



Door onderzoek zijn nieuwe inzichten ontstaan voor kanaalplaatvloeren bij brand

# Nieuwe maatregelen kanaalplaatvloeren (1)

*De afgelopen jaren is uitgebreid onderzoek verricht naar het gedrag van kanaalplaten bij brand. Uit dit onderzoek blijkt dat het nodig is enigszins anders om te gaan met kanaalplaatvloeren. In een brief van de BFBN [1], die tegelijkertijd met dit artikel verschijnt, zijn nieuwe maatregelen voorgesteld. In dit artikel wordt ingegaan op het uitgevoerde onderzoek en de overwegingen die bij de voorgestelde maatregelen een rol hebben gespeeld <sup>1)</sup>.*

Bij een brand in de parkeergarage van een appartementencomplex in de Lloydstraat te Rotterdam in oktober 2007 is schade ontstaan aan kanaalplaatvloeren [2]. Naar aanleiding hiervan is in november 2009 door de BFBN voorgesteld bij de toepassing van kanaalplaatvloeren in nieuwbouw aanvullende bepalingen te hanteren [3] <sup>2)</sup>. Hoewel het specifiek bij die brand waargenomen gedrag – het vroegtijdig loskomen van de onderschil – nog onvoldoende bekend was, was het de verwachting dat de voorgestelde maatregelen de kans op optreden ervan sterk zouden verminderen. Zoals ook was aangekondigd, is het onderzoek naar dit specifieke gedrag van kanaalplaten bij brand daarna voortgezet.

De kanaalplaatvloer is een wereldwijd zeer veel toegepast vloersysteem. Er zijn in Europa vele honderden miljoenen vierkante meters toegepast, in Nederland naar verwachting tussen de 200 en 300 miljoen. De afgelopen decennia is het in Nederland, meer dan in vele andere landen, steeds meer gebruik geworden om met een constructieve druklaag op de kanaalplaatvloer de samenhang en de stabiliteit van het gebouw op een praktische en eenvoudige manier in te vullen. Het is in belangrijke mate die constructieve druklaag die er voor zorgt dat het gedrag van de kanaalplaatvloer bij brand anders kan zijn dan wat altijd werd gedacht. Dit wordt in dit artikel toegelicht. Alvorens daarop in te gaan, zal eerst worden teruggekeken naar wat vooraf ging bij de beoordeling van de brandwerendheid van kanaalplaatvloeren.

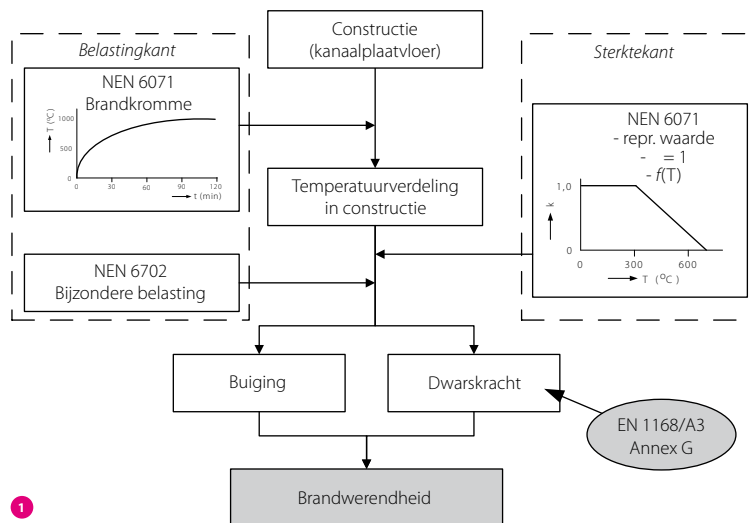
### Hoe het eerst was

Zoals dat geldt voor meer bouwsystemen die zijn opgebouwd uit losse onderdelen, is de brandwerendheid van kanaalplaatvloeren in het verleden altijd primair beoordeeld op basis van de brandwerendheid van een afzonderlijke kanaalplaat. Het verwaarlozen van de interactie tussen losse bouwdeelen, ofwel de invloed van (constructieve) verbindingen, werd altijd als een conservatieve aanpak beschouwd. Met brandproeven volgens NEN 6069 op losse kanaalplaten werd aangetoond dat de betreffende kanaalplaat de vereiste brandduur haalt. Een beschouwing van de capaciteit voor buiging was de gebruikelijke manier om de brandwerendheid van de kanaalplaatvloer aan te tonen. Dit onder de bijzondere belasting brand en rekening houdend met de temperatuurafhankelijke sterkte van de materialen [4].

<sup>1)</sup> Het onderzoek en het voorstellen van de maatregelen is begeleid door de BFBN-Begeleidingscommissie 'Brand', waarin VROM Inspectie, COBc, TNO, Efectis Nederland B.V., Adviesbureau Hageman, ERB en de kanaalplatenindustrie zijn vertegenwoordigd. Verder zijn bijdragen geleverd door prof.ir. A.C.W.M. Vrouwenvelder van TNO, ing. A. van den Bos van ABT en prof.ir. P.H.E. van de Leur van DGMR.

<sup>2)</sup> Om duidelijk onderscheid te maken tussen de BFBN-brieven van respectievelijk 2009 en 2011, wordt in dit artikel gesproken over respectievelijk BFBN-2009-brief [3] en BFBN-2011-brief [1].

<sup>3)</sup> Opgemerkt wordt dat in [2] en [7] nog werd gesproken over een beperking van de druklaagdikte tot 50 mm, maar in de naderhand uitgebrachte BFBN-2009-brief is daar 70 mm voor aangehouden.



Uit onderzoeken begin deze eeuw (o.a. [5]) was duidelijk geworden dat in bepaalde omstandigheden bij brand ook bezwijken op dwarskracht maatgevend kan zijn. Bepalingen om daarmee op een adequate manier rekening te houden, zijn opgenomen in de ontwerp Annex G van EN 1168 'Hollow core slabs' [6].

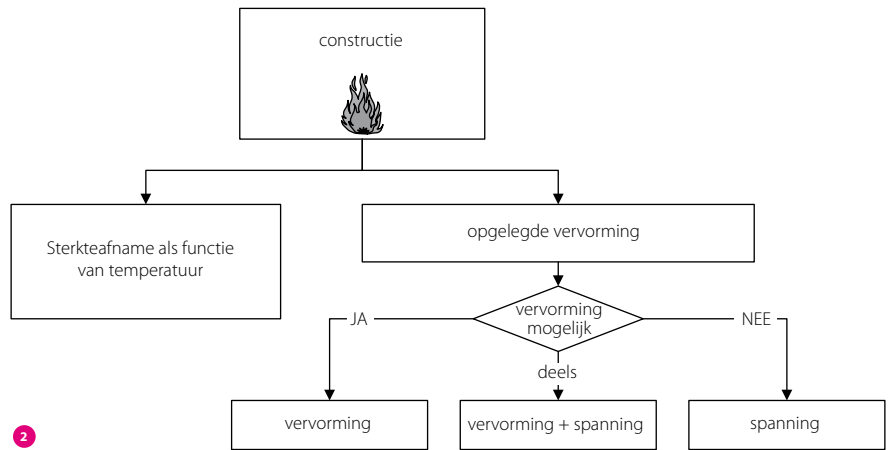
### Maatregelen naar aanleiding van Lloydstraat

De BFBN-2009-brief [3] verwijst naar de aanvullende rekenmethodiek voor dwarskracht volgens ontwerp Annex G van de EN 1168 /A3. De maatregelen zijn toegelicht in [7]. Ter illustratie is in figuur 1 schematisch weergegeven hoe de rekenkundige beoordeling van de brandwerendheid voor de mechanismen buiging en dwarskracht verloopt.

