

Besparen met Fire Safety Engineering

Fire Safety Engineering (FSE) geeft een realistische weergave van het gedrag van een brand en het effect op de omgeving, met gebruik van fysische modellen. Het is een relatief nieuwe ontwikkeling. De methode kan worden ingezet voor het beschouwen van alle aspecten die met brandveiligheid te maken hebben. De uitkomst kan van grote invloed zijn op een ontwerp en kan ertoe leiden dat het plan wordt vereenvoudigd. Dit is goedkoper en duurzamer, zonder concessies op het gebied van veiligheid.

ir. T.G. van der Waart van Gulik en dr.ir. L.J. van der Meer.

Tim van der Waart van Gulik is specialist brandveiligheid en Lex van der Meer is specialist constructies/FEM bij ABT in Velp.

Van oudsher wordt de brandwerendheid van constructies of constructieonderdelen beoordeeld op basis van de standaardbrandkromme. In werkelijkheid is het verloop van een brand allesbehalve standaard. Een brand is in het begin vaak heviger dan het veronderstelde standaardverloop van de temperatuur. In tegenstelling tot de standaardbrandkromme, neemt het brandvermogen en daarmee de temperatuur van een brand later veelal snel af. Het exacte brandverloop is echter afhankelijk van veel verschillende parameters zoals:

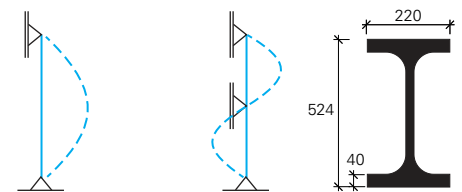
- de hoeveelheid en typen brandbare materialen;
- de opstelling van de brandbare materialen in de ruimte;
- de afmetingen van de ruimte;
- de gebruikte isolatiematerialen;
- de openingen in de ruimte;
- de actieve maatregelen zoals een sprinklerinstallatie of rook- en warmteafvoerinstallatie.

Het onderscheid tussen Fire Safety Engineering (FSE) en de conventionele aanpak om

constructief gedrag bij brand te toetsen, is samengevat in *tabel 1*.

Realistische benadering

FSE van dragende constructieonderdelen verschilt op twee aspecten van de standaard beschouwing. Enerzijds thermisch door, in plaats van het toepassen van de ‘universele’ standaardbrandkromme, meer realistische brandomstandigheden in kaart te brengen voor de specifieke situatie (natuurlijke brand). Anderzijds mechanisch, door het betreffende constructieonderdeel niet als een op zichzelf staande component te benaderen, maar als onderdeel van de hele constructie. Methoden gebaseerd op een natuurlijke brand, zoals beschreven in de Eurocode, maken deze realistische benadering mogelijk. Zeker wanneer de constructieve benuttingsgraad van een constructieonderdeel bij kamertemperatuur al relatief hoog is, kan een nadere beschouwing van de constructieve brandveiligheid door toepassing van FSE, tot een optimaler resultaat leiden. Daarnaast



1. Links: schematisatie kolom, kniklengte sterke as 10 m. Midden: schematisatie kolom, kniklengte zwakke as 5 m. Rechts: kolomdoorsnede.

kunnen bij de conventionele aanpak nadelige effecten zoals belastingtoename door verhinderde thermische vervormingen over het hoofd worden gezien. Toepassing van FSE kan dus ook leiden tot een veiliger ontwerp.

Case study dragende stalen gevelkolom

Als case study: de constructieve brandveiligheid van een dragende stalen gevelkolom. Het betreft een 10 m lange H-vormige stalen gevelkolom die om de sterke as aan de uiteinden scharnierend is opgelegd. Om de zwakke as is deze aan de uiteinden en halverwege de hoogte scharnierend opgelegd. De kolom kan in de lengterichting vrij vervormen (*afb. 1*). De kniklengte om de sterke as is dus 10 m en de kniklengte om de zwakke as is 5 m. De toegepaste staalsoort is S355. De rekenwaarden van de kolombelasting zijn, een normaalkracht van 2750 kN en een buigend moment om de sterke as van 180 kNm.

Natuurlijke brand

In veel gebouwen is een open en transparante gevel gewenst. Ze krijgen een gevelindeling met veel glas en vides en nagenoeg geen aanliggende objecten. Bij een eventuele brand bevindt de brandhaard zich dan op enige afstand van de gevel. Dit is gunstig

Tabel 1. Constructief gedrag bij brand: conventionele aanpak vs. Fire Safety Engineering (FSE).

constructie	standaardbrand	natuurlijke brand
één component	1a. conventionele aanpak	2a. FSE
gehele constructie, meerdere componenten	1b. FSE	2b. FSE

voor de gevelkolom en kan met een FSE-beschouwing worden vertaald naar voordeligere brandwerende maatregelen, of een hogere rekenkundige draagkracht. De in werkelijkheid te verwachten thermische belasting op de kolom wijkt nu eenmaal aanzienlijk af van de standaardbrandkromme. Bij het uitwerken van deze case study is er daarom voor gekozen om de brand te beschouwen als een natuurlijke brand. Voor de eenvoud is de interactie tussen de stalen gevelkolom en de rest van de hoofdconstructie niet beschouwd. De case study bevindt zich dus in kwadrant 2a van *tabel 1*.

