



Laan van Westenenk 501
Postbus 342
7300 AH Apeldoorn

www.mep.tno.nl

T 055 549 34 93
F 055 549 32 01
info@mep.tno.nl

TNO-rapport

R 2003/413

**Toepasbaarheid fysische effectmodellen t.b.v.
ongevalsscenario's in tunnels**

Datum	oktober 2003
Auteur(s)	Dr. F. Kootstra Ir. M. Molag
Exemplaarnummer	33984
Versienummer	1
Trefwoorden	Fysische effectmodellen Scenarioanalyse Tunnels
Bestemd voor	Bouwdienst Rijkswaterstaat Steunpunt Tunnelveiligheid Griffioenlaan 2 Postbus 20000 3502 LA Utrecht

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksovereenkomsten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2003 TNO

Samenvatting

In het kader van “Ontwikkeling Leidraad Scenarioanalyse” is door het Steunpunt Tunnelveiligheid van de Bouwdienst van Rijkswaterstaat aan de afdeling Industriële Veiligheid van TNO Milieu, Energie en Procesinnovatie (TNO-MEP) gevraagd om (mede) invulling te geven aan het deelproject “uitwerking ongevalsscenario’s”.

Het doel van het deelproject “uitwerking ongevalssecnario’s” is tweeledig, enerzijds het verkrijgen van inzicht in de wijze van uitwerking van ongevalsscenario’s in tunnels, en anderzijds het verkrijgen van inzicht in de bruikbaarheid en (mogelijk door aanpassingen) toepasbaarheid van de bestaande fysische effectmodellen in tunnels.

Door de afdeling Industriële Veiligheid van TNO-MEP is in dit kader onderzoek verricht naar de toepasbaarheid van de fysische effectmodellen ten behoeve van ongevalsscenario’s in tunnels. Aangezien de fysische effectmodellen zoals beschreven in het Gele Boek van toepassing en gevalideerd zijn in het vrije veld, zullen er naar alle waarschijnlijkheid voor deze modellen in tunnels aanpassingen nodig zijn, om ze ook aldaar op fysisch verantwoorde wijze toe te kunnen passen.

De doelstelling van het onderzoek is als volgt geformuleerd: Het bepalen tot in hoeverre de bestaande fysische effectmodellen/methodieken toepasbaar zijn in tunnels en indien de modellen niet toepasbaar hiervoor zijn, hoe ze zouden moeten worden aangepast om toch een acceptabel risicobeeld in tunnels te geven.

Fysische effecten

Bij een ongeval met een gevaarlijke stof in een weg- of railtunnel zullen zich onder andere de volgende fysische effecten/fenomenen kunnen voordoen ten gevolge van het vrijkomen van brandbare en/of toxische vloeistoffen of gassen:

- Het ontstaan, het uitbreiden en het zich voortplanten van een brand in een tunnel, en de daarmee gepaard gaande rookverspreidingseffecten.
- De verdamping van vloeistoffen vanuit (gevormde) plassen in tunnels.
- De dispersie van (toxische) gassen, van dampen of van rook (ten gevolge van een brand) in een tunnel.
- Het optreden van gaswolkexplosies (gaswolkontbranding, deflagratie / detonatie en de bijkomende overdrukeffecten).
- De effecten ten gevolge van een BLEVE’s.
- (BLEVE = Boiling Liquid Expanding Vapour cloud Explosion).
- De warmtestralingseffecten ten gevolge van een fakkel of plasbrand in een tunnel.

Zoals ook weergegeven in onderstaande tabel.

Gevaarlijke Stof	Fenomeen	Bron	Ontsteking	Type ongeval
Zonder	Geen brand	→	→	Ongeval met uitsluitend materiële schade (UMS)
Zonder	Brand (trein/auto) zonder brandbare lading	→	→	Kleine brand (warmte en rookontwikkeling)
Zonder	Brand (vrachtwagen) met brandbare lading	→	→	Grote brand (warmte en rookontwikkeling)
Met	Toxische vloeistof	→	→	Giftige damp (na verdamping)
Met	Toxisch gas	Continue (klein lek)	→	Giftig gaswolk
Met	Toxisch gas	Instantane (BLEVE)	→	Giftige gaswolkexplosie (piekoverdruk)
Met	Brandbare vloeistof	→	Directe	Plasbrand (warmte)
Met	Brandbare vloeistof	→	Vertraagde (damp)	Gaswolkexplosie (mogelijk na verdamping) + Plasbrand (warmte)
Met	Brandbaar gas	Continue	Directe	Fakkelbrand (warmte)
Met	Brandbaar gas	Continue	Vertraagde (damp)	Gaswolkontbranding, deflagraties of detonaties (warmte en piekoverdruk)
Met	Brandbaar gas	Instantane	Directe (BLEVE)	Gaswolkontbranding, deflagraties of detonaties (warmte en piekoverdruk)
Met	Brandbaar gas	Instantane	Vertraagde (damp)	Gaswolkontbranding, deflagraties of detonaties (warmte en piekoverdruk)
Met	Explosieven	→	→	Explosie (Detonatie/ Deflagratie)

Mate van toepasbaarheid van de fysische effectmodellen in tunnels

In onderstaande tabel is aangegeven in welke mate de bestaande fysische effecten modellen in tunnels toepasbaar zijn.

	Fysisch effectmodel	Mate toepasbaarheid in tunnels ⁽¹⁾
1	Brand en rookverspreiding	++
2	Verdamping	+/-
3	Dispersie	-
4	Explosie	+/-
5	BLEVE	+
6	Warmtestraling	+

⁽¹⁾ ++ : zeer toepasbaar, + : goed toepasbaar, +/- : toepasbaar, - : minder toepasbaar, -- : niet toepasbaar.

Brand en rookverspreiding

Voor brand- en rookverspreiding in tunnels zijn beschikbaar het (eenvoudige) zone model en het (meer gecompliceerde) CFD model. Het zone model geeft als resultaat een eerste indicatieve waarde voor de lengte in de tunnel waarover stratificatie standhoud afhankelijk van de tunnelconfiguratie (dimensies) en het vermogen [MW] van de brand. De CFD modellen zijn veel geavanceerder in vergelijking met het zone model en geven naar aanleiding van een bepaald brandscenario (brandvermogen [MW] vs. tijd [s]), de temperatuur van de brand en concentraties aan rook in de tunnel berekend als functie van tijd en plaats. Met de resultaten van de CFD berekening kan direct een koppeling worden gemaakt met de schademodelen (vluchtmodellen en letaliteitsmodellen t.g.v. warmte en toxiciteit). Hiermee zijn dan indirect het aantal slachtoffers in de tijd te bepalen in de tunnel t.g.v. de warmte- en rookverspreiding. Derhalve moet het te gebruiken model, zone model vs. CFD model, voor brand & rookverspreiding in tunnels gekozen worden afhankelijk van het gewenste soort resultaat.

Verdamping

In het geval van een weg- of railtunnel moet bij de modellering van het fysische effect model verdamping in tunnels in de bestaande verdampingsmodellen (ontwikkeld voor een open infrastructuur) extra en expliciet rekening worden gehouden worden met: *aangepaste windsnelheden* (rijrichting of ventilatierichting), *andere plasoppervlakken* (rechthoekige begrensde plassen) en *drainage* (kleinere hoeveelheden in de plas) in de tunnel. Indien dit op fysisch correcte wijze wordt gedaan is het fysische effect model voor een open infrastructuur ook toepasbaar voor weg- of railtunnel.

Dispersie

De dispersie modellen die voor zowel neutrale als zware gaswolken in tunnels worden toegepast zijn simplistisch in de manier waarop rekening wordt gehouden met de invloed van de *tunnel configuratie* (deze bepaald de maximale omvang van de gaswolk), de *windsnelheid* (rijrichting of ventilatierichting) en de *bronsterkte* (lagere bronsterkte ten gevolge van dimensie source, concentratie boven de source en windsnelheid) op het fysische effect van dispersie. In principe zou er een goed gevalideerd theoretisch dispersie model moeten worden ontwikkeld voor tunnels waarin *atmosferische turbulentie* in rekening wordt gebracht en waarbij de *verticale dispersie* gemodelleerd kan worden op dezelfde manier als in de open lucht, waarbij de gaswolk dan wordt begrensd door de hoogte en breedte van de tunnel.

Explosies

In het rapport “*Vuistregels voor explosiebelasting en respons van verkeerstunnels*” zijn de relevante experimentele gegevens met betrekking tot gasexplosies van propaan-luchtmengsels in pijpen en kanalen vertaald en geëxtrapoleerd naar een aantal reële scenario’s van een gasexplosie in een verkeerstunnel op volle schaal. Bij variatie van de twee parameters: de *wolklengte* en de *ontstekingsplaats van de wolk* (centraal of aan de rand) is vervolgens de blastbelasting op de tunnelwand berekend en in tabelvorm weergegeven. Vanwege het feit dat de experimentele resultaten geëxtrapoleerd zijn vanuit pijpen en kanalen naar de volle schaal van een verkeerstunnel is het model, hoewel zeer goed bruikbaar, niet overtuigend in de mate van toepasbaarheid.

BLEVE

Een BLEVE resulteert in de volgende fysische effecten: *druk golf* (piekoverdruk), *rondvliegende fragmenten* van de opslagtank en (bij brandbare gassen die direct worden ontstoken) een ‘*fire ball*’ (vuurbal). De mogelijke toepasbaarheid van de bestaande fysische effectmodellen voor een BLEVE op maaiveld, is op verschillende wijzen aannemelijk gemaakt voor weg- en railtunnels door middel van: modelaanpassingen in het huidige model, stochastische overwegingen en fysische overwegingen. Als vuistregel kan derhalve worden aangenomen dat, gezien de lengte van de weg- en/of railtunnels in Nederland, ten gevolge van een BLEVE in een tunnel de overlijdingskans één is voor personen in de tunnelbuis (intern risico) door de ‘vuurzee’ of door verdringing van de aanwezige zuurstof. De invloed op het externe risico ten gevolge van een BLEVE is afhankelijk van het mogelijk bezwijken van de tunnelconstructie.

Warmtestraling

De warmtestralingseffecten ten gevolge van een brand in een tunnel door het vrijkomen van een brandbaar gas (fakkel/gaswolkexplosie) en/of een brandbare vloeistof (plasbrand) kunnen goed worden gemodelleerd met de modellen die beschikbaar zijn voor de open infrastructuur (maaiveld). Echter dienen de resultaten te worden geïnterpreteerd voor zowel een fakkelbrand als een plasbrand, daarbij rekening houdend met: de (*begrenzende*) *dimensies van de tunnel* en de *beperkte aanwezigheid (en toevoer) van zuurstof* in zo’n weg- en/of railtunnel.

De begrenzende dimensies van de tunnel zal de ontwikkeling van de brand beperken. Tevens zal door onvoldoende aanwezigheid (en toevoer) van zuurstof de brand niet volledig tot ontwikkeling kunnen komen in een tunnel, en derhalve minder warmte uitstralen of zelfs (door verstikking) uitdoven door onvoldoende verse lucht toevoer (afhankelijk van wel/niet ventilatie).

Uit bovenstaande tabel en de toelichting daarop blijkt dus dat met name het dispersiemodel duidelijk aanpassingen behoeft aan de specifieke tunnelomstandigheden. Het verdampings- en het explosiemodel zullen met geringe aanpassingen voldoen aan de toepasbaarheid voor tunnels, en de overige modellen zijn in hun huidige vorm goed tot zeer goed toepasbaar binnen tunnels.

Inhoudsopgave

	Samenvatting.....	2
1	Inleiding.....	7
2	Fysische effecten.....	9
3	Fysische effectmodellen	12
3.1	Inleiding	12
3.2	Brand- en rookverspreiding.....	16
3.2.1	Zone model.....	16
3.2.2	CFD model	22
3.2.3	Schademodelen.....	26
3.3	Verdamping	26
3.3.1	Oppervlakte van de plas	26
3.3.2	Massa transport coëfficiënt	27
3.3.3	Temperatuur van en boven de plas	28
3.3.4	Aangepaste windsnelheden	28
3.3.5	Andere plasoppervlakken.....	28
3.3.6	Draining.....	29
3.4	Dispersie.....	31
3.4.1	Dispersie van een neutrale gaswolk	31
3.4.2	Dispersie van een zware gaswolk.....	32
3.5	Explosies	34
3.5.1	Gasexplosie in een verkeerstunnel	34
3.5.2	Explosie scenario's in tunnels	36
3.6	BLEVE.....	41
3.6.1	Druk golf	41
3.6.2	Rondvliegende fragmenten	42
3.6.3	Fire ball	44
3.7	Warmtestraling	46
3.7.1	Fakkel.....	46
3.7.2	Plasbrand	48
4	Inventarisatie ongevalsscenario's.....	54
4.1	Veiligheidsanalyse brand in HSL tunnels: modelbeschrijving.....	54
4.2	Scenarioanalyse van de overkappingsvarianten voor de A2 Leidsche Rijn.....	55
4.3	Deterministische veiligheidsanalyse ontwerp Randstadrail tunnel Rotterdam.....	57
4.4	Leidsche Rijn: Risicoanalyse interne en externe veiligheid.....	58
5	Conclusies.....	60
6	Referenties.....	65
7	Verantwoording	66
	Bijlage(n)	
	A Definities en terminologie	

1 Inleiding

In het kader van *Ontwikkeling Leidraad Scenarioanalyse* is door het Steunpunt Tunnelveiligheid van de Bouwdienst van Rijkswaterstaat aan de afdeling Industriële Veiligheid van TNO Milieu, Energie en Procesinnovatie (TNO-MEP) gevraagd om (mede) invulling te geven aan het deelproject *uitwerking ongevalsscenario's*.

Het doel van het deelproject *uitwerking ongevalsscenario's* is tweeledig, enerzijds het verkrijgen van inzicht in de wijze van uitwerking van ongevalsscenario's in tunnels, en anderzijds het verkrijgen van inzicht in de bruikbaarheid en (mogelijk door aanpassingen) toepasbaarheid van de bestaande fysische effectmodellen in tunnels.

Door de afdeling Industriële Veiligheid van TNO-MEP is in dit kader onderzoek verricht naar de toepasbaarheid van de fysische effectmodellen ten behoeve van ongevalsscenario's in tunnels. Aangezien de fysische effectmodellen zoals beschreven in het Gele Boek van toepassing en gevalideerd zijn in het vrije veld, zullen er naar alle waarschijnlijkheid voor deze modellen in tunnels aanpassingen nodig zijn, om ze ook aldaar op fysisch verantwoorde wijze toe te kunnen passen.

Algemeen

De bestaande fysische effectmodellen zijn in principe ontwikkeld ter bepaling van de externe veiligheid (risicoberekeningen) in een open infrastructuur (het maaiveld). Voor andere (gesloten) infrastructuren (viaducten, tunnels en overkappingen) zijn deze modellen niet zondermeer geschikt. Er mag worden verwacht dat het risico buiten de infrastructuur (extern risico), evenals het risico voor de aanwezigen binnen of op een infrastructuur (intern risico), anders is t.o.v. de open situatie (het maaiveld).

Beschouwde risico's

Er moet dus worden gekeken naar de invloed van de weg- of railtunnel op zowel het in- als externe risico. De berekeningsmethoden voor de interne veiligheid zijn met name gericht op het geven van inzicht in het groepsrisico (GR) voor het aantal doden onder de weggebruikers en/of treinreizigers. Voor de externe veiligheid gaat het niet alleen bij de berekeningswijzen voor inzicht in het GR, maar ook om het plaatsgebonden risico (PR), voorheen genaamd individueel risico (IR). De externe veiligheid wordt bepaald door het vervoer van gevaarlijke stoffen door de gesloten infrastructuur, namelijk: explosieven, giftige/brandbare gassen en toxische/brandbare vloeistoffen. Ter bepaling van de interne veiligheid komt daar nog het risico ten gevolge van een brand in een (personen)auto, bus en een vrachtwagen of spoorwagon met brandbare lading bij, en altijd de mogelijkheid tot brandoverslag.

Invloed tunnel op schade/effectafstand

In het algemeen zal een tunnel aanleiding geven tot andere schade/effect afstanden in vergelijking met de open situatie. Te denken valt hierbij aan:

- veranderingen in de bronsterkte (b.v. verdamping).
- verandering in soort effect (b.v. druk, temperatuur en concentraties).
- verandering in (ver)plaats(ing) van het effect t.g.v. de tunnel constructie.
- verandering in de grootte van het schade/effect gebied t.g.v. de tunnel dimensies.

Een kwalitatieve inventarisatie naar de invloed van de weg- of railtunnel op bovenstaande veranderingen met betrekking tot zowel de interne- als externe veiligheid laat het volgende zien:

- de bronsterkte bij het vrijkomen van een gas zal nagenoeg gelijk zijn, of minder t.g.v. mogelijke verzadigingseffecten van de gaswolk bij ontbreken van (natuurlijke) ventilatie.
- de bronsterkte voor vloeistof uitstroom t.g.v. verdamping zal minder zijn t.g.v. uitregenen (tot vloeistof verdicht gas), mogelijk kleinere plasoppervlakken (afhankelijk van het hellingspercentage in de tunnel) door de dimensies van de tunnel (breedte van de tunnel) en ‘draining’ (wegstromen vloeistof in putten).
- de tunnel dimensies zullen bij ongevallen met gevaarlijke stoffen aanleiding geven tot verhoogde drukken, temperaturen en concentraties.
- de tunnel dimensies zullen zorgen voor nagenoeg geen verplaatsing van het fysische effect, hetgeen een sterk ongunstig effect zal hebben op de interne veiligheid.
- de tunnel dimensies zullen een gunstig effect op de externe veiligheid, de tunnel constructie biedt extra bescherming.
- de tunnel dimensies zullen een (lokaal) groter schade gebied opleveren in de tunnel, en dus een ongunstig effect hebben op de interne veiligheid.
- de tunnel dimensies zullen een kleiner schade gebied opleveren buiten de tunnel (alleen bij de tunnel uiteinden), en dus een gunstig effect hebben op de externe veiligheid.

In Tabel 1 is bovenstaande kwalitatieve inventarisatie weergegeven.

Tabel 1 Kwalitatieve inventarisatie op de interne- en externe veiligheid t.g.v. weg- of railtunnel.

Bronsterkte		Soort effect			(Ver)plaats(ing) effect		Grootte schade/effect gebied	
Gas	Vloeistof	Druk	Temp.	Concentratie	IV*	EV*	IV*	EV*
+/-	-	+	+	+	--	+	++	--

* IV = interne veiligheid, EV = externe veiligheid.

De doelstelling van het onderzoek is derhalve als volgt geformuleerd:

Het bepalen tot in hoeverre de bestaande fysische effectmodellen/methodieken toepasbaar zijn in tunnels en indien de modellen niet toepasbaar hiervoor zijn, hoe ze zouden moeten worden aangepast om toch een acceptabel risicobeeld in tunnels te geven.

2 Fysische effecten

Bij een ongeval met een gevaarlijke stof in een weg- of railtunnel zullen zich onder andere de volgende fysische effecten/fenomenen kunnen voordoen (zie Tabel 2) ten gevolge van het vrijkomen van brandbare en/of toxische vloeistoffen of gassen:

- Het ontstaan, het uitbreiden en het zich voortplanten van een **brand** in een tunnel, en de daarmee gepaard gaande **rookverspreidingseffecten**.
- De **verdamping** van vloeistoffen vanuit (gevormde) plassen in tunnels.
- De **dispersie** van (toxische) gassen, van dampen of van rook (ten gevolge van een brand) in een tunnel.
- Het optreden van gaswolk**explosies** (gaswolkontbranding, deflagratie / detonatie en de bijkomende overdrukeffecten).
- De effecten ten gevolge van een **BLEVE**'s
- (BLEVE = Boiling Liquid Expanding Vapour cloud Explosion).
- De **warmtestralingseffecten** ten gevolge van een fakkel of plasbrand in een tunnel.

Tabel 2 Overzicht van de mogelijke fysische effecten bij ongevallen met gevaarlijke stoffen in een weg- of railtunnel.

Gevaarlijke Stof	Fenomeen	Bron	Ontsteking	Type ongeval
Zonder	Geen brand	→	→	Ongeval met uitsluitend materiële schade (UMS)
Zonder	Brand (trein/auto) zonder brandbare lading	→	→	Kleine brand ^{***} (warmte en rookontwikkeling)
Zonder	Brand (vrachtwagen) met brandbare lading	→	→	Grote brand ^{***} (warmte en rookontwikkeling)
Met	Toxische vloeistof	→	→	Giftige damp (na verdamping)
Met	Toxisch gas	Continue (klein lek)	→	Giftig gaswolk
Met	Toxisch gas	Instantane (BLEVE ^{***})	→	Giftige gaswolkexplosie (piekoverdruk)
Met	Brandbare vloeistof	→	Directe	Plasbrand (warmte)
Met	Brandbare vloeistof	→	Vertraagde (damp)	Gaswolkexplosie (mogelijk na verdamping) + Plasbrand (warmte)
Met	Brandbaar gas	Continue	Directe	Fakkelbrand (warmte)
Met	Brandbaar gas	Continue	Vertraagde (damp)	Gaswolkontbranding, deflagraties of detonaties (warmte en piekoverdruk)
Met	Brandbaar gas	Instantane	Directe (BLEVE ^{***})	Gaswolkontbranding, deflagraties of detonaties (warmte en piekoverdruk)
Met	Brandbaar gas	Instantane	Vertraagde (damp)	Gaswolkontbranding, deflagraties of detonaties (warmte en piekoverdruk)
Met	Explosieven	→	→	Explosie (Detonatie/ Deflagratie)

* De omvang van de brand (klein/groot) is een relatieve maat en mede afhankelijk van de dimensie van de tunnel (weg/trein/tram/metro).

** Bij brand (klein of groot) moet altijd nog rekening worden gehouden met de mogelijkheid van brandoverslag.

*** Afhankelijk van de toedracht/aanleiding tot de BLEVE zal het gaan om een koude of warme BLEVE, wat van invloed is op de gevolgen/effecten.

Van de fysische effecten die optreden ten gevolge van een brand of ten gevolge van het vrijkomen van brandbare en/of toxische vloeistoffen en/of gassen in een tunnel zal allereerst een inventarisatie van de mogelijke (en te verwachten) invloeden van de tunnelstructuur (de gesloten infrastructuur) worden gegeven op deze fysische effecten.