Met de aanvullende maatregelen ten aanzien van dwarskrachtbreuk werd in 2009 weliswaar recht gedaan aan de laatste kennis op dit punt, maar daarmee was nog geen antwoord gegeven op de specifieke bevindingen in de parkeergarage van de Lloydstraat. Daarmee wordt bedoeld dat bij die brand onderschillen van kanaalplaten, of delen daarvan, na relatief korte tijd naar beneden zijn gekomen [2]. Dit schadebeeld kon niet worden verklaard met de kennis over bezwijken op buigend moment of dwarskrachtbreuk. Daarom waren in de BFBN-2009-brief specifiek hiervoor extra maatregelen opgenomen in de vorm van 'extra detailleringseisen'. Deze eisen hielden in:

- beperking van druklaagdikte tot 70 mm in midden van overspanning<sup>3)</sup>;
- beperking druklaagwapening t.p.v. oplegging tot Ø6-150 mm;
- beperking hoogte van koppelwapening;
- eis aan te gebruiken oplegmateriaal.

- 2 Effecten van brand op een constructie
- 3 Kanaalplaat met 'onvervormbare' bovenflens wordt boven de oven gehangen
- 4 Gedrag in dwarsrichting bij opgelegde temperatuurvervorming bij vrij vervormbare kanaalplaat (links) en aan de bovenzijde vastgehouden kanaalplaat (rechts)
- 5 Schematische weergave brandproef



2

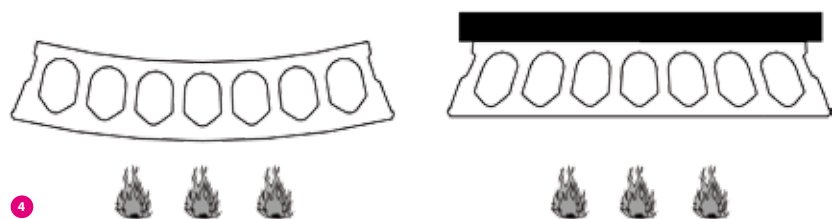
De basisgedachte achter de detailleringseisen bij de oplegging was het beperken van drukspanningen in langsrichting in de onderflens [7], die het gevolg zijn van verhinderde opgelegde (thermische) vervormingen (fig. 2). Door brand wil de verhitte onderzijde uitzetten en de kanaalplaat doorbuigen. Een verhindering van deze (thermische) doorbuiging door een steunpuntwapening of een zeer dikke en stijve druklaag, kan resulteren in een hoge drukspanning in de onderflens [2]. De detailleringseis voor de druklaagdikte was ingegeven door de effecten die een druklaag heeft voor het gedrag in zowel de langs- als dwarsrichting van de kanaalplaten.

### Ervaringen met de tijdelijke maatregelen

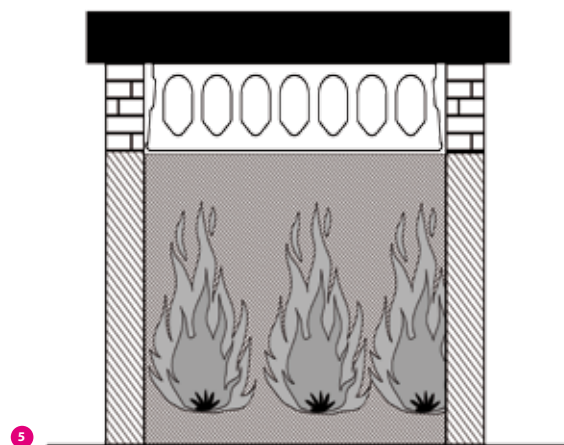
Al snel na de BFBN-2009-brief [3] rezen vanuit de bouwpraktijk vragen over de effectiviteit van de detailleringseisen. Vooral de wapeningsbeperking in de druklaag werd als (onnodig) beperkend ervaren. Een zwaardere wapening in de druklaag is vaak wenselijk om te kunnen voldoen aan eisen in verband met de samenhang van het gebouw en met duurzaamheid en scheurwijdbepaling. Daarnaast zal bij een zwaarder gewapende druklaag de kans dat de schade beperkt blijft tot alleen het bezwijken van de onderschil (en dus het niet bezwijken van de vloer als geheel) alleen maar groter

3





4



5

maken. Al met al genoeg extra redenen om het werkelijke gedrag van kanaalplaten met een druklaag bij brand beter in beeld te krijgen.

### Hypothese

Met het doel de onderzoekrichting voor vervolgonderzoek vast te stellen, vond in april 2010 een 'expertmeeting' plaats met betrekking tot het gedrag van kanaalplaten en brand. Bij deze meeting was een aantal specialisten aanwezig, onder wie de auteurs van dit artikel. Hier kwam naar voren dat de aandacht vooral zou moeten worden gericht op hetgeen zich in dwarsrichting van de kanaalplaten afspeelt. De verwachting was dat in de ongewapende dwarsdoorsnede van de kanaalplaten een mechanisme op zou kunnen treden dat tot losscheuren van de onderschil leidt. Dit ruim voordat zich in langsrichting grote drukspanningen in de onderflens opbouwen. De basisgedachte daarbij was dat bij een 'vastgehouden' bovenschil, bijvoorbeeld door een dikke, stijve druklaag, de thermische uitzetting van de onderschil zou kunnen leiden tot afschuiving van de lijven en daardoor het losscheuren van de onderschil (fig. 3). In lijn met de grondgedachte voor de detailleringseisen, is ook hier de gedachte dat de effecten van opgelegde (thermische) vervormingen belangrijker zijn dan reductie van materiaalsterkte. Wat anders is, is dat de aandacht nu primair is gericht op de dwarsrichting en de afschuif-/treksterkte van 'dammetjes'.

Om de hypothese te verifiëren dat 'vervormingsverhinderend van de bovenflens' primair de oorzaak is voor doorscheuren van dammen en loskomen van de onderschil, is een aantal onderzoeken uitgevoerd. Met deze bril op is nog eens heel goed gekeken naar resultaten van beschikbare brandproeven. Daarnaast zijn verkennende brandproeven en numerieke analyses uitgevoerd en is geprobeerd het gedrag in een simpel rekenmodel te vatten. Navolgend wordt een aantal bevindingen getoond.

