisen worden gesteld aan onderdelen van de constructie die bij bezwijken aanleiding geven tot voortschrijdende instorting. Men spreekt in dit verband van de 'hoofddraagconstructie'. Voortschrijdende instorting wordt geacht op te treden, indien bezwijken van een constructieonderdeel aanleiding geeft tot bezwijken van onderdelen van het gebouw die zich niet bevinden in de directe omgeving van het beschouwde onderdeel, èn indien de draagkracht van de resterende constructie onvoldoende is om de optredende belasting te dragen. Om vast te stellen of een constructie-onderdeel al dan niet tot de hoofddraagconstructie behoort, moet worden beoordeeld wat het effect van het bezwijken is op de omringende constructiedelen.
De consequenties van voortschrijdende instorting zijn in het algemeen ernstiger naarmate het gebouw hoger is. Bovendien wordt het gedrag van de hoofddraagconstructie gecompliceerder bij toenemende gebouwhoogten, zeker onder brandomstandigheden. Daarom worden de brandwerendheidseisen op bezwijken van de hoofddraagconstructie verhoogd bij toenemende gebouwhoogte.

■ *Niet tot bewoning bestemd gebouw.* Voor de hoofddraagconstructie van een dergelijk gebouw, waarin zich geen verblijfsgebieden bevinden met een vloer hoger dan 5 m boven het aansluitende terrein (gemeten ter plaatse van de hoofdingang), geldt een eis van 60 minuten brandwerendheid. Voorwaarde is echter dat het gebouw mede bestemd is voor overnachting. Voorbeelden van dergelijke gebouwen zijn ziekenhuizen en hotels.
Scholen en kantoren zijn in het algemeen niet bestemd voor overnachting; hiervoor geldt dus geen brandwerendheidseis voor de hoofddraagconstructie, indien althans aan de genoemde hoogtevoorwaarde wordt voldaan. Ook voor hallen, bestaande uit slechts één bouwlaag, geldt voor de hoofddraagconstructie als zodanig geen brandwerendheidseis. In verband met het veilig ontvluchten en het voorkomen van branduitbreiding naar andere gebouwen, kunnen overigens toch brandwerendheidseisen worden gesteld.
Voor niet tot bewoning bestemde gebouwen waarvan de genoemde vloerhoogte ligt tussen 5 en 13 m, geldt een eis van 90 minuten voor de hoofddraagconstructie. Ligt de bovenste vloer hoger dan 13 m, dan bedraagt de eis 120 minuten.
Afhankelijk van de permanente vuurbelasting kunnen de eisen voor de hoofddraagconstructie worden verlaagd. De vuurbelasting van een gebouw is de hoeveelheid warmte per eenheid van *grond*oppervlakte, die vrijkomt bij de volledige verbranding van alle in het gebouw aanwezige brandbare materialen. Onder de permanente vuurbelasting verstaat men de som van de bijdragen van



5. Brandwerendheidseisen voor de hoofddraagconstructie van niet tot bewoning bestemde gebouwen.

de materialen die deel uitmaken van de vergunningsplichtige onderdelen van het gebouw. Uit het feit dat bijvoorbeeld niet-dragende scheidingswanden niet vergunningsplichtig zijn, volgt dat deze geen deel uitmaken van de permanente vuurbelasting. De brandwerendheidseis van de hoofddraagconstructie is 30 minuten lager, indien de permanente vuurbelasting verwaarloosbaar is: 100 MJ/m^2, ofwel 5 kg vurehout/m^2. De achterliggende gedachte is dat onder deze omstandigheden de totale vuurbelasting – en daarmee de brandduur – relatief gering is.
Genoemde eisen zijn in *afbeelding 5* samengevat voor de hoofddraagconstructie van nieuwbouw van niet tot bewoning bestemde gebouwen.

■ *Tot bewoning bestemde gebouwen.* Voor deze gebouwen gelden soortgelijke eisen. De hoogte van de gestelde eisen voor nieuwbouw stemt globaal overeen met de in het verleden gegroeide praktijk.

■ *Bestaande gebouwen.* De eisen voor bestaande gebouwen zijn geregeld bij Ministeriële Regeling [6]. In het algemeen gelden lagere eisen dan bij nieuwbouw.

Bijzondere belastinggeval brand

Componentbenadering
De brandwerendheid met betrekking tot bezwijken slaat op constructie-onderdelen en niet op de constructie als geheel. Er is dus sprake van een componentbenadering en niet van een systeembenadering. Tot voor kort was de componentbenadering de enige praktische mogelijkheid, gelet op de beperkte afmetingen van de brandoven bij de experimentele bepaling van de brandwerendheid. Met de introductie van rekenkundige bepalingsmethoden in het Bouwbesluit, is het in beginsel mogelijk het gedrag van gehele constructies bij brand te analyseren. Een dergelijke benadering is op dit moment helaas nog niet geschikt voor de dagelijkse constructeurspraktijk vanwege de benodigde expertise en computerfaciliteiten. Daarom gaat het Bouwbesluit nog steeds uit van de componentbenadering.