Brand:

- de grootte en de ontwikkeling van een brand is afhankelijk van de verse luchttoevoer naar de brand in de tunnel en dus afhankelijk van (1) tunneldimensies, (2) ventilatiesnelheid, en (3) de mogelijkheid tot brandoverslag.
- door de gesloten infrastructuur is de afvoer van de ontwikkelde rook bij een brand in een tunnel een probleem voor de vluchtende mensen door (1) verontreinigen lucht inhalatie en (2) afname zicht in de tunnel.
- bij onvoldoende ventilatie zal door de gesloten infrastructuur zal, afhankelijk van de tunnel dimensies, over een gedeelte van de lengte van de tunnel stratificatie van rook optreden alvorens deze rook in de retourstroom naar de brand zal worden teruggevoerd.

Brandbare vloeistoffen:

- verdampingssnelheid van de vloeistof vanuit de plas beïnvloed door ventilatiesnelheid in de tunnel.
- door de gesloten infrastructuur zal de verdampte vloeistof vanuit de plas aanleiding geven tot hogere concentraties in de gevormde gaswolk.
- mogelijkheid tot bijkomende overdrukeffecten bij vertraagde ontsteking van de gaswolk.
- verdamping vanuit kleinere plassen door dimensies tunnel (wegoppervlak) en ‘drainage’ t.g.v. putten in het wegdek.
- bijkomend effect van blootstelling aan rookontwikkeling bij plasbranden in tunnels.
- verhoogd lokaal effect en blootstelling aan warmte effecten t.g.v. plasbranden in tunnels.

Brandbare (mogelijk tot vloeistof verdichte) gassen:

- lagere concentraties in de gaswolk t.g.v. mogelijk uitregenen van de vloeistof.
- door ‘drainage’ van de gevormde plas, in de putten aanwezig in de tunnel, geeft aanleiding tot lagere gaswolkconcentraties.
- mogelijkheid tot explosies bij ontsteking van de gaswolk (deflagraties of detonaties).
- extra schade en risico’s t.g.v. het optreden van bijkomende hogere overdrukeffecten bij gaswolkexplosies in tunnels.
- mogelijke ‘missile’ effecten (rondvliegende brokstukken) bij (gaswolk)explosies.
- mogelijk falen van de tunnelconstructie ten gevolge van explosies.

Toxische vloeistoffen:

- verdampingssnelheid van de vloeistof vanuit de plas beïnvloed door ventilatiesnelheid in de tunnel.
- door de gesloten infrastructuur zal de verdampte vloeistof vanuit de plas aanleiding geven tot hogere concentraties in de gevormde gaswolk.
- verdamping vanuit kleinere plassen door dimensies tunnel (wegoppervlak) en ‘drainage’ t.g.v. putten in het wegdek.
- door blootstelling aan toxische dampen verhoogd risico in de tunnel op slachtoffers door verstikking en/of versuffing, resulterend in lagere vluchtsnelheden.

- plaats in de tunnel van verhoogde toxische damp concentratie is naast de tunneldimensies ook afhankelijk van de aanwezigheid van wel of geen (mogelijk geforceerde) ventilatie.

Toxische gassen:

- mogelijkheid tot explosies (BLEVE's) bij ontsteking van de (toxische) gaswolk.
- extra schade en risico's t.g.v. het optreden van bijkomende hogere overdrukeffecten bij gaswolkexplosies (BLEVE's) in tunnels.
- mogelijke 'missile' effecten (rondvliegende brokstukken) bij (gaswolk)explosies.
- door blootstelling aan toxische dampen verhoogd risico in de tunnel op slachtoffers door verstikking en/of versuffing (t.g.v. lagere vluchtsnelheid).
- plaats in de tunnel van verhoogde toxische damp concentratie is naast de tunneldimensies ook afhankelijk van de aanwezigheid van wel of geen (mogelijk geforceerde) ventilatie.

3 Fysische effectmodellen

3.1 Inleiding

Door de intensivering van het personen- en goederenvervoer op zowel de weg als ook op het spoor is de kans op het plaatsvinden van ongevallen in weg- en/of railtunnels toegenomen. Bij een ongeval in dergelijke tunnels kunnen de risico's met betrekking tot de interne als ook de externe veiligheid worden gemodelleerd. Voor de berekening van die risico's worden de ongevallen en de daaruit voortvloeiende fenomenen theoretisch benaderd. In de theoretische benadering wordt uitgegaan van het optreden van bepaalde ongevalsscenario's, die op een zo goed mogelijke wijze worden gemodelleerd door rekening te houden met de invloed van tunnel op de ontwikkeling van het ongeval, en ook de daaruit voortvloeiende consequenties. De scenario's die in een dergelijke theoretische benadering worden beschouwd kunnen worden opgedeeld in:

- ongeval *zonder* aanwezigheid gevaarlijke stof
- ongeval *met* aanwezigheid van een gevaarlijke stof

Een ongeval waar geen gevaarlijke stof bij betrokken is kan aanleiding geven tot een ongeval met uitsluitend materiële schade (UMS) dan wel een ongeval met (naast materiële schade) het ontstaan, uitbreiden, en het zich voortplanten van een brand in de tunnel. Naast de directe gevaren van warmte ten gevolge van de brand moet in de gesloten tunnel constructies ook rekening worden gehouden met de gevaren van de rook die bij een brand vrijkomt.

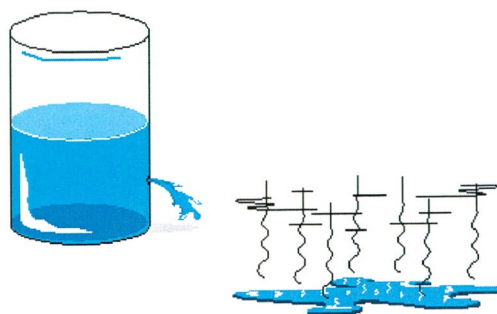


Figuur Brand en rookverspreiding.

De verspreiding van de rook in een gesloten tunnel constructie kan namelijk extra slachtoffers eisen doordat de personen niet tijdig kunnen vluchten door het slechtere zicht in de rook en als een gevolg hiervan aan een extra hoeveelheid ingeademde rook worden blootgesteld tijdens het vluchten.

Een ongeval waar wel vrijkomende gevaarlijke stoffen bij betrokken zijn, kan aanleiding geven tot het optreden van verschillende fysische effecten afhankelijk van of de gevaarlijke stof zich in de gasfase en/of in de vloeibare fase bevindt, en tevens of de gevaarlijke stof toxisch, brandbaar of beide is.

Bij een ongeval waarbij een gevaarlijke stof is betrokken in de vloeibare fase zal bij het vrijkomen zich een plas in de tunnel vormen van waaruit verdamping van de gevaarlijke stof optreedt.



Figuur Continu vrijkomen van een vloeistof gevolgd door verdamping vanuit een plas.

De verdampte vloeistof vanuit de plas zal een gaswolk vormen boven de plas die zich ten gevolge van heersende windsnelheid en richting in de tunnel zal dispergeren.



Figuur Dispergerende gaswolk.

Afhankelijk van of de vrijgekomen vloeistof toxisch en/of brandbaar was, zal de gaswolk zich in de tunnel als een toxische gaswolk verspreiden en/of ook nog bij een vertraagde ontsteking van de gaswolk een gaswolkexplosie kunnen opleveren.



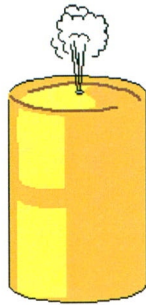
Figuur Gaswolkexplosie.

Als echter de vrijgekomen vloeistof brandbaar is, en in de gevormde plas direct na vrijkomen wordt ontstoken zal er een plasbrand optreden met de daarbij gepaard gaande warmte en rookverspreidingseffecten.



Figuur Plasbrand.

Bij een ongeval waarbij een gevaarlijke stof is betrokken in de gasvormige fase zal bij het vrijkomen het optredende fysische effect afhankelijk zijn van of het gas instantaan vrijkomt of vrijkomt vanuit een continue bron.



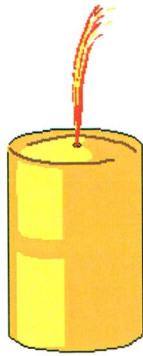
Figuur Continu vrijkomen van een gas.



Figuur Instantaan vrijkomen van een gas.

Bij het vrijkomen vanuit een continue bron van een toxisch gas zal zich een toxische gaswolk vormen die zich ten gevolge van heersende windsnelheid en windrichting in de tunnel zal dispergeren.

Bij het vrijkomen vanuit een continue bron van een brandbaar gas zal zich bij directe ontsteking een fakkel vormen met de nodige warmte effecten.



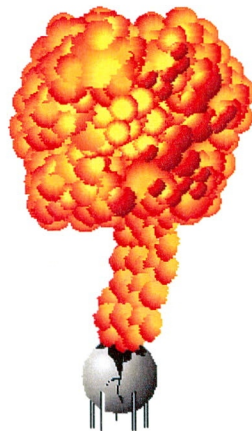
Figuur Fakkel ten gevolge van continu vrijkomen van een gas met directe ontsteking.

Indien het brandbare gas niet direct wordt ontstoken maar allereerst de kans krijgt om een gaswolk te vormen die pas vertraagd wordt ontstoken, zal dit aanleiding geven tot een gaswolkontbranding met de daarbij behorende warmte effecten. Afhankelijk van de snelheid van ontbranding, en de zich voortplantende vlammen, kan een gaswolkontbranding aanleiding geven tot een detonatie met de daarbij behorende overdruk effecten.



Figuur Detonatie.

Bij het instantaan vrijkomen van een brandbaar gas zal zich een gaswolkexplosie kunnen voordoen van de (mogelijk tevens toxische) gaswolk.



Figuur BLEVE.

Indien het brandbare gas instantaan vrijkomt maar pas vertraagd wordt ontstoken zal dit aanleiding geven tot een gaswolkontbranding en de mogelijkheid tot detonatie met de daarbij gepaard gaande warmte en overdruk effecten.

In het navolgende zullen de modellen die worden gehanteerd om de zojuist besproken fysische effecten in tunnels te modelleren nader worden uitgewerkt. Hierbij zal telkens worden aangegeven in hoeverre, en hoe, het bestaande fysische effect model voor een open infrastructuur ook toepasbaar is voor een gesloten infrastructuur (tunnels). Telkens als een model niet toepasbaar (of ongeschikt) is voor toepassing in een tunnel is getracht aan te geven welke modelaanpassingen nodig zijn (of genomen moeten worden) om toch tot een acceptabel risicobeeld voor in een tunnel te komen voor dat specifieke fysische effect.

3.2 Brand- en rookverspreiding

In vergelijking met de situatie van een open infrastructuur is het nodig een fysisch effect model te hanteren voor de brand- en rookverspreiding in tunnels. Tot op heden werd dit gedaan door middel van:

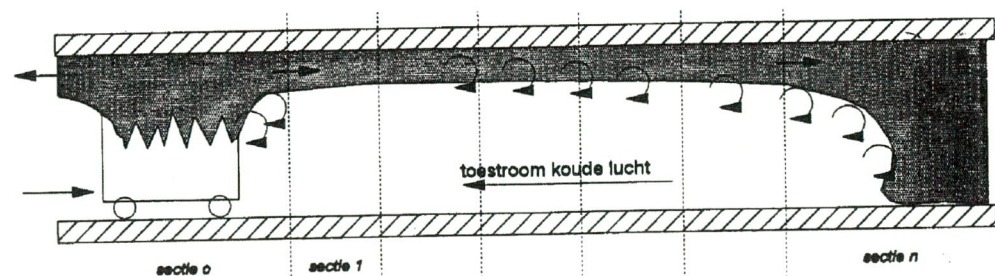
- 1 (eenvoudige) Zone modellen [SAVE 1995/1998] en
- 2 (meer gecompliceerde) CFD modellen (CFD = Computational Fluid Dynamics)

De zone modellen gaan ervan uit dat de tunnel, waarin brand ontstaat, te scheiden valt in twee lagen, nl. bovenin een rooklaag en daaronder een laag met relatief zuivere lucht (stratificatie). Er geldt overigens dat er alleen sprake van stratificatie kan zijn bij geringe turbulentie (geen kunstmatige ventilatie, geringe luchtverplaatsing door wind en/of rijdende voertuigen) en indien de rooklaag dunner is dan de 0.5 maal de tunnelhoogte. In de praktijk blijkt dat al bij een dikte van de rooklaag van 0.3 maal de hoogte van de tunnelhoogte er sterke inmenging van lucht vanuit de onderlaag plaatsvindt.

De CFD modellen gaan uit van de Navier-Stokes (NS) differentiaalvergelijkingen die het transport van massa, impuls, warmte in een samendrukbaar medium beschrijven. De geometrie van de tunnel wordt opgedeeld in cellen met een bepaald volume waarin de NS-differentiaalvergelijkingen worden geïntegreerd en opgelost tot zelfconsistentie wordt bereikt tussen de cellen onderling. Dit houdt in dat in elke cel de behoudswetten voor massa, impuls en energie worden toegepast, waarbij verondersteld wordt dat het transport dat door de wanden plaatsvindt afhankelijk is van twee cellen onderling.

3.2.1 Zone model

In Figuur 1 is schematisch het rookverspreidingsbeeld gegeven zoals dat in een tunnel (zonder ventilatie) zal optreden.



Figuur 1 Schematische voorstelling van het rookverspreidingsbeeld in een tunnel.

Het brandende voertuig bevindt zich in sectie 0, hier worden de verbrandingsproducten gemengd met toestromende lucht zodat hete rook wordt gevormd die sectie 0 in twee richtingen zal verlaten. De hete lucht zal hierbij op de koudere instromende lucht blijven drijven. Tijdens de verplaatsing koelt de rooklaag af, met name door afkoeling aan het plafond, maar ook door inmenging van de 'koudere' lucht uit de laag onder de rooklaag (afhankelijk van de verschillen in stroomsnelheden tussen deze beide lagen). De rooklaag zal op een gegeven moment instabiel worden t.g.v. te lage temperatuur, te grote snelheidsverschillen tussen de twee lagen, en turbulentie in de rooklaag t.g.v. bijvoorbeeld obstakels. Het gevolg: totale menging van de twee lagen in sectie n, en het terugstromen van verontreinigde lucht naar de brand toe. Ook in tussenliggende secties mengt reeds een fractie van de rooklaag met de onderlaag, wat ervoor zorgt dat reeds (gedeeltelijk) verontreinigde lucht naar de brand wordt teruggevoerd.

De rookverdeling in een weg- en/of railtunnel is dus afhankelijk van 2 elkaar tegenwerkende mechanismen:

- de dichtheid van de 'warme' rook is lager dan de 'koude' lucht, wat ervoor zorgt dat de rook naar en langs het plafond beweegt, en
- de twee tegengestelde stromingen van rook en lucht, wat zorgt voor turbulentie, en menging van de beide stromingen.

Het Richardsongetal geeft een indicatie van de stabiliteit van het twee lagen systeem:

$$R_i = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d}{\rho \cdot (v_r - v_l)^2} \cong \frac{(T_r - T_l) \cdot g \cdot d}{T_l \cdot (v_r - v_l)^2} \quad (1)$$

waarin:

d	= dikte van de rooklaag	[m]
g	= gravitatie snelheid	[m/s ²]
v_r	= snelheid rook in de rooklaag	[m/s]
v_l	= snelheid lucht in de onderlaag	[m/s]
ρ	= dichtheid van de lucht (temperatuur = T_l K)	[kg/m ³]
$\Delta\rho$	= verschil in dichtheid tussen rook/lucht (temperatuur is resp. T_r en T_l K)	[kg/m ³]

De praktijk heeft geleerd dat als $R_i > 0.8$ (onder voorwaarde dat $d < \text{tunnelhoogte}/2$) de rooklaag stabiel is, en als $R_i < 0.8$ steeds meer sprake van turbulentie en dus mening van de twee lagen. Op grond hiervan is een mengfractie geïntroduceerd als het (volume) gedeelte van de rook in de bovenlaag van de beschouwde tunnelsectie die met de onderlaag mengt. Als de fractie dus gelijk is aan 1 treedt volledige mening op. De mengfractie wordt bepaald volgens:

$$\text{Fractie} = 1 \text{ als } R_i < 0.8 \text{ en anders } = e^{5(0.8 - R_i)}$$

waarbij $R_i < 0.8$ wordt gezet als de dikte van de rooklaag groter wordt dan de helft van de tunnelhoogte.

De berekeningswijze van het zone model werkt nu als volgt¹.

Als invoergegevens zijn nodig:

- 1 de rook- en luchttemperatuur, T_r en T_l [K]
- 2 het vermogen van de brand, Q [kW]
- 3 de hoogte en breedte van de tunnel, H en W [m]

De rooksnelheid volgt uit:

$$v_r = 0.8 \left[\frac{g \cdot \frac{Q}{2} \cdot T_r}{\rho_0 \cdot c_p \cdot T_l^2 \cdot W} \right]^{1/3} \quad [\text{m/s}] \quad (2)$$

waarin:

- Q = thermisch vermogen van de brand [kW]
 ρ_0 = dichtheid rook/lucht (=1.217 kg/m³) bij $T_l = 290$ K
 c_p = soortelijke warmte rook (≈ 1 kJ/kg)
 W = breedte van de tunnel [m]

De dikte van de rooklaag wordt bepaald volgens:

$$d = \frac{MD \cdot T_r}{v_r \cdot W \cdot T_l \cdot \rho_0} \quad [\text{m}] \quad (3)$$

waarin MD het massadebiet van de rook dat volgt uit:

$$MD = \frac{Q/2}{(T_r - T_l) \cdot c_p} \quad [\text{kg/s}] \quad (4)$$

Als benadering kan de snelheid van de toestromende lucht naar de brand worden berekend uit de dikte en de snelheid van de rooklaag volgens:

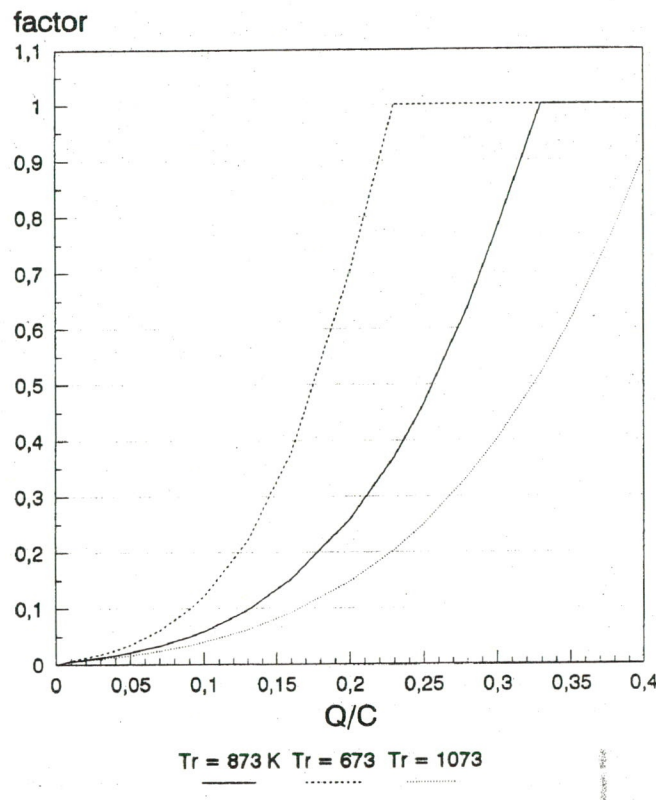
$$v_l = \frac{-v_r \cdot d}{H - d} \quad [\text{m/s}] \quad (5)$$

Na het bepalen van de waarden van de vergelijkingen (2) tot (5) kan het Richardsongetal en de mengfractie worden bepaald voor de zone.

Uit de vergelijkingen (2) tot (5) blijkt dat de uiteindelijke mengfractie in een zone van de tunnel afhankelijk is van T_r , T_l en $Q/C = Q/(W \cdot H \cdot \sqrt{H})^2$. Dit is weergegeven in Figuur 2, waarbij een voor T_l een constante waarde van 290 K is verondersteld.

¹ Als aanname hierbij is genomen dat het Froudegetal (F_r) gelijk is aan 0.71, wat voor de toepassing in weg- en railtunnels een betrouwbaar getal is gebaseerd op praktijkgegevens (snelheden, wrijvingskrachten en viscositeiten).

² $C = W \cdot H \cdot \sqrt{H}$



Figuur 2 De mengfactor vs. Q/C wat een indicatie geeft van de stabiliteit van de rooklaag in een bepaalde tunnelsectie.

Opmerking: Bij het toepassen van Figuur 2 op verschillende secties van de tunnel moet het volgende worden bedacht: Als bij een bepaalde brand met vermogen Q , een lage rooktemperatuur is gekozen, dan volgt daaruit een groot massadebiet en hoge lucht- en rooksnelheden. Wat lage waarden van R_i oplevert, dus een instabiele rooklaag. Als nu de rooktemperatuur aanvankelijk hoger was verondersteld zou dit een 'stabielere' rooklaag hebben opgeleverd. Vandaar dat Figuur 2, niet achtereenvolgens op de verschillende secties van de tunnel mag worden toegepast.

Er is dus een voorspelling nodig voor de afkoeling van de rooklaag tijdens de verplaatsing in de lengterichting van de tunnel om tot een globale afschatting te komen voor de afstand waarop R_i een kritische waarde krijgt, en stratificatie in de tunnel opgeheven wordt.

Deze afchatting verloopt dan als volgt:

- a. in vergelijking (1) nemen we aan dat over de lengte van de tunnel d , v_r en v_l gelijk blijven. (dus R_i is recht evenredig met $(T_r - T_l)/T_l$).
- b. de waarde van T_l over de gehele tunnellengete constant is.

Als we nu vervolgens de rookafkoeling in de lengterichting van de tunnel kunnen benaderen, dan is met (a) en (b), de verandering van R_i met de plaats in de tunnel af te schatten.