### Analyse brandproeven

In [7] was al gerapporteerd dat bij brandproeven soms horizontale scheurtjes zijn vastgesteld op de halve hoogte van de platen, maar dat het in geen van de gevallen heeft geleid tot bezwijken van de testvloer. Daar was overigens ook al aangege-

ven dat de scheurtjes te wijten zouden zijn aan een verschiluitzetting van de bovenflens ten opzichte van de onderflens en dat het vooral bij vloeren met gewapende druklaag was waargenomen. Alle resultaten van beschikbare brandproeven zijn nogmaals geanalyseerd, waarmee hetgeen in [7] was gerapporteerd kon worden bevestigd. Opgemerkt moet wel worden dat brandproeven in het verleden niet waren gericht op het onderzoeken van het fenomeen van scheuren in dammetjes. Feitelijk ging het er bij de proeven om te onderzoeken of de constructie de gewenste brandduur haalde. Als deze voortijdig bezweek was niet te achterhalen wat precies de oorzaak was. Daarnaast was er, als de benodigde brandduur werd gehaald en de proef gestopt, veelal geen aanleiding aanwezige scheurvorming gedetailleerd in kaart te brengen en te rapporteren. Toch zijn enkele brandproeven gevonden waar werd gerapporteerd over horizontale scheurvorming in dammetjes. Inderdaad bleek er dan altijd sprake te zijn van verhinderde vervorming van de bovenflens door de aanwezigheid van een druklaag. Waargenomen scheurvorming in dammen bij enkele proeven zonder druklaag, bleek te kunnen worden verklaard met een verandering door in dwarsrichting toegepaste zware stalen balken voor het aanbrengen van een bovenbelasting. In geen van de beschouwde brandproeven was sprake van loskomen van de onderschil, zoals in de Lloydstraat. Opgemerkt moet worden dat bij brandproeven, ook als een samenstel van een aantal kanaalplaten naast elkaar wordt beproefd, vrijwel nooit sprake zal zijn geweest van eenzelfde opsluiting bij de randen als bij dezelfde kanaalplaten als onderdeel van een totaal vloerveld.

### Verkennde brandproeven

Om de hypothese te verifiëren en inzicht in het mechanisme te vergroten, zijn medio 2010 enkele brandproeven uitgevoerd. Om snel proeven uit te kunnen voeren is gebruikgemaakt van een kleine oven (verwarmd oppervlak van ca. 1,2 m x 1,2 m) bij Efectis Nederland B.V. Allereerst was het de bedoeling na te gaan of inderdaad de onderschil snel losscheurt als de bovenschil geheel wordt verhinderd te vervormen. Daartoe is een 1,2 m brede kanaalplaat met een lengte van 1,2 m en een hoogte van 260 mm voorzien van een extreem dikke en zwaar gewapende bovenlaag. Deze laag was ook nog via ingeboomde ankers aan de bovenflens verbonden (foto 3 / fig. 5). Zoals mocht worden verwacht op basis van eenvoudige mechanica,



6

leidt de (thermische) uitzetting van de onderschil, onder een brandbelasting overeenkomstig de standaard brandcurve, relatief snel (circa 10 minuten) tot scheuren in de dammetjes met als gevolg het losscheuren van de onderschil (foto 6).

Het is duidelijk dat de uitzetting van de onderschil niet kan worden tegengehouden door de dammetjes. In werkelijkheid echter, zal de onderschil tot op zekere hoogte worden verhinderd uit te zetten door de aanwezigheid van een naastgelegen plaat en voegvulling. Ook al is er normaliter een kleine spleet over de onderste circa 20 mm, ter plaatse van de vellingkanten, zou dit kunnen betekenen dat zich weliswaar drukspanningen in de onderflens opbouwen, maar dat afschuiving van de dammetjes niet optreedt of wordt uitgesteld. Met de intentie na te gaan welk effect de voeg heeft, als nog steeds de bovenzijde volledig verhinderd is te vervormen, is een tweede proef met twee volledig opgesloten halve kanaalplaten uitgevoerd (foto 8). Ondanks de verwachting dat in het geval van zijdelingse opsluiting de horizontale scheurvorming zou kunnen uitblijven of later zou optreden, bleek ook nu door scheuren in de dammetjes de onderschil snel (nu iets meer dan 10 minuten) los te komen (foto 7).

Omdat beide proeven werden uitgevoerd met een relatief kort stuk kanaalplaat (1,2 m lang), werd het wenselijk geacht om ook nog een losse kanaalplaat met deze lengte aan een brandproef te onderwerpen. Hiermee moest worden bezien of daarmee ook het gedrag zou worden gevonden, zoals dat bekend is van brandproeven op hele kanaalplaten. Daartoe is

een iets langer stuk kanaalplaat gebruikt, zodat deze op de ovenranden kon worden opgelegd. Als verwacht, trad kromming van de kanaalplaat en scheurvorming in de flenzen op (foto 10) en kon de plaat in deze toestand met gemak een brandduur van 2 uur doorstaan.

Ook al lijken de brandproeven te laten zien dat het gedrag in dwarsrichting dominant is, met de toegepaste lengte van de kanaalplaat van 1,2 m was er bij de proeven natuurlijk ook in langsrichting een vervormingsverschil tussen de onder- en bovenflens. Daarom zijn aanvullende verkennende brandproeven uitgevoerd op proefstukken met een lengte van slechts 150 mm. Met uitzondering van de lengte was de opzet van de proeven gelijk aan de overige proeven. Hoewel bij dergelijke proefstukken in theorie warmteverlies op de kopvlakken een invloed kan hebben, zal dat in de proeven beperkt zijn. Immers, de scheuren treden op een tijdstip op dat de warmte-indringing in de kanaalplaat nog beperkt is tot de onderschil. Er zijn proeven uitgevoerd op zes 'schijfjes' kanaalplaat met een hoogte van respectievelijk 260 mm en 400 mm, terwijl voor de druklaagdikte respectievelijk 50, 75 en 100 mm is toegepast (foto 9). Tijdens de brandproeven ontwikkelde zich opnieuw in een vroeg stadium een scheurenpatroon. De opgetreden scheurenpatronen waren vergelijkbaar met de in de eerdere proeven gevonden resultaten met vooral bij de dikkere druklagen ook scheuren in dammetjes. De scheuren in dwarsrichting bleken dus ook op te kunnen treden in een situatie waarin mechanische effecten in de langsrichting verwaarloosbaar zijn.

7



6 Losgescheurde onderschil in proef met vastgehouden bovenflens

7 Scheurvorming in proefstuk van figuur 8

8 Proefstuk met twee halve kanaalplaten, voeg en aan bovenzijde en zijkanten verhinderde vervorming

9 Twee proefstukken (schijf kanaalplaat met lengte van 150 mm) achter elkaar op de oven

10 Scheurvorming in kanaalplaat zonder druklaag

Voor alle duidelijkheid: de voorgaand beschreven proeven representeren niet direct de situatie van de kanaalplaatvloeren in de praktijk. Maar ze hebben wel bevestigd dat vervormingsverhindering van de bovenflens de oorzaak is voor het mechanisme van scheuren van dammetjes. De vraag is vervolgens tot welke druklaagdikte de verticale scheuren nog optreden, waardoor tijdens de brand min of meer I-vormige liggers ontstaan die de belasting gewoon kunnen blijven dragen, en in hoeverre de detaillering van de voeg hier invloed op heeft.

### Numerieke berekeningen

Met behulp van berekeningen op basis van de eindige-elementenmethode (EEM) kan het gedrag van kanaalplaten worden bestudeerd [8]. In het kader van het onderhavige onderzoek zijn door een aantal betrokkenen berekeningen gemaakt met het programma DIANA<sup>4</sup>). Enkele resultaten van door ABT uitgevoerde simulaties van de verkennende brandproeven zijn navolgend weergegeven.



8



9



10

<sup>4</sup>) EEM-berekeningen zijn gemaakt door ing. A. van den Bos en ing. O. Joosten van ABT en ir. A.B.M. van Overbeek van TNO.

