



Project 'Safety Proef'

Rapportage Brandproeven

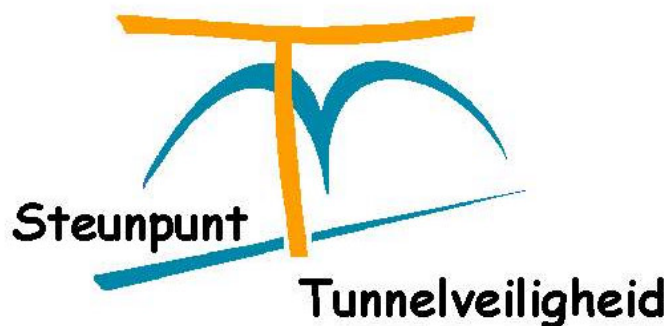
Augustus 2002





Project 'Safety Proef'

Rapportage Brandproeven



Colofon

Uitgegeven door: Bouwdienst Rijkswaterstaat
Griffioenlaan 2
Postbus 20.000
3502 LA UTRECHT

Opgesteld door: Bouwdienst Rijkswaterstaat
Steunpunt Tunnelveiligheid
Telefoon: (030) 285 83 70
Fax: (030) 289 74 18
Email: STTV@bwd.rws.minvenw.nl

Datum: Augustus 2002





Voorwoord



Rijkswaterstaat is verantwoordelijk voor het optimaal beheren en laten functioneren van het hoofdwegennet in Nederland. Met kennis en deskundigheid vanuit de uitvoeringspraktijk, draagt Rijkswaterstaat bij aan de beleidsvorming van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat. Hierbij wordt dankbaar gebruik gemaakt van de kennis en kunde van de Bouwdienst, hét ingenieursbureau van Rijkswaterstaat.

De Bouwdienst doet echter meer. Zo wordt er gezocht naar hoogwaardige innovatieve technologische ontwikkelingen. Natuurlijk heeft de Bouwdienst zijn blik op de toekomst gericht. Dat betekent aandacht voor de groeiende mobiliteitsproblematiek en het vraagstuk van betere benutting van de infrastructuur. Een ander belangrijk

aandachtspunt is de veiligheid van de weggebruiker. Om de veiligheid in wegtunnels te verbeteren doet de Bouwdienst onder meer grootschalig onderzoek naar brandontwikkeling, rookverspreiding en temperatuurontwikkeling bij calamiteiten.

Op het gebied van wegtunnels worden deze activiteiten binnen de Bouwdienst gecoördineerd door het Steunpunt Tunnelveiligheid. Het voor u liggende rapport is het resultaat van een door het Steunpunt Tunnelveiligheid geïnitieerd project, het project Safety Proef. Een project waar samen met diverse partijen uit de marktsector onderzoek is gedaan naar de verschillende aspecten die zich voordoen bij brand in een wegtunnel en het daaruit voortvloeiende gedrag van de weggebruiker. Het Steunpunt Tunnelveiligheid probeert hiermee een bijdrage te leveren aan het optimaliseren en waar nodig verbeteren van de veiligheid in de wegtunnels.

Ir. M.J. Olierook
Hoofdingenieur-Directeur Bouwdienst



Dankwoord

De brandproeven in de 2^e Beneluxtunnel, deel uitmakend van het project 'Safety Proef 2001/2002', zijn uitgevoerd onder auspiciën van de Bouwdienst Rijkswaterstaat, Steunpunt Tunnelveiligheid. Dank gaat uit naar de volgende partijen voor hun bijdrage aan het project:

Ministerie van Verkeer en Waterstaat
Rijkswaterstaat Directie Zuid Holland
Projectorganisatie 2^e Beneluxtunnel
TNO BOUW, Centrum voor brandveiligheid
ARCADIS infra
Nagtglas Versteeg Inspecties
Strukton Systems
Brandweer Roermond
Brandweer Regio Rotterdam-Rijnmond

- Gezamenlijke Brandweer
- Brandweer Waterweg
- Brandweer Rotterdam - district zuid

Brandweer regio Noord en midden Limburg
NIBRA, Nederlands Instituut voor Brandweer en Rampenbestrijding
EFPC, European Fire Protection Consultants
Automatic Sprinkler
Adviesbureau PEUTZ & Associés
SensaTYCO Integrated Systems
MUTEC Benelux
AJAX Fire Protection Systems
Hulskamp Audiovisueel



Samenvatting

Het Steunpunt Tunnelveiligheid van de Bouwdienst Rijkswaterstaat heeft het initiatief genomen om gericht onderzoek te doen naar een aantal specifieke aspecten die bij brand in een tunnel van belang zijn en wel middels het houden van full-scale brandproeven. De aanleiding hiervoor was de behoefte om kennisleemten in te vullen en onderzoeksvragen te beantwoorden uit diverse projecten. Deze behoefte is sterker geworden door de vele discussies die de Bouwdienst samen met ontwerpende en voorschrijvende partijen voert omtrent de inrichting van de autosnelwegtunnels. Deze zijn veelal op theoretische aannames gebaseerd, waarbij de praktische informatie ontbreekt. Tevens richten de veiligheidsdiscussies zich steeds meer op het vluchten van weggebruikers (zelfredzaamheid) wat andere aspecten met zich meebrengt.

Dit heeft geresulteerd in het project Safety Proef, brandproeven in de 2^e Beneluxtunnel. Het project is uitgevoerd onder auspiciën van het Steunpunt Tunnelveiligheid in nauwe samenwerking met o.a. TNO Centrum voor Brandveiligheid, Arcadis, Nagtglas Versteeg Inspecties en Strukton Systems.

Naar aanleiding van een inventarisatie van de onderzoeksvragen en een literatuurstudie zijn de volgende onderzoeksdoelen geformuleerd:

- het krijgen van een beter begrip van het verloop in de tijd van warmte- en rookverspreiding teneinde beter te kunnen inschatten welke kans op ontvluchting bestaat;
- de invloed van langsventilatie op de brandgrootte ofwel het aanwakkereffect;
- de invloed van het toepassen van een sprinklersysteem op brandontwikkeling, rookverspreiding en temperatuur;
- de gevoeligheid naar plaats en tijd van branddetectiesystemen, mede in relatie tot het aansturen van een sprinklersysteem;
- de zichtbaarheid van vluchtwegaanduiding;
- de nauwkeurigheid van CFD-modellering als voorspellingsinstrument;
- voorlichting aan betrokkenen over de betekenis van brand in een tunnel.

Om deze onderzoeksdoelen te realiseren zijn vier categorieën van proeven gedefinieerd, die in november 2001 zijn uitgevoerd in de 2^e Beneluxtunnel te Rotterdam.

De categorie-indeling is als volgt:

- Categorie 1: warmte en rookverspreiding;
- Categorie 2: aanwakkereffect;
- Categorie 3: sprinkler;
- Categorie 4: branddetectie.

Buis D van de nieuwe 2^e Beneluxtunnel heeft als proeflocatie dienst gedaan. De apparatuur die niet nodig was, is ingepakt of verwijderd en rond de vuurhaard is over een lengte van 70 meter een extra laag hittewerende bekleding aangebracht. In totaal zijn er 28 proeven uitgevoerd in een periode van vier weken. Deze zijn onderverdeeld in:

- 6 panbranden;
- 6 aanwakkerbranden in voertuigen;
- 4 sprinklerproeven met gestapelde lading, die dan niet overdekt met huif;
- 12 detectieproeven.

Er is voornamelijk in de nachtelijke uren gewerkt om omwonenden en overig verkeer zo min mogelijk overlast te bezorgen. Betrokkenen op het gebied van tunnelveiligheid konden 's nachts (live) of overdag direct de gebeurtenissen volgen middels een zestal camera's die in de tunnel waren opgesteld. De tunnel heeft geen blijvende schade opgelopen en is kort daarna opengesteld voor verkeer.

De resultaten van de proeven bestaan uit meetgegevens en video-opnamen. Uit de analyse hiervan zijn in hoofdzaak de volgende conclusies getrokken:

- Binnen circa 6 meter van een ontwikkelde personenauto-brand is letaliteit te verwachten vanwege het hoge stralingsniveau. Bij kleine ontwikkelde vrachtwagenbranden is deze afstand 12 meter. Op een dergelijke korte afstand zijn convectieve warmte, vermindering van zicht en hoge CO-concentraties geen bedreiging vanwege de optredende stratificatie.
- Zowel zonder als met langventilatie is de kans groot dat op een afstand van 100-200 meter stroomafwaarts van de brand weggebruikers binnen enkele minuten omgeven worden door rook en het zicht dusdanig is gedaald dat vluchtwegen niet of nauwelijks kunnen worden gezien. Daarbij overschrijden de verhoogde CO-concentraties nog niet de kritieke grenzen.
- Door een hoge ventilatiesnelheid kan de brandontwikkeling van een personenauto zo'n 30 minuten worden vertraagd indien de brand aan de voorzijde begint. Dit in tegenstelling tot de gangbare opvatting, die een versnelde ontwikkeling veronderstelt. Een hoge ventilatiesnelheid verhoogt de grootte en ontwikkelingsnelheid van branden in de laadruimte van vrachtwagens met een grootte van circa 20 MW. Dit veroorzaakt een hoger stralingsniveau nabij de brand en kan leiden tot enigszins hogere temperaturen op leefniveau, maar de temperaturen in het algemeen rondom de brand worden door een hoge ventilatiesnelheid lager.
- Een sprinklersysteem verlaagt de temperaturen van de lucht en van andere voertuigen in de omgeving van de brand aanzienlijk. Bij de gerediseerde brandgrootten zijn de resulterende temperaturen niet letaal en kan brandoverslag worden voorkomen. Stoomvorming is niet of nauwelijks waargenomen. Door inschakeling van de sprinkler neemt het zicht zodanig af dat de vluchtwegen niet of slechts moeilijk te onderscheiden zijn.
- Branddetectiesystemen, uitgevoerd als lijnvormig systeem, zullen bij zich langzaam ontwikkelende branden in het algemeen meer dan 5 minuten na het ontstaan van de brand een alarmmelding geven. Bij zich snel ontwikkelende branden zal veelal binnen 3 minuten een alarm worden gegenereerd. Zonder ventilatie wordt de brand bij zich langzaam ontwikkelende branden binnen vijf meter van de brandhaard aangegeven, met ventilatie kan de afstand meer dan 20 meter zijn. Bij zich snel ontwikkelende branden wordt vrijwel altijd binnen 5 meter van de brand een melding gegeven. Deze conclusies zijn gebaseerd op de bij de proeven ingestelde gevoeligheden van de beproefde systemen.
- Vluchtwegaanduidingen worden vrij snel onzichtbaar wanneer deze door rook worden omgeven. Het verdient aanbeveling deze aanduidingen zo te plaatsen dat de kans op bedekking door rook zo klein mogelijk is.
- Kwantitatief lijkt de simulatie van branden in tunnels met behulp van CFD redelijk mogelijk te zijn. In kwantitatieve zin blijken er echter aanzienlijke afwijkingen te kunnen optreden en is ijking aan uitgevoerde brandproeven noodzakelijk voor een verantwoorde toepassing van CFD rekentechnieken bij de simulatie van branden in tunnels. De rekentechniek is blijkbaar nog niet zodanig uitgekristalliseerd dat het routinematig in kwantitatieve zin voor het complexe verschijnsel brand kan worden toegepast. Het toepassen van CFD rekentechnieken voor het simuleren van brandscenario's lijkt echter niettemin in de toekomst een nuttige en hanteerbare aanpak te kunnen zijn; mits voldoende ervaring aanwezig is of beschikbaar komt en de rekenresultaten zo af en toe vergeleken kunnen worden met proefresultaten.

Inhoudsopgave

Samenvatting	7
Inhoudsopgave	9
I INLEIDING EN DOELSTELLING	13
1 Inleiding	14
2 Achtergrond en onderzoeksdoelen	15
2.1 Achtergrond	15
2.2 Samenvatting literatuuronderzoek	15
2.3 Onderzoeksdoelen	18
2.4 Detaillering van de onderzoeksdoelen	18
II INRICHTING PROEVEN	21
3 Overzicht van uitgevoerde proeven	22
3.1 Categorie 1 proeven: warmte- en rookverspreiding	22
3.2 Categorie 2 proeven: aanwakkereffecten	23
3.3 Categorie 3 proeven: sprinkler	24
3.4 Categorie 4 proeven: branddetectie	26
4 Locatie en tunnelconfiguratie	27
4.1 De tweede Beneluxtunnel	27
4.2 Meetgebied en ondersteunende voorzieningen	28
4.3 Bescherming van de tunnelconstructie	29
4.4 Ventilatie	29
5 Proefopstelling proeven categorie 1-3	31
5.1 Proefopstelling	31
5.2 Beschrijving hoofdcomponenten	32
5.3 De panbranden (proeven categorie 1)	33
5.4 De voertuig- en ladingbranden (categorie 2 en 3)	35
5.5 De meetopstelling	38
5.6 Videoregistratie	38
5.7 Sprinklersysteem	39
6 Proefopstelling proeven categorie 4	40
6.1 Proefopstelling	40
6.2 De detectiesystemen	41

III THEORIE	45
7 Vluchtcriteria	46
7.1 Temperatuur	46
7.2 Warmtestraling	47
7.3 Zicht	48
7.4 Toxische gassen	50
8 Warmte- en rookverspreiding	51
8.1 Convectorische warmtestroom	51
8.2 Warmtestraling vanuit de brandhaard	51
8.3 Stratificatie	52
8.4 Kritieke lichtsnelheid ter voorkoming van backlayering	55
9 Brandontwikkeling en brandgrootte	58
9.1 Personenautobranden	58
9.2 Overige voertuig- en ladingbranden	60
9.3 Invloed van ventilatie	60
9.4 Invloed van tunnelgeometrie	62
IV RESULTATEN	63
10 Warmte- en rookverspreiding	64
10.1 Inleiding	64
10.2 Analyse van het brandvermogen	64
10.3 Analyse van warmtestraling	65
10.4 Analyse van stratificatie	65
10.5 Analyse backlayering	66
10.6 Analyse CO-concentratie	67
10.7 Vluchtomstandigheden	68
10.8 Zichtbaarheid vluchtwegaanduidingen	71
10.9 Conclusies	71
11 Invloed ventilatie op de brand	73
11.1 Brandverloop bij personenautobranden	73
11.2 Brandverloop bij overige voertuig- of ladingbranden	74
11.3 Conclusies	77
12 Sprinkler	78
12.1 Verloop van de proeven 11-14	78
12.2 Waarnemingen proeven 11-14	78
12.3 Waarnemingen Emmerproef	80
12.4 Conclusies	82
13 Branddetectie	83
13.1 Algemene opmerkingen	83
13.2 Resultaten	83
13.3 Overige waarnemingen	85
13.4 Analyse van de resultaten	85
13.5 Conclusies	88

V	NUMERIEKE SIMULATIES (CFD)	91
14	CFD-simulaties	92
14.1	Inleiding	92
14.2	Onderzoeksopzet	92
14.3	Beschrijving CFD-technieken	95
14.4	Het CFD-model van TNO	96
14.5	CFD-simulaties door Peutz	97
14.6	Resultaten	98
14.7	Discussie	101
14.8	Conclusies/aanbevelingen	102
15	Overzicht van de conclusies	105
16	Literatuurlijst	109



I INLEIDING EN DOELSTELLING



1 Inleiding

De veiligheid van tunnels is een belangwekkend onderwerp geworden en de publieke aandacht hiervoor is sterk vergroot na de opgetreden tragische spoor- en wegtunnel calamiteiten in Frankrijk, Oostenrijk en Zwitserland. Uit analyse blijkt dat in de meeste gevallen voertuigbrand en daaruit voortvloeiende hoge temperaturen en rookontwikkeling de voornaamste maatgevende oorzaken waren voor de schade aan personen en materieel. Voorts bleek dat de zelfredzaamheid van tunnelgebruikers in samenhang met de aanwezige hulpvoorzieningen van groot belang is voor de uiteindelijke gevolgen van de tunnelbranden.

Uitgezonderd een ernstig ongeval in de Velsertunnel in 1978 is Nederland tot dusver niet opgeschrikt door een omvangrijke calamiteit met brand in een tunnel. De sterke toename van de ondergrondse infrastructuur, de enorme groei van het wegverkeer en ontwikkelingen op het gebied van overkluizingen en overkappingen roepen evenwel tot diertheid. Een andere ontwikkeling is het beleidsvoornemen om in (nieuw te rediseren) tunnels voor wegverkeer het vervoer van die soorten goederen toe te staan. Kennisontwikkeling is dan ook nodig teneinde de kans op een dergelijke calamiteit alsmede de mogelijk optredende nadelige gevolgen voor mens, materieel en omgeving te minimaliseren.

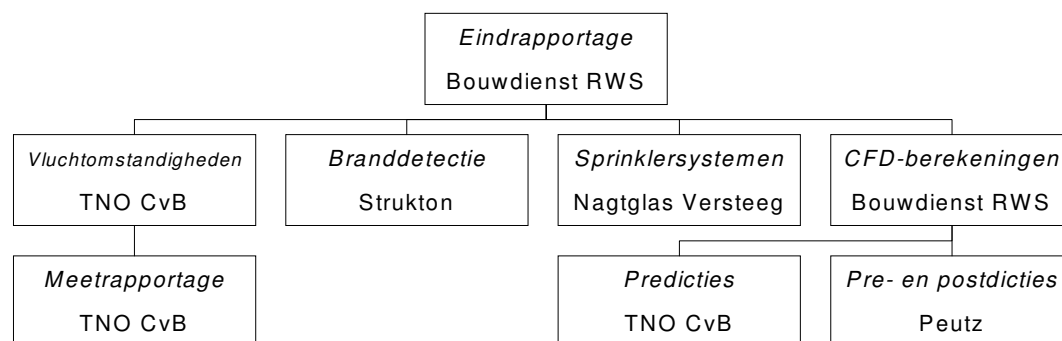
Het Steunpunt Tunnelveiligheid van de Bouwdienst van Rijkswaterstaat heeft daarom het initiatief genomen een gericht onderzoek te doen naar een aantal specifieke aspecten, die bij brand in een tunnel van belang zijn. Daarvoor is het project "Safety Proef" opgezet dat als doel had onderzoek te doen naar de invloed van brand en het zelfredzaamheidsgedrag bij optredende calamiteiten in een tunnel. Het project "Safety Proef" is opgesplitst in twee deelprojecten te weten "Full-scale brandproeven" en een "Gedragsonderzoek".

Doelstelling van het gedragsonderzoek is inzicht verkrijgen in het gedrag van weggebruikers tijdens een calamiteit en de herkenbaarheid en bruikbaarheid van vluchtvoorzieningen.

De resultaten van het gedragsonderzoek zijn beschreven in het TNO rapport getiteld "Gedrag van automobilisten bij evacuatie van een tunnel" (3).

Doelstelling van de brandproeven is om uitspraken te kunnen doen over de optredende brandontwikkeling in relatie tot de effecten op vluchtende mensen en vluchtmogelijkheden in een tunnel. Daarbij is nader onderzoek gedaan naar de vluchtomstandigheden in relatie tot rook en warmte, de invloed van langsventilatie op de grootte van de brand, de mogelijkheden voor gebruik van branddetectiesystemen en de invloed van sprinkler. Er is bezien in hoeverre vluchtweg-aanduidingen zichtbaar zijn en blijven. Tevens is nagegaan in hoeverre numerieke simulatiemethoden (CFD) een goed voorspellingsinstrument vormen.

De in dit rapport beschreven resultaten van de brandproeven zijn gebaseerd op rapportages van de partijen zoals weergegeven in onderstaand schema.



Figuur 1 Overzicht documenten ten behoeve van eindrapportage Bouwdienst Rijkswaterstaat.

2 Achtergrond en onderzoeksdoelen

2.1 Achtergrond

De discussies over veiligheid van weggebruikers in tunnels richten zich met name op vluchtmogelijkheden van personen bij brand. Hierbij komen onderwerpen als brandontwikkeling, rookverspreiding, brand/rookdetectie, sprinkler, aanduiding en zichtbaarheid van vluchtwegen aan de orde.

Op het gebied van snelheid van rookverspreiding, detectie en sprinkler is nogal eens verschil van mening. Daarbij komt nog dat men in de discussies soms uitgaat van aannamen en veronderstellingen die niet altijd zijn getoetst in de praktijk. Brand in Nederlandse verkeerstunnels komt relatief weinig voor met als consequentie dat er maar weinig praktijkervaring bestaat bij hulpverleners en ontwerpers.

Een andere ontwikkeling is het voornemen om in (nieuw te realiseren) tunnels voor wegverkeer het vervoer van alle soorten goederen toe te staan. Dit onder voorwaarde dat voor weggebruikers en hulpverleners een brandveiligheidsniveau wordt gerediseerd dat equivalent is aan dat van tunnels waar een beperking geldt voor de te vervoeren goederen. Voor het bereiken van een equivalent veiligheidsniveau wordt in sommige gevallen gedacht aan het aanbrengen van branddetectiesystemen en/of een sprinklersysteem. Echter, het gedrag van dergelijke systemen in wegtunnels in Nederland is nooit onderzocht.

Vanwege bovenstaande redenen is het initiatief genomen een gericht onderzoek te doen naar een aantal specifieke aspecten die bij brand in een tunnel van belang zijn.

Gestart is met een literatuuronderzoek naar brandproeven in tunnels en opgetreden tunnelbranden wereldwijd (10). Hierbij is geïnventariseerd wat de momentane stand van kennis is met betrekking tot ontvluchtingsmogelijkheden in relatie tot tunnelbranden, het gedrag van warmte en rook bij een zich ontwikkelende brand en brandveiligheidsvoorzieningen.

2.2 Samenvatting literatuuronderzoek

In het verleden zijn in het buitenland reeds diverse brandproeven op ware schaal gedaan. Een overzicht hiervan is:

- **Ofenegg Tunnel** (Zwitserland, 1965)
Doel van de testen was de noodzakelijke ventilatiecapaciteit bij brand. De tunnel was een spoorwegtunnel met een dood eind op 190 m van de ingang. Er werden 11 brandproeven gedaan met benzinepoelen.
- **Zwenberg Tunnel** (Oostenrijk, 1975)
Bij deze proeven werden diverse ventilatiesystemen getest. Er werden in totaal 29 brandproeven gedaan met benzinepoelen. De uitgevoerde metingen betroffen: temperatuur, gasconcentratie, zichtbaarheid en verbrandingsgraad.
- **PWRI experimenten** (Japan, 1980)
De metingen werden gebruikt om de capaciteit van noodvoorzieningen te beoordelen. Er werd gebruik gemaakt van een 700 m lange galerij gebouwd door de Public Works Research Institute (PWRI) en een 3300 m lange wegtunnel. Er werden 16 experimenten in de galerij uitgevoerd en 8 in de tunnel. De vuurbronnen waren brandstofpoelen (12 proeven), auto's (6 proeven) en autobussen (6 proeven).
- **Repparfjord Tunnel** (Noorwegen, 1990-1992)
De experimenten werden uitgevoerd in een verlaten mijntunnel met een lengte van 2.3 km. Er werd door 9 Europese landen samengewerkt. Deze experimenten vormden de basis voor het

EUREKA 499 "Firetun" project. Er werden in totaal 21 brandproeven uitgevoerd met spoor- en metrowagons, auto's, zwaarbeladen vrachtauto's en gecombineerde branden (heptaan en hout).

- **Eureka project "Firetun"**

De continuering van eerdere testen uitgevoerd in de Ofenegg Tunnel (Zwitserland) in 1965 en in de Zwenberg Tunnel (Oostenrijk) in 1976. In beide gevallen werden brandproeven gedaan met benzinepoelen om de beweging van de rook te onderzoeken in de lengterichting van de tunnel afhankelijk van de windsnelheid.

- **Memorial Tunnel** (VS, 1993-1995)

De experimenten werden uitgevoerd in een verlaten tunnel met een lengte van 850 m. Het doel was het testen van ventilatieconfiguraties. Er werden 91 brandproeven uitgevoerd met dieselolie als brandstof. De warmteafgifte varieerde van 10 MW tot 100 MW.

Uit deze proeven is veel geleerd over de maximale brandvermogens, het rookgedrag en de wijze van ventileren. Bij deze proeven zijn echter de volgende opmerkingen te maken:

Type brand

- De meeste proeven zijn uitgevoerd met ongeregelde oliepanbranden die zich anders ontwikkelen en gedragen als voertuigbranden. Bij dergelijke branden is het brandvermogen gedurende de proef constant. Dit is afwijkend met de in werkelijkheid optredende situatie waarbij voertuigbranden met een variabel brandvermogen voorkomen;
- De buitenlandse proeven zijn verricht in niet (brand)geïsoleerde tunnels;
- Vermeldenswaardig is de dat de proeven in de Noorse Repparfjord Tunnel, met echte voertuigen, zijn gedaan in een tunnel die in verhouding een zeer kleine dwarsdoorsnede had in vergelijking met een representatieve¹ Nederlandse tunnel dwarsdoorsnede (bijvoorbeeld Tweede Beneluxtunnel) waardoor uitspraken over de brandontwikkeling, het brandvermogen en de rookverspreiding een beperkte geldigheid hebben;

Aanwakkeren van de brand

- Via proeven in parkeergarages bestaat de indruk dat het aanwakkeren van personenautobranden nauwelijks optreedt. Over ladingbranden/vrachtwagenbranden zijn de meningen sterk verdeeld;
- Uit verricht onderzoek (5) blijkt enerzijds dat het ontwikkelde brandvermogen in een tunnel groter is dan in de openlucht en anderzijds, op basis van diverse internationaal bekende proeven, dat de vermogenscurve (brandduur, vorm en maximum vermogen) van een personenautobrand naar alle waarschijnlijkheid niet significant zal worden beïnvloed door een gedwongen ventilatiesnelheid van minder dan 2 m/s. Voorts is geconcludeerd dat er onvoldoende experimentele gegevens beschikbaar zijn om het brandgedrag bij hogere ventilatiesnelheden te kunnen voorspellen.
- In 1999/2000 is door Carvel (6) een voorzet² gedaan voor de invloed van de ventilatiesnelheid in de langrichting van de tunnel op de brandontwikkeling op basis van een literatuurstudie en interviews van "deskundigen". Zijn artikel geeft verwachtingen die tot ongerustheid leiden, maar biedt geen zekerheid.

Rookverspreiding

- Een observatie is dat bij alle bovengenoemde proeven de brandhaard centraal geplaatst was in de dwarsdoorsnede van een tunnel. In werkelijkheid zullen de meeste brandhaarden asymmetrisch in de tunnel voorkomen. Voorts volgt uit de praktijk dat (bij rechts verkeer) de meeste pechgevallen

¹ Een éénrichtingstunnel met twee rijstroken, langventilatie in de rijrichting, en brandwerende isolatie aan de bovenzijde.

² Hierbij is gebruik gemaakt van de Bayesiaanse probabilistische onderzoeksmethodiek.



-
- en voertuigbranden op de rechterrijstrook plaatsvinden. Deze asymmetrische opstelling in de tunnel heeft mogelijk invloed op de wijze van rookverspreiding;
- Genoemde brandproeven zijn gedaan in een nagenoeg lege tunnel terwijl in de werkelijkheid voertuigen in de buurt van de brand het rookverspreidingspatroon (met name in de beginfase) beïnvloeden, hetgeen stroomafwaarts van belang is indien daar personen aanwezig zijn.

Detectie

- De laatste tijd wordt er steeds meer aangedrongen op de installatie van branddetectiesystemen, terwijl ook bekend is dat de beschikbare middelen in bestaande tunnels te laat, niet of onvoldoende hebben gefunctioneerd.
- Zelfs moderne middelen hebben niet geheel voldaan in proeven die de BetuweRoute in 2000 in de Hemspoortunnel heeft uitgevoerd.

Sprinkler

- Er is enige ervaring met sprinklers in bestaande tunnels. Hieruit blijkt dat je het niet meteen moet aanzetten maar eerst de weggebruikers de gelegenheid tot vluchten moet geven. Direct aanzetten kan leiden tot ongevallen vanwege schikreacties en ongevallen;
- De proeven die in Japan uitgevoerd zijn met sprinkler laten zien dat uitbreiding met sprinkler te voorkomen is. Maar het gebruik van de sprinkler kan de rooklaag doen zakken, waardoor het vluchten bemoeilijkt wordt;
- De Ofeneg brandproeven laten als bijeffect van de sprinkler het volgende zien: het verstoren van stratificatie, sterke stoomvorming en het ophopen van niet verbrande gassen. Het gevolg van deze effecten was een sterke reductie van het zicht in de gehele tunnel, gevaar van verbranding door stoom en explosie door ontbranding van de opgehoopte gassen. Deze resultaten worden niet door iedereen begrepen of men vindt dat de interpretatie niet klopt;
- Bij de Memorid tunnelproeven zijn 2 sprinkler proeven gehouden in combinatie met langsventilatie; hieruit bleek dat een luchtsnelheid van ca. 4 m/s nauwelijks invloed had op de werking van de sprinklerkoppen. Dit wordt niet door alle deskundigen geaccepteerd in verband met de toegepaste typen sprinklerkoppen.

Naast voornoemde zaken, blijkt dat het beschikbare experimentele materiaal geen antwoord geeft op enkele belangrijke vragen in relatie tot brand in een verkeerstunnel:

- Onder welke omstandigheden, hoe lang, over welke afstand, is er sprake van gestratificeerde rook die mogelijk een belangrijke rol speelt bij de zelfredzaamheid van tunnelgebruikers;
- Hoe reageren verschillende brandhaarden op een sterke langsventilatie.
- Bovendien zijn er bij de gerapporteerde proeven nauwelijks branddetectiesystemen getest en zijn er vrijwel geen brandproeven met sprinklersystemen gehouden. Daarnaast is de toepasbaarheid van branddetectie in combinatie met een sprinklerinstallatie in een tunnel maar sporadisch onderzocht.

Aangezien steeds vaker numerieke simulatiemethoden, verder aangeduid als CFD-berekeningen, worden gebruikt om het temperatuurverloop en de rookverspreiding in tunnels te bepalen, ontstaat de vraag hoe nauwkeurig deze methoden zijn. Het zou nuttig zijn na te gaan vooraf gemaakte CFD-berekeningen te vergelijken met uitkomsten van brandproeven zodat een zo natuurgetrouw mogelijk beeld ontstaat van de ontwerp praktijk.

2.3 Onderzoeksdoelen

Bij een calamiteit in een tunnel, gepaard gaande met brand, worden twee hoofddoelen nagestreefd:

1. het zoveel mogelijk voorkomen van dodelijke slachtoffers en gewonden
2. het zo goed mogelijk sparen van de tunnelconstructie

Er zijn veel verschillende aspecten die met deze twee hoofddoelen samenhangen en een aantal aspecten is reeds eerder onderzocht. De hier beschreven brandproeven zijn zodanig ingericht dat zij niet een herhaling vormen van eerdere brandproeven maar antwoord geven op de vragen die volgen uit de beschreven literatuurstudie.

Hiervoor zijn de volgende onderzoeksdoelen gedefinieerd, namelijk inzicht verkrijgen in :

1. Het verloop in de tijd van warmte- en rookverspreiding teneinde beter te kunnen inschatten welke kans op ontvluchting bestaat;
2. De invloed van langsventilatie op de brand (aanwakkeffect);
3. De invloed van een sprinklersysteem op brandontwikkeling, rookverspreiding en temperatuur;
4. De gevoeligheid naar plaats en tijd van branddetectiesystemen;
5. De zichtbaarheid van vluchtwegaanduidingen.
6. Het vergelijken van vooraf gemaakte CFD-berekeningen met daarna uitgevoerde brandproeven.

Vanwege het eerder genoemde gebrek aan praktijkervaring bij ontwerpers, beheerders, hulpdiensten en andere betrokkenen is als neven doel gesteld dat de brandproeven tijdens de uitvoering te volgen zouden zijn door genoemde partijen en dat zoveel mogelijk beeldmateriaal van de proeven zou worden geproduceerd.

Betreffende de sprinkler wordt opgemerkt dat het doel van de proeven niet bestond uit het nemen van een beslissing omtrent het al dan niet aanbrengen van sprinklersystemen in tunnels. Het doel was de verschijnselen te onderzoeken teneinde bij te dragen aan de besluitvorming omtrent de toepassing van sprinklers.

Over het onderzoek naar branddetectiesystemen wordt verder opgemerkt dat het doel niet bestond uit het maken van een keuze omtrent het beste systeem (leverancier). Het doel was om onderzoek te doen naar de performance (functionele mogelijkheden) van de op de markt zijnde systemen.

2.4 Detaillering van de onderzoeksdoelen

De onderzoeksdoelen 1 tot en met 4 zijn als volgt nader gedetailleerd:

Onderzoeksdoel nummer 1

Het verloop in de tijd van warmte- en rookverspreiding teneinde beter te kunnen inschatten welke kans op ontvluchting bestaat

- Hoe snel de zich ontwikkelende warmte en rook zich door de tunnel verspreidt;
- Invloed van de ventilatie op de warmte- en rookverspreiding;
- Stratificatie (gescheiden warme rooklaag boven en rookvrije koude onderlaag), qua omvang en tijdsduur van optreden;
- Invloed van de ventilatie op stratificatie;
- Rookverspreiding stroomopwaarts van de brand ('backlayering');
- Straling nabij de brand en uit de rook;
- Toxiciteit in rookgassen (alleen CO).

Onderzoeksdoel nummer 2

De invloed van langsventilatie op de brand (aanwakkeffect)

- In hoeverre wordt de brand aangewakkerd door langsventilatie;
- hoeveel vermogen komt uit de brand vrij afhankelijk van de grootte van de langsstroming;
- wijze en snelheid van brandontwikkeling binnen het voertuig;
- kans op branduitbreiding naar naaststaande voertuigen.

Onderzoeksdoel nummer 3

De invloed van een sprinklersysteem op brandontwikkeling, rookverspreiding en temperatuur

- de effectiviteit van een sprinklersysteem ten aanzien van het voorkomen van branduitbreiding en het beheersen van branden in voertuigen;
- de effectiviteit van een sprinklersysteem ten aanzien van het koelen van voertuigen in de nabijheid van een brand;
- de invloed van een sprinklersysteem op de leefomgeving (omgevingstemperatuur, straling en rookconcentratie).
- De mate van eventuele stoomvorming;
- De invloed van het vertraagd activeren van een sprinklersysteem.

Het laatste subdoel is gesteld omdat in veel gevallen een sprinkler niet meteen na ontdekken van de brand kan worden ingeschakeld maar eerst het nog rijdende verkeer tot stilstand moet worden gebracht.

Onderzoeksdoel nummer 4

De gevoeligheid naar plaats en tijd van branddetectiesystemen

- gevoeligheid met betrekking tot het detecteren van (kleine) branden;
- mogelijkheden en beperkingen ten aanzien van de plaatsbepaling van een brand;
- beïnvloeding van de gevoeligheid en plaatsbepaling door luchtbewegingen in de tunnel;
- gevoeligheid in relatie tot de projectering³;
- gevoeligheid voor temperatuurverhogingen door andere oorzaken dan brand;
- instellingen van branddetectiesystemen (alarmdrempels);
- temperatuur- en brandbestendigheid van systemen;
- uitval van systemen door een defect of door brand.