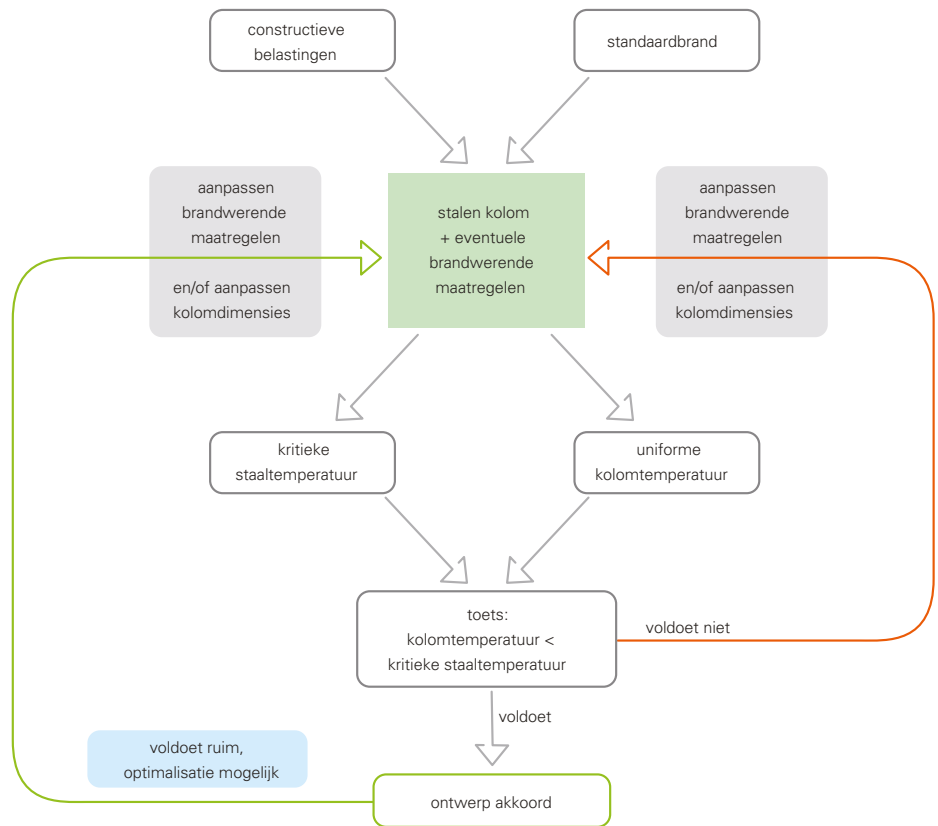
Eigen berekening

In dit voorbeeld is een gevel beschouwd waarin stalen gevelkolommen grotendeels buiten het gebouw vallen en voor een klein deel daarbinnen. Dit zorgt bij verhitting door brand voor een temperatuurgradiënt over de doorsnede. Bestaande softwarepakketten waarmee de opwarming (Ozone) en de brandwerendheid (Brawesta) kunnen worden bepaald, gaan uit van een uniforme staaltemperatuur. Brawesta baseert zich hierbij bovendien op de standaardbrandkromme. Daarom is gekozen voor het maken van een eigen berekening in Excel en verificatie van deze berekening met de eindige-elementensoftware DIANA FEA.