De afkoeling van de rooklaag is direct gekoppeld aan de opwarming van het tunnelplafond. Voor de afkoeling van de rooklaag geldt:

$$A \cdot \frac{dT_r}{dx} + \alpha_{tot} (T_r - T_l) = 0 \quad (6)$$

waarin:

A = totale (aanvankelijke) warmte-inhoud van de rookstroom

x = afstand tot de brand [m]

α_{tot} = totale warmteoverdracht parameter, die zowel de warmteoverdracht binnen de rooklaag (α_r) bevat als ook de warmteoverdracht naar de plafondwand (α_w).

De oplossing van vergelijking (6) voor het effect op R_i op plaats x is nu:

$$x = \frac{Q}{2 \cdot \alpha_{tot} \cdot W \cdot (T_{r_0} - T_l)} \cdot [\ln(R_{i0}) - \ln(0.8)] \quad (Q \text{ in [MW]}) \quad (7)$$

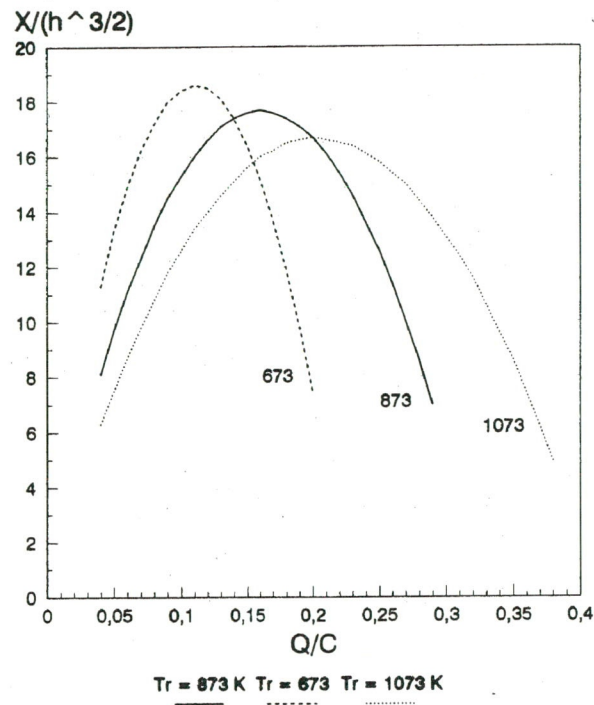
Daarbij is verondersteld dat R_i evenredig is met $(T_r - T_l)/T_l$ (zie vergelijking 1), en onder de randvoorwaarde $R_i(x) = 0.8$.

Omschrijven van vergelijking (7) geeft:

$$\frac{x}{H \cdot \sqrt{H}} = \frac{Q}{W \cdot H \cdot \sqrt{H}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \alpha_{tot} \cdot (T_{r_0} - T_l)} \cdot [\ln(R_{i0}) - \ln(0.8)] \quad (8)$$

zodat net als in Figuur 2, de schatting van de afstand (X) tot waarover stratificatie behouden blijft in Figuur 3 grafisch uitgezet kan worden tegen

$$Q/C = Q/(W \cdot H \cdot \sqrt{H}).$$



Figuur 3 De schatting van de afstand tot waarover stratificatie behouden blijft vs. Q/C . (Figuur geldt voor $\alpha = 3$).

Voorbeeld: Uitgaande van een weg- of railtunnel met een hoogte van 5 m en breedte van 9 m kan voor een brand met een vermogen variërend van 1, 3, 30 en 60 MW uit de figuren 2 en 3 de mengfactor en uiteindelijk de lengte waarover stratificatie optreedt worden bepaald in zo'n tunnel. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Tabel 3.

Tabel 3 Lengte waarover stratificatie optreedt bij tunnel met een hoogte van 5 m en breedte van 9 m bij verschillende vermogens brand.

Brandvermogen [MW]	$Q/C = Q/b \cdot h^{3/2}$	Mengfactor (F)			$X/h^{3/2}$			X		
		673K	873K	1073K	673K	873K	1073K	673K	873K	1073K
1	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-	-	-	-	-	-
3	0.03	<0.05	<0.05	<0.05	-	-	-	-	-	-
5	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	-	-	-	-	-	-
20	0.20	0.7	0.26	0.15	8	17	16.5	89	190	184
30	0.30	1	0.78	0.4	-	-	13	-	-	145
60	0.60	1	1	1	-	-	-	-	-	-
100	0.99	1	1	1	-	-	-	-	-	-

Conclusie:

Uit Tabel 3 blijkt onder meer dat het zone model beperkt toepasbaar is. Figuur 2 van het zone model geeft afhankelijk van de waarde van Q/C een waarde voor de mengfactor. Slechts voor bepaalde waarden van Q/C geeft Figuur 3 ook daadwerkelijk een waarde voor $X/h^{3/2}$, en kan er dus een lengte worden bepaald waarover stratificatie optreedt.

Opmerkingen:

1. Vanuit de *Rapportage Brandproeven van het Project 'Safety Proef' uitgevoerd door het Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Bouwdienst, Steunpunt Tunnelveiligheid, Augustus 2002* is in Bijlage IV.5 een Tabel opgenomen van videowaarnemingen ter bepaling van de afstanden waarover stratificatie optreedt. Hieruit valt te concluderen dat bij branden met een vermogen van 5 en 20 MW (proef nr. 3 en 4) er stratificatie optreedt tot afstanden van ongeveer 200 m vanaf de brandhaard. Uit Tabel 3 blijkt dat deze afstanden ook waren voorspeld met behulp van het Zone Model (ervan uitgaande dat de temperatuur van de brand tussen de 873 en 1073 K bedroeg).
2. Een beschrijving van een soortgelijk, maar uitgebreider, zone model genaamd FASIT, waarin nog een derde zogenaamde 'mixing layer' is toegevoegd is te vinden in *Predicting fire and smoke movement in tunnels using zone modelling* door S. Rylands *et al.*

3.2.2 *CFD model*

Met een Computational Fluid Dynamics (CFD) model wordt n.a.v. een bepaald brand-scenario de temperatuur van de brand en concentraties aan rook in de tunnel berekend als functie van tijd en plaats.

In het navolgende zullen de *uitgangspunten*, *werkwijze* en de *resultaten* van een CFD berekeningen aan de orde komen, zoals die staan beschreven in het rapport van de door TNO-Centrum voor brandveiligheid uitgevoerde CFD rekenstudie voor de Randstad Rail boortunnel. De CFD berekeningen zijn uitgevoerd met het door TNO ontwikkelde programma VESTA. Dit programma is onlangs nog gevalideerd voor zijn specifieke toepassing in tunnels [CETU]. Naast het programma VESTA dat door TNO is ontwikkeld bestaan er natuurlijk meerdere (vergelijkbare) CFD programma die door andere partijen zijn ontwikkeld. Deze zijn gebaseerd op soortgelijke uitgangspunten en werkwijzen, en geven 'vergelijkbare' resultaten. Een voorbeeld van zo'n programma is PHOENICS dat is ontwikkeld door Peutz en het CFD model "Fire Dynamics Simulator" dat is ontwikkeld door het Amerikaanse National Institute of Standards and Technology (te vinden op: <http://fire.nist.gov/fds/>).

Uitgangspunten:

- Het programma VESTA is gebaseerd op de eindige volume methode en kan met behulp van het $k-\epsilon$ turbulentiemodel en een verbrandingsmodel het dynamische verloop van de snelheden, temperaturen en rookconcentraties in een tunnel berekenen.
- Het programma VESTA houdt rekening met stralingswarmteoverdracht in de rook (discrete transfer model) en de warmtegeleiding in de wanden.
- De weerstand van de tunnel is benaderd met behulp van een constante wrijvingscoëfficiënt λ .
- De verbrandingsproducten zijn gerepresenteerd door één concentratie 'rook' met een constante componentsamenstelling, waaruit de verspreiding van componenten als

CO, HCl en NO_x is berekend. Op dezelfde wijze is ook de optische dichtheid van de rook bepaald.

- De naijleffecten van de luchtbeweging door het tot stilstand komen van de trein in de tunnel zijn verwaarloosd.
- De verbranding is gemodelleerd dmv. een representatieve éénstaps reactie (brandstof + zuurstof → verbrandingsproduct), met instantane verbranding van de brandstof op het vlak waar zuurstof beschikbaar is.
- De brandhaard is gemodelleerd dmv. een voorgeschreven verloop van de brandstoftoevoer binnen het brandende rijtuig.
- De warmtestraling tussen de wanden en de stralingsabsorptie en emissie van de vlammen en de rook is in detail mee berekend, alsmede de warmtegeleiding in de wanden.
- Er is gerekend over een periode van maximaal 30 minuten vanaf de aanvang van de brand.

Werkwijze:

Configuratie:

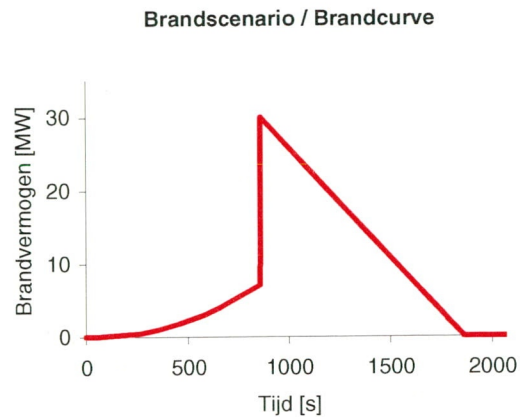
- Informatie omtrent de configuratie van de tunnel (lengte, breedte en hoogte).
- De positie van de brand (trein) in de tunnel.
- Informatie omtrent de configuratie van de trein (lengte, breedte en hoogte alsmede aantal rijtuigen, aantal ramen en deuren per rijtuig).
- Er zal bij de berekening gebruik worden gemaakt van zoveel mogelijk symmetrie in de tunnel en de trein om de hoeveelheid rekenwerk te beperken.

Materiaaleigenschappen:

- De tunnel is geïsoleerd, en de wanden hebben (Eurocode 4) een warmtegeleidingscoëfficiënt: $\lambda = 2 \text{ W/mK}$ en warmtecapaciteit: $\rho C_p = 2,6 \text{ MJ/m}^3\text{K}$. De tunnelweerstandsfactor is 0,025 en de emissiecoëfficiënt van het beton is gesteld op 0,9.
- De trein is verondersteld geen warmtetransmissie of opname te hebben via de wanden, vloer en het plafond van de trein. De emissiecoëfficiënt van de oppervlakken is gelijk 1.
- De stralingseigenschappen van de rook zijn berekend met het Weighted Sum of Grey gases model. De optische rookdichtheid is berekend op basis van een rookpotentieel van 250 m²/kg verbrande brandstof en de aanname dat 4,7 kg brandstof met 3,3 kg zuurstof reageert tot 8 kg verbrandingsproducten. Dit impliceert een rookpotentieel van 147 m²/kg verbrandingsproducten. Hierbij is een verbrandingswaarde van 17 MJ/kg brandstof aangenomen, dat wil zeggen 9,96 MJ/kg verbrandingsproduct (deze waarden zijn gebaseerd op brandstof bestaande uit hardboard en kunststoffen).

Randvoorwaarden:

- Ventilatie kan worden opgelegd door drukverschil tussen de beide tunnelopeningen, hierbij ontstaat ventilatie door de wind van buiten of asymmetrische afzuiging.
- De temperatuur bij aanvang van de CFD simulatie kan worden ingesteld.
- De brandstoftoevoer is dusdanig over de gehele vloer van het treinstel waarin de brand plaatsvindt (midden- of staartbrand) dat dit overeenkomt met het specifieke verloop van het brandvermogen (brandcurve).
- De brandscenario's (ook wel brandcurves genaamd) beschrijven het vermogen zoals dat door de brand wordt afgegeven in de tijd. (brandvermogen [MW] vs. tijd [s]).



Figuur 4 Voorbeeld van een brandcurve die het vermogen van de brand in de loop van de tijd beschrijft.

Numeriek model [TNO-CvB, 2001-CVB-R04697, Delft december 2001]:

- De VESTA berekeningen zijn uitgevoerd met (impliciete) tijdstappen van 6 sec. op een rekenrooster van 126x26x17 cellen (halve tunnel) of 65x26x17 cellen (kwart tunnel).
- Het VESTA programma gebruikt een hybride differentieschema, de SIMPLER drukcorrectiemethode en een lijn TDMA solver.
- Het VESTA programma modelleert turbulentie conform het standaard k- ϵ turbulentiemodel met een wandfunctie voor ruwe wanden.

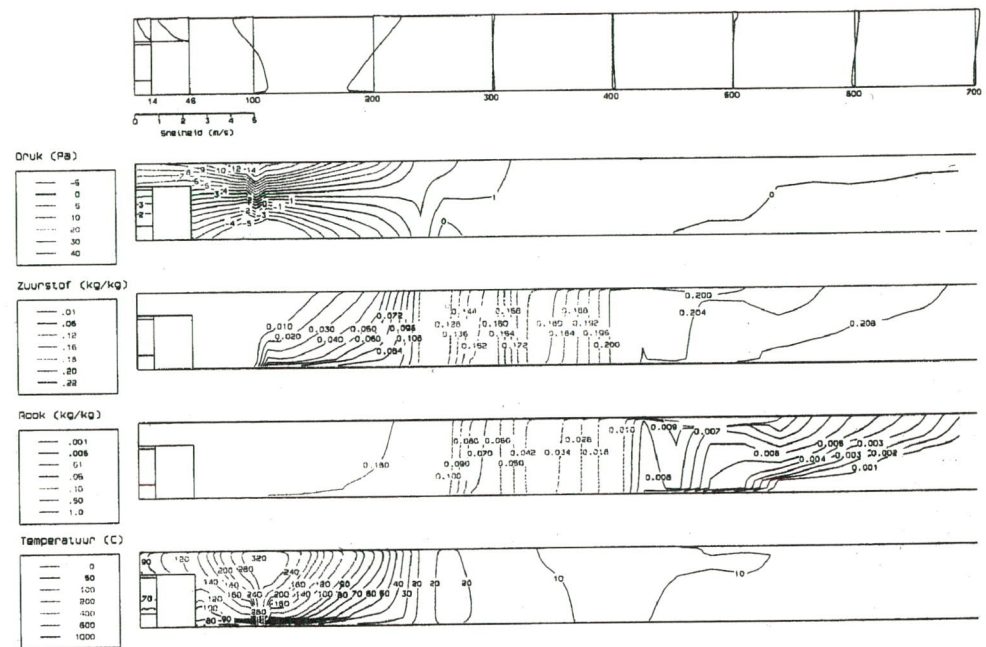
Met behulp van bovenstaande kan dus een CFD berekening voor verschillende cases worden uitgevoerd. Een case kenmerkt zich door de volgende parameters:

- de positie van de brand in de trein: in het midden of aan de staart;
- het brandscenario: keuze uit verschillende vermogenscurves;
- de ventilatie in de tunnel: wel of geen opgelegde ventilatie.

Resultaten:

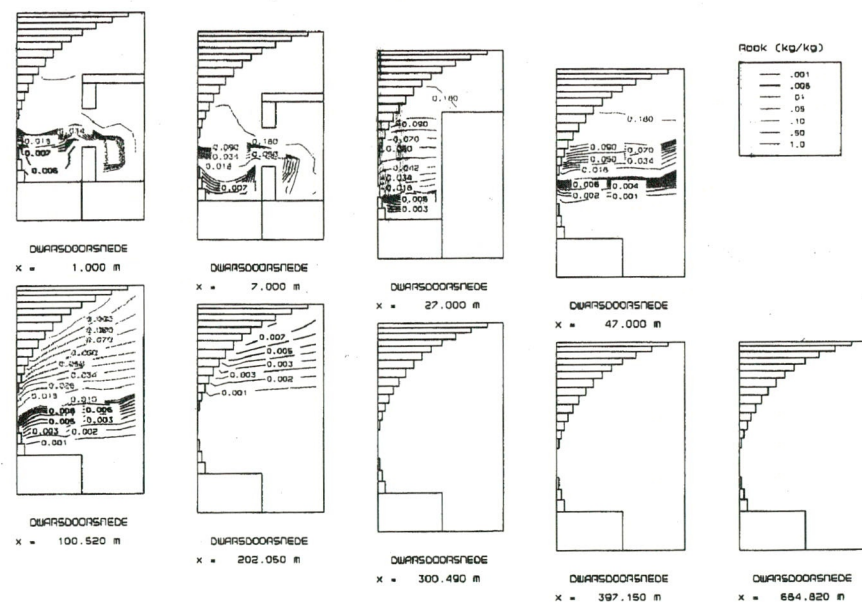
De resultaten van zo'n case kunnen grafisch worden gerepresenteerd als verticale langsdoorsneden in het midden van de tunnel en ook de nodige representatieve verticale dwarsdoorsneden van de tunnel.

Voor de langsdoorsnede kan per tijdstip het snelheidsprofiel in de lengterichting, de drukverdeling, de massafractie zuurstof, de massafractie rook en de temperatuurverdeling worden getoond.



Figuur 5 Voorbeeld van de resultaten van een langsdoorsnede voor een bepaalde case.

Voor de dwarsdoorsnede kunnen per tijdstip de snelheidsvectoren in de dwarsdoorsnede, de massafractie zuurstof, de massafractie rook en de temperatuursverdeling worden getoond.



Figuur 6 Voorbeeld van de resultaten van een dwarsdoorsnede en de massafractie rook voor een bepaalde case.

3.2.3 Schademodellen

Vervolgens is men in staat om het aantal slachtoffers ten gevolge van een brand te berekenen in de tunnel door vervolgens drie (sub)modellen met elkaar te combineren:

- het vluchtmodel bepaalt de blootstellingsduur aan rook en warmte;
- het letaliteitsmodel ten gevolge van blootstelling aan warmte;
- het letaliteitsmodel ten gevolge van blootstelling aan toxiciteit.

3.3 Verdamping

Bij de verdamping van toxische of brandbare vloeistoffen vanuit een plas is in het algemene geval de afname van de vloeistof massa (Q) in een verdampende plas afhankelijk van de (lokale) verdampingsflux (q_v'') en het (tijdsafhankelijke) oppervlak van de plas ($A(t)$), weergegeven als:

$$dQ/dt = q_v'' \cdot A(t) \quad (9)$$

De lokale verdampingsflux is een functie van de massa transport coëfficiënt (k_m) en de atmosferische concentratie (c_i) vlak boven de plas:

$$q_v'' = k_m \cdot c_i \quad (10)$$

De massa transport coëfficiënt (k_m) is afhankelijk van de windsnelheid (u_w) boven de plas:

$$k_m \approx u_w \quad (11)$$

De atmosferische concentratie (c_i) is afhankelijk van de (verzadigings) dampspanning (P_v°), en dus de temperatuur (T), boven de plas:

$$c_i \approx P_v^\circ(T) \quad (12)$$

Dit betekent dat de cruciale factoren die de verdampingsflux (bronsterkte) van een verdampende plas bepalen de volgende zijn:

- 1 oppervlakte van de plas
- 2 massa transport coëfficiënt (windsnelheid/ventilatiesnelheid in de tunnel)
- 3 temperatuur van en boven de plas

3.3.1 Oppervlakte van de plas

Bij het uitstromen van een vloeistof zal een zich op de ondergrond (in de tijd) spreiden de plas vormen, die tegelijkertijd staat te verdampen. Het spreiden van de plas zal voortduren tot het punt waarop de spreidings- en verdampingssnelheid met elkaar in evenwicht zijn, vanaf dat moment zal het oppervlak van de plas nagenoeg constant blijven. De simpelste benadering voor een zich spreidende plas in de tijd wordt gegeven door de volgende relatie ($r(t)$ = straal v/d plas):

$$r(t) = C_s \cdot t^{E_s} \quad (13)$$

waarin C_s en E_s constanten zijn afhankelijk van de vloeistof, oppervlak waarop spreiding plaatsvindt en het type uitstroom: continue of instantaan.

Een betere (meer wetenschappelijke) beschrijven van een zich spreidende plas wordt gegeven door het oplossen van de 'shallow layer equations' als volgt:

[behoud van momentum]: $\partial u / \partial t + u \cdot \partial u / \partial r = -g \cdot \partial h / \partial r$

[behoud van massa]: $\partial h / \partial t + u \cdot \partial h / \partial r + (h/r) \cdot \partial(r \cdot u) / \partial r = 0$

waarin:

u	= radiale snelheid van de plas	[m/s]
r	= straal van de plas	[m]
h	= dikte van de plas	[m]
g	= gravitatie snelheid	[m/s ²]

De oplossing van de 'shallow layer equations' laten drie fasen in de spreiding van de plas zien, die elk zijn te fitten als $r(t) \approx C_x \cdot t^2$, te weten:

1 'gravity-inertia' fase $r(t) \approx \sqrt{(C_0 + C_1 \cdot t^2)}$

2 'gravity-turbulent' fase $r(t) \approx C_2 \cdot t^{2/7}$

3 'gravity-viscous' fase $r(t) \approx C_3 \cdot t^{1/8}$

3.3.2 Massa transport coëfficiënt

Door de wind wordt er damp boven het plasoppervlak verwijderd. Dit veroorzaakt een gradiënt in de dampconcentratie boven de plas, waardoor er massa transport vanuit de plas wordt geïnduceerd om het (partiele) dampdruk evenwicht in- en vlak boven de plas te herstellen. Een maat voor het massa transport vanuit de plas wordt gegeven door de 'lokale verdampingsflux' (vergelijking. (2)) als functie van de massa transport coëfficiënt (k_m) en de atmosferische concentratie (c_i) boven de plas. Er bestaan meerdere uitdrukkingen voor de massa transport coëfficiënt o.a.:

1 Raj & Morris

$$k_m = \frac{0.037 \cdot \left[\left[\rho_a \cdot u_w \cdot \frac{2r}{\eta_a} \right]^{0.8} - 15500 \right] \cdot S_c^{1/3} \cdot D_v}{l_p} \quad (14)$$

2 MacKay & Matsugu

$$k_m = 0.004786 \cdot u_w^{0.78} \cdot (2r)^{-0.11} \cdot S_c^{-0.67} \quad (15)$$

waarin:

ρ_a	= dichtheid van de lucht	[kg/m ³]
u_w	= windsnelheid	[m/s]
η_a	= dynamische viscositeit van lucht	[N.s/m ²]
S_c	= Schmidt nummer	[-]
D_v	= diffusie coëfficiënt van damp in lucht	[m ² /s]
l_p	= lengte van de plas (in windrichting)	[m]

3.3.3 *Temperatuur van en boven de plas*

Voor de verdamping van een plas is warmte nodig. Deze warmte kan onttrokken worden uit de directe omgeving van de plas en/of vanuit de plas zelf. Het verdampingsproces voldoet aan de ‘wet van behoud van energie’, die voor een plas weergegeven is in de volgende warmte balans:

$$H = H_{soil} + H_{atm} + H_{wind} + H_{sun} - H_{pool} \quad (16)$$

waarin:

H_{soil}	=	warmte opname vanuit de ondergrond (grond)	[J/(m ² .s)]
H_{atm}	=	warmte opname vanuit de atmosfeer (lucht)	[J/(m ² .s)]
H_{wind}	=	warmte opname vanuit de luchtstroom (wind)	[J/(m ² .s)]
H_{sun}	=	warmte opname vanuit zonnestraling (zon)	[J/(m ² .s)]
H_{pool}	=	warmte afgifte vanuit de plas (verdamping)	[J/(m ² .s)]

Zoals duidelijk zal zijn vanuit bovenstaande warmte vergelijking zal de temperatuur van en boven een vloeistofplas afhankelijk zijn van al de bovengenoemde warmtestromen rond een plas. Op zijn beurt zijn de grootte van de warmtestromen afhankelijk van de atmosferische omstandigheden (temperatuur lucht en ondergrond en windsnelheid) maar ook van de uitstroomcondities en eigenschappen van de vloeistof (kokend of niet-kokend).