Onderzoeksdoel nummer 5 is niet apart gedetailleerd maar tijdens de uitvoering gezien gedurende de uitvoering van de onderzoeksdoelen 1-3.

³ Juiste projectering heeft te maken met de positie en afstand tussen de kabels in breedterichting (o.a. afhankelijk van tunnelgeometrie) om (nog) betrouwbaar te kunnen detecteren.



II INRICHTING PROEVEN

Dit deel beschrijft de opzet van de proeven en de meetopstelling.

3 Overzicht van uitgevoerde proeven

Naar aanleiding van de eerste vier onderzoeksdoelen zijn vier categorieën proeven gedefinieerd. De proeven zijn daarmee in te delen in de volgende categorieën:

Categorie 1: warmte- en rookverspreiding

Categorie 2: aanwakker-effecten

Categorie 3: sprinkler

Categorie 4: branddetectie

De overige onderzoeksdoelen zijn gedurende deze proeven bestudeerd en niet specifiek aan een categorie proeven verbonden. Bij enkele proeven uit de categorieën 1 – 3 zijn eveneens de branddetectiesystemen beproefd.

Op basis van de definitie van de proeven is een meetopstelling vastgesteld. Daarbij is de meetopstelling ten behoeve van de proeven uit de categorieën 1 – 3 de meest omvangrijke en verschilt de meetopstelling ten behoeve van de proeven uit categorie 4 aanzienlijk hiervan. Beide proefopstellingen zijn derhalve apart beschreven.

Voor een overzicht van de uitgevoerde proeven wordt verwezen naar de laatste bijlage (uitklapbaar proevenoverzicht).

3.1 Categorie 1 proeven: warmte- en rookverspreiding

De proeven zijn uitgevoerd met geregelde panbranden. De reden hiervoor is dat met name de rook- en warmteverspreiding in de eerste fasen van een brand bestudeerd zou worden. Er is dus een relatie met tijdsaspecten. Daarom is een brandhaard gekozen waarvan de grootte is te beïnvloeden gedurende het verloop van de proef zodat een zich ontwikkelende voertuigbrand kon worden gesimuleerd volgens een tevoren vastgestelde brandkromme. Dit is met een voertuigbrand niet mogelijk.

Om het type rook andoog te laten zijn aan een voertuigbrand is gekozen voor een brandstofmengsel bestaande uit n-heptaan en toluen in de massaverdeling 60% / 40%. Het toluen diende voorts om voldoende rookdichtheid te verkrijgen.

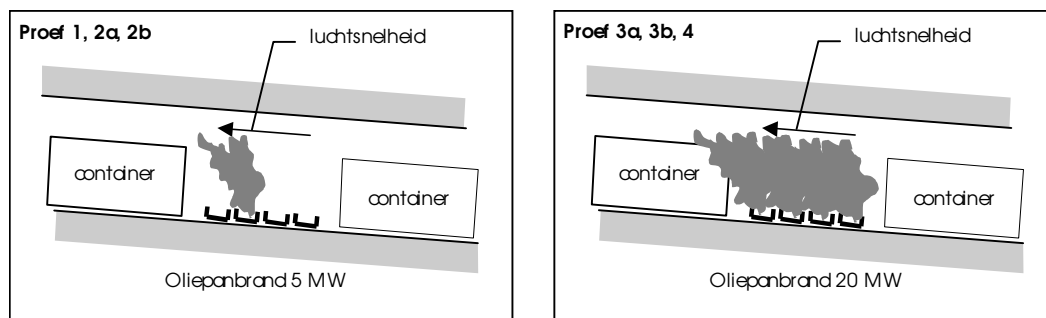
Er zijn twee brandvermogens toegepast, namelijk ter grootte van een personenauto (beoogd 5 MW, gerediseerd circa 3,5 - 4 MW) en ter grootte van een kleine vrachtwagen (beoogd circa 20 MW, gerediseerd circa 14 – 15 MW). Dit is uitgevoerd door een personenauto te simuleren met één brandbak, en de kleine vrachtauto te simuleren met vier brandbakken.

De keuze voor de grootte van de beoogde 20 MW is gebaseerd op het statistische gegeven dat grotere branden zeldzaam zijn, en het gegeven voor personen zonder beschermende kleding op korte afstand van de brand de warmtestraling niet direct levensbedreigend is. Voorts is gesteld dat branden groter dan 20 MW altijd beginnen als een kleinere brand en dat in deze proeven de rook- en warmteverspreiding in de beginfasen van de brand zou worden bestudeerd.

De geplande luchtsnelheden en brandgrootten waren als volgt:

- proef 1 en 3a: Luchtsnelheid nagenoeg 0 m/s met als doel nate gaan hoe rook en warmte zich verspreidt bij een brand op een helling doch met niet ingeschakelde mechanische ventilatie. De brand is overeenkomstig een zich ontwikkelende voertuigbrand.
- Proef 2a en 3b: luchtsnelheid overeenkomstig werkelijke situatie waarbij aan de tunneloperator gemeld wordt dat er brand is en hij de ventilatie inschakelt. In eerste instantie is de luchtsnelheid nagenoeg 0 m/s, in de meeste tunnels is de langssnelheid circa 6 m/s bij ingeschakelde ventilatie rekening houdend met plaats van de brand,

- Proef 2b en 4: hoeveelheid verkeer in de tunnel en windinvloeden. De brand is overeenkomstig een zich ontwikkelende voertuigbrand. de ventilatie in stappen opgevoerd teneinde na te gaan wat de rook- en warmteverspreiding is bij verschillende ventilatiesnelheden. De brand is hierbij bewust gekozen als een continue brandgrootte teneinde de verschillen in ventilatiesnelheid met elkaar te kunnen vergelijken.



Figuur 3.1: Schematisatie categorie 1 proeven.

Tijdens de proeven is een container stroomopwaarts en een container stroomafwaarts van de brand geplaatst. Deze dienden om verkeer in de nabijheid van een brand te simuleren overeenkomstig een werkelijke situatie met brand. Daarbij werd verondersteld dat dit gesimuleerde verkeer invloed zou kunnen hebben op de wijze van rook- en warmteverspreiding, terwijl ook de invloed van een brand op verkeer in de buurt zou kunnen worden gemeten.

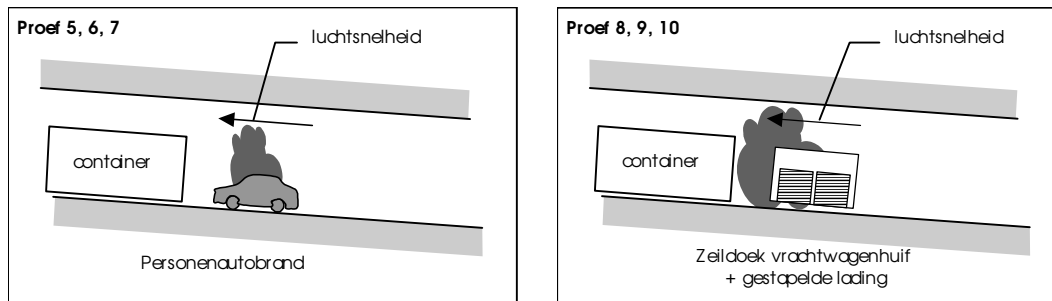
Bij deze proeven zijn ook de branddetectiesystemen getest, te weten in de proeven 1, 2 en 4. Bij deze proeven zijn op 45 m afstand van de brand diverse typen vluchtduurverlichting geplaatst teneinde na te gaan in hoeverre en hoe lang deze na ontsteken van de brand zichtbaar blijven.

3.2 Categorie 2 proeven: aanwakker effecten

De proeven zijn uitgevoerd met personenauto's en gesimuleerde vrachtwagenladingen. In het Nederlandse vrachtwagenpark komen zowel opbouwen voor bestaande uit aluminiumconstructies als constructies afgedekt met kunststof zeildoek. Bij deze proeven zijn de vrachtwagenladingen gesimuleerd door middel van een opbouw met kunststof zeildoek met daaronder een gestapelde lading pallets. Naar verwachting zou het kunststof snel verbranden waarna de luchtstroom vrij spel heeft om het vuur aan te wakkeren. Een personenauto heeft een brandvermogen van circa 5 MW. De opbouw van de zeildoekhuif met pallets was zodanig dat een brandvermogen van ca. 20 MW werd nagestreefd.

Onderzocht is de invloed van ventilatie op de ontwikkelingssnelheid en grootte van de brand als volgt:

- Proef 5, 6 en 7: personenautobrand, in proef 5 en 6 geen ventilatie (proef 6 was een herhaling van proef 5), in proef 7 ingeschakelde ventilatie met een ventilatiesnelheid van circa 6 m/s
- Proef 8, 9 en 10: zeildoekhuif met lading, in proef 8 geen ventilatie, in de proeven 9 en 10 ingeschakelde ventilatie met de meest voorkomende ventilatiesnelheid van circa 6 m/s (proef 10 was een herhaling van proef 9 in verband met betrouwbaarheid van meetresultaten)



Figuur 3.2.: Schematisatie categorie 2 proeven.

Teneinde de aanstroming van lucht niet te belemmeren is stroomopwaarts geen container geplaatst. Hoewel geen doel op zich bij deze proeven is om de rook- en warmteverspreiding stroomafwaarts van de brand na te kunnen gaan door wel een container als simulatie van verkeer geplaatst. Daarmee kan tevens de invloed van een brand op verkeer in de buurt worden gemeten. Bij deze proeven zijn op 45 m afstand van de brand diverse typen vluchtduurverlichting geplaatst teneinde na te gaan in hoeverre en hoe lang deze na ontsteken van de brand zichtbaar blijven.

3.3 Categorie 3 proeven: sprinkler

Bij de sprinklerproeven zijn 2 sprinklersedies aangebracht: één boven de zone van de brandhaard (lengte 17,5 m) en één boven een aansluitende zone stroomafwaarts (lengte 20 m). De zones zijn op deze wijze gekozen omdat op die manier het blussen van de brand en de eventuele koelende werking op voertuigen stroomafwaarts van de brand apart kan worden bestudeerd. Mede gebaseerd op eerdere proefnemingen is gekozen voor een delugesysteem⁴. Voor een goede beheersing tijdens de proeven is gekozen voor een handbediende installatie.

Er is gekozen voor een debiet van 12,5 liter/minuut per vierkante meter vloeroppervlak. Hieraan liggen de volgende overwegingen ten grondslag:

- Voor doelmatige koeling volgens gangbare normen in o.a. de petrochemische industrie moet het gehele uitgeslagen tankoppervlak worden angesproeid met 10 liter/m²/min. Tunnelgebonden systemen worden gekenmerkt door de onmogelijkheid de onderzijde van tankwagens aan te sproeien; derhalve moet worden voorzien in een overmaat van water uit het daknet.
- Volgens gangbare normen voor magazijnen is een sproeidichtheid van 12,5 liter/m²/min) geschikt voor het beheersen van een brand in uiteenlopende soorten goederen tot een opslaghoogte van 2,5 m. In vrachtwagens is een opslaghoogte van 2,5 m mogelijk terwijl de laadruimte als een mobiele opslagplaats kan worden beschouwd.

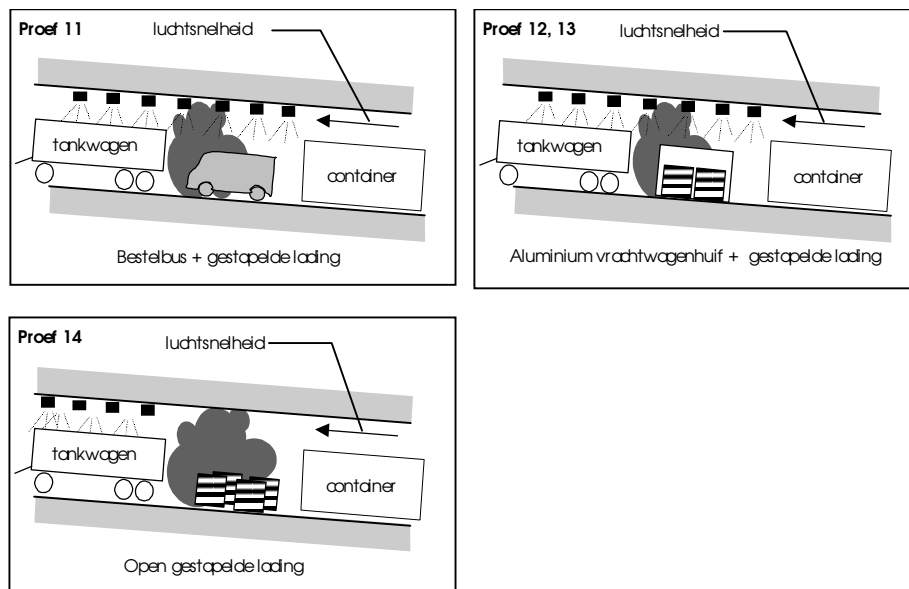
Beschrijving van de gebruikte brandhaarden:

- Proef 11: De proef had voornamelijk als doel eventuele stoomvorming te bestuderen. Derhalve is gekozen voor een voertuig (bestelbus) dat tijdens de brand zo goed mogelijk gesloten zou blijven. Het voertuig was zodanig geladen met pallets dat circa 15 MW kon worden bereikt. Door de (interne) brand zou het voertuig opgewarmd worden. De sprinkler moest sterk vertraagd ingeschakeld worden om het voertuig de gelegenheid te geven op te warmen zodat stoomvorming aanmerkelijk was. Om

⁴ Met een delugesysteem wordt bedoeld een systeem met open sprinklerkoppen, waarbij de watertoevoer wordt geregeld door middel van een centrale gestuurde klep. Dit in tegenstelling tot gesloten sprinklersystemen waarbij de sprinklerkoppen openen op basis van de ruimtetemperatuur nabij de sprinklerkop.

- stoomvorming mogelijk te maken zou een luchtsnelheid van nagenoeg 0 m/s gewenst zijn; voor de afvoer van rookgassen is de luchtsnelheid op 1 m/s gesteld.
- Proef 12, 13:** Doel van de proeven was de blussende en koelende werking van sprinkler op vrachtwagenladingen en in de nabijheid staand verkeer te onderzoeken. Bij deze proeven is gebruik gemaakt van gesimuleerde laadcabines van vrachtwagens bestaande uit een aluminium huif geladen met pallets zodanig dat circa 20 MW zou worden bereikt. Het dak van de huiven was conform werkelijke laadcabines voorzien van kunststof lichtopeningen, die bij een brand sneller wegbranden dan de aluminium huif. Dit zou invloed hebben op de bluswerking van sprinklers. Bij proef 12 is de sprinkler zo snel mogelijk na ontsteking van de brandhaard ingeschakeld, bij proef 13 juist sterk vertraagd. De reden hiervoor is gelegen in het feit dat bij de meeste toepassingen van sprinkler deze zo snel mogelijk na ontdekking van de brand wordt ingeschakeld om de brand beheersbaar te houden en mogelijk te blussen. In een tunnel kan directe inschakeling tot gevaarlijke situaties leiden wanneer er nog rijdend verkeer is zodat een vertraagde inschakeling gewenst is. Bij proef 12 is de luchtsnelheid op circa 3 m/s gesteld overeenkomend met een verwachte luchtsnelheid in een tunnel in de situatie dat het verkeer tot stilstand komt en de mechanische langsventilatie nog niet is ingeschakeld. Bij proef 13 is de luchtsnelheid op circa 0-1 m/s gesteld overeenkomend met een verwachte luchtsnelheid in een tunnel in de situatie dat het verkeer tot stilstand is gekomen en de windinvloed gering is, terwijl de mechanische langsventilatie niet wordt ingeschakeld.

Proef 14: Doel van de proef was met name de koelende werking van sprinkler op een LPG-tankwagen in de nabijheid van een brand te bestuderen. Er is een brandvermogen van circa 35 MW nagestreefd met als doel een zo groot mogelijke invloed van de brand op een tankwagen stroomafwaarts. Na ontwikkeling van de brand moest alleen de sprinklersectie boven de tankwagen worden ingeschakeld teneinde de koelende werking na te gaan, terwijl de brandhaard bewust niet zou worden gesprinklerd om de invloed van de brand zo groot mogelijk te houden. De luchtsnelheid is op circa 0-1 m/s gesteld omdat daarmee de brand en de vrijkomende rookgassen zo min mogelijk door luchtstroming zouden worden gekoeld en de invloed van de brand op korte afstand maximaal zou zijn.



Figuur 3.3: Schematisatie categorie 3 proeven.

Tijdens de proeven is een container stroomopwaarts van de brand geplaatst. Deze diende om verkeer in de nabijheid van een brand te simuleren overeenkomstig een werkelijke situatie met brand. Daarbij werd verondersteld dat dit gesimuleerde verkeer invloed zou kunnen hebben op de wijze van rook- en warmteverspreiding, terwijl ook de invloed van een brand op verkeer in de buurt zou kunnen worden gemeten.

Stroomafwaarts van de brand was een tankwagen geplaatst ter simulatie van een LPG-tankwagen. Bij proef 11 zijn ook branddetectiesystemen getest.

In aanvulling op bovengenoemde sprinklerproeven is ook een "emmer" -proef gehouden. Doel was na te gaan in hoeverre het sproei patroon van de sprinklerinstallatie zou worden beïnvloed door langsventilatie. Dit kon worden gedaan door de proef zowel met een ventilatiesnelheid van 0 m/s als met 6 m/s uit te voeren.

Tegelijk met proef 14 zijn ook nabij en onder de tankwagen emmers geplaatst teneinde de spreidichtheid te meten.

De spreidichtheid kan worden bepaald uit het volume van het water in de emmer, het bovenoppervlak van de emmer en de sproeitijd.

3.4 Categorie 4 proeven: branddetectie

De proeven van categorie 4 zijn genummerd met "nul" met daarna een volgrete. De nummering met "nul" komt voort uit het feit dat chronologisch gezien de detectieproeven ds eerste zijn uitgevoerd.

Bij de detectieproeven zijn alleen lijnvormige detectiesystemen gebruikt omdat die tijdens de definitiefase de meest kansrijke leken. Voor de proeven zijn diverse leverandiers benaderd voor medewerking. Er hebben 3 leverandiers, verder aangeduid met A, B en C, toegestemd in medewerking.

Doel van de proeven was om de grenzen van de mogelijkheden van dergelijke detectiesystemen te verkennen. Nadrukkelijk wordt gesteld dat de proeven niet ten doel hadden specifieke systemen van leverandiers op hun kwaliteit te beoordelen noch om een kwalitatieve vergelijking tussen leverandiers en hun systemen te maken.

De grootte en plaats van de brandbakken is zodanig gekozen dat zowel de tijd die verstrijkt tussen het ontsteken van de brand en tijdstip van detectie ds de plaatsnauwkeurigheid in langsrichting kon worden bestudeerd.

De snelheid van de luchtstroming in langsrichting is met behulp van de tunnelventilatie gevarieerd teneinde de gevoeligheid van branddetectiesystemen hiervoor vast te stellen.

De proeven zijn uitgevoerd met kleine brandvermogens overeenkomend met brandvermogens zoals vereist volgens de algemene voorschriften voor beproeving van branddetectiesystemen.

4 Locatie en tunnelconfiguratie

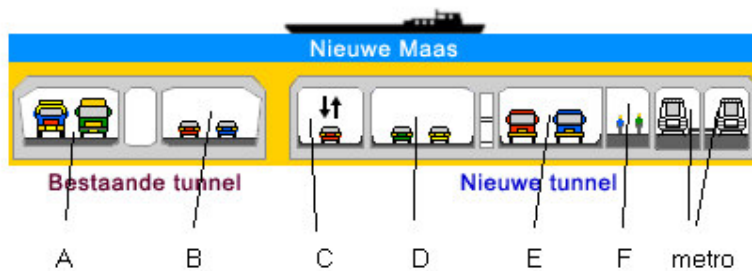
4.1 De tweede Beneluxtunnel

De proeven zijn uitgevoerd in de (nieuwe) tweede Beneluxtunnel. Deze verbindt de noordelijke oever van de Nieuwe Maas met de zuidelijke oever, ligt circa 7 km ten westen van Rotterdam en maakt onderdeel uit van de Rijksweg A4.



Figuur 4.1: Locatie van de Tweede Beneluxtunnel als onderdeel van de Rijksweg A4.

De nieuwe tweede Beneluxtunnel is gebouwd naast de bestaande Beneluxtunnel en bestaat uit aparte buizen, bestemd voor personenautoverkeer, doelgroepenverkeer, fietsers en metro. De buizen A en B verzorgen het autoverkeer van Noord naar Zuid, de buizen D en E het autoverkeer van Zuid naar Noord. Buis C is bedoeld als wisselbuis die afhankelijk van de verkeersintensiteit van Noord naar Zuid of andersom kan worden gebruikt. Buis F is bedoeld voor voetgangers en fietsers; de overige buizen worden gebruikt door de Rotterdamse metro.



Figuur 4.2: Overzicht Beneluxtunnel.

De tunnelbuizen voor autoverkeer zijn ds volgt afgewerkt:

- Wegdek: DAB (dicht asfalt beton)
- Wanden tot ca. 0,9 m hoog: betonnen barriers
- Wanden tussen ca. 0,9 en 3,6 m: afgewerkt met tegels
- Wanden boven de tegels en plafond: brandwerende bekleding type promatect H dikte 27mm

4.2 Meetgebied en ondersteunende voorzieningen

Alle brandproeven zijn uitgevoerd in buis D. De buis is maximaal 9.80 m breed en 5.10 m hoog. De brandhaard bevond zich op de rechter rijstrook, op 265 m van de noordelijk gelegen uitgang van de 900 m lange tunnel.

De meetinstrumenten in buis D zijn geplaatst over een lengte van 300 m, van 200 m stroomafwaarts tot 100 m stroomopwaarts van de brandhaard. Dientengevolge bedroeg het hellingspercentage in het meetgebied: 4.4 % (van portaal tot 50 m stroomopwaarts brand) en 3.3% (vanaf 50 m stroomopwaarts). Alle ondersteunende meetvoorzieningen waren uit veiligheidsoverwegingen in de aangrenzende tunnelbuis C opgesteld. Dit betrof o.a: de registratieapparatuur, commandowagen, kantine wagen, brandstofvoorziening t.b.v. de panbranden en watertoevoer sprinklerinstallatie.

Ten behoeve van de doorvoer van leidingen tussen buis D en C is zowel circa 10 m ten noorden van de brandhaard als circa 50 m ten zuiden van de brandhaard een gat in de wand gecreëerd door een hulppost te verwijderen. Deze gaten zijn tijdens de brandproeven rookwerend afgedicht.

Ten tijde van de brandproeven waren buis D en C nog niet in gebruik. De reeds gemonteerde verlichting en communicatie-apparatuur zijn voorafgaand aan de proevenserie gedemonteerd.

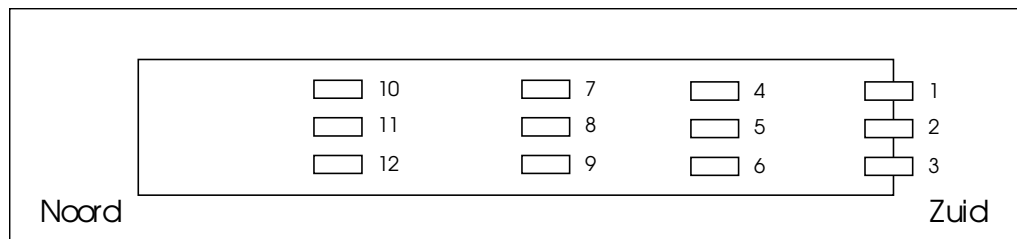
4.3 Bescherming van de tunnelconstructie

Ter bescherming van buis D tegen de verwachte hitte werden de vloer, wanden en plafond rondom de brandhaard van extra isolatie voorzien. De wanden en het plafond werden in een strook van circa 35 m aan weerszijden van de brandhaard geïsoleerd met 25 mm dikke Promadad platen. Over de lengtes van het plafond was uit hetzelfde materiaal nog een koof van 0.40 m hoogte en 1.20 m breedte geconstrueerd ter bescherming van een ophangrail. Het plafond onder de koof was dus geen 5.10 m, maar 4.70 m hoog (t.o.v. het wegdek).

Bovendien was het wegdek in een strook van circa 15 m rondom de brand beschermd door middel van een 25 mm dikke laag Promadad type 900 (in plaatvorm aangebracht) met daarop een circa 0.10 m dikke, met cement gestabiliseerde zandlaag. Dit laatste als werkvloer en als buffer voor eventueel gemorste brandstof.

4.4 Ventilatie

Voor het creëren van luchtsnelheid is gebruik gemaakt van de aanwezige straatventilatoren aan het plafond van de tunnelbuis. Tunnelbuis D is voorzien van langsventilatie door middel van drie ventilatoren in het ingangsportaal, en 3 x 3 ventilatoren in de tunnel. De ventilatoren in buis D zijn opgesteld zoals onderstaande figuur is weergegeven.



Figuur 4.3: Opstelling ventilatoren in buis D.

De ventilatoren 10, 11 en 12 zijn tijdens de proeven niet gebruikt aangezien die zich in noordelijke richting stroomopwaarts van de brandhaard bevonden en brandwerend waren beschermd.

De ventilatoren 1, 2 en 3 bevinden zich in het ingangsportaal.

De afstand van de ventilatoren 4, 5 en 6 tot zuidportaal is 250 m, d.w.z. 382 m stroomopwaarts van de brand. De afstand van de ventilatoren 7, 8 en 9 tot zuidportaal is 500 m.

De ventilatoren 1, 2 en 3 hebben elk een vermogen van 28 kW en een stromingsrendement van 95%.

De ventilatoren 4, 5 en 6 leveren 18 kW met een rendement van 75%. Effectief leveren ventilatoren 1, 2 en 3 dus een factor circa twee meer vermogen dan ventilatoren 4, 5 en 6.

De (ingang)ventilatoren 1 tot en met 3 zijn niet omkeerbaar en worden derhalve niet gebruikt bij een luchtstroming tegen de verkeersrichting in. De overige ventilatoren zijn 100% omkeerbaar en kunnen naar behoefte een luchtstroming tegen de verkeersrichting in of met het verkeer mee forceren.

Uit oriënterende berekeningen vooraf en uit verkennende metingen bleek dat met de bestaande ventilatoren, exclusief de 3 ventilatoren nabij de uitgang, de luchtsnelheid in de tunnel voldoende beheerst kon worden door het inschakelen van meer of minder ventilatoren. Hierbij is gepoogd onderstaande volgorde van schakelen aan te houden:

- ventilatoren 4, 5 en 6 (achtereenvolgens)
- ventilatoren 1, 2 en 3 (achtereenvolgens)

Het aantal in te schakelen ventilatoren is vóór aanvang van elke proef experimenteel vastgesteld vanwege de onvoorspelbare windinvloed.

Alle bij de proeven betrokken personen waren gedurende de branden zelf in buis C aanwezig (behalve in sommige gevallen brandweerpersoneel met beschermende kleding en adembescherming). De langsventilatie in buis C is daarom in verband met de veiligheid altijd, bij elke brandproef, circa 30 minuten voor aanvang van elke brandproef zodanig ingeschakeld dat een luchtstroming van zuid naar noord ontstond.

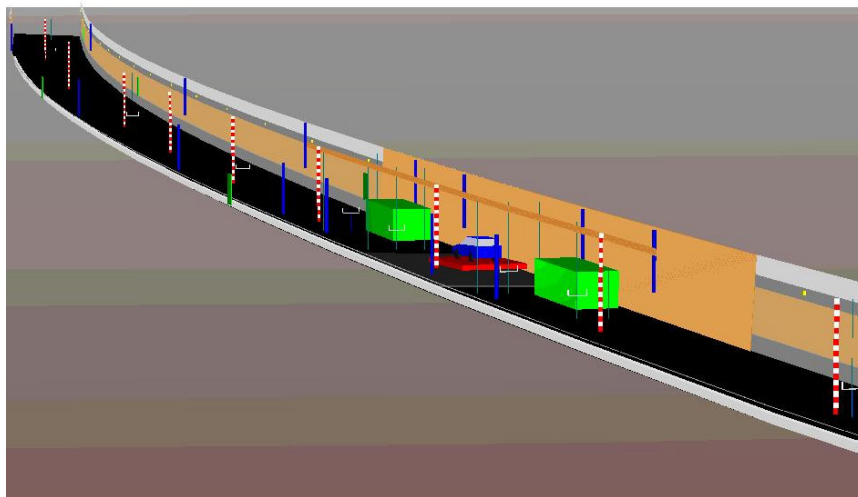
In verkeersbuis E diende gedurende de brandproeven verkeer mogelijk te zijn. Om rookintrede in die buis te voorkomen (verkeersveiligheid) is de langsventilatie in buis E circa 15 minuten voor aanvang van elke brandproef zodanig ingeschakeld dat een luchtstroming van zuid naar noord van circa 2 m/s ontstond.



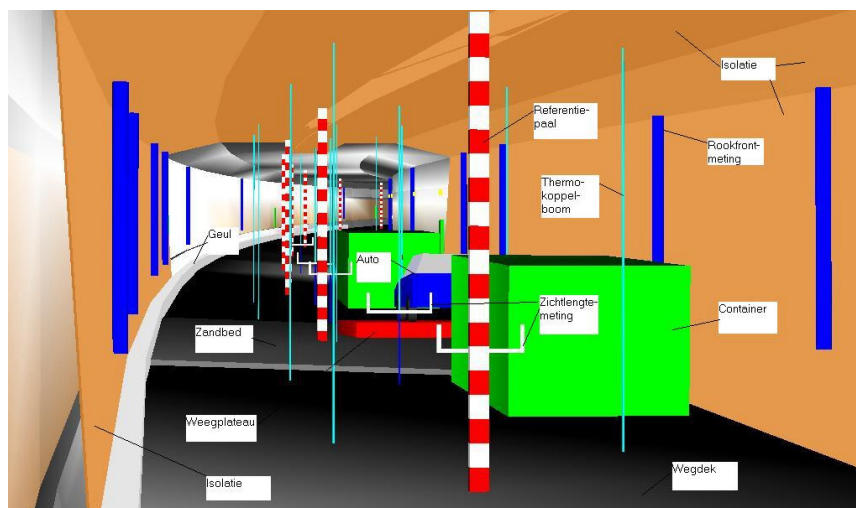
5 Proefopstelling proeven categorie 1-3

5.1 Proefopstelling

Onderstaande figuren geven in een schematisch 3D-model een overzicht van de proefopstelling.



Figuur 5.1 Overzicht van de proefopstelling in buis D kijkend in noordelijke richting van 50 meter stroomopwaarts van de brand



Figuur 5.2 Overzicht van de proefopstelling in buis D kijkend in noordelijke richting van 30 meter stroomopwaarts van de brand

Niet in de figuren zijn aangegeven:

- de brandstofbakken ten behoeve van de panbranden;
- de videocameras;
- de opstellingen voor metingen van straling, lichtsnelheden en CO-concentratie.

5.2 Beschrijving hoofdkomponenten

5.2.1 Containers

De zeecontainers zijn vóór en achter de brandhaard geplaatst op 0,40 m hoge stalen I-profielen. Dit op zo'n manier dat de lucht in de lengterichting onder de containers kon stromen. De kortste afstand van elke container tot het midden van de brandhaard bedroeg 13 m. De containers voldeden aan de ISO standaarden: lengte 20 ft (6 meter), breedte 8 ft (2.44 m) en hoogte 8,6 ft (2.59 m).

5.2.2 Tankwagen

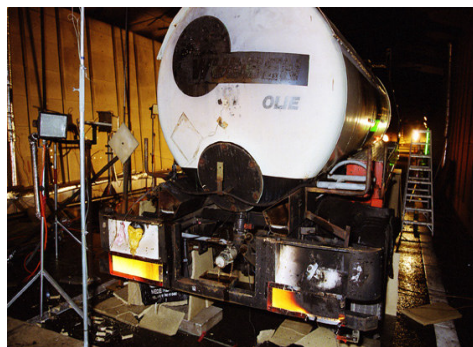
Ten behoeve van de sprinklerproeven is een tankwagen zonder cabine aangeschaft.

Technische gegevens van de tanktrailer:

- Tankinhoud : circa 16 m³
- Leeggewicht : circa 4.500 kg
- Tanklengte : circa 9,5 m
- Tanktype : geschikt voor stookolie, stalen wand, mangat bovenop
- Lading : leeg (nagenoeg)

Ter simulatie van in Nederland voorkomende tankauto's voor LPG is ten behoeve van de proef op het dak van de tank een stalen plaat gelast op een afstand van circa 2 m van de tankwand.

De afstand tussen de tanktrailer en de brandhaard was bij proef 11 circa 10 meter en bij de proeven 12, 13 en 14 circa 5 meter. De reden voor het verkleinen van de afstand was de invloed van de brand op de opwarming van de tankwagen te vergroten.



Figuur 5.3: De tankwagen.

5.2.3 Vluchtdeurverlichting

Door twee leveranciers zijn verschillende soorten vluchtwegaanduidingen geplaatst bestaande uit:

- Een armatuur met een TL-achtige lamp (groen uitstralend)
- Een lichtlijn bestaande uit groene LED's opgenomen in een kunststof behuizing
- Een flexibel kunststof band met daarin 2 parallelle zwak oplichtende LED's

De armatuur en de lichtlijn waren bevestigd op lattenstelsels in de vorm van een vluchtdeur en los tegen de wand geplaatst op circa 45 m stroomafwaarts van de brandhaard. De flexibele band was op de grond gelegd vanaf de brandhaard tot circa 45 meter stroomafwaarts.

5.3 De panbranden (proeven categorie 1)

5.3.1 Opstelling panbranden

De opstelling voor de panbranden bestond uit een viertal stalen brandbakken, die met een onderlinge ruimte van 0.5 m op het midden van de rechterijstrook waren geplaatst.



Figuur 5.4: Illustratie categorie 1 proeven: panbranden (5 MW en 20 MW).

De bakken waren dubbelwandig uitgevoerd waarbij water tussen beide wanden zorgde voor de noodzakelijke koeling van de wanden van de binnenste brandbak. Deze brandbak had als afmetingen: 1800 x 1000 x 100 mm (l x b x h). In de bodem van de brandbakken was een voorziening aanwezig voor de toevoer van brandstof. In deze voorziening was ook een terugslagklep opgenomen om te voorkomen dat er in geval van het stoppen van de vloeistofstroom vlamterugslag zou kunnen plaatsvinden in de toevoerleiding van de brandstof.

De toevoer van de brandstof geschiedde door middel van een pneumatische aangedreven vloeistofpomp met een aanzuigsonde (stijgbuis) die in de brandstofvaten werd gestoken. Door reduceren van de persluchtdruk kon de pompcapaciteit worden geregeld. De uitstroom van de pomp was aangesloten op een verdeelunit voorzien van een viertal kogelkranen. Op de kranen werden de vier brandstoftoevoerleidingen van de brandstoffbakken aangesloten. Met behulp van de vier kranen in combinatie met de pompregeling konden de brandstoffbakken onafhankelijk van elkaar van brandstof worden voorzien.

