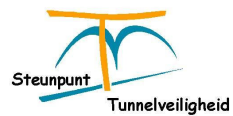




QRA-tunnels 2.0

Achtergronddocument

Datum 2 februari 2012
Status Definitief



Colofon

Uitgegeven door	RWS Steunpunt Tunnelveiligheid
Informatie	www.rws.nl/tunnelsafety
E-mail	sttv@rws.nl
Uitgevoerd door	RWS Steunpunt Tunnelveiligheid
Datum	2 februari 2012
Status	definitief
Versienummer	1
Documentnummer	4818-2012-0005

Inhoud

Inhoud	3
1 Inleiding.....	7
1.1 Algemeen	7
1.2 Risicoberekeningen	8
1.3 Referentiedocumenten	8
1.4 Leeswijzer	9
2 Opzet model.....	11
2.1 Algemeen	11
2.2 Kansenmodel	11
2.3 Gevolgenmodel	14
2.4 Risico	16
3 Invoervariabelen	17
3.1 Geometrie	17
3.2 Voorzieningen	18
3.3 Motorvoertuigen	21
3.4 Periode en verkeersintensiteiten	22
3.5 Verkeerssamenstelling	23
3.6 Gevaarlijke stoffen	23
3.7 File benedenstrooms	25
3.8 Incidentkans	27
3.9 Overige defaultwaarden	28
4 Tussenvariabelen.....	37
4.1 Incidentkansen	37
4.2 Verdeling voertuigen over perioden	37
4.3 Uitstroming gevaarlijke stoffen	38
4.4 Voertuigbranden	41
4.5 Tankbrand gevaarlijke stoffen	42
4.6 Brandgrootte	43
4.7 Filevorming	44
4.8 Detectie	46
4.9 Beschikbaarheid voorzieningen	48
4.10 Opstartsignaal	49
4.11 Blokkade vluchtdeur	55
4.12 Plaats incident	56
5 Gebeurtenissenboomanalyse	59
5.1 Gebeurtenis 'incident'	59
5.2 Gebeurtenis 'periode'	59
5.3 Gebeurtenis 'file benedenstrooms'	60
5.4 Gebeurtenis 'plaats'	60
5.5 Gebeurtenis 'snelheidsdetectie'	61
5.6 Gebeurtenis 'voertuig'	61
5.7 Gebeurtenis 'stofklasse'	62
5.8 Gebeurtenis 'uitstroming'	63
5.9 Gebeurtenis 'voertuigbrand'	64
5.10 Gebeurtenis 'tankbrand'	65
5.11 Gebeurtenis 'brandgrootte'	66
5.12 Gebeurtenis 'melding weggebruiker'	67
5.13 Gebeurtenis 'branddetectie'	68

5.14	Gebeurtenis 'vertraagde detectie'	68
5.15	Gebeurtenis 'beschikbaarheid ventilatie'	69
5.16	Gebeurtenis 'beschikbaarheid ontgrendelen'	69
5.17	Gebeurtenis 'beschikbaarheid afsluiten'	69
5.18	Gebeurtenis 'automatisch opstartsignaal'	70
5.19	Gebeurtenis 'actie operator'	70
5.20	Gebeurtenis 'blokkade'	71
6	De gevolgen van de scenario's, algemeen	73
6.1	Inleiding	73
6.2	Berekening 'directe' slachtoffers	73
6.3	Berekening 'extra' slachtoffers	73
6.4	Modellering 'kleine-kans-grote-gevolgen' slachtoffers, algemeen	74
6.4.1	Bepaling lengte benedenstroomse file	78
6.4.2	Bepaling lengte file bovenstrooms	79
6.4.3	Bepaling dichtheden in de verschillende gebieden	80
6.4.4	Start vluchten en vluchtproces	81
7	Gevolgenmodellering brandscenario's	83
7.1	Inleiding	83
7.2	De CFD-berekeningen	83
7.3	Invloed van warmtestraling	87
7.4	Invloed van rookgassen op vluchtgedrag	90
7.4.1	Inleiding	90
7.4.2	Verminderde vluchtsnelheid door rook	90
7.4.3	Immobiliteit door rookgasvergiftiging	92
7.4.4	Rookgasvergiftiging	96
7.4.5	Modellering van het concentratieverloop	98
7.4.6	De maximaal mogelijke vluchttijd	106
7.5	Schadelijke effecten van hoge temperaturen	108
7.5.1	Inleiding	108
7.5.2	Resultaten CFD-berekeningen	108
7.5.3	Modellering van het temperatuurverloop	110
7.5.4	De temperaturodos	115
7.5.5	De maximaal mogelijke vluchttijd	115
7.6	Het aantal slachtoffers door rookgassen en temperatuur	117
7.6.1	De maximaal mogelijke vluchtafstand	118
7.6.2	Tunnels zonder vluchtdeuren	120
7.6.3	Tunnels met vluchtdeuren	122
7.6.4	Extra slachtoffers onder de niet-zelfredzame weggebruikers	129
8	Gevolgenmodellering scenario's met uitstroming gevaarlijke stoffen	131
8.1	Inleiding	131
8.2	Scenario's met explosieven	131
8.3	Scenario's met brandbare vloeistoffen	132
8.3.1	Plasvorming	133
8.3.2	Directe ontsteking: plasbrand	145
8.3.3	Vertraagde ontsteking	146
8.4	Scenario's met toxische vloeistoffen	149
8.4.1	Effecten bij vrijkomen, algemeen	149
8.4.2	Voorbeeldberekening LT2 (propylamine)	150
8.4.3	Toepassing in QRA-tunnels	154
8.5	Scenario's met brandbare gassen	154
8.5.1	Grote continue uitstroming, directe ontsteking	155
8.5.2	Grote continue uitstroming, vertraagde ontsteking	157

8.5.3	Kleine (niet-relevante) continue uitstromingen	158
8.5.4	Instantaan vrijkomen, koude BLEVE	159
8.5.5	Warme BLEVE	159
8.6	Scenario's met toxische gassen	161
8.6.1	Grote continue uitstroming	161
8.6.2	Kleine, 'niet-relevante' uitstroming	163
8.6.3	Instantaan vrijkomen	164
9	Berekening risico's.....	165
9.1	Inleiding	165
9.2	Verwachtingswaarde	165
9.3	Persoonlijk risico	166
9.4	Groepsrisico	166
	Referenties	168
	Bijlage A. Gebeurtenissenboom.....	171
	Bijlage B. Effectberekeningen branden	172
	Bijlage C. Toetsing vergelijkingen dispersie in tunnel aan open veld berekening	201
	Bijlage D. Bepaling ontstekingstijd.....	204

