

7 | Brandschade

Gotthardtunnel, oktober

2001

www.polizia.ti.ch



Constructief gedrag van boortunnels tijdens brand

Brand in boortunnels

ir. B.B.G. Lottman, TU Delft, faculteit CiTG¹⁾

dr.ir. C.B.M. Blom, Ingenieursbureau Gemeentewerken Rotterdam / TU Delft, faculteit CiTG

dr.ir. E.A.B. Koenders, TU Delft, faculteit CiTG, Microlab

ir. V. Bouwman, ABAQUS Benelux bv²⁾

prof.dr.ir. J.C. Walraven, TU Delft, faculteit CiTG

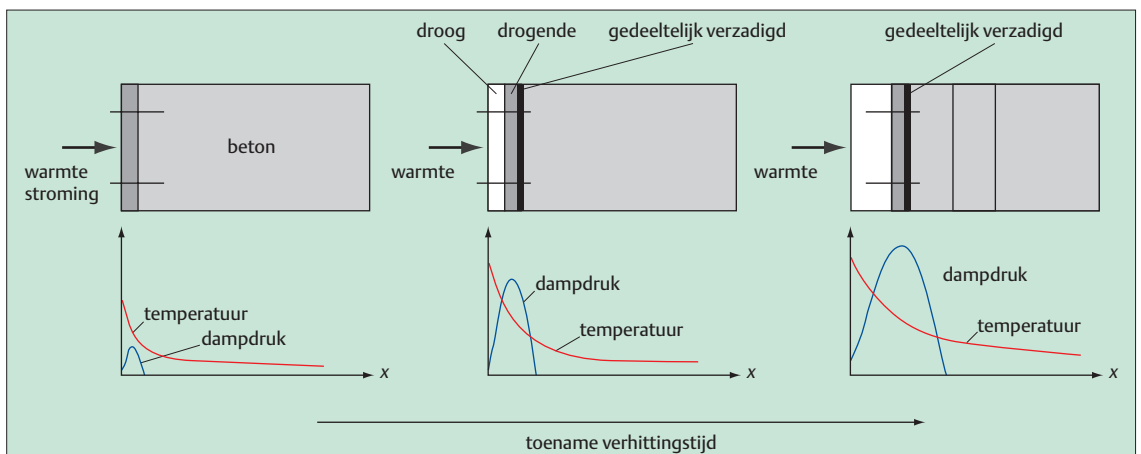
De afgelopen jaren hebben er in Europa verscheidene grote tunnelbranden plaatsgehad. De meest bekende zijn die in de Mont Blanctunnel, de Gotthardtunnel (foto 1) en de Kanaaltunnel (foto 2). De meeste van deze tunnelbranden hadden gewonden en soms zelfs dodelijke slachtoffers tot gevolg. De schade aan de tunnel was in sommige gevallen zelfs zo ernstig, dat de constructieve draagkracht ervan werd bedreigd. Uiteindelijk was er altijd sprake van economische schade door herstellkosten, verlies aan inkomsten voor de tunnelbeheerders en oponthoud of omrijden van het verkeer. Tunnelbranden kunnen een serieuze impact hebben op het maatschappelijk leven, reden waarom meer kennis omtrent het gedrag van betonconstructies tijdens brand wenselijk is, vooral ten aanzien van (explosief) afspringen van beton.

Spatten van beton

Als beton wordt blootgesteld aan hoge temperaturen tijdens brand, wordt eerst het oppervlak en daarna, door thermische geleiding, de doorsnede van buiten naar binnen geleidelijk verhit (fig. 3). Op het moment dat het beton de grens

van 100 °C passeert, resulteert deze verhitting in een verdamping van het 'vrije water' in de gel- en capillaire poriën van het beton. Deze faseverandering gaat gepaard met een volumevergroting, die door de geslotenheid van

de poriën resulteert in een toename van de druk in deze poriën. Door de aanwezigheid van een temperatuurgradiënt over de doorsnede ontstaat ook een poriedrukgradiënt, die ervoor zorgt dat de gevormde waterdamp gaat stromen, in het begin van de brand voornamelijk in de richting van het verhitte oppervlak. Echter, na verloop van tijd zal steeds meer waterdamp het diepere, koelere gedeelte van de betondoorsnede instromen, waar het condenseert tot water. Hierdoor ontstaat geleidelijk een laag in de betondoorsnede waar de poriën geheel of gedeeltelijk zijn gevuld met water. Deze laag ontwikkelt zich verder, waardoor het drukverschil geleidelijk onvoldoende wordt om de waterdamp en het water dieper in het beton af te laten vloeien. Hierdoor stroomt de waterdamp minder snel af en door de stijgende temperatuur zal de druk in de poriën toenemen. Wanneer het