Onderstaande figuren tonen de opstelling van de brandstoffbakken in buis D en de opstelling voor de brandstofregeling in buis C.



Figuur 5.5 Opstelling voor panbranden in buis D (links) en buis C (rechts).

5.3.2 Regeling brandvermogen

De brandstofbakken zijn ontworpen op een nominaal vermogen van 5 MW per bak als het volledige oppervlakte van de bak wordt benut. Dit vermogen kan worden verlaagd door verkleining van het brandstofoppervlak in de bak. Hierbij mag bij benadering een lineair verband tussen het oppervlak en het brandvermogen worden verondersteld. De regeling van het brandstofoppervlak is mogelijk door de brandstofbakken scheef te plaatsen. Dit is gerediseerd door de brandstofbakken over hun lengte van 2 meter, 20 mm scheef te plaatsen met de brandstoftoevoer op het laagste punt.

5.3.3 Bepaling brandvermogen: brandstof

De keuze van de brandstof was gebaseerd op de eis dat de warmte- en rookproductie vooraf bekend moesten zijn en bij benadering gelijk aan die van een gemiddelde autobrand. Op grond van voorbereidende experimenten bij TNO-CvB is gekozen voor een mengsel van 60 % (massa) n-heptaan en 40 % toluen. Dit mengsel heeft een theoretische verbrandingswaarde van 45,8 MJ/kg waarmee per brandbak 5 MW kan worden gehaald. Bij nadere beschouwing is echter gebleken dat het realistisch is om uit te gaan van circa 38,4 MJ/kg. Bij deze verbrandingswaarde wordt niet geheel de ontwerp eis van 5 MW per brandbak gehaald. Een nadere analyse van de verbrandingswaarde is opgenomen in bijlage II.3.

In verband met de giftige en explosieve eigenschappen van het brandstofmengsel zijn specifieke veiligheidsmaatregelen genomen. Dit betrof o.a.: het dragen van beschermende kleding; het plaatsen van een lekbak onder de vaten; en het monitoren van de luchtsamenstelling met explosiemeters.

Het werkelijke brandvermogen tijdens de uitvoering van de proeven is bepaald op basis van het brandstofdebiet naar de bakken en de gemeten temperaturen in de brandstofbakken. De temperaturen geven een indicatie van de verandering van het vloeistofniveau in de bak. Dit is nodig om te bepalen in hoeverre het toegevoerde debiet gelijk is aan de verdamping/verbranding. Het toegevoerde debiet is bepaald aan de hand van de gewichtsafname van het brandstofvat. Hiertoe werd het vat op een elektronische weegschaal geplaatst. De nauwkeurigheid van de gewichtsmeting was beter dan ± 0.1 % van de meetwaarde.

5.3.4 Aansteken en uitdoven

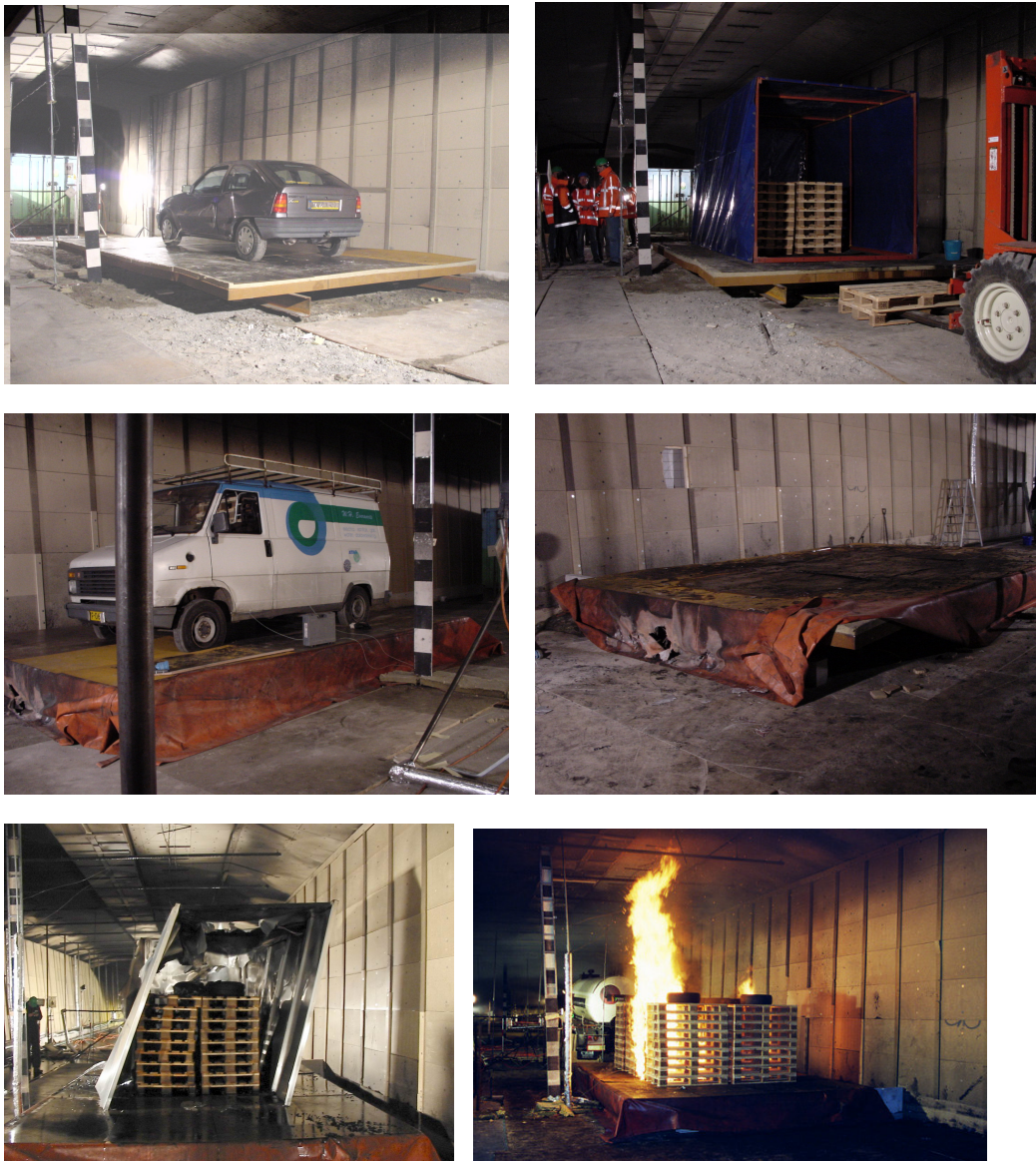
De bakken zijn handmatig met een fakkel aangestoken, nadat deze elk voor circa $\frac{1}{4}$ met brandstof waren gevuld. Bij proeven 1 en 2 (5 MW brand, met slechts één pan) is pan nr 3 aangestoken, d.w.z. de eerste pan stroomafwaarts van het centrum van de brand. Bij proeven 3 en 4 (20 MW brand met vier bakken) zijn de pannen in stroomopwaartse richting aangestoken, d.w.z. achtereenvolgens pan 4, 3, 2 en 1. Bij proef 3 duurde dit circa 40 s en bij proef 4 circa 60 s.

De branden werden beëindigd door de brandstoftoevoer af te sluiten en de brandbakken leeg te laten branden.

5.4 De voertuig- en ladingbranden (categorie 2 en 3)

5.4.1 Bepaling brandvermogen: weegsysteem

Bij proeven 5 t/m 14 is het brandvermogen bepaald aan de hand van de gewichtsafname van de brandhaard tijdens de proef. De personenauto, bestelbus of huif met gestapelde houtlading werd hiertoe (met de neus in de rijrichting) op het midden van een speciaal ontworpen weegplateau gezet dat op vier krachtopnemers was geplaatst. Het weegplateau had een vloeroppervlak van $6.0 \times 4.0 \text{ m}^2$ (lengte x breedte) en was in de lengterichting opgesteld centraal op de rechterrijstrook van tunnelbuis D. Het vloerniveau van het plateau bevond zich ca. 400 mm boven het wegniveau.



Figuur 5.6 Overzicht van de gebruikte voertuigen, blusdeken, laddruimten en gestapelde ladingen

5.4.2 De voertuigbranden in proef 5, 6 en 7

Ten behoeve van proef 5, 6 en 7 werden drie slooppauto's aangeschaft; allen van het type Opel Kadett. De auto's voldeden aan de volgende, voorafgestelde eisen:

- Middenklasse personenauto;
- Merk en type gelijk in verband met reproduceerbaarheid;
- Leeftijd jonger dan 1990 (in verband met gebruik kunststoffen);
- De auto is compleet en zo goed mogelijk in de oorspronkelijke vorm;
- Ramen intact, in voorste portieren half naar beneden geopend, ramen in achterste portieren en andere te openen ramen gesloten;
- Benzinetank ½ vol, 25-30 liter benzine;
- Banden lek in verband met explosiegevaar; Aacu en olie verwijderd.

De auto's werden in brand gestoken door een klein bakje benzine aan te steken dat onder de stoel van de bestuurder was geplaatst.

5.4.3 De voertuigbrand in proef 11

Ten behoeve van proef 11 is een bestelbus van de sloop aangeschaft van het type Citroen Jumper. Het voertuig voldeed aan de volgende, voorafgestelde eisen:

- Middelgrote bestelbus, van voren ramen; bij het laadgedeelte alleen in de achterdeuren ramen; tussen cabine en laadgedeelte geen afscheiding;
- Leeftijd, merk en type geen eisen;
- Het voertuig is compleet en zo goed mogelijk in de oorspronkelijke vorm;
- Ramen intact, in voorste portieren half naar beneden geopend;
- Achterdeur laadruimte op een kier;
- Benzinetank ½ vol; 40 liter benzine;
- Banden lek in verband met explosiegevaar;
- Aacu en olie verwijderd.

De bus was geladen met 18 stuks houten Euro-pallets (gewicht per stuk 22 kg) en 3 autobanden. Hiermee werd beoogd een maximaal brandvermogen van circa 15 MW te realiseren.

De bestelbus is in brand gestoken door een klein bakje benzine aan te steken dat op de stoel van de bestuurder was geplaatst. Het was niet mogelijk de bak onder de stoel te plaatsen.

5.4.4 Gesimuleerde vrachtwagenbrand in proef 8, 9 en 10

Ten behoeve van proef 8, 9 en 10 is een laadruimte conform die van een kleine vrachtwagen nabgebouwd met uitwendige afmetingen: 4.5 m x 2.4 m x 2.5 m (lengte x breedte x hoogte).

De laadruimte, ook wel aangeduid met 'zeildoek vrachtwagenhul', bestond uit een plaatstalen vloer met daarop een demontabel frame van onbewerkte staalprofielen. Over het frame was een Bisonyl zeil gespannen dat aan de achter- en onderzijde met tourniquettes (hart op hart 500 mm) was vastgezet aan het frame. De achterzijde van de laadruimte was open.

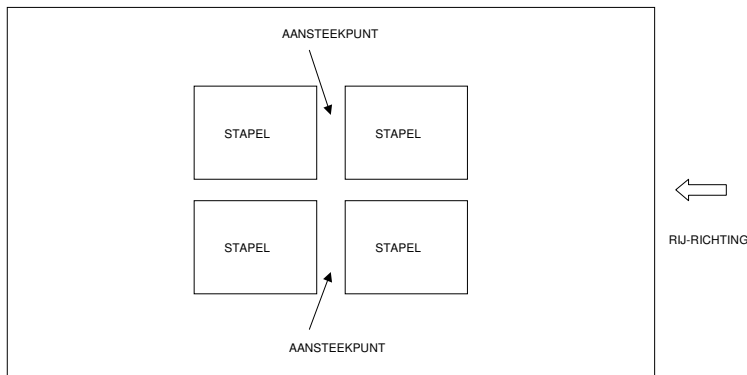
De laadruimte was geladen met 4 stapels van elk 9 houten Euro-pallets (in totaal 36 stuks) met op elke stapel een autoband. Hiermee werd beoogd een maximaal brandvermogen van circa 20 MW te realiseren. De autobanden waren toegevoegd om extra rook te produceren.

De lading is aangestoken door twee bakjes benzine aan te steken die op de laadvloer in het midden tussen de houtstapels waren geplaatst.

5.4.5 Gesimuleerde vrachtwagenbrand in proef 12 en 13

Ten behoeve van proef 12 en 13 is een laadruimte conform die van een kleine vrachtwagen nagebouwd met uitwendige afmetingen: 4.0 m x 2.0 m x 2.5 m (lengte x breedte x hoogte). De laadruimte, ook wel aangeduid met 'aluminium vrachtwagenhuif', bestond uit een plaatstalen vloer met daarop een zelfdragende huif opgebouwd uit 2 mm dikke aluminium platen. De zijwanden en voorwand van de huif bestonden uit negen omgezette platen die op locatie in elkaar zijn gezet middels een boutverbinding. De kap bestond uit drie platen met omgezette kant die over de zijwanden vielen en voorzien waren van verstijvingsribben. In de kapplaten waren twee kunststof lichtstroken aangebracht, elk circa 0.5 m lang. De achterzijde van de laadruimte was open.

De laadruimte was geladen met 4 stapels van elk 9 houten Euro-pallets (in totaal 36 stuks) met op elke stapel een autoband. Hiermee werd beoogd een maximaal brandvermogen van circa 20 MW te realiseren. De autobanden waren toegevoegd om extra rook te produceren. De lading is aangestoken door twee bakjes benzine aan te steken die op de laadvloer in het midden tussen de houtstapels waren geplaatst.

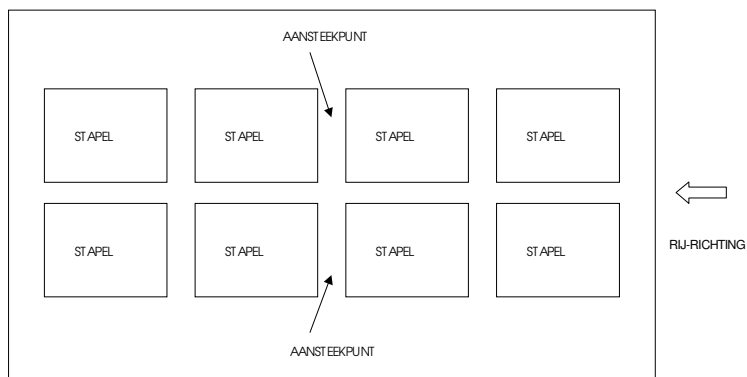


figuur 5.7 opstelling van houtstapels

5.4.6 Gesimuleerde ladingbrand in proef 14

Op het weegplateau werden twee rijen van elk vier houtstapels geplaatst. Elk stapel bestond uit negen houten Euro-pallets. Er werden in totaal 72 pallets verbrand, teneinde een maximaal brandvermogen van circa 40 MW te realiseren. Ten behoeve van extra rookontwikkeling zijn 6 autobanden toegevoegd.

De lading is aangestoken door twee bakjes benzine aan te steken die op het weegplateau tussen de houtstapels waren geplaatst. De bakjes waren in het midden van elke rij geplaatst.



figuur 5.8 opstelling van houtstapels in proef 14

5.5 De meetopstelling

De positie van de meetopnemers is beschreven in bijlagen II.1 en II.2.

Bij de meetopnemers is opgemerkt:

- De temperatuurmetingen waren in het algemeen niet afgeschermd tegen warmtestraling. De invloed van warmtestraling is geschat op basis van enige afgeschermd thermokoppels nabij de brandhaard.
- In de tunnel waren op bepaalde plaatsen zwart/wit geblokte referentieplaten geplaatst om visueel via de camera's vast te stellen op welke hoogte de rook boven het wegdek hing en hoe snel het zicht in de tunnel verminderde. De hoogte van de blokken bedroeg 25 cm.
- In de tunnel waren zichtlengte en rookfrontmeters opgesteld beide werkend op basis van een lasersysteem.
- De rookfrontmeters waren bedoeld om vast te stellen hoe snel het rookfront zich door de tunnel bewoog. De zichtmeters waren hiervoor eveneens te gebruiken.

Er wordt rekening gehouden met de volgende onnauwkeurigheden van de meetopnemers:

Tabel 5.9 meetnauwkeurigheid

Meting	Afwijking
Temperatuur (thermokoppel)	$\pm 3-8 \%$
Straling	$\pm 5\%$
Luchtsnelheid	$\pm 2,5\%$
Lasersystemen	$\pm 5\%$

5.6 Videoregistratie

De brandontwikkeling en rookverspreiding werden op video geregistreerd door de firma Huls Kamp. Dit gebeurde met in totaal zes camera's (deels watergekoeld), en een compleet ingerichte regiewagen die circa 120 uur aan beeldmateriaal heeft opgenomen. De posities van de gebruikte videocamera's staan in tabel 5.10 vermeld. Merk op dat camera VC3 40 meter buiten de tunnel is geplaatst (zie eveneens de overzichtstekening in bijlage II.1).

Tabel 5.10 Posities en identificatie videocameras

POSITIES VIDEOCAMERAS								
Afstand in dwarsrichting		↓ ↓ ↓ Afstand tot brandhaard in lengterichting (m)						
Plaats	Vanaf midden (m)	300	85	45	5	0	-5	-45
Rijstrook oost	1.800	brand						
Midden	0.000							
Rijstrook west	-3.600	VC3	VC4	VC2	VC5		VC6	VC1
Hoogte videocameras: 1,5 m, richting: kijkend naar de brand								

5.7 Sprinklersysteem

Er is voorzien een tijdelijke handbediende sprinklerinstallatie, volgens het deluge systeem⁵. Het systeem heeft twee aaneengesloten secties van 17,5 m en 20 m, bestaande uit 15 sprinklerleidingen op een onderlinge afstand van 2,5 m. Per sprinklerleiding waren staand op de leiding 3 sprinklerkoppen gemonteerd, waarbij de onderlinge afstand tussen sprinklerkoppen op dezelfde leiding circa 3,5 m was. De middelste sprinklerkop was in het hart van de tunnel. De open sprinklers waren van het type conventioneel, old style, 20 mm, typegekeurd. De sproeidichtheid van het systeem was berekend op 12,5 mm/min.



Figuur 5.11 Sprinklerleidingen aan tunnelplafond.

De installatie werd handmatig geactiveerd door het openen van de vlinderkleppen in de centrale watertoevoerinstallatie.

De tijdelijke watervoorziening van deze installatie bestond uit apparatuur van de brandweer. Het benodigde water werd betrokken uit het waterreservoir aan de noordzijde van de tunnel. De autospuiter van de brandweer leverde het water aan de verdeelleiding onder de vlinderkleppen. Deze verdeelleiding was voorzien van een stromingsmeter (fabrikaat Annubar Eagle Eye) en een manometer (klasse 1.0).

⁵ Met een delugesysteem wordt bedoeld een systeem met open sprinklerkoppen, waarbij de watertoevoer wordt geregeld door middel van een centrale gestuurde klep. Dit in tegenstelling tot gesloten sprinklersystemen waarbij de sprinklerkoppen worden geopend op basis van de ruimtetemperatuur nabij de sprinklerkop.

6 Proefopstelling proeven categorie 4

6.1 Proefopstelling

De detectielijnen zijn op de volgende posities in de tunnel gemonteerd:

- Van elke leverancier een detectielijn tegen het plafond recht boven de plaats van de brandhaard van de proeven 1 tot en met 15;
- Van elke leverancier een detectielijn tegen het tunnelplafond nabij de linker tunnelwand (westzijde) waarbij de afstand tot de tunnelwand 0,5 tot 1,0 meter bedroeg.
- In lengterichting waren de detectielijnen geplaatst vanaf circa 35 meter voor de positie van het hart van de brandhaard van de proeven 1 tot en met 15 tot 35 meter daarna (totaal circa 70 meter)

De proeven 0A en OD zijn uitgevoerd met een brandblok met een oppervlak van 0,52 m² en de proeven 0E tot en met 0I met een brandblok met een oppervlak van 1,13 m².

De gebruikte brandstof in de proeven 0A tot en met 0I was ethylalcohol 85%. De brandstof is kort voor elke test in de brandblok gegoten.

De plaats van de brandblokken in lengterichting was 5m stroomafwaarts van het hart van de brandhaard van de proeven 1-15.

De plaats van de brandblokken is in breedterichting gevarieerd als volgt:

- Proef 0C en 0D:
In proef 0C de bak recht onder de detectielijnen boven de rechterrijstrook (oost).
In proef 0D de bak recht onder de detectielijnen nabij de linkerzijwand (west).
Doel was nate gaan wat het verschil was in reactie van een lijn met de brandhaard er recht onder en een lijn met de brandhaard op enige afstand.
- Proef 0E, 0F, 0G en 0I:
Doel was de invloed van langsstroming te onderzoeken, daarom is een grotere bak dan in de proeven 0C en 0D gebruikt.
De ventilatiesnelheid was gepland als 0, 3 en 6 m/s.
Proef 0I vormde een herhaling van proef 0E ter verificatie.
- Proef 0H:
Doel was het verschil in detectiesnelheid en plaats vast te stellen voor een detectielijn gemonteerd boven de rechterrijstrook (de meest waarschijnlijke plaats) en een detectielijn nabij een wand van de tunnel (in werkelijkheid mogelijk een noodzakelijke positie).

In proef 0J is de invloed van een bovuutlaat van een vrachtwagen op de detectiesystemen bekeken in verband met het vermijden van valse meldingen.



Proeven 0C en 0D, brandbak 0,51 m²



Proeven 0E-0I, brandbak 1,13 m²



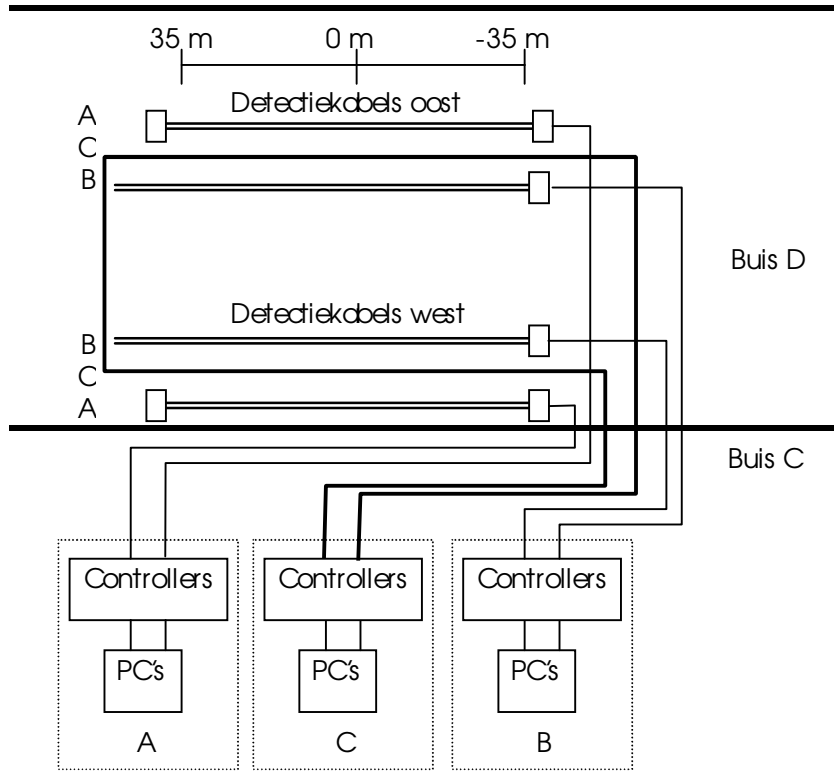
Proef 0J, vrachtauto-uitlaat

Figuur 6.1 Toegepaste brandblokken en uitlaat vrachtauto in de categorie 0 proeven.

6.2 De detectiesystemen

Een branddetectiesysteem bestaat globaal uit twee delen:

- Detectiekabel die in tunnelbuis D is opgehangen. De detectiekabel meet de temperatuur en geeft deze door aan de controller;
- De controller ontvangt de temperatuurinformatie van de kabel en analyseert deze temperatuurinformatie. De controller geeft alarmen uit als de temperatuurwaarden daar aanleiding toe geven. De controllers staan in buis C. Voor deze beproevingen zijn aan de controllers-PC gekoppeld voor het vastleggen van de temperatuurinformatie.



Figuur 6.2 Overzicht van de drie geïnstalleerde detectiesystemen A, B en C in de tunnel.

6.2.1 Typen kabels

Het type branddetectiekabel bepaalt in belangrijke mate de temperatureigenschappen van het branddetectiesysteem. De kabels van systeem A en B bevatten sensoren, de kabel van systeem C is een glasvezelkabel.

Kort volgt een overzicht van de toegepaste kabels:

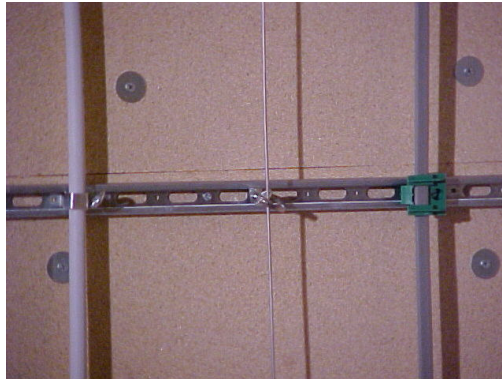
- **Kabel A:** afgeronde rechthoekige kabel van 16 x 7 mm. Buiten- en binnenmantel hdogeenvrij, respectievelijk voor chemische- en vochtbescherming. De kabel die gebruikt is voor deze beproeving heeft elke 4 meter een elektronische temperatuursensor;
- **Kabel B:** rond, diameter 19 mm: kabelmantel hdogeenvrij, aluminium scherm, vulmassa en detectiecircuits. De kabel die gebruikt is voor deze beproeving heeft elke 2 meter een elektronische temperatuursensor. De systemen die leverancier B gemonteerd hebben kleine verschillen, daarom worden deze aangeduid met type B-I en type B-II;

- **Kabel C:** ronde RVS buis, diameter 3,2 mm, met daarin een glasvezel. Deze glasvezel loopt van de controller in een lus door de twee secties (west en oost) en komt weer terug bij de controller; bij één breuk zijn alle meetpunten nog bereikbaar vanaf één van beide zijden. Omdat de gehele glasvezel een soort temperatuursensor is, zijn voor de glasvezel datapunten in het proefgebied gedefinieerd met een onderlinge afstand van 1 meter. Per datapunt wordt een temperatuur afgegeven door het systeem.

Bij systeem A en B valt bij één kabelbreuk het deel van de kabel achter de breuk uit. Indien de breuk een kortsluiting veroorzaakt valt de gehele kabel uit.



Ophanging kabels, dwarskoof en koof in de lengterichting



De 3 kabels en ophanging B, C en A

Figuur 6.3: Ophanging van de detectiekabels.

De detectiekabels zijn alle opgehangen aan montagestrips met een onderlinge afstand van 1 meter. De detectiekabels hingen circa 0,2 m uit elkaar. De montagestrips bestonden uit:

- Systeem A : kunststof klem
- Systeem B : aluminium beugel
- Systeem C : metalen kabelbindband

6.2.2 Plaatsbepeding van sensoren

Voorafgaand aan de brandproeven zijn testen uitgevoerd om de positie van de sensoren volgens de lengte afstandverdeling in de tunnel te bepalen. Op zes vastgestelde plaatsen is de temperatuur van de kabel veranderd met een brander of koelspray. Aan de hand van de plaats van de temperatuurverandering en de door het systeem weergegeven plaats van temperatuurverandering is de lengte plaats van de sensoren (systeem A en B) en datapunten bepaald (systeem C). Hierbij is de testplaats, de plaats van de brandbak (lengte afstand 5 meter), gebruikt als middelpunt. De plaatsnauwkeurigheid hier is 1 meter. Verder weg van het vuur kan de lengte plaats grotere afwijkingen vertonen (tot 2 meter) door het niet geheel strak hangen van de detectiekabel en door een dwarskoof op 25,5 meter.

6.2.3 Alarminstellingen

Alle detectiesystemen hebben twee alarminstellingen:

- **Maximaal:** op het systeem wordt een maximale temperatuur ingesteld. Bij overschrijding wordt een alarm gegenereerd;
- **Differentiaal:** op het systeem wordt een differentiaaltemperatuur ingesteld. Afhankelijk van de instelling wordt een bepaalde temperatuuroptoe in een tijdsbestek een alarm gegeven.

De leverandiers hebben op basis van ervaring en inzicht aan de hand van de proeven 0A en 0B de darmeempels ingesteld; alle systemen bieden ruim voldoende mogelijkheden om diverse instellingen te maken (zie tabel).

Tabel 6.4 Alarminstellingen van de drie detectiesystemen.

Alarminstellingen	Systeem A	Systeem B	Systeem C
Maximaal alarm	50 °C	50 °C	60 °C
Differentiaalalarm	10,3 °C/minuut	3,4 °C per 200 seconden	40 °C/minuut
Afschakeltemperatuur	120 °C (bescherming apparatuur)	systeem B-I : 99,9 °C systeem B-II: geen afschakeling toegepast	Geen

III THEORIE

In dit deel worden de vluchtcriteria en de fysische achtergronden van een brand in een tunnel gepresenteerd. Daarbij wordt de warmte- en rookverspreiding in een tunnel gezien, waarbij uit de literatuur bekende begrippen als 'stratificatie', 'kritieke snelheid ter voorkoming van backlayering' en 'mengfactor' worden toegelicht. Tevens wordt aan de hand van theoretische modellen ingegaan op brandontwikkeling.

Aan de hand van de hier gepresenteerde theorie en begrippen zijn de resultaten van de brandproeven beschreven en zijn de vluchtomstandigheden geanalyseerd.

7 Vluchtcriteria

De volgende bedreigingen zijn beschouwd:

- blootstelling aan hete gassen;
- blootstelling aan warmtestraling.
- verlies van zicht.;
- blootstelling aan toxische stoffen.

7.1 Temperatuur

Mensen die zich in hete lucht of rook bevinden kunnen door twee mechanismen letsel oplopen:

- huidverbranding;
- longverbranding.

Uit referentie (18) volgt onderstaande tabel met vermelding van temperatuurseffecten op mensen gebaseerd op droge lucht:

Tabel 7.1 Temperatuur versus responsie

Temperatuur (°C)	Responsie
127	Moelijk ademen
140	Tolerantielimiet 5 min
149	Moelijk door mond ademen, grens voor vluchten
160	Ondraaglijke pijn
182	Onomkeerbare schade in 30 seconden
200	Ademhalingssysteem bezwijkt binnen 4 minuten

Boven 150 °C ontstaan binnen 5 minuten huidbrandwonden. Onder de 70 °C kan men oncomfortabel, maar wel veilig, langere tijd verblijven.

Tussen 70 en 150 °C geeft referentie (18) onderstaande betrekking tussen de maximale blootstellingsduur t in seconden en de temperatuur T in °C:

$$t = 5.33 \cdot 10^8 \cdot (1 / T^{3.66})$$

Voor blootstelling aan warmte in een 'watermist' omgeving, die ontstaat na gebruik van een sprinkler, wordt conform de PIARC-richtlijn gesteld dat bij een temperatuur van 50°C de warmteoverdracht naar de huid zo sterk toegenomen is ten opzichte van een droge omgeving en dat ook de kans op condensatie in de longen zodanig is toegenomen dat letditeit optreedt.

Samenvattend worden voor verblijf in een warme omgeving de volgende kritieke waarden voorgesteld:

- *hinderlijk*: temperatuur = 70 °C indien droge omgeving
(oncomfortabel, maar wel veilig, langere tijd te verblijven)
- *letad*: temperatuur = 150 °C
(er ontstaan binnen 5 minuten brandwonden op de huid)
- *letad*: temperatuur = 50 °C indien een vochtige omgeving

7.2 Warmtestraling

Ook door de warmtestraling uitgezonden door hete gassen en vaste oppervlakken, buiten het vlam bereik en de hete rookgaszone, kunnen personen door hitte worden bedreigd. Hierbij is maatgevend:

- intensiteit van de warmtestraling die invalt op de huid;
- tijdsduur van blootstelling;
- plaats die aan de warmtestraling wordt blootgesteld.

Bij een beperkte tunnelbrand kan een tunnelgebruiker zich gemakkelijk onttrekken aan de vlamwarmtestraling door te vluchten vanaf de brand. Aan de warmtestraling afkomstig van een tegen het tunneldek liggende rooklaag is minder gemakkelijk te ontkomen, omdat deze over grote afstand hoog kan zijn.

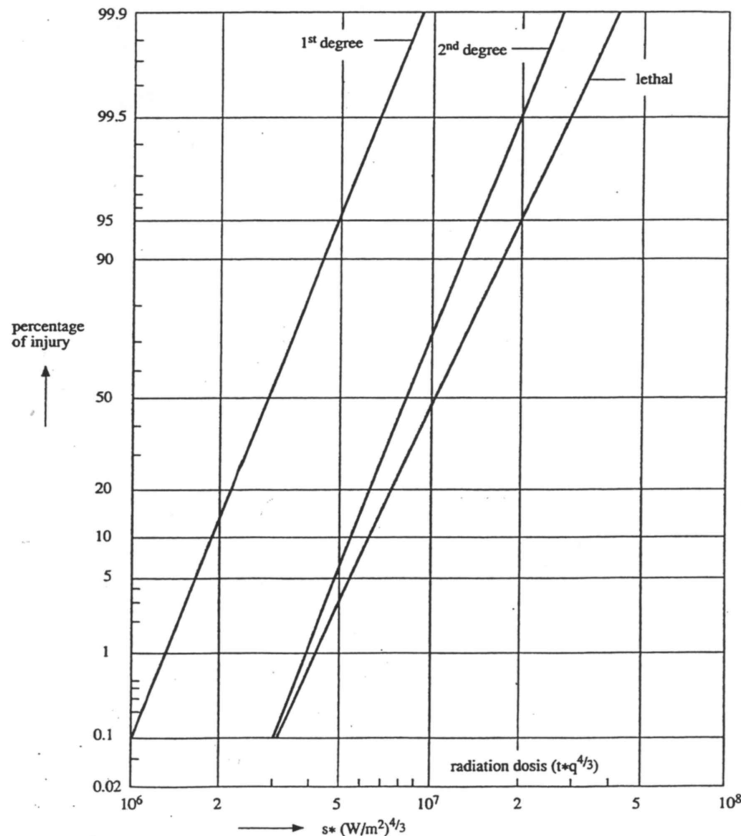
Gegevens over kritieke niveaus voor de warmtestralingsflux zijn ontleend aan (19): De CPR16E geeft zgn. probitrelaties voor 1^o en 2^o graads brandwonden en voor dodelijke blootstelling, afgeleid van gegevens voor infraroodstraling gemeten in experimenten met vloeistofbranden. Het schadeniveau is afhankelijk van de opgenomen dosis warmte uitgedrukt in het product van de blootstellingstijd "t" en de warmtestralingsflux "q" volgens de relatie $t \cdot q^{4/3}$:

Eerstegraads brandwonden : $\text{Probit} = -39,83 + 3,0186 \cdot \ln(t \cdot q^{4/3})$

Tweedegraads brandwonden : $\text{Probit} = -43,14 + 3,0186 \cdot \ln(t \cdot q^{4/3})$

Dodelijk : $\text{Probit} = -36,38 + 2,5600 \cdot \ln(t \cdot q^{4/3})$

De probitwaarden worden via een conversietabel omgerekend naar de kans op optreden van het betreffende schadeniveau, zie figuur 7.1.