Thermische belasting
De thermische belasting omvat alle effecten die de warmtestroom naar het constructie-onderdeel bepalen: uiteraard de standaardbrandkromme (*afb. 4*), maar ook andere warmte-overdrachtsparameters die de straling en de convectie beïnvloeden. Bedacht moet worden dat de omstandigheden van een standaardbrand belangrijk kunnen afwijken van de werkelijke situatie bij brand. De standaardbrand heeft dan ook veeleer een conventionele, rekenkundige betekenis dan een fysische.
Het werkelijke gedrag van een brand wordt nauwkeuriger beschreven met een zogeheten natuurlijke brand. Eurocode 1 biedt de mogelijkheid hiermee te rekenen. Deze optie is met name voor staalconstructies interessant. Op natuurlijke branden zal in een vervolgartikel nader worden ingegaan.

Mechanische belasting
NEN 6702, art. 6.4.2.2, beschouwt brand als een bijzondere belastingcombinatie, waarbij de belastingfactoren γ gelijk aan 1 worden gesteld. De bijzondere belasting F is 0. De belasting bij de bijzondere belastingcombinatie brand is dan:

$$G + \Sigma\, \psi Q \qquad (1)$$

Hierin is:
G permanente belasting;
Q veranderlijke belasting;
ψ factor, die de verhouding aangeeft tussen de momentane en de extreme waarden van de veranderlijke belasting. Deze factor hangt af van de aard van het contructie-onderdeel en van de functie van het gebouw. De momentane veranderlijke vloerbelasting is bij kantoor-, onderwijs- en gezondheidszorggebouwen 0,5 maal de extreme waarde (ψ = 0,5). Op stabiliserende elementen moet bovendien worden gerekend op 20% van de extreme windbelasting (ψ = 0,2).

Begrippen

■ *Standaardbrandkromme*: het gestandaardiseerde tijdsafhankelijke verloop van de temperatuur in de brandruimte, zoals weergegeven in *afbeelding 4*, met $\theta - \theta_o$ = gemiddelde temperatuurstijging in °C en t = tijd in minuten.

■ *Profielfactor P*: factor met als eenheid m^{-1}, die de invloed van de geometrie van het staalprofiel op de opwarming in rekening brengt. De profielfactor is gedefinieerd als de aan verhitting blootgestelde oppervlakte O (m^2/m) gedeeld door het volume van het staalprofiel A (m^3/m). Bij beklede profielen is O de binnenoppervlakte van de bekleding. In de praktijk bepaalt men P door de aan brand blootgestelde omtrek te delen door de oppervlakte van de doorsnede van het profiel. Hoe hoger P, des te sneller het profiel opwarmt.

■ *Vloeigrens staal bij brand*: bij hoge temperatuur (θ > 400 °C) neemt de vloeigrens van staal af. Het verband tussen de vloeigrens bij temperatuur θ en die bij kamertemperatuur, luidt in formulevorm (*afb. 6*):

$$\psi = 1 \qquad \theta \leq 400\ ^\circ\mathrm{C} \qquad (2a)$$

$$\psi = \frac{f_{y,\theta}}{f_{y,20}} = \frac{1{,}03}{(e^{\beta} + 1)^{0{,}26}}$$

$$\theta > 400\ ^\circ\mathrm{C} \qquad (2b)$$

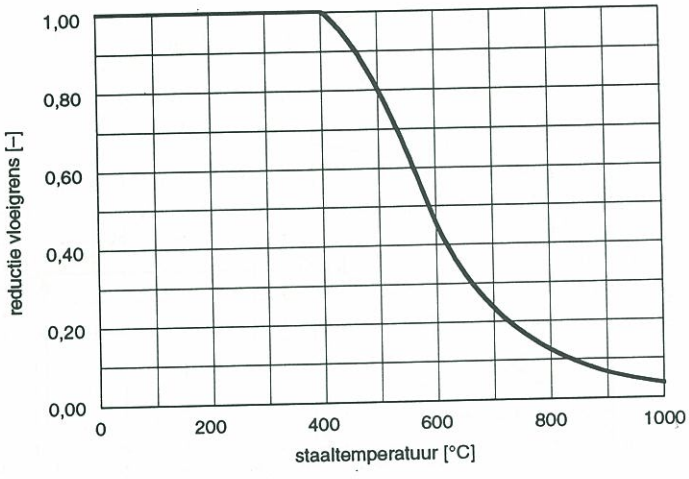
$$\beta = \frac{\theta_a - 482}{39{,}2} \qquad (2c)$$

Hierin is:
$f_{y,\theta}$ vloeigrens bij een staaltemperatuur θ_a;
$f_{y,20}$ vloeigrens bij kamertemperatuur;
ψ temperatuursafhankelijke correctiefactor op de vloeigrens, niet te verwarren met de in (1) gebruikte combinatiefactor voor de veranderlijke belasting ψ.
θ_a staaltemperatuur.