3 | Ontwikkeling van temperatuur en dampdruk in beton bij eenzijdige verhitting

¹⁾ ir. B.B.G. Lottman is op dit onderzoek afgestudeerd aan de TU Delft; de studie is uitgevoerd in samenwerking met ABAQUS Benelux bv. De afstudeercommissie bestond uit dr.ir. C.B.M. Blom, ir. V. Bouwman, dr.ir. P.C.J. Hoogenboom, dr.ir. E.A.B. Koenders, ir. T. van Overbeek en prof.dr.ir. J.C. Walraven. ir. Lottman ontving hiervoor de ENCI Studieprijis 2007 en is momenteel als promovendus betrokken bij het project 'Explosive spalling of concrete'. Dit project is gefinancierd door de Stichting Technische Wetenschappen (STW) en heeft als doel meer inzicht te krijgen in het proces dat leidt tot het afspringen van beton en het ontwikkelen van een model dat het afspringen van beton beschrijft.

²⁾ ABAQUS is een multi-purposse eindige-elementen-programma van SIMULIA.



water van deze verzadigde laag verdampt, zal de waterdamp voornamelijk in de richting van het verhitte oppervlak stromen. Echter, in de richting van het oppervlak neemt de temperatuur toe, hetgeen ervoor zorgt dat de waterdamp verder uitzet. De structuur van de poriën verhindert deze uitzetting, waardoor er langs de wanden van de poriën wrijvingskrachten ontstaan, die de stroming van waterdamp verhinderen. Dit proces resulteert in een oplopende druk, waarbij de maximale druk wordt bereikt op het moment dat evenveel waterdamp wordt gevormd als er afstroomt of als de oplopende poriedruk de sterkte van het beton overschrijdt (fig. 3). In het laatste geval leidt dit tot het afspatten van een laag beton met een dikte van ongeveer de dikte van de gedroogde laag.

Na het afspatten begint het proces opnieuw, waarna eventueel weer een laag van het beton kan afspaten. Deze vorm van spatten wordt in het Engels 'progressive spalling' genoemd. De doorsnede wordt in de loop van de tijd gereduceerd en tevens zullen de hoge temperaturen een afname van sterkte en stijfheid van het resterende betongedeelte tot gevolg hebben. Daarnaast wordt, indien de dekking eraf spat, de wapening blootgesteld aan zeer hoge temperaturen, waardoor ook de sterkte en stijfheid van het staal afnemen. Deze combinatie van factoren zorgt ervoor dat de constructieve draagkracht van de betonddoorsnede tijdens een brand significant afneemt.

Invloedsfactoren

Het afspatten van beton wordt in hoge mate bepaald door de permeabiliteit van het beton. Als de permeabiliteit van het beton afneemt, is de poriënstructuur van het beton slecht verbonden (connectiviteit) en neemt de kans op afspatten toe. Aanvullende materiaalfactoren die het afspatten van beton beïnvloeden zijn de porositeit, de initiële verzadigingsgraad en de treksterkte van het beton.

Wanneer de porositeit afneemt en/of de initiële verzadigingsgraad toeneemt, neemt het aantal lege poriën af en neemt de kans op afspatten toe. Daarnaast is de verhittingsgraad van het beton van groot belang. De verhittingsnelheid is bepalend voor de snelheid waarmee het water verdampt en de poriedruk zich ontwikkelt. De kans op afspatten neemt toe als deze verhittingsgraad ook toeneemt.

Aanvullende constructieve factoren die het afspatten van beton beïnvloeden zijn het aantal zijden dat wordt verhit en de belasting. Een constructie die meerzijdig wordt verhit zal een hogere verhittingsgraad hebben. De belasting van de constructie bepaalt de spanningsverdeling in de constructie. Drukspanningen aan het oppervlak van de doorsnede, bijvoorbeeld door de temperatuurgradiënt, drukken ontstane scheuren dicht, waardoor de spanningen in de randzone toenemen, de permeabiliteit lokaal wordt verminderd en de kans op afspatten daardoor toeneemt. Daarnaast reduceren trekspanningen in de doorsnede de capaciteit van het

beton dat de opbouw van poriedrukken moet weerstaan.