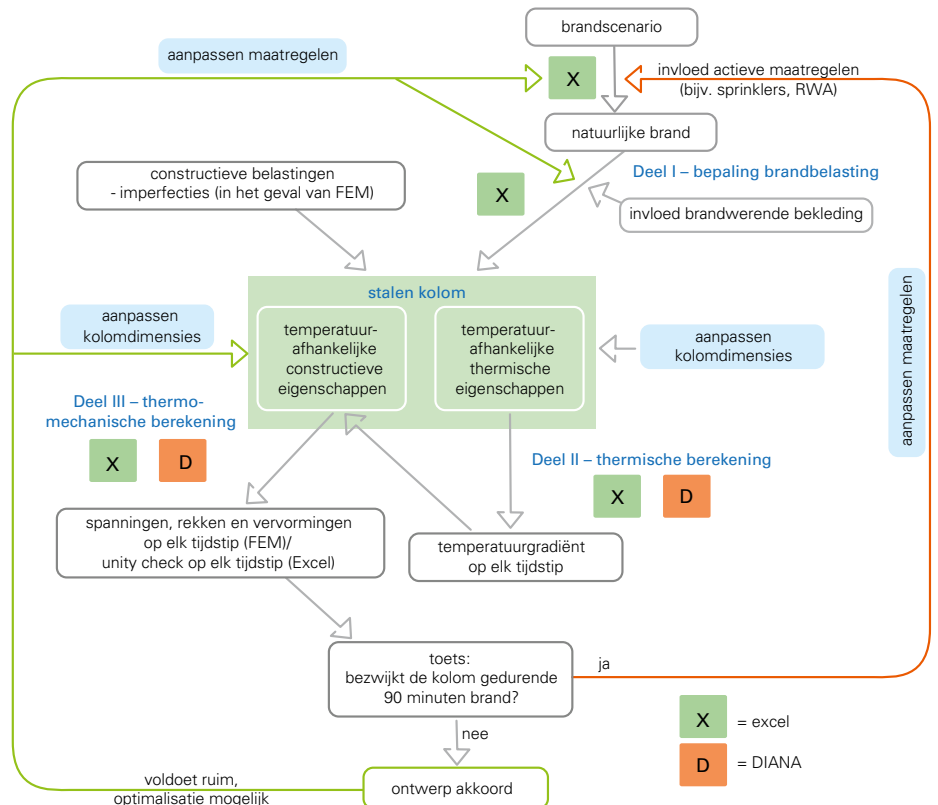
De conventionele aanpak is inzichtelijk gemaakt in het schema in *afbeelding 2*. Met de Excel-tool op de website van Bouwen met Staal is de kritieke staaltemperatuur van de kolom bepaald op 239 °C. Bij toepassing van de standaardbrandkromme wordt de staaltemperatuur na 60 minuten 880 °C, wat resulteert in een unity check van 10,4. Ter vergelijking is de FSE-aanpak die voor de gepresenteerde case study is gehanteerd, toegelicht in *afbeelding 3*.

Bepaling brandbelasting

Bij FSE waarbij een natuurlijke brand wordt beschouwd, is het van belang om alle mogelijke brandscenario's in kaart te brengen en hiervan de meest maatgevende te identificeren. Het maatgevende brandscenario voor deze case study betreft een brand in een aan de gevel gelegen vergaderzaal met een totale vuurlast van ± 13.000 MJ.



2. Schema bij conventionele aanpak voor toetsing constructief gedrag bij brand.



3. Schema bij FSE-aanpak zoals gehanteerd voor de gepresenteerde case study.

Afbeelding 4 toont links het vrijkomende vermogen van de brand in de vergaderzaal en rechts de thermische belasting op de kolom als gevolg hiervan. Voor de bepaling hiervan is gebruik gemaakt van NEN-EN 1991-1-2. Ter vergelijking is ook de standaardbrandkromme weergegeven.

Thermische berekening

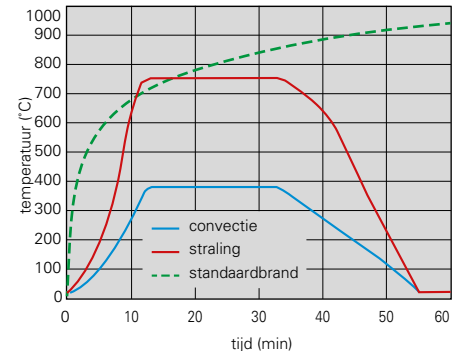
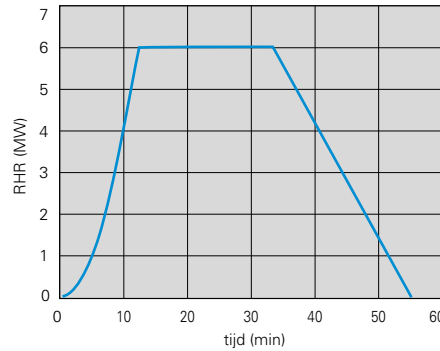
In Excel is de staaltemperatuur over de doorsnede van de gevelkolom voor elk tijdstip bepaald, waarbij rekening is gehouden met de volgende parameters:

- de thermische condities rondom de kolom zoals weergegeven in afbeelding 4 (rechts);
- de warmteoverdracht naar de kolom via convectie en straling;
- de thermische materiaaleigenschappen van staal.