■ *Belastinggraad* η: de optredende belasting bij brand volgens de bijzondere belastingcombinatie in (1), gedeeld door de bij kamertemperatuur maximaal opneembare belasting. Deze belasting moet ten minste gelijk zijn aan de belastingen bij kamertemperatuur conform de optredende fundamentele belastingcombinaties volgens NEN 6702.
Neem als voorbeeld een vloerligger in een kantoorgebouw met ψ = 0,5, belast door een permanente belasting G en een veranderlijke belasting Q. Indien de ligger op sterkte is gedimensioneerd en bij kamertemperatuur juist voldoet, is de uitdrukking voor h:

$$\eta = \frac{G - 0{,}5Q}{1{,}2G + 1{,}5Q} \qquad (3)$$

Hierbij zijn de partiële belastingsfactoren gehanteerd conform NEN 6702: 1,2 voor permanente en 1,5 voor veranderlijke belasting. Afhankelijk van de verhouding tussen de permanente en de veranderlijke belasting varieert de belastinggraad in de praktijk tussen 0,56 (G = Q) en 0,64 (G =



6. Afname van de vloeigrens van staal bij hoge temperaturen (of de afname van de kritieke staaltemperatuur bij een toenemende belastinggraad).

2Q). Formule (3) is in *afbeelding 7* grafisch weergegeven voor verschillende waarden van ψ.
Voor kolommen in geschoorde raamwerken met n bouwlagen, geldt als bovengrens voor de belastinggraad:

$$\eta = \frac{G + 0{,}5Q}{1{,}2G + 0{,}75Q(1 + \frac{1}{n})} \qquad (4)$$

Opgemerkt wordt dat de belastinggraad in de praktijk veelal een orde 0,5 of minder is dan uit (3) of (4) volgt. Vaak is er nog extra capaciteit aanwezig, bijvoorbeeld doordat bij liggers het doorbuigingscriterium maatgevend is, of dat bij brand kan worden gerekend met een geringere kniklengte van de kolommen.

■ *Kritieke staaltemperatuur* θ_{kr}: de staaltemperatuur, waarbij bezwijken optreedt. Indien de belastinggraad bekend is, is tevens bekend bij welke temperatuur bezwijken optreedt. Er kan worden aangetoond dat de belastingsgraad η bij bezwijken gelijk is aan de correctiefactor op de vloeigrens van staal ψ, zie (2). Uit *afbeelding 6* is direct de kritieke temperatuur te bepalen. Voor bijvoorbeeld $\eta = \psi = 0{,}46$ is af te lezen: $\theta_{kr} = 600$ °C.

Berekeningsmethode

De berekeningsmethode in NEN 6072 is van toepassing op onbeklede en beklede lijnvormige constructiedelen van staal. De methode is gebaseerd op de plasticiteitstheorie en als zodanig alleen geldig voor profielen uit de klasse 1. Hiertoe behoren alle gebruikelijke walsliggers en kokerprofielen. Uitgangspunt is verder een gelijkmatige opwarming van het profiel tijdens brand, zowel over de doorsnede als in lengterichting. Voor vierzijdig verhitte profielen wordt hieraan voldaan. Voor driezijdig verhitte liggers wordt een correctiefactor gegeven om het gunstige effect van de lagere temperatuur van de bovenflens in rekening te brengen.
Voor één- en tweezijdig verhitte profielen, zoals bijvoorbeeld bij geïntegreerde liggers het geval is, zijn nog geen correctiefactoren beschikbaar en is de methode in principe niet toepasbaar. In dat geval bepaalt men de brandwerendheid uit proeven of met een geavanceerd rekenmodel. Momenteel wordt gewerkt aan rekenregels voor dergelijke profielen.
Voor staal-betonconstructies zijn geen normen beschikbaar, die door het Bouwbesluit worden aangewezen. Een aantal CS/CUR/SG-rapporten geeft rekenmethoden voor de bepaling van de brandwerendheid van staal-betonkolommen en staalplaat-betonvloeren [7, 8]. Een beroep op het gelijkwaardigheidsbeginsel is hier alleszins verantwoord.
De berekeningsmethode voor staalconstructies bestaat uit drie onderdelen, namelijk: de berekening van de kritieke temperatuur θ_{kr} als functie van de belastingsgraad, de berekening van de staaltemperatuur θ_a als functie van de tijd en de bepaling van de brandwerendheid als de tijd, waarvoor $\theta_a = \theta_{kr}$ (*afb. 8*).
In de praktijk zal het meestal niet gaan om een berekening van de brandwerendheid, maar een toetsing aan de gestelde eis (t = 30, 60, 90 of 120 minuten). De aanpak bestaat dan in principe uit dezelfde drie onderdelen:
- berekening van de kritieke temperatuur θ_{kr}, als functie van de belastinggraad;
- berekening van de staaltemperatuur θ_a na t minuten;
- toetsing van de brandwerendheid: $\theta_a \leq \theta_{kr}$.