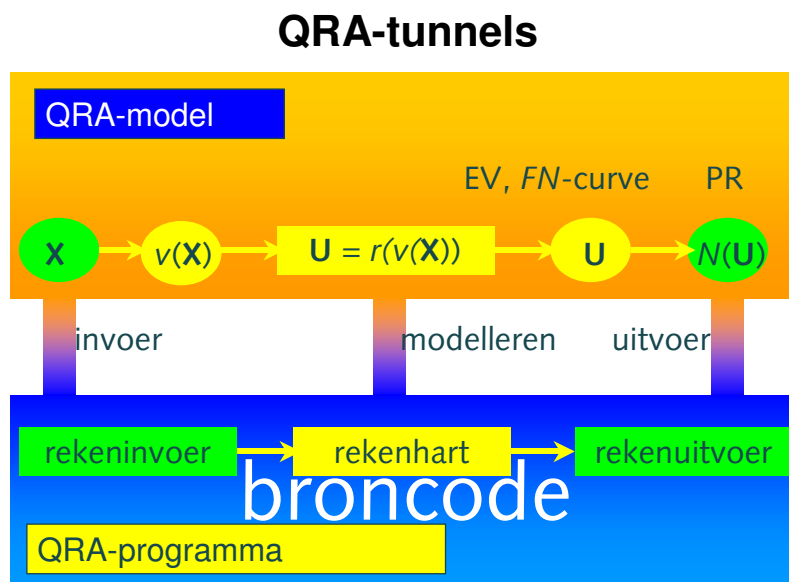
1 Inleiding

1.1 Algemeen

Voor de berekening van de risico's in tunnels voor wegverkeer heeft het Steunpunt Tunnelveiligheid van de Rijkswaterstaat een model voor kwantitatieve risicoanalyse ontwikkeld: QRA-tunnels¹. QRA staat voor Quantitative Risk Analysis en is de veel gebruikte afkorting voor een kwantitatieve risicoanalyse. In dit document wordt het model uitvoerig beschreven.

Het model QRA-tunnels is ontwikkeld voor de berekening van de risico's voor de weggebruikers in de tunnel.

QRA-tunnels bestaat uit een QRA-model en een QRA-programma (zie Figuur 1-1):



Figuur 1-1 Impressie van het model QRA-tunnels.

Er zijn twee documenten opgesteld: een Gebruikershandleiding en een Achtergronddocument. Dit is het *Achtergronddocument*, dat een stapsgewijze beschrijving van het QRA-model bevat. Het behelst de beschrijving van onder meer:

- de modelaannamen en de werking van het model;
- de door de gebruiker te verzamelen invoervariabelen X (waaronder de kansen) met bijbehorende literatuurverwijzingen naar de gegevensbronnen;
- een aantal in het programma uitgevoerde voorbewerkingen $v(X)$ (in het document tussenvariabelen genoemd);
- de formules r waarmee de voorbewerkte variabelen worden doorberekend;

¹ Tijdens de ontwikkeling en validatie was QRA-tunnels bekend onder de werktitel "RWSQRA 2.0".

- de uitvoervariabelen **U**;
- de in het programma nabewerkte uitvoer **N(U)** (in het document gebruikersuitvoer genoemd);
- de beperkingen van het QRA-programma.

De *Gebruikershandleiding* 1 bevat een beschrijving van de mogelijkheden en werkwijze van het QRA-programma, zoals de door gebruiker te verzamelen invoervariabelen en de (gebruikers)uitvoer.

In de risicoanalyse wordt waar mogelijk gebruik gemaakt van gevalideerde gegevensbronnen (bijvoorbeeld erkende databases) voor kansen en effecten. Daar waar geen literatuurgegevens voorhanden waren zijn de waarden voor kansen en effecten onderbouwd met de inschattingen door experts.

1.2 Risicoberekeningen

De in het model berekende risico's hebben alleen betrekking op de risico's ten gevolge van het gebruik van de tunnel. Risico's ten gevolge van externe invloeden, zoals vallende ankers, zinkende schepen, aardbevingen en dergelijke, zijn niet in het model opgenomen.

Bij de bepaling van de risicokentallen worden de kansen en gevolgen van een groot aantal scenario's (ook wel gebeurtenissen genoemd) bepaald. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een gebeurtenissenboom. Hierin worden alle bekende relevante (ongewenste) gebeurtenissen opgenomen die bepalend zijn voor het risico.

Het gevolg dat per incident wordt beschouwd is het aantal weggebruikers dat overlijdt ten gevolge van het incident.

Bij tunnels is het kenmerkende de zijwaartse en verticale opsluiting die vooral bij een voertuigbrand en/of een uitstroming van gevaarlijke stoffen een negatieve rol kan spelen; deze incidenten hebben kleine kansen maar potentieel grote gevolgen. Het model richt zich vooral op het berekenen van de risico's van deze incidenten. Incidenten zonder uitstroming van gevaarlijke stoffen en/of brand, de 'gewone' incidenten, zijn minder kenmerkend omdat de directe gevolgen niet veel zullen verschillen van de situatie op de open weg (hoewel de bereikbaarheid van de plaats van het incident en de beschikbare werkruimte wel verschillend zijn).

1.3 Referentiedocumenten

Specifieke informatie over incidenten met gevaarlijke stoffen in tunnels is slechts heel beperkt aanwezig. Daarom wordt voor het berekenen van de risico's ten gevolge van het vrijkomen van gevaarlijke stoffen in tunnels veel gebruik gemaakt van onderzoeken op het gebied van (de kwantitatieve risicoanalyses voor) de externe veiligheid. Bij externe veiligheid wordt de veiligheid beschouwd van de aanwezigen in de omgeving van, maar niet deelnemend aan, de risicoveroorzakende activiteit. Hiervoor bestaan al rekenmethoden die beschreven zijn in de gekleurde boeken van de Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen (PGS):

- het Groene Boek [2] PGS 1 'Methoden voor het bepalen van mogelijke schade' waarmee schade aan mensen en goederen door het vrijkomen van gevaarlijke stoffen kan worden berekend;
- het Gele Boek [3] PGS 2 'Methods for the calculation of physical effects' waarmee de fysische effecten van vrijgekomen gevaarlijke stoffen kunnen worden berekend;
- het Paarse Boek [4] PGS 3 'Guidelines for quantitative risk assessment'; hierin zijn opgenomen onderdelen die nog niet zijn opgenomen in de overige gekleurde boeken én onderdelen die wel

eerder in één van de andere gekleurde boeken waren opgenomen maar sindsdien door nieuw onderzoek of gewijzigde inzichten veranderd zijn;

- het Rode Boek [5] PGS 4 'Methods for determining and processing probabilities' voor het bepalen en verwerken van kansen.

Deze publicaties hebben betrekking op het vrijkomen van gevaarlijke stoffen in de atmosfeer uit zowel industriële installaties, opslagfaciliteiten als transportmiddelen.

Daarnaast zijn voor de externe veiligheid van het transport van gevaarlijke stoffen over de weg ook nog aanvullende onderdelen van de rekenmethodiek beschreven in andere documenten, onder andere:

- 'Systematiek voor indeling van stoffen ten behoeve van risicoberekeningen bij het vervoer van gevaarlijke stoffen' [6] waarin de indeling van gevaarlijke stoffen in, bij de risicoberekeningen gehanteerde, stofcategorieën wordt beschreven en per categorie een voorbeeldstof wordt gegeven.
- 'Fundamenteel onderzoek naar kanscijfers voor risicoberekeningen bij wegtransport gevaarlijke stoffen' [7] waarin de afleiding van de vervolgekans op uitstroming gegeven een letselongeval wordt beschreven.
- 'Handleiding risicoberekening wegtransport gevaarlijke stoffen: bepaling faalkansen' [8] met een samenvatting van wat in [7] is opgenomen en de wijze waarop de ongevalkans van een wegdeel kan worden bepaald.
- 'Actualisatie uitstroomberekeningen wegtransport' [9] waarin een actualisatie van [7] en [8] is opgenomen.