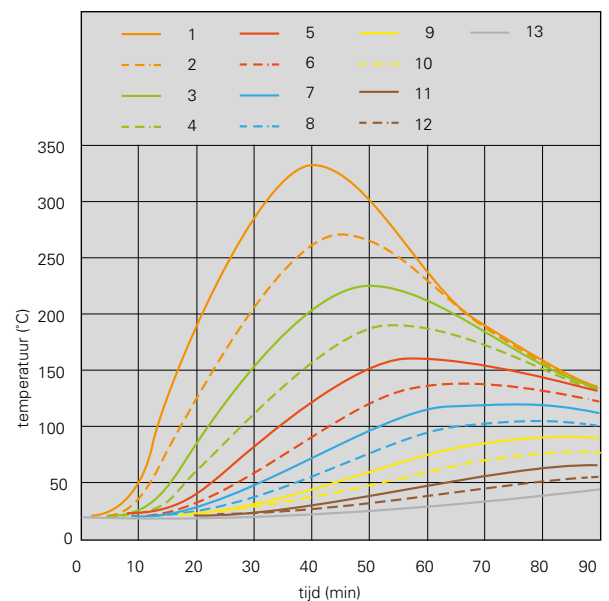
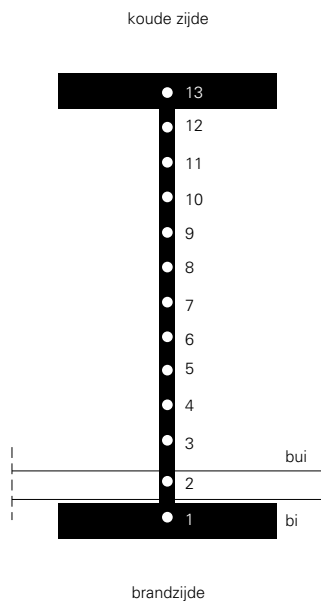
Hierbij is gebruik gemaakt van NEN-EN 1991-1-2 en NEN-EN 1993-1-2. In afbeelding 5 is het temperatuurverloop in de tijd van de in stukjes verdeelde doorsnede weergegeven. De snelst en traagst stijgende lijn geeft het temperatuurverloop van de twee flenzen weer. De tussenliggende elf lijnen staan elk voor het temperatuurverloop van een deel van het lijf. De temperatuur aan de binnenzijde (brandzijde) is logischerwijs hoger dan die aan de buitenzijde van de kolom. Deze resultaten zijn gebruikt als input voor de bepaling van de mechanische respons.

3D-model

Ter vergelijking is de met Excel uitgevoerde thermische analyse ook uitgevoerd met DIANA FEA. Hierbij is een 3D-model gemaakt met volume-elementen waarbij ook de afrondingsstraal van de kolomdoorsnede is meegenomen. Voor de thermische berekening en de verderop in dit artikel beschreven thermo-mechanische berekening, wordt exact hetzelfde model gebruikt. Overdrachtscoëfficiënten en thermische materiaaleigenschappen zijn ingevoerd conform NEN-EN 1991-1-2 en NEN-EN 1993-1-2. De thermische belasting bestaat uit een tijdsafhankelijke convectie- en radiatietemperatuur, zoals weergegeven aan de rechterzijde van afbeelding 4.



4. Links: vermogen van de brandende vergaderzaal. Rechts: stralings- en convectietemperatuur bij de gevelkolom door de brandende vergaderzaal (let op: stralings- en convectietemperatuur zijn niet gelijk aan de staaltemperatuur). Ter referentie is ook de standaardbrandkromme weergegeven.



5. Links: vereenvoudigde kolomdoorsnede verdeeld in stukjes met uniforme temperatuur per stukje. Rechts: temperatuurverloop in de tijd per stukje van de kolomdoorsnede.

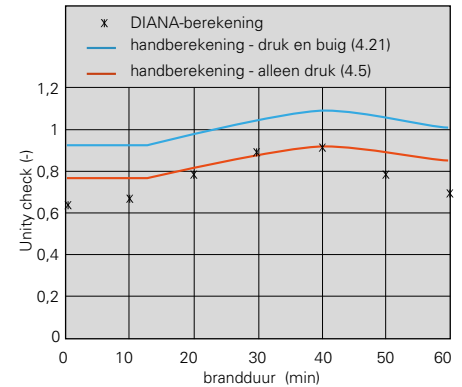
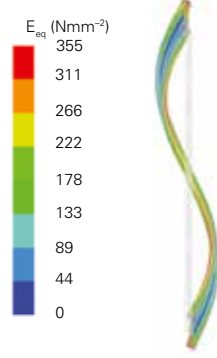
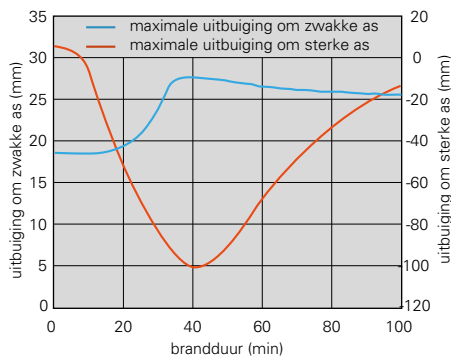
Vergelijken

De resultaten van de thermische analyse met DIANA worden in afbeelding 6 vergeleken met de resultaten van de Excel-berekening. Hieruit blijkt dat de resultaten goed overeenkomen. De direct verhitte flens wordt in de DIANA-analyse iets minder warm; dit is te verklaren doordat de afrondingsstralen in de DIANA-analyse zijn meegenomen, waardoor de warmte iets beter naar het lijf van de kolom kan worden overgedragen (geleiding). In de Excel-berekening zijn deze afrondingsstralen niet meegenomen.