Analytisch model

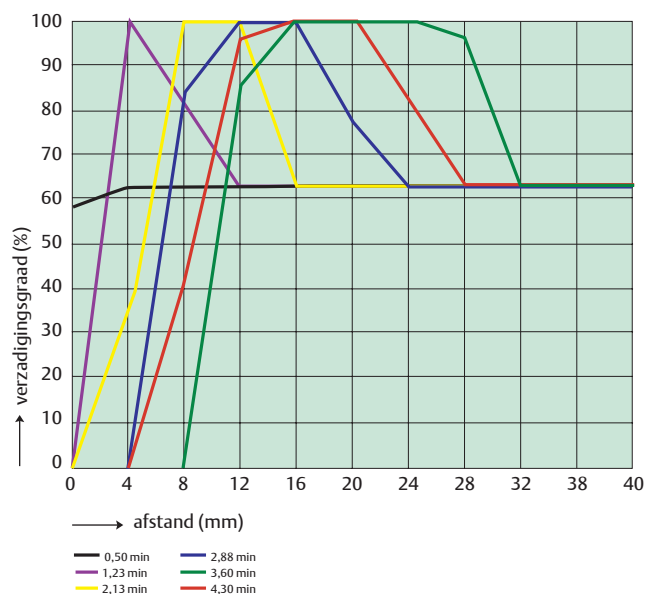
Het hierboven omschreven gedrag van beton is gebruikt om een analytisch en een numeriek model af te leiden [1]. Het doel van beide modellen is een relatief eenvoudig model te ontwikkelen dat de belangrijkste processen en factoren bevat waarmee inzicht kan worden verkregen in het afspatten van beton.

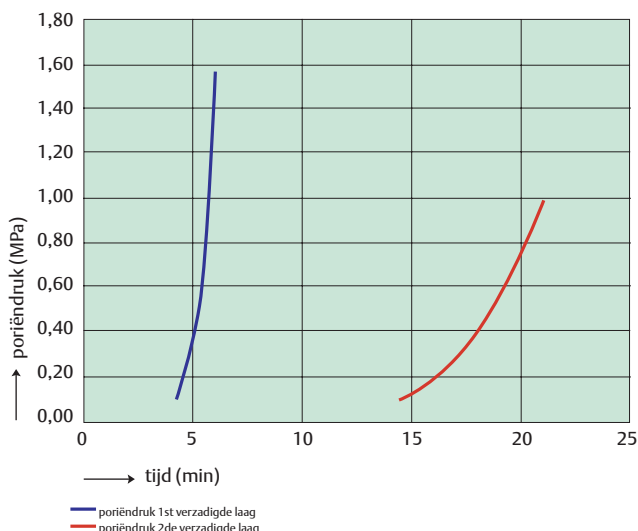
Het analytische model is opgebouwd uit vier delen en beschrijft een betonddoorsnede die is verdeeld in elementen met elk een lengte van 4 mm.

Het eerste deel bepaalt aan de hand van de numerieke oplossing van de differentiaalvergelijking van Fourier de temperatuurverdeling in de tijd over de doorsnede. Het tweede deel bepaalt, aan de hand van deze temperatuurverdeling, de resulterende spanningen. Het derde deel bepaalt, aan de hand van de temperatuurverde-

2 | Brandschade aan lining
Kanaaltunnel, november
1996

4 | Verdeling verzadigingsgraad voor de ontwikkeling van de eerste verzadigde laag



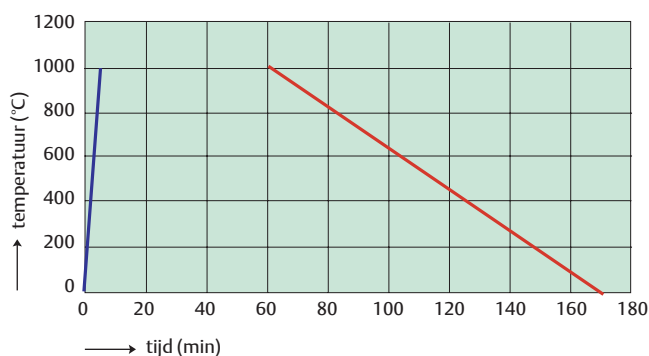


5 | Omrekening poriedrukken naar trekspanningen met behulp van het 'hollow spherical model' [3]