1.4 Leeswijzer

Het achtergronddocument is als volgt opgebouwd:

- In hoofdstuk 2 wordt de opzet van het model beschreven.
- In hoofdstuk 3 worden de (door de gebruiker te verzamelen) invoervariabelen, de daaruit berekende variabelen en de aangehouden default of vaste waarden beschreven.
- In hoofdstuk 4 worden de voorbewerkingen beschreven.
- Hoofdstuk 5 bevat de beschrijving van de gebeurtenissenboom.
- In hoofdstuk 6, 7 en 8 is beschreven hoe de gevolgen van de scenario's worden berekend. In hoofdstuk 6 worden de algemene principes toegelicht. Hoofdstuk 7 gaat in op de gevolgen van brand en in hoofdstuk 8 worden de gevolgen van incidenten met gevaarlijke stoffen uitgewerkt.
- In hoofdstuk 9 is aangegeven hoe het risico wordt berekend.
- Tenslotte is een referentielijst toegevoegd en een aantal bijlagen.

Voor een toelichting op de in het rapport beschreven veiligheidsvoorzieningen en veiligheidsonderwerpen zoals langsventilatie, detectievoorzieningen, communicatiemiddelen, brandbescherming en vluchtvoorzieningen wordt verwezen naar de VRC-Richtlijnen [10].

2 Opzet model

2.1 Algemeen

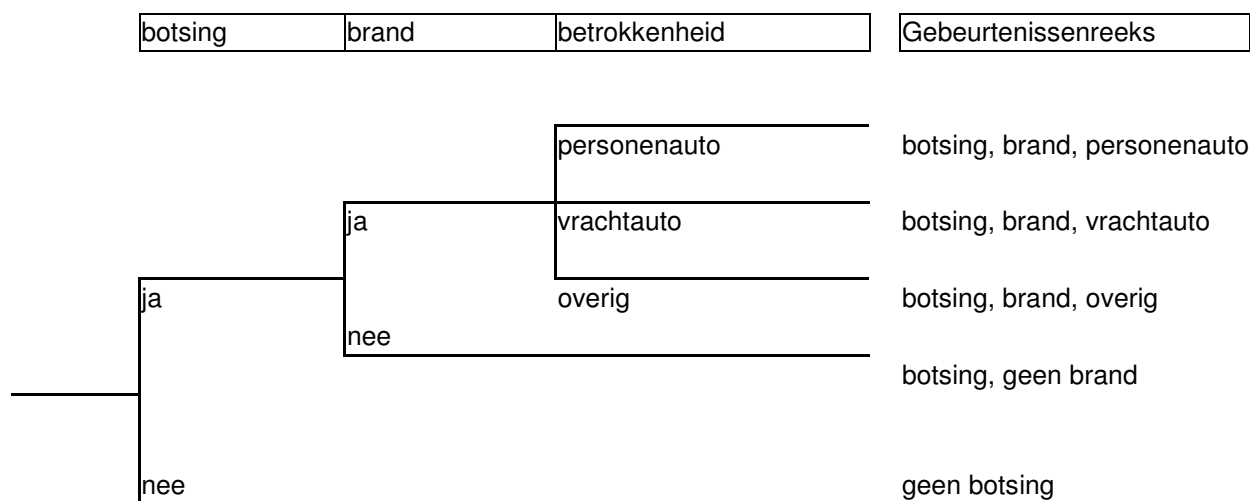
QRA-tunnels bestaat uit:

- het kansenmodel, gebaseerd op een gebeurtenissenboomanalyse, voor de berekening van de kans van optreden van elk ongevalsscenario;
- het gevolgenmodel voor het berekenen van een effect per ongevalsscenario;
- een model voor het berekenen van het risico;
- een beschrijving van de invoer en de uitvoer.

2.2 Kansenmodel

Het kansenmodel in QRA-tunnels bestaat uit één gebeurtenissenboom. Met de gebeurtenissenboom worden alle voor het risico relevante scenario's in beeld gebracht. Deze gebeurtenissenboom heeft de structuur van 20 opeenvolgende *vervolggebeurtenissen of condities*, in dit document kortweg *gebeurtenissen* genoemd.

Voor de begripsvorming volgt nu een vereenvoudigde weergave van deze structuur. Figuur 2-1 toont een voorbeeld met twee fictieve² vervolgebeurtenissen (een botsing en een brand na een botsing) en een conditie (het type voertuig betrokken bij de door brand gevolgde botsing). Er zijn in dit voorbeeld vijf mogelijke verlopen van de gebeurtenissenreeks (scenario's) aangegeven.

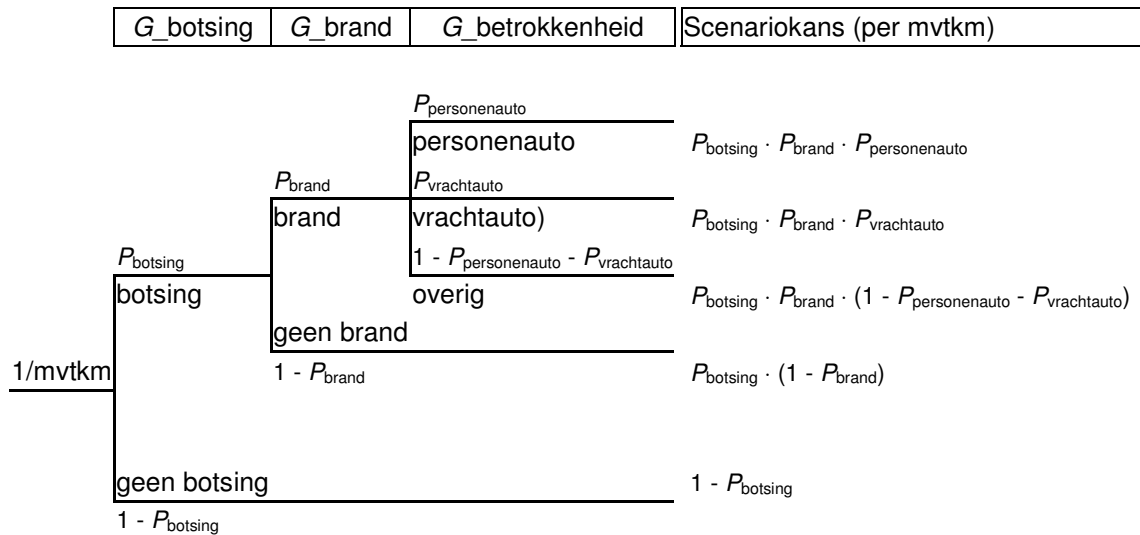


Figuur 2-1: Voorbeeld vereenvoudigde gebeurtenissenboomstructuur.