- 11 2D-model (links) en 3D-model (rechts) voor de brandproef met de verhinderde vervorming van de bovenflens
- 12 Vergelijking DIANA-berekening met proefresultaat: Scheurrekken in het DIANA-model en vervormingen vergroot weergegeven



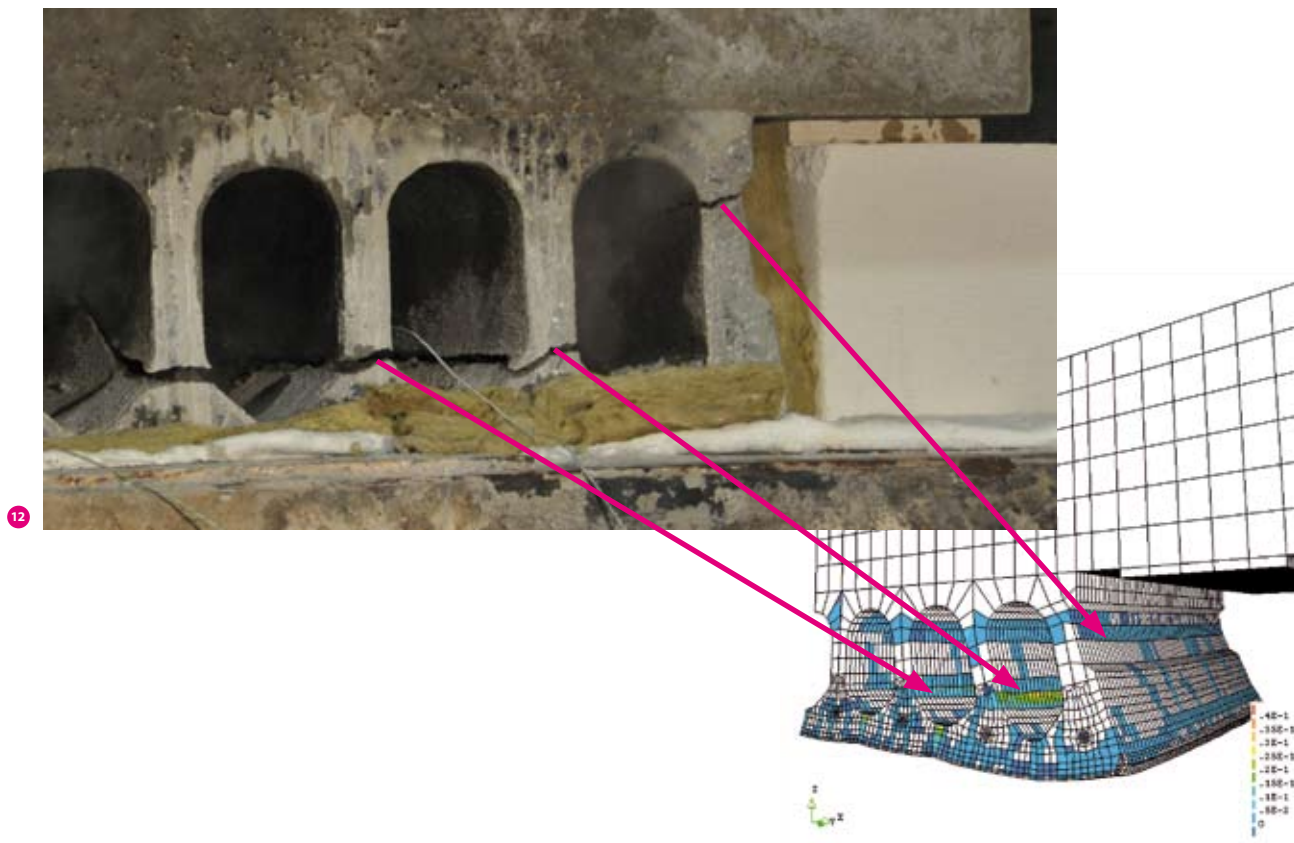
In de EEM-berekeningen zijn de temperatuursafhankelijke materiaaleigenschappen volgens Eurocode 2 [9] toegepast in zowel 2D- als 3D-modellen. De gebruikte modellering voor de brandproef op de kanaalplaat die aan de bovenzijde is verhinderd te vervormen, is weergegeven in figuur 11. Omdat de 3D-berekeningen zeer veel rekentijd vergen, is daar gebruikgemaakt van symmetrie en de helft van het proefstuk gemodelleerd.

Simulatie van de brandproef op de kanaalplaat met vastgehouden bovenflens liet resultaten zien, die zeer goed overeenkomen met hetgeen in de proef is waargenomen (fig. 12). Ook bij de kanaalplaat zonder opstort sloten de resultaten heel goed aan bij de brandproef (fig. 14). De DIANA-berekeningen bevestigen daarmee dat bij een kanaalplaat, waarvan de bovenflens wordt verhinderd te vervormen, de dammen scheuren en

dat de scheuren in de onderflens optreden als de vervorming van de bovenflens wel mogelijk is. In de simulatie van de opgesloten twee halve kanaalplaten met voeg werd niet de scheurvorming gevonden, zoals die in de proef was waargenomen (foto 7). Mogelijk dat dit te maken heeft met het feit dat daarbij op druk en instabiliteit bezwijken waarschijnlijk een rol speelt, hetgeen vooralsnog moeilijker in EEM-modelleringen is te simuleren.

### Analyses met eenvoudig model

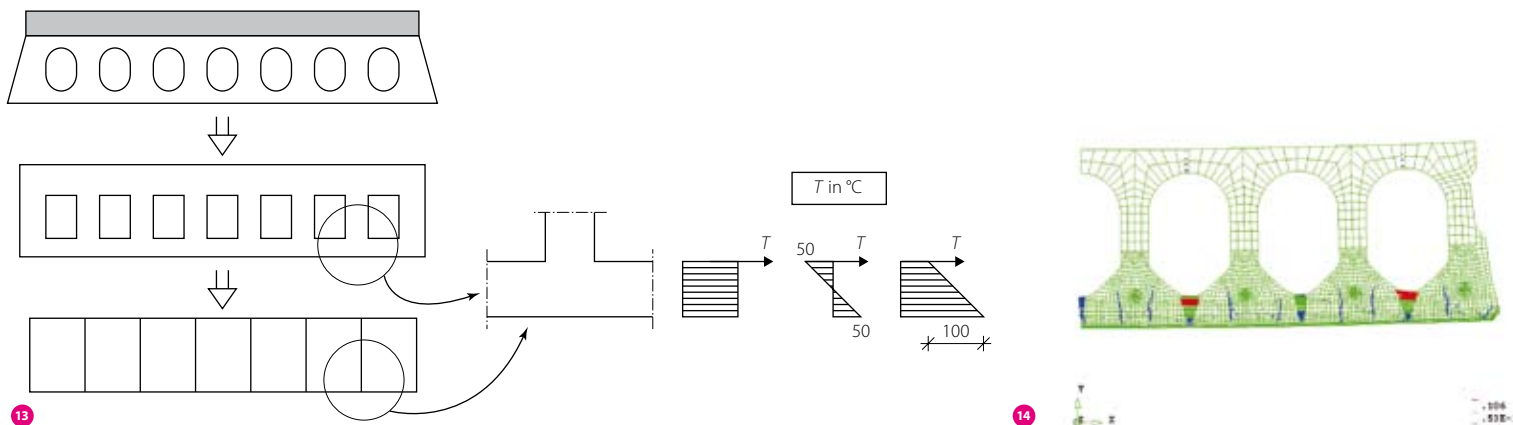
Het gedrag van de kanaalplaat in dwarsrichting, met enerzijds de opgelegde thermische vervorming aan de onderzijde en anderzijds de randcondities aan de bovenzijde (al dan niet verhinderde vervorming), wordt primair bepaald door mechanismen die met eenvoudige mechanica zijn te beschouwen. Dit