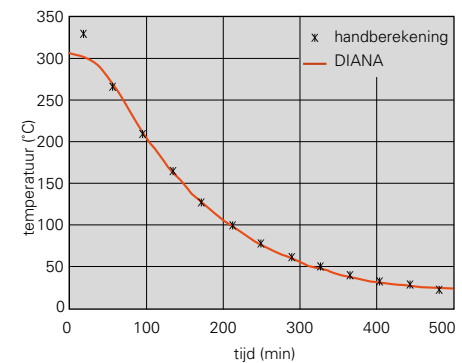
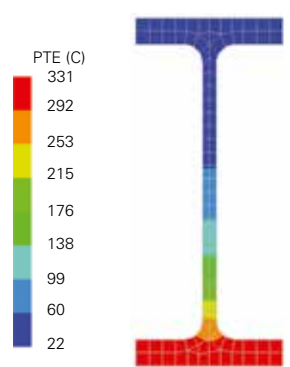
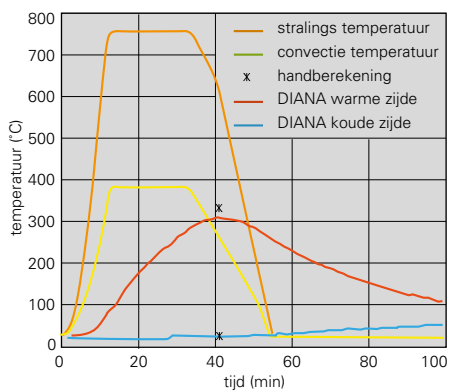
Om de DIANA-berekening goed met de Excel-berekening te kunnen vergelijken, is in de DIANA-analyse de temperatuur over de lengte van de kolom constant gehouden. Het tijdstip waarop in de Excel-berekening en in de DIANA-berekening de maximale temperatuur wordt bereikt, komt ook goed overeen, zie afbeelding 5 rechts en afbeelding 6 links. Dit gebeurt na ongeveer 40 minuten brand.

Thermo-mechanische berekening

De afname van sterkte en stijfheid (tabel 3.1 in NEN-EN 1993-1-2) zijn als gevolg van de



7. Links: maximale uitbuiging om de zwakke en sterke as gedurende de brand (bij gelijkblijvende normaalkracht). Midden: Von Mises-spanningen in de kolom na 40 minuten brand. Rechts: unity check gedurende de brand volgens DIANA-berekening vs. Excel-berekening.



6. Links: temperatuurbelasting en kolomdoorsnede vs tijd. Midden: temperatuurgradiënt DIANA na 40 minuten brand. Rechts: temperatuurgradiënt DIANA vs. Excel-berekening.

niet-uniforme temperatuur (afb 5) ook niet uniform over de doorsnede. De verschillende stukjes van de doorsnede leveren per tijdstip dus een verschillende bijdrage aan de sterkte en stabiliteit. In de eenvoudige berekeningsmodellen van NEN-EN 1993-1-2 (paragraaf 4.2) wordt echter geen expliciete mogelijkheid geboden om dit effect te beschouwen voor elementen belast op druk. Daarom is bij de Excel-berekening uitgegaan van een uniforme staaltemperatuur gelijk aan de maximale staaltemperatuur. De unity check van de combinatie buiging-axiale druk, volgens vergelijking (4.21) van NEN-EN 1993-1-2, bleek maatgevend en bedroeg 1,07. Daarmee voldoet, volgens deze berekening, de kolom bij brand niet.

FEM-berekening

Evenals bij de Excel-berekening worden in DIANA de mechanische materiaaleigenschap-

pen temperatuurafhankelijk gemaakt volgens tabel 3.1 uit NEN-EN 1993-1-2. De staaltemperatuur zoals bepaald tijdens de thermische berekening dient als input voor de bepaling van de mechanische materiaaleigenschappen op elk tijdstip van de brand. In tegenstelling tot de eenvoudige berekeningsmodellen van NEN-EN 1993-1-2 geven de geavanceerde berekeningsmodellen (paragraaf 4.3) wel ruimte voor het in rekening brengen van een niet-uniforme staaltemperatuur. Om instabiliteitsverschijnselen zoals knik in een FEM-berekening te beschouwen, dient een geometrisch en fysisch niet-lineaire berekening uitgevoerd te worden. Hierbij worden geometrische imperfecties meegenomen die invloed hebben op de draagkracht van de kolom, evenals plasticiteit (vloeien van het staal). Om deze aanpak te valideren, is eerst een constructieve berekening gemaakt bij

kamertemperatuur, die is vergeleken met een handberekening volgens NEN-EN 1993-1-1 (zie kader p. 38).