De berekeningsgang in de drie onderdelen bestaat in totaal uit acht stappen (*afb. 9*).

Berekening van de kritieke temperatuur θ_{kr}

① Bepaal de belasting op de constructie bij brand q_θ.
② Bepaal de maximaal opneembare belasting bij kamertemperatuur q_{20}.
③ Bepaal de belastingsgraad:

$$\eta = \frac{q_\theta}{q_{20}} \qquad (5)$$

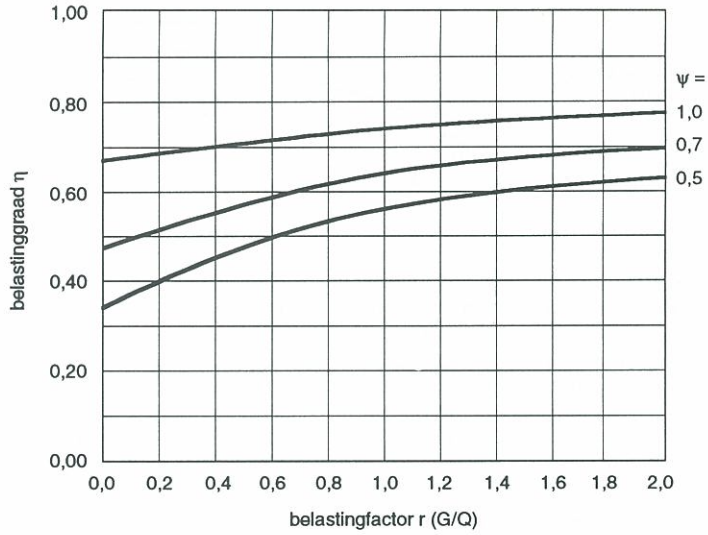
Als veilige benadering voor onder meer kantoorgebouwen zijn (3) en (4) te gebruiken.
④ Bepaal de correctiefactor κ, die afhangt van de wijze van belasten en de wijze van verhitten. κ is ingevoerd om de berekeningsresultaten beter te laten aansluiten met proefresultaten. Voor driezijdig verhitte liggers geldt $\kappa = 0{,}7$ (statisch bepaald) of $\kappa = 0{,}6$ (statisch onbepaald); voor kolommen geldt $\kappa = 1{,}2$. Voor de overige constructie-elementen geldt $\kappa = 1{,}0$.
⑤ Bepaal de kritieke temperatuur θ_{kr} ($\theta_{kr} \geq 400$°C), zie ook *afbeelding 6*:

$$\theta_{kr} = 39{,}19 \cdot \ln\left[\frac{1}{0{,}8925\,(\kappa \cdot \eta)^{3{,}846}} - 1\right] + 482$$

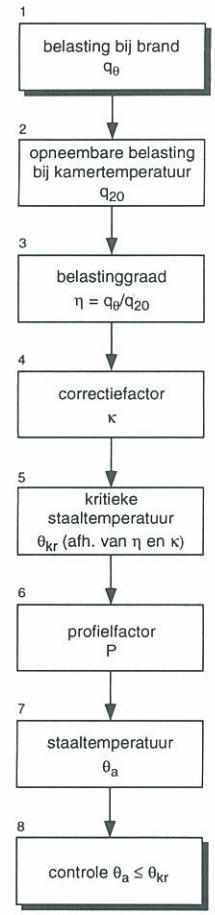
Deze formule komt tot stand door (2) om te schrijven, met $\psi = \kappa \bullet \eta$ en $\theta_a = \theta_{kr}$.