13 Eenvoudig model op basis van staafwerken en toegepaste opgelegde temperaturen in de onderschil

14 Scheurrekken in het DIANA-model bij de kanaalplaat zonder opstort

15 Scheurenpatroon, zoals gevonden met het eenvoudige model



maakt het mogelijk ook met een eenvoudig model het gedrag en de invloed van bepaalde factoren te onderzoeken. Dit heeft als voordeel dat direct inzicht wordt verkregen in de mechanismen, zonder mogelijk versturende andere effecten. Analyses met eenvoudige modellen zijn uitgewerkt door Efectis Nederland B.V.<sup>5)</sup>

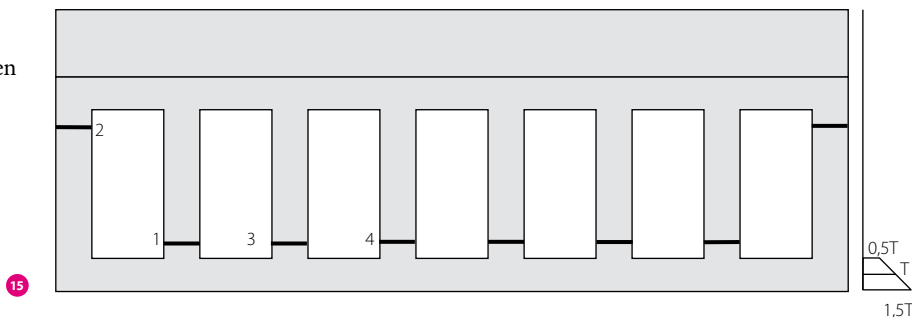
Er is gewerkt met een tweedimensionaal lineair elastisch staafwerkmodel met een constante doorsnede voor de staven en temperatuursonafhankelijke materiaaleigenschappen (fig. 14). Dit is een vergelijkbare aanpak, zoals is toegepast door prof. Kleinman [10]. De doorsnede van de staafelementen is gekozen op basis van een kanaalplaat met een hoogte van 260 mm, waarbij voor de aanwezigheid van een druklaag de doorsnede van de bovenste staafelementen conform is aangepast. Voor de temperatuurbelasting op de onderschil is gerekend met een uniforme temperatuurstijging in de onderschil (verschil tussen onder- en bovenschil 100 °C), een gradiënt over de onderschil (verschil tussen onder- en bovenzijde van de onderschil 100 °C) en een combinatie van temperatuurstijging en gradiënt in de onderschil (fig. 14).

Alvorens enkele resultaten te laten zien, eerst kort aandacht voor de situatie van volledige opsluiting. Hierbij gaat het vooral om het feit dat de onderschil wordt verhinderd te verlengen. In die omstandigheid wordt de opgelegde thermische vervorming direct omgezet in thermische spanningen (fig. 2). Met  $\sigma = E \cdot \varepsilon = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$  is direct te zien dat bij een elasticiteitsmodulus  $E$  van 35 000 MPa en een thermische uitzettingscoëfficiënt  $\alpha$  van  $10^{-5}$  een drukspanning van 45 MPa al bij 130 °C wordt bereikt. Bij een brand conform de standaardbrandkromme, die wordt gehanteerd bij berekening of beproeving volgens NEN- en EN-standaarden, wordt dit al na enkele minuten bereikt.

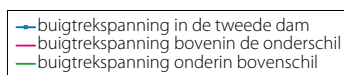
Met het staafwerkmodel is onderzocht welke normaalkrachten en buigende momenten in de flenzen en dammetjes ontstaan bij verschillende randvoorwaarden voor de bovenschil (vast of vrije vervorming). De opgelegde thermische vervorming (kromming) van de kanaalplaat blijkt hoofdzakelijk het gevolg van een gemiddelde opwarming van de onderschil. De temperatuurgadiënt over de onderschil draagt daar slechts in beperkte mate aan bij. Voor de dammetjes geldt dat de temperatuurgadiënt alleen voor de buitenste dam resulteert in een buigend moment. Dit is tegengesteld aan het buigend moment ten gevolge van de uniforme opwarming van de onderschil. Het resultaat is dat het grootste buigend moment in de op een-na-laatste dam optreedt en niet in de laatste. Naast buigende momenten ontwikkelen zich ook normaalkrachten in de dammetjes. Een drukkracht in de buitenste dam maakt evenwicht met trekkrachten (naar het midden van de kanaalplaat toe afnemend) in de overige dammetjes. Voor een kanaalplaat met een dikke druklaag is een scheurenpatroon gevonden dat overeenkomt met de proeven en de EEM-berekeningen (fig. 15). Hierbij wordt opgemerkt dat de tijdstippen waarop de scheuren ontstaan zo dicht bij elkaar liggen dat die vrijwel gelijktijdig optreden.

Het is ook goed mogelijk gebleken voor de krachtswerking in dwarsrichting van de kanaalplaat een analytisch model op te zetten. Hiermee worden dezelfde resultaten gevonden als met het staafwerkmodel.

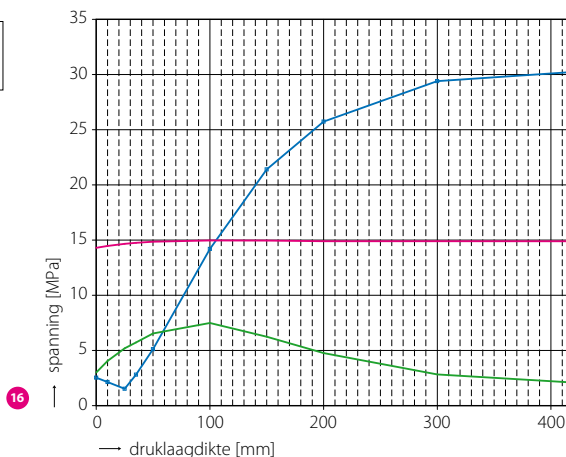
<sup>5)</sup> De analyses op basis van eenvoudige modellen zijn opgesteld door ir. A. Breunese van Efectis Nederland B.V.