Validatie

De resultaten van de DIANA-berekening zijn getoond in afbeelding 7. Hierbij zijn twee opties doorgerekend: (1) de rekenwaarde van de normaalkracht wordt eerst aangebracht en daarna passeert de brand (afb. 7 links en midden), of (2) de temperatuurgradiënt behorend bij een specifiek tijdstip wordt aangebracht en daarna wordt de normaalkracht opgevoerd tot bezwijken (afb. 7 rechts). Optie (1) ligt dicht bij hetgeen er in werkelijkheid gebeurt. Deze optie geeft alleen aan of de kolom gedurende de brand bezwijkt of niet, maar als de kolom niet bezwijkt, dan is moeilijk te achterhalen hoeveel reservecapaciteit er nog is geweest. Optie (2) daaren-

tegen kan gebruikt worden om de capaciteit van de kolom te bepalen bij een 'bevroren' temperatuurgradiënt. Met deze optie kan ook de unity check van de kolom gedurende de brand bepaald worden, zoals te zien in *afbeelding 7* rechts. Als bij optie (1) op tijdstip x van de brand de kolom bezwijkt, dan zou dit moeten corresponderen met het tijdstip waarop de unity check groter wordt dan 1,0. Wanneer bij optie (1) de kolom niet bezwijkt, kan optie (2) gebruikt worden om inzicht te krijgen in de beschikbare reservecapaciteit op elk tijdstip van de brand.

Bevindingen

Zoals verwacht, wordt de hoogste unity check gevonden op het tijdstip dat de maximale staaltemperatuur optreedt. Na ongeveer 40 minuten brand wordt de maximale staaltemperatuur bereikt en is de met DIANA gevonden unity check 0,92 ten opzichte van een met Excel bepaalde unity check van 1,07. De DIANA-berekening laat een gunstiger resultaat zien dan de combinatiecheck voor druk en buiging volgens vergelijking (4.21) van NEN-EN 1993-1-2, wat in dit geval het verschil maakt tussen voldoen en niet voldoen. Wordt een Excel-berekening gemaakt waarbij buiging buiten beschouwing wordt gelaten, volgens vergelijking (4.5) van NEN-EN 1993-1-2, dan komt de maximale unity check overeen met de DIANA-berekening. De DIANA-berekening is uitgevoerd met een buigend moment om de sterke as en met verschillende combinaties van imperfecties. Hieruit bleek dat de gekozen kolom alleen gevoelig is voor knik om de zwakke as. Voor de Excel-berekening kan deze conclusie niet getrokken worden en zal de combinatie druk en buiging volgens (4.21) aangehouden moeten worden. Hierdoor is de DIANA-berekening 14% gunstiger. Opmerkelijk is het verschil tussen de Excel-berekening volgens (4.5) en de DIANA-analyse in de beginfase van de brand. Dit heeft te maken met de verschillen tussen NEN-EN 1993-1-1 en NEN-EN 1993-1-2 aangaande de bepaling van de relatieve slankheid van de kolom (slankheidskromme). Tot een staaltemperatuur van 100 °C (tot ongeveer 13 minuten in deze case study) veranderen de mechanische materiaaleigenschappen

Tabel 2. Unity checks voor instabiliteit van de kolom bij brand, conventioneel vs FSE.

conventioneel standaardbrand	FSE natuurlijke brand	
uniforme staaltemperatuur eenvoudig berekeningsmodel (Excel)	uniforme staaltemperatuur eenvoudig berekeningsmodel (Excel)	temperatuurgradiënt geavanceerd berekeningsmodel (DIANA FEA)
10,4	1,07	0,92

IJken rekenmethodiek bij kamertemperatuur

Ter referentie is eerst een structurele analyse bij kamertemperatuur uitgevoerd in DIANA waarvan de resultaten zijn vergeleken met NEN-EN 1993-1-1. Het betreft een geometrisch niet-lineaire (GNL) en fysisch niet-lineaire (FNL) analyse waarbij geometrische imperfecties en plasticiteit zijn meegenomen. De vorm van de geometrische imperfecties zijn bepaald met een lineaire knik-analyse, zie *afbeelding 8*. Deze analyse laat conform verwachting zien dat de kolom het meest gevoelig is voor knik om de zwakke as. Als imperfectie is gekozen voor de eerste knikvorm (*afb. 8* links) met een maximale amplitude van $L_{kolom}/1000 = 10$ mm. Deze amplitude is in lijn met paragraaf 4.3 van NEN-EN 1993-1-2. Het toevoegen van additionele imperfecties bleek geen noemenswaardige invloed op de bezwijklast te hebben.

'Arc-length' methode

De normaalkracht wordt in stappen opgevoerd totdat de normaalkrachtcapaciteit van de kolom bereikt is. Met de 'arc-length' methode wordt de normaalkracht daarna automatisch weer afgebouwd, terwijl de uitbuiging van de kolom blijft toenemen.