Van elk scenario (gebeurtenissenreeks) wordt de kans bepaald voor één motorvoertuigkilometer (mvtkm). Bijvoorbeeld de gebeurtenissenreeks 'botsing, brand, personenauto' heeft een kans van optreden die bestaat uit het product van de kans P_{botsing} , de kans P_{brand} en de kans $P_{\text{personenauto}}$. Op elk

² Met fictief wordt bedoeld dat dit eenvoudige voorbeeld weinig met het werkelijke model in QRA-tunnels van doen heeft !

knooppunt in de boom dienen de vertakkingen alle, en elkaar uitsluitende, gebeurtenissen te bevatten; dit betekent dat bij elke vertakking de som van de deelkansen 1 is. In Figuur 2-2 zijn de kansen van het in Figuur 2-1 gegeven voorbeeld aangegeven. Ook is in Figuur 2-2 de gehanteerde conventie zichtbaar om de verschillende, elkaar uitsluitende, takken bij een gebeurtenis te duiden: $G_{botsing}$ = botsing, $G_{botsing}$ = geen botsing, G_{brand} = brand, G_{brand} = geen brand en ten slotte $G_{betrokkenheid}$ = personenauto, $G_{betrokkenheid}$ = vrachtauto of $G_{betrokkenheid}$ = overig.



Figuur 2-2: Voorbeeld van een vereenvoudigde gebeurtenissenboomstructuur met kansen.

Voor het werkelijke model in QRA-tunnels geldt - geheel in lijn met het zojuist beschreven vereenvoudigde fictieve voorbeeld - dat de kans van optreden van elk scenario bestaat uit de vermenigvuldiging van een reeks van 20 conditionele kansen behorend bij de 20 beschouwde gebeurtenissen (zie Tabel 2-1). In de voorloper van QRA-tunnels, RWSQRA versie 1 [11], bestond de gebeurtenissenboom uit 16 takken. Het verschil tussen RWSQRA versie 1 en QRA-tunnels zit voornamelijk in het toevoegen van de diverse detectiemogelijkheden en de door de operator te nemen maatregelen. De gebeurtenissenboom uit [11] heeft zijn oorsprong in 'Gebeurtenissenboom tunnel risicoanalysemodel' [12] waarvan ook in [13] gebruik is gemaakt. Elke conditionele kans op een bepaalde gebeurtenis wordt óf rechtstreeks ingevoerd, óf uitgerekend met een formule. In deze formules worden tunnelspecifieke en generieke variabelen gecombineerd. Alle tunnelspecifieke en een groot aantal generieke variabelen zijn door de gebruikers veranderbaar via de invoervariabelen (**X** uit Figuur 1-1). De overige generieke variabelen (de zogenaamde vaste waarden) zijn slechts veranderbaar door de ontwikkelaars van QRA-tunnels.

Tabel 2-1 Gebeurtenissen in QRA-tunnels

No	G_Gebeurtenis	Onderverdeling naar:
1	$G_{incident}$	type incident: <ul style="list-style-type: none"> • pech, • ongeval met uitsluitend materiële schade, • letselongeval, • geen incident.

No	G_Gebuurtenis	Onderverdeling naar:
2	G_periode	periode van een etmaal: <ul style="list-style-type: none"> • spits, • dag, • nacht.
3	G_fileben	file (nagenoeg stilstaand verkeer) benedenstrooms van het incident: <ul style="list-style-type: none"> • wel een benedenstroomse file, • geen benedenstroomse file.
4	G_plaats	de plaats van het incident <ul style="list-style-type: none"> • in het midden van het opgaande deel, • in het midden van het horizontale deel, • in het midden van het neergaande deel, • in de file (bij een benedenstroomse file).
5	G_snelde	snelheidsdetectie: <ul style="list-style-type: none"> • wel snelheidsdetectie, • geen snelheidsdetectie.
6	G_voertuig	het incident veroorzakende voertuig: <ul style="list-style-type: none"> • personenauto, • bus, • vrachtauto met geen of niet-brandbare lading, • vrachtauto met brandbare lading, • vrachtauto met explosieven, • tankauto met gevaarlijke stoffen.
7	G_stofklasse	stofklassen voor tankauto's met gevaarlijke stoffen: <ul style="list-style-type: none"> • brandbare vloeistoffen (LF), • brandbare tot vloeistof verdichte gassen (GF), • toxische vloeistoffen (LT), • toxische tot vloeistof verdichte gassen (GT).
8	G_uitstroming	grootte van de uitstroming voor <i>gassen</i> : <ul style="list-style-type: none"> • instantane uitstroming tot vloeistof verdicht gas door opwarming, • instantane uitstroming tot vloeistof verdicht gas door impact, • continue uitstroming tot vloeistof verdicht gas naar achter, • continue uitstroming tot vloeistof verdicht gas naar voor, • 'niet-relevante' uitstroming tot vloeistof verdicht gas naar achter, • 'niet-relevante' uitstroming tot vloeistof verdicht gas naar voor, • geen uitstroming tot vloeistof verdicht gas of < 100 kg. <p>of, grootte van de uitstroming voor <i>vloeistoffen</i>:</p> <ul style="list-style-type: none"> • instantane vloeistof uitstroming, • grote continue vloeistof uitstroming, • kleine continue vloeistof uitstroming, • geen uitstroming vloeistof of < 100 kg.
9	G_vtgbrand	incidenten die wel of niet resulteren in een voertuigbrand (alleen als de voertuigbetrokkenheid bij een incident (3) niet gelijk is aan een tankauto): <ul style="list-style-type: none"> • brand, • geblust, • geen brand.

No	G_Gebeurtenis	Onderverdeling naar:
10	G_tankbrand	incidenten met uitstroming van gevaarlijke stoffen uit tankauto's die wel of niet resulteren in ontsteking van de uitgestroomde stof: <ul style="list-style-type: none"> • directe ontsteking, • vertraagde ontsteking, • geen ontsteking.
11	G_brandgrootte	brandgrootte: <ul style="list-style-type: none"> • 5 MW, • 10 MW, • 25 MW, • 50 MW, • 100 MW, • 200 MW.
12	G_melding	melding van een incident door een weggebruiker: <ul style="list-style-type: none"> • wel melding, • geen melding.
13	G_branddet	branddetectie: <ul style="list-style-type: none"> • wel branddetectie, • geen branddetectie.
14	G_vertrdet	wel of geen vertraagde detectie van een in eerste instantie niet opgemerkt ernstig incident: <ul style="list-style-type: none"> • wel vertraagde detectie, • geen vertraagde detectie.
15	G_ventilatie	wel of geen beschikbaarheid van de ventilatie: <ul style="list-style-type: none"> • wel ventilatie, • geen ventilatie.
16	G_ontgrendelen	wel of niet kunnen ontgrendelen (of het ontgrendeld zijn) van de vluchtdeuren: <ul style="list-style-type: none"> • wel ontgrendeld, • geen ontgrendeld.
17	G_afsluiten	wel of geen beschikbaarheid afsluiten: <ul style="list-style-type: none"> • wel afsluiten, • geen afsluiten.
18	G_autostart	wel of geen automatisch opstartsignaal: <ul style="list-style-type: none"> • wel een automatisch opstartsignaal, • geen automatisch opstartsignaal.
19	G_operator	wel of niet nemen van actie door de operator (uitgesplitst naar vier verschillende mogelijke momenten na het incident): <ul style="list-style-type: none"> • het activeren van de calamiteitenknop, • handbediening inclusief ontgrendelen van de vluchtdeur, • handbediening zonder ontgrendelen van de vluchtdeur, • geen actie.
20	G_blokkade	wel of geen blokkade van een vluchtdeur <ul style="list-style-type: none"> • wel blokkade, • geen blokkade.