Berekening van de staaltemperatuur θ_a

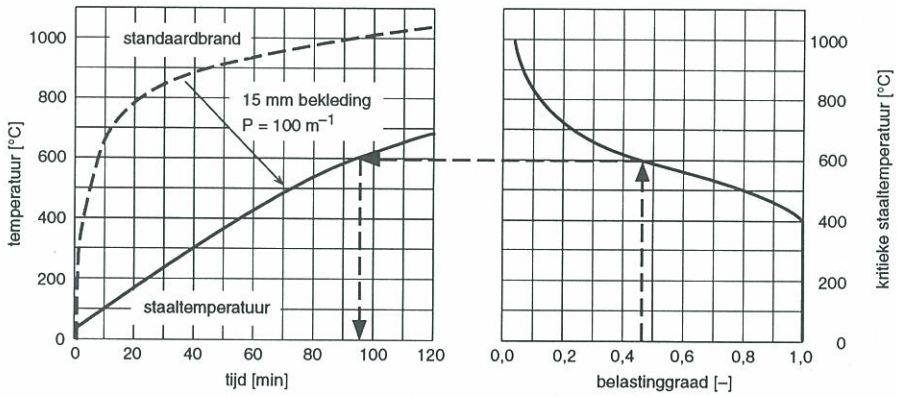
⑥ Bepaal de profielfactor P, die afhangt van de wijze van verhitting (drie- of vierzijdig) en het type bekledingsmateriaal. Bij een profielvolgende bekleding is P gelijk aan de profielfactor van het onbeklede profiel; voor met platen beklede profielen is P kleiner, omdat het verhitte oppervlak geringer is. Voor de meest gang-



7. Verband tussen de belastinggraad η van liggers en de verhouding tussen de permanente en de veranderlijke belasting G/Q voor verschillende waarden van ψ.



9. Stroomschema voor de toetsing van de brandwerendheid van staalconstructies in acht stappen.



8. Grafische bepaling van de brandwerendheid van staalconstructies.

bare I- en H-profielen is de profielfactor in tabellen weergegeven [5]. Voor kokerprofielen is P gelijk aan , waarin t de wanddikte is.

⑦ Bepaal de staaltemperatuur θ_a voor de geëiste brandwerendheid. Bij onbeklede profielen bepaalt de profielfactor P de temperatuurontwikkeling in het staalprofiel, naast de in NEN 6072 voorgeschreven materiaaleigenschappen van staal (specifieke warmte c en volumieke massa ρ) en de warmte-overdrachtsparameters (standaardbrandkromme, emissiefactor ε en convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt α). Bij beklede staalprofielen zijn verder de dikte en de materiaaleigenschappen van het bekledingsmateriaal van belang.

De bepaling van θ_a berust op een tijdstapmethode, waar hier niet verder op wordt ingegaan; berekening met de hand is niet goed mogelijk. Met een computerprogramma als Brawesta [9] is de temperatuur wel eenvoudig te berekenen.

Toetsing van de brandwerendheid

⑧ Controleer of $\theta_a \leq \theta_{kr}$.

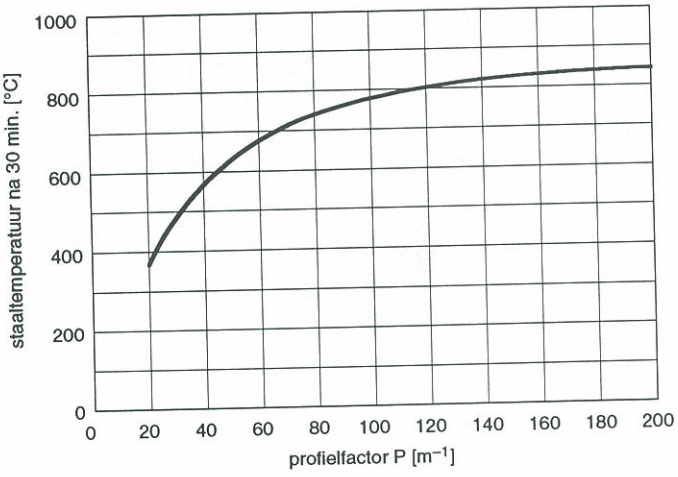
Computerberekeningen volgens NEN 6072 tonen het in *afbeelding 10* gegeven verband tussen de profielfactor en de staaltemperatuur θ_a van een onbeschermd profiel na 30 minuten brand. Indien de kritieke temperatuur 600 °C bedraagt, corresponderend met een belastinggraad 0,46 (zie *afb. 6*), blijkt dat een profielfactor kleiner dan 45 m^{-1} nodig is om een brandwerendheid van 30 minuten te bereiken. Bij de gangbare wals- en kokerprofielen is P meestal hoger dan 100 en voor IPE-profielen zelfs hoger dan 200, waardoor een brandwerendheid van 30 minuten doorgaans niet haalbaar is.

In de meeste gevallen is dus een brandwerende voorziening (isolerende bekleding of een staalbetonconstructie) noodzakelijk om een brandwerendheid van 30 minuten te verkrijgen. Door bijvoorbeeld een isolerende bekleding in de vorm van een plaat, spuitpleister of opschuimende laag ('verf') aan te brengen, vertraagt de warmtestroom naar het staalprofiel en duurt het langer voor de kritieke staaltemperatuur wordt bereikt.