Dit is te zien in de met DIANA verkregen GNL-FNL-grafiek aan de linkerkant van *afbeelding 8*. In deze figuur is ook een GNL-grafiek weergegeven waarbij het materiaalgedrag lineair-elastisch is. Deze grafiek komt overeen met de theoretische benadering waarbij de beginexcentriciteit wordt vermenigvuldigd met de vergrotingsfactor ($e = e_0 \cdot n / (n-1)$ met $n = N/N_{cr}$). Daarnaast zijn ook de theoretische limieten voor lineair-elastisch gedrag en ideaal-plastisch gedrag in de afbeelding weergegeven. De limiet voor lineair-elastisch gedrag markeert het punt waarop de GNL- en GNL-FNL-grafiek van elkaar beginnen af te wijken. De GNL-FNL-grafiek benadert uiteindelijk de limiet voor ideaal-plastisch gedrag. Ter referentie zijn ook de rekenwaarde van de normaalkracht (N_{Ed}), de Eulerse kniklast (N_{cr}) en de normaalkrachtcapaciteit volgens NEN-EN 1993-1-1 (N_{brd}) weergegeven (knikkromme b). De GNL-grafiek nadert asymptotisch naar de Eulerse kniklast. De piek van de GNL-FNL-grafiek komt goed overeen met de normaalkrachtcapaciteit volgens NEN-EN 1993-1-1.

Geconcludeerd kan worden dat de DIANA-berekening goed overeenkomt met de berekeningen op basis van theorie en NEN-EN 1993-1-1. Uit zowel de DIANA-berekening als uit NEN-EN 1993-1-1 volgt een normaalkrachtcapaciteit bij kamertemperatuur van 4250 kN. In combinatie met de rekenwaarde van de normaalkracht van 2750 kN geeft dit een unity check voor de kolom van 0,65 bij kamertemperatuur.

niet en is het logischer om NEN-EN 1993-1-1 aan te houden. Boven de 100 °C (vanaf ongeveer 13 minuten in deze case study) is NEN-EN 1993-1-2 de aangewezen norm voor de bepaling van de (rest)capaciteit.