In het geval van een weg- of railtunnel moet in de modellering van het verdampingsproces rekening gehouden worden met:

- 1 aangepaste windsnelheden
- 2 andere plasoppervlakken
- 3 ‘draining’ in putten

3.3.4 *Aangepaste windsnelheden*

In een gesloten infrastructuur zoals een weg- of railtunnel wordt de windrichting vooral bepaald door:

- de rijrichting van het verkeer (auto's / vrachtwagens) of de trein;
- de ventilatierichting van het ventilatiesysteem.

Het fysische reken model voor verdamping in weg- en spoortunnels kan dan ook hetzelfde zijn als die voor een open infrastructuur, maar er moet gerekend worden met een windsnelheid zoals die in de tunnel heerst. De invloed hiervan op de uiteindelijke verdampingsflux is via de massa transport coëfficiënt en blijkt uit de vergelijkingen (6) en (7).

3.3.5 *Andere plasoppervlakken*

In weg- en/of railtunnel wordt de grootte van het plasoppervlak met name bepaald door:

- dimensies tunnel (breedte van de tunnel / grootte van het wegoppervlak)
- ‘drainage’ in de tunnel door plaatsing van de putten in het wegdek
- ondergrond van de plas b.v. grind/stenen (rail)
- hellingspercentage van het wegdek in de tunnel

Er valt dan ook in het algemeen te verwachten dat het plasoppervlak in tunnels kleiner zal zijn dan in de open situatie als gevolg van de vloeistofopvangsystemen in tunnels. De invloed hiervan op de verdamping blijkt dan ook uit verg. (1) waarin bij risicoanaly-

ses veelal conservatief wordt gerekend met een tijdsafhankelijk plasoppervlak (A) afhankelijk van één van de bovenstaande factoren.

3.3.6 Draining

Bij het vrijkomen en verdampen van een vloeistof kan de variatie in het volume van de plas als volgt worden weergegeven:

$$dV / dt = dV_{dis} / dt - dV_{evap} / dt - dV_{drain} / dt \quad (17)$$

waarin:

V	= volume van de plas	$[m^3]$
V_{dis}	= volume vrijgekomen in de plas	$[m^3]$
V_{evap}	= volume dat verdampt is	$[m^3]$
V_{drain}	= volume dat afvloeit via drainage	$[m^3]$

Vergelijking (9) kan als volgt worden uitgeschreven:

$$dV / dt = q_{dis} / \rho_l - u_r \cdot A - q_{drain} / \rho_l \quad (18)$$

waarin:

q_{dis}	= uitstroom snelheid v/d vloeistof	$[kg/s]$
ρ_l	= dichtheid van de vloeistof	$[kg/m^3]$
u_r	= oppervlakte afname snelheid	$[m/s]$
A	= oppervlakte van de plas	$[m^2]$
q_{drain}	= drainage rate	$[kg/s]$

Zoals hiervoor uit 'Andere plasoppervlakken' al bleek wordt er veelal in tunnels niet tijdsafhankelijk gerekend voor wat betreft het plasoppervlak in tunnels (alg. voor wat betreft verdamping in tunnels). Stel nu eens dat we uitgaan van een 'instantaan' vrijkomen van een 'bepaalde hoeveelheid' gevaarlijke vloeistof, dan nog kan/moet 'draining' in rekening worden gebracht door een inschatting te maken van het percentage van de vrijgekomen hoeveelheid vloeistof dat zal worden afgevoerd via putten in het wegdek, en daardoor dus niet zal kunnen verdampen vanuit een plas. Een goede inschatting van het percentage dat door 'draining' via putten in het wegdek niet aan het verdampingsproces zal deelnemen moet worden gemaakt door rekening te houden met:

- ligging van de putten in het wegdek (om de hoeveel meter)
- (breedte)helling van het wegdek
- soort wegdek
- totale (afvoer)capaciteit van de putten

Voorbeeld:

Uitgaande van de toxische vloeistoffen acrylonitrile, CH_2CHCN en isopropylamine, $(CH_3)_2CHNH_2$ zijn bij variabele windsnelheden tussen 1 en 5 m/s en variabele plasoppervlakken 150 en 350 m^2 in de tunnel de volgende parameters bij plasverdamping vanuit een niet-kokende vloeistof, die instantaan is vrijgekomen binnen een begrensd oppervlak (bund) bepaald:

- de verdampingsflux $[kg/s]$ op tijdstip $t = 0$ sec.
- de verdampte hoeveelheid vloeistof $[kg]$ na 1800 sec. (= ½ uur)
- onder de volgende (atmosferische) omstandigheden:

- verdamping vanaf land (isolation concrete)
- (initiële) plastemperatuur = 8.85 °C
- temperatuur ondergrond = 8.85 °C
- omgevingstemperatuur = 8.85 °C
- luchtvochtigheid = 83 %

Acrylonitrile, CH_2CHCN (Plasoppervlak = 150 m²)

Windsnelheid [m/s]	Evaporation mass flow rate [kg/s] at t = 0 sec.	Evaporated mass [kg] after t = 1800 sec.
1	0.095	330
2	0.163	525
3	0.223	670
4	0.280	795
5	0.333	900

Isopropylamine, $(\text{CH}_3)_2\text{CHNH}_2$ (Plasoppervlak = 150 m²)

Windsnelheid [m/s]	Evaporation mass flow rate [kg/s] at t = 0 sec.	Evaporated mass [kg] after t = 1800 sec.
1	0.616	1615
2	1.057	2234
3	1.451	2596
4	1.816	2836
5	2.161	3007

Isopropylamine, $(\text{CH}_3)_2\text{CHNH}_2$ (Plasoppervlak = 350 m²)

Windsnelheid [m/s]	Evaporation mass flow rate [kg/s] at t = 0 sec.	Evaporated mass [kg] after t = 1800 sec.
1	1.372	2735
2	2.355	3342
3	3.229	3635
4	4.040	3821
5	4.805	3965

Conclusie:

Het effect van verschillende (aangepaste) windsnelheden in de tunnel blijkt uit zowel de bepaalde verdampingssnelheden op $t = 0$ sec. en de verdampte hoeveelheden na 1800 sec. van acrylonitrile en isopropylamine. Hoe hoger de wind/ventilatiesnelheid in de tunnel hoe hoger de verdampingssnelheden en verdampte hoeveelheid na 1800 sec. Dit geldt overigens algemeen voor niet-kokende vloeistoffen, omdat hierbij de verdampingssnelheid met name bepaald wordt door de afvoersnelheid van de damp die zich boven de plas bevindt.

Door de aanwezigheid van drainage systemen (putten) in tunnels valt te verwachten dat het plasoppervlak kleiner zal zijn dan de standaard plasgrootte die gehanteerd wordt ter bepaling van verdampingssnelheden en hoeveelheden bij plasverdamping vanuit het open veld. Het effect hiervan blijkt door de verdamping van isopropylamine te vergelijken bij verschillende plasoppervlakken, te weten 150 en 350 m².

3.4 Dispersie

3.4.1 Dispersie van een neutrale gaswolk

Het dispersie model voor een neutrale gaswolk (t.g.v. b.v. vloeistof verdamping vanuit een plas) in een weg- of railtunnel is hetzelfde als dat voor de situatie in de open lucht. Echter is het zeer gecompliceerd (dan wel onmogelijk) om atmosferische turbulentie in rekening te brengen. Vandaar dat in tunnels de volgende (vrij simpele) benadering wordt gehanteerd om de concentratie te berekenen in de gaswolk op een bepaalde (downwind) afstand van het emissiepunt (de bron) [SAVE 1995/1998]:

$$C \approx \frac{Q}{U_w \cdot B \cdot (0.1 \cdot X)} \quad [\text{kg/m}^3] \text{ voor } (0.1 \cdot X) \leq H \quad (19)$$

en

$$C \approx \frac{Q}{U_w \cdot A} \quad [\text{kg/m}^3] \text{ voor } (0.1 \cdot X) > H \quad (20)$$

waarin:

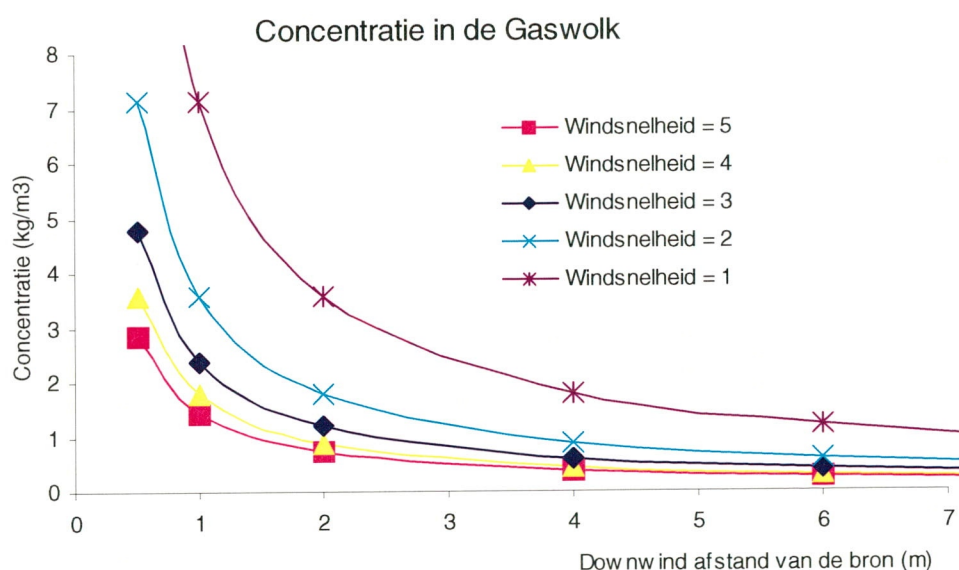
C	= concentratie in de gaswolk op afstand X	[kg/m ³]
Q	= bronsterkte	[kg/s]
U_w	= windsnelheid in de tunnelbuis	[m/s]
B	= breedte van de tunnelbuis	[m]
H	= hoogte van de tunnelbuis	[m]
X	= downwind afstand van de bron	[m]
A	= doorsnede van de tunnelbuis	[m ²]

In vergelijking (19) en (20) zijn de hoogte- en breedte beperkingen t.g.v. de tunnelconstructie verwerkt. De $0.1 \cdot X$ verdisconteert hierin de dispersie in verticale richting als functie van de afstand tot de bron.

Voorbeeld:

Uitgaande van een bronsterkte van 5 kg/s, en variabele windsnelheden van 1-5 m/s in een tunnel van 7 bij 5 m (breedte resp. hoogte), laat dit het volgende verloop zien voor de concentratie vs. downwind afstand van de bron.

Downwind distance X in (m)	0.5	1	2	4	6	8	10	20	30	40	50
Concentratie (kg/m ³) bij $u_w = 5$ m/s	2.85	1.42	0.71	0.35	0.24	0.18	0.14	0.07	0.05	0.04	0.03
Concentratie (kg/m ³) bij $u_w = 4$ m/s	3.57	1.79	0.89	0.45	0.30	0.22	0.18	0.09	0.06	0.05	0.04
Concentratie (kg/m ³) bij $u_w = 3$ m/s	4.76	2.38	1.19	0.60	0.40	0.30	0.24	0.12	0.08	0.06	0.05
Concentratie (kg/m ³) bij $u_w = 2$ m/s	7.14	3.57	1.79	0.89	0.60	0.45	0.36	0.18	0.12	0.09	0.07
Concentratie (kg/m ³) bij $u_w = 1$ m/s	14.29	7.14	3.57	1.79	1.19	0.89	0.71	0.36	0.24	0.18	0.14



Figuur 7 Grafische voorstelling van concentratie versus downwind afstand van de bron bij verschillende windsnelheden in de tunnel voor de dispersie van een neutrale gaswolk.

3.4.2 Dispersie van een zware gaswolk

Het dispersie model voor een zware gaswolk (t.g.v. b.v. de uitstroming van een tot vloeistof verdicht gas) in een weg- of railtunnel gaat uit van volledige opmenging met lucht, en er zal dus sprake zijn van 'verdringing'. Indien er sprake is van een kleine uitstroming zal zich een zware gaswolk kunnen vormen, onder de randvoorwaarde dat de wolkhoogte lager is dan de tunnelhoogte volgens een zwaargasmodel. In tunnels wordt voornamelijk de volgende vergelijking gehanteerd om de concentratie te berekenen in de gaswolk bij een bepaalde dwarsdoorsnede A (m²) van de gaswolk:

$$C \approx \frac{Q}{U_w \cdot A} [\text{kg/m}^3] \quad (21)$$

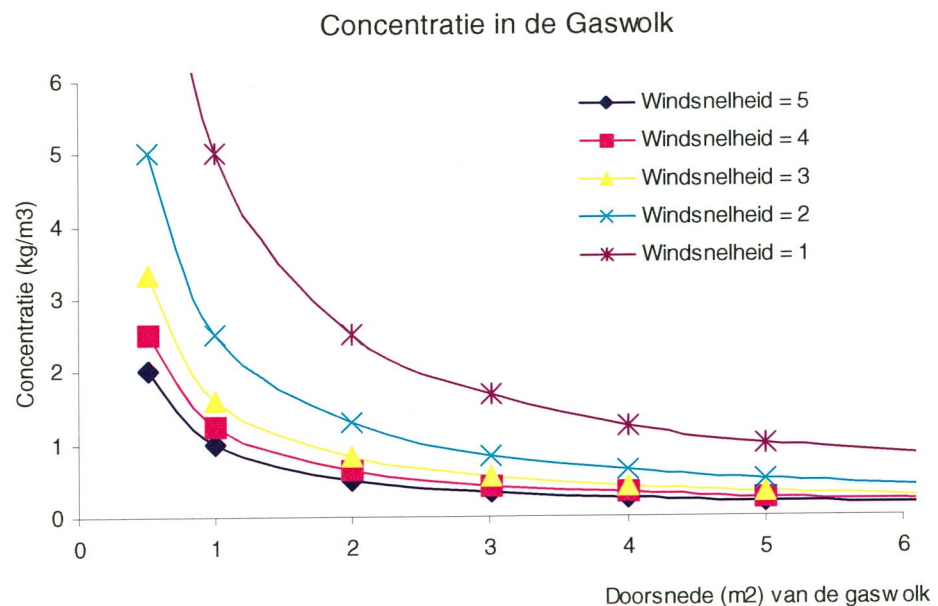
Opmerking:

In principe zou er een theoretisch zwaargas dispersie model moeten worden ontwikkeld voor tunnel waarbij de verticale dispersie gemodelleerd kan worden op dezelfde manier als in de open lucht, en waarbij de gaswolk begrensd wordt door de breedte van de tunnel.

Voorbeeld:

Uitgaande van een bronsterkte van 5 kg/s, en variabele windsnelheden van 1-5 m/s in een tunneldoorsnede van 35 m², laat dit het volgende verloop zien voor de concentratie vs. dwarsdoorsnede oppervlak van de gaswolk.

Oppervlak gaswolk (m ²)	0.5	1	2	3	4	5	8	10	20	30	35
Concentratie (kg/m ³) bij u _w = 5 m/s	2.00	1.00	0.50	0.33	0.25	0.20	0.13	0.10	0.05	0.03	0.03
Concentratie (kg/m ³) bij u _w = 4 m/s	2.50	1.25	0.62	0.42	0.32	0.25	0.16	0.13	0.06	0.04	0.04
Concentratie (kg/m ³) bij u _w = 3 m/s	3.33	1.60	0.83	0.55	0.41	0.33	0.20	0.17	0.08	0.06	0.05
Concentratie (kg/m ³) bij u _w = 2 m/s	5.00	2.50	1.30	0.83	0.63	0.50	0.31	0.25	0.13	0.08	0.07
Concentratie (kg/m ³) bij u _w = 1 m/s	10.0	5.00	2.50	1.67	1.25	1.00	0.63	0.50	0.25	0.17	0.14



Figuur 8 Grafische voorstelling van concentratie versus dwarsdoorsnede oppervlak gaswolk bij verschillende windsnelheden in de tunnel voor de dispersie van een zware gaswolk.

Uit Figuur 7 kan voor de dispersie van een neutrale gaswolk in een tunnel worden afgeleid dat er een kwadratisch verband wordt verondersteld tussen het volume van de gaswolk en de tijd. (in het voorbeeld voor een windsnelheid van 3 m/s: $V = 6.25 \cdot t^2$) tot het moment waarop $(0.1 \cdot X) > H$.

Tijd (sec)	Afstand (m)	Concentratie (kg/m ³)	Volume (m ³)
1	3	0.80	6.3
2	6	0.40	25.0
3	9	0.26	56.3
4	12	0.20	100.0
5	15	0.16	156.3
6	18	0.13	225.0

Opmerking:

Zoals gezien kan worden aan de vorm van de vergelijkingen (19), (20) en (21), vertonen deze een singulariteit indien de windsnelheid gelijk wordt gesteld aan nul meter per seconde (geen wind in de tunnel). In dit geval zal voor zowel een neutrale als zware gaswolk dispersie, deze optreden onder invloed van ‘natuurlijke’ diffusie. Deze diffusie zal plaatsvinden ten gevolge van het drukverschil dat er in de tunnel heerst ten opzichte van de uiteinden van de tunnel, of bij een brand ten gevolge van het temperatuursverschil. Het is derhalve raadzaam de vergelijkingen (19), (20) en (21) slechts te hanteren bij windsnelheden groter dan 0.5 m/s.

Conclusie:

Uit Figuur 7 & 8 kan worden gezien dat de concentratie in de gaswolk strekt afhankelijk is van de windsnelheid in de tunnel. Hoe hoger de windsnelheid hoe lager de concentratie in de gaswolk bij dezelfde downwind distance (neutrale gaswolk) of dezelfde doorsnede van de gaswolk (zware gaswolk).

3.5 Explosies

Een gasexplosie is een gecompliceerd verschijnsel waarvan de gasdynamische effecten vaak moeilijk door middel van een simpel model zijn weer te geven. Bestaande simpele modellen zijn vaak toegesneden op effecten van explosies in de vrije ruimte en niet toepasbaar op explosies in tunnels. Het effect van een gasexplosie is van geval tot geval verschillend omdat het niet bepaald wordt door de aard en de hoeveelheid van het gasmengsel zelf maar in de allereerste plaats door de geometrische randvoorwaarden aan het proces. De geometrische randvoorwaarden worden in dit geval bepaald door de tunnelbuis, de eventuele aanwezigheid van een rij voertuigen in de tunnel alsmede de opstelling, de afmetingen en de vorm van de voertuigen.

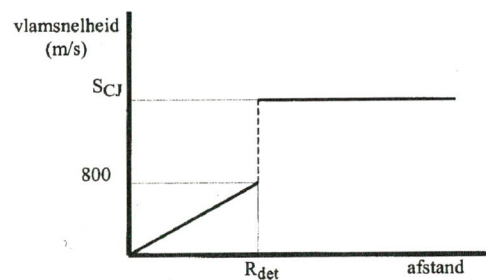
3.5.1 Gasexplosie in een verkeerstunnel

Een simpel ééndimensionaal numeriek model van een gasexplosie van een tunnel staat beschreven in “*Vuistregels voor explosiebelasting en respons van verkeerstunnels*”. De toepassing van dit ééndimensionale model van een gasexplosie in een tunnel vereist informatie met betrekking tot de ontwikkeling van het proces van vlamvoortplanting (vlamsnelheid als functie van de plaats). Relevante gegevens uit de literatuur van experimentele gegevens met betrekking tot gasexplosies in pijpen en kanalen zijn in “*Vuistregels voor explosiebelasting en respons van verkeerstunnels*” vertaald en geëxtrapo-

leerd naar een aantal scenario's van een gasexplosie in een verkeerstunnel op volle schaal.

Gezien de complexiteit van een vlamvoortplantingsproces in een pijp in werkelijkheid, is een sterke stilering van het verloop van het proces onvermijdelijk. Aangenomen wordt dat de vlamsnelheid in een pijp (zowel leeg als voorzien van obstructies) zich lineair met de afgelegde afstand ontwikkelt. Dit verloop komt overeen met een exponentiële ontwikkeling als functie van de tijd, een ontwikkeling die kenmerkend is voor gasexplosies in het algemeen. De aanname van een lineaire ontwikkeling in zowel vlamsnelheid als overdruk met de afgelegde weg maakt een simpele extrapolatie van gegevens van kleinschalige experimenten in pijpen naar een verkeerstunnel op volle schaal mogelijk.