16 Buigtrekspanningen als functie van druklaagdikte



### Parameterstudie

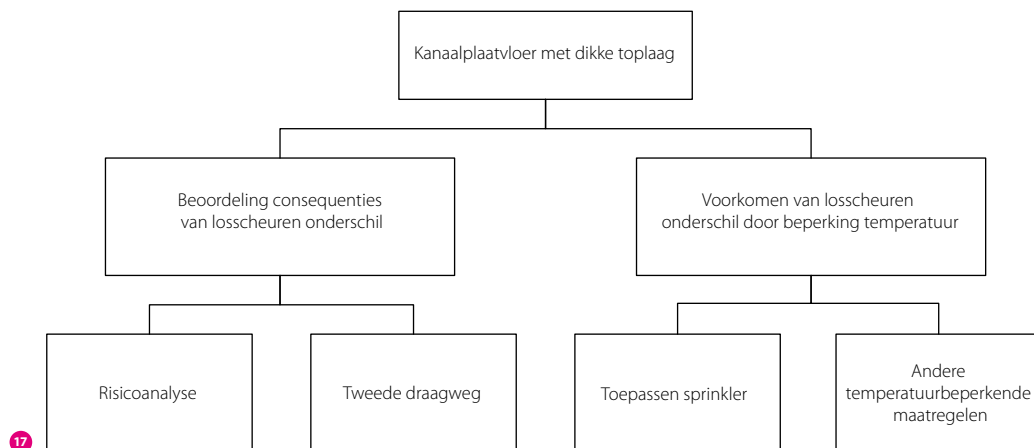
De bevindingen, zoals die voorgaand zijn beschreven, laten zien dat voor de krachtswerking in dwarsrichting de vervormingsvrijheid van de kanaalplaat bepalend is voor het al dan niet losscheuren van de onderschil. Als die vervormingsvrijheid er is, zullen als eerste, en relatief snel, verticale scheuren in de flenzen onder en boven kanalen optreden, waarna de dammetjes niet meer scheuren. Er is dan min of meer een 'balkenvloer' van naast elkaar gelegen I-vormige liggertjes ontstaan, die nog goed in staat is belasting te dragen. Als daarentegen de kanaalplaat wordt verhinderd te vervormen door een verbinding van de bovenflens met een stijve druklaag, dan scheuren de dammetjes en resteert na bezwijken van de onderflens alleen de bijna ongewapende bovenflens met de gewapende druklaag. Het scheuren van de dammetjes is bij een flexibele voeg, waarbij de onderflens zijdelings kan uitzetten, het gevolg van buiging in de dammetjes. Indien de zijdelingse randconditie een stijve voeg is, dan zijn de scheuren in de dammetjes het gevolg van hoge drukspanningen in de onderflens, mogelijk in combinatie met tweede-orde-effecten (naar onder uitknikken). Feitelijk komt dit mechanisme van de hoge drukspanning in dwarsrichting overeen met de beschouwingen voor de langsrichting die mede ten grondslag hebben gelegen aan de detailleringregels in de BFBN-2009-brief [3].

Voor de beoordeling van de brandwerendheid van een kanaalplaatvloer zou het fijn zijn als bekend is bij welke druklaagdikte de overgang ligt van scheuren in flenzen naar scheuren in dammetjes. Naast het feit dat daarbij het totale samenspel van de verschillende kanaalplaten in de vloer mogelijk een rol speelt, is een eerste vraag waar die overgang ligt bij de gebruikte modellen. Om te proberen daar inzicht in te krijgen, is met het eenvoudige staafwerkmodel met DIANA een parameterstudie uitgevoerd. Voor verschillende dikten van de druklaag is gekeken naar de grootste (buig)trekspanning in respectievelijk de onderschil, de dammen en de bovenschil. Voor verschillende kanaalplaatafmetingen bleek een zelfde tendens te worden gevonden. Het resultaat voor de 260 mm hoge kanaalplaat is in figuur 16 weergegeven.

De trekspanning is (boven)in de onderschil relatief groot. Dit is primair het gevolg van de opgelegde temperatuurgradiënt. Doordat de onderschil in dwarsrichting gemiddeld onder druk staat, zal deze niet in zijn geheel doorscheuren. De spanning in de bovenschil neemt in eerste instantie toe met toenemende druklaagdikte en vervolgens af. Dit kan worden begrepen, als wordt bedacht dat bij dunne druklaag de bovenschil met druklaag de opgelegde vervorming volgt, waarbij een grotere dikte resulteert in een hogere trekspanning. Anderzijds resulteert een grotere druklaagdikte in meer vermindering van de vervorming en daardoor een geringere spanning. Bij toenemende druklaagdikte is er een geleidelijke overgang van het ene naar het andere mechanisme. Verondersteld wordt dat als de grootste trekspanning in de bovenschil (groene lijn) groter is dan de grootste trekspanning in de tweede dam (blauwe lijn), het eerst scheuren van de bovenschil (en dan ook onderschil) ertoe leidt dat er vrijheid is om te vervormen. Hierdoor zullen de dammen naar verwachting niet meer scheuren. Voor de verschillende plaathoogten is een overgang gevonden die ligt bij waarden van circa 55 tot 75 mm druklaagdikte.

De hier beschreven aanpak beschrijft de locatie van de maximale spanning in de doorsnede, oftewel de 'eerste scheur' in de doorsnede. Bij het optreden van de eerste scheur in een dam zijn de overige dammen nog ongescheurd, zodat er nog geen sprake is van een doorgaande breuk van de gehele plaat. Daarom is met het model tevens gekeken in hoeverre het optreden van de eerste scheur de spanningsverdeling beïnvloedt, en waar dus de volgende scheur ontstaat. Hiertoe is in het model een stapsgewijze aanpak gevolgd, waarbij steeds het elementje met maximale spanning als 'doorgescheurd' wordt beschouwd en uit het model wordt verwijderd. Dit kan worden herhaald totdat een doorgaand scheurpatroon (van welke vorm dan ook) is gevonden. Daarbij blijkt dat het uiteindelijke scheurpatroon combinaties bevat van horizontale en verticale scheuren en sterk afhankelijk is van de doorsnedegeometrie van de plaat.

17 Voorgestelde aanpak voor kanaalplaatvloeren met dikke toplaag [1] (gelijktijdig gehanteerde combinaties van de rechter en linkerhelft zijn ook mogelijk)



## Overwegingen

Het onderzoek heeft het inzicht in het gedrag in dwarsrichting bij kanaalplaten en brand aanzienlijk vergroot. Maar wat moeten die bevindingen nu betekenen voor het construeren met kanaalplaatvloeren? Dat is een belangrijke vraag, waar de BFBN-begeleidingscommissie 'Brand' zich het hoofd over heeft gebogen. Daarbij is ook het feit in ogenschouw genomen dat er geen expliciete gevallen bekend zijn waarbij de horizontale scheuren vroegtijdig tot ernstige schade aan de totale draagconstructie of ongevallen hebben geleid. Bedacht moet ook worden dat in de verkennende proeven en de toegepaste modellen slechts een klein geïsoleerd deel van een kanaalplaat is beschouwd. Hoe een kanaalplaatvloer als geheel reageert, is nog niet goed bekend en ongetwijfeld spelen de randcondities van het vloerveld ook een rol. Anderzijds is het zo dat nabij de opleggingen van de kanaalplaat ook de vervorming in dwarsrichting wordt verhinderd. Ook is het zo dat in werkelijkheid nooit direct onder het gehele vloerveld een brandbelasting overeenkomstig de standaard brandkromme optreedt, ook al moet daar op basis van de voorschriften wel mee worden gerekend. Al met al genoeg redenen om onderzoek naar het gedrag van kanaalplaten bij brand voort te zetten. Er is dan ook vervolgonderzoek in gang gezet om de inzichten in het gedrag binnen twee à drie jaar verder te vergroten [1]. De BFBN-begeleidingscommissie 'Brand' adviseert op basis van de voorgaande overwegingen om voor kanaalplaatvloeren de maatregelen volgens [1] toe te passen. Deze maatregelen worden navolgend kort toegelicht.

Naast analyses van het bezwijkgedrag, zoals voorgaand uitgebreid is besproken, is gekeken naar de mogelijkheden van risicobeschouwingen en tweede-draagwegprincipes. Het bezwijken van de onderschil is op zichzelf geen probleem. Dit is een lokale schade en als dit niet leidt tot het bezwijken van de vloer dan is dit geen vraagstuk in het kader van de bouwregelgeving.

Een mogelijke aanpak is om zodanig te ontwerpen dat bij brand de vloer het zonder de onderschil houdt. Omdat in die situatie mag worden gerekend zonder partiële factoren en met slechts de momentane belasting, is het mogelijk om met niet al te veel wapening in de druklaag te laten zien dat de vloer niet bezwijkt zonder de onderschil. In [11] is een uitwerking getoond.