Figuur 7.1 Schadeniveau versus stralingsdosis.

Hieruit blijkt dat bij een dosis van $1.05 \times 10^7 \text{ s} \cdot (\text{W}/\text{m}^2)^{4/3}$ 50% van de personen overlijdt. Dit komt overeen met 20 seconden lang $20 \text{ kW}/\text{m}^2$ of met 100 seconden $5.8 \text{ kW}/\text{m}^2$. Eerstegraads brandwonden ontstaan na 20 seconden blootstelling aan $7.3 \text{ kW}/\text{m}^2$ of na 100 seconden aan $2.1 \text{ kW}/\text{m}^2$. Anders gezegd, bij een vluchtperiode van 100 seconden en een stralingsniveau van $6 \text{ kW}/\text{m}^2$ zal circa de helft van de vluchtenden omkomen, terwijl bij $2 \text{ kW}/\text{m}^2$ de helft eerstegraads brandwonden zal oplopen. De relaties gelden voor een naakte huid.

Overigens is in de CPR 16E niet duidelijk aangegeven of het schadeniveau "dodelijk" uitgaat van bijvoorbeeld een normaal gekleed persoon met een beperkt percentage naakte huid (handen, hoofd). Bij een door kleding beschermde huid is de warmtestraling niet alleen bepalend voor de optredende schade. De huidtemperatuur wordt ook bepaald door de kledingisolatie, rekening houdend met luchtlagen, smelten, ontsteken. Voor de tijdsduur bepaling waarbij een bepaalde huidtemperatuur kan worden verdragen bevat de CPR 16E een grafiek.
Ter info: 45°C : langdurig, 52°C circa 100 s..

Samenvattend worden voor straling een tweede kritieke waarden voorgesteld, gebaseerd op het effect na 100 seconden:

- *hinderlijk* : stralingsflux = $2 \text{ kW}/\text{m}^2$ (helft vluchtenden 1^e graads brandwonden)
- *letaal* : stralingsflux = $6 \text{ kW}/\text{m}^2$ (helft vluchtenden zal omkomen)

7.3 Zicht

Een maatgevende bedreiging bij brand is zichtverlies door aanwezige rook. Hierdoor treedt desoriëntatie op met als gevolg dat mensen niet meer in staat zijn om (snel) de vluchtuitsgangen te bereiken. Zichtverlies hangt samen met:

- lichtabsorptie en lichtverstrooiing door rookdeeltjes;
- irriterende werking van deeltjes en gas op de ogen.

De rookdeeltjes ontstaan in de vlammen als vaste deeltjes (as) en vloeibare deeltjes (condensaat). De productie is naast het verbrandingsproduct afhankelijk van de verbrandingscondities (temperatuur, zuurstoftoevoer). De rook verspreidt zich met de door de brand geïnduceerde stroming en onder invloed van de heersende mechanische ventilatie.

Maatgevend voor de zichtomstandigheden is de zichtlengte. Dit is de afstand waarover een persoon voorwerpen kan waarnemen. Referentie (33) geeft een relatie tussen de zichtlengte en de optische rookdichtheid.

$Z = 1 / RD$ voor niet-lichtgevende voorwerpen

$Z = 2.5 / RD$ voor lichtgevende voorwerpen

waarin:

Z is de zichtlengte in m

RD is de rookdichtheid in m^{-1}

Hierbij wordt uitgegaan van een gelijkmatige rookverspreiding over de gehele zichtlengte. Bij variërende rookdichtheid over het "zichtpad" vindt padintegratie plaats.

De formele bouwregelgeving in Nederland kent geen grenswaarden. Het huidige Bouwbesluit (4) stelt een maximum aan de loopafstand die in (dichte) rook mag worden afgelegd, van 30 m in een ingedeeld rookcompartiment. Buiten het rookcompartiment is de vluchtroute volledig rookvrij, omdat deze van de brandruimte is gescheiden door rookwerende constructies.

De afstand van 30 m is ontleend aan:

- de observatie (14) dat mensen gedurende 30 s door rook kunnen lopen en daarin tenminste 30 m kunnen afleggen;
- de conservatieve veronderstelling dat rook zich door het gehele rookcompartiment kan hebben verspreid voordat aanwezigen vluchten.

Het nieuwe Bouwbesluit, dat in 2003 van kracht wordt, kent in de prestatie-eisen onderscheid naar gebouwfunctie; voor gebouwen met een lage bezettingsgraad (aantal personen per m^2) worden grotere loopafstanden in een rookcompartiment toegestaan dan 30 m.

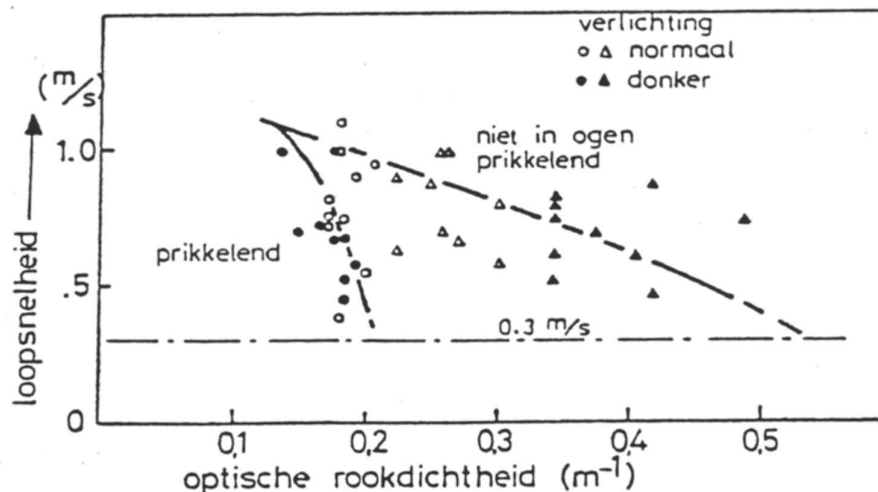
Voor grote compartimenten verwijst het nieuwe Bouwbesluit naar een beoordelingsmethodiek "Vluchten bij brand uit grote compartimenten" (11); daarin wordt gesteld dat een vluchtroute bruikbaar is zolang de zichtlengte betrokken op niet lichtgevende voorwerpen ten minste 30 m bedraagt.

Als de zichtlengte onder de 30 m daalt, is de vluchtroute nog 30 s bruikbaar. De grens van 30 m zichtlengte is de langere tijd in zwang bij het ontwerp van rook- en warmteafvoer systemen (RWA) voor bescherming van vluchtroutes (21).

Het is niet eenvoudig criteria te stellen aan de zichtlengte, overeenkomend met eerder genoemde effectniveaus als hinder, gewonden, doden. Mensen raken niet gewond of overlijden als rechtstreeks gevolg van het niet kunnen zien. Dat kan wel gebeuren als zij, doordat zij niet goed kunnen zien, zich niet snel genoeg in veiligheid kunnen brengen. Daarom wordt de gezochte koppeling wel gelegd via de loopsnelheid en de af te leggen afstand.

Door het verlies aan zicht gaan mensen langzamer lopen zoals in onderstaande figuur wordt geïllustreerd (33). Doordat mensen langzamer lopen verblijven zij langer in de omgeving van de brand en worden daardoor langer aan warmte en toxische gasen blootgesteld.

Als de rookdichtheid groter wordt dan $0.5 m^{-1}$ valt de loopsnelheid terug naar nul.



Figuur 7.2 Loopsnelheid versus optische rookdichtheid.

Als de vluchtroute goed te lokaliseren is blijft het gevaar beperkt tot de genoemde vertraging van het vluchten. Als de vluchtroute niet te lokaliseren is zal de vertraging gepaard gaan met verlies aan gevoel voor de juiste richting; het risico op langdurige blootstelling neemt dan snel toe.

Samenvattend worden volgende kritieke waarden ter beoordeling van de conditie voor de rookdichtheid (RD) voorgesteld:

- *lichte hinder*: RD = 0.05 m^{-1} , zichtlengte voor lichtgevende voorwerpen 50 m; bij deze zichtlengte heeft een tunnelgebruiker zicht op minstens één van de vluchtdeuren;
- *matige hinder*: RD = 0.10 m^{-1} , zichtlengte voor lichtgevende voorwerpen 25 m; bij deze zichtlengte heeft een tunnelgebruiker zicht op minstens één van de vluchtaanduidingen tussen de vluchtdeuren;
- *ernstige hinder*: RD = 0.2 m^{-1} , zichtlengte voor lichtgevende voorwerpen 12.5 m; zichtlengte voor niet lichtgevende voorwerpen 5 m; bij deze rookdichtheid heeft een gebruiker dtijd (net) zicht op een van beide niet verlichte tunnelwanden, en kan zich daarmee oriënteren;
- *desoriëntatie*: RD = 0.5 m^{-1} , zichtlengte voor lichtgevende voorwerpen 2.5 m; bij deze rookdichtheid heeft een gebruiker geen zicht op de wanden van de tunnel en op objecten;

7.4 Toxische gassen

Bij de effecten van rook op mensen wordt een onderscheid gemaakt tussen:

- oogirritatie (verminderd zicht op de vluchtroute) en disfunctioneren van ademhaldingsorganen (ademen);
- toxische gassen die, via de ademhaling, in het bloed worden opgenomen; de dosis kan narcotische effecten hebben (CO , CO_2) of anderszins het functioneren bemoeilijken (belangrijkste verbrandingsgassen: H_2S , NO_x , NH_3 , SO_2 , HF , HCN).

Bij de uitgevoerde proeven zijn alleen CO metingen verricht. Onderstaande tabel waarin de effecten vermeld zijn van blootstelling aan CO is ontleend aan referentie (18).

Tabel 7.2 Concentratie CO versus effect

Concentratie CO (ppm)	Effect
1500	Hoofdpijn na 15 minuten, bewusteloosheid na 30 minuten, dood na 60 minuten
2000	Hoofdpijn na 10 minuten, bewusteloosheid na 20 minuten, dood na 45 minuten
3000	Maximum veilig blootstellingsduur 5 minuten, bewusteloosheid na 10 minuten
6000	Hoofdpijn en duizeligheid in 1 à 2 minuten, dood in 10 à 15 minuten
12800	Onmiddellijk effect, binnen 2 à 3 ademhalingen bewusteloosheid, dood in 1 – 3 minuten

De onderstaande probitfunctie stemt voor het 50% letaliteitsniveau overeen met de gegevens uit de tabel, waarbij "t" de blootstellingsduur is en "C" de gemiddelde concentratie tijdens de blootstellingsduur in ppm:

$$\text{Dodelijk} : \text{Probit} = -37,98 + 3,7 \cdot \ln(t \cdot C)$$



8 Warmte- en rookverspreiding

8.1 Convector warmtestroom

Op basis van de gemeten snelheden en temperaturen in de tunnel is het mogelijk om een schatting te maken van de hoeveelheid warmte die in de lengterichting van de tunnel wordt meegevoerd door het lucht-/rookmengsel.

Deze convectieve warmtestroom is niet over alle doorsneden van de tunnel gelijk, maar neemt af naarmate de doorsnede zich verder van de brand bevindt. Dit vanwege het warmteverlies door de wanden en het plafond van de tunnel. Door de bepaling van de convectieve warmtestroom (vanuit temperatuurmetingen) en de straling kan dus een indruk worden verkregen van het warmteverlies door de tunnelwanden nabij de brand en verder stroomafwaarts. Bovendien is hiermee een controle mogelijk op de middelen weging bepaald de brandvermogens.

De warmtestroom Q_{cx} door een doorsnede A_x van de tunnel is in principe te bepalen met de volgende integraal:

$$Q_{cx} = \int \rho_{x,y,z} \cdot v_{x,y,z} \cdot C_p \cdot (T_{x,y,z} - T_o) dydz$$

waarin:

- Q_{cx} is de warmtestroom (J/s);
- x, y, z is de ruimtecoördinaten met x in lengterichting van de tunnel (m);
- $\rho_{x,y,z}$ is de soortelijke massa van lucht /rook op positie (x,y,z) (kg/m^3);
- $v_{x,y,z}$ is de lucht-/rooksnelheid op positie (x,y,z) (m/s);
- $T_{x,y,z}$ is de lucht-/rooktemperatuur op positie (x,y,z) (K);

Omdat bij de brandproeven de snelheden slechts op één hoogte zijn gemeten en de luchttemperaturen op slechts vijf hoogten per doorsnede, is formule (2.1) benaderd met:

$$Q_{cx} = \rho_o \cdot v_o \cdot C_p \cdot A_x \cdot (T_{gem,x} - T_o)$$

waarin:

- ρ_o is de soortelijke massa van lucht/rook bij instroom (kg/m^3);
- v_o is de lucht-/rooksnelheid bij instroom (= 100 m stroomopwaarts) (m/s);
- C_p is de soortelijke warmte van lucht/rook (J/kgK);
- A_x is de doorsnede van de tunnel op positie x (m^2);
- $T_{gem,x}$ is de gemiddelde lucht-/rooktemperatuur over doorsnede A_x (K)
- T_o is de instroomtemperatuur (K).

8.2 Warmtestraling vanuit de brandhaard

Bij brand vindt ook warmtetransport plaats door straling vanuit de brandhaard in de tunnel. De warmtestraling uit de brandhaard is op een complexe wijze afhankelijk van de afmetingen, temperaturen en emissiecoëfficiënt van de vlammen en de rookgassen.

Nabij de brandhaard vormt directe straling vanuit de brand een bedreiging voor personen in de tunnel. Om de afstand waarbinnen die bedreiging nog geldt te kunnen bepalen is het nodig de relatie tussen het stralingsniveau en de afstand tot de brand te kunnen voorspellen.

Voorgesteld wordt om hiervoor onderstaande relatie te gebruiken:

$$q_{\text{str}} = C_1 \cdot P_{\text{RHR}} / r^2$$

waarin:

- q_{str} is de warmteflux op afstand r (W/m^2);
 C_1 is de evenredigheidsconstante (-);
 P_{RHR} is het totaal brandvermogen (W);
 r is de afstand tot het centrum van de brandhaard (m).

De relatie is gebaseerd op de vereenvoudigde aannamen dat

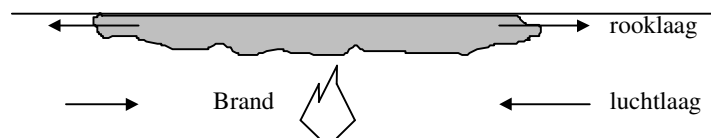
- (1) de brand vanuit één punt (het centrum van de brand) isotroop strahlt, dat wil zeggen in alle richtingen met dezelfde intensiteit, en
- (2) het uitgestraalde vermogen evenredig is met het brandvermogen.

Als we aannemen dat alle brandvermogen als warmtestraling vrijkomt en dat die straling door een hele bol met straal r gaat, dan is de coëfficiënt C_1 gelijk aan $1/(4\pi) = 0.08$. Als we aannemen dat die straling door een halve bol gaat dan is C_1 gelijk aan $1/(2\pi) = 0.16$.

8.3 Stratificatie

8.3.1 Definitie van stratificatie

Brand in een tunnel gaat veelal gepaard met een hoge rookproductie. De rook zal, als gevolg van een hogere temperatuur, een lagere soortelijke massa hebben dan de omringende lucht in de tunnel en daardoor naar het plafond van de tunnel stijgen. Vervolgens zal de rook zich in een laag langs het plafond van de brand verwijderen. Onderlangs zal koude lucht naar de brand worden aangezogen. Hierdoor ontstaan twee boven elkaar stromende lagen, namelijk de warme rooklaag en de koude rookvrije luchtlaag (zie figuur 8.1). Indien de warme en koude laag een duidelijke scheidslijn kennen, is er sprake van stratificatie.



Figuur 8.1 Schematische voorstelling van stratificatie bij brand in een tunnel.

Zolang de vluchtende personen zich in de koude rookvrije laag bevinden, worden zij niet direct blootgesteld aan de hete en schadelijke rookgassen en blijft hun zicht onbelemmerd. Door stratificatie kan dus een veilige vluchtzone ontstaan. De afmetingen van deze zone zullen echter niet alleen afhangen van de lengte waarover de stratificatie in stand blijft, maar ook van de temperatuur van de rooklaag, doordat deze warmte uitstraalt naar de vluchtenden. Bovendien vormt de vlamstraling vanuit de brand een bedreiging nabij de brandhaard.

8.3.2 Stabiliteit van stratificatie

Onder invloed van de tegengestelde stromen bestaat er een neiging tot menging van de twee lagen: er wordt namelijk turbulentie gegenereerd door de wrijving tussen de warme en koude laag, die de stabiliteit van de lagen ondermijnt.

Deze turbulentie wordt nog versterkt door de aanwezigheid van obstakels (ventilatoren, voertuigen en dergelijke) en door windinvloeden in de tunnel. Naarmate de rooklaag zich verder in de tunnel verspreidt zal ze afkoelen waardoor de stratificatie uiteindelijk instabiel wordt en er menging optreedt, zodat er verder in de tunnel geen rookvrije zone meer is.

Ook speelt het maximale brandvermogen, de vermogenscurves en de hoeveelheid rook die bij de brand vrijkomen een belangrijke rol voor de stabiliteit van de stratificatie. Bij grotere branden (vanaf circa 10 MW, afhankelijk van de tunneldoorsnede), zal de rook al vrij snel (circa 5 minuten) tot boven het wegdek zijn gedald en een bedreiging vormen voor een veilige vluchtzone. Bij een relatief trage brandontwikkeling zal de rooklaag minder snel tot het wegdek dalen en minder hoog zijn (dus minder uitstralen) en heeft de weggebruiker dus meer tijd om te vluchten.

Een grootte die vaak is gebruikt om de stabiliteit van de gestratificeerde rooklaag te beoordelen is het getal van Richardson. Als dit getal een bepaalde waarde overschrijdt zal de stratificatie opbreken. Het getal geeft dus een mogelijkheid om te bepalen over welke lengte stratificatie op zal treden. In de praktijk is de methode echter minder betrouwbaar gebleken. Daarom worden hier twee alternatieve methoden beschreven: het gebruik van de mengfactor en een berekening van de rookvrij hoogte.

Mengfactor

In het risicoanalysemodel van SAVE (26; 27) wordt een methode aangegeven om met behulp van een mengfactor de rookconcentraties en temperaturen te voorspellen op leefniveau stroomafwaarts van een geventileerde brand; met andere woorden geeft deze aan in welke mate de rook opmengt onder invloed van ventilatie. De mengfactor F_{meng} is hierbij gedefinieerd als:

$$F_{\text{meng}} = C_{\text{leef}} / C_{\text{gem}}$$

waarin:

- F_{meng} is de mengfactor (-);
- C_{leef} is de rookconcentratie in de leefzone (-);
- C_{gem} is de rookconcentratie gemiddeld over de doorsnede van de tunnel (-), deze is constant over de gehele lengte van de tunnel.

De gemiddelde concentratie wordt berekend op basis van de rookproductie en instroomsnelheid.

Vanwege de analogie tussen de temperatuurvergelijking en de concentratievergelijking is de mengfactor ook uit de temperaturen te bepalen, en wel met de relatie:

$$F_{\text{meng}} = (T_{\text{leef}} - T_o) / (T_{\text{gem}} - T_o)$$

waarin:

- F_{meng} is de mengfactor (-);
- T_{leef} is de temperatuur in leefzone (op 2 m hoogte) (°C);
- T_{gem} is de temperatuur gemiddeld over de doorsnede van de tunnel (°C);
- T_o is de temperatuur van de instroomlucht (°C).

Rookvrije hoogte

De beschrijving van het rookgedrag met behulp van de gemeten temperaturen is gebaseerd op de aanname dat het temperatuurprofiel over een tunneldoorsnede gelijkvormig is aan het profiel van de rookconcentratie over dezelfde doorsnede. De gelijkvormigheid bestaat vanwege de analogie tussen de temperatuurvergelijking (die de verspreiding van warmte beschrijft) en de concentratievergelijking (die de rookverspreiding beschrijft).

In de praktijk zal de gelijkvormigheid niet volledig zijn, omdat:

- de warmte-afgifte aan de wanden anders verloopt dan de afgifte van rookdeeltjes;
- er in de rooklaag absorptie en emissie van warmtestraling plaatsvindt; een verschijnsel dat niet aan de rookverspreiding.

Ondanks bovengenoemde verschillen is het gebruik van de analogie tussen warmte- en rookverspreiding een nuttig en algemeen aanvaard middel om inzicht te krijgen in rookgedrag op basis van temperatuurmetingen. Bij de bepaling van de rookvrije hoogte wordt uitgegaan van de analogie tussen de temperatuurvergelijking en de concentratievergelijking zoals bij de mengfactor. Op die manier is het mogelijk om de rookvrije hoogte direct uit de temperaturen te bepalen. Deze methode is aan de hand van de temperatuurfactor $\theta_{x,y}$ gedefinieerd volgens:

$$\theta_{x,y} = T_{x,y} - T_o / (T_{\max,x} - T_o)$$

waarin:

- $\theta_{x,y}$ is de temperatuurfactor (-);
 $T_{x,y}$ is de temperatuur op afstand x en hoogte y (°C);
 T_o is de instroomtemperatuur (°C);
 $T_{\max,x}$ is de maximumtemperatuur op afstand x (°C).

De rookvrije hoogte wordt dan gelijk gesteld aan de hoogte y waar $\theta_{x,y}$ gelijk is aan een zekere grenswaarde, die in de meeste gevallen gelijk is aan 0.1 of 0.2.

Anders gezegd: voor elke tunneldoorsnede is op de grens tussen de rooklaag en de rookvrije laag de temperatuur gelijk aan 10% of 20 % van het verschil tussen de maximum temperatuur op die doorsnede en de instroomtemperatuur.

8.3.3 Invloed van ventilatie

In bovenstaande beschrijving is ervan uitgegaan dat de rook zich in twee richtingen verspreidt, doordat er geen ventilatie is en het wegdek horizontaal staat (symmetrie). Echter bij een brand op een hellend wegdek, of door windinvloeden van buitenaf, zal de rook zich meer naar de ene zijde verspreiden dan naar de andere zijde.

In Nederlandse tunnels wordt in geval van brand langsventilatie toegepast om de rook bewust in één richting te dwingen. De toepassing van langsventilatie vergroot namelijk de kans op de verstoring van de stratificatie, doordat het dichtheidsverschil tussen de warme en koude laag afneemt en de turbulentie daardoor minder wordt uitgedoofd. Dit effect wordt gedeeltelijk gecompenseerd door de mogelijk geringere turbulentieproductie tussen de lagen, doordat deze niet meer in tegengestelde richting stromen.

Ventilatie zorgt dus enerzijds voor een afname van de lengte waarover stratificatie zal optreden (ongunstig effect op de vluchtomstandigheden) en anderzijds voor een verdunnende en koelende werking van/in de rookzone (gunstig effect op de vluchtomstandigheden). De mogelijk gunstige invloed van ventileren is echter alleen te verwachten bij hoge ventilatiehoeveelheden, dat wil zeggen bij hoge ventilatiesnelheden en grote tunneldoorsneden, en bij branden met geringe brandvermogens en rookproductie.

8.3.4 Invloed van sprinkler

De invloed van sprinklers op het warmte- en rookgedrag stroomafwaarts bestaat uit:

- de verstoring van de stratificatie (ongunstig effect op de vluchtomstandigheden);
- de afkoeling van de rooklaag (zowel gunstig als ongunstig effect op de vluchtomstandigheden);
- de hoge, warme waterdampconcentraties in de leefzone (ongunstig effect op de vluchtomstandigheden).

8.4 Kritieke luchtsnelheid ter voorkoming van backlayering

8.4.1 Definitie

Door toepassing van langsventilatie kan de rook bewust in één richting worden gedwongen. In tunnelbuizen met één rijrichting gebeurt dit veel in de rijrichting, teneinde stroomopwaarts van de brand een veilige zone te creëren voor de stilstaande weggebruikers en de brandweer. Een veilige zone stroomafwaarts is dan minder van belang, als de weggebruikers stroomafwaarts van de brand de tunnel op normale wijze kunnen verlaten. Bij file-vorming stroomafwaarts gaat dit echter niet op en blijft een veilige zone stroomafwaarts noodzakelijk.

Om te voorkomen dat de rook zich alsnog tegen de ventilatierichting in beweegt, dit verschijnsel wordt aangeduid met backlayering, is een bepaalde kritieke luchtsnelheid nodig. Als deze kritieke snelheid wordt overschreden zal de lucht onder de rooklaag stroomafwaarts niet meer naar de brand toe zal stromen, maar met de rooklaag mee. Deze situatie is in vrijwel alle brandproeven opgetreden, inclusief de proeven die zonder mechanische ventilatie waren opgezet. Dit laatste doordat in werkelijkheid steeds zo is geventileerd dat backlayering voorbij de extra isolatie rondom de brandhaard werd voorkomen.

De kritieke luchtsnelheid is afhankelijk van de afmetingen van de doorsnede van de tunnel, helling, omgevingstemperatuur, en van het vermogen dat vrijkomt bij de brand. Het precieze verband is niet bekend, diverse verbanden zijn in de literatuur voorgesteld, maar de verschillen zijn beperkt.

Het is internationaal gebruikelijk om langsventilatiesystemen voor tunnels zo te ontwerpen dat tijdens een calamiteit de kritieke luchtsnelheid gerediseerd kan worden, zodat tenminste het gedeelte stroomopwaarts van de brand vrij blijft van verbrandingsproducten.

8.4.2 Modellen

Uit het onderzoeksproject in de Memorid Tunnel in de VS bleek een kritieke luchtsnelheid van 2,5 tot 3 m/s voldoende voor branden tussen 50 en 100 MW. Hierbij is het Froude-model gebruikt dat uitgaat van de volgende formules:

Het Froude getal luidt in formule:

$$Fr = \frac{gH(\rho_0 - \rho_f)}{\rho_0 V^2}$$

Met de aanname dat alle vrijkomende warmte wordt opgenomen in de rook, is voor de kritieke luchtsnelheid de volgende formule afgeleid:

$$V_{cr} = \left(\frac{gHQ}{Fr_{cr}\rho_0 c_p AT_f} \right)^{1/3}$$

Waarin:

V_{cr} is de kritieke waarde van de luchtsnelheid;

g is de valversnelling;

H is de hoogte van de tunneldoorsnede;

E_c is de vrijkomende warmte;

Fr_{cr} is de kritieke waarde van het Froude getal;

ρ is de dichtheid buiten de brandzone;
 ρ_f is de dichtheid in de brandzone;
 c_p is de specifieke warmte, bij constante druk, van het gasmengsel;
 A is het oppervlak van de tunneldoorsnede;
 T_f is de luchttemperatuur in de brandzone.

Het Health and Safety Laboratory (VK) komt op basis van proeven in het kader van de beveiliging van de Kanadatunnel (2) tot conclusies dat een kritieke luchtsnelheid van 2 m/s voldoende blijkt voor een 2 MW brand, en 4 m/s voor 19 MW. Er werd echter geen significant verband gevonden tussen vermogen en kritieke luchtsnelheid.

Atkinson et al.(1) concluderen eveneens, op basis van vergelijking van dezelfde en andere experimenten en CFD-analyses, dat voor grote branden er geen significant verband is tussen kritieke luchtsnelheid en vermogen. Zij stellen gaan uit van dimensieloze grootheden voor de kritieke backlayeringssnelheid V^* en de warmteproductie van de brand Q^* :

$$V^* = \frac{V_c}{\sqrt{gH}} \text{ en } Q^* = \frac{Q}{\rho_0 c_p T_0 \sqrt{gH^5}}$$

waarin:

Q is het werkelijke brandvermogen;
 Q^* is het dimensieloze brandvermogen;
 V_c is de kritieke luchtsnelheid;
 V^* is de dimensieloze kritieke luchtsnelheid;
 ρ_0 is de soortelijke massa van lucht /rook bij instroom;
 c_p is de soortelijke warmte van lucht/rook;
 T_0 is de absolute lucht/rook temperatuur bij instroom;
 g is de valversnelling;
 H is de hoogte van de tunnel;

Men vond de volgende waarden voor de dimensieloze kritieke luchtsnelheid:

$$V^* = (Q^* / 0.12)^{1/3} \quad \text{ds} \quad Q^* < 0.12$$

$$V^* = V^*_{\max} \text{ voor } Q^* = 0.12 \quad \text{ds} \quad Q^* > 0.12$$

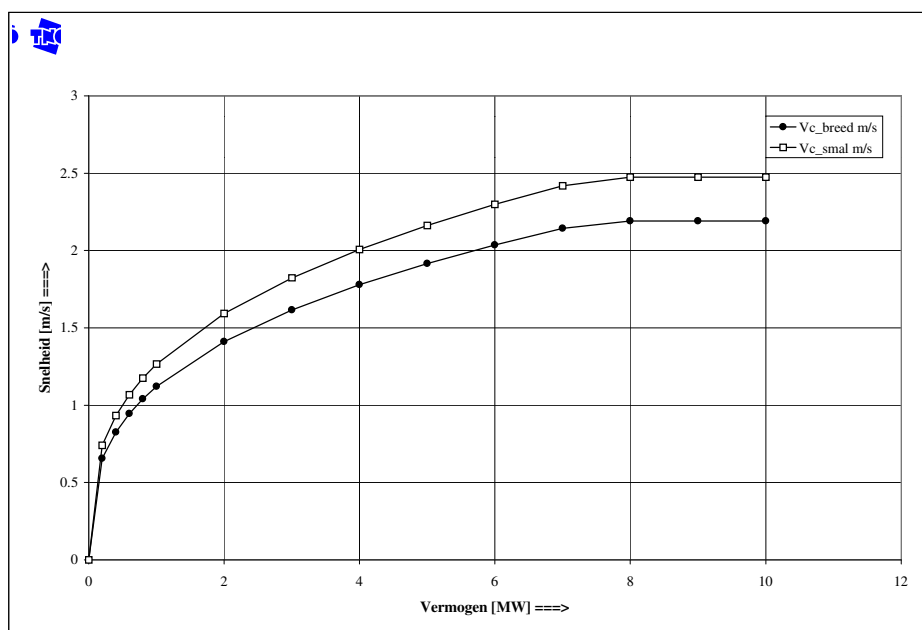
In nadere studie van de Sheffield University in samenwerking met het Health and Safety Laboratory gepresenteerd in 2000 (32) is de hoogte van de tunnel H vervangen door de hydraulische diameter van de tunnel, uitgedrukt als de hydraulische hoogte \bar{H} . Daarmee vond men de volgende waarden voor de dimensieloze kritieke luchtsnelheid

$$V^* = 0.4 * (Q^* / 0.2)^{1/3} \quad \text{ds} \quad Q^* < 0.2$$

$$V^* = 0.4 \quad \text{ds} \quad Q^* > 0.2$$

In dit rapport is uitgegaan van de door het Health and Safety Laboratory (UK) in 1996 afgeleide formules. Daarbij varieert V^*_{\max} tussen 0.31 voor brede en 0.35 voor smalle brandhaarden. Voor een tunnel van 5 m hoog levert dit een kritieke luchtsnelheid die niet hoger is dan 2,5 m/s ongeacht het vermogen van de brand. Uit de studie gepresenteerd in 2000 blijkt eveneens dat de backlayeringssnelheid nooit hoger is dan 2,5 m/s ongeacht het vermogen van de brand.

Voor de Beneluxtunnel ($h = 5.1$ m) en instromende lucht van 10 °C levert dit de relatie tussen kritieke luchtsnelheid en brandvermogen zoals in figuur 8.2 getoond.



Figuur 8.2 Relatie tussen kritieke lichtsnelheid en brandvermogen.

9 Brandontwikkeling en brandgrootte

9.1 Personenautobranden

Voor personenautobranden, welke zijn geanalyseerd bij de beoordeling van de brandveiligheid, bestaan gangbare vermogenscurves. Uitgangspunt voor onderstaande kwantitatieve schattingen is een kleine ontstekingsbron zoals een aanstekervlam of een brandende lap in een niet verder geprepareerde auto.

Uit experimenten (23) en (7) blijkt dat de vermogenscurve als volgt is te typeren.

- De 'opwarmfase' of 'smeulfase', waarin nog weinig vermogen wordt geproduceerd en alleen de directe omgeving van de ontstekingsbron wordt opgewarmd⁶. Deze fase kan tussen enkele minuten en tientallen minuten duren;
- De 'ontwikkelingsfase' duurt ten minste enkele (3 tot 5) minuten voordat een vermogen van 1 MW wordt bereikt; wordt eenmaal deze omvang bereikt dan kan een autobrand binnen enkele minuten doorgroeien tot enkele MW's;
- Piekvermogens liggen vaak tussen 3 en 5 MW, maar voor modernere auto's ook hoger, tot bijna 10 MW. Deze piekvermogens worden bereikt na ten minste ca 10 minuten;
- De gemiddelde brandduur totdat het vermogen afneemt onder de 1 MW bedraagt circa 30 minuten, afhankelijk van het geproduceerde vermogen (een brand met beperkt vermogen heeft langer brandstof ter beschikking).

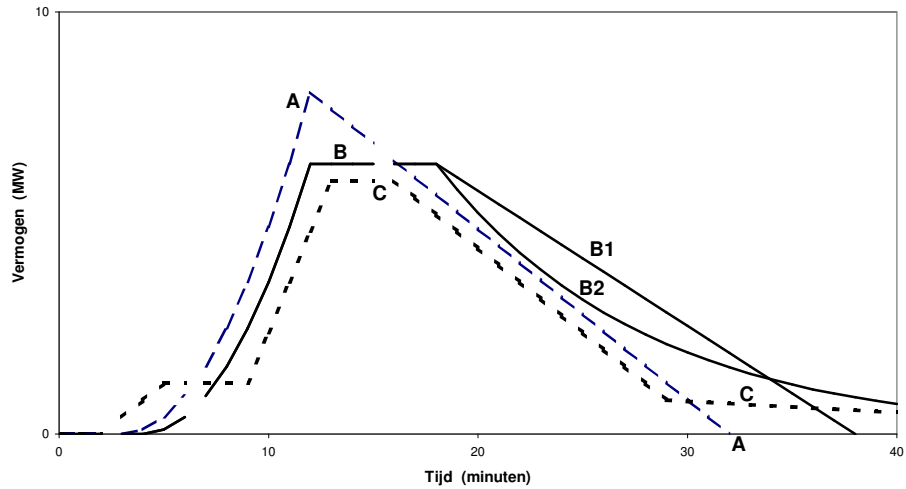
Op basis van experimenten is een aantal typen model-vermogenscurves ontworpen.