Hoewel de deflagratie-detonatieovergang (DDT) gekenmerkt wordt door verschijnselen met een sterk probabilistisch karakter, is de aanname van een deterministisch overgangscriterium onvermijdelijk. Als overgangscriterium wordt een vlamsnelheid van 800 m/s aangenomen. Experimentele aanwijzingen laten zien dat DDT in pijpen met obstructies bij vlamsnelheden ergens tussen de 600 en 1000 m/s kan worden verwacht. Een vlamsnelheid van 800 m/s komt overeen met een overdruk van ongeveer 800 kPa. Aangenomen wordt dat op het ogenblik dat deze vlamsnelheid en dit drukniveau worden bereikt, het vlamvoortplantingsproces als detonatie verdergaat met de CJ-detonatiegolfsnelheid (S_{CJ}). Grafisch ziet deze gestileerde ontwikkeling van een gasexplosie in een tunnel er dus uit als in Figuur 9.



Figuur 9 Gestileerde ontwikkeling van een gasexplosie in een tunnel.

Dit gestileerde verloop van een gasexplosie in een pijp kan worden gekarakteriseerd met twee parameters: de detonatiegolfsnelheid (S_{CJ}) en de detonatie run-uplengte (R_{det}). De detonatie run-uplengte is de pijplengte waarover de vlamsnelheid van 800 m/s bereikt wordt en omslag in detonatie plaatsvindt. De detonatiegolfsnelheid kan worden berekend met de volgende vergelijking:

$$S_{CJ} = \sqrt{\frac{2 \cdot Q \cdot (\gamma_1^2 - 1)}{c_0^2}} \quad [\text{m/s}] \quad (22)$$

waarin:

Q = verbrandingswarmte mengsel [J/kg]

γ_1 = verhouding specifieke warmte voor verbrandingsproducten [-]

c_0 = atmosferische geluidssnelheid [m/s]

Voor een verbrandingswarmte van 2,76 MJ/kg van stoichiometrisch propaanlucht en een verhouding van de specifieke warmtes van 1,25 voor de verbrandingsproducten bedraagt deze 1762 m/s.

3.5.2 *Explosie scenario's in tunnels*

Het aantal mogelijke scenario's door variatie van parameters als tunnallengte, wolklengte, positie van de wolk in de tunnel, aard van het gasluchtmengsel, concentratieverdeling in de wolk, aanwezigheid en opstelling voertuigen en ontstekingsplaats in de wolk, is zeer groot en onmogelijk te beschouwen. Er is gekozen [TNO-PML-R2001/xxx, Rijswijk, juli 2001] voor variatie van slechts 2 parameters, namelijk

- (1) de wolklengte en
- (2) de ontstekingsplaats in de wolk.

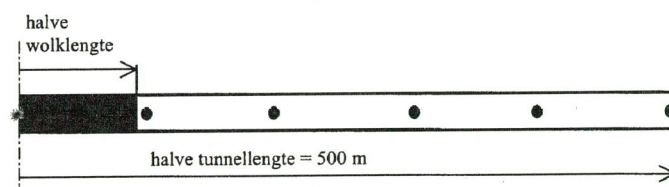
De belasting van de tunnelwand wordt op een zestal plaatsen over de tunnallengte geregistreerd. Aan de andere parameters wordt een constante waarde toegekend, namelijk:

- Een tunnallengte van 1000 m;
- Een centrale positie van de wolk in de tunnel;
- Een stoichiometrisch propaanluchtmengsel;
- Aanwezigheid van een file van voertuigen.

Ontsteking in een centrale positie binnen de wolk is een scenario dat bijvoorbeeld zou kunnen voorkomen indien een bestuurder in de file zijn voertuig, dat zich in het centrum van de wolk bevindt, opnieuw probeert te starten. Ontsteking aan de rand van de wolk zou bijvoorbeeld kunnen voorkomen wanneer de wolk, die zich verplaatst in de ventilatiestroming, in contact komt met een hete uitlaat.

3.5.2.1 *Wolk in het centrum ontstoken*

Dit scenario bestaat uit een stoichiometrische propaanlucht wolk, gepositioneerd in het midden van een tunnel van 1000 m lengte en 5 m hoogte, die centraal wordt ontstoken. Het centrum van de wolk is derhalve een symmetrievlak, zoals in Figuur 10 is geïllustreerd. Hierdoor behoeft slechts de halve tunnelbuis in de simulatie te worden meegenomen.



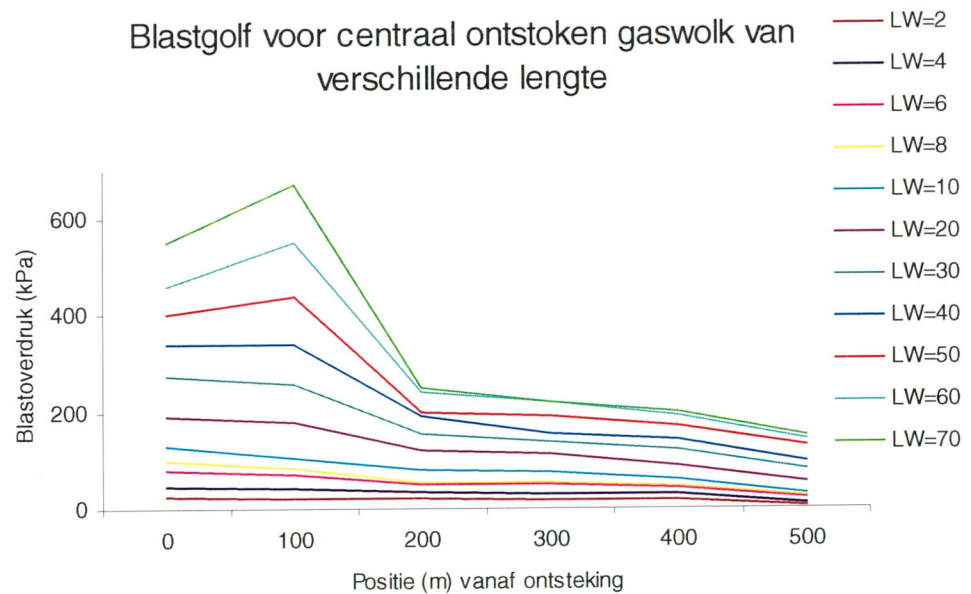
Figuur 10 Centraal ontstoken wolk gepositioneerd in het midden van de tunnel.

Op basis van experimentele gegevens is de detonatie run-uplengte in een tunnel vol met voertuigen geschat op 11 tunnelhoogtes. Binnen 55 m neemt de vlam snelheid dus toe tot 800 m/s waarna omslag in detonatie plaatsvindt. De detonatiegolf plant zich voort met een snelheid van 1762 m/s. De wolklengte is gevarieerd van 2 tot 100 m.

De resulterende blastbelasting op de tunnelwand is weergegeven in Tabel 4 en Figuur 11.

Tabel 4 Blastgolf (kPa) voor centraal ontstoken wolken van diverse lengte gepositioneerd in het midden van de tunnel, berekend in zes locaties over de halve tunnellenkte.

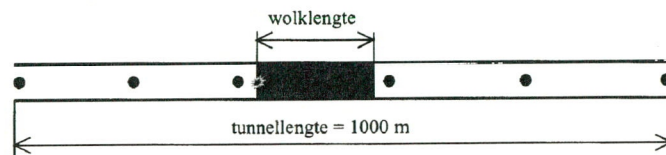
Lengte wolk (m)	Positie (m) vanaf ontsteking					
	0	100	200	300	400	500
2	25	22	20	18	17	4
4	45	40	33	30	28	10
6	80	70	50	48	42	20
8	100	83	55	55	45	25
10	130	105	80	75	60	30
20	190	180	120	110	85	55
30	275	255	155	135	120	80
40	340	340	190	155	140	95
50	400	440	200	190	170	130
60	460	550	240	220	190	140
70	550	670	250	220	200	150
100	1020	900	350	270	240	200



Figuur 11 Grafische weergave van de blastgolf voor centraal ontstoken wolken van diverse lengte gepositioneerd in het midden van de tunnel, berekend in zes locaties over de halve tunnellenkte (LW = Lengte Wolk [m]).

3.5.2.2 Wolk aan de rand ontstoken

Dit scenario bestaat uit een stoichiometrische propaanlucht wolk, gepositioneerd in het midden van een tunnel van 1000 m lengte, die aan de rand wordt ontstoken. Deze situatie is in Figuur 12 geïllustreerd.



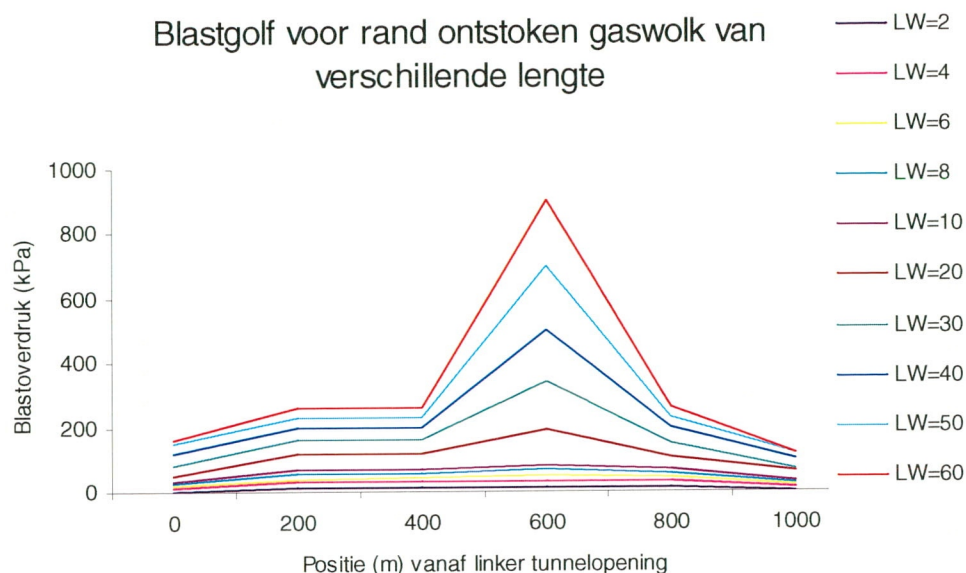
Figuur 12 Rand ontstoken wolk gepositioneerd in het midden van de tunnel.

Op basis van experimentele gegevens voor een rand ontstoken wolk de detonatie run-uplengte in een tunnel met voertuigen geschat op 22 tunnelhoogtes. Binnen 110 m neemt de vlamsnelheid dus toe tot 800 m/s waarna omslag in detonatie plaatsvindt. De detonatiegolf plant zich voort met een snelheid van 1762 m/s. De wolklengte is gevarieerd van 2 tot 100 m.

De resulterende blastbelasting op de tunnelwand is weergegeven in Tabel 5 en Figuur 13.

Tabel 5 Blastgolf voor rand ontstoken wolken van diverse lengte gepositioneerd in het midden van de tunnel, berekend in zes locaties over de halve tunnellengte.

	Positie (m) vanaf linker tunnelopening					
Lengte wolk (m)	0	200	400	600	800	1000
2	3	11	12	13	12	3
4	11	28	28	32	32	12
6	20	40	41	47	45	21
8	25	55	55	65	55	25
10	32	66	66	83	66	30
20	50	120	120	190	105	60
30	80	160	160	340	150	70
40	120	200	200	500	200	100
50	150	230	230	700	230	120
60	160	260	260	900	260	120
70	170	300	300	1350	300	170
100	250	360	370	2200	350	250



Figuur 13 Grafische weergaven van de blastgolf voor rand ontstoken wolken van diverse lengte gepositioneerd in het midden van de tunnel, berekend in zes locaties over de halve tunnellengete.

In de berekeningsresultaten voor centraal ontstoken wolken zijn in de Tabel 4 ruwweg de volgende trends te signaleren:

- De overdruk van de blastbelasting op de tunnelwand nemen min of meer evenredig toe met de wolklengthe;
- De overdruk van de blastbelasting op de tunnelwand zijn maximaal in het ontstekingspunt en nemen over de tunnellengete geleidelijk af. Hoe hoger de blastoverdruk hoe sterker de afname;
- De overdruk van de blastbelasting op de tunnelwand zijn in de buurt van de tunnelopening aanzienlijk lager dan in de rest van de tunnel.

In de berekeningsresultaten voor rand ontstoken wolken zijn in Tabel 5 de volgende ruwe trends te signaleren:

- De overdruk van de blastbelasting op de tunnelwand zijn min of meer evenredig met wolklengthe;
- De hoogste blastoverdruk wordt gevonden ter plaatse waar de hoogste vlamsnelheid wordt bereikt (Op 600 m vanaf de linkertunnelopening).

Voorbeeld:

Blastbelasting van een gasexplosie van 100 kg LPG

100 kg is een typische inhoud van een LPG-tank van een bus van het openbaar vervoer. De effecten van een gasexplosie van 100 kg LPG zijn als volgt te berekenen. Allereerst moet de lengte van een stoichiometrisch gemengde wolk van 100 kg propaan worden berekend. Een stoichiometrisch propaanlucht mengsel bevat 4% (vol) propaan. Het molecuulgewicht van een stoichiometrisch mengsel ($M_{\text{propaan}} = 44$ en $M_{\text{lucht}} = 29$) is daarom $M_{\text{mengsel}} = 0,04 \cdot 44 + 0,96 \cdot 29 = 29,6$. De dichtheid van het mengsel bij een omgevingsdruk van 101.325 kPa en een omgevingstemperatuur van 288 K.

$$\rho_{\text{mengsel}} = \frac{P \cdot M_{\text{mengsel}}}{R \cdot T} = \frac{101325 \cdot 29,6}{8314 \cdot 288} = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

Massafractie propaan in een 4% (vol) mengsel $(0.04 \cdot 44) / (0.04 \cdot 44 + 0.96 \cdot 29) = 0.0594$
 De massa van een stoichiometrische wolk die 100 kg propaan bevat is $100 / 0.0594 = 1684$ kg. Volume stoichiometrische wolk van 1684 kg een dichtheid van 1.25 kg/m^3 is $1684 / 1.25 = 1350 \text{ m}^3$. De lengte wolk in een lege tunnel van $9 \cdot 5 \text{ m}^2$ doorsnede = 30 m. De lengte wolk in een tunnel met voertuigen met daarin voertuigen ≈ 40 m. Blastbelasting bij een centraal ontstoken wolk van 40 m lengte uit Tabel 4. Ter plaatse van ontstekingspunt: $P = 340 \text{ kPa}$, 100 m van de tunnelopening: $P = 140 \text{ kPa}$. Blastbelasting bij een randontstoken wolk van 40 m lengte uit Tabel 5. Ter plaatse van de gasexplosie: $P = 500 \text{ kPa}$, 200 m van de tunnelopening: $P = 200 \text{ kPa}$

Effecten van een gasexplosie van 25 kg LPG

25 kg is een typische inhoud van een LPG-tank van een personenauto. De effecten van een gasexplosie van 25 kg LPG zijn als volgt te berekenen. Lengte van de wolk in de tunnel (conform het vorige) = 10 m Blastbelasting bij een centraal ontstoken wolk van 10 m lengte uit Tabel 4. Ter plaatse van ontstekingspunt: $P = 130 \text{ kPa}$, 100 m van de tunnelopening: $P = 60 \text{ kPa}$. Blastbelasting bij een randontstoken wolk van 10 m lengte uit Tabel 5. Ter plaatse van de gasexplosie: $P = 83 \text{ kPa}$, 200 m van de tunnelopening: $P = 66 \text{ kPa}$.

Effecten van een gaswolkexplosies bij een continue uitstroming

De effecten van een gaswolkexplosie kunnen worden bepaald door allereerst te kijken naar de continue uitstroming van propaan uit een gat met diameter 76.2 mm (zoals voorgeschreven voor weg- en railtransport in het Paarse Boek [Purple Book (1999)]) in een horizontaal geplaatste cilinder gevuld met propaan met een volume van 100 m^3 , die voor 80% is gevuld bij een druk van 6.2 Bar en een temperatuur van 8.85°C (discharge coëfficiënt 0.62). Zo'n uitstroming heeft in de eerste 100 sec van uitstroming een gemiddeld uitstroomdebiet van 60 kg/s. De Lower Explosion Limit (LEL) waarde van propaan bedraagt 1.7 % (vol). Het molecuulgewicht van dit mengsel bedraagt: 29.74, en de dichtheid bij een omgevingsdruk van 1 Bar en temperatuur van 288 K bedraagt 1.26 kg/m^3 . De massafractie aan propaan bedraagt in zo'n 1.7% (vol) mengsel: 0.0251. Aangezien het uitstroomdebiet bij zo'n hoge druk plaatsvindt is in onderstaande tabel het effect weergegeven van ontsteking binnen de eerste seconde van uitstroming en de blastbelasting bij zowel een centraal als een aan de rand ontstoken gaswolk.

					Blastbelasting (kPa)	
Tijd (sec)	Propaan (kg)	Massa Gaswolk (kg)	Volume Gaswolk (m^3)	Lengte Gaswolk* (m)	Centraal Ontstoken**	Rand Ontstoken**
0.1	6	238.6	189.6	4.2	~ 45	~ 32
0.2	12	477.2	379.1	8.4	~ 100	~ 65
0.4	24	954.3	758.2	16.8	~ 150	~ 130
0.8	48	1908.6	1516.4	33.7	~ 300	~ 350
1.0	60	2385.8	1895.5	42.1	~ 350	~ 520

* Doorsnede van de tunnel is 45 m^2 (breedte: 9m en hoogte: 5m)

** Blastbelasting ter plaatse.

Conclusie:

Zoals gezien kan worden in bovenstaande tabel waarin de blastoverdrukeffecten zijn weergegeven, voor zowel centraal als aan de rand ontstoken gaswolken van propaan bij een continue uitstroming (60 kg/s) vanuit een vat met een gat met een diameter van 76.2 mm en een druk van 6,2 Bar, is dat binnen die 1^{ste} seconde van uitstroming de blastoverdrukeffecten gelijk zijn geworden aan die van een gaswolkexplosie van 100 kg LPG (zie eerder).

3.6 BLEVE

Een BLEVE is de afkorting voor ‘Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion’, wat het resultaat is van een plotseling falen, of falen t.g.v. blootstelling aan brand, van een opslagtank met daarin een (brandbare) gevaarlijke stof opgeslagen onder druk. De gevaarlijke stof is daardoor in vloeibare vorm op een temperatuur boven het kookpunt van deze gevaarlijke stof onder normale atmosferische omstandigheden.

Kenmerken bij een BLEVE van een opslagtank met daarin een (brandbare) vloeistof onder druk zijn:

- de opslagtank faalt,
- een flash-off van de damp van de oververhitte vloeistof, en
- (indien vloeistof brandbaar) een ‘fire ball’ (bij directe ontsteking).

En een BLEVE resulteert dus in de volgende effecten:

- drukgolf (piekoverdruk)
- rondvliegende fragmenten van de opslagtank
- een ‘fire ball’ (vuurbal), bij brandbare gasen die direct worden ontstoken

3.6.1 Druk golf

De drukgolf ten gevolge van een BLEVE wordt veroorzaakt door:

- de expansie van de damp door het falen van de opslagtank
- de flash-off van de vloeistof, en
- de verbranding van de damp (indien brandbaar)

Voor de berekening van de drukgolf t.g.v. een BLEVE kunnen verschillende methoden worden gebruikt:

1 TNT-equivalent methode

Hierin wordt de vrijkomende energie bij de explosie berekend via een conversie naar een TNT equivalente hoeveelheid volgens:

$$Q_{TNT} = \alpha_e \cdot \frac{Q_f \cdot E_{m,f}}{E_{m,TNT}} = \alpha_m \cdot Q_f \quad (23)$$

waarin:

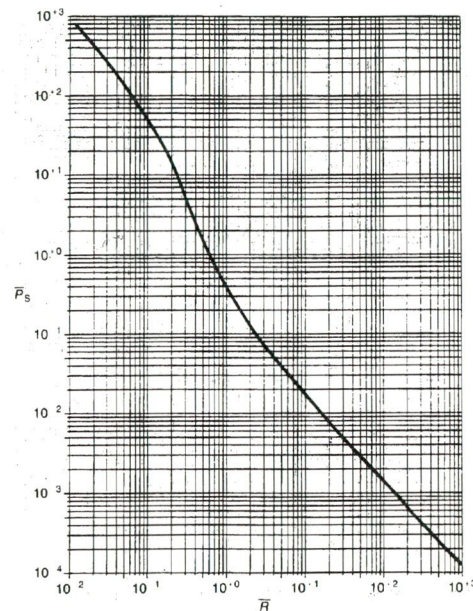
Q_{TNT}	=	Equivalente massa van TNT	[kg]
Q_f	=	Massa van de betreffende brandbare vloeistof	[kg]
$E_{m,f}$	=	Verbrandingsenergie van de brandbare vloeistof	[J/kg]
$E_{m,TNT}$	=	Verbrandingsenergie van TNT	[J/kg]
α_e	=	TNT-equivalent gebaseerd op energie	[-]
α_m	=	TNT-equivalent gebaseerd op massa	[-]

1 Baker's methode

De vrijkomende energie bij de explosie wordt berekend volgens de Brode vergelijking:

$$E_{Brode} = E_{expl.} = \frac{(P_{init} - P_{atm.}) \cdot V}{\gamma - 1} \quad (24)$$

met (V) het volume dat het gas inneemt, en (γ) de ratio van de specific heats van het gas. Vervolgens kan de daadwerkelijke piekoverdruk (p_s) op een bepaalde afstand (r) van de opslagtank worden berekend via de geschaalde afstand ($\bar{R}$) en piekoverdruk ($\bar{P}_s$) met behulp van $\bar{R} = r \left(\frac{P_{atm.}}{E_{expl.}} \right)^{1/3}$, $\bar{P}_s = \frac{p_s}{P_{atm.}} - 1$ en Figuur 14.



Figuur 14 Geschaalde piekoverdruk vs. afstand voor een pentolite explosie (W.E. Baker, 1975).