Praktische uitwerking voor beklede staalconstructies

De nieuwste versie van het computerprogramma Brawesta biedt de mogelijkheid snel en nauwkeurig een TNO-geautoriseerde berekening van de brandwerendheid te maken. Deze berekening maakt gebruik van materiaaleigenschappen van isolatiematerialen die in erkende laboratoria zijn bepaald met proeven.

Het is ook mogelijk met een eenvoudige handberekening een indruk te krijgen van de benodigde bekledingsdikte. Daartoe wordt gebruik gemaakt van de conservatieve waarden van de materiaaleigenschappen volgens *tabel 1*. Deze methode is niet normatief, maar geeft een veilige benadering van de bekledingsdikte.



10. Verband tussen de profielfactor P en staaltemperatuur q_a van een onbeschermd profiel na 30 minuten brand.

Afhankelijk van de kritieke temperatuur, de brandwerendheidseis en de profielfactor is met de grafieken in *afbeelding 11* een isolatiemateriaal met een bepaalde dikte en materiaaleigenschappen te kiezen. De benodigde warmteweerstand R (d/λ) is af te lezen voor een geëiste brandwerendheid en kritieke temperatuur (stappen 1-5) èn de gegeven profielfactor (stap 6). De relatief bewerkelijke stap 7 (de berekening van de staaltemperatuur) is door het gebruik van de grafieken niet nodig. In de grafieken is echter de invloed van de warmtecapaciteit en het vochtgehalte van het bekledingsmateriaal niet verwerkt, zodat de benadering een veilige is.

De gegeven rekenmethode is voor twee gevallen uitgewerkt, zie de rekenvoorbeelden in de omkaderde tekst.

Kniklengtereductie kolommen

Kolommen in geschoorde raamwerken hebben, onder bepaalde voorwaarden, in geval van brand een gereduceerde kniklengte. Dit heeft te maken met het feit dat de kolommen star zijn ingeklemd, indien de aansluitende kolom zich in een ander brandcompartiment bevindt, hetgeen meestal het geval is, en de brand beperkt blijft tot de betreffende bouwlaag. *Afbeelding 12* toont dat de kniklengte onder deze voorwaarden mag worden gereduceerd tot 0,7 maal de systeemlengte voor de bovenste kolom en 0,5 maal de systeemlengte voor de overige kolommen.

De reductie geldt zowel voor doorgaande kolommen als voor kolommen die met een kop- en voetplaatverbinding zijn verbonden. De stijfheid van deze verbinding aan een achterliggend, niet-verhit constructiedeel is groot ten opzichte van een kolom die door de hitte slapper is geworden. Om dezelfde reden kan de voetplaatverbinding van een kolom op de begane grond als een inklemming worden beschouwd. Voorwaarde is dat er geen al te grote excentriciteiten optreden; dit is bij kolommen in een geschoord raamwerk doorgaans het geval. De rotatie van de voetplaat is immers verwaarloosbaar ten opzichte van de bij brand optredende kolomvervormingen, omdat de oplegspanningen onder de voetplaat uitsluitend drukspanningen zijn.

Indien de kniklengte wordt gereduceerd, is de belastinggraad η gedefinieerd als de bij brand optredende belasting gedeeld door de maximaal opneembare belasting bij kamertemperatuur van de kolom met een gereduceerde kniklengte.

De reductie van de kniklengte bij brand reduceert de belastinggraad met 10 tot 50% bij centrisch belaste kolommen met een relatieve slankheid tussen 0,5 en 1,4. Dit is het geval bij de gebruikelijke breedflensprofielen tot 300 mm en kokers tot 200 mm met een staalkwaliteit van FeE 235–355 N/mm² en een verdiepinghoogte van 3,5 m).