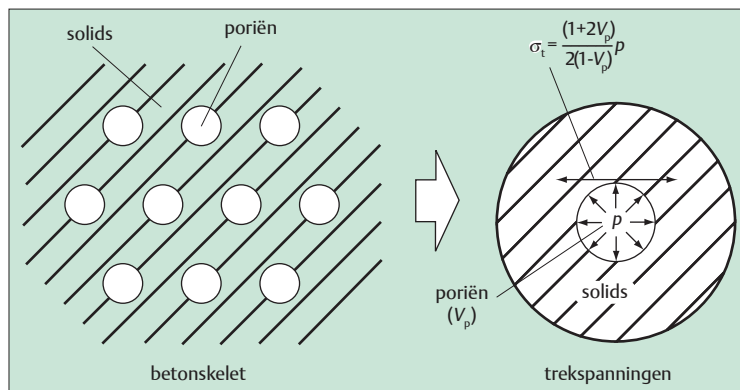
σ_t is de trekspanning, in MPa
 V_p is het poriënvolume, in m^3
 p is de poriedruk, in MPa

6 | Poriëndruk op de voorkant van de eerste en tweede verzadigde laag

7 | Brandkromme HSL-Zuid



ling, de verdamping van het poriëwater, de stroming van de waterdamp en de verzadigingsgraad over de doorsnede. De verdamping van het poriëwater wordt bepaald aan de hand van de verhouding tussen de hoeveelheid energie die een brand toevoegt aan het beton en de hoeveelheid energie benodigd om het water in de poriën te verdampen, hetgeen wordt bepaald aan de hand van de verdampingsenthalpie van water. De stroming van de waterdamp wordt bepaald met behulp van de wet van Darcy en de voorwaarde dat de waterdamp alleen het beton kan instromen. Het drukverschil dat de stroming van deze waterdamp veroorzaakt, wordt bepaald aan de hand van verzadigde waterdampdruk ter plaatse van de verdamping en de dieper in het beton gelegen atmosferische druk. Indien de poriën in een element volledig zijn verzadigd, wordt gecontroleerd of de snelheid waarmee het verdampingsfront de doorsnede ingaat, hoger is dan de



snelheid waarmee de waterdamp stroomt, hetgeen betekent dat de waterdamp niet condenseert en er dus een verzadigde laag is gevormd.

Het laatste deel van het analytische model bepaalt de drukopbouw in de poriën aan de voorkant van de verzadigde laag. De waterdamp die ontstaat door verdamping van de verzadigde laag, wordt verondersteld te stromen in de richting van het verhitte oppervlak. Vanwege de verhinderde expansie en verhinderde stroming van waterdamp kan de stroming van de waterdamp worden berekend met de vergelijking van Kodres [2], die op basis van het druk- en temperatuurverschil de massaflux naar het oppervlak bepaalt.

Het analytische model voorspelt het ontstaan van een eerste verzadigde laag na ongeveer 5 minuten op een diepte van 16 mm met een dikte van 12 mm (fig. 4). Circa 15 minuten later treedt een tweede verzadigde laag op, op een diepte van 40 mm. De berekende poriedrukken, kunnen via het zogenoemde 'hollow spherical model' [3] globaal worden omgerekend naar trekspanningen (fig. 5), die vervolgens kunnen worden vergeleken met de biaxiale trek-drukspanning van het Mohr-Coulomb vloeicriterium, waarbij de temperatuurafhankelijkheid van de betoneigenschappen in acht moet worden genomen. De berekende poriedrukken op de eerste verzadigde laag blijken voldoende te zijn om afsputten te veroorzaken (fig. 6).