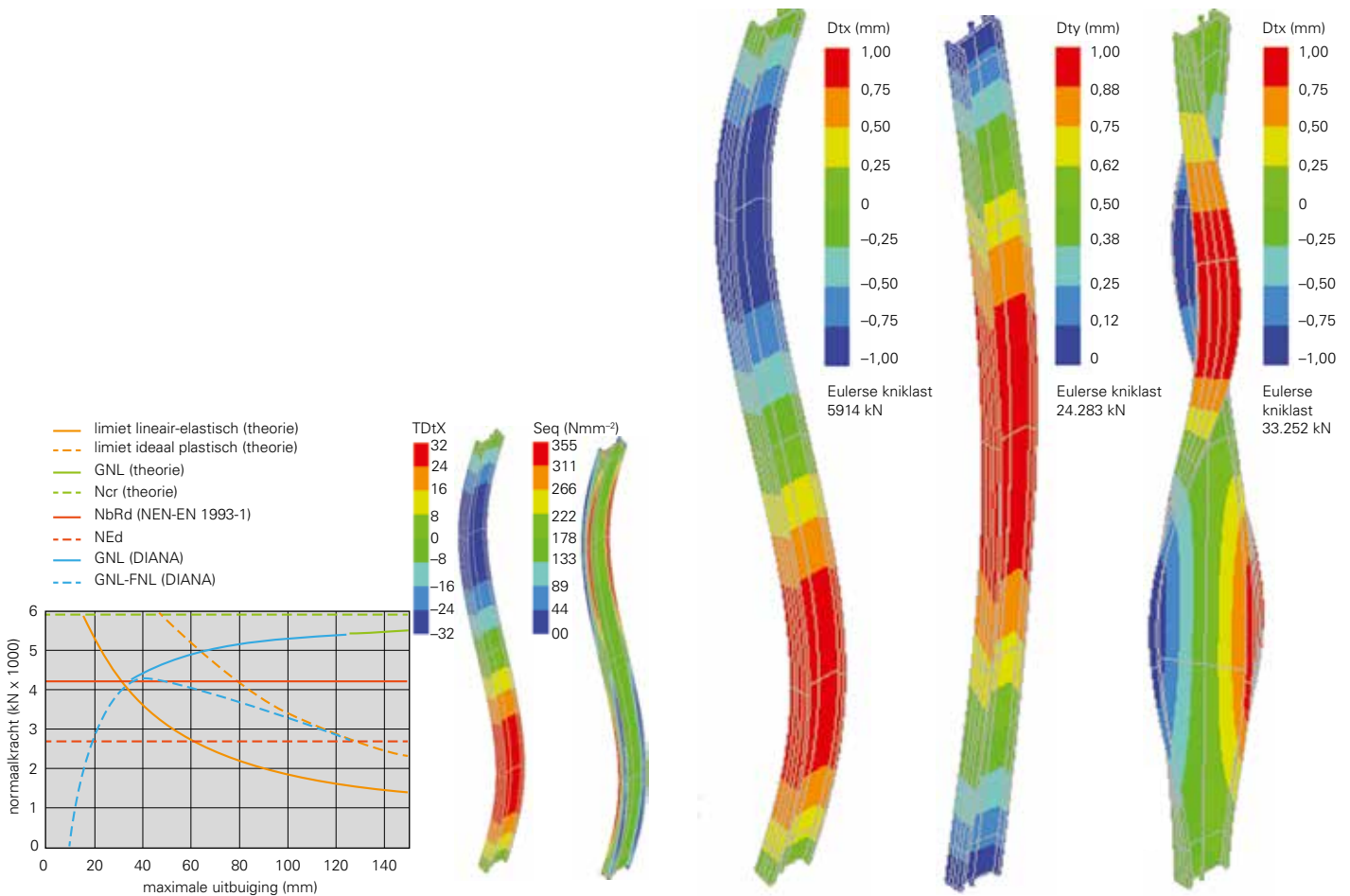
Resultaat onder de streep

Dit artikel betreft een vergelijking tussen een Excel-berekening en een thermo-mechanische berekening, uitgevoerd in een eindige-elementenprogramma. Als case study is een dragende stalen gevelkolom geanalyseerd die eenzijdig door een natuurlijke brand

wordt verhit. Omdat er wordt afgeweken van de standaardbrand valt deze berekening onder de noemer Fire Safety Engineering (FSE). Doel van het artikel is om enerzijds aan te tonen dat met de inzet van FSE bespaard kan worden op constructiemateriaal en/of op brandwerende maatregelen en anderzijds om de modellen wederzijds te valideren.

Unity check

De unity checks voor instabiliteit van de kolom bij brand volgens de conventionele aanpak zijn in *tabel 2* vergeleken met de



8. Links: normaalkracht vs. uitbuiging. Midden: uitbuiging bij maximale normaalkracht. Rechts: Von Mises-spanning bij maximale normaalkracht.

9. Links: knik om de zwakke as. Midden: knik om de sterke as. Rechts: torsieknik.

FSE-aanpak zoals gehanteerd in de gepresenteerde case study. Bij de FSE-aanpak is onderscheid gemaakt tussen een eenvoudig berekeningsmodel en een geavanceerd berekeningsmodel.

Conclusies

- Er is goede overeenkomst tussen de DIANA- en de Excel-berekening volgens NEN-EN 1993-1-1 wat betreft de unity check van de stalen kolom bij kamertemperatuur (zie kader p. 38).
- Er is goede overeenkomst tussen de DIANA- en de Excel-berekening volgens NEN-EN 1991-1-2 en NEN-EN 1993-1-2 wat betreft de temperatuurgradiënt over de doorsnede ten gevolge van de brand.
- Er is goede overeenkomst tussen de DIANA- en de Excel-berekening volgens NEN-EN 1991-1-2 en NEN-EN 1993-1-2 wat betreft de unity check voor knik van de stalen kolom belast op alleen druk bij brand (vergelijking (4.5) uit NEN-EN 1993-1-2).

Wanneer ook buiging wordt beschouwd (vergelijking (4.21) uit NEN-EN 1993-1-2), geeft de DIANA-berekening een lagere unity check dan de Excel-berekening. De 'winst' die hiermee wordt behaald is $\pm 14\%$.

De 'juiste' methode

De met de Excel-berekening verkregen resultaten lijken erg op de resultaten verkregen met de eindige-elementensoftware. Echter bij situaties met een grotere complexiteit of een groter aantal te beschouwen elementen, is het inefficiënt, zo niet praktisch onmogelijk, om de analyses met Excel uit te voeren. Hierbij valt te denken aan verhinderde of gedwongen vervormingen door een niet-uniforme temperatuurverdeling over de doorsnede en/of omringende koude constructieonderdelen. Inzet van een geschikt eindige-elementenprogramma wordt dan noodzakelijk. Ook bestaat de mogelijkheid om aan de belastingkant geavanceerde software (Compu-

tational Fluid Dynamics, CFD) in te zetten, waarmee de thermische belasting in ruimte en tijd voor een specifiek brandscenario nauwkeurig bepaald kan worden.

Besparen met meer engineering

De inzet van complexere rekentechnieken kan uiteindelijk leiden tot een eenvoudiger en beter ontwerp. De constructeur en de specialist brandveiligheid krijgen met FSE meer inzicht in het werkelijke constructieve gedrag bij brand. De aannemer kan besparen op constructiemateriaal en/of brandwerende maatregelen. De architect kan vrijer ontwerpen, waardoor meer mogelijk is en beter aan de wensen van een opdrachtgever kan worden voldaan. Het toepassen van FSE brengt aan de engineeringkant weliswaar meer kosten met zich mee, maar deze kunnen daarna ruimschoots worden terugverdiend door een besparing op materiaalkosten en een winst aan flexibiliteit. •