## Nieuwe maatregelen

Op basis van de inzichten in het gedrag van kanaalplaatvloeren bij brand heeft de begeleidingscommissie ervoor gekozen de dikte van de toplaag als belangrijkste parameter te kiezen voor aanvullende maatregelen in verband met losscheuren van de onderschil. Navolgend wordt toegelicht wat onder de dikte van de toplaag wordt verstaan. Voor de twee uitersten was het duidelijk. Bij kanaalplaatvloeren zonder toplaag zijn geen aanvullende maatregelen benodigd en bij aanwezigheid van een dikke toplaag wel. Alvorens in te gaan op de wijze waarop de overgang tussen deze uitersten is ingevuld, wordt eerst ingegaan op de voorgestelde maatregelen voor kanaalplaatvloeren met dikke toplagen. Bij het opstellen van de maatregelen is een aanpak gevolgd die aansluit op NEN-EN 1991-1-7 [12]. Daarin zijn strategieën beschreven voor het omgaan met 'buitengewone ontwerpsituaties'. Het losscheuren van de onderschil kan in dit verband worden beschouwd als buitengewone ontwerpsituatie met een bekende buitengewone belasting. De aanpak is gebaseerd op risiconiveaus, ofwel betrouwbaarheidsniveaus. Met een risicoanalyse kan worden bepaald wat het risiconiveau is en als dat niet kan worden aanvaard, dan zijn aanvullende maatregelen noodzakelijk. Maatregelen kunnen zijn gebaseerd op het creëren van voldoende robuustheid van de rest van de constructie bij het optreden van lokaal bezwijken of het voorkomen van lokaal bezwijken. In analogie met NEN-EN 1991-1-7 [12] is dat in de BFBN-2011-brief [1] uitgewerkt naar vier mogelijke maatregelen. In figuur 17 is dat schematisch weergegeven. Hierbij zijn risicoanalyse en tweede draagweg arbitrair gerangschikt onder het kopje 'beoordeling consequenties'.

Bij toepassing van een kanaalplaatvloer met een dikke druklaag kan men er dus voor kiezen een risicoanalyse uit te voeren. Hoe dat moet worden gedaan is beschreven in NEN-EN 1991-1-7 [12]. Als het risiconiveau aanvaardbaar laag is, dan zijn geen maatregelen nodig. Als dat wel zo is, dan zal dus toch één van de andere drie maatregelen nodig zijn. Omgekeerd is het zo dat, als er al voor wordt gekozen met brandbeschermende maatregelen de temperatuur van het betonoppervlak gedurende de wettelijk geëiste tijdsduur te beperken tot maximaal 200 °C, een risicoanalyse of andere maatregelen niet meer nodig zijn. Gaat het echter om een bouwwerk van gevolgklasse 2b of 3 volgens NEN-EN 1991-1-7 dan zijn aanvullende beschouwingen nog wel steeds noodzakelijk. Voor de tweede draagweg beschouwing geldt dat bij de kanaalplaatvloer met de dikke toplaag er vanuit moet worden gegaan dat de onderschil ontbreekt. Een mogelijkheid om een tweede draagweg te

creëren is bijvoorbeeld het toepassen van voldoende wapening in de constructieve druklaag [11].

Er is voor gekozen naast de toplaagdikte, de gevolgklasse voor gebouwen volgens NEN-EN 1991-1-7 [12] te gebruiken voor een differentiatie in toepassingen waarvoor extra maatregelen worden aanbevolen. In tabel 1 is de indeling in gevolgklassen voor gebouwen weergegeven. Voor de gevolgklassen zijn in NEN-EN 1991-1-7 [12] strategieën aangegeven, die er toe moeten leiden dat een gebouw een aanvaardbaar niveau van robuustheid heeft om lokaal bezwijken te doorstaan zonder een disproportioneel niveau van instorting. Met betrekking tot de aanbevolen strategieën geldt volgens de informatieve bijlage A van NEN-EN 1991-1-7 [12] onder andere voor gebouwen in:

- **gevolgklasse 1** dat geen specifieke beschouwing noodzakelijk is voor buitengewone belastingen, als het is ontworpen, berekend en gebouwd volgens de normen voor voldoende stabiliteit bij normaal gebruik;
- **gevolgklasse 2a** dat maatregelen behoren te worden toegepast, waarbij het aanbrengen van effectieve horizontale trekbanden één van de aangegeven mogelijkheden is;
- **gevolgklasse 2b** dat het controleren op de situatie van een denkbeeldig verwijderd dragend element een mogelijke strategie is als alternatief voor het toepassen van trekbanden;
- **gevolgklasse 3** dat een systematische risicoanalyse van het gebouw behoort te zijn uitgevoerd.

In de BFBN-2011-brief [1] is met een tabel aangegeven in welke omstandigheden het nodig is één van de vier mogelijke maatregelen (fig. 17) toe te passen, aangeduid met 'A' en onder welke omstandigheden dat niet noodzakelijk wordt geacht. Met de aanpak is aangesloten bij de systematiek voor buitengewone belastingen in NEN-EN 1991-1-7 [12]. De grondgedachte achter de aanpak in de tabel is dat het al dan niet optreden van losscheuren van de onderschil onafhankelijk is van het type gebouw (gevolgklasse) of de vereiste brandwerendheid, uitgedrukt in 30, 60, 90 of 120 minuten. Hierdoor is feitelijk alleen de dikte van de toplaag onderscheidend voor het al dan niet moeten toepassen van maatregelen (A). Echter, voor gevolgklasse 1 en voor gevolgklasse 2a tot een toplaagdikte van 70 mm wordt de kans op persoonlijk letsel, die uit een risicoanalyse volgt, voldoende klein geacht, zodat automatisch is voldaan aan de eis. Men zou ook kunnen zeggen dat er in de gevolgde aanpak voor is gekozen dat het eerder nodig wordt geacht maatregelen te nemen als (zie ook tabel 2):

- de kans van losscheuren van de onderschil groter wordt (dikkere toplaag);
- de gevolgen, ofwel risico's, van het losscheuren van de onderschil groter worden (hogere gevolgklasse).

**Tabel 1** Indeling in gevolgklassen volgens NEN-EN 1991-1-7 [12] met voorgestelde aanpassingen voor de Nationale Bijlage in Nederland