Case studie: Groene Harttunnel

In samenwerking met ABAQUS Benelux bv is een numeriek model ontwikkeld op basis van ABAQUS/Standard. Het eindigelementenmodel is gebaseerd op twee aparte modellen voor temperatuur en poriedruk. Het eerste model is een ontkoppeld warmteoverdrachtmodel (ABAQUS: Uncoupled Heat Transfer Analysis model), waarbij de temperatuur de enige vrijheidsgraad is en waarmee de temperatuurverdeling over de doorsnede wordt bepaald. Het tweede model is een poriëwater/spanningenmodel (ABAQUS: Pore fluid/Stress model), gebaseerd op de wet van Darcy, waarmee de stroming van een vloeistof door een poreus medium kan worden gemodelleerd. Het gedrag van de (stromende) vloeistof is aangepast om de faseverandering die in het poriëwater ontstaat, te modelleren. De expansiecoëfficiënt en de bulkmodulus zijn daarvoor temperatuurafhankelijk gemaakt. Een in FORTRAN geprogrammeerde subroutine bepaalt, aan de hand van het overschrijden van de treksterkte van het materiaal, de af te spatten diepte. Via het reduceren van de doorsnede met de afgespatten laag en met inachtneming van de aanwezige poriedrukken- en spanningsverdeling, kan de berekening worden vervolgd en het repeterende effect van spatten worden weergegeven.

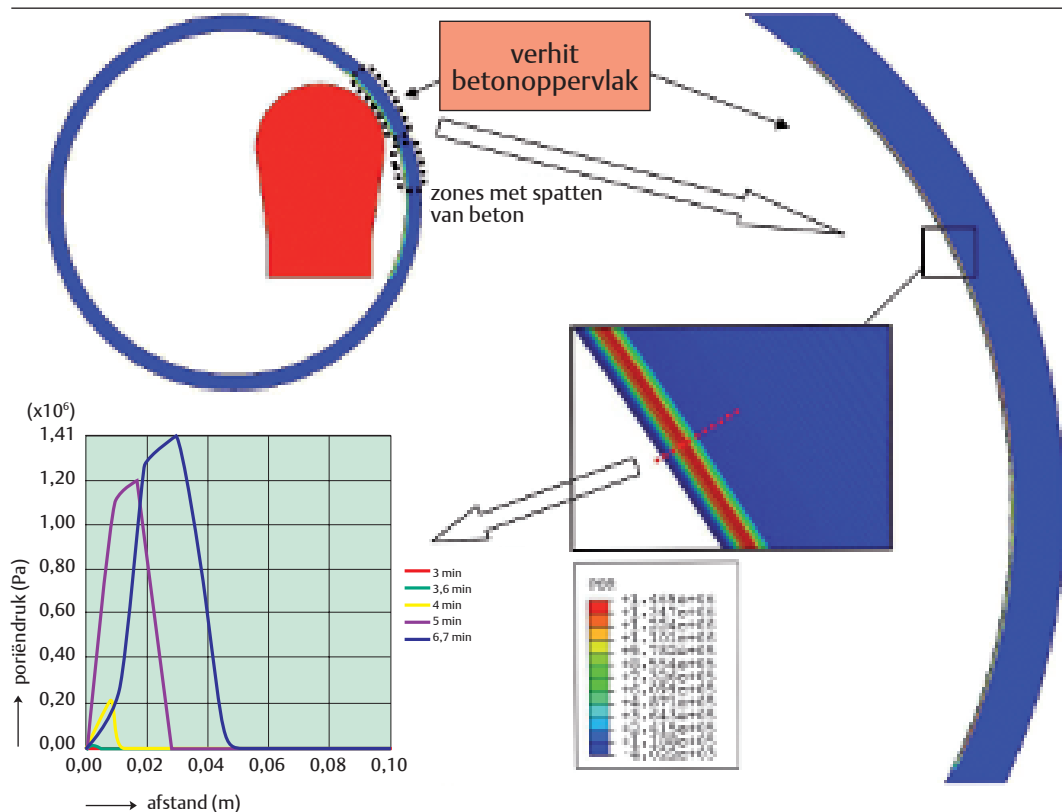
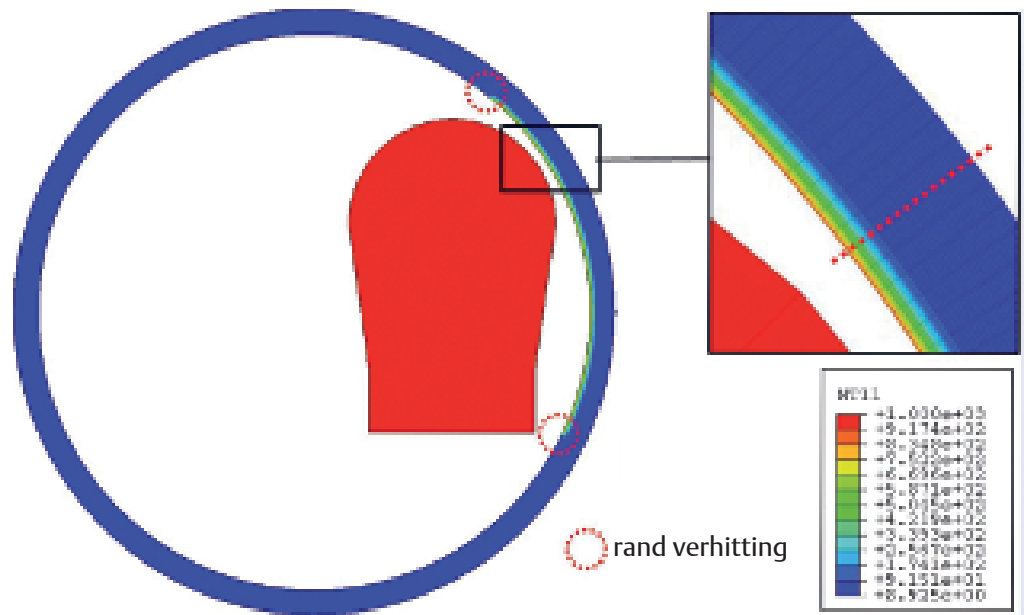
Het ontwikkelde numerieke model is gebruikt voor een case-