2.3 Gevolgenmodel

Voor elk scenario wordt het aantal weggebruikers dat overlijdt ten gevolge van het incident berekend.

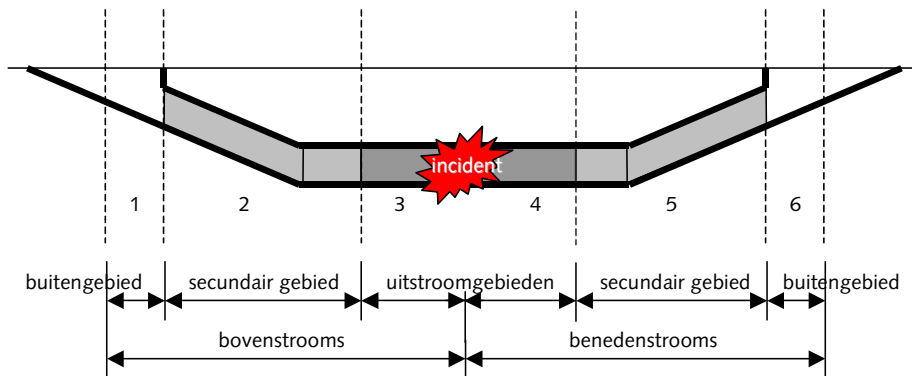
Bij het aantal weggebruikers dat overlijdt ten gevolge van het incident worden drie 'typen' slachtoffers onderscheiden:

- de 'directe' slachtoffers: de 'normale' verkeersdoden. Aangenomen wordt dat de invloed van de tunnel op het aantal slachtoffers, gegeven een letselongeval, verwaarloosbaar is. De tunnel is wel van invloed op de kans op letselongevallen!
- de 'extra' slachtoffers: de beknelden en/of zwaar gewonden in de direct bij een brand betrokken voertuigen die niet tijdig kunnen worden bevrijd en daardoor omkomen. Aangenomen wordt dat in de tunnel de bevrijding uit voertuigen wordt bemoeilijkt ten opzichte van de open weg.
- de 'kleine-kans-grote-gevolgen' slachtoffers: de niet direct bij het incident betrokken weggebruikers die, ten gevolge van de effecten van brand en/of uitstroming van gevaarlijke stoffen, niet tijdig kunnen vluchten en daardoor omkomen. De invloed van de tunnel op het aantal slachtoffers is hierbij zeer groot.

Het aantal 'directe' slachtoffers wordt bepaald met het gemiddeld aantal doden per letselongeval.

Het aantal 'extra' slachtoffers wordt, voor letselongevallen met brand, bepaald op basis van het gemiddeld aantal gewonden per letselongeval, de kans om bekneld of zwaar gewond te raken en de kans op overlijden voor een beknelde of zwaar gewonde.

Het aantal kleine-kans-groot-gevolg' slachtoffers wordt bepaald door de tunnel in te delen in zes stukken, 3 stukken voor het ongeval en 3 stukken erachter. Een voorbeeld hiervan wordt gegeven in Figuur 2-3. Op dezelfde wijze wordt de tunnel ook in 6 stukken verdeeld, als het ongeval op het opgaande of neergaande deel is.



Figuur 2-3 Deelgebieden voor de incidentlocatie op het horizontale deel van de tunnelbuis.

De lengte van de delen L_1 t/m L_6 is afhankelijk van de ongevalsscenario's. Ook de overlijdenskans in deze gebieden is afhankelijk van de scenario's. Bij sommige (explosie) scenario's is het ook mogelijk dat er nog slachtoffers in de andere verkeersbuizen vallen. Dit wordt in de hoofdstukken 7 en 8 uitgewerkt voor respectievelijk branden en vrijkomen gevaarlijke stoffen. Het algemene principe wordt toegelicht in hoofdstuk 6. In dat hoofdstuk wordt ook uitgewerkt hoeveel personen er zich in de verschillende tunneldelen bevinden (o.a. afhankelijk van de locatie van het ongeval, de snelheid waarmee de tunnel wordt afgesloten en de verkeersintensiteit).

Bij de berekening van het aantal slachtoffers ten gevolge van brand (hoofdstuk 7) wordt gebruik gemaakt van CFD-berekeningen die voor verschillende brandgroottes zijn uitgevoerd. Van de CFD-berekening worden de volgende waarden afgeleid:

- het tijdstip waarop men de brand waarneemt op afstand x vanaf de brand en start met vluchten (als men nog niet eerder daartoe is aangezet door de operator);
- het tijdstip waarop men op afstand x vanaf de brand hinder krijgt van de rook en hierdoor aanzienlijk langzamer zal vluchten;
- het gebied vanaf de brand waarbinnen hinder bestaat door warmtestraling;
- de beschikbare tijd op afstand x vanaf de brand totdat men bezwijkt (= niet meer in staat om verder te vluchten) door te hoge rookgasconcentratie;

- de beschikbare tijd op afstand x vanaf de brand totdat men bezwijkt (= niet meer in staat om verder te vluchten) door te hoge temperaturen.

Dit wordt vergeleken met de benodigde tijd op locatie x om de vluchtdeuren te bereiken. Dit leidt uiteindelijk tot de berekening van het aantal dodelijke slachtoffers per tunneldeel. Voor alleen reizende niet-zelfredzame weggebruikers wordt er vanuit gegaan dat deze niet zelf vluchten, maar moeten worden gered. In het model wordt aangenomen dat dit pas na een uur gebeurt. Bij scenario's waarbij de beschikbare tijd korter is dan een uur, wordt daarom verondersteld dat alle aanwezige, niet zelfredzame personen zijn overleden.

Voor de scenario's met gevaarlijke stoffen wordt een iets eenvoudiger benadering gehanteerd, waarbij per tunneldeel L_1 t/m L_6 over het gehele stuk een gelijke overlijdenskans wordt bepaald aan de hand van voorbeeldberekeningen.

2.4 Risico

Het risico wordt berekend voor één tunnelbuis. Wel worden in de berekening de slachtoffers die in andere tunnelbuizen vallen (ten gevolge van een incident in de beschouwde tunnelbuis) meegenomen. Voor het totale risico in een tunnel met meer dan één tunnelbuis dient dus voor elke tunnelbuis het risico te worden berekend en dienen de risico's van elke tunnelbuis bij elkaar te worden opgeteld.

Voor elk beschouwd scenario wordt zowel de kans per voertuigkilometer als het gevolg berekend, zie Tabel 2-2.

Tabel 2-2: Scenariokansen en gevolgen.