Gevolgklasse	Voorbeeld van indeling van soorten gebouwen en het gebruiksdoel
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Woonhuizen van maximaal vier bouwlagen</li> <li>– Gebouwen met agrarische bestemming</li> <li>– Gebouwen waarin zich niet veel personen ophouden, mits geen enkel deel van het gebouw zich dichters dan een afstand van 1 ½ maal de gebouwhoogte bij een ander gebouw, of een gebied waar zich wel personen ophouden, bevindt</li> </ul>
2a risicogroep laag	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Woonhuizen van vijf bouwlagen</li> <li>– Hotels van maximaal vier bouwlagen</li> <li>– Flats, appartementen en andere woongebouwen van maximaal vier bouwlagen.</li> <li>– Kantoren van maximaal vier bouwlagen</li> <li>– Industriële gebouwen van maximaal drie bouwlagen</li> <li>– Parkeergarages van maximaal drie bouwlagen<sup>6)</sup></li> <li>– Winkels van maximaal drie bouwlagen met een vloeroppervlak kleiner dan 1000 m<sup>2</sup> per bouwlaag</li> <li>– Onderwijsgebouwen van één bouwlaag</li> <li>– Alle openbare gebouwen van maximaal twee bouwlagen en met vloeroppervlakten van niet meer dan 2000 m<sup>2</sup> per bouwlaag</li> </ul>
2b risicogroep hoog	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Hotels, flats, appartementen en andere woongebouwen van meer dan vier bouwlagen maar met een maximale hoogte van de voor verblijf van mensen bestemde vloer van 70 m<sup>7)</sup></li> <li>– Onderwijsgebouwen van meer dan één bouwlaag maar met een maximale hoogte van de voor verblijf van mensen bestemde vloer van 70 m<sup>7)</sup></li> <li>– Winkels van meer dan drie bouwlagen, maar met een maximale hoogte van de voor verblijf van mensen bestemde vloer van 70 m<sup>7)</sup></li> <li>– Ziekenhuizen van maximaal drie bouwlagen</li> <li>– Kantoren van meer dan vier bouwlagen, maar met een maximale hoogte van de voor verblijf van mensen bestemde vloer van 70 m<sup>7)</sup></li> <li>– Alle openbare gebouwen met vloeroppervlakten van meer dan 2000 m<sup>2</sup> maar van niet meer dan 5000 m<sup>2</sup> per bouwlaag</li> <li>– Parkeergarages van maximaal zes bouwlagen</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Alle gebouwen hierboven vermeld als gevolgklasse 2 laag en hoog, die buiten de grenzen van oppervlakte of aantal bouwlagen vallen</li> <li>– Alle gebouwen waarin publiek in grote aantallen is toegelaten</li> <li>– Stadions voor meer dan 5000 toeschouwers</li> <li>– Gebouwen met gevaarlijke stoffen en/of processen</li> </ul>

<sup>6)</sup> Dit is een aanvulling op [12], die ter vaststelling voorligt bij de normcommissie.

<sup>7)</sup> In [12] wordt gesproken over maximaal 15 bouwlagen. Deze aanpassing ligt voor ter vaststelling door de normcommissie.

Voor gevolgklasse 2b moet bij toepassing van de Eurocodes volgens NEN-EN 1991-1-7 zijn aangetoond dat de risico's voldoende klein zijn. Dat geldt voor elke constructie en dus ook voor een kanaalplaatvloer met een toplaagdikte tot en met 50 mm. Bij een tweededraagwegberekening mag er in dit geval vanuit worden gegaan dat de onderschil niet is losgescheurd. Als echter een tweededraagwegberekening wordt gekozen als invulling van maatregel A voor een kanaalplaatvloer met een toplaagdikte groter dan 50 mm, dan moet er vanuit worden gegaan dat de onderschil is bezwaken. Met een berekening op basis van zeil(membraan)werking, waarbij eventueel ook de bovenschil van de kanaalplaat met wapening wordt meegerekend, zal dan mogelijk kunnen worden aangetoond dat de vloer onder brandomstandigheden gedurende de geëiste tijdsduur niet bezwijkt. Het feit dat grote doorbuigingen kunnen optreden, is niet belangrijk, als de buitengewone belastingscombinatie nog maar kan worden weerstaan. Een aandachtspunt daarbij is wel dat de randkrachten moeten kunnen worden opgenomen door de aansluitende constructie. Ook voor de verplichte risicoanalyse volgens NEN-EN 1991-1-7 voor gevolgklasse 3 geldt dat voor toplagen tot en met 50 mm mag worden aangenomen dat de onderschil niet bezwijkt, ook als geen maatregelen in de vorm van temperatuurbepijking of toepassing van een sprinklerinstallatie, worden genomen.

Hoewel het in de praktijk gebruikelijk is te spreken van (constructieve) druklaag, is bij het opstellen van de maatregelen bewust gekozen voor de term 'toplaag'. De reden is dat niet alleen een constructieve druklaag bijdraagt aan de vervormingsverhijndering van de bovenflens van de kanaalplaat, maar

ook een eventueel toegepaste afwerklaag. Voor de bepaling van de dikte van de toplaag, moet de dikte van de afwerklaag bij de dikte van de druklaag worden opgeteld, tenzij er maatregelen zijn genomen om de afwerklaag los te houden van de druklaag. Als de kwaliteit van de afwerklaag erg laag is, zal de bijdrage aan de verhijndering van de vervorming relatief beperkt zijn. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat stijfheid (elasticiteitsmodulus) niet rechtevenredig is met de sterkte (bij een lage sterkte kan nog steeds sprake zijn van een relatief grote stijfheid). Het advies is daarom afwerklaagen tot een druksterkteklasse van maximaal D15 voor de helft mee te rekenen in de berekening van de toplaagdikte. Voor sterktes hoger dan de gedefinieerde sterkte bij D15 wordt de gehele dikte van de cementgebonden afwerklaag meegenomen voor de bepaling van de toplaagdikte.

### Tot besluit

De bij het onderzoek betrokken organisaties zijn van mening dat met de voorgestelde nieuwe maatregelen in voldoende mate tegemoet wordt gekomen aan de huidige inzichten over het gedrag van kanaalplaatvloeren bij brand. Er is vervolgonderzoek in gang gezet om de inzichten in het gedrag binnen twee à drie jaar nog weer verder te vergroten. ☒

Tabel 2 Toepassen van maatregelen A als functie van toplaagdikte en gevolgklasse [1]

	$t \leq 50$ mm	$50 \text{ mm} < t \leq 70$ mm	$t > 70$ mm
1	-	-	-
2a	-	-	A
2b	-	A	A
3	-	A	A

### LITERATUUR

- 1 BFBN-brief van Pielkenrood d.d. juni 2011. Betreft: Beoordeling van kanaalplaatvloeren bij brand. In bijlage: Aanbevolen bepalingsmethode voor de brandwerendheid van kanaalplaatvloeren.
- 2 Welling, W. & van Paassen, A., Brand in parkeergarage. *Cement* 2009/7.
- 3 BFBN-brief van Pielkenrood met kenmerk 09.055.16269.WWE/YHE, d.d. 16 november 2009. Betreft: nader onderzoek brand Lloydstraat te Rotterdam. Bijlagen: Bijlage 1: Managementsamenvatting; Bijlage 2: Schema voor de bepaling van de brandwerendheid van kanaalplaatvloeren.
- 4 NEN 6071, Rekenkundige bepaling van de brandwerendheid van bouwdelen – Betonconstructies. Nederlands Normalisatie-Instituut (NEN), december 2001.
- 5 Fellingier, J.H.H., Shear and anchorage behaviour of fire exposed hollow core slabs. Proefschrift TU Delft, 2004.
- 6 EN 1168:2005 Precast concrete products – Hollow core slabs. Proposal for amendment 3 (inclusief de informatieve Annex G 'Resistance to fire'), Approved by TC229 on 2010/06/17.
- 7 Acker, A. van, Brandveiligheid kanaalplaatvloeren. *Cement* 2009/7.
- 8 Van den Bos, A. & Joostenz, O., Brandsimulatie op beton. *Cement* 2009/7.
- 9 EN1992-1-2 Eurocode 2 deel 1-2: 'Ontwerp en berekening van constructies bij brand'. 2005.
- 10 Kleinman, C.S., Kanaalplaatvloer in dwarsrichting bij brand. *Cement* 2011/5.
- 11 Klösters, G., Klein-Holte, R., Van Dongen, A.J., Nieuwe maatregelen kanaalplaatvloeren (2). *Cement* 2011/5.
- 12 NEN-EN 1991-1-7 Eurocode 1 – Belastingen op constructies, deel 1-7: Algemene belastingen – Buitengewone belastingen: stootbelastingen en ontploffingen, september 2006.