studie voor de Groene Harttunnel in de HSL-Zuid. In het tweedimensionale model is de brand van een treinstel gesimuleerd door middel van de contouren van een brandoppervlak. De temperatuur van dit brandoppervlak ontwikkelt zich volgens de HSL-Zuid-brandkromme (fig. 7), waarbij via geleiding en straling de lining wordt verhit. In figuur 8 is de temperatuurverdeling in de lining na 60 minuten brand weergegeven. De lining van de tunnel is verondersteld niet te zijn beschermd door brandwerend materiaal. In werkelijkheid is de lining van de Groene Harttunnel beschermd met spuitbeton, zodat afsputten niet optreedt.

De reactie van de lining is opgedeeld in twee afzonderlijke modellen. Het eerste model is een verend ondersteunde ring die wordt belast door de grond en de temperatuurverdeling. Het tweede model is een poriedrukmodel en is gebaseerd op een opgelegde ring die alleen wordt belast door de temperatuurverdeling. Dit model bepaalt vanuit de poriedrukken in de lining, gecombineerd met de spanningen van het verend ondersteunde model, de resulterende spanningsverdeling op basis van lineair-elastisch materiaalgedrag. Het model voorspelt dat de lining na ongeveer 7 minuten op twee locaties afsput met een diepte van 30 mm (fig. 9). Deze locaties komen goed overeen met schadebeelden zoals waargenomen bij de Kanaaltunnelbrand.

Verdere ontwikkelingen

Uit de ontwikkelde modellen en de toepassing in de casestudie blijkt dat de grootste onzekerheden vooral op het gebied van materiaalgedrag liggen. Vooral de permeabiliteit van beton bij stijgende temperaturen en verschillende verzadigingsgraden bij vloeistof- of gasstroming, is van groot belang voor het juist modelleren van het afsputten van beton. Daarnaast is de relatie tussen permeabiliteit en porositeit van



belang. Uit het afstudeerwerk is gebleken dat meer onderzoek naar deze beide materiaaleigenschappen noodzakelijk is. Verder is gebleken dat beide modellen gebruikt kunnen worden voor het bepalen van afsputten van beton. Het verbeteren van de modellen voor het afsputten kan door het toepassen van breukmechanica-wetten. Het daadwerkelijk bezwijken van het beton hangt af van de resulterende trekspanningen in

combinatie met degradatie van het materiaal door de hoge temperaturen als gevolg van brand. ■

Literatuur

1. Lottman, B.B.G., Fire in bored tunnels. Structural behaviour, during fire conditions, of bored tunnels made with a concrete segmental lining. Afstudeerverslag TU Delft en ABAQUS Benelux bv, juli 2007.

- 8 | Resultaat warmteoverdrachtmodel bij Groene Harttunnel na 60 minuten blootstelling aan brandkromme HSL-Zuid
- 9 | Resultaat poriewater/spanningenmodel in Groene Harttunnel