Scenario	Scenariokans per /mvtkm	Gevolg (doden)
1	P_1	E_{totaal1}
2	P_2	E_{totaal2}
...
M	P_M	E_{totaalM}

Het risico wordt uitgedrukt in de volgende risicokentallen:

- Verwachtingswaarde: dit is het verwachte aantal slachtoffers dat per jaar in de desbetreffende tunnelbuis valt. Dit wordt bepaald door voor elk scenario kans en effect met elkaar te vermenigvuldigen, vervolgens al deze producten bij elkaar op te tellen en daarna te vermenigvuldigen met het aantal in de tunnelbuis gereden voertuigkilometers per jaar.
- Persoonlijk risico: Het persoonlijk risico geeft de kans per, in de tunnelbuis afgelegde, kilometer voor een weggebruiker om in de tunnel te overlijden als gevolg van een incident in de betreffende tunnelbuis.
- Het groepsrisico is de kans per jaar dat in één keer een groep mensen komt te overlijden bij een ongeval in de tunnel. Het groepsrisico wordt in beeld gebracht in een grafiek, de zogenaamde f-N curve. In deze grafiek wordt de overschrijdingsfrequentie $f(N)$ van ongelukken met N of meer doden op een dubbellogaritmische schaal weergegeven.

In hoofdstuk 9 wordt verder toegelicht hoe deze risicokentallen worden bepaald.

3 Invoervariabelen

Belangrijke variabelen voor de interne veiligheid van een tunnel zijn onder andere de geometrie van de tunnel (lengte, breedte, hoogte, helling), de voorzieningen in de tunnel en de intensiteit en samenstelling van het verkeer. Bij voorzieningen moet in dit verband worden gedacht aan die voorzieningen in de tunnel die mede bepalend zijn voor de effecten van incidenten.

De waarden van deze variabelen dienen door de gebruiker te worden ingevoerd. De invoervariabelen zijn onderverdeeld in de rubrieken:

- geometrie (zie paragraaf 3.1);
- voorzieningen (zie paragraaf 3.2);
- motorvoertuigen (zie paragraaf 3.3);
- periode en verkeersintensiteiten (zie paragraaf 3.4);
- verkeerssamenstelling (zie paragraaf 3.5);
- gevaarlijke stoffen (zie paragraaf 3.6)
- file benedenstrooms (zie paragraaf 3.7);
- incidentkans (zie paragraaf 3.8);
- overige defaultwaarden (zie paragraaf 3.9).

Zoveel mogelijk dienen de in te voeren waarden op basis van praktijkgegevens te worden bepaald!

De invoervariabelen worden in de tabellen getypeerd met een symbool, een omschrijving, een eenheid en een domein of functie. Met een domein $[a;b]$ wordt bedoeld dat $a \leq$ waarde invoervariabele $\leq b$; met $(a;b)$ wordt bedoeld dat $a <$ waarde invoervariabele $< b$ en met $(a;b]$ wordt bedoeld $a <$ waarde invoervariabele $\leq b$.

De invoer geldt voor één tunnelbuis!

De in dit hoofdstuk weergegeven tabellen bevatten naast de invoervariabelen ook de uit de invoerwaarden berekende variabelen en defaultwaarden. Voor deze variabelen is in de laatste kolom van de tabellen de functie $v(X)$ aangegeven (voorafgegaan door een = teken). De berekende waarden zijn in de tabellen rechts uitgelijnd in de kolom symbool (bijvoorbeeld L_{op}).

3.1 Geometrie

Tabel 3-1 bevat die deelverzameling van de totale reeks invoervariabelen met hun domein en de functies, op basis waarvan de geometrie van de tunnelbuis wordt gemodelleerd.

Tabel 3-1 Variabelen voor de geometrie.

symbool	omschrijving	eenheid	domein of functie $v(X)$
L_{buis}	lengte (gesloten deel) van de tunnelbuis	m	[80; 20000]
L_{neer}	lengte neergaand deel van de tunnelbuis ¹	m	[0; L_{buis}]
L_{hor}	lengte horizontale deel van de tunnelbuis	m	[0; $L_{buis} - L_{neer}$]
L_{op}	lengte opgaand deel van de tunnelbuis	m	$= (L_{buis} - L_{hor} - L_{neer})$
B_{buis}	breedte van het wegdek (tussen opstaande randen)	m	[3; 30]
L_{hart}	hart-op-hart afstand van de vluchtdeuren ²	m	[30; L_{buis}]
N_{rij}	aantal rijstroken in de tunnelbuis	-	[1; 6]
$N_{tot-rijstroken}$	Totaal aantal rijstroken in de tunnelbuizen voor verkeer van de tunnel ³	-	[N_{rij} ; 30]
N_{vlucht}	aantal vluchtstroken in de tunnelbuis	-	[0; 2]

Toelichting bij Tabel 3-1:

1. Het gaat hier om de lengte van dat deel van de tunnel dat een neergaande helling heeft in de rijrichting. Geadviseerd wordt om hellingen kleiner dan 1% niet als helling aan te merken.
2. Wanneer de tunnelbuis géén vluchtdeuren heeft dient hier de lengte van de tunnelbuis te worden ingevoerd.
3. Het gaat hierbij om het totaal aantal rijstroken in één tunnelconstructie. Deze variabele is van belang in verband met het berekenen van de gevolgen van scenario's (explosies, bezwijken tunnelconstructie) waarbij ook effecten in naastliggende tunnelbuizen optreden (het betreft niet een risicoberekening van die andere buizen!).

3.2 Voorzieningen

Een aantal voorzieningen heeft direct invloed op (de gevolgen van) incidenten. Met QRA-tunnels kunnen tunnels met en tunnels zonder deze voorzieningen worden doorgerekend. Voor een toelichting van de hier beschreven voorzieningen wordt verwezen naar de VRC-Richtlijnen [10].

Controlekamer met een operator

De aanwezigheid of afwezigheid van een operator (in een controlekamer) is van belang omdat een operator, na detectie van een incident, acties kan nemen. De te nemen acties zullen afhangen van de ernst van het incident. Bij kleine incidenten (bijvoorbeeld een voertuig dat met pech stopt) zal de actie van de operator kunnen zijn: de rijstrook waarop het incident heeft plaatsgevonden afkruisen, de hulpdienst waarschuwen en op de andere rijstroken met behulp van matrixborden een snelheidsbeperking instellen. Bij zeer ernstige incidenten (bijvoorbeeld een brand of een uitstroming van een gevaarlijke stof) zal de actie van de operator (voor zover mogelijk en/of nodig) kunnen bestaan uit: het direct afsluiten van één of meer verkeersbuizen, het waarschuwen van de overheidshulpdiensten, het aanzetten van de ventilatie, het ontgrendelen van de vluchtdeuren, het opstarten van de overdruk in het vluchtkanaal en het oproepen tot vluchten van de weggebruikers met een luidsprekersysteem.

In het model wordt impliciet verondersteld dat een operator beschikt over visuele middelen (CCTV = Closed Circuit TeleVision) om de situatie in de tunnel te kunnen beoordelen. Daarnaast is het van belang of de operator kan beschikken over middelen om boodschappen aan de weggebruikers te kunnen geven (luidsprekers of inspreekmogelijkheid op het HF-systeem).

Naast het handmatig opstarten van voorzieningen kan de operator ook gebruik maken van een calamiteitenknop, indien aanwezig. Een calamiteitenknop is een knop (fysiek of op beeldscherm) die een groepscommando inschakelt waardoor met één handeling alle bij een calamiteit benodigde commando's worden gegeven en de daarbij behorende acties worden gestart. Voor het QRA model is het vooral van belang of bij het gebruik van de calamiteitenknop: de ventilatie wordt gestart, de tunnelbuis wordt afgesloten en of (zonodig) de vluchtdeuren worden ontgrendeld; dit dient daarom bij de invoer te worden aangegeven.