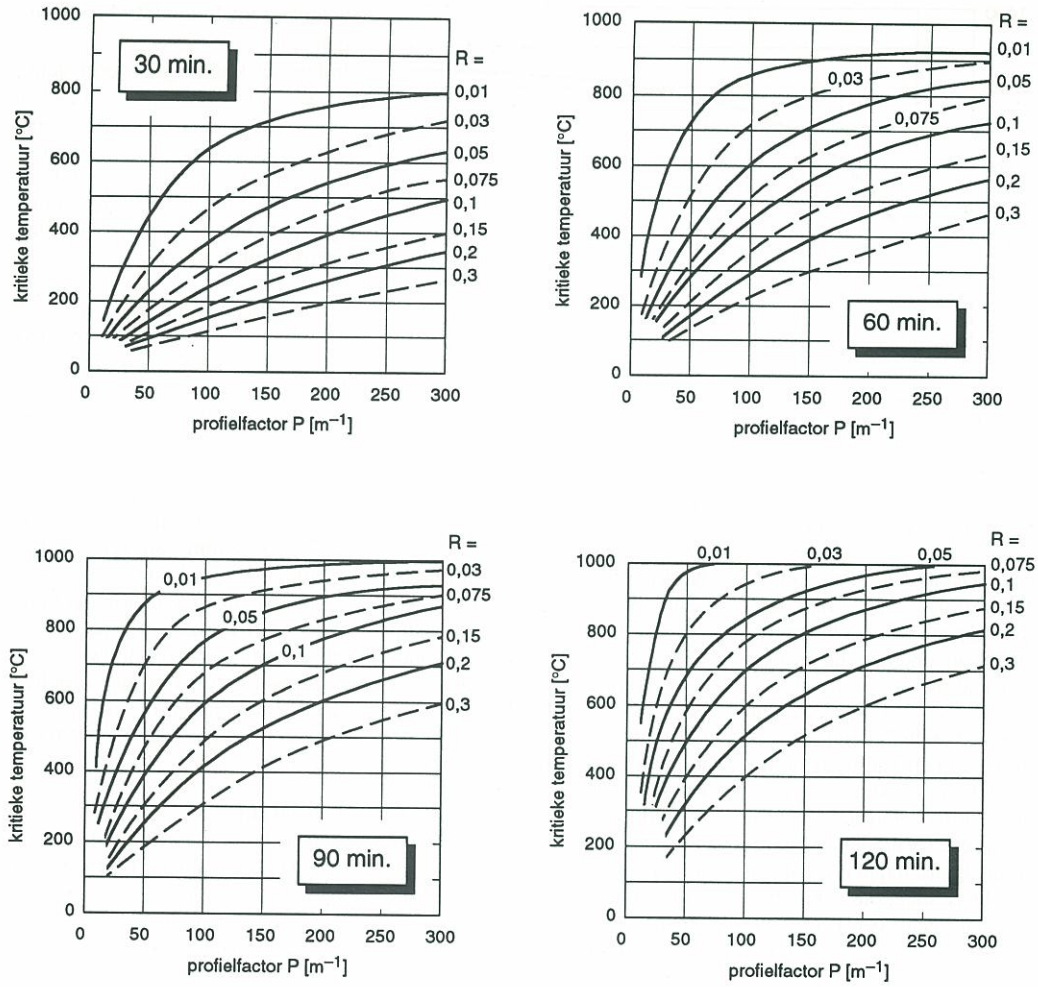
Voor excentrisch belaste kolommen geeft artikel 9.2.2 van NEN 6072 een vereenvoudigde rekenregel, waarbij het bij brand optredende moment wordt omgerekend tot een equivalente normaalkracht.

Tabel 1. Materiaaleigenschappen van enkele bekledingsmaterialen [5].

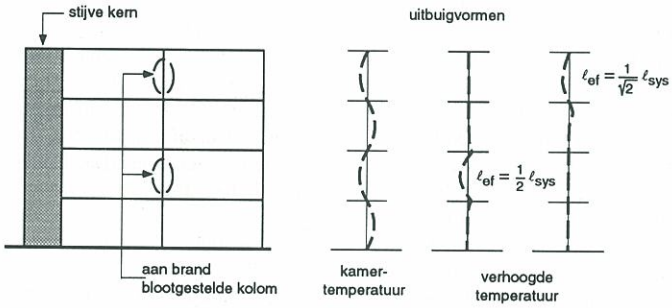
Materiaal	λ [W/mK]	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]
gipsplaat	0,20	800	1700
silicaatplaat	0,15	450–900	1100
vermiculietplaat	0,15	300–800	1100
steenwolplaat	0,25	120–150	1100
gespoten mineraalvezels	0,10	250–350	1100
gespoten vermiculiet	0,15	300–800	1100

Literatuur

1. *Bouwbesluit* (Besluit houdende technische voorschriften omtrent het bouwen van bouwwerken en de staat van bestaande bouwwerken), Staatsblad 680, 1991.
2. *NEN 6702* (TGB 1990. Belastingen en vervormingen), 1991.
3. *NEN 6072* (Rekenkundige bepaling van de brandwerendheid van bouwdelen. Staalconstructies), 1991.
4. *Eurocode 3* (Design of steel structures. Part 10. Structural fire design), draft, April 1990.
5. L. Twilt en J. Witteveen, *Brandveiligheid staalconstructies,* uitgave Centrum Staal/Staalbouwkundig Genootschap, Rotterdam 1985 (2e druk).
6. *Regeling 'Bouwbesluit constructieve veiligheid en gebruiksveiligheid',* Ministeriële Regeling, Staatsblad 104, 2 juni 1992.
7. *Brandwerendheid van staal-betonkolommen* (CS/CUR/SG-rapport 5 en 6), 1988 en 1989.
8. *Staalplaat-betonvloeren.* Deel 1. *Richtlijnen en rekenvoorbeelden* (CS/CUR/SG-rapport 7), 1991.
9. *Computerprogramma 'Brandwerendheid van staalconstructies',* uitgave Centrum Staal/Staalbouwkundig Genootschap, Rotterdam 1988 (versie 1.1).
   Brawesta is ontwikkeld door TNO. Een update van het programma, aangepast aan de nieuwe norm NEN 6072, komt begin 1993 beschikbaar en bevat door TNO-geautoriseerde materiaaleigenschappen van bekledingsmaterialen.