- A. Ontwikkelingsfase met een vermogensgroei kwadratisch in de tijd tot een piekwaarde en een dooffase vanaf topvermogen afnemend lineair tot het moment van uitdoven of blussen;
- B. Ontwikkelingsfase met een vermogensgroei kwadratisch in de tijd, een constant top-vermogen; een dooffase vanaf topvermogen afnemend lineair (B1) of met negatieve e-macht (B2) tot het moment van uitdoven of blussen;
- C. Ontwikkelingsfase met vermogensgroei lineair in de tijd, eerste constante vermogens-niveau; verdere lineaire groei, tweede constant niveau (top-vermogen); een dooffase vanaf topvermogen in twee lineaire delen afnemend (eerst sterke afname dan langzamer) tot het moment van uitdoven of blussen.

Mengvormen van de gepresenteerde vormen zijn natuurlijk ook mogelijk. Voorbeelden van de type curves zijn gegeven in figuur 9.1. De curves zijn ook bruikbaar voor andere typen voertuigen, zij het met andere maximale waarden.

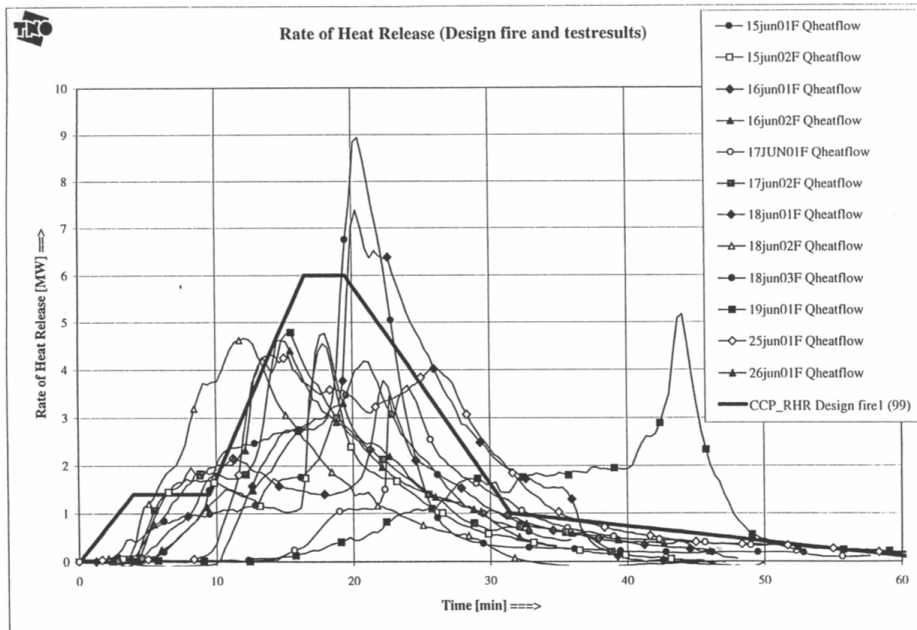
⁶ Een autobrand zal in deze fase vaak niet ontdekt worden, niet visueel en ook niet door automatische melding

Typen model-vermogenscurven



Figuur 9.1 Geschematiseerde vermogenscurves (A, B, C) voor personenautobranden

Ter illustratie van het in de praktijk grillige verloop van het brandvermogen toont onderstaande figuur de vermogenscurves die TNO heeft gemeten in het kader van het onderzoek naar de effectiviteit van stuwkrachtventilatie in gesloten parkeergarages (23). De figuur toont ook een voorstel voor een maatgevende ontwerpcurve (CCP_RHR Design fire I) bepaald uit de experimenten.



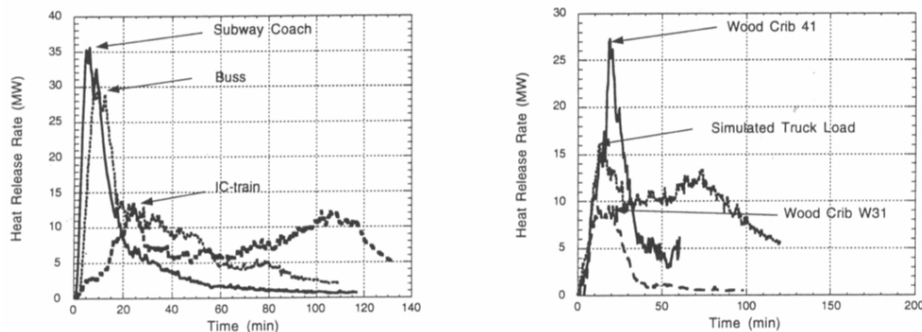
Figuur 9.2 Vermogenscurves gemeten in de parkeergarage Fleece (23) en ontwerpcurve CCP_RHR Design fire I.

9.2 Overige voertuig- en ladingbranden

Het brandverloop voor een bestel- of vrachtauto is zeer variabel, sterk afhankelijk van de vervoerde lading. Bij start van de brand in de bestuurderscabine kan de beginfase (tot circa 1 MW) als eerste benadering gelijk worden verondersteld. Het verloop daarna is afhankelijk van het moment van ontsteken van de lading. Omdat het gemak waarmee een brand in de cabine door- of overslaat naar de lading van veel factoren afhankelijk is, is voor het brandverloop bij start van de brand in de lading geen algemeen geldende uitspraak te doen.

Om toch een indruk te krijgen van de te verwachten vermogenscurves toont figuur 9.3 de veel in literatuur aangehaalde curves gemeten in de Repparfjord tunnel in Noorwegen in het kader van het EUREKA project 499 Firetun. Zie (13), (9).

De proeven in de figuur 9.3, rechts, zijn min of meer vergelijkbaar met de proeven 8 t/m 14. Tabel 9.1 vermeldt de kenmerken van deze testen. De tunnel was 5.3 m breed en 5.5 meter hoog.



Figuur 9.3 Vermogenscurves bepaald in de Repparfjordtunnel (13), (9)

Tabel 9.1 Kenmerken testen in Repparfjordtunnel

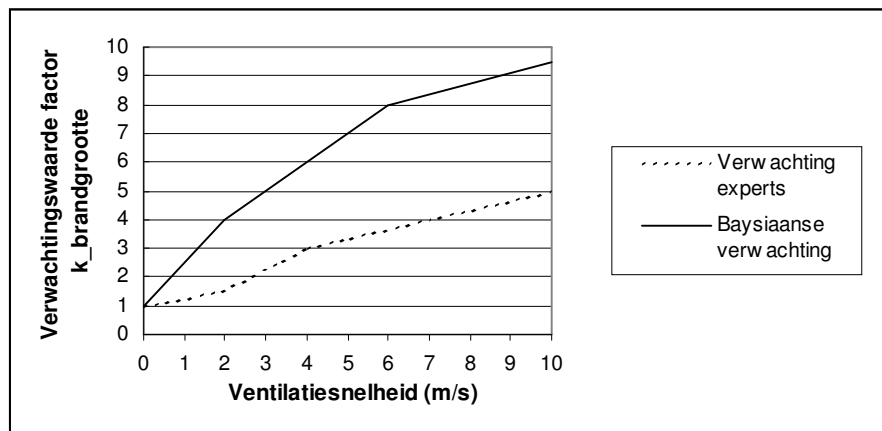
Test	Brandhaard		Ventilatie (m/s)	Brandcurve		
	Materiaal	Afmetingen (L X B X H)		Brandduur (min)	Maximum vermogen (MW)	Energie-inhoud (MJ)
W31	950 kg houten kribben	3.2 x 0.3 x 2.4	geen	0-97	9.5	17000
W41	idem als W31		2.9 m/s	0-60	27	17000
LF1	truck lading: 2212 kg dicht gestapelde wood cribs, 310 kg plastic tussen de cribs en 332 kg banden op de stapel	2.4 x 2.4 x 2.2	geen	0-120	17	65000

9.3 Invloed van ventilatie

In de literatuur wordt weinig vermeld over de invloed van mechanische ventilatie op de brandontwikkeling. Carvel et al. (6) hebben als eersten gepoogd om uitspraken te doen over de brandontwikkeling van voertuigen met behulp van een statistische methode gebaseerd op Bayesiaanse technieken. Deze methode combineert het oordeel van deskundigen met de resultaten van diverse internationaal bekende proeven.

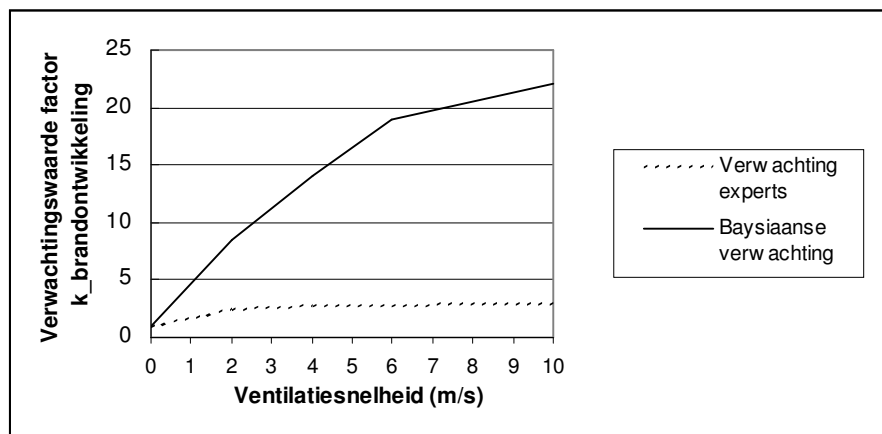
Op basis van hiervan stellen zij dat de vermogenscurve (brandduur, vorm en maximum vermogen) van een personenautobrand naar alle waarschijnlijkheid niet significant zal worden beïnvloed als de ventilatiesnelheid niet meer dan 2 m/s bedraagt. Verder stellen zij dat er onvoldoende experimentele gegevens beschikbaar zijn om het brandgedrag van personenauto's bij hogere ventilatiesnelheden te kunnen voorspellen.

Tevens beweren Carvel et al. dat de toepassing van mechanische langsventilatie aanzienlijke invloed heeft op het maximale vermogen en de vermogensgroei van een brandende geladen kleine vrachtauto. Zij stellen dat het maximale vermogen met een factor $k_{\text{brandvermogen}}$ ten opzichte van een situatie met natuurlijke ventilatie zal toenemen volgens het in figuur 9.4 getoonde verloop.



Figuur 9.4 Invloed van mechanische langsventilatie op het maximaal ontwikkelde vermogen

De vermogensgroei in de beginfase van de brand (van 0 tot 5 MW) zal volgens Carvel et al. met de in figuur 9.5 getoonde factor $k_{\text{brandontwikkeling}}$ toenemen. Deze factor geeft aan in hoeverre de snelheid van brandontwikkeling toeneemt ten opzichte van een situatie met natuurlijke ventilatie.



Figuur 9.5 Invloed van mechanische langsventilatie op het ontwikkelde vermogen in de groei fase

Volgens Carvel et al. leidt een ventilatiesnelheid van 2 m/s dus tot een 4 keer groter maximaal vermogen en een 5 keer snellere brandgroei. Bij een snelheid van 6 m/s neemt het maximum een factor 8 toe en de brandgroei een factor 20!

Ingason (12) betoogt echter dat de schattingen van Carvel e.a. een te hoge invloed van de ventilatie voorspellen, omdat de methode geen rekening houdt met de brandstofsoort (hout, kunstof e.d.) en met de mate waarin zuurstof kan toetreden, welke afhangt van de wijze waarop de lading is gestapeld of de aanwezigheid van een huif. Ingason voorspelt daarom een vermogenstoename met 'slechts' een factor 2 tot 3 bij circa 3 m/s.

Een extra argument om de krommen in de getoonde figuren voorzichtig te hanteren is dat deze ook geen rekening houden met de plaats van aansteken en met de doorsnede van de tunnel, de doorsnede van de Repparfjordtunnel is namelijk een factor 0.6 kleiner dan die van de Beneluxtunnel.

9.4 Invloed van tunnelgeometrie

Carvel et al. (5) stellen, dat het ontwikkelde vermogen Q_{tun} in een tunnel groter is dan in de openlucht Q_{open} . Op basis van een analyse van alle in de literatuur beschreven experimentele branden stellen zij de volgende relatie voor:

$$Q_{tun} = (24 \cdot (W_F / W_T)^3 + 1) \cdot Q_{open}$$

waarin:

- Q_{tun} is het ontwikkeld warmtevermogen in de tunnel (MW);
- Q_{open} is het ontwikkeld warmtevermogen in de openlucht (MW);
- W_F is de breedte van de brandhaard (m);
- W_T is de breedte van de tunnel (m).

IV RESULTATEN

Het grootste deel van de meetresultaten is gepresenteerd in de bijlagen bij deel IV. In bijlage IV.1 zijn, per proef, voor alle meetposities de meetwaarden tegen de tijd uitgezet, alsmede het bepaalde brandvermogen, de wijze van schakelen van de ventilatie en de windsnelheid buiten de tunnel.

Behalve metingen zijn op uitgebreide schaal video-opnamen gemaakt met de zes opgestelde videocamera's. Hiermee is beeldmateriaal van branden in een tunnel beschikbaar voor nadere bestudering en presentatiebeelden.

De in dit deel beschreven analyses zijn gebaseerd op genoemde meetwaarden, alsmede op de videobanden van de brandproeven.

10 Warmte- en rookverspreiding

10.1 Inleiding

De resultaten voor het onderdeel warmte- en rookverspreiding zijn zodanig uitgewerkt dat uitspraken kunnen worden gedaan over de leefomstandigheden en de vluchtmogelijkheden zowel vlakbij de brandhaard als op grotere afstanden in de tunnel (18).

Uitgangspunt voor de beschouwingen is het werkelijk opgetreden brandvermogen, wat mede gebruikt wordt bij de beschouwing van eventuele aanwakkeffecten. De analyse van de leefomstandigheden is vervolgens nader uitgewerkt naar convectieve warmteoverdracht, warmtestraling, zichtcondities in verband met het kunnen vinden van de vluchtwegen en de invloed van toxische stoffen waarbij alleen de invloed van CO is gezien.

10.2 Analyse van het brandvermogen

Het brandvermogen is op twee manieren geanalyseerd:

1. door weging van het te verbranden product: bij de panbranden door weging van de olievaten en bij de overige branden door weging van de brandhaard;
2. door bepaling van de convectieve warmte in de rook stroomafwaarts van de brand (bij de theorie genoemd "convectieve warmtestroom" (zie formule in paragraaf 8.1)).

Het brandvermogen, bepaald door weging van het te verbranden product, is opgenomen in bijlage IV.1 (17).

De convectieve warmtestroom is bepaald voor de doorsneden op 20 m, 50 m en 100 m stroomafwaarts van de brand. Daarbij is de snelheid v_0 berekend het gemiddelde van de meetpunten SN_OPm, SN_OPw en SN_Opo, waarbij uit 90% van de gemiddelde waarde is genomen ter compensatie van het niet uniform optredende snelheidsprofiel bij de wanden.

De temperatuur T_{gem} is bepaald uit de temperaturen in het midden van de tunneldoorsnede die op 1 m, 2 m, 3 m, 4 m en 5 m hoogte zijn gemeten. Hierbij is aangenomen dat:

- het temperatuurverloop tussen de meethoogten lineair met de hoogte varieert;
- de temperatuur tussen 5 m hoogte en het plafond gelijk is aan de gemeten temperatuur op 5 m hoogte;
- en de temperatuur tussen de vloer en 1 m hoogte gelijk is aan de gemeten temperatuur op 1 m hoogte.

De warmtestroom op 200 m van de brand is niet te bepalen, omdat daar te weinig meetpunten goed functioneerden.

In bijlage IV.2 zijn de brandvermogens gegeven op basis van de middels weging bepaalde vermogenscurve (RHR) en de convectieve warmtestromen op 20 m, 50 m en 100 m stroomafwaarts van de brand. In elke grafiek wordt tevens aan de hand van gekleurde tijdlijnen weergegeven:

- de brandduur (met een rode lijn);
- wanneer geventileerd wordt: (één of twee lichtblauwe lijnen, respectievelijk half of volledig ventilatorvermogen);
- wanneer de sprinkler is ingeschakeld (één of twee groene lijnen, respectievelijk één of twee secties);
- wanneer wordt geblust indien bekend (donkerblauwe lijnen).

Bij proef 2 en proef 3 is brandvermogen bepaald uit de convectieve warmtestroom in de rook hoger dan volgens de vermogenscurve op basis van weging is vrijgekomen.

Ook bij proef 7 is dit het geval waardoor een verbrandingswaarde van de auto van 30 MJ/kg in plaats van 25 MJ/kg, zoals vermeld in hoofdstuk 9, wordt gesuggereerd.

Hierbij is aangenomen dat die door de brandhaard uitgestraalde warmte uiteindelijk in de rook komt; hetzij door directe absorptie, hetzij door opwarming van de geïsoleerde wanden rondom de brandhaard. In werkelijkheid zal een deel van de warmtestraling niet in de rook terecht komen maar worden afgegeven aan de wanden. Daarmee rekening houdend kunnen de vrijgekomen vermogens bij deze proeven nog zo'n 10-20% groter zijn geweest dan hier is aangegeven.

Het blijkt dat als er niet of weinig wordt geventileerd het brandvermogen gebaseerd op convectieve warmtestroom in de rook een factor 0.5 (geen ventilatie, proeven 6, 8, 11 en 13) tot 0.8 (2 m/s ventilatie, proef 14) kleiner is dan die overeenkomend met de brandcurve gebaseerd op weging. Dit heeft mogelijk twee oorzaken.

- De term p.v is in de rooklaag hoger dan onder de rooklaag; dat is het geval als de rooklaag harder stroomt dan de onderlaag (zoveel harder dat dit de lagere dichtheid van de rooklaag meer dan compenseert). De aanwezige instrumentatie met alleen snelheidsmeetpunten op 2 m hoogte laat niet toe dit te bevestigen;
- Het warmteverlies naar de wanden nabij de brand is hoger vanwege de hogere rookgas temperaturen die bij de lagere snelheden optreden.

Hierbij dient vermeld te worden dat de fout in de bepaling van de brandcurve op basis van weging circa 10% bedraagt.

10.3 Analyse van warmtestraling

Om een indruk te krijgen van de stralingsniveaus nabij een voertuigbrand, toont bijlage IV.3 de gemeten stralingsniveaus op circa 5 meter (meetpunt STR-051) en op circa 20 meter (meetpunt STR-205) stroomafwaarts van de brand, waarbij de proeven per vermogensniveau bij elkaar zijn gezet.

Op basis van de gegevens van alle meetpunten (zie bijlage IV.1) is de in Deel III genoemde stralingscoëfficiënt C_1 berekend.

Bij de berekening is voor de proeven 1 en 2 het centrum van de brand stroomafwaarts verschoven ten opzichte van het officiële centrum ($x = 0$ m) omdat de brandpan niet op positie $x = 0$ m stond. Voor proef 14 is hetzelfde gedaan omdat uit de videobeelden blijkt dat de brand zich voornamelijk in de voorste helft van de houtstapel ontwikkelde.

Uit de resultaten (zie bijlage IV.4) blijkt dat de coëfficiënt C_1 een grote spreiding vertoont en neigt naar een lagere waarde naarmate het vermogen lager is en de ventilatiesnelheid hoger. Een grove schatting is: $C_1 = 0.04 \pm 0.02$.

10.4 Analyse van stratificatie

Bij een beschouwing van stratificatie volgens het getal van Richardson wordt aangenomen dat verse lucht vanuit het uitgangsportaal, tegen de rijrichting in, onder de rooklaag naar de brand stroomt. Deze situatie is echter bij geen de van proeven opgetreden. Hier zijn twee oorzaken voor aan te wijzen:

- Door de helling van de tunnel ontstaat een natuurlijke trek in de richting van het uitgangsportaal.
- Er is tijdens de proeven steeds zo geventileerd dat 'backlayering' voorbij de isolatie stroomopwaarts werd voorkomen. De hiervoor benodigde ventilatiesnelheid was zeer laag (in de orde van 1 m/s) en reeds groot genoeg om de toestroom van verse lucht vanuit het uitgangsportaal tegen te gaan. Deze oorzaken zijn een reden om stratificatie niet in het licht van het getal van Richardson te beschouwen.

De analyse van stratificatie heeft plaatsgevonden aan de hand van de video-opnamen, waarbij een toets heeft plaatsgevonden op de beoordeling van stratificatie aan de hand van de mengfactor respectievelijk een berekening van de rookvrije hoogte.

10.4.1 Beoordeling aan de hand van video-opnamen

Bijlage IV.5 geeft voor alle proeven een beoordeling van de stratificatie aan de hand van de video-analyse. De in de tabel vermelde rookvrije hoogtes gelden voor de beginfase van de brand, namelijk bij het passeren van het rookfront. De tabel vermeldt ook het tijdstip waarop het rookfront passeert.

10.4.2 Evaluatie van de mengfactor

Voor alle proeven is waar mogelijk de mengfactor bepaald. De hieruit volgende profielen zijn in bijlage IV.6 weergegeven, waarbij de mengfactor op de horizontale as is uitgezet en de hoogte van de tunnel op de verticale as. Per proef worden vier grafieken getoond. Elke grafiek bevat de profielen op 10 m, 20 m, 50 m, 100 m en 200 m op één tijdstip tijdens de proef.

Het blijkt dat het optreden van stratificatie wordt gekenmerkt door een hoge mengfactor onder het plafond en een lage mengfactor in de leefzone. Zonder ventilatie blijkt de mengfactor op leefniveau in de meeste gevallen tussen 0.2 en 0.4 te liggen. Op 200 m is de waarde circa 0.6. In alle gevallen is er dus nog voldoende zicht. Met ventilatie ligt de mengfactor tussen 0.6 en 1.0 (of hoger) en treedt geen stratificatie meer op.

Uit bijlage IV.6 is ook een schatting te maken van de rookvrije hoogte door aan te nemen dat die hoogte overeenkomt met de plaats waar de mengfactor gelijk is aan 0.6. Genoemde relatie tussen de mengfactor en de video-analyse is echter niet voor alle proeven waargenomen.

Opgemerkt wordt dat ventileren een gunstig effect heeft op de straling vanuit de rooklaag. Deze wordt namelijk lager, vanwege de lagere temperaturen in de rooklaag en de lagere emissiefactor. Met name op 20 m afstand en bij hogere vermogens, heeft ventilatie dus een gunstige invloed op zowel het zicht als de blootstelling door warmtestraling.

Uit bovenstaande volgt dat als de mengfactor lager is dan 0.6 er nog sprake is van stratificatie met een rooklaag boven de leefzone, en dat een mengfactor hoger dan 0.6 overeenkomt met de waarneming dat er geen stratificatie meer is, door menging of doordat de rooklaag in de leefzone komt. De voorgestelde grenswaarde van 0.6 voor het al dan niet optreden van stratificatie komt in de meeste maar niet in alle gevallen overeen met de waarnemingen.

10.4.3 De rookvrije hoogte bepaald uit de temperaturen

Bijlage IV.7 geeft de (uit de in paragraaf 8.3.2 genoemde relatie) berekende hoogten. Hieruit blijkt dat de waargenomen rookvrije hoogte in het algemeen lager is dan de berekende hoogte, behalve op 200 m afstand waar de berekende hoogte lager is.

10.5 Analyse backlayering

In bijlage IV.8 is voor de proeven 1-14 met uitzondering van proef 5 de kritieke snelheid weergegeven zoals met het Atkinson-model (zie Deel III) berekend voor een brede tunnel (SN_KR_B) en een smalle tunnel (SN_KR_S). Proef 5 is weggelaten omdat het vermogen onbekend is en proef 12 is weggelaten omdat vrijwel direct na ontsteking de sprinklerinstallatie is aangezet. Ter vergelijking is ook het verloop van de gemiddelde instroomsnelheid (GSN_OP) weergegeven. Deze is bepaald uit het gemiddelde van de drie snelheidsmeetpunten 100 m stroomopwaarts van de brand.

Wanneer de gemiddelde instroomsnelheid hoger is dan de kritieke snelheid mag er dus geen backlayering zijn, terwijl bij een lagere snelheid juist wel backlayering moet optreden. Dit is te controleren aan de hand van de grafieken die rechts van de snelheidsgrafieken staan. Deze bevatten de temperaturen op 4 m en 5 m hoogte, 10 m en 20 m stroomopwaarts. Hiermee is na te gaan of er backlayering (hoge temperaturen) is of geen backlayering (lage temperaturen).

Bij een beschouwing van de temperaturen volgens genoemde meetpunten blijkt dat bij lage luchtsnelheden backlayering optreedt en bij hogere luchtsnelheden backlayering wordt voorkomen.

De metingen zijn getoetst aan het model van Atkinson. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de waarnemingen volledig zijn in overeenstemming met de theorie van Atkinson. Daarbij moet wel worden opgemerkt dat de meeste waarnemingen situaties betreffen met een vrij lage of juist een vrij hoge luchtsnelheid, terwijl er nauwelijks waarnemingen zijn met een snelheid in de buurt van de kritieke snelheid.

10.6 Analyse CO-concentratie

De meting van de CO concentraties in de leefzone tijdens de voertuigbrand proeven is uiteindelijk niet gerealiseerd vanwege een defecte meter. Dit werd pas na afloop van de proeven geconstateerd. De CO-concentratie ter plaatse van het CO-metpunt op 1.5 m hoogte en 100 m stroomafwaarts van de brand, is derhalve bepaald op basis van berekening.

Bij een bekende CO-productie kan tezamen met de mengfactor de CO-concentratie op leefniveau berekend worden volgens.

$$Y_{CO} = F_{meng} \Phi_{CO} / (\rho_o v_o A)$$

waarin:

- Y_{CO} is de massafractie CO (-);
- Φ_{CO} is de CO-productie (kg/s);
- ρ_o is de dichtheid van de instromende lucht (kg/m³);
- v_o is de instroomsnelheid (m/s);
- A is de tunneldoorsnede (m²).

De CO-productie Φ_{CO} bij een voertuigbrand is te relateren aan de CO₂-productie Φ_{CO_2} . PIARC (25) leidt uit de Eureka FIRETUN proeven (9) de volgende benadering af.

$$\Phi_{CO} / \Phi_{CO_2} = 0.051 \pm 0.015$$

waarin:

- Φ_{CO} is de CO-productie (kg/s);
- Φ_{CO_2} is de CO₂-productie (kg/s).

In het kader van het EU "Closed Car Parks" project (8) zijn door CTICM metingen verricht naar de CO-productie bij personenautobranden. Bij deze metingen is het brandvermogen bepaald op basis van de verbrande zuurstof en de geproduceerde CO en CO₂. Uit deze metingen blijkt dat de verhouding Φ_{CO} / Φ_{CO_2} in het algemeen kleiner is dan 0.051, namelijk maximaal 0.03. Om aan de 'veilige' kant te blijven, wordt hier uitgegaan van de door PIARC gegeven verhouding.

Een schatting van de CO₂-productie per ontwikkeld brandvermogen is dat 1 kg O₂ gemiddeld 13 MJ warmte produceert en bij volledige verbranding 1.375 kg CO₂. Dit betekent een CO₂-productie van circa 0.1 kg/s per MW ontwikkeld vermogen. Hiermee is de maximale CO-concentratie op het meetpunt geschat voor de proeven 6 t/m 11 en proef 14.

Tabel 10.1 Maximale CO-concentratie op leefniveau (proeven 6 t/m 11 en proef 14)

Proef	Omschrijving	tijd	P	v	Fmeng	Productie CO	Concentratie CO
		(min)	MW	m/s	-	kg/s	ppm
6	Personenauto, geen ventilatie (herhaling proef 5)	10	4	1.00	0.20	0.020	76
7	Personenauto, wel ventilatie	10	2	6.00	0.80	0.010	25
8	Zeildoek Huif, gestapelde lading, geen ventilatie	18	13	1.50	0.30	0.066	246
9	Zeildoek Huif, gestapelde lading, wel ventilatie	18	18	6.00	0.60	0.092	170
10	Zeildoek Huif, gestapelde lading, wel ventilatie (herhaling proef 9)	10	16	5.00	0.80	0.082	242
11	Bestelbus, gestapelde lading, vertraagde sprinkler	10	7	0.80	0.30	0.036	248
14	Open gestapelde lading, vertraagde sprinkler	12	25	2.20	0.30	0.128	322

De hoogste concentratie bedraagt circa 300 ppm (proef 14). Vergelijking van de in de tabel genoemde concentraties met de CO-grenswaarden laat zien dat de CO concentratie nooit hoger wordt dan 20% van de in deel III genoemde grenswaarde 1500 ppm waarbij hoofdpijn na 15 minuten optreedt en bewusteloosheid na 30 minuten.

Ook wordt opgemerkt dat de concentraties op 200 meter circa 2 keer hoger zullen zijn dan op 100 meter vanwege de hogere mengfactor op die plek. De concentraties zijn op 200 meter echter nog steeds een factor 2.5 kleiner dan de waarde van 1500 ppm.

10.7 Vluchtomstandigheden

Voor alle proeven is bepaald het tijdsafhankelijke verloop van de vluchtomstandigheden stroomafwaarts van de brand, alsmede het verloop van de belangrijkste condities van de proef. De waarnemingen zijn in bijlage IV.9 weergegeven.

Hierin is te zien op welke tijdstippen de kritieke waarden worden overschreden en hoe lang deze overschrijdings-, c.q. blootstellingsduur is. Deze tijden kunnen onderling met elkaar worden vergeleken en worden gecorreleerd aan het brandvermogen en de ventilatiesnelheid op dat moment. Bij een dergelijke correlatie dient rekening te worden gehouden met het feit dat het enige tijd duurt voordat het effect van een sterke stijging (of daling) van het brandvermogen zich stroomafwaarts manifesteert als bijvoorbeeld een overschrijding van een zichtcriterium. Dit tijdsverschil hangt samen met de (ventilatie) snelheid waarmee het effect zich in de tunnel verplaatst en is o.a. goed te zien aan de plotselinge daling van de rookvrije hoogte als gevolg van de passage van het rookfront.

Vanuit de database met meetgegevens zijn de exacte tijden bepaald waarop de eerste keer een kritieke waarde werd overschreden. Hierbij is aangehouden dat de kritieke waarde minstens 100 s aaneengesloten dient te zijn overschreden om te voorkomen dat kortdurende overschrijdingen bepalend worden voor de beoordeling van de mogelijkheden tot vluchten. In bijlage IV.10 zijn per bedreiging de overschrijdingstijdstippen weergegeven.



De gemeten overschrijdingen zijn aangevuld met de waarnemingen uit de videobeelden. Een extra videoanalyse is uitgevoerd om te controleren of de gemeten tijden op 200 m afstand corresponderen met de waarnemingen. Dit blijkt goed te kloppen voor de tijdstippen behorende bij 'hinder', zij het binnen de mogelijkheden om vanuit de videobeelden de zichtlengte af te schatten.

10.7.1 Bedreiging door convectieve warmte

Uit de metingen van de temperatuur blijkt het volgende:

- Met name de temperaturen 10 m stroomafwaarts blijken de 'hinderlijke' temperatuur van 70 °C te overschrijden. Als er geventileerd wordt bevindt dit meetpunt zich in de hete luchtstroom. De overschrijding van de hinderlijke temperatuur gebeurt af en toe bij de proeven 3 en 4, en voor een langere periode bij de proeven 9, 10 en 14.
- Hinderlijke temperaturen op 10 m zijn alleen aanwezig bij de proeven met de hoogste vermogens (dus niet bij een personenauto-brand).
- Op 20 m afstand wordt het 'hinderlijke' niveau alleen overschreden bij de proeven zonder ventilatie met de hogere brandvermogens. De tijden liggen in de orde van 9 tot 16 minuten;
- De letde temperatuur van 150 °C wordt bij geen enkele proef overschreden.
- Uit een vergelijking van de proeven 8, 9 en 10 blijkt dat ventilatie de bedreiging door convectieve warmte vergroot. Dit is te verklaren uit het feit dat de hete rookgassen in de leefzone worden geblazen. In een situatie zonder door containers gesimuleerd verkeer zal deze invloed zich verder uitstrekken, omdat de container als een blokkade werkt en het gebied op 20 m afschermt tegen de directe stroom rookgassen.

10.7.2 Bedreiging door stralingswarmte

In deel III is een model beschreven om de stralingsflux nabij de brand te schatten. Hiermee zijn de kritieke afstanden tot het centrum van de brandhaard vast te stellen waarbinnen de hinderlijke en letde stralingsfluxen worden overschreden.

Tezamen met de meetresultaten blijkt dan het volgende:

- Bij een 5 MW brand bedraagt de letde afstand circa 6 m en de hinderlijke afstand circa 10 m. Bij een 20 MW brand lopen deze afstanden op tot circa 12 m en 20 m. Aangenomen is dat de straling uit de rooklaag bij deze afstanden ondergeschikt is aan de directe straling uit de brandhaard.
- Op 10 meter van de brand is levensbedreigende straling aanwezig na circa 6 tot 9 minuten als het brandvermogen zich ontwikkelt tot meer dan 12 MW.
- Blootstelling aan hinderlijke stralingswarmte blijft bij branden tot circa 15 MW beperkt tot 20 m vanaf de brand. Bij proef 14 is echter waargenomen dat de stralingsflux ook op 50 m tot aan het hinderlijke niveau komt.

10.7.3 Bedreiging door vermindering van zicht

Uit de waarnemingen blijkt het volgende:

- Bij de beproefde brandgrootten blijft het zicht binnen een afstand van 50-100 meter stroomafwaarts van de brand tenminste de eerste 5 minuten na ontsteking van de brand volledig aanwezig. Vaak is het zicht tot 10 minuten na ontsteking aanwezig ook als er wordt geventileerd. Dit wordt veroorzaakt door de aanwezige stratificatie.
- Op een afstand van 200 meter kan het zicht al binnen 2-5 minuten zodanig verminderen dat desoriëntatie het gevolg is. Dit is niet afhankelijk van of dan niet aanwezige langsventilatie.

10.7.4 Bedreiging door toxische stoffen (CO)

Uit de berekening van de opgetreden CO-concentraties blijkt dat in geen enkele proef deze concentraties boven de kritieke waarde zijn uitgekomen. Hierbij geldt de waarschuwing dat mogelijk andere toxische stoffen wel invloed kunnen hebben.

10.7.5 Invloed van ventileren

Ventilatie is gunstig voor het stralingsniveau uit de rooklaag. Eventuele hinderlijke straling bij hogere vermogens tussen 20 m en 50 m stroomafwaarts wordt hiermee opgeheven. Dit is te verklaren uit het feit dat de rookgastemperaturen lager worden.

Bij de autobranden lijkt ventileren weinig invloed te hebben op de zichthinder, er treedt lichte tot matige zichthinder op vanaf 8 tot 12 minuten. Dit ondanks dat het vrijkomende brandvermogen bij ventileren lager is en dat het piekvermogen pas na 38 minuten wordt bereikt. Door ventilatie verdwijnt de hinderlijke straling op 10 meter afstand. De desoriëntatie na 38 minuten is slechts tijdelijk, namelijk enkele minuten.