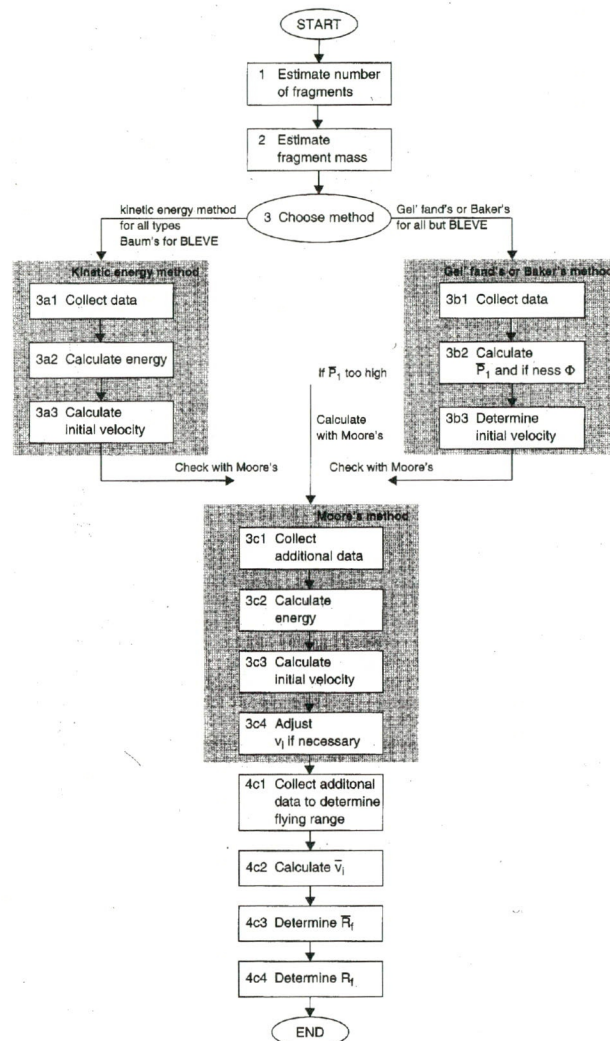
Het bepalen van de piekoverdruk in een weg- of spoortunnel is van belang omdat mogelijk een deel van de tunnel (gesloten infrastructuur) kan bezwijken t.g.v. de overdrukeffecten bij een BLEVE. Bovenstaande twee modellen ter bepaling van de piekoverdruk effecten zijn opgesteld en gevalideerd naar aanleiding van experimentele bevindingen in een open infrastructuur (maaiveld), dit is dus niet erg conservatief voor tunnels en te verwachten valt dat er in een tunnel t.g.v. de gesloten constructie hogere waarden voor de piekoverdruk zullen optreden.

3.6.2 Rondvliegende fragmenten

Het risico dat wordt veroorzaakt door de rondvliegende fragmenten van de opslagtank bij een BLEVE zijn gerelateerd aan het aantal fragmenten waarin de opslagtank breekt en de snelheid (afhankelijk van de massa) en richting waarmee de fragmenten door de

lucht vliegen en mogelijk schade veroorzaken. In Figuur 15 is het algemene flowschema gegeven voor fragmentatie effecten van verschillende typen van explosies, namelijk:

- Exploderende drukvaten (zonder reactieve inhoud)
- Runaway reacties
- BLEVE's
- Ontleding van energetische materialen
- Interne explosies



Figuur 15 Flowschema voor fragmentatie effecten van verschillende typen van explosies.

Voor een BLEVE wordt de snelheid van de fragmenten berekent met betrekking tot Baum's empirische relatie volgens:

$$v_i = \sqrt{\frac{2 \cdot A_{ke} \cdot E_{av}}{M_v}} \quad (25)$$

waarin:

v_i = (initiële) snelheid van het fragment [m/s]

- A_{ke} = fractie van de vrijgekomen energie (E_{av}) dat
 wordt omgezet in kinetische energie [-]
 E_{av} = vrijgekomen energie (E_{av}) tijdens explosie [J]
 M_v = totale massa van het lege opslagtank [kg]

Afhankelijk van de snelheid van de fragmenten is de maximale afstand die de fragmenten af kunnen leggen te berekenen. Voor de relevantie voor het berekenen van deze werpafstanden voor rondvliegende fragmenten van de opslagtank bij een BLEVE in een gesloten infrastructuur (weg- of railtunnels) valt te verwachten dat het risico dat gepaard gaat met piekoverdrukeffecten en warmtestraling effecten orden van grootte hoger zullen zijn en dus de risico's ten gevolge van de rondvliegende fragmenten hierbij in het niets zullen vallen.

3.6.3 Fire ball

De berekening van de warmtestraling van een 'fire ball' ten gevolge van een 'BLEVE' worden in het TNO-model de volgende elf (11) berekeningsstappen gedaan in het fysische reken model voor een open infrastructuur:

1. de hoeveelheid gevaarlijke stof betrokken bij de BLEVE

$$m = f \cdot V \cdot \rho \quad (26)$$

is gelijk aan: de fractie van vulling van de opslagtank * volume van de opslagtank * dichtheid van vloeistof in de opslagtank.

2. de straal van de 'fire ball' is gelijk aan: $r = 3.24 \cdot m^{0.325}$
3. de duur van de 'fire ball' is gelijk aan: $t = 0.852 \cdot m^{0.26}$
4. de 'lift-off' van de 'fire ball': $H_{bleve} = 2 \cdot r$
5. de afstand van het oppervlak van de 'fire ball' tot het object: x
6. de view factor: F_{view} is een functie van x dwz. $F_{view} = f(x)$
7. de fractie van de warmte die door de 'fire ball' wordt uitgestraald: F_s
8. de beschikbare warmte voor verbranding: ΔH
9. de SEP ('Surface Emissive Power') is gelijk aan: $SEP = \frac{\Delta H \cdot m \cdot F_s}{4\pi \cdot r^2 \cdot t} \quad (27)$
10. de 'transmissiviteit': τ_a is ook een functie van x dwz. $\tau_a = f(x)$
11. de warmtestraling op de plaats van het object kan dan als volgt berekend worden:

$$q'' = SEP \cdot F_{view} \cdot \tau_a \quad (28)$$

Tot op heden werden de warmtestralingseffecten t.g.v. een BLEVE in een weg- of railtunnel niet meegenomen in risicoanalyses vanwege:

- 1 overtuiging dat piekoverdruk- en fragment effecten belangrijker zijn.
- 2 overtuiging van de ontoepasbaarheid van het bestaande fysische effect model voor de open infrastructuur.

De mogelijke toepasbaarheid voor weg- en railtunnels van het bestaande fysische effect model voor een BLEVE in een open infrastructuur (op maaiveld) kan op verschillende wijzen (stapsgewijs) aannemelijk worden gemaakt:

- modelaanpassingen in het huidige model,
- stoichiometrische overwegingen en

– fysische overwegingen.

Modelaanpassingen in het huidige model

Met behulp van de berekende straal van de vuurbal in stap 2 kan via $V_{bol} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$,

het volume van de vuurbal worden berekend.

Voorbeeld:

Uitgaande van een tankauto met een inhoud van 20.000 (25.000) kg propaan (opslag-tank: 15 °C, 10 Bar) geeft dit een straal van de vuurbal van 81 (87) m, en dus een volume van 2.226.094 (2.758.330) m³. Zo'n volume van de vuurbal zou een tunnel met een breedte en hoogte van resp. 7 en 5 m kunnen vullen over een afstand van 63 (78) km. Hierbij moet de opmerking worden gemaakt dat er dan stilzwijgend vanuit is gegaan dat:

- 1 voldoende zuurstof in de tunnel aanwezig is en er dus totale verbranding van de hoeveelheid propaan kan optreden, en
- 2 de aanvoer van de (voldoende) zuurstof geen probleem vormt.

Stoichiometrische overwegingen

Op basis van reactievergelijking voor de verbranding van propaan:



volgt dat de propaan:zuurstof verhouding 1:5 is (in molverhouding) voor de volledige verbranding van alle propaan.

Voorbeeld:

Uitgaande nog steeds van de tankauto met een inhoud van 20.000 (25.000) kg (= 453 (567) kmol) aan propaan, en de wetenschap dat lucht voor 20% vol. uit zuurstof bestaat, levert dit de volgende hoeveelheden aan lucht die voldoende zuurstof bevatten voor de volledige verbranding van alle propaan in de tankauto: 302.000 (377.963) m³. Zo'n benodigde hoeveelheid volume aan lucht zou betekenen (voor een tunnel met een breedte en hoogte van resp. 7 en 5 m) dat de lengte van de tunnel 8.6 (10.7) km moet zijn. Hierbij moet dan nog steeds worden opgemerkt dat er vanuit is gegaan dat de aanvoer van voldoende zuurstof voor volledige verbranding geen probleem vormt.

Fysische overwegingen

Puur op grond van fysische overweging mag verondersteld worden dat de aanvoer van voldoende zuurstof een beperkende factor zal zijn, aangezien de aanvoer hiervan alleen kan plaatsvinden op de grensvlakken van de zich door de tunnel expanderende 'fire ball'.

Voorbeeld:

In de tunnel met een breedte en hoogte van resp. 7 en 5 m is de grootte van het grensvlak 35 m², ervan uitgaande dat de tunnel verder volledig gevuld zal zijn met vuur. De aanvoer van zuurstof kan dus nooit voldoende zijn op grond van:

- de zich voortbewegende 'expanderende' fire ball naar de uiteinden van de tunnel toe, en
- de vorming en de afvoer van de verbrandingsproducten op de grensvlakken.

Voorts kan op fysische gronden de ondergrens van opvulling van de tunnelbuis worden bepaald ten gevolge van het volume dat door de propaan gaswolk zal worden ingeno-

men bij instantaan vrijkomen van het vloeibare propaan en de expansie t.g.v. drukverlies van 10 Bar naar atmosferische druk (1 Bar). Dit onder de aanname dat het vrijkomen instantaan plaatsvindt bij constante temperatuur namelijk de kooktemperatuur van propaan $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$ (flashen). De tankauto met een inhoud van 20.000 kg propaan (bij een temperatuur van $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ en druk van 10 Bar) komt overeen met een volume van 39.5 m^3 aangezien die dichtheid van het vloeibare propaan bij die temperatuur 506.6 kg/m^3 bedraagt. Ten gevolge van het instantaan vrijkomen van het vloeibare propaan zal het flashen (op zijn kooktemperatuur) en worden omgezet in de gasvorm t.g.v. het drukverlies van 10 naar 1 Bar. De dichtheid van het gasvormige propaan bij kooktemperatuur bedraagt $2,295\text{ kg/m}^3$, hetgeen overeenkomt met een volume van $20.000/2,295 = 8715\text{ m}^3$. Een tunnel met een breedte en hoogte van resp. 7 en 5 m zal dus over een lengte van 249 m volledig gevuld zijn met propaan gas indien het niet van te voren is ontstoken (wat overigens zeer waarschijnlijk is). De expansie in volume bij de overgang van de vloeibare propaan naar de gasvormige fase bedraagt dus een toename van 220 maal.

Algemeen, mede gezien bovenstaande overwegingen, kan thans als vuistregel worden aangenomen dat t.g.v. een (ontstoken) BLEVE in een weg- en/of railtunnel de overlijdingskans één is voor personen in de tunnelbuis (intern risico) t.g.v. de ‘vuurzee’ en gezien de lengte van de weg- en/of railtunnels in Nederland. Tevens is ook de overlijdingskans één voor personen in de tunnelbuis indien de gaswolk niet wordt ontstoken, vanwege het feit dat alle zuurstof in de tunnel is verdrongen door de gaswolk. Het externe risico t.g.v. een BLEVE is afhankelijk van het mogelijk (gedeeltelijk) bezwijken van de tunnelconstructie. Indien de tunnelconstructie niet bezwijkt t.g.v. drukeffecten wordt het externe risico met name bepaald door de ‘fire ball’ aan de uiteinden van de tunnel.

3.7 Warmtestraling

Mogelijke warmtestralingseffecten ten gevolge van brand in een tunnel kunnen voorkomen bij zowel het vrijkomen van een brandbaar gas als ook bij het vrijkomen van een brandbare vloeistof.

Bij het continue vrijkomen van een brandbaar gas zal dit bij directe ontsteking een fakkel opleveren. Bij vertraagde ontsteking van het vrijgekomen brandbare gas geeft dat een mogelijke gaswolkontbranding/explosie. Indien er sprake is van instantaan vrijkomen van (een tot vloeistof verdicht) brandbaar gas zal dit (indien ontstoken) een BLEVE opleveren.

Bij het instantane of continue vrijkomen van een brandbare vloeistof vormt zich een plas in de tunnel die, indien de plas wordt ontstoken, een plasbrand oplevert. Als de plas niet direct wordt ontstoken zal de plas verdampen, en bij vertraagde ontsteking van de ontwikkelde damp een mogelijke gaswolkontbranding/explosie opleveren.

3.7.1 *Fakkel*

Een van de meest gebruikte modellen ter bepaling van de warmtestralingniveaus rond een fakkel is die zoals beschreven door Chamberlain in referentie [Chamberlain, G.A., (1987)] genaamd, het Thornton model.

Algemene beschrijving van het model:

De belangrijkste parameters voor de warmtestraling van en rond zo'n fakkel die een bijdrage geven aan de warmtestralingniveaus op een bepaalde positie rond de fakkel waar zich een object of persoon bevindt zijn:

- De 'surface emissive power' (SEP), de warmte uitgestraald door het oppervlak van de fakkel, waarbij de mogelijke roetvorming is meegenomen.
- De 'view factor' (F_{view}) van de fakkel door de observator of het object, die afhankelijk is van:
 - de vorm van de fakkel, waarbij de invloed van de wind is meegenomen.
 - de afstand van het object tot het (buiten) oppervlak van de fakkel.
 - de oriëntatie van de ontvanger tov. de fakkel (indien noodzakelijk).
- De 'atmospheric transmittivity' (τ_a).

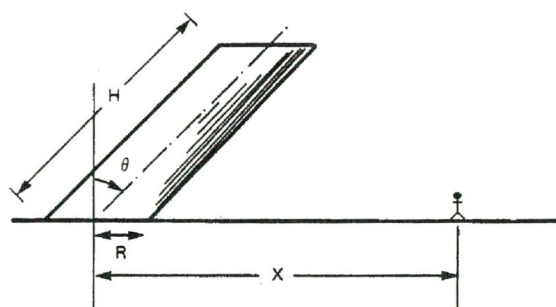
Algemeen is de warmte die vrijkomt bij een verbranding afhankelijk van:

- de verbrandingssnelheid, en
- de verbrande chemische stof of het materiaal.

Indien we een verbranding modelleren wordt de vorm, en de dimensie, van het vuur als constant verondersteld. Dit houdt in dat de verbrandingssnelheid gelijk wordt verondersteld aan de toevoer snelheid van het te verbranden materiaal. In het geval van een fakkel impliceert dit dat de verbrandingssnelheid gelijk is (onder evenwichtstoestand) aan de uitstroomsnelheid van het te verbranden materiaal.

View factor

Voor de schatting van de warmtestralingniveaus rond een vuur is een beschrijving van de vorm van het vuur noodzakelijk. De berekening van de warmte-intensiteit op een bepaalde plaats rond het vuur vereist daarom de bepaling van de geometrische 'view factor'. De berekeningsalgoritmen voor verschillende vormen van vuren zijn beschreven door Mudan in referentie [Mudan, K.S., (1987)]. In het geval van een fakkel zijn de uitdrukking voor de geometrische view factor die voor een afgebogen cilinder (zie Figuur 16).



Figuur 16 Coördinaat systeem voor een afgebogen cilindrische geometrie.

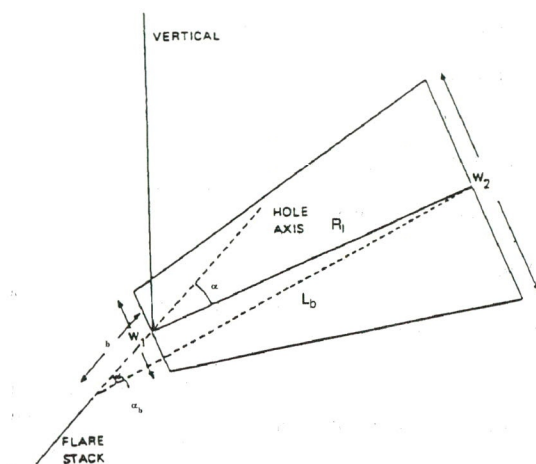
Atmospheric transmittivity

De 'atmospheric transmittivity' is een maat voor de geabsorbeerde warmte die door het vuur wordt uitgestraald en wordt geabsorbeerd door de lucht tussen de straler (het vuur) en het ontvangende object (of persoon). Zonder absorptie factoren is τ_a gelijk aan 1. De absorptie factoren zijn afhankelijk van de eigenschappen van de meest absorberende

componenten in de lucht (H_2O en CO_2). Vandaar dat de 'atmospheric transmittivity' gedefinieerd is als:

$$\tau_a = 1 - \alpha_w - \alpha_c \quad (30)$$

De absorptie factoren worden grafisch bepaald met behulp van de grafieken van Hottel in referentie [Hottel H.C. (1967)], zoals opgenomen in het Gele Boek [TNO Yellow Book (1997)] pagina 6.47.



Figuur 17 De berekende fakkel/ frustum parameters met het Thornton model.

In Figuur 17 zijn de volgende parameters te zien die berekend worden met behulp van het Thornton model voor een fakkelbrand:

- De hoek tussen de (uitstroom) gat en de as van de vlam (α).
- De offset van de frustum (b).
- De breedte van de frustum basis (W_1).
- De breedte van de frustum top (W_2).
- De lengte van de frustum (fakkel) (R_1).
- De afbuigingshoek van de centrale as van de fakkel (α_b).
- De snelheid van de expanderende fakkel (u_e).
- Het oppervlak van de frustum.
- Het oppervlak van de frustum in cilindrische benadering.
- De maximale 'surface emissive power' (SEP_{max}).
- De werkelijke 'surface emissive power' (SEP_{actual}).
- De 'atmospheric transmissivity'
- De 'view factor', en uiteindelijk
- De warmtestraling op een bepaalde plaats X ten opzichte van de fakkel.

3.7.2 Plasbrand

Algemene beschrijving van het model:

Bij de modellering van een vuur ten gevolge van een plasbrand worden de volgende berekeningsstappen gedaan:

- berekening van de maximale plas diameter (D_{max}), indien de plas cirkelvormige is en er een continue uitstroming wordt verondersteld.
- berekening van de verbrandingssnelheid (m'').

- berekening van de vlam dimensies van de plasbrand, de hoogte van de vlammen en de afbuigingshoek van de vlammen (L and θ).
- berekening van de werkelijke ‘Surface Emissive Power’ (SEP_{act}).
- berekening van de warmtestraling op een bepaalde afstand ($q'' = SEP_{act} \times F_{view} \times \tau_a$).
- berekening van opgenomen warmte op een bepaalde afstand
($= q''^{\frac{4}{3}} \times exposure_duration$).

De volgende parameters worden numeriek berekend bij een plasbrand:

- het warmtestralingsniveau op een bepaalde afstand X ten opzichte van het centrum van de plas.
- de verbrandingssnelheid van de plas,
- de duur van de plasbrand,
- de maximale warmtestraling (SEP_{max}) van het oppervlak van de plasbrand,
- de afbuiging van de vlammen,
- de ‘view factor’ op een bepaalde afstand X ten opzichte van het centrum van de plas,
- de ‘atmospheric transmittivity’ op een bepaalde afstand X ten opzichte van het centrum van de plas.

Grafisch worden bepaald:

- de warmte straling als functie van de afstand tot het centrum van de plas.
- de opgenomen warmte als functie van de afstand tot het centrum van de plas bij een bepaalde blootstellingsduur.
- 1st, 2nd and 3rd (lethaal letsel) graadsbrandwonden als functie van de afstand tot het centrum van de plas.

In het geval van een weg- of railtunnel moet in de modellering van een fakkel en plasbrand rekening gehouden worden met de volgende factoren:

Fakkel:

- de exacte plaats van uitstroming (het gat) van waaruit de continue uitstroming van het brandbare gas plaatsvindt.
- specifieke uitstroomrichting van het gas, en diensgevolge de richting van de fakkel in de tunnel.
- beperking van de omvang van de fakkel ten gevolge van:
 - de uitstroomrichting,
 - de dimensies tunnel en
 - de beperkte zuurstoftoevoer.

Plasbrand:

- de niet cirkelvormig vorm van de plassen, maar waarschijnlijk rechthoekig vorm.
- (tijdsafhankelijke karakter) van het volume van de vloeistof in de plas, die is namelijk afhankelijk van de aanwezige drainage systemen in de tunnel.
- de windrichting in de tunnel (de zogenaamde langsventilatie) en de windsnelheid in tunnels, afhankelijk van de (mogelijke) ventilatiesnelheid en rijrichting en snelheid.
- beperkingen in de brandontwikkeling t.g.v. de hoogte van de tunnel in vergelijking met de mogelijke te bereiken hoogte van de vlammen.
- beperkingen in de brandontwikkeling door beperkte zuurstoftoevoer voor de verbranding van de brandbare vloeistof in de plas in de tunnel.
- mogelijke verplaatsing van de brandende plas door aanwezigheid van een hellingspercentage in de tunnel.

Voorbeeld: Gaswolkontbranding/explosie vs. Fakkels

Bij het continue vrijkomen van het brandbare gas propaan kunnen zich twee scenario's voordoen, die afhankelijk van vertraagde of directe ontsteking van het brandbare propaan aanleiding geven tot een gaswolkontbranding/explosie dan wel een fakkel (zie Tabel 6).