11. Verband tussen de profielfactor P en de kritieke staaltemperatuur θ_{kr}, afhankelijk van de warmteweerstand R van de isolerende bekleding en van de geëiste brandwerendheid.



12. Reductie van de kniklengte bij kolommen in geschoorde raamwerken.

Voorbeeldberekening ligger

Gegeven: ligger met een overspanning van 8 m, hart op hart 5 m. G = Q = 4 kN/m².
Gekozen profiel: HEA 400 (kwaliteit FeE 235), $W_p = 2562$ cm³.
Brandwerendheidseis: 120 minuten.

① Optredende belasting bij brand:
$q_\theta = (4 \cdot 1 + 4 \cdot 1 \cdot 0{,}5) \cdot 5 = 30$ kN/m.

② Maximaal opneembare belasting bij kamertemperatuur:

$$q_{20} = \frac{f_y \cdot 8 \cdot W_p}{l^2} = \frac{235 \cdot 8 \cdot 2562 \cdot 10^3}{8000^2} = 75{,}3 \text{ kN/m.}$$

③ Belastinggraad:

$$\eta = \frac{30}{75{,}3} = 0{,}40.$$

④ Correctiefactor: $\kappa = 0{,}7$ (statisch bepaalde, driezijdig verhitte ligger).

⑤ Kritieke temperatuur volgens (6) voor $\eta = 0{,}4$ en $\kappa = 0{,}7$:
$\theta_{kr} = 679$°C.

⑥ Profielfactor voor driezijdige verhitting, profielvolgend volgens tabel in [5]:
$P = 101{,}3$ m⁻¹

⑦ Warmteweerstand van het bekledingsmateriaal volgt uit *afbeelding 11* (120 minuten): $d/\lambda = 0{,}11$. Dit is bijvoorbeeld te bereiken met 16,5 mm gespoten vermiculiet ($\lambda = 0{,}15$) of 11 mm gespoten mineraalvezels ($\lambda = 0{,}10$).

Voorbeeldberekening kolom

Gegeven: een gebouw met vier bouwlagen met een verdieping-hoogte van 3,6 m. Vloerveld 3,6×4,8 m^2. G = 5 kN/m^2 en Q = 4 kN/m^2. Eigen gewicht gevel: 2,5 kN/m^2. Kolomstramien in de gevel: 4,8 m. Excentriciteit 0 m.
Gekozen profiel: vierkante buis 150×150×8 (kwaliteit FeE 275).
Brandwerendheidseis: 90 minuten.

① Normaalkracht bij brand:
$N_q = (4 \cdot 5 + 4 \cdot 4 \cdot 0{,}5 + 3 \cdot 2{,}5) \cdot 3{,}6 \cdot 4{,}8 = 613$ kN

② Maximaal opneembare centrische normaalkracht bij kamertemperatuur, rekeninghoudend met kniklengtereductie:

$$\lambda = \frac{\dfrac{1800}{69{,}4}}{\pi\sqrt{\dfrac{210.000}{275}}} = 0{,}30.$$

Voor $\lambda = 0{,}30$ geldt $\omega_{buc} = 0{,}96$ (knikkromme b), zodat:
$N_{20} = 0{,}96 \cdot 1189 = 1141$ kN

③ Belastinggraad:

$$\eta = \frac{618}{1141} = 0{,}54.$$

④ Correctiefactor: $\kappa = 1{,}2$

⑤ Kritieke temperatuur volgens (6) voor $\eta = 0{,}54$ en $\kappa = 1{,}2$:

$\theta_{kr} = 546$ °C

⑥ Profielfactor voor vierzijdige verhitting:

$$P = \frac{1}{t} = 125 \text{ m}^{-1}.$$

⑦ Warmteweerstand van het bekledingsmateriaal volgt uit *afbeelding 11* (90 minuten): $d/\lambda = 0{,}15$. Dit is te bereiken met een 30 mm dikke gipsplaat ($\lambda = 0{,}20$), een 22,5 mm dikke vermiculiet- of silicaatplaat ($\lambda = 0{,}15$) of een 7,5 mm dikke steenwolplaat ($\lambda = 0{,}25$). Dit zijn conservatieve waarden: de warmtecapaciteit van de bekleding is niet is meegenomen en de λ-waarden zijn conservatief.