Bij de branden met de gestapelde lading onder de zeildoek huif ontstaat zowel met als zonder ventilatie lichte tot matige zichthinder. Echter ventileren is desondanks nadeliger, omdat:

- de zichthinder zich over een groter gebied uitstrekt: 20 tot 200 m tegen alleen 200 m zonder ventilatie;
- de zichthinder circa 10 minuten eerder optreedt vanwege de veel snellere brandontwikkeling (indirecte invloed van ventilatie).

Het voordeel dat er geen hinderlijke warmtestraling meer is uit de rooklaag geldt alleen op 20 m afstand. Daarbij komt dat de hinderlijke straling pas 15 minuten na de brand optreedt.

10.7.6 Invloed van sprinkler

Bij inschakeling van het sprinklersysteem lopen de temperaturen op 1 m en 2 m hoogte nabij de brandhaard terug tot 20 a 30 °C en komen hiermee ruim onder de voor het sprinkleren als letad voorgestelde temperatuur van 50 °C.

Wel treedt zichthinder op, die bij de brand met de bestelbus zonder ventilatie zelfs tot desoriëntatie kan leiden.

10.7.7 De snelheid van het rookfront en de vluchtsnelheid

In bijlage IV.11 is voor de belangrijkste proeven de passage van het rookfront uitgezet als functie van de tijd. De figuur toont ook de overschrijdingstijden voor hinderlijke en letde straling, alsmede voor lichte, matige en ernstige zichthinder. Daarnaast toont de figuur in schuine lijnen de positie van vluchtende personen in de tunnel die zich met een snelheid van 1 m/s stroomafwaarts verplaatsen.

Er kan het volgende worden geconcludeerd:

- bij proeven 3, 4, 6 en 11 worden personen die direct beginnen te vluchten alsnog binnen 100 m achterhaald door het rookfront;
- aannemende dat het vluchten pas begint op het moment dat het rookfront op 10 m passeert worden de vluchtenden in alle getoonde proeven binnen 100 m, door het rookfront achterhaald;
- bij dezelfde aanname kunnen de personen die zich op een afstand tussen 20 m en 200 m vanaf de brand bevinden niet dítijd ongehinderd vluchten. Bij de proeven 9 en 10 zullen zij namelijk in sommige gevallen lichte tot matige zichthinder ondervinden alvorens zij een vluchtdoor bereiken. Het betreft de proeven waarin wordt geventileerd, wat de snelheid van het rookfront aanzienlijk vergroot;
- bij dezelfde aanname zullen de personen die zich op 200 m afstand bevinden ook bij proeven 3 en 4 zichthinder ondervinden;
- bij dezelfde aanname zullen de vluchtenden de positie op 20 m afstand al hebben verlaten op het moment dat de straling op die afstand hinderlijk wordt.

10.8 Zichtbaarheid vluchtwegaanduidingen

Als onderzoeksdoel is mede aangegeven de zichtbaarheid van de vluchtwegaanduidingen. Uit de visuele waarnemingen tijdens de proeven bleek dat wanneer de rook gestratificeerd was daaronder de vluchtwegaanduidingen goed zichtbaar bleven. Echter, zodra de rook tot op lage niveaus hing waren alle geplaatste typen vluchtwegaanduiding niet meer zichtbaar. Daarbij verdwenen de vluchtwegaanduidingen met de grootste helderheid het laatste in de rook.

Vastgesteld werd, dat vluchtwegaanduidingen al zeer snel niet meer zichtbaar zullen zijn ook als ze een grote helderheid hebben. Het is van belang vluchtwegaanduidingen laag te plaatsen waardoor ze zo lang mogelijk zichtbaar blijven.

10.9 Conclusies

Nabij de brand is de bedreiging door warmtestraling groter dan de bedreiging door convectieve warmte. Bij een 5 MW brand (personenauto) bedraagt de 'letde' afstand circa 6 m en de 'hinderlijke' afstand 10 m. Bij een 20 MW brand (kleine vrachtauto) bedragen deze afstanden circa 12 m en 20 m.

Wanneer er stratificatie optreedt is dat het gunstigst voor de vluchtomstandigheden tussen 50 m tot 100 m. In die zone speelt de straling uit de rooklaag een rol en verder weg (vanaf circa 200 m) zorgt de daling van de rooklaag tot beneden zichthoogte voor slechtere omstandigheden. Met name op 20 m en vanaf 200 m kunnen er dan vrijwel onmiddellijk na het passeren van het rookfront hinderlijke tot levensbedreigende omstandigheden ontstaan en is dus de rookfrontsnelheid van belang. En deze is altijd zo groot dat vluchtende personen worden ingehaald.

Overigens heeft geen terugstroming plaatsgevonden van de op 200 m gedaalde rook, wat een verslechtering van de omstandigheden tussen 50 m en 150 m tot gevolg gehad zou hebben.

Langsventilatie beperkt de vluchtmogelijkheden stroomafwaarts van de brand binnen korte tijd na ontsteking van de brand.

- Bij een personenauto-brand treedt in beide gevallen lichte tot matige zichthinder op: het gunstige effect van het lagere vermogen wordt teniet gedaan door de verstoring van de stratificatie.
- Bij een brand van een lading onder een huif ontstaat zowel met als zonder ventilatie lichte tot matige zichthinder, maar bij ventileren:
 - strekt de zichthinder zich over een groter gebied uit, namelijk tussen de 20 m en 200 m van de brand (zonder ventilatie alleen op 200 m);
 - treedt de zichthinder circa 10 minuten eerder op, vanwege de snellere brandontwikkeling;
 - speelt het voordeel van de vermindering van de warmtestraling uit de rooklaag geen rol, omdat vluchtende personen onder normale omstandigheden voldoende tijd hebben om dit relatief kleine, gevaarlijke gebied (tot maximaal 50 m van de brand) te verlaten.

Opgemerkt wordt dat ook het (nog) rijdende verkeer een langsstroming opwekt die nog enige minuten in stand blijft nadat het verkeer tot stilstand is gekomen. Ook wind zal een langsstroming veroorzaken.

De overschrijding van de kritieke concentraties toxische stoffen is (zeer waarschijnlijk) van ondergeschikt belang ten opzichte van de bedreiging door convectieve warmte, stralingswarmte en vermindering van zicht.

Het optreden en voorkomen van backlayering stemt volledig overeen met uit recente literatuur bekende relaties voor de kritieke snelheid ter voorkoming van backlayering.

Karakterisering van het rookgedrag is ten dele mogelijk door gebruik te maken van de mengfactor waarmee de overgang tussen stratificatie en menging is te voorspellen. Onder een grenswaarde van 0,6 is de rookconcentratie voldoende laag, daarboven is men omgeven door rook.

Bij de gegeven brandgrootten verlaagt sprinkler de temperatuur in de omgeving van de brand binnen korte tijd tot acceptabele waarden. Het is niet bekend of de temperaturen ook bij grotere branden nog acceptabel zijn. Het zicht vermindert zodanig dat het vinden van de vluchtwegen wordt belemmerd.

Vluchtwegaanduidingen zullen al snel door rook onzichtbaar worden. De kans hierop kan worden verkleind door de plaats zo te kiezen dat ze niet snel door rook aan het zicht worden onttrokken.

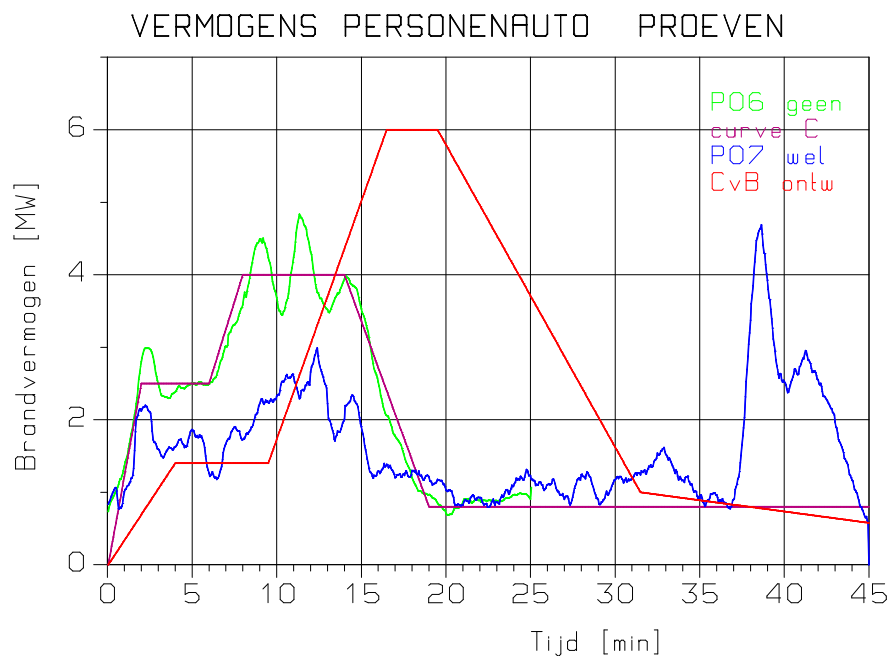


11 Invloed ventilatie op de brand

11.1 Brandverloop bij personenautobranden

11.1.1 Gemeten vermogenscurven

Onderstaande figuur toont de gemeten vermogenscurven in de proeven 6 en 7, gebaseerd op de gewichtsafname, uitgaande van een verbrandingswaarde van 25 MJ/kg. Uit de figuur blijkt dat de curve zonder ventilatie te benaderen is met de in hoofdstuk 9 gepresenteerde vorm C. De benadering met de curve voor personenautobranden zoals gevonden in (23) blijkt hier niet bruikbaar.



Figuur 11.1: Gemeten vermogenscurven met en zonder ventilatie en benaderde vermogenscurven voor een personenautobrand

11.1.2 Invloed van tunnelgeometrie

De in paragraaf 9.4 beschreven benadering van de invloed van de tunnelgeometrie impliceert voor de personenautobranden dat het vermogen een factor 1,1 groter zou zijn dan in de open lucht. Het effect van de tunnelgeometrie kan voor de uitgevoerde brandproeven worden verwaarloosd getoet op de spreiding in gemeten brandcurven.

11.1.3 Invloed van ventilatie

De vermogenscurven laten zien dat een ventilatiesnelheid van 6 m/s grote invloed heeft op de brandontwikkeling. De brandontwikkeling wordt vertraagd ten opzichte van de situatie zonder ventilatie. Het vermogen blijft tot 38 minuten na aansteken circa 1 a 2 MW terwijl dit niveau zonder ventileren al binnen 2 minuten wordt bereikt. In de eerste 15 minuten is het brandvermogen een factor van circa 0,6 lager dan zonder ventilatie. Aan het einde van de brand treedt na 38 minuten een piek op van 5 MW, die echter in 8 minuten weer lineair afneemt tot 1 MW.

Een verklaring hiervoor volgt uit de video-analyse van proef 6 en 7. Deze laat zien dat, wanneer de brand aan de voorzijde van het voertuig ontstaat, de ventilatie in de rijrichting belemmerend werkt op de branduitbreiding naar de achterzijde van de auto. Hierdoor breekt pas na 40 minuten de achterrauit waardoor de zuurstof toevoer aan de achterzijde lange tijd beperkt blijft. Het piekvermogen na 38 minuten wordt echter niet aan de achterzijde maar door een grote vuurbal aan de voorkant van de auto veroorzaakt. Onderstaande figuur toont het verschil in branduitbreiding met en zonder ventilatie.



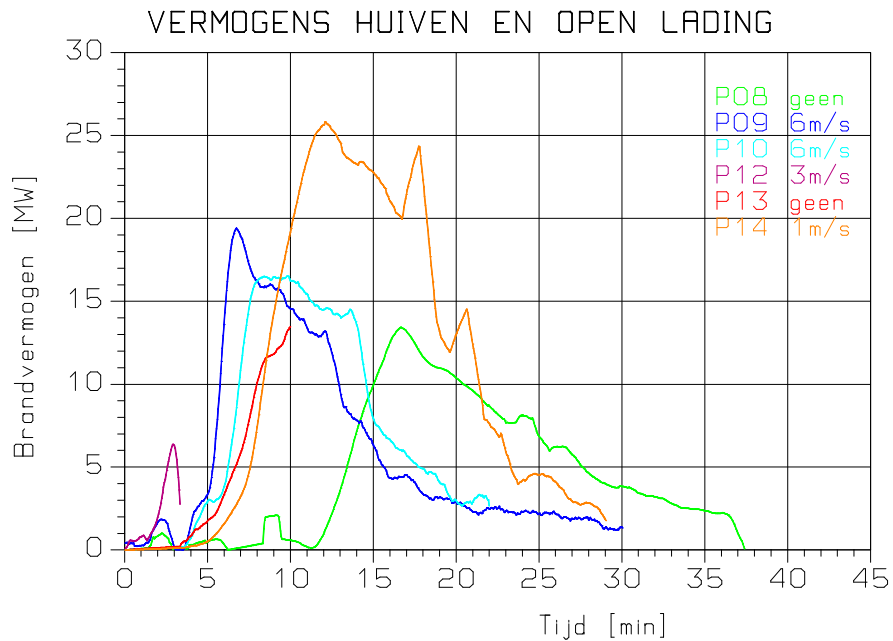
Figuur 11.2: Waargenomen brandgedrag personenautobrand zonder ventilatie (links) en met 6 m/s ventilatie (rechts).

Een algemene conclusie dat de ventilatie de brandontwikkeling vertraagt kan echter niet worden getrokken, omdat niet is onderzocht wat de invloed is van de beginlocatie van de brand. Gelet op het waargenomen brandgedrag is het namelijk niet uit te sluiten dat een brand die begint aan de achterzijde van een auto zich juist sneller naar voren, met de wind mee, zal uitbreiden. Hier staat echter tegenover dat circa 95% van de autobranden wordt veroorzaakt door motorpech en bij de motor ontstaat, die vaak voorin is geplaatst.

11.2 Brandverloop bij overige voertuig- of ladingbranden

11.2.1 Gemeten vermogenscurven

Figuur 11.3 toont de gemeten vermogenscurven voor de proeven 8 t/m 14. De vorm van de curven is andoog aan de vorm zoals gepresenteerd in hoofdstuk 9. Proef 8 is te benaderen met vorm A (met een lange aanloop) en proef 9 en 10 met vorm B2.



Figuur 11.3: Gemeten vermogenscurves zeildoek huifbrand zonder en met ventilatie.

In tabel 11.1 zijn de belangrijkste kenmerken van vermogenscurves van de proeven 8 t/m 13 weergegeven. De brandcurve wordt hierin gekarakteriseerd aan de hand van het maximum vermogen en de tijdstippen waarop het vermogen tot respectievelijk 2 MW, 5 MW en het maximum is gestegen.

Tabel 11.1 Karakteristieken brandproeven 8 t/m 13

Test	Brandhaard		Ventilatie (m/s)	Vermogenscurve					Energie-inhoud (MJ)
	Materiaal	Afmetingen (L X B X H)		Tijd tot 2 MW (min)	Tijd tot 5 MW (min)	Tijd tot maximum (min)	Tijd tot 5 MW (min)	Maximum vermogen (MW)	
P08	790 kg houten pallets + 4 banden onder zeildoek huif	4.5 x 2.4 x 2.5	geen	12	13	16	28	13	11850
P09	idem als P08	4.5 x 2.4 x 2.5	4 - 6	4	5	6.5	16	19	11850
P10	idem als P08	4.5 x 2.4 x 2.5	5	4	6	8	18	16	11850
P12	790 kg houten pallets + 4 banden onder aluminium huif	4.0 x 2.0 x 2.5	3	2.5	2.5	?	?	6?	11850
P13	790 kg houten pallets + 4 banden onder aluminium huif	4.0 x 2.0 x 2.5	0 - 3	5	7	10?	?	13?	11850

11.2.2 Invloed van tunnelgeometrie

De in hoofdstuk 9 beschreven benadering van de invloed van de tunnelgeometrie impliceert voor de ladingbranden dat het vermogen een factor 2,8 groter zou zijn dan in de open lucht.

Dat blijkt hier echter niet het geval te zijn: bij de proef met de grootste ladingbrand (proef 14) is de factor slechts 1,3.

11.2.3 Invloed van ventilatie bij 'gesloten' ladingbranden

Zowel de proeven 8, 9 en 10 als de proeven 12 en 13 zijn gebruikt om informatie over de invloed van ventilatie op de brand vast te stellen.

Proef 10 was een herhaling van proef 9. Uit de resultaten blijkt dat de invloed van ventileren goed reproduceert. De invloed is voornamelijk merkbaar aan de brandontwikkeling in de beginfase. Bij de proeven met de zeildoek huif blijkt deze ontwikkeling met ventilatie (5 à 6 m/s) 2 tot 3 keer sneller te verlopen dan zonder. De tijd tot 5 MW loopt van 13 minuten terug tot 5 à 6 minuten. Het maximum van het brandvermogen ligt een factor 1,2 tot 1,5 hoger.

Ook bij de proeven met de aluminium huif (proef 12 en 13) verloopt de brandontwikkeling met ventilatie sneller dan zonder ventilatie. Opvallend is echter de snelle ontwikkeling bij 3 m/s ventilatie, namelijk sneller dan bij de zeildoek huif met 6 m/s. Kennelijk is de natuurlijke variatie tussen vrijwel identiek ingerichte proeven ten minste even groot als de variatie ten gevolge van verhoogde ventilatie.

Mogelijke specifieke oorzaken voor de geringere ventilatie-invloed zijn:

- de windscherming van de lading door de huif: de snelle stijging naar het maximum treedt pas op als een groot deel van het zeil of aluminium is weggebrand;
- de plaats van ontsteking. De lading is in het midden aangestoken, en de ventilatie vertraagt de branduitbreiding naar achteren, zoals ook bij de personenautobrand (proef 7) geconstateerd (zie figuur 11.5).



Figuur 11.5 De brandontwikkeling met en zonder ventilatie.

Een vergelijking met de voorspellingen van Carvel et al. laat zien dat het maximum vermogen niet met een factor 8 toeneemt, maar slechts met een factor 1,2 tot 1,5. Ook de brandontwikkeling verloopt niet een factor 20 sneller, maar een factor 2 tot 4. Zelfs de verwachting van de "experts" was nog aan de ruime kant.

Bij figuur 11.3 kan worden opgemerkt dat op tijdstip $t = 0$ de lading in brand is gestoken. In praktijk ontstaan de meeste branden vanwege motorpech of kortsluiting. Dat impliceert dat de brand bij een

vrachtwagen aan de voorzijde ontstaat en pas na enige tijd de lading tot ontbranding komt mits de brand tot ontwikkeling kan komen. De tijden in figuur 11.3 geven daarom een pessimistisch beeld dan in werkelijkheid het geval is.

11.3 Conclusies

Uit een vergelijking van de meetresultaten met de theorie blijkt dat de werkelijke snelheid van brandontwikkeling en de uiteindelijke brandgrootte aanzienlijk afwijken van het door Carvel et al. voorgestelde model.

Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat de proeven, waarop onder anderen Carvel et al. hun mening baseerden, gehouden zijn in relatief kleine tunnels waar de tunnelgeometrie een belangrijke rol speelt.

In een werkelijke verkeerstunnel zoals de Beneluxtunnel is ook zonder ventilatie al reeds zo'n grote hoeveelheid zuurstof aanwezig dat langsventilatie nauwelijks extra zuurstof aan de brand toevoert. Tegelijkertijd heeft langsventilatie een koelende werking op de omgeving van de brand (zie de temperatuurmetingen) waardoor de brand zijn warmte goed naar de omgeving kan afstaan en deze warmte kan niet worden gebruikt voor het stimuleren van de brand.

Langsventilatie heeft invloed op de brandontwikkeling, zij het niet altijd conform de verwachtingen:

- Door verhoogde ventilatie kan de brandontwikkeling van een personenauto zo'n 30 minuten worden vertraagd als de brand aan de voorzijde begint. Dit in tegenstelling tot de gangbare opvatting die een versnelde ontwikkeling veronderstelt.
- Gelet op het waargenomen brandgedrag lijkt de plaats waar de brand begint van groot belang voor de invloed van verhoogde ventilatie op de brandontwikkeling bij een personenautobrand. Merk op dat de brand in circa 95 % van de gevallen bij de motor, d.w.z. voorin zal ontstaan.
- Door een hoge ventilatiesnelheid versnelt de ontwikkeling van een ladingbrand onder een huif met een factor 2 tot 3 en dus bij lange na niet met de door sommige auteurs voorspelde factor 20. De brandgrootte wordt door een hoge ventilatiesnelheid 20-50% groter.
- De natuurlijke variatie tussen vrijwel identiek ingerichte proeven, namelijk zeildoek huif versus aluminium huif is echter tenminste even groot als de variatie ten gevolge van verhoogde ventilatie! Dit geeft al aan dat een algemene uitspraak met betrekking tot het brandverloop van een bestel- of vrachtauto niet mogelijk is, zeker niet als er sprake is van een andere lading of het aansteken van de brand in de bestuurderscabine.

12 Sprinkler

12.1 Verloop van de proeven 11-14

In tabel 12.1 is het verloop van de proeven 11-14 weergegeven.

Tabel 12.1 Proefbeschrijving en sprinklerinstallatie-instellingen B tijdens de proeven

Proef	Sprinklerinstalling
11	openen sprinklerinstallatie: ca. 14 min na ontsteking; afzetten sprinklerinstallatie: ca. 22 min na het openen.
12	openen sprinklerinstallatie: ca. 6 min na ontsteking; afzetten sprinklerinstallatie: ca. 10 min na het openen
13	openen sprinklerinstallatie: ca. 10 min na ontsteking; afzetten sprinklerinstallatie: ca. 9 min na het openen
14	openen sprinklerinstallatie: ca. 22 min na ontsteking sectie boven de tankwagen; ca. 9 min later werd ook de sectie boven de brandhaard open gezet afzetten sprinklerinstallatie: ca. 17 min resp. 8 min na het openen van de eerste sectie resp. de tweede sectie Opmerking: doordat stapels pallets tijdens de brand zijn omgevallen, is een deel van de resterende vuurbelasting naast de weegschaal terecht gekomen

12.2 Waarnemingen proeven 11-14

12.2.1 Waterdebiet

Tijdens de proeven zijn de waterdebieten gemeten. De resultaten hiervan zijn in tabel 12.2 vermeld.

Tabel 12.2: Waterdebiet

Proef nr.	Autospuit nr.	Hoeveelheid (dm ³ /min)	Druk t.p.v. verdeeliding (bar)
11	AS 55.1	Ca 5.500	Ca 4,10
12	AS 50.1	Ca 5.500	Ca 3,80
13	AS 50.1	Ca 5.500	Ca 4,00
14	TAS	Ca 2.750 Ca 5.500	Ca 4,00 Ca 4,00

De hiervoor gespecificeerde prestaties moeten als gemiddelden worden beschouwd. De verschillen in druk houden verband met de uiteenlopende drukken die werden geleverd door de pomp en de (tank)autospuiten. Tijdens de beproevingen raakten de motoren warmgedraaid waardoor het rendement en de opbrengst toenamen. Zonodig is bij de proeven de stand van de afsluiters bijgesteld.

De geleverde hoeveelheid water (5.500 dm³/min) resulteert in een gemiddelde theoretische sproeidichtheid van ca. 13,97 mm/min over het gehele (fictieve) sproeiveld (10,5 bij 37,5 m) bij het in werking zijn van beide secties.

12.2.2 Algemene waarnemingen

De rooklaag werd zoals verwacht verstoord door het water uit de sprinklers. Hierdoor werd het zicht in de nabijheid van de brandhaard vrijwel onmiddellijk na activering (zeer) sterk verminderd. Na verloop van enige tijd (5 tot 10, maximaal 15 minuten) trad enige verbetering op in het zicht in de nabijheid van de brand.

Ondanks de lange wachttijden tussen ontsteking van de brand en inschakeling van de sprinklerinstallatie (bij proef 14 zelfs ruim 30 minuten) waardoor koeling van leidingen en bevestigingen uitbleef, hebben de leidingen noch bevestigingen schade ondervonden van de opgetreden hoge temperaturen.

Tijdens proef 11 en ook tijdens de andere proeven trad geen significante stoomvorming op. Wel was direct na het blussen van de brandhaard van proef 14 de lucht stroomafwaarts tamelijk heet en vochtig en kon de ruimte niet worden betreden.

12.2.3 Proeven 11, 12 en 13

Bij alle proeven daalden de luchttemperaturen stroomopwaarts én stroomafwaarts van de brand binnen zeer korte tijd van circa 250-350 °C vlak voor het open zetten van de sprinklerinstallatie tot nagenoeg de begintemperaturen van circa 15 °C voorafgaand aan de proef.

Bij de proeven 11, 12 en 13 daalde de hoeveelheid warmtestraling in de nabijheid van de brand binnen zeer korte tijd van circa 10 kW/m² vlak voor het openen van de sprinklerinstallatie tot circa 1 kW/m².

In proef 13 daalden de oppervlaktetemperaturen gemeten op de ongekoelde container vertraagd van circa 40 °C na het open zetten van de sprinklerinstallatie tot nagenoeg de begintemperaturen van circa 15 °C voorafgaand aan de proef.

De tankwagentemperaturen daalden van circa 80 °C binnen zeer korte tijd na het open zetten van de sprinklerinstallatie tot nagenoeg de begintemperaturen van circa 15 °C voorafgaand aan de proef.

12.2.4 Proef 14

De luchttemperaturen daalden binnen korte tijd van 400-600 °C vlak voor het openen van de sprinklersectie tot circa 15 °C tijdens het sprinkleren.

De hoeveelheid warmtestraling in de nabijheid van de brand daalde binnen zeer korte tijd van circa 40 kW/m² vlak voor het openen van de sprinklerinstallatie tot 2 kW/m².

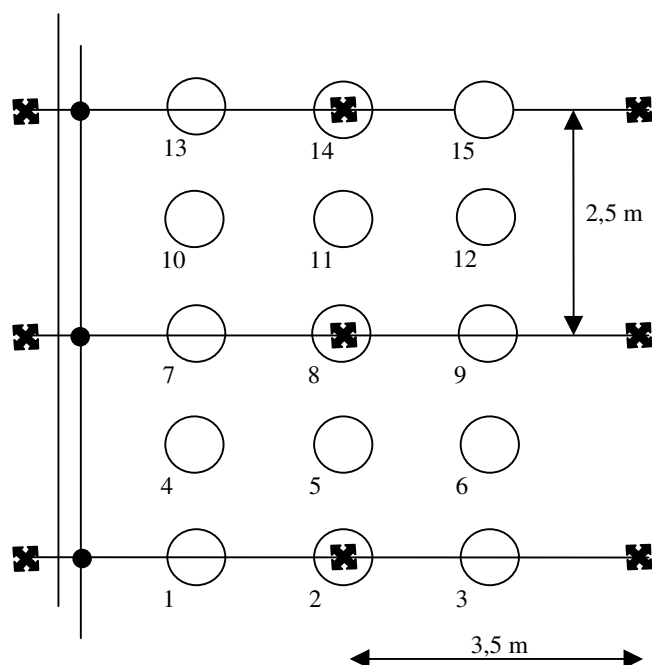
Bij koeling van de tankwagen daalde de tankwagentemperatuur binnen 3 minuten van circa 250-350 °C vlak voor het openen van de sprinklersectie boven de tankwagen tot ca. 100 °C. Daarna daalde de temperatuur in circa 5 minuten verder tot 50 °C. Dit gold voor alle opnemers met uitzondering van de meest ongunstige. Pas nadat ook de brandhaard zelf werd bestreden (openen sectie vóór de tankwagen), daalde ook de tankwagentemperatuur op deze ongunstigste opnemer tot ongeveer de uitgangstemperatuur.

12.3 Waarnemingen Emmerproef

Om de invloed van langventilatie op sprinkler te onderzoeken zijn 2 proeven met 15 emmers uitgevoerd:

1. bij de eerste proef was de langventilatiesnelheid 0 m/s, de sproeitijd 10,5 minuten, en het debiet volgens meting bij het sprinklerverdeelstuk eerst 5500 liter/min, later 5000 liter/min
2. bij de tweede proef was de gerediseerde langventilatiesnelheid 5 m/s, de sproeitijd 10 minuten, en het debiet volgens meting bij het sprinklerverdeelstuk 5500 liter/min

Het emmerpatroon bestond uit van 15 emmers h.o.h. in dwarsrichting 1,75m met de middelste emmers in het midden van dwarsdoorsnede en h.o.h. in langrichting 1,25m met de 1° emmerrij onder de 1° sprinklerrij.



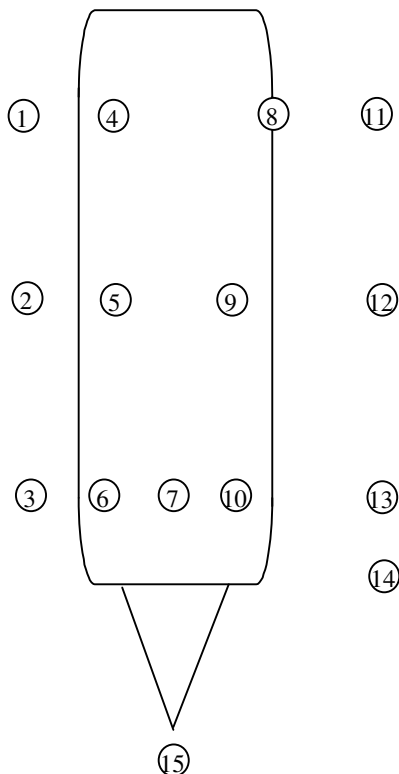
figuur 12.1 Opstelling emmers in emmerproef 1 en 2

Bij proeven 1 en 2 zijn de gemeten waterhoogten in de emmers (in mm):

Emmer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Epr 1	x	x	120	210	x	145	218	190	132	244	115	180	208	155	190
Epr 2	x	105	0	25	50	25	42	90	30	110	110	70	160	70	90

Tijdens proef 14 is een patroon van 15 emmers rondom en onder de tankwagen geplaatst (emmerproef 3). De sproeitijd bedroeg 7,5 minuten, volgens meting bij sprinklerverdeelstuk was het debiet 5350 liter/minuut.

Het emmerpatroon was ds volgt :



figuur 11.4 Opstelling emmers in emmerproef 3

Meetwaarden emmerproef 3: waterhoogte in de emmers in mm

Emmer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Epr 3	90	90	85	145	20	120	30	5	90	160	x	80	80	227	153

Emmer 11 was stuk. Niet nagezien is hoe sprinklerkoppen boven tankwagen stonden.

De waterhoogten in elke emmer geven de volgende inhoudten:

Liter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Wh in mm	28	50	76	97	120	142	163	184	204	222	243

Het oppervlak van de opening van elke emmer was 480 cm².

Voorzover uit visuele waarneming van de beproevingen is op te maken heeft (mechanisch) ventileren geen invloed op de effectiviteit van de sprinklerinstallatie. Het sproeipatroon verschuift enigszins in langrichting doch vertoont hetzelfde patroon ds regen onder winderige condities.

Wel blijkt uit de waterhoogten in de emmers dat onder windinvloed de sproeidichtheid op de vloer kleiner wordt. Een verklaring hiervoor kan zijn dat de luchtstroom de kleinere druppels meevoert en alleen de grotere druppels de vloer bereiken.

12.4 Conclusies

Bij de inzet van een sprinkler daalt bij de beproefde brandgrootten de temperatuur in de leefzone stroomafwaarts tot 20 á 30 °C en blijft dus beneden de voorgestelde letde temperatuur van 50 °C.

Met betrekking tot vorming van waterdamp ter plaatse van de brand wordt geconcludeerd dat deze niet of in beperkte mate is opgetreden. Overigens treedt vorming van waterdamp ook op bij blussing van de brand door de brandweer.

Door het in werking treden van de sprinklerinstallatie werd de rook (in de nabijheid van de brand) naar beneden geslagen waardoor het zicht plaatselijk nagenoeg geheel werd belemmerd. Het trid na verloop van enige tijd enige verbetering op.

Gezien de sterke daling van de luchttemperatuur en de temperatuur van de rookgassen in de omgeving van de brand na activering van het sprinklersysteem en de verminderde invloed van de bij brand vrijkomende warmtestraling op blootgestelde voertuigen wordt voor de beproefde scenario's geconcludeerd dat door een sprinklerinstallatie branduitbreiding naar andere voertuigen kan worden voorkomen.

Voorzover uit visuele waarneming van de beproevingen is op te maken heeft (mechanisch) ventileren geen invloed op de effectiviteit van de sprinklerinstallatie. Wel blijkt dat onder windinvloed de spreidichtheid op de vloer kleiner wordt.

Een sprinklersysteem verlaagt de temperaturen van de lucht en van andere voertuigen in de omgeving van de brand aanzienlijk. Bij de gerediseerde brandgrootten zijn de resulterende temperaturen niet letad en brandoverslag kan worden voorkomen. Stoomvorming is niet of nauwelijks waargenomen. Door inschakeling van de sprinkler neemt het zicht zodanig af dat de vluchtwegen niet of slechts moeilijk zijn te onderscheiden.

13 Brondetectie

13.1 Algemene opmerkingen

Voor de drie detectieleveranciers is de doorlooptijd erg kort geweest, waardoor de systemen in de proefopstelling niet optimaal zijn uitgevoerd. Dit heeft echter geen gevolgen voor de functionaliteit van de systemen, maar bijvoorbeeld wel voor de beschikbaarheid van de systemen bij een defect.

De leveranciers van detectiesystemen B en C hebben aan de proeven 4, 11, 0J en 12 deelgenomen. De leverancier van systeem A heeft aan deze proeven vanwege logistieke redenen niet deelgenomen.

- Van systeem B is de oostkabel tijdens proef 4 verbrand. De westkabel is na proef 10 geprepareerd en verhangen naar de oostelijke positie en heeft gefunctioneerd t/m proef 11. Tijdens proef 12 is de kabel zodanig beschadigd dat deze geheel is uitgevallen.
- Bij systeem C is bij de proeven 11, 0J en 12 alleen aan de oostzijde een detectiekabel gemonteerd geweest.
- De systemen A en B kunnen temperaturen meten tot 100-120 °C en worden daarboven (automatisch) afgeschakeld.

Tijdens de proeven waren leidingen en verlichting van de tunnel afgeschermd met brandwerend materiaal. Deze bekleding vormde op enkele plaatsen koven tegen het plafond in de lengte- en dwarsrichting. Deze koven hebben vrijwel zeker invloed gehad op de luchtverplaatsing tegen het plafond van de tunnel en daardoor de meetgegevens beïnvloed.

13.2 Resultaten

13.2.1 Luchtsnelheid tijdens de proeven 0C – 0J

De volgende luchtsnelheden zijn tijdens de proeven gemeten:

Tabel 13.1 Luchtsnelheden tijdens de proeven 0C – 0J

Proef	0C	0D	0E	0F	0G	0H	0I	0J
V (m/s)	0,2	0,2	0,2	2,8	5	2,8	0,2	0,2

13.2.2 Temperatuurverloop

Om de invloed van ventilatie respectievelijk brandgrootte te laten zien is van de proeven 0E, 0F, 0G en 2 het temperatuurverloop in de detectiekabels naar plaats en tijd opgenomen in bijlage IV.12 (voor overige resultaten, zie (30)).