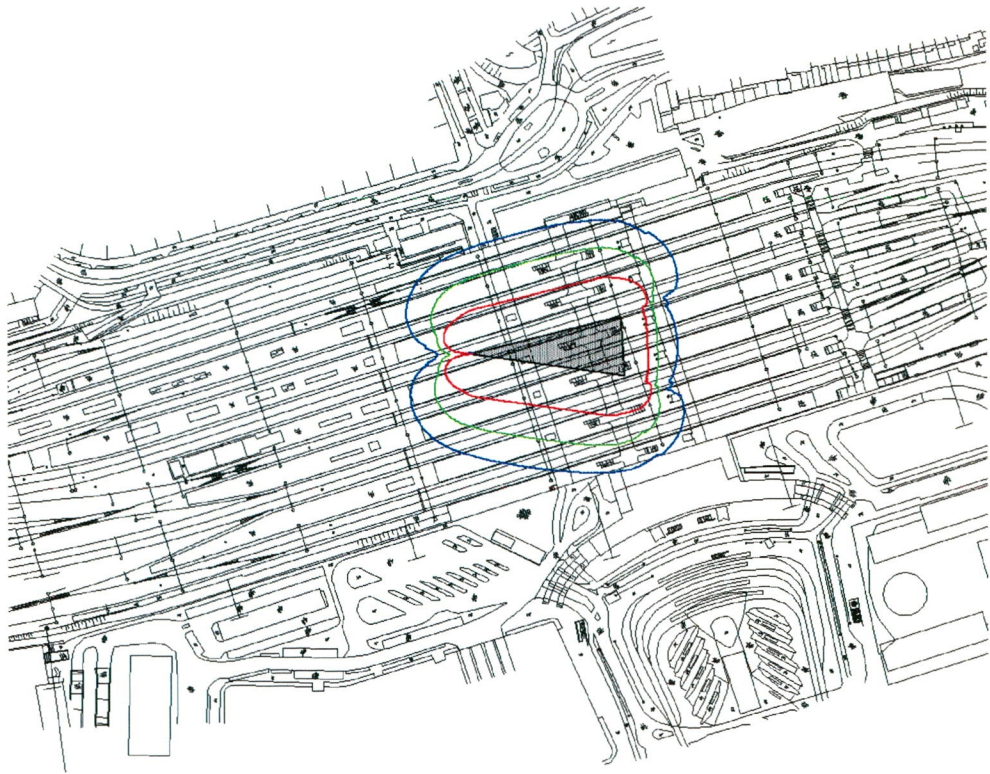
Tabel 6 Mogelijke scenario's bij het vrijkomen van het brandbare gas propaan.

Scenario #	Ontsteking	Uitwerking scenario
1	Direct	Liquid release → Chamberlain
2	Vertraagd	Liquid release → Spray release → Zwaar gas dispersie

Scenario # 1:

Het liquid release model berekent de maximale uitstroomsnelheid van het (tot vloeistof verdichte) brandbare gas. Uitgaande van de volgende situatie (zoals voorgeschreven voor weg- en railtransport in het Paarse Boek [Purple Book (1999)]): de propaan komt vrij door een gat in een horizontaal gepositioneerde cilinder met een inhoud van 100 m³, de lengte van de cilinder bedraagt 20 m en is voor 80% gevuld. In de cilinder heerst een overdruk van 10 Bar. Het gat heeft een diameter van 76.2 mm (zoals voorgeschreven voor weg- en railtransport in het Paarse Boek [Purple Book (1999)]) en bevindt zich op een hoogte van 1 m boven grondniveau. De initiële temperatuur in de cilinder is 20°C, en de 'discharge coëfficiënt' (afhankelijk van de vorm van het gat in de cilinder) is 0.62. Dit levert een maximaal uitstroomsnelheid van 89 kg/s aan propaan.

Met behulp van het fakkel model kan vervolgens de grootte van de fakkel worden berekend en de afstanden vanaf en rondom de fakkel voor de verschillende percentages van letaliteit. De berekening is gedaan uitgaande van de volgende situatie: de uitstroming is 'unchoked', met een snelheid van 89 kg/s (zoals berekend met het liquid release model). De druk en temperatuur bij vrijkomen zijn respectievelijk 10 Bar en 293 K. De weersomstandigheden zijn volgens Pasquill stabiliteitsklasse D5 (windsnelheid 5 m/s), omgevingstemperatuur: 282 K en een luchtvochtigheid van 83%. Als conservatieve uitstroomrichting is 15° gekozen (0° = horizontale uitstroming en 90° = verticale uitstroming). Dit levert de namelijk een fakkel met dimensies: basis 0.7 m, top 32 m, lengte 80 m, en warmtestralingniveaus rond de fakkel voor 100% (zwart), 50% (groen) en 1% (blauw) die precies over de weg liggen in het verlengde van de tunnel.



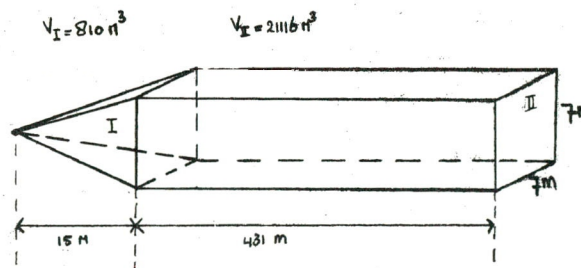
Figuur Voorbeeld van de berekende fakkel, afgebeeld op ware grootte over de achtergrond van Rotterdam CS.

Opmerkingen:

Zoals eerder genoemd zal de omvang van de fakkel in een tunnel worden beperkt ten gevolge van: de uitstroomrichting, de dimensies van de tunnel en de beperkte zuurstof-toevoer in een tunnel. De berekende fakkel met dimensies: basis (b) 0.7m, top (t) 32m en lengte (l) 80m, heeft een volume van: 21926 m³

$$V = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot l \cdot \left[\left(\frac{t}{2} \right)^2 + \left(\frac{b}{2} \right)^2 + \left(\frac{t}{2} \cdot \frac{b}{2} \right) \right] \quad (31)$$

Uitgaande van een tunnel met een hoogte en breedte van 7 bij 7m ziet de fakkel er in de tunnel dan als volgt uit.



Figuur 18 Vorm van de fakkel in een tunnel van 7 bij 7 m.

Het volume van deel I is gelijk aan 810 m^3 , hetgeen voor deel II overlaat ($21926 - 810$) 21116 m^3 . Wat impliceert dat de tunnel over een afstand van 431 m totaal met vuur gevuld zal zijn. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de mogelijke beperking ten gevolge van beperkte toevoer (en beschikbaarheid) van zuurstof in de tunnel buiten beschouwing is gelaten en als een niet beperkende factor is verondersteld, hetgeen een tamelijk conservatieve aanname is.

Scenario # 2:

Met het liquid release model wordt zoals beschreven bij scenario # 1 de maximale uitstroomsnelheid berekend van 89 kg/s aan propaan. Met het spray release model kunnen de condities in de propaan jet worden berekend na verdamping van alle druppels die zich aanvankelijk in de propaan jet bevonden (uitgaande van vertraagde ontsteking). Uitgaande van een continue uitstroming vanuit een gat in een cilinder onder druk (10 Bar) op een hoogte van 1 m boven grondniveau, en een diameter van 76.2 mm van het brandbare propaan met een uitstroomsnelheid van 89 kg/s bij een omgevingstemperatuur van 282 K en een van luchtvochtigheid 83%. Resulteert dit in een propaan jet (na verdamping van alle druppels in de jet) met een dichtheid van 4.47 kg/m^3 en een snelheid van 21.34 m/s. Het oppervlak van de jet is 0.95 m^2 . Bij deze berekende dichtheid van de propaan jet is het nodig om het gas verder in de omgeving te laten dispergeren volgens een zwaar gas dispersie model. Resultierend in een gaswolk waarin voor de lower explosion limiet geldt: maximale grootte explosieve wolk: 3847 m^3 , lengte wolk: 125 m, breedte wolk: 44 m waarin zich een explosieve massa bevindt van 721 kg.

Opmerking:

In bovenstaande rekenvoorbeeld is op naïeve wijze het zwaar gas dispersie model toegepast zonder daarbij rekening te houden met bijvoorbeeld de afmetingen van de tunnel, die voor een begrenzing van de gaswolk dimensies zullen leiden. Zoals al eerder opgemerkt zal er dus in principe een theoretisch zwaar gas dispersie model moeten worden ontwikkeld dat in staat is om:

- verticale dispersie in een tunnel te modelleren, en
- de omvang van de gaswolk begrensd aan de hand van de tunnel dimensies.

Voorbeeld: Plasbrand

Bij de modellering van het vrijkomen van een brandbare vloeistof, gevolgd door een directe ontsteking, bij weg- en railtransport wordt gerekend met de stof n-hexane (zoals voorgeschreven voor weg- en railtransport in het Paarse Boek [Purple Book (1999)]). Hierbij kan gevarieerd worden in de weersomstandigheden in de tunnel, door b.v. de windsnelheid (1 m/s - 5 m/s) in de tunnel te variëren. Verder zal er in de tunnel gerekend worden met een rechthoekige plas waarvan de breedte is, de breedte van de tunnel (7 m). Gezien de aanwezigheid van drainagesystemen in tunnels (putten om de zoveel meter) en meestal aanwezige hellingspercentages in tunnels zal er gerekend worden met relatief kleine plasoppervlakken (tot maximaal 150 m^2). Dit levert de volgende letaliteitsafstanden [aan de breedtezijde (7 m) van de rechthoekige n-hexane plas] voor de verschillende warmtestralingniveaus [die corresponderen met de verschillende letaliteitspercentages] en ten opzichte van verschillende windsnelheden in de tunnel.

Tabel 7 Letaliteitsafstanden t.o.v. de breedtezijde van de brandende n-hexane plas voor verschillende windsnelheden in tunnels.

Windsnelheid (m/s)	99% letaliteit (35 kW/m ²)	50% letaliteit (19.5 kW/m ²)	1% letaliteit (9.8 kW/m ²)	2 ^{de} graads brandwonden (9.4 kW/m ²)	1 ^{ste} graads brandwonden (4.1 kW/m ²)
1	< 3	6	9	10	13
2	4	8	11	12	16
3	5	9	13	13	18
4	6	10	14	14	19
5	7	11	15	15	20

Opmerking:

In bovenstaande tabel 7 zijn de volgende twee factoren verwaarloosd die zeker de ontwikkeling van de brand beperkt zouden hebben. Te weten:

- de hoogte van de vlammen in de tunnel.

Bij plasbranden van dergelijke omvang (tot maximaal 150 m²) bereiken de vlammen een hoogte van >10 m, hetgeen hoger is dan de hoogte van de tunnel.

- de beperkte zuurstoftoevoer in tunnels.

Door onvoldoende aanwezigheid en toevoer van zuurstof zal de brand niet volledig tot ontwikkeling kunnen komen, en derhalve minder warmte uitstralen of zelfs (door verstikking) uitdoven door onvoldoende verse lucht toevoer.

4 Inventarisatie ongevalsscenario's

De *selectie* en *analyse* van de relevante ongevalsscenario's in tunnels vormt de kern van het project “*Ontwikkeling Leidraad Scenarioanalyse*”. De relatie tussen de te selecteren scenario's in combinatie met

- (1) type tunnel (weg/rail),
- (2) soort effect- en schade modellen,
- (3) toepasbaarheid en betrouwbaarheid van de beschikbare modellen en
- (4) kwaliteit van de modelberekening,

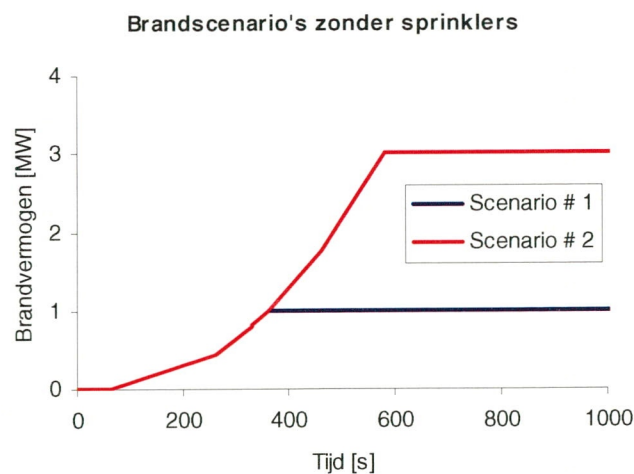
is hierbij erg belangrijk. In dit hoofdstuk is derhalve een overzicht gegeven van *hoe* de verschillende fysische effecten zijn gemodelleerd in de reeds uitgevoerde veiligheidsanalyses.

4.1 Veiligheidsanalyse brand in HSL tunnels: modelbeschrijving

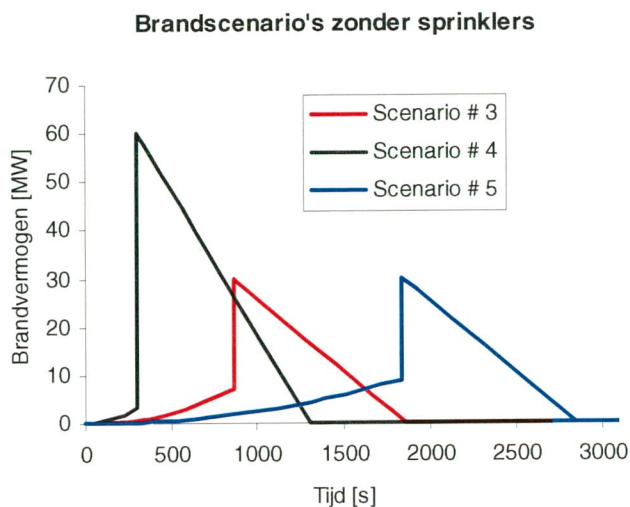
De beschouwde scenario's in dit rapport zijn ter bepaling van het risico op dodelijke slachtoffers ten gevolge van een brand in een trein in de HSL tunnels.

Brandscenario's voor treinen zonder sprinklers

- 1 Geen flash-over, $a = 11 \text{ W/s}^2$, max. vermogen 1 MW
- 2 Geen flash-over, $a = 11 \text{ W/s}^2$, max. vermogen 3 MW
- 3 Flash-over 800 sec., $a = 11 \text{ W/s}^2$, max. vermogen 30 MW
- 4 Snelle flash-over 240 sec., $a = 45 \text{ W/s}^2$, max. vermogen 60 MW
- 5 Langzame flash-over 1600 sec., $a = 3 \text{ W/s}^2$, max. vermogen 30 MW



Figuur 19 Brandscenario 1 en 2 voor treinen zonder sprinklers.



Figuur 20 Brandscenario 3,4 en 5 voor treinen zonder sprinklers.

Brandscenario's voor treinen met sprinklers

- 1 Geen flash-over, max. vermogen 1 MW
- 2 Geen flash-over, max. vermogen 3 MW
- 3 Flash-over 960 sec., max. vermogen 30 MW
- 4 Snelle flash-over 370 sec., max. vermogen 60 MW
- 5 Langzame flash-over 2160 sec., max. vermogen 30 MW

Opmerking:

- Voor definities en terminologie zie Bijlage 1.
- De vertraging die in de scenario's 3, 4 en 5 optreden in de flash-over tijden ten opzicht van de scenario's met sprinklers zijn berekend door de warmteproductie tijdens de brand te verminderen met het toevoegende koelend vermogen van de sprinkler. Het koelend vermogen is gelijk aan de som van de warmte nodig voor het opwarmen van het sprinklerwater van 20 tot 100 °C en de verdampingswaarde vermenigvuldigt met het debiet per seconde en een efficiency factor (η 0.4).

Toegepaste wijze van modellering:

Om de risico's op gewonden en/of op dodelijke slachtoffers ten gevolge van een brand in een trein in de HSL tunnel te bepalen zijn de brandscenario's doorgerekend op een uitgebreide en gedetailleerde manier met behulp van een CFD berekening. Dit om een directe koppeling te kunnen maken met de schade-, letsel-, en vluchtmodellen waarvoor de ontwikkeling van de brand in de loop van de tijd nodig is.

4.2 Scenarioanalyse van de overkappingsvarianten voor de A2 Leidsche Rijn

De ongevalsscenario's die in dit rapport zijn bekeken om inzicht te krijgen in de ontwikkeling van de schade in de tijd voor de mogelijke incidenten/ongevallen in de verschillende overkappingsvarianten.

De volgende ongevalsscenario's zijn bekeken:

- 1 Verkeersverstoring zonder schade
- 2 Ongeval met uitsluitend materiele schade

- 3 Letselongeval
- 4 Personenautobrand (5 MW)
- 5 Bus- en kleine vrachtautobrand (20 MW)
- 6 Grote brand: vloeistof brand (300 MW)
- 7 LPG BLEVE
- 8 LPG gaswolk
- 9 Ongeval met vrijkomen toxische vloeistof
- 10 Ongeval met vrijkomen toxisch gas

Toegepaste wijze van modellering:

De scenario's in dit rapport zijn dusdanig gekozen om met name inzicht te krijgen in de ontwikkeling van de schade in de loop van de tijd. Derhalve zijn de fysische effecten niet 'expliciet' gemodelleerd, maar zijn er beredeneerde aannames gedaan met betrekking tot de omvang van het schadegebied, dan wel de tijdsduur van de ontwikkeling van het schadegebied en/of de tijdsduur voor zelfredzaamheid. De aannames zijn hieronder schematisch weergegeven en vervolgens toegelicht.

Tabel Schematisch overzicht van de toegepaste wijze van modellering in "Scenarioanalyse van de overkappingsvarianten voor de A2 Leidsche Rijn".

Ongevalsscenario	Omvang van het schadegebied		Ontwikkelingstijd schadegebied
Personenautobrand	Brandende auto		-
	Zonder ventilatie in tunnel	Met ventilatie in tunnel	
Bus- en kleine vrachtautobranden	200-300 m	450-1500 m	17 – 20 minuten
Vloeistof brand	Zie vrachtautobrand	Zie vrachtautobrand	-
LPG (BLEVE/gaswolk)	Gehele tunnel		-
Toxische vloeistof	Afhankelijk van: - soort vloeistof - snelheid van verdamping vanuit plas - snelheid van spreiding van de plas		Enkele minuten
Toxische gaswolk	Gehele tunnel		0 – 2 minuten

Personenautobrand:

Uit een berekening van TNO in dit rapport is gebleken dat, uitgaande van een ventilatiesnelheid van 3 m/s en tunneldoorsneden van 86 resp. 93 m², de temperatuurstijging onder de overkapping ca. 15 °C bedraagt. Aangezien de rookconcentraties ook betrekkelijk laag zijn, zullen er bij dit scenario, bij werking van de ventilatie, geen doden vallen. Uit een vergelijking met berekeningen die voor metrotunnels zijn gemaakt, kan tevens worden afgeleid dat ook bij ontbreken van ventilatie geen extra (dodelijke) slachtoffers zullen optreden.

Bus- en kleine vrachtautobranden:

Uit een berekening van TNO in dit rapport is gebleken dat, na circa 17 – 20 minuten temperaturen worden bereikt, waarbij zonder ventilatie vluchten niet meer mogelijk is. Hierbij geldt wel dat er eerst nog sprake zal zijn van stratificatie, waardoor onderin (op menshoogte) de atmosfeer nog wel geschikt is om te vluchten.

Vloeistof brand:

Schadeafstanden vergelijkbaar met de vrachtautobrand, maar met hogere temperaturen. Dus kortere tijden (1–2 minuten) waarna temperaturen worden bereikt waarbij, zonder ventilatie, vluchten niet meer mogelijk is.

LPG (BLEVE/gaswolk):

Schadegebied: Gehele tunnel

Toxische vloeistof:

Schadegebied afhankelijk van de hoeveelheid toxische vloeistof die vrijkomt en de snelheid van verdamping en verspreiding.

Toxische gaswolk:

Schadegebied: Gehele tunnel

4.3 Deterministische veiligheidsanalyse ontwerp Randstadrail tunnel Rotterdam

Algemeen kunnen zich in een railtunnel de volgende ongevallen voordoen:

- (1) aanrijdingen,
- (2) ontsporingen,
- (3) botsingen en
- (4) brand.

Door TNO-Bouw, Centrum voor Brandveiligheid (CvB) is onderzoek verricht naar de mogelijke brandontwikkeling die in het RandstadRail materieel zou kunnen optreden. Op grond daarvan zijn de volgende representatieve brandcurves opgesteld.

- 1 langzaam groeiende brand zonder vlamoverslag (groeisnelheid is 1 MW in 600 sec.), verder groeiend tot 3 MW, daarna constant op 3 MW.
- 2 langzame vlamoverslagbrand (groeisnelheid is 1 MW in 600 sec.), vlamoverslag 800 sec. na start groei, topvermogen 15 MW, daarna lineair afnemend, brandduur na vlamoverslag is 4500 sec. (75 min).
- 3 snelle vlamoverslagbrand (groeisnelheid is 1 MW in 150 sec.), vlamoverslag 210 sec. na start groei, topvermogen 40 MW, daarna lineair afnemend, brandduur na vlamoverslag is 1800 sec. (30 min).

De opgestelde brandscenario's zijn een combinatie van het volgende:

- 1 representatieve brandcurve
- 2 locatie van de brand (kop, midden en staart)
- 3 wel/geen ventilatie

Toegepaste wijze van modellering:

Om de risico's op gewonden en/of op dodelijke slachtoffers ten gevolge van een brand in een trein in de HSL tunnel te bepalen zijn de brandscenario's doorerekend op een uitgebreide en gedetailleerde manier met behulp van een CFD berekening. Dit om een

directe koppeling te kunnen maken met de schade-, letsel-, en vluchtmodellen waarvoor de ontwikkeling van de brand in de loop van de tijd nodig is.

4.4 Leidsche Rijn: Risicoanalyse interne en externe veiligheid.

Voor het vervoer van de volgende stoffen vindt plaats op dit traject:

- brandbare vloeistoffen:
 - categorie LF1 (heptaan) en
 - categorie LF2 (pentaan)
- toxische vloeistoffen:
 - categorie LT1 (acrylonitril) en
 - categorie LT2 (propylamine)
- brandbare gassen:
 - categorie GF2 (butaan) en
 - categorie GF3 (propan)

Daarvoor zijn de volgende ongevalsscenario's beschouwd:

- brandbare vloeistoffen:
 - instantaan vrijkomen directe ontsteking
 - plasbrand
 - instantaan vrijkomen vertraagde ontsteking
 - (mogelijke) gaswolkexplosie
 - continue uitstroming directe ontsteking
 - continue uitstroming vertraagde ontsteking
- toxische vloeistoffen:
 - instantaan vrijkomen
 - toxische gaswolk
 - continue uitstroming
 - toxische gaswolk
- brandbare (tot vloeistof verdichte) gassen:
 - instantaan vrijkomen directe ontsteking
 - BLEVE
 - instantaan vrijkomen vertraagde ontsteking
 - (mogelijke) gaswolkexplosie
 - continue uitstroming directe ontsteking
 - Fakkels
 - continue uitstroming vertraagde ontsteking
 - (mogelijke) Gaswolkexplosie

Toegepaste wijze van modellering:

De fysische effecten zijn niet 'expliciet' gemodelleerd in dit rapport, maar berusten op aannames met betrekking tot de omvang van het schadegebied. De aannames zijn hieronder schematisch weergegeven en vervolgens toegelicht.

Tabel Schematisch overzicht van de toegepaste wijze van modellering in “Leidsche Rijn: Risicoanalyse interne en externe veiligheid”.