Daarnaast is het mogelijk dat voorzieningen automatisch worden gestart na een melding van een detectiesysteem. Door het bewust inbouwen van een beperkte tijdvertraging bij het starten van deze voorziening(en) kan de operator de mogelijkheid worden geboden om het automatisch opstarten af te breken door het gebruik van een resetknop. Deze mogelijkheid is vooral van belang om het onnodig opstarten van energievretende voorzieningen, zoals ventilatie, te voorkomen.

Voor het automatisch opstarten van voorzieningen zijn in het model de volgende mogelijkheden opgenomen:

- automatisch opstarten aangestuurd door snelheidsdetectie;
- automatisch opstarten aangestuurd door branddetectie.

En voor de op te starten voorzieningen:

- het starten van de ventilatie;
- het ontgrendelen van de vluchtdeuren.

Riolering

De aanwezigheid van een riolering heeft effect op de plasgrootte van vloeistofuitstromingen. De capaciteit van de riolering is daarom invoer voor het model. Bij uitstromingen zal echter altijd een deel van de uitstroming als plas in de tunnel achter blijven. De vloeistof zal immers vanaf de incidentlocatie eerst naar de zijkant van de tunnelbuis moeten stromen, voordat de vloeistof het riool in kan lopen. Daarbij zal de plasgrootte op een opgaande of neergaande helling groter zijn dan op een horizontaal deel. Bij instantane uitstromingen (het in één keer vrijkomen van de gehele inhoud) van een vloeistof zal het effect van de riolering op de plasgrootte véél beperkter zijn dan bij uitstromingen uit een gat. De vloeistof zal zich namelijk met een zo grote snelheid in de tunnelbuis verspreiden dat er maar weinig vloeistof direct de riolering in zal stromen.

Blusvoorzieningen

Blusvoorzieningen voor de brandweer hebben doorgaans geen effect op het aantal slachtoffers, want bij ernstige incidenten (brand en/of uitstroming van een gevaarlijke stof) zullen de effecten van het incident na aankomst van de brandweer (en andere hulpdiensten) al zo ernstig zijn dat de weggebruikers óf veilig (gevlucht of veilig bovenstrooms van het incident wanneer de ventilatie is ingeschakeld) óf dood zijn. Wel kan in het model rekening worden gehouden met de mogelijkheid dat een brand wordt geblust door weggebruikers (met de eventueel in de tunnel aanwezige blusmiddelen voor weggebruikers).

Ventilatie

Met langsventilatie kunnen weggebruikers bovenstrooms van een brand worden beschermd tegen de gevolgen van die brand.

Afsluiten tunnelbuis

Indien een ernstig incident in de tunnel heeft plaatsgevonden zal de operator, indien mogelijk, de betreffende verkeersbuis afsluiten. Omdat het aantal weggebruikers dat na het incident nog de tunnel inrijdt bepalend is voor het aantal aanwezigen bovenstrooms van het incident, zijn het tijdstip en de effectiviteit van het sluiten van de verkeersbuis (de wijze van afsluiten) in te stellen in QRA-tunnels.

Vluchtdeuren

In de meeste Nederlandse tunnels leiden de vluchtdeuren naar een middenkanaal, soms direct naar de naastgelegen verkeersbuis. Van belang is of de vluchtdeuren wel of niet vergrendeld zijn. Wanneer vluchtenden direct in de naastgelegen verkeersbuis komen, kan in de standaardprocedures van de tunnel zijn opgenomen dat het verkeer in de naastgelegen verkeersbuis eerst gestopt of naar de rechter rijstrook geleid moet zijn voordat de vluchtdeuren mogen worden ontgrendeld. Het tijdstip waarop de vluchtdeuren ontgrendeld worden (en de weggebruikers naar het middenkanaal of de andere verkeersbuis kunnen vluchten) is in de risicoanalyse opgenomen, omdat het vluchten van de aanwezigen in de incidentbuis pas effectief is nadat de vluchtdeuren ontgrendeld zijn. Voordat de vluchtdeuren ontgrendeld zijn kunnen aanwezigen in de tunnel alleen via de in- en uitrit van de tunnel in een veiliger omgeving komen.

Hittewerende bekleding

Hittewerende bekleding is van invloed op de kans op het verloren gaan van de constructie ten gevolge van een brand. Ook is er enige invloed op de verspreiding van rookgassen omdat hittewerende bekleding het afkoelen van rookgassen beperkt en daardoor de *stratificatie* bevordert. In het model wordt dit effect echter vooralsnog nog niet meegenomen.

Detectie

Met detectiemiddelen worden middelen bedoeld waarmee de operator wordt gealarmeerd en/of automatisch acties worden ondernomen. In het model worden onderscheiden: snelheidsdetectie, alarmering door een weggebruiker (met behulp van noodtelefoon of mobiele telefoon) en branddetectie. Aangezien het tijdstip van de detectie bepalend is voor het tijdstip waarop voorzieningen kunnen worden gestart, wordt per detectiesysteem de kans op en het tijdstip van aanspreken van de detectie gemodelleerd. Als invoer dient te worden aangegeven welke typen detectie in de tunnel aanwezig zijn.

In Tabel 3-2 zijn de invoervariabelen voor de voorzieningen opgenomen. Verlichting is geen rechtstreekse invoerwaarde in QRA-tunnels. Wel wordt impliciet rekening gehouden met de verlichting, omdat de verlichting, vooral bij de ingang van de tunnel, van invloed is op de ongevalfrequenties.

Tabel 3-2: Invoervariabelen voor de voorzieningen.