De lengte van de detectiekabels is stroomafwaarts ca. 35 m vanaf de brand. Hierdoor zijn verderop stroomafwaarts geen meetgegevens bekend.

Systeem B registreerde de maximum temperaturen van de proeven 0C, 0E en 0I aan de westzijde en 0G aan de oostzijde op het moment van afbreken van de logging.

De temperatuurmetingen laten bij de proeven 0F t/m 0H op twee plaatsen een maximum zien. Onderstaande tabel geeft een overzicht van de twee maximumtemperaturen en de plaats waar het maximum is bereikt. Het hoogste maximum is vet gedrukt.

Tabel 13.2 Twee maxima proeven OF t/m OH

Nr.	zijde	Systeem A			Systeem B			Systeem C		
		T _{max} boven (°C)	T _{max} afst. (°C)	Af- stand (m)	T _{max} boven (°C)	T _{max} afst. (°C)	Af- stand (m)	T _{max} boven (°C)	T _{max} afst. (°C)	Af- stand (m)
OF	West	17,9	18,5	33,1	16,4	17,5	32,3	16,1	20,2	36,0
	Oost	24,7	23,5	13,6	21,4	20,3	14,1	18,8	26,5	14,0
OG	West	17,2	*		15,9	*		15,3	*	
	Oost	23,6	18,0	25,5	20,6	15,7	32,0	17,7	17,9	30,0
OH	West	19,5	22,6	25,3	17,3	19,6	23,8	16,3	23,6	24,0
	Oost	22,9	20,7	25,3	20,8	18,1	22,1	18,0	22,4	25,0

*: niet duidelijk waarneembaar maximum op grote afstand van vuur

T_{max} boven: maximumtemperatuur boven de brand

T_{max} afst.: maximumtemperatuur op een afstand van meer dan 5 meter van de brand

13.2.3 Overzicht van darmen

In tabel 13.3 zijn de gegevens opgenomen van de door de drie systemen gegenereerde darmen. Alarmen kunnen worden gegenereerd op basis van de snelheid van verandering van temperatuur (differentiad-darm) en overschrijding van een grenswaarde-temperatuur (maximad-darm). Ook voordarmen ds waarschuwing zijn mogelijk.

Er zij opgemerkt dat de verschillende leveranciers de vrijheid hadden de darmdrempels naar eigen inzicht in te stellen, en dat deze daarom per systeem verschillen. Onderlinge vergelijking van de darmen is daarom niet mogelijk.

De darmtijden zijn vanaf het moment 'vuur aan'. De afstanden zijn in meters ten opzichte van het hart van de brandhaard.

Tabel 13.3 Overzicht gegenereerde darmen door de systemen

Nr.	Uitg. punt	Systeem A						Systeem B						Systeem C					
		Westkabel			Oostkabel			Westkabel			Oostkabel			Westkabel			Oostkabel		
		(min:s)	(m)		(min:s)	(m)		(min:s)	(m)		(min:s)	(m)		(min:s)	(m)		(min:s)	(m)	
OC	Niet							07:10	4,0	D	02:40	3,2	D						
OD	Niet	07:05	0,6	M				02:18	-0,2	D	04:08	-6,8	D						
OE	Wel				00:56	0,6	D	04:22	-8,7	D	01:10	-0,8	D				00:36	-0,5	D
OF	Wel							06:40	27,3	V	03:40	9,1	V						
OG	Wel										06:30	-0,8	V						
OH	Wel							05:50	23,1	D	07:40	23,0	D						
OI	Wel				04:45	0,6	M	02:50	1,9	D	00:53	1,2	D				00:36	1,5	D
1	Wel	01:59	0,9	D	00:16	0,8	D	01:17	4,0	D	00:37	-0,6	D	02:07	3,9	M	00:23	3,7	D
2	Wel	01:31	0,9	D				01:17	1,8	D	00:45	1,6	D	02:21	-0,1	M	00:24	0,7	M
4	Wel							01:00	0,5	D	00:40	2,2	D	00:46	1,7	D	00:38	0,5	D
11	Wel										01:18	2,0	D				01:03	2,7	D
OJ	Niet										12:40	2,0	D						
12	Wel										03:41	1,3	D				02:53	4,7	D

D: differentiad-darm M: maximad-darm V: voordarm gearceerd: geen deelname

Uit de tabel van de darmen volgt:

Systeem A geeft met de gekozen instellingen 1 van de 4 keer wel een darm ds er geen darm gegenereerd mag worden en 8 van de 13 keer geen darm ds er volgens de opgave wel darm gegeven moet worden. Alle darmen worden binnen ± 5 m van de brand gegeven.

Systeem B geeft met de gekozen instelling 5 keer (2x 0C, 2x 0D en 0J) darm ds het systeem geen darm mag geven en geeft 4 (0F en 0G) van de 18 keer geen darm of dleen een voordarm ds er volgens opgave een maximaal of differentiaal darm gegeven moet worden. Drie keer wordt darm gegeven op een plaats meer dan 5 meter van de brandhaard; bij 0E (op 8 m afstand) aan de westzijde, bij 0H zowel aan west- ds oostzijde op 23 m afstand.

Bij de proeven 1, 2 en 4 wordt een darm direct boven de brandhaard gegenereerd. Bij de proeven 11 en 12 is dleen aan de oostzijde een detectiekabel aanwezig en ook hier wordt darm gegeven met een nauwkeurigheid van ± 5 m.

Systeem C genereert met de gekozen instelling nooit darm ds het systeem ook geen darm mag geven. Er wordt 8 van de 18 keer geen darm gegenereerd ds er volgens opgave wel een darm gegenereerd moet worden: 5 maal (0E t/m 0I) wordt het darm niet aan de west- en 3 keer (0F t/m 0H) niet aan de oostzijde gegeven.

Alle darmen worden met een plaatsnauwkeurigheid van ± 5 m gegeven.

13.3 Overige waarnemingen

Bij systeem A zijn tijdens proef 1 de kunststof beugels waarin de kabel aan de oostzijde hing gesmolten. Hierdoor is de kabel dicht op het vuur komen te hangen en verbrand.

Bij de uitwerking van de loggegevens van systeem B is gebleken dat de controller bij een groot aantal meldingen prioriteit geeft aan de uitgifte van branddarmen. De uitgifte van temperaturen aan de registratie-PC komt dan op de tweede plaats, waardoor bijv. niet elke 10 maar elke 30 s temperatuurgegevens worden uitgegeven. Dit leidt tot sprongen in de grafieken. Eveneens geeft bij proeven 1, 2 en 4 een aantal sensoren aan de oostzijde een lagere temperatuur aan wegens correctie van de drifttemperatuur. Bij proef 12 is het systeem instabiel gebleken; de meetresultaten van proef 12 zijn verder niet verwerkt.

De kabel van systeem C is niet beschadigd door de hoge temperaturen, die tijdens de beproevingen zijn opgetreden. Tijdens proef 12 ontstond een breuk vermoedelijk veroorzaakt doordat door de warmte de bevestiging van een aantal montagestrips losgelaten heeft en een andere detectiekabel kabel C belastte. Daarnaast neemt de mechanische sterkte van de glasvezel in de RVS behuizing af bij hogere temperaturen.

Bij systeem C wordt de eerste kabelbreuk gedetecteerd terwijl het systeem dan volledig blijft functioneren. Bij een tweede kabelbreuk valt het gebied tussen de breuken uit. Hiervan wordt geen aparte melding gegeven.

13.4 Analyse van de resultaten

13.4.1 Nauwkeurigheid van de temperatuurmetingen

Bij de proeven 1, 2, 4 en 11 zijn de temperaturen ook gemeten door de meetopstelling van TNO t.b.v. de proeven 1-14. Hoewel de positie van de meetopnemers van deze meetopstelling in hoogte- en breedterichting niet geheel overeen kwamen met de positie van de branddetectielijnen is een vergelijking gemaakt tussen de verschillende temperatuurmetingen.

Een vergelijking met de door de systemen A en B afgegeven temperaturen is daarbij niet mogelijk omdat deze slechts tot 100-120 °C meten terwijl tijdens de proeven veel hogere temperaturen zijn bereikt. Er is alleen een vergelijking met systeem C mogelijk.

De vergelijking van de gemeten temperaturen is opgenomen in onderstaande tabel.

Tabel 13.4 Vergelijking maximumtemperaturen systeem C en TNO-meetopstelling

Proef	TNO sensor	Plaats	T _{max} TNO (°C)	T _{max} syst. C westkabel (°C)	T _{max} syst. C oostkabel (°C)
1	TK_B085	West, 3 m van buis C, 5 m hoog	222,5	191,2	248,1
2	TK_B085	West, 3 m van buis C, 5 m hoog	220,1	174,1	297,1
4	TK_BRA2	Boven de brand, 3 m hoog	395,7	264,9	411,5
11	TK_BRA2	Boven de brand, 3 m hoog	300		396,8

De verschillen in de gemeten temperaturen zijn onder andere verklaarbaar vanwege het verschil in meetpositie.

13.4.2 Snelheid van de branddetectie

De door de detectiekabels gemeten temperatuur bij een brand wordt bepaald door de overdracht van warmte via straling en convectie en is mede afhankelijk van de constructie en andere eigenschappen van de detectiekabel en van de systeemcontroller waarop de kabel is aangesloten.

De warmteoverdracht vertaalt zich naar een steilheid van de temperatuurgrafieken. Bij proef 0E is deze voor systeem A berekend op 11°C/min, voor systeem B op 6°C/min en voor systeem C op 60°C/min. Hierbij vormen de massa van de kabel en de warmteoverdrachtscoëfficiënt van de kabel de belangrijkste factoren. Kabel C heeft een relatief geringe massa, kabel B heeft de grootste en kabel A heeft massa die hier tussenin ligt. Kabel C heeft vanwege de metalen mantel een veel grotere warmteoverdrachtscoëfficiënt dan de kabels A en B die een kunststof mantel hebben.

Deze eigenschappen worden in proef 2 goed geïllustreerd: zodra de ventilatie toeneemt, daalt de temperatuur van kabel C veel scherper dan kabel A en B. Wanneer gebruik wordt gemaakt van de gemeten temperaturen blijkt dat systeem C veel eerder de maximum temperatuur bereikt, zowel aan oost- als westzijde. In proef 0G geeft systeem A aan westzijde de hoogste temperatuur aan en reageert het snelste.

Uit de gegenereerde alarmen blijken de volgende mogelijkheden:

- De systemen genereren bij een kleine brand (panbrand 1,13 m²) recht onder de kabel en een ventilatiesnelheid van 0-1 m/s een alarm binnen circa 1 minuut.
Wanneer dezelfde brand schuin onder de kabel staat is de reactietijd circa 2-4 min. (systeem B).
- Bij toenemende ventilatiesnelheid genereert een kleine brand (panbrand 1,13 m²) recht onder de kabel bij systeem B een alarm binnen 4-8 minuten, de overige systemen genereren geen alarm.
Bij dezelfde brand schuin onder een kabel ligt de reactietijd in dezelfde orde grootte.
- Bij de grotere panbranden in de proeven 1, 2 en 4 is de reactiesnelheid voor een brand recht onder de kabel circa 0,5 minuten waarbij moet worden opgemerkt dat deze branden begonnen met een brandvermogen van circa 1-2 MW.
Dezelfde branden schuin onder een kabel gaven een reactietijd van circa 2 minuten.
- De (gesimuleerde) voertuigbranden in de proeven 11 en 12 gaven een reactietijd te zien van 1-3 minuten, waarbij wordt opgemerkt dat de branden onder de detectiekabels stonden en de ventilatiesnelheid gering was.



- Een vrachtwagen-bovenuitlaat recht onder de detectiekabel gaf bij systeem C geen alarm en bij systeem B pas na 12 minuten.
- Bij de kleine branden van proeven 0C en 0D werd uiteindelijk door systeem A en B wel een alarm gegenereerd hoewel de reactietijd binnen 2-7 minuten gegeven werd.

Op basis van deze gegevens bestaat de indruk dat een zich ontwikkelende voertuigbrand binnen 1-3 minuten een brandalarm kan genereren mits de brand recht onder de kabel plaatsvindt en de luchtstroming niet meer dan circa 3 m/s is. Wanneer de brand niet recht onder de kabel staat en/of er een aanzienlijke langsstroming is kan de reactietijd naar schatting oplopen tot 5 minuten of (veel) meer. Hierbij moet het volgende worden opgemerkt:

- Ondanks de verschillende kabeleigenschappen en verwerking van gemeten temperatuurwaarden tot een brandalarm wijken de reactietijden niet veel van elkaar af. Kennelijk pasten kabeleigenschappen en gekozen alarmdrempel-instellingen bij elkaar.
- De kabels waren niet te gevoelig afgesteld zoals blijkt uit proef 0J, maar misschien is een gevoeliger instelling wel mogelijk waarmee de reactietijden enigszins kunnen worden verkort zonder dat extra veel valse alarmen worden gegenereerd.

Opgemerkt wordt dat niet bekend is welke invloed de signaalverwerkingstijd heeft op de snelheid van alarmverwerking indien lange detectiekabels c.q. veel sensoren per kabel worden toegepast.

13.4.3 Plaatsnauwkeurigheid

Temperatuurverhogingen in de kabel kunnen zowel door convectorie als door straling worden veroorzaakt. Bij een geringe ventilatiesnelheid liggen de plaats van convectorie en straling zeer dicht bij elkaar of op dezelfde plaats. Bij een hogere luchtsnelheid kunnen deze plaatsen op een aanzienlijke afstand van elkaar liggen en wordt dus op twee plaatsen brandalarm aangegeven. De gevoeligheden voor convectorie en straling hangen af van de kabelconstructie.

Uit de gegenereerde alarmen blijkt:

- De systemen A en C genereren bij branden recht onder de kabel de plaats binnen 5 meter van de brand. Systeem B genereert bij lage ventilatiesnelheden eveneens een melding binnen 5 meter van de brand, maar bij hogere ventilatiesnelheden kan de afstand tot meer dan 20 meter oplopen.
- Bij branden niet recht onder de kabel wijken de posities van de brandmelding weliswaar af maar kunnen toch dezelfde gevolgtrekkingen worden gemaakt.
- Bij een aanzienlijke ventilatiesnelheid wordt in langsrichting stroomafwaarts gezien het eerste meldpunt veroorzaakt door straling en geeft dit het beste de locatie van de brand weer.

Plaatsbepeding door het detectiesysteem is van belang indien de informatie van dit systeem wordt gebruikt ten behoeve van hulpverlening en brandbestrijding door de brandweer. Een zekere mate van onnauwkeurigheid (bijvoorbeeld 30 m) is voor die toepassing evenwel acceptabel.

In het kader van de aansturing van (in secties opgedeelde) open sprinklersystemen is nauwkeurige plaatsbepeding (± 5 m) van een brand essentieel om te voorkomen dat relatief grote blusssecties moeten worden toegepast.

13.4.4 Instelling alarmdrempelwaarden

Uit het temperatuurverloop van de proefbranden, met name 0F en 0H, is af te leiden dat vermeden moet worden de maximum temperatuurdrempel relatief laag in te stellen (bijv. enkele graden boven de tijdens normale omstandigheden voorkomende maximum temperatuur in de tunnel) om te voorkomen dat ten gevolge van opwarming door convectorie bij een zich wat langzaam ontwikkelende brand stroomafwaarts (dus op de verkeerde plaats) alarmen worden gegenereerd.

Bij dezelfde (ongevoelige) instelling moet dus worden uitgegaan van een langere tijd tussen het ontstaan van een brand en het moment van detectie (brandalarm).

13.4.5 Temperatuurmonitoring

Ten aanzien van de temperatuur- en brandbestendigheid is o.a. vastgesteld dat de beproefde sensorsystemen niet geschikt zijn voor temperatuurmonitoring (uitval bij ca. 120°C). Bij één van de kabels bleek tevens dat de bevestiging verbeterd moet worden; het tijdens een brand al snel naar beneden vallen van installatiedelen is namelijk niet wenselijk. Ook is het wenselijk dat een detectiekabel zelf relatief onbrandbaar is.

Het beproefde glasvezelsysteem (C) blijft in bedrijf tot ca. 500 °C en is in dat opzicht dus redelijk geschikt om temperatuurinformatie tijdens een brand te verstrekken.

De andere systemen kunnen dit vanwege de kabelconstructie en het verwerkingssysteem niet.

13.4.6 Uitval bij defect

Uit de beproevingen met de grote branden is gebleken dat uiteindelijk alle detectiekabels ter plaatse van de brand defect raakten. Alleen het glasvezeldetectiesysteem bleef echter functioneel bij één defect en voldoet daarmee aan de eis dat één defect geen invloed mag hebben op naastgelegen stuurzones.

Leveranciers van sensordetectiesystemen zijn bezig met ontwikkeling zodat in de toekomst ook met deze systemen aan de eis zal kunnen worden voldaan. Voordien zal bij toepassing van sensorsystemen per sprinklersectie een aparte controller noodzakelijk zijn om bij een defect (kortsluiting) invloed op naastgelegen stuurzones uit te sluiten.

13.5 Conclusies

De reactiesnelheid van de beproefde branddetectiesystemen ligt bij zich langzaam ontwikkelende voertuigbranden in de ordegrootte van 1-3 minuten voor branden recht onder de detectiekabel en bij een langsstroming die niet groter dan 1 m/s is.

Wanneer de brand niet recht onder de kabel staat en/of er een langsstroming meer dan 1 m/s is wordt in veel gevallen geen alarmmelding gegeven. Wanneer wel een melding wordt gegeven kan de reactietijd oplopen tot 5 minuten of (veel) meer.

Bij zich snel ontwikkelende branden zal veelal een melding binnen 3 minuten mogelijk zijn ongeacht de ventilatiesnelheid.

Bij de gekozen instellingen van de alarmdrempels is het in het algemeen mogelijk om zich langzaam ontwikkelende branden binnen 5 meter afstand van de brandhaard de brand te detecteren ongeacht of de brand recht onder de detectiekabel staat of niet, mits de ventilatiesnelheid minder dan 1 m/s is.

Bij een ventilatiesnelheid van meer dan 3 m/s worden in langsrichting stroomafwaarts gezien vaak twee meldingen gegeven. Het eerste meldpunt wordt dan veroorzaakt door warmtestraling en ligt binnen 5 meter van de brandhaard; het tweede meldpunt kan op 20 meter of meer liggen.

Bij zich snel ontwikkelende branden wordt altijd binnen 5 meter afstand van de brand een melding gegeven.

Om ongewenste brandmeldingen, door bijvoorbeeld uitlaatgassen uit een omhoog gerichte uitlaat van een stilstaande vrachtwagen in een situatie dat er weinig of geen luchtbeweging is, te voorkomen is een relatief ongevoelige instelling van de alarmdrempelwaarden nodig.

Bij toepassing van detectiesystemen voor de aansturing van sprinklerinstallaties moet van een sprinklersysteem, dat bestaat uit meerdere secties, niet alleen de blussctie boven de brand maar ook de direct naastgelegen sectie worden open gestuurd. Dit wordt veroorzaakt door de onnauwkeurigheid in de plaatsbepaling en tevens doordat niet van tevoren de omvang van een brandend object bekend is.

Indien een zeer snelle detectie van kleine branden gewenst is binnen enkele minuten, zodat acties als ontruiming sneller in gang kunnen worden gezet, kan dit niet met de beproefde detectiesystemen. Daarvoor moet gedacht worden aan andere oplossingen.



V NUMERIEKE SIMULATIES (CFD)

14 CFD-simulaties

14.1 Inleiding

De simulatie van een brand is van zeer complexe aard. De beschikbare kennis is dan ook enigszins fragmentarisch en zeker nog niet uitgekristalliseerd. De laatste jaren heeft echter de ontwikkeling van CFD-technieken voor simulatie van vele uiteenlopende processen een grote impuls gekregen, mede dankzij de steeds krachtiger wordende computers.

Omdat de ontwikkeling van CFD-rekentechnieken nog betrekkelijk nieuw is en de materie complex, bestaat in de praktijk al snel behoefte om de rekenuitkomsten empirisch te ijken. Als echter de mate van betrouwbaarheid van CFD-modellen voldoende is, dan kunnen in de toekomst dierhande calamiteitsscenario's worden berekend, zonder dat de noodzaak aanwezig is tot het uitvoeren van kostbare proeven.

Het is wenselijk na te gaan hoe nauwkeurig met deze ontwikkelde CFD-modellen kwantitatieve voorspellingen kunnen worden gedaan over temperatuur, straling en rookdichtheid.

Voorafgaand aan de brandproeven zijn aan de hand van CFD-modellen predicties gedaan over de ruimtelijke en tijdsafhankelijke temperatuur- en rookverdeling in de tunnel.

Een van de berekeningen had tevens als doel de benodigde aanvullende beschermingsmaatregelen in de Tweede Beneluxtunnel te bepalen tijdens het uitvoeren van de brandproeven.

Na het uitvoeren van de brandproeven zijn postdictieberekeningen uitgevoerd, met als doel de ten opzichte van de predicties gewijzigde randvoorwaarden mee te nemen in de berekeningen.

14.2 Onderzoekopzet

Voor de uitvoering van pre- en postdictie-CFD-berekeningen zijn twee externe deskundige partijen, TNO-CvB en Peutz, uitgenodigd. De reden om meer dan één partij te laten rekenen bestond hieruit dat de uitkomsten van CFD-simulaties in afhankelijk zijn van zowel het gebruikte rekenmodel als de modellering van het probleem in het CFD-model. Verwacht werd dat bij het rekenen door meer dan één partij de verschillen in modellering tot uiting zouden komen.

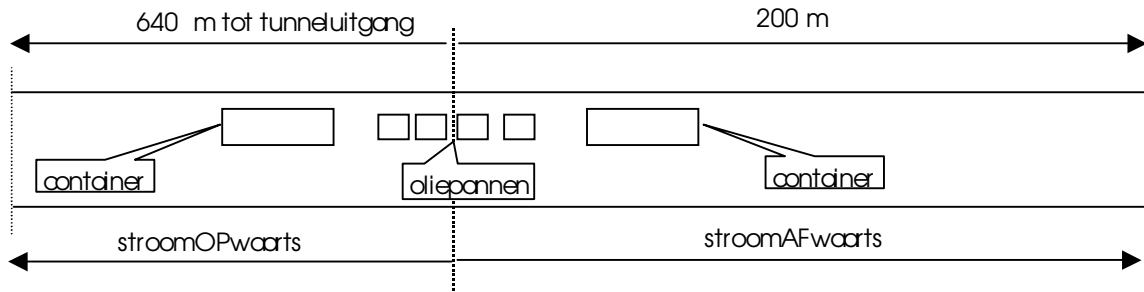
De twee partijen hebben onafhankelijk van elkaar gerekend en waren vrij in de modellering en het stellen van de randvoorwaarden. De uitgangspunten werden van tevoren door de Bouwdienst aan beide partijen opgegeven (31).

Voor het uitvoeren van CFD-simulaties zijn enkele panbranden gekozen omdat bij deze brandproeven het brandverloop en de maximale brandgrootte het best voorspelbaar waren.

Voor de brandproeven 1, 2, 3 en 4 zijn in dit kader predictieberekeningen gesimuleerd. Bij een predictieberekening worden de rekenresultaten gebruikt om van tevoren een indruk te verkrijgen wat er bij een werkelijke brand te verwachten is.

De postdictieberekeningen zijn beperkt gebleven tot de brandproeven 3 en 4.

In onderstaande figuur 14.1 wordt een schematisch beeld gegeven van de proefopzet zoals die numeriek gemodelleerd is.



Figuur 14.1 schematisch bovenaanzicht proefopstelling: tunnel ligt hier ter plaatse onder een helling van 4,5 %

14.2.1 Uitgangspunten bij de predictieberekeningen

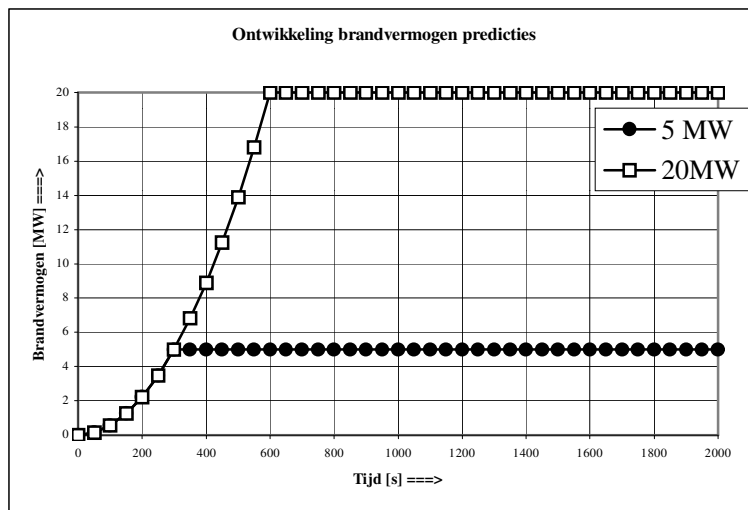
Bij de predicties zijn onderstaande voorwaarden opgelegd:

Tabel 14.1 Overzicht CFD-predicties

<i>Geval</i>	<i>Brandvermogen</i>	<i>Ventilatiesnelheid</i>
Proef 1	Curve tot 5 MW	+1 m/s
Proef 2	Curve tot 5 MW	+6 m/s
Proef 3	Curve tot 20 MW	0 m/s
Proef 4	Curve tot 20 MW	+6 m/s

+: ventilatierichting stroomafwaarts

Voor de predicties is de ontwikkeling van het brandvermogen voorgeschreven volgens figuur 14.2.



Figuur 14.2 Vermogenscurve voor 20 MW- en 5 MW-brand

Daarnaast is voorafgaand aan de brandproeven een CFD-berekening gemaakt met het maximaal verwachte brandvermogen van 20 MW en een lichtsnelheid van 0 m/s. Verwacht werd dat deze belasting de hoogste temperaturen zou opleveren waarmee de mate van extra noodzakelijke brandwerende bekleding in de tunnel tijdens de brandproeven kon worden vastgesteld.

14.2.2 Uitgangspunten bij de postdictieberekeningen

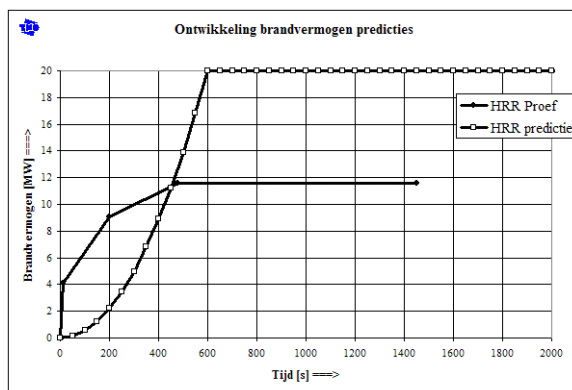
Tijdens het uitvoeren van de brandproeven bleek een aantal van de van tevoren opgegeven randvoorwaarden niet geheel overeenkomstig de uitgangspunten van de predictieberekeningen:

- Het type brandstof is in de voorbereiding van de proeven gewijzigd van 100% n-heptaan in 60% n-heptaan en 40% toluen, met als gevolg een ca. 4 maal zo grote rookproductie dan het zuivere n-heptaan.
- Omdat de automatische ontsteking van de brandblokken niet werkte moest de brand handmatig worden ontstoken waardoor het brandvermogen bij aanvang hoger was dan oorspronkelijk werd aangenomen. Ook de brandontwikkeling was daardoor anders.
- Het maximale brandvermogen was door de gewijzigde samenstelling van de brandstof lager dan voor de (reeds uitgevoerde) berekeningen opgegeven.
- Bij de predicties is er van uitgegaan dat de extra brandwerende bekleding zich vanaf 20 meter stroomopwaarts tot 30 meter stroomafwaarts bevond. In werkelijkheid was de afstand 35 meter stroomopwaarts tot 35 meter stroomafwaarts.
- De werkelijke ventilatiesnelheden bleken af te wijken van de geplande ventilatiesnelheden.
- Ook bleken bij de proeven de thermokoppels op een andere hoogte geplaatst te zijn dan bij de predicties was aangenomen.

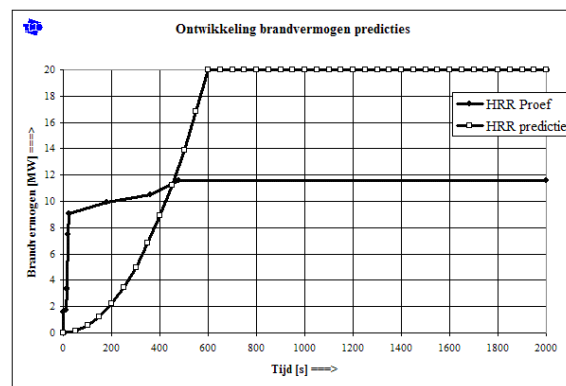
Dit heeft ertoe geleid dat de predictieberekeningen voor de proeven 3 en 4 na uitvoering van de brandproeven nogmaals zijn uitgevoerd met aanpassing van de genoemde zaken. Alle andere randvoorwaarden, de verdeling van het cellenrooster en de modellering van het probleem zijn niet gewijzigd.

In onderstaande figuren wordt het verschil tussen de geplande en de gerediseerde vermogenscurven in de proeven 3 en 4 geïllustreerd.

De bepaling van de bij de brandproeven gerediseerde brandvermogens bleek moeilijker te zijn dan oorspronkelijk werd verwacht. De nauwkeurigheid is dus mogelijk beperkt, hetgeen de vergelijking tussen meet- en rekenresultaten compliceert.



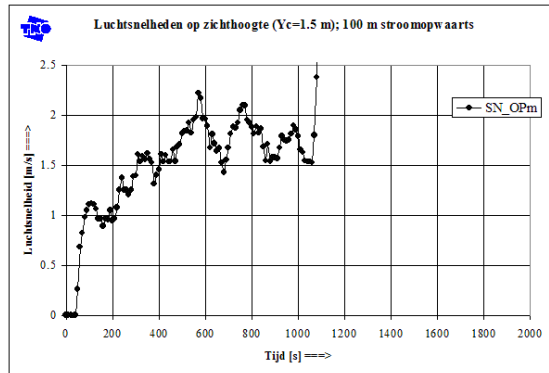
proef 3



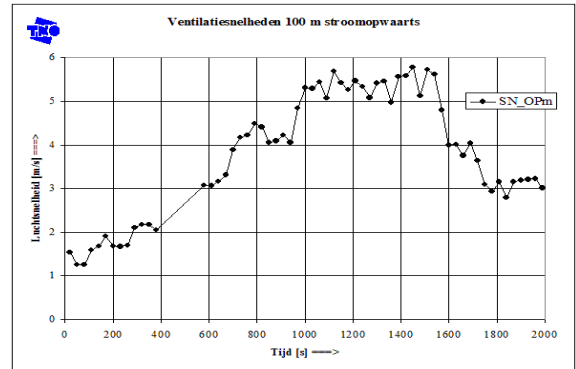
proef 4

Figuur 14.3 Gehanteerde vermogenskrommen voor proef 3 en 4 (predicties en postdicties)

Ook de bij de predicties aangenomen constante ventilatiesnelheden (resp. 0 en 6 m/s) konden niet nauwkeurig gerediseerd worden; zie onderstaande figuren.



proef 3



proef 4

Figuur 14.4 Gemeten ventilatiesnelheden bij proef 3 en 4

14.3 Beschrijving CFD-technieken

Aan de basis van een CFD-rekenmodel liggen de Navier-Stokes differentiaalvergelijkingen, die het transport van massa, impuls, warmte en stof in een samendrukbaar medium beschrijven. De geometrie van het probleem wordt m.b.v. roosterpunten in volumecellen opgedeeld, waarover de vergelijkingen worden geïntegreerd en opgelost. Dit houdt in dat voor elke roostercel de behoudswetten voor massa, impuls en energie worden toegepast, waarbij wordt verondersteld dat het transport door de wanden van een roostercel slechts wordt bepaald door de waarde van de grootheden in de eigen roostercel en in de aangrenzende roostercellen. De programma's berekenen met behulp van het $k-\epsilon$ turbulentiemodel en een verbrandingsmodel het tijdsafhankelijke verloop van de lokale snelheden, drukken, temperaturen en rookconcentraties in een tunnel. Dit rekening houdend met de stralingswarmteoverdracht in de rook en naar de wanden, en met de warmtegeleiding in de wanden.

In dit rapport worden de rekenresultaten besproken welke verkregen zijn met behulp van de volgende twee computerprogramma's:

- PHOENICS (Peutz)
- VESTA (TNO)

Bij CFD-berekeningen wordt daartoe vaak het k -epsilon model gehanteerd om het mechanisme van turbulentie te modelleren, waarbij de verschillende vergelijkingen in een tijd-gemiddelde Reynoldsform^{*)} worden gestoken (Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS). Zowel PHOENICS als VESTA passen dit turbulentiemodel toe.

Een opkomende rekentechniek is die welke bekend staat als Large Eddy Simulation (LES); hierbij wordt getracht een hoger oplossend vermogen naar plaats en tijd te verkrijgen.

^{*)} $Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\eta} = \frac{\text{traagheidskracht}}{\text{visceuze kracht}}$ met ρ = dichtheid, v = snelheid, η = dynamische viscositeit

De rookdichtheid RD wordt gedefinieerd als:

$$RD = \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

waarbij I de intensiteit is van monochromatisch licht.
De eenheid waarin RD wordt weergegeven is: (1/m)

14.4 Het CFD-model van TNO

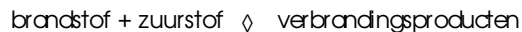
14.4.1 Het CFD-model

De CFD-simulaties zijn door TNO verricht met het softwarepakket VESTA.
De gecombineerde stromings- en stralingsberekening is uitgevoerd met een tijdstap van 12 seconden, waarbij binnen elke tijdstap 90 iteraties werden uitgevoerd. De keuze van de tijdstapgrootte en aantal iteraties per tijdstap is gebaseerd op ervaringen met eerdere berekeningen in tunnels. Er is gekozen voor een 'brute force' benadering, dat wil zeggen dat niet is gepoogd de rekentijd te optimaliseren door bijvoorbeeld de tijdstap aan te passen aan de veranderingen van het stromingsbeeld (kleine tijdstap dat wil zeggen lange rekentijd bij grote veranderingen versus grotere tijdstap, dat wil zeggen kortere rekentijd bij kleinere veranderingen).

Volledigheidshalve volgt een beknopte presentatie van de voornaamste processen/fenomenen die een rol spelen bij de numerieke modellering van brand volgens VESTA.

Verbranding

De verbranding is gemodelleerd door middel van de éénstapsreactie:



Het model neemt aan dat de verbranding instantaan plaatsvindt daar waar brandstof en zuurstof gelijktijdig aanwezig zijn, waarbij dus alle aanwezige zuurstof wordt verbrand of alle aanwezige brandstof. De verbrandingsnelheid is dus onafhankelijk gesteld van de chemische reactiesnelheid en van de turbulente menging van de brandstof met de zuurstof. Deze manier van verbrandingsmodellering wordt het '*mixed is burnt*' principe genoemd en biedt de mogelijkheid om rekening te houden met de invloed van de stroming op de grootte en oriëntatie van het vlamvolume. Het is het meeste eenvoudige verbrandingsmodel in VESTA.