Ongevalsscenario	Omvang van het schadegebied	
	Zonder ventilatie in tunnel	Met ventilatie in tunnel
Personenautobrand	50 meter	50 meter
Bus- en kleine vrachtautobranden	600 m	1500 m
Vloeistof brand	Zie vrachtautobrand*	Zie vrachtautobrand*
Toxische vloeistof	900 m	4500 m
LPG (BLEVE/gaswolk)	Gehele tunnel	
Toxische gaswolk	Gehele tunnel	

* De tijdsduur voor zelfredzaamheid is echter veel korter ten opzichte van de bus- en kleine vrachtautobranden, ten gevolge van (in vergelijking) de hele snelle brandontwikkeling en veel hogere brandvermogens bij vloeistofbranden.

Personenautobrand:

Schadegebied voor overkapte wegdelen met en zonder ventilatie: 50 m.

Schadegebied voor deels open wegdelen: < 50 m.

Bus- en kleine vrachtautobranden:

Schadegebied in geval geen ventilatie: 600 m.

Schadegebied in geval wel ventilatie: 1500 m (benedenstroom).

Schadegebied bij gedeeltelijke overkapping: afhankelijk van de lengte van de overkapping.

Vloeistof brand:

Continue uitstroming van in totaal 5 m³, met een lengte van de plas van 15 m, over de hele breedte van de tunnel.

Instantane uitstroming, met een lengte van de plas van 200, over de hele breedte van de tunnel.

LPG (BLEVE/gaswolk):

Schadegebied: Gehele tunnel

Toxische vloeistof:

Tunnel met ventilatie: maximale schadegebied 4500 m.

Tunnel zonder ventilatie: maximale schadegebied 900 m.

Toxische gaswolk:

Schadegebied: Gehele tunnel

5 Conclusies

In onderstaande tabel is voor de eerder besproken fysische effecten modellen een overzicht gegeven van hun mate van toepasbaarheid in tunnels.

	Fysisch effectmodel	Mate toepasbaarheid in tunnels ⁽¹⁾
1	Brand en rookverspreiding	++
2	Verdamping	+/-
3	Dispersie	-
4	Explosie	+/-
5	BLEVE	+
6	Warmtestraling	+

⁽¹⁾ ++ : zeer toepasbaar, + : goed toepasbaar, +/- : toepasbaar, - : minder toepasbaar, -- : niet toepasbaar.

Toelichting:

1. Brand en rookverspreiding

Voor brand- en rookverspreiding in tunnels zijn beschikbaar het (eenvoudige) zone model en het (meer gecompliceerde) CFD model. Het zone model geeft als resultaat een eerste indicatieve waarde voor de lengte in de tunnel waarover stratificatie standhoud afhankelijk van de tunnelconfiguratie (dimensies) en het vermogen [MW] van de brand. De CFD modellen zijn veel geavanceerder in vergelijking met het zone model en geven naar aanleiding van een bepaald brandscenario (brandvermogen [MW] vs. tijd [s]), de temperatuur van de brand en concentraties aan rook in de tunnel berekent als functie van tijd en plaats. Met de resultaten van de CFD berekening kan direct een koppeling worden gemaakt met de schademodelen (vluchtmodellen en letaliteitsmodellen t.g.v. warmte en toxiciteit). Hiermee zijn dan indirect het aantal slachtoffers in de tijd te bepalen in de tunnel t.g.v. de warmte- en rookverspreiding. Derhalve moet het te gebruiken model, zone model vs. CFD model, voor brand & rookverspreiding in tunnels gekozen worden afhankelijk van het gewenste soort resultaat. Indien slechts een indicatieve waarde nodig is van de lengte waarover stratificatie in de tunnel kan optreden, kan met een zone model berekening worden volstaan. Als echter een koppeling met een schade-, letsel- en/of vluchtmodel nodig is, om tot slachtofferaantallen in de loop van de brandontwikkeling te komen, zijn de uitgebreidere en meer gedetailleerde CFD berekeningen nodig.

2. Verdamping

In het geval van een weg- of railtunnel moet bij de modellering van het fysische effect model verdamping in tunnels in de bestaande verdampingsmodellen (ontwikkeld voor een open infrastructuur) extra en expliciet rekening worden gehouden worden met: *aangepaste windsnelheden*, *andere plasoppervlakken* en *drainage* in de tunnel. Indien dit op fysisch correcte wijze wordt gedaan is het fysische effect model voor een open infrastructuur ook toepasbaar voor weg- of railtunnel. Bij toepassing van het verdampingsmodel moet voor de *windsnelheid* rekening worden gehouden met de heersende windsnelheid in de tunnel. Deze kan zijn opgelegd door, of de rijrichting (en snelheid) van het verkeer, of door de ventilatierichting (en snelheid) van het werkende ventilatiesysteem. Voor het *plasoppervlak* moet in het verdampingsmodel rekening worden ge-

houden met rechthoekige plasoppervlakken. De breedte is hierbij afhankelijk van de breedte van de tunnel, en de lengte is afhankelijk van de plaatsing van het drainage systeem (om de hoeveel meter, en waar, bevinden zich putten in het wegoppervlak) en het hellingspercentage van het wegdek (deze is van invloed op de snelheid waarmee de plas zich uitbreidt). Als maximale plasoppervlak in een tunnel wordt derhalve veelal 150 m² gehanteerd. Ten gevolge van *drainage* moet in het verdampingsmodel rekening worden gehouden met aangepaste hoeveelheden (kleinere hoeveelheden) vloeistof in de plas. Hierbij dient een reële inschatting gemaakt te worden van het percentage van de vrijgekomen hoeveelheid vloeistof dat in de putten (het drainage systeem) wordt afgevoerd van de oorspronkelijk, instantaan vrijgekomen hoeveelheid gevaarlijke stof.

3. Dispersie

De dispersie modellen die voor zowel neutrale als zware gaswolken in tunnels worden toegepast zijn simplistisch in de manier waarop rekening wordt gehouden met de invloed van de *tunnel configuratie*, de *windsnelheid* en de *bronsterkte* op het fysische effect van dispersie. In principe zou er een goed gevalideerd theoretisch dispersie model moeten worden ontwikkeld voor tunnels waarin *atmosferische turbulentie* in rekening wordt gebracht en waarbij de *verticale dispersie* gemodelleerd kan worden op dezelfde manier als in de open lucht, waarbij de gaswolk dan wordt begrensd door de breedte van de tunnel. Bij toepassing van het dispersiemodel in een tunnel moet expliciet rekening worden gehouden met de *configuratie van de tunnel*. Derhalve dient als randvoorwaarde voor de maximale omvang van de gaswolk de lengte, de breedte en de hoogte van de tunnel gehanteerd te worden. Voor de *windsnelheid* moet in het dispersiemodel, net als in het verdampingsmodel, rekening worden gehouden met de heersende windsnelheid in de tunnel. Deze kan zijn opgelegd door, of de rijrichting (en snelheid) van het verkeer, of door de ventilatierichting (en snelheid) van het werkende ventilatiesysteem. In het dispersiemodel in een tunnel moet altijd worden gerekend met een lagere *bronsterkte* in vergelijking met een vergelijkbare situatie en berekende waarde in een open infrastructuur. Aangezien de bronsterkte afhankelijk is van de grote van de source (plasoppervlak), de (gas)concentratie boven de source (de plas) en de windsnelheid in de tunnel, zal deze altijd een lagere bronsterkte opleveren in vergelijking met de (berekende) bronsterkte, en vergelijkbare situatie, in een open infrastructuur.

4. Explosies

In het rapport “*Vuistregels voor explosiebelasting en respons van verkeerstunnels*” zijn de relevante experimentele gegevens met betrekking tot gasexplosies van propaanluchtmengsels in pijpen en kanalen vertaald en geëxtrapoleerd naar een aantal reële scenario's van een gasexplosie in een verkeerstunnel op volle schaal. Bij variatie van de twee parameters: de *wolk lengte* en de *ontstekingsplaats van de wolk* (centraal of aan de rand) is vervolgens de blastbelasting op de tunnelwand berekend en in tabelvorm weergegeven. Vanwege het feit dat de experimentele resultaten geëxtrapoleerd zijn vanuit pijpen en kanalen naar de volle schaal van een verkeerstunnel is het model, hoewel zeer goed bruikbaar, niet overtuigend in de mate van toepasbaarheid. Aangezien in vele gevallen ook navolgende parameters variëren, die echter in het model constant zijn verondersteld op de volgende wijze. De tunnellengete is zo gekozen dat de gaswolk geheel in de tunnel past. De positie van de gaswolk is centraal (in het midden van de tunnel) gekozen. In de berekening is uitgegaan van een stoichiometrisch propaanlucht mengsel. Tevens is een evenredige concentratie verdeling in de gaswolk verondersteld, en is uitgegaan van de aanwezigheid van een file in de tunnel.

5. BLEVE

Een BLEVE resulteert in de volgende fysische effecten: *druk golf* (piekoverdruk), *rondvliegende fragmenten* van de opslagtank en (bij brandbare gassen die direct worden ontstoken) een *'fire ball'* (vuurbal). De mogelijke toepasbaarheid van de bestaande fysische effectmodellen voor een BLEVE op maaiveld, is op verschillende wijzen aannemelijk gemaakt voor weg- en railtunnels door middel van: modelaanpassingen in het huidige model, stoichiometrische overwegingen en fysische overwegingen. Als vuistregel kan derhalve worden aangenomen dat, gezien de lengte van de weg- en/of railtunnels in Nederland, ten gevolge van een BLEVE in een tunnel de overlijdingskansen één is voor personen in de tunnelbuis (intern risico) door de 'vuurzee' of door verdringing van de aanwezige zuurstof. De invloed op het externe risico ten gevolge van een BLEVE is afhankelijk van het mogelijk bezwijken van de tunnelconstructie.

6. Warmtestraling

De warmtestralingseffecten ten gevolge van een brand in een tunnel door het vrijkomen van een brandbaar gas (fakkel/gaswolkexplosie) en/of een brandbare vloeistof (plasbrand) kunnen goed worden gemodelleerd met de modellen die beschikbaar zijn voor de open infrastructuur (maaiveld). Echter dienen de resultaten te worden geïnterpreteerd voor zowel een fakkelbrand als een plasbrand, daarbij rekening houdend met: de (*be-grenzende*) *dimensies van de tunnel* en de *beperkte aanwezigheid (en toevoer) van zuurstof* in zo'n weg- en/of railtunnel. Door de (opgelegde) vaste hoogte van de tunnel zal dit de ontwikkeling van de brand beperken. Aangezien bij plasbranden met een maximale omvang van 150 m², de vlammen een hoogte zullen bereiken die hoger zullen zijn dan de hoogte van de tunnel zal hierdoor de ontwikkeling van de brand beperkt blijven. Tevens zal door onvoldoende aanwezigheid (en toevoer) van zuurstof de brand niet volledig tot ontwikkeling kunnen komen in een tunnel, en derhalve minder warmte uitstralen of zelfs (door verstikking) uitdoven door onvoldoende verse lucht toevoer (afhankelijk van wel/niet ventilatie).

Uit bovenstaande tabel en de toelichting daarop blijkt dus dat met name het dispersiemodel duidelijk aanpassingen behoeft aan de specifieke tunnelomstandigheden. Het verdampings- en het explosiemodel zullen met geringe aanpassingen voldoen aan de toepasbaarheid voor tunnels, en de overige modellen zijn in hun huidige vorm goed tot zeer goed toepasbaar binnen tunnels.

Algemene beschrijving voor de toepassingswijze van de in dit rapport behandelde fysische effect modellen zoals die zijn besproken voor de verschillende fenomenen die zich kunnen voordoen ten gevolge van het vrijkomen van brandbare en/of toxische vloeistoffen of gassen in een weg- of railtunnel.

1. Brand en rookverspreiding

– Zone model

Met behulp van het beschreven zone-model in 3.2.1 is het mogelijk om voor een specifieke tunnelconfiguratie (dimensie) en een bepaald vermogen van de brand, de afstand te berekenen waarover stratificatie in de tunnel standhoud (zich een scheiding tussen een rooklaag bovenin de tunnel met een daaronder relatief zuivere luchtblaag standhoud).

– CFD model

Met een Computational Fluid Dynamics (CFD) model kan voor een bepaald vermogen van de brand (brandscenario), de temperatuur van de brand en concentratie aan rook in de tunnel berekend als functie van tijd en plaats. Met de beschrijving van het

model in 3.2.2 is echter geen modelberekening uit te voeren. Voor het uitvoeren van een dergelijke berekening is een CFD programma nodig waarvan het gebruik voor de niet ingewijde gebruiker erg gecompliceerd en arbeidsintensief is, naast het feit dat de rekentijd aanzienlijk meer is dan de rekentijd die nodig is voor een zone model berekening.

2. Verdamping

– *Verdampings model*

Met de ‘algemene’ beschrijving van de processen die een rol spelen bij een plasverdampingsproces in 3.3 is geen modelberekening uit te voeren. Voor het doen van een modelberekening kunnen verschillende risicoanalyse pakketten worden gehanteerd, waarin de onderliggende verdampingsmodellen allemaal de algemene beschrijving zullen volgen. Bij het toepassen van deze pakketten is het bij plasverdamping dus met name van belang gebruik te maken van tunnelspecifieke waarden voor de windsnelheid en het plasoppervlak, en de mogelijkheid van drainage in de tunnels in rekening te brengen.

3. Dispersie

– *Dispersie model*

Met behulp van de beschreven modellen voor zowel neutraal gas (3.4.1) als zwaar gas (3.4.2), is het mogelijk om de concentratie in de gaswolk te berekenen als functie van de down-wind distance (3.4.1) dan wel dwarsdoorsnede van de gaswolk (3.4.2). Opgemerkt dient te worden dat deze dispersie modellen voor tunnels echter zeer simplistische zijn in de wijze waarop rekening wordt gehouden met de tunnel configuratie, de windsnelheid en de bronsterkte, en er tevens hierbij geen rekening wordt gehouden met atmosferische turbulentie en de dispersie in verticale richting in de tunnel.

4. Explosie

– *Gasexplosie model*

Met behulp van het in 3.5 beschreven model voor een gasexplosie is voor gaswolken met een variabele lengte en een verschillende ontstekingsplaatsen (centraal of aan de rand) de blastbelasting op de tunnelwand te bepalen met behulp van de aldaar gegeven tabellen en grafieken. Hetgeen is geïllustreerd in een aantal rekenvoorbeelden.

5. BLEVE

– *BLEVE model*

Met behulp van de ‘algemene’ beschrijving van de processen (druk golf, rondvliegende fragmenten en ‘fire ball’) die een rol spelen bij een BLEVE in 3.6 is geen modelberekening uit te voeren. Echter op grond van fysische overwegingen (zoals in 3.6 beschreven) kan als vuistregel worden aangenomen dat de overlijdenskans één is voor personen in een tunnelbuis ten gevolge van een BLEVE, en is het dus niet noodzakelijk om daarwerkelijk een modelberekening uit te voeren.

6. Warmtestaling

– *Fakkelt model & plasbrand model*

Met behulp van de ‘algemene’ beschrijving van de parameters (‘surface emissive power’, ‘view factor’ en ‘atmospheric transmittivity’) die een rol spelen bij de warmtestralingsmodel in 3.7 is geen modelberekening uit te voeren voor zowel een fakkelt als een plasbrand. Voor het uitvoeren van een modelberekening kunnen verschillende risicoanalyse pakketten worden gehanteerd, waarin in de onderliggende warmtestra-

lingsmodellen al deze algemene parameters zijn opgenomen. In de voorbeeld modelberekeningen in 3.6 voor een gaswolkontbranding/explosie, een fakkel als ook voor een plasbrand is weergegeven hoe in zulke berekening de (begrensde) tunneldimensie alsmede de beperkte aanwezigheid (en toevoer) van zuurstof kan worden verdisconteerd.

6 Referenties

- [1] Veiligheidsanalyse brand in HSL tunnels: Modelbeschrijving, TNO-MEP-R2000/259, Apeldoorn juli 2000.
- [2] Scenarioanalyse van de overkappingsvarianten voor de A2 Leidsche Rijn, TNO-MEP-R2001/470, Apeldoorn oktober 2001.
- [3] Deterministische veiligheidsanalyse ontwerp Randstadrail tunnel Rotterdam, TNO-MEP-R2002/xxx, Apeldoorn mei 2002.
- [4] Leidsche Rijn: Risicoanalyse interne en externe veiligheid, Bouwdienst, rapportnummer A2/LR/RA-R-00.013, Utrecht 15 maart 2000.
- [5] Contra expertise interne en externe veiligheid A2 Leidsche Rijn, TNO-MEP-R2002/xxx, Apeldoorn januari 2002.
- [6] Aanzet tot berekeningsmethodiek voor in- en externe risico's bij tunnels en overkappingen, SAVE-rapport 98223-C54, November 1998.
- [7] Handleiding risicoanalyse voor brandveiligheid van ondergrondse railwegen; SAVE-rapport 95378-560, Februari 1995.
- [8] Project 'Safety Proef' Rapportage Brandproeven, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Bouwdienst, Steunpunt Tunnelveiligheid, Augustus 2002.
- [9] TNO (1983) LPG, A study: Comparative risk analysis for the storage, handling, transport and use of LPG and Petrol, Subreport 1112, 1983.
- [10] Vuistregels voor explosiebelasting en respons van verkeerstunnels, TNO-PML-R2001/xxx, Rijswijk, juli 2001.
- [11] TNO Yellow Book, third edition 1997, Methods for the calculation of physical effects, resulting from releases of hazardous materials (liquids and gases). Directorate-General of Social Affairs and Employment, CPR 14E third edition, The Hague 1997.
- [12] Chamberlain, G.A., Development in design methods for predicting thermal radiation from flares, Chem. Eng. Res. Des. Vol. 65 July 1987 pg. 299-309.
- [13] Mudan, K.S., Geometric View Factors for Thermal Radiation Hazard Assessment, Fire Safety Journal 12, 1987, pg. 89-96.
- [14] Hottel H.C. and Saforim A.F., Radiative transfer, McGraw Hill, New York (1967).
- [15] Purple Book, Guidelines for Quantitative Risk Assessment CPRE 18 E, Committee for the Prevention of Disasters. First Edition, Sdu Uitgevers Den Haag (1999) ISBN: 901208796
CFD rook/warmte berekeningen voor de Randstad Rail boortunnel, TNO-CvB, 2001-CVB-R04697, Delft december 2001.
- [16] Centre d'Etudes des Tunnels (CETU), Evaluation of Memorial Tunnel CFD Simulations, Report for the Ministry of Transport and Public Works, The Netherlands, January 1999.
- [17] Rylands, S., Davis, P., McIntosh, A.C. and Charters, D.A. Predicting Fire and Smoke movement in tunnels using zone modelling. Proceedings of the 3rd International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels, 9th - 11th March, Nice, France, (Ed. A. Vardy), ITC / University of Dundee, 127-138, (1998). ISBN 1-901-808-033.

7 Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever:

Bouwdienst Rijkswaterstaat
Steunpunt Tunnelveiligheid
Griffioenlaan 2
Postbus 20.000
3502 LA Utrecht

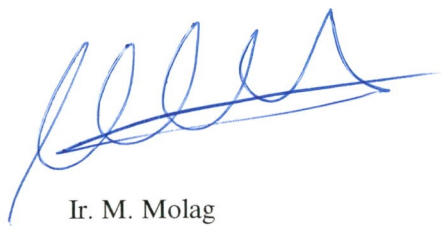
Namen en functies van de projectmedewerkers:

Dr. F. Kootstra projectmedewerker
Ir. M. Molag projectleider

Namen van instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed:

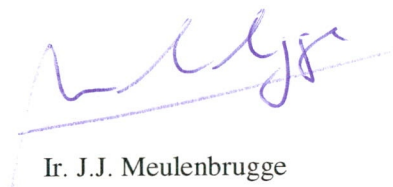
Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad:
oktober 2002 – oktober 2003

Ondertekening:



Ir. M. Molag
projectleider

Goedgekeurd door:



Ir. J.J. Meulenbrugge
afdelingshoofd

A Definities en terminologie

Brandgroei:

Voor de karakterisering van de brandgroei tijdens een brand wordt de volgende formule gebruikt:

$$W = a \cdot t^2 \quad (32)$$

waarin:

W brandvermogen in MW

a groeicoëfficiënt in W/s^2

t tijdsduur van de brandgroei in seconden

Door TNO-Bouw, Centrum voor Brandveiligheid (CvB) zijn de volgende waarden afgeleid:

'langzame' groei	$a = 3 \text{ W/s}^2$
'gemiddelde' groei	$a = 11 \text{ W/s}^2$
'snelle' groei	$a = 45 \text{ W/s}^2$

Smeulfase:

De tijd die voorafgaat aan de groeifase tijdens een brand. Door TNO-Bouw, Centrum voor Brandveiligheid (CvB) worden de volgende waarden voor de smeulfase op basis van expert meningen verondersteld:

'langzame' groei,	smeultijd: 120 seconden
'gemiddelde' groei,	smeultijd: 60 seconden
'snelle' groei,	smeultijd: 30 seconden

Flash-over:

Het moment waarop de brand overgaat van een lokale brand naar een brand in het gehele voertuig. Het vermogen van de brand neemt hierbij in zeer korte tijd sterk toe. Het tijdstip waarop de flash-over optreedt is afhankelijk van het moment waarop de ramen in het voertuig al of niet zijn gesprongen.

Op basis van expert judgement van het TNO-Bouw, Centrum voor Brandveiligheid (CvB) zijn tot de volgende tijdstippen voor flash-over en piekvermogens van de brand gekomen:

'langzame' groei:	flash-over: 1600 seconden (afh. van kwaliteit glas en enkel/dubbel glas), piekvermogen: max. 30 MW.
'gemiddelde' groei,	flash-over: 190 seconden (geen ruitbreuk), flash-over: 240 seconden (breuk van één ruit), flash-over: 800 seconden (breuk meerdere ruiten), piekvermogen: max. 30 MW
'snelle' groei,	flash-over: 150 seconden (breuk van één ruit), flash-over: 400 seconden (breuk meerdere ruiten), flash-over: 240 seconden (gemiddeld) piekvermogen: max. 60 MW