Rookeigenschappen

De stralingseigenschappen van de rook zijn berekend met het Weighted Sum of Grey gases model. In dit model wordt geen rekening gehouden met de golflengte-afhankelijkheid van de optische eigenschappen van de lucht, rook en verbrandingsgassen, met andere woorden deze zijn behandeld als grijs.

Er is gebruik gemaakt van waarden die door Smith et al. (28) zijn bepaald voor een gas-roet mengsel bestaande uit gelijke volumina kool dioxide en waterdamp uitgaande van een roetproductie van 0,012 kg/kg verbrande brandstof.

De optische rookdichtheid is berekend op basis van een rookpotentieel van 100 (Bel/m) m³/kg verbrande brandstof. De waarde is gebaseerd op een SBI-meting bij TNO.

Warmtestraling

De modellering van de warmteoverdracht door straling is gebaseerd op de Discrete Transfer Methode. Hiervoor zijn 16 stralingsrichtingen gebruikt.



14.4.2 Modellering en randvoorwaarden

De gehele configuratie omvat de totale lengte van de tunnelbuis. Deze is als een rechthoekige doos gemodelleerd: 840 m lang, 9,85 m breed en 5,10 m hoog. Gelet op de relatief geringe kromming van de buis in langrichting is de verwachting dat deze geen wezenlijke invloed op de resultaten zal hebben en dus verwaarloosd kan worden. De invloed van de helling in langrichting is wel meegenomen. Deze varieert in de lengterichting van de tunnel.

In tegenstelling tot de opstelling van de proeven is bij de simulaties van enkelwandige bakken met een vast brandstofoppervlak uitgegaan, namelijk het maximale (buitenbekaafmetingen) oppervlak. Het vermogen is per bak gevarieerd door de verbrandingssnelheid per bak te variëren. Bij 5 MW is slechts één bak gemodelleerd die zich in het midden van de brandhaard (bij 20 MW) bevindt. De vermogenscurve van 20 MW wordt gerediseerd door bak nr. 3 tot het maximale vermogen van 5 MW te regelen, vervolgens bak nr. 2 tot het maximale vermogen (totaal 10 MW), vervolgens bak nr. 4 en tenslotte nr. 1.

Uitgaande van een verbrandingssnelheid van ca. 5 mm/min en 95% zuiver n-heptaan kunnen de brandstofbakken met een brandstofoppervlak van 1,0 x 1,8 m een vermogen van 5 MW leveren. Gerekend is met een niet-equidistant rekenrooster van $119 \times 14 \times 22 = 36.552$ rekencellen, waarbij de kleinste rekencellen zich daar bevinden waar de grootste snelheids- en/of temperatuurgradienten optreden. De keuze van het rooster is gebaseerd op ervaringen met eerdere tunnelsimulaties. Voor de aanvangstemperatuur in de tunnel is 10 °C aangehouden.

14.5 CFD-simulaties door Peutz

14.5.1 Het CFD-model

De CFD-simulaties zijn door Peutz verricht met het softwarepakket PHOENICS.

De grootte van de tijdstappen varieert tussen de 15 s en 15 minuten. In de groeifase van de brand zijn kleine stappen geselecteerd, terwijl in de stationaire fase grotere tijdstappen zijn gekozen.

Volledigheidshalve volgt een beknopte presentatie van de voornaamste processen/fenomenen die een rol spelen bij de numerieke modellering van brand volgens PHOENICS.

Verbranding

De brand is gemodelleerd als een warmtebron met een vast vlamvolume doch met een variabel warmtevermogen.

Rookeigenschappen

Voor de grootte van de rookproductie zijn dezelfde waarden aangehouden als vermeld bij TNO. De stralings eigenschappen van de rook zijn berekend met het Weighted Sum of Grey gases model. In dit model wordt geen rekening gehouden met de golflengte-afhankelijkheid van de optische eigenschappen van de lucht, rook en verbrandingsgassen, met andere woorden deze zijn behandeld als grijs.

In iedere eindige volumecel wordt berekend het absorptiecoëfficiënt van het rookluchtmengsel. Het composiet stralingsmodel van Spalding is gebruikt voor modellering van de stralings transmissie in de tunnel.

14.5.2 Modellering en randvoorwaarden

De tunnel is geschematiseerd als een recht kokersegment met een lengte van 250 m en een rechthoekige doorsnede. De in werkelijkheid optredende (langs)kromming is verwaarloosd. De containers zijn geplaatst aan weerszijden van de brand, op 10 m afstand, in het midden van de rechter rijbaan. De Promadad beplating ter bescherming van het tunneldak over de gehele lengte is gemodelleerd, evenals de aanvullende Promadad beplating rondom de brandhaard, namelijk tot 20 m stroomopwaarts en tot 50 m stroomafwaarts (in werkelijkheid was de bekleding van 35 m stroomopwaarts tot 35 m stroomafwaarts gemonteerd).

De brandhaard is geschematiseerd tot een oppervlak, waarover de warmtebron met variabel warmtevermogen (5 MW en 20 MW) wordt uitgesmeerd. Het brandoppervlak is bij de 5 MW-brand 2 m² en bij de 20 MW-brand 8 m².

De predictieberekeningen zijn uitgevoerd met een niet-equidistant rekenrooster van ca. 100.000 rekenaars; het rooster is verfijnd ter plaatse van de brandhaard en de containers. De afmetingen van de gridcellen variëren tussen de 0,02 m³ (dichtbij de brand) en 0,25 m³ (stroomafwaarts). Voor de aanvangstemperatuur in de tunnel is 10 °C aangehouden.

14.6 Resultaten

Voor een grafische weergave van de rekenresultaten wordt verwezen naar bijlage V.1 en V.2. Zowel van de predicties als van de postdicties worden de maximaal opgetreden temperaturen vermeld. Deze aangegeven temperaturen hoeven in de tijd niet gelijktijdig te zijn opgetreden. De resultaten worden gegeven voor de hoogten 2m en 5m boven het wegdek op het hart van de tunnel. De reden hiervoor is dat 2m als een grens van de leefzone kan worden gezien, terwijl op 5m hoogte de situatie nagenoeg tegen de onderzijde van het tunnelplafond wordt gezien.

Opgemerkt wordt dat de resultaten van de predicties niet goed vergelijkbaar zijn met de meetresultaten van de genoemde afwijkingen in brandstof, brandvermogen, brandontwikkeling en ventilatiesnelheden.

De resultaten van de predicties van Peutz zijn op andere hoogten gegeven dan de werkelijke meetlocaties tijdens de proeven. Bij de predicties van TNO en bij de postdicties van zowel TNO als Peutz en zijn de werkelijke meethoogten in de tunnel gebruikt. De verschillen werden veroorzaakt doordat na de predictie-berekeningen van Peutz de meethoogten in de tunnel zijn gewijzigd. Een overzicht van de verschillen wordt in tabel 14.4 gegeven.

Tabel 14.4 Overzicht geplande en werkelijke hoogteposities van meetpunten luchttemperaturen

	Hoogteposities van meetpunten luchttemperaturen (thermokoppels) (m)				
Meetpositie in tunnel	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
Predictie van Peutz	1,5	3,0	4,0	4,5	5,0
Predictie van TNO en alle postdicties	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0

14.6.1 Maximale temperaturen brandproef 1

In tabellen 14.5 en 14.6 worden gepresenteerd de berekende (predicties) en gemeten maximale temperaturen op 2 m en 5 m hoogte.

Tabel 14.5 Maximale temperaturen op 2 m hoogte, midden tunnel ($t \leq 1000$ s)

Afstand tot brandhaard	Maximale temperatuur op 2 m hoogte (°C)		
	Peutz	TNO	Meetresultaten
	predictie	predictie	
200 m stroomafwaarts	40	30	Ontbreekt op 2 m Op 3 m hoogte: 25
100 m stroomafwaarts	95	55	25
50 m stroomafwaarts	80	15	20
20 m stroomafwaarts	45	15	20
10 m stroomafwaarts	40	15	25
10 m stroomopwaarts	25	15	15
20 m stroomopwaarts	20	10	15

Tabel 14.6 Maximale temperaturen op 5 m hoogte, midden tunnel ($t \leq 1000$ s)

Afstand tot brandhaard	Maximale temperatuur op 5 m hoogte (°C)		
	Peutz	TNO	Meetresultaten
	predictie	predictie	
200 m stroomafwaarts	90	45	50
100 m stroomafwaarts	110	70	70
50 m stroomafwaarts	140	95	85
20 m stroomafwaarts	180	110	100
10 m stroomafwaarts	210	115	125
10 m stroomopwaarts	215	180	150
20 m stroomopwaarts	165	120	120

14.6.2 Maximale temperaturen brandproef 2

In tabellen 14.7 en 14.8 worden gepresenteerd de berekende (predicties) en gemeten maximale temperaturen op 2 m en 5 m hoogte.

Tabel 14.7 Maximale temperaturen op 2 m hoogte, midden tunnel ($t \leq 1000$ s)

Afstand tot brandhaard	Maximale temperatuur op 2 m hoogte (°C)		
	Peutz	TNO	Meetresultaten
	predictie	predictie	
200 m stroomafwaarts	28	18	Ontbreekt op 2 m Op 3 m hoogte: 37
100 m stroomafwaarts	29	20	25
50 m stroomafwaarts	25	15	28
20 m stroomafwaarts	23	22	25
10 m stroomafwaarts	37	20	50
10 m stroomopwaarts	20	10	25
20 m stroomopwaarts	20	10	18

Tabel 14.8 Maximde temperaturen op 5 m hoogte, midden tunnel ($t \leq 1000$ s)

Afstand tot brandhaard	Maximde temperatuur op 2 m hoogte (°C)		
	Peutz	TNO	Meetresultaten
	predictie	predictie	
200 m stroomafwaarts	47	25	45
100 m stroomafwaarts	55	28	70
50 m stroomafwaarts	56	36	90
20 m stroomafwaarts	58	47	140
10 m stroomafwaarts	60	20	145
10 m stroomopwaarts	20	10	145
20 m stroomopwaarts	20	10	130

14.6.3 Maximde temperaturen brandproef 3

In tabellen 14.9 en 14.10 worden gepresenteerd de berekende (pre- en postdicties) en gemeten maximde temperaturen op 2 m en 5 m hoogte.

Tabel 14.9 Maximde temperaturen op 2 m hoogte, midden tunnel ($t \leq 1000$ s)

Afstand tot brandhaard	Maximale temperatuur op 2 m hoogte (°C)				
	Peutz		TNO		Meetresultaten
	predictie	postdictie	predictie	postdictie	
200 m stroomafwaarts	105	85	70	40	Ontbreekt op 2 m Op 3 m hoogte: 55
100 m stroomafwaarts	45	40	55	60	40
50 m stroomafwaarts	50	40	50	35	45
20 m stroomafwaarts	60	65	90	50	50
10 m stroomafwaarts	70	80	75	50	65
10 m stroomopwaarts	20	35	15	25	15
20 m stroomopwaarts	20	20	10	10	15

Tabel 14.10 Maximde temperaturen op 5 m hoogte, midden tunnel ($t \leq 1000$ s)

Afstand tot brandhaard	Maximale temperatuur op 2 m hoogte (°C)				
	Peutz		TNO		Meetresultaten
	predictie	postdictie	predictie	postdictie	
200 m stroomafwaarts	230	160	105	55	105
100 m stroomafwaarts	290	200	160	90	170
50 m stroomafwaarts	330	220	195	125	235
20 m stroomafwaarts	370	240	235	150	315
10 m stroomafwaarts	445	280	300	200	400
10 m stroomopwaarts	200	250	200	150	270
20 m stroomopwaarts	20	165	140	115	220

14.6.4 Maximale temperaturen brandproef 4

In tabellen 14.11 en 14.12 worden gepresenteerd de berekende (pre- en postdicties) en gemeten maximale temperaturen op 2 m en 5 m hoogte.

Tabel 14.11 Maximale temperaturen op 2 m hoogte, midden tunnel ($t \leq 1000$ s)

Afstand tot brandhaard	Maximale temperatuur op 2 m hoogte (°C)				Meetresultaten
	Peutz		TNO		
	predictie	postdictie	predictie	postdictie	
200 m stroomafwaarts	45	85	35	40	Ontbreekt op 2m. Op 3 m hoogte: 50
100 m stroomafwaarts	45	70	40	40	35
50 m stroomafwaarts	45	75	40	35	40
20 m stroomafwaarts	20	65	20	45	25
10 m stroomafwaarts	30	85	30	50	60
10 m stroomopwaarts	20	45	10	10	20
20 m stroomopwaarts	20	20	10	10	20

Tabel 14.12 Maximale temperaturen op 5 m hoogte, midden tunnel ($t \leq 1000$ s)

Afstand tot brandhaard	Maximale temperatuur op 2 m hoogte (°C)				
	Peutz		TNO		Meetresultaten
	Predictie	postdictie	predictie	postdictie	
200 m stroomafwaarts	125	145	75	60	80
100 m stroomafwaarts	140	190	85	80	120
50 m stroomafwaarts	155	220	105	115	155
20 m stroomafwaarts	180	250	130	135	160
10 m stroomafwaarts	250	285	200	180	250
10 m stroomopwaarts	20	270	10	100	185
20 m stroomopwaarts	20	245	10	10	145

14.7 Discussie

14.7.1 Predicties

Temperatuur

De vergelijking van de resultaten van de predicties met de meetresultaten van de brandproeven is niet goed mogelijk, omdat de gerediseerde ventilatiesnelheden en brandvermogens niet overeenkomen met de uitgangspunten van de CFD-berekeningen.

Vergelijking van de berekende temperaturen laat zien dat de Peutz-predicties zowel bij proef 3 en 4 duidelijk hoger liggen dan die van TNO. Dit verschil wordt stroomafwaarts steeds groter. Deze observatie blijft overigens ook geldig na aftrek van het verschil van 10 °C in de aanvangstemperatuur door Peutz (20 °C) en TNO (10 °C).

Verder blijkt TNO de stratificatie structureel te onderschatten ten opzichte van de berekeningsresultaten van Peutz; de rekenresultaten van TNO geven in de hoogterichting een grotere menging weer.

Rookdichtheid

De optredende significante verschillen tussen de gemeten en de berekende rookdichtheden zijn grotendeels verklaarbaar door het gebruik van het toluen-n-heptaan brandstofmengsel met 4 maal zoveel rookproductie dan de hier aangenomen n-heptaan brandstof. De met PHOENICS (Peutz) en VEST A (TNO) berekende waarden van de rookdichtheid zijn van gelijke orde.

14.7.2 Postdicties

Temperatuur

Bij proef 3 blijkt dat als gevolg van het lagere brandvermogen (11,6 MW in plaats van 20 MW) de berekende temperaturen bij de postdicties significant lager zijn dan volgde uit de predicties. Dit houdt in dat de rekenresultaten van Peutz dichtbij de meetresultaten zijn komen te liggen; de temperaturen meer nabij de brandhaard worden echter onderschat en meer stroomafwaarts overschat.

De postdicties van TNO onderschatten nabij het plafond de temperaturen structureel; op lagere niveaus komen de berekende en gemeten waarden beter met elkaar overeen.

Het temperatuurverloop bij de aanvang van de brand verloopt bij beide predicties veel sneller dan volgt uit de gemeten waarden.

Wanneer het verloop van de gemeten temperaturen nabij de brandhaard vergeleken met de vorm van de gehanteerde brandvermogenskromme dan ontstaat de indruk dat deze laatste wellicht toch een flauwer verloop heeft gehad dan in figuur 14.3 is weergegeven. Een en ander compliceert de vergelijking tussen de berekende en de gemeten temperaturen.

Bij proef 4 blijkt dat Peutz zowel op 2 m hoogte als 5 m hoogte t.o.v. de predicties duidelijk hogere temperaturen vindt. Voor TNO geldt globaal dat de temperaturen niet bijzonder veel afwijken van de predicties.

Volgens Peutz wordt het lagere brandvermogen van 11,6 MW (20 MW in predicties) dus ruimschoots gecompenseerd door de lagere waarden van de kunstmatige ventilatiesnelheden.

Bij TNO compenseren de effecten van het lagere brandvermogen en ventilatiesnelheden elkaar vrijwel.

De berekende maximale temperaturen wijken bij TNO zowel naar boven als naar beneden gemiddeld 20-30% af van de gemeten temperaturen.

De door Peutz berekende temperaturen zijn substantieel hoger dan de gemeten temperaturen.

Rookdichtheid

Bij proef 3 zijn de rookdichtheden volgens TNO meer dan het dubbele dan die van Peutz.

Bij proef 4 zijn de postdictieresultaten van Peutz en TNO ongeveer vergelijkbaar.

De meetwaarden liggen echter op een significant lager niveau ten opzichte van de rekenresultaten.

14.8 Conclusies/aanbevelingen

Kwalitatief lijkt de simulatie van branden in tunnels met behulp van CFD redelijk mogelijk te zijn. In kwantitatieve zin blijken er echter aanzienlijke afwijkingen te kunnen optreden en is ijking aan uitgevoerde brandproeven noodzakelijk voor een verantwoorde toepassing van CFD-rekentechnieken bij de simulatie van branden in tunnels. De rekentechniek is blijkbaar nog niet zodanig uitgekristalliseerd dat het routinematig in kwantitatieve zin voor het complexe verschijnsel brand kan worden toegepast.

Het toepassen van CFD-rekentechnieken voor het simuleren van brandscenario's lijkt echter niettemin in de toekomst een nuttige en hanteerbare aanpak te kunnen zijn, mits voldoende ervaring aanwezig is of beschikbaar komt en de rekenresultaten zo af en toe vergeleken kunnen worden met proefresultaten.

Aanbevolen wordt na te gaan hoe de rekenmodellen eventueel nog aangepast kunnen worden met als doel de kwantitatieve resultaten te verbeteren. Hierbij kan o.a. worden gedacht aan:

- andere meshverdeling,
- andere tijdstappen,
- ander vlammodel,
- andere turbulentie-eigenschappen.
- andere wandfuncties.
- etc.

Naast RANS-technieken, zoals toegepast door Peutz en TNO, wordt aanbevolen in de toekomst ook aandacht te besteden aan LES-rekentechnieken, omdat deze laatste rekentechniek het complexe verschijnsel brand in principe met een grotere resolutie naar plaats en tijd kan beschrijven dan mogelijk is met de RANS-aanpak.



15 Overzicht van de conclusies

Aan de hand van de brandproeven is een zestal onderzoeksdoelen en onderliggende vragen, zoals beschreven en geformuleerd in Deel II, onderzocht.

De gepresenteerde resultaten en conclusies gelden voor branden met een vermogen tot maximaal 25 MW in een tunnel met een relatief grote doorsnede (circa 50 m²), waarbij bewust in de rijrichting is geventileerd om 'backlayering' te voorkomen.

De conclusies aan de hand van de onderzoeksdoelen zijn als volgt:

Onderzoeksdoel 1

Het verloop in de tijd van warmte- en rookverspreiding teneinde beter te kunnen inschatten welke kans op ontvluchting bestaat.

Conclusie

Nabij de brand is de bedreiging door warmtestraling groter dan de bedreiging door convectieve warmte. Bij een 5 MW brand (personenauto) bedraagt de 'let de' afstand circa 6 m en de 'hinderlijke' afstand 10 m. Bij een 20 MW brand (kleine vrachtauto) bedragen deze afstanden circa 12 m en 20 m.

Wanneer er stratificatie optreedt is dat het gunstigst voor de vluchtomstandigheden tussen 50 m tot 100 m. In die zone speelt de straling uit de rooklaag een rol en verder weg (vanaf circa 200 m) zorgt de daling van de rooklaag tot beneden zichthoogte voor slechtere omstandigheden. Met name op 20 m en vanaf 200 m kunnen er dan vrijwel onmiddellijk na het passeren van het rookfront hinderlijke tot levensbedreigende omstandigheden ontstaan en is dus de rookfrontsnelheid van belang. En deze is altijd zó groot dat vluchtende personen worden ingehaald.

Opgemerkt wordt, dat er geen terugstroming heeft plaatsgevonden van de op 200 m gedaalde rook, wat een verslechtering van de omstandigheden tussen 50 m en 150 m tot gevolg zou hebben gehad.

Langsventilatie beperkt de vluchtmogelijkheden stroomafwaarts van de brand binnen korte tijd na ontsteking van de brand.

- Bij een personenauto-brand treedt in beide gevallen lichte tot matige zichthinder op: het gunstige effect van het lagere vermogen wordt tenietgedaan door de verstoring van de stratificatie.
- Bij een brand van een lading onder een huif ontstaat zowel met als zonder ventilatie lichte tot matige zichthinder, maar bij ventileren:
 - strekt de zichthinder zich over een groter gebied uit, namelijk tussen de 20 m en 200 m van de brand (zonder ventilatie alleen op 200 m);
 - treedt de zichthinder circa 10 minuten eerder op, vanwege de snellere brandontwikkeling;
 - speelt het voordeel van de vermindering van de warmtestraling uit de rooklaag geen rol, omdat vluchtende personen onder normale omstandigheden voldoende tijd hebben om dit relatief kleine, gevaarlijke gebied (tot maximaal 50 m van de brand) te verlaten.

Opgemerkt wordt dat ook het (nog) rijdende verkeer een langsstroming opwekt die nog enige minuten in stand blijft nadat het verkeer tot stilstand is gekomen. Ook wind zal een langsstroming veroorzaken.

De overschrijding van de kritieke concentraties toxische stoffen is (zeer waarschijnlijk) van ondergeschikt belang ten opzichte van de bedreiging door convectieve warmte, stralingswarmte en vermindering van zicht.

Het optreden en voorkómen van backlayering stemt volledig overeen met uit recente literatuur bekende relaties voor de kritieke snelheid ter voorkoming van backlayering.

Karakterisering van het rookgedrag is ten dele mogelijk door gebruik te maken van de mengfactor waarmee de overgang tussen stratificatie en menging is te voorspellen. Onder een grenswaarde van 0,6 is de rookconcentratie voldoende laag, daarboven is men omgeven door rook.

Onderzoeksdoel 2

De invloed van langsventilatie op de brand (aanwakkereffect).

Conclusie

Langsventilatie heeft invloed op de brandontwikkeling, zij het niet altijd conform de verwachtingen:

- Door verhoogde ventilatie kan de brandontwikkeling van een personenauto zo'n 30 minuten worden vertraagd als de brand aan de voorzijde begint. Dit in tegenstelling tot de gangbare opvatting die een versnelde ontwikkeling veronderstelt.
- Gelet op het waargenomen brandgedrag lijkt de plaats waar de brand begint van groot belang voor de invloed van verhoogde ventilatie op de brandontwikkeling bij een personenauto-brand. Merk op dat de brand in circa 95 % van de gevallen bij de motor, d.w.z. voorin zal ontstaan.
- Door een hoge ventilatiesnelheid versnelt de ontwikkeling van een ladingbrand onder een huif met een factor 2 tot 3 en dus bij lange na niet met de door sommige auteurs voorspelde factor 20. De brandgrootte wordt door een hoge ventilatiesnelheid 20-50% groter.
- De natuurlijke variatie tussen vrijwel identiek ingerichte proeven, namelijk zeildoek huif versus aluminium huif is echter tenminste even groot als de variatie ten gevolge van verhoogde ventilatie! Dit geeft al aan dat een algemene uitspraak met betrekking tot het brandverloop van een bestel- of vrachtauto niet mogelijk is, zeker niet als er sprake is van een andere lading of het aansteken van de brand in de bestuurderscabine.

Onderzoeksdoel 3

De invloed van een sprinklersysteem op brandontwikkeling, rookverspreiding en temperatuur.

Conclusie

Bij de inzet van een sprinkler daalt bij de beproefde brandgrootten de temperatuur in de leefzone stroomafwaarts tot 20 à 30 °C en blijft dus beneden de voorgestelde letde temperatuur van 50 °C.

Met betrekking tot vorming van waterdamp ter plaatse van de brand wordt geconcludeerd dat deze niet of in beperkte mate is opgetreden. Overigens treedt vorming van waterdamp ook op bij blussing van de brand door de brandweer.

Door het in werking treden van de sprinklerinstallatie werd de rook (in de nabijheid van de brand) naar beneden geslagen waardoor het zicht plaatselijk nagenoeg geheel werd belemmerd al trad na verloop van enige tijd enige verbetering op.

Gezien de sterke daling van de luchttemperatuur en de temperatuur van de rookgassen in de omgeving van de brand na activering van het sprinklersysteem en de verminderde invloed van de bij brand vrijkomende warmtestraling op blootgestelde voertuigen wordt voor de beproefde scenario's geconcludeerd dat door een sprinklerinstallatie branduitbreiding naar andere voertuigen kan worden voorkomen.

Voorzover uit visuele waarneming van de beproevingen is op te maken heeft (mechanisch) ventileren geen invloed op de effectiviteit van de sprinklerinstallatie. Wel blijkt dat onder windinvloed de spreidichtheid op de vloer kleiner wordt.

Een sprinklersysteem verlaagt de temperaturen van de lucht en van andere voertuigen in de omgeving van de brand aanzienlijk. Bij de gerediseerde brandgrootten zijn de resulterende temperaturen niet letad en brandoverslag kan worden voorkomen. Stoomvorming is niet of nauwelijks waargenomen. Door inschakeling van de sprinkler neemt het zicht zodanig af, dat de vluchtwegen niet of slechts moeilijk zijn te onderscheiden.

Onderzoeksdoel 4

De gevoeligheid naar plaats en tijd van branddetectiesystemen

Conclusie

De reactiesnelheid van de beproefde branddetectiesystemen ligt bij zich langzaam ontwikkelende voertuigbranden in de orde grootte van 1-3 minuten voor branden recht onder de detectiekabel en bij een langsstroming die niet groter dan 1 m/s is.

Wanneer de brand niet recht onder de kabel staat en/of er een langsstroming meer dan 1 m/s is wordt in veel gevallen geen alarmmelding gegeven. Wanneer wel een melding wordt gegeven kan de reactietijd oplopen tot 5 minuten of (veel) meer.

Bij zich snel ontwikkelende branden zal veelal een melding binnen 3 minuten mogelijk zijn ongeacht de ventilatiesnelheid.

Bij de gekozen instellingen van de alarmdrempels is het in het algemeen mogelijk om zich langzaam ontwikkelende branden binnen 5 meter afstand van de brandhaard de brand te detecteren ongeacht of de brand recht onder de detectiekabel staat of niet, mits de ventilatiesnelheid minder dan 1 m/s is. Bij een ventilatiesnelheid van meer dan 3 m/s worden in langsrichting stroomafwaarts gezien vaak twee meldingen gegeven. Het eerste meldpunt wordt dan veroorzaakt door warmtestraling en ligt binnen 5 meter van de brandhaard; het tweede meldpunt kan op 20 meter of meer liggen.

Bij zich snel ontwikkelende branden wordt dit tijd binnen 5 meter afstand van de brand een melding gegeven.

Om ongewenste brandmeldingen, door bijvoorbeeld uitlaatgassen uit een omhoog gerichte uitlaat van een stilstaande vrachtwagen in een situatie dat er weinig of geen luchtbeweging is, te voorkomen is een relatief ongevoelige instelling van de alarmdrempelwaarden nodig.

Bij toepassing van detectiesystemen voor de aansturing van sprinklerinstallaties moet van een sprinklersysteem, dat bestaat uit meerdere secties, niet alleen de blussectie boven de brand maar ook de direct naastgelegen sectie worden open gestuurd. Dit wordt veroorzaakt door de onnauwkeurigheid in de plaatsbepaling en tevens doordat niet van tevoren de omvang van een brandend object bekend is.

Indien een zeer snelle detectie van kleine branden gewenst is binnen enkele minuten, zodat acties als ontruiming sneller in gang kunnen worden gezet, kan dit niet met de beproefde detectiesystemen. Daarvoor moet gedacht worden aan andere oplossingen.

Onderzoeksdoel 5

De zichtbaarheid van vluchtwegaanduidingen.

Conclusie

Vluchtwegaanduidingen zullen al snel door rook onzichtbaar worden. De kans hierop kan worden verkleind door de plaats zo te kiezen dat ze niet snel door rook aan het zicht worden onttrokken.

Onderzoeksdoel 6

Het vergelijken van vooraf gemaakte CFD-berekeningen met daarna uitgevoerde brandproeven.

Conclusie

Kwantitatief lijkt de simulatie van branden in tunnels met behulp van CFD redelijk mogelijk te zijn.

In kwantitatieve zin blijken er echter aanzienlijke afwijkingen te kunnen optreden en is ijking aan uitgevoerde brandproeven noodzakelijk voor een verantwoorde toepassing van CFD rekentechnieken bij de simulatie van branden in tunnels. De rekentechniek is blijkbaar nog niet zodanig uitgekristalliseerd dat het routinematig in kwantitatieve zin voor het complexe verschijnsel brand kan worden toegepast.

Het toepassen van CFD rekentechnieken voor het simuleren van brandscenario's lijkt echter niettemin in de toekomst een nuttige en hanteerbare aanpak te kunnen zijn; mits voldoende ervaring aanwezig is of beschikbaar komt en de rekenresultaten zo af en toe vergeleken kunnen worden met proefresultaten.



16 Literatuurlijst

1. Atkinson (1996).
2. Bettis, R.J. et al. (1994). *Reduced Scale simulations of fires in partially blocked tunnels*. Int. Conf. on fires in tunnels, Borås.
3. Boer, L.C. (mei 2002). *Gedrag van automobilisten bij evacuatie van een tunnel* (TM-02-C034). TNO Technische Menskunde, Soesterberg.
4. *Bouwbesluit* (1992). Staatscourant 292, 354, 355, 509.
5. Carvel, R.O., Beard, A.N. & Jowitt, P.W. (1999). *A method for making realistic estimates of the heat release rate of a fire in a tunnel*.
6. Carvel, R.O., Beard, A.N. & Jowitt, P.W. (2001). *The effect of forced longitudinal ventilation on a HGV fire in a tunnel*. Proc. Int. Conf. on Tunnel Fires and Escape from Tunnels, Independent Technical Conf., pp191-221.
7. CEC (1996). *Closed Car Parks Find report* (7210-SA/211/318/518/620/933).
8. *Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in closed car parks* (1999) (Find Report, EUR 18867EN & Car Fire Test n9, CTICM-report INC-96/378-DJ/VG).
9. EUREKA (1995). *Fire protection in Traffic Tunnels - Findings from Large Scale tests within the EUREKA-project EU 499 Firetun* (Find Technical Report).
10. Gajadhar, R. & Huijben, J.W. (december 2000). *Tunnelbranden, Een literatuurstudie naar brandproeven en echte branden in tunnels*. Bouwdienst Rijkswaterstaat, Zoetermeer.
11. Graaf, L. van der & Pothuis, ir. J.W. (februari 1997). *Vluchten bij brand uit grote compartimenten; bepalingsmethode voor veilig vluchten* (EG/JWP/IZ 2717). PRC Bouwcentrum, Bodegraven.
12. Ingason, H. (mei 1995). *Design Fires in Tunnels*. Conference Proceedings ASIAFLAM 95, Interscience Communications Ltd., pp 77-95, Hong Kong.
13. Ingason, H., Gustavsson, S. & Dahlberg, M. (1994). *Heat Release Measurements in Tunnel Fires* (SP-Report 1994:08). Swedish National Testing and Research Institute.
14. Janse, E.W. & Leur, P.H.E. van de (1996). *Toegankelijkheid en zicht in een gang gevuld met rook* (TNO rapport 96-CVB-R0958). TNO Centrum voor Brandveiligheid, Rijswijk.
15. Kennedy, W.D. (1997). *Critical velocity, past, present and future*.
16. Kennedy, W.D. (1997). *The influence of the Memorial Tunnel Fire tests on transit tunnel fire emergency ventilation analysis*. American Public Transit Ass., Rapid Transit Conference, Washington.
17. Lemaire, A.D. & Leur, P.H.E. van de (april 2002). *Safety Proof: TNO Metingen Beneluxtunnel*. TNO Centrum voor Brandveiligheid, Rijswijk.
18. Lemaire, A.D., Leur, P.H.E. van de & Kenyon, Y.M. (juli 2002). *Safety Proof: Evaluatie metingen rook- en warmtegedrag in de Beneluxtunnel* (2002-CVB-R05573). TNO Centrum voor Brandveiligheid, Rijswijk.
19. *Methods for the determination of possible damage, Het groene boek* (1992) (CPR 16E).
20. Midea, P.J. *Heat Release Rate, critical velocity and Tunnel ventilation capacity interdependence*.
21. Mierlo, R.J.M. (1993). *Vluchten uit hoge ruimten* (SBR rapport 233).
22. Nelemans, B. & Molag, M. (mei 1999). *Stratificatie van rookgassen in HSL-Zuid tunnels* (TNO MEP rapport).
23. Oerle, N.J. van, Lemaire, A.D. & Leur, P.H.E. van de (november 1999). *Effectiviteit van stuwkrachtventilatie in gesloten parkeergarages, Brandproeven en simulatie*. TNO Centrum voor Brandveiligheid, Rijswijk.
24. Parsons Brinckerhoff (1996). *Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program, Comprehensive test report*.
25. PIARC Committee on Road Tunnels, C5 (1999). *Fire and Smoke Control in Road Tunnels* (No 05.05 .B).
26. SAVE (november 1998). *Aanpak tot berekeningsmethodiek voor in- en externe risico's bij tunnels en overkappingen* (SAVE-Rapport 98223-C54, in opdracht van Ministerie van Verkeer en Waterstaat).

-
27. SAVE. *Handleiding risicoanalyse voor brandveiligheid van Ondergrondse Railwegen* (SAVE-Rapport in opdracht van Ministerie van Verkeer en Waterstaat).
 28. Smith, T.F., Shen, Z.F. & Friedman, J.N. (1982). *Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model*. Journal of Heat Transfer, vol. 104 no. 4, pp 602-608.
 29. *Smoke and Critical velocity in tunnels* (april 1996). ITC seminar, London.
 30. Wagemckers, W. (februari 2002). *Meetrapport beproeven branddetectiesystemen Beneluxtunnel*. Strukton Systems, Utrecht.
 31. Walsink, G.M. (juli 2002). *Rapportage CFD-predictie- en postdictieberekeningen brandproeven 2^e Beneluxtunnel*. Bouwdienst Rijkswaterstaat, Utrecht.
 32. Wu, Bckar, Jagger, Betts & Allen (2000). *Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems - a study of the critical velocity*. Sheffield University and Health and Safety Laboratory, United Kingdom.
 33. Zorgman, H., Aken, dr.ir, J. van, Hoffmans, ir. L.J.M. & Dijk, ir. H.A.L. van (1984). *Menselijk gedrag bij brand* (SBR-rapport 29-2). Stichting Bouwresearch, Rotterdam.