symbool	omschrijving	eenheid	domein
A_{oper}	houdt een operator (in controlekamer) toezicht op de tunnel?	-	ja; nee
A_{vent}	is een langsventilatiesysteem aanwezig?	-	ja; nee
A_{luid}	is een HF en/of luidsprekersysteem aanwezig? ¹	-	ja; nee
A_{bekl}	is hittewerende bekleding aanwezig?	-	ja; nee
A_{blus}	zijn brandblusmiddelen voor weggebruikers aanwezig?	-	ja; nee
A_{comm}	is alarmering door weggebruiker mogelijk (noodtelefoon in hulppost aanwezig en/of mobiele telefonie mogelijk)?	-	ja; nee
A_{snel}	is een snelheidsdetectiesysteem aanwezig? ²	-	ja; nee
$A_{brand,temp}$	is een branddetectie met temperatuurmeting aanwezig? ³	-	ja; nee
$A_{brand,CO}$	is een branddetectie met CO-meting aanwezig? ³	-	ja; nee
$A_{brand,zicht}$	is een branddetectie met zichtmeting aanwezig? ³	-	ja; nee
H_{zicht}	hart-op-hart afstand van zichtmeting	m	[0; 10 ⁴]
A_{calam}	beschikt de operator over een calamiteitenknop? ⁴	-	ja; nee
A_{sluit}	is het afsluiten van de tunnelbuis mogelijk?	-	matrixborden; verkeerslicht; verkeerslicht en slagboom; nee
$L_{afsluit}$	de afstand tussen de plaats waar de tunnelbuis wordt afgesloten en de ingang van de tunnelbuis	m	[0; 10 ⁴]
A_{deur}	zijn er vluchtdeuren in de verkeersbuis, en zo ja, welk type?	-	vergrendeld; altijd ontgrendeld; nee
$T_{vertontgr}$	tijdsvertraging bij het ontgrendelen van de vluchtdeuren ⁵	min	[0; 5]
K_{vlucht}	wand waarin de vluchtdeuren zijn aangebracht	-	middenwand; buitenwand
$C_{autventsnel}$	wordt ventilatiesysteem aangestuurd door snelheidsdetectie? ⁶	-	ja; nee
$C_{autventbrand}$	wordt ventilatiesysteem aangestuurd door branddetectie? ⁶	-	ja; nee
$C_{autdeursnel}$	worden vluchtdeuren ontgrendeld bij snelheidsdetectie? ⁷	-	ja; nee
$C_{autdeurbrand}$	worden vluchtdeuren ontgrendeld bij branddetectie? ⁷	-	ja; nee
$C_{calvent}$	start ventilatie bij gebruik calamiteitenknop? ⁴	-	ja; nee
$C_{calsluit}$	wordt de verkeersbuis afgesloten bij gebruik calamiteitenknop? ⁴	-	ja; nee
$C_{caldeur}$	worden vluchtdeuren ontgrendeld bij gebruik calamiteitenknop? ⁴	-	ja; nee
C_{riool}	capaciteit van de riolering ⁸	m ³ /min	[0; 15]; default 4
$T_{snelaut}$	tijdsduur tussen snelheidsdetectie en automatisch opstarten ⁶	min	[0; 5]

Toelichting bij Tabel 3-2:

1. Hier wordt een HF en/of luidsprekersysteem bedoeld dat wordt gebruikt om weggebruikers in de tunnel over een incident in de tunnel te informeren (én dus zonodig op te roepen tot vluchten).
2. Het gaat hierbij om een snelheidsonderschrijdingssysteem (een systeem waarbij, met behulp van lussen in het wegdek, wordt gemeten of voertuigen met een snelheid lager dan de ingestelde snelheid door de tunnel rijden in welk geval de operator met een signaal en een camerabeeld via de CCTV wordt gealarmeerd) of een stilstanddetectiesysteem (een systeem waarbij stilstand wordt gedetecteerd door middel van een camera die een signaal afgeeft wanneer (een element van) het beeld van een camera gedurende een bepaalde tijd niet wijzigt).
3. Bij meer dan één detectiesysteem berekent het programma welk detectiesysteem als eerste reageert.
4. In Nederland is het gebruikelijk dat de operator over een calamiteitenknop beschikt om, bij zeer ernstige incidenten, een aantal commando's gelijktijdig te geven. Het direct starten van de ventilatie, het afsluiten van de verkeersbuis en het ontgrendelen van de vluchtdeuren horen daarbij. Als $A_{calam} = \text{nee}$ dan geldt natuurlijk ook dat $C_{calvent} = \text{nee}$, $C_{calsluit} = \text{nee}$ en $C_{caldeur} = \text{nee}$.
5. Een tijdsvertraging bij het ontgrendelen van de vluchtdeuren kan nodig zijn indien moet worden gevluht naar een tunnelbuis waarin zich verkeer bevindt.
6. Het is in Nederland gebruikelijk bij het overschrijden van de ingestelde waarde van de zichtmeting (en bij tunnels waar dit nog van toepassing is: bij het overschrijden van de ingestelde waarde van de CO-meting) automatisch en direct de ventilatie aan te sturen; dus $C_{autventbrand} = \text{ja}$. Het automatisch opstarten van de ventilatie bij snelheidsdetectie wordt in Nederland bijna nooit toegepast (dus meestal $C_{autventsnel} = \text{nee}$). Het is alleen toegepast in de Westerscheldetunnel, een tunnel met relatief weinig verkeer; bij een snelheidsonderschrijding wordt, met tijdsvertraging, de ventilatie opgestart. Het toepassen in tunnels met veel verkeer wordt ontraden omdat verreweg de meeste meldingen geen ernstig incident zullen betreffen en daardoor een melding meestal zal leiden tot óf het onnodig opstarten óf tot het steeds moeten resetten van het opstartcommando, wat dan een soort automatische actie zal worden. Indien wordt gekozen voor het starten van de ventilatie bij snelheidsdetectie dan zal er veelal een tijdsvertraging worden ingebouwd om de operator voldoende tijd te geven om een 'vals' alarm te onderkennen en het opstartcommando te beëindigen. Aanbevolen wordt om, indien onvoldoende informatie beschikbaar is, 1 minuut als uitgangswaarde te hanteren.
7. Hiermee is het mogelijk om het ontgrendelen van de vluchtdeuren automatisch te laten geschieden bij een branddetectie of een snelheidsdetectie.
8. Indien er géén rioleringsysteem in de tunnelbuis aanwezig is dient hier 0 te worden ingevoerd. De mogelijkheid tot het automatisch afsluiten van de tunnelbuis na branddetectie of snelheidsdetectie is niet in het model ingebouwd; het ten onrechte afsluiten van tunnelbuizen dient namelijk te worden voorkomen.

3.3 Motorvoertuigen

Met de invoervariabelen uit Tabel 3-3 worden de snelheid van voertuigen en het aantal inzittenden van personenauto's gemodelleerd. Het gemiddeld aantal inzittenden van bussen en vrachtauto's is met behulp van defaultwaarden gemodelleerd. De afkorting 'mvt' staat voor motorvoertuig.

Tabel 3-3: Invoervariabelen en defaultwaarden voor de motorvoertuigen.

symbool	omschrijving	eenheid	domein	default
V_{auto}	gemiddelde snelheid van personenauto's	km/uur	[30; 120]	-
V_{bus}	gemiddelde snelheid van bussen	km/uur	[20; 100]	-
V_{vracht}	gemiddelde snelheid van vrachtauto's	km/uur	[20; 100]	-
N_{auto}	gemiddeld aantal inzittenden in een personenauto ¹	pers/mvt	[1; 3]	-
N_{bus}	gemiddeld aantal inzittenden in een bus ²	pers/mvt	[1; 50]	22

N_{vracht}	gemiddeld aantal inzittenden in een vrachtauto ²	pers/mvt	[1; 3]	1
$FR_{nietzelfredzm}$	fractie alleen reizende, niet zelfredzame weggebruikers ³	-	[0;1]	0,003
L_{auto}	gemiddeld ruimtebeslag personenauto in een file ⁴	m/mvt	[4;100]	6,73
L_{vracht}	gemiddeld ruimtebeslag vrachtauto of bus in een file ⁴	m/mvt	[10;100]	15,62

Toelichting bij Tabel 3-3:

1. Indien geen specifieke gegevens voor de beschouwde tunnel bekend zijn kan als eerste schatting worden aangehouden: 1,5 inzittenden per personenauto [14] en [15]; in [14] is aangegeven dat tijdens de spits gemiddeld 1,2 personen en tijdens het weekend gemiddeld 1,8 personen per personenauto aanwezig zijn (op basis van gegevens uit de periode 1992 – 1994). De waarde van 1,5 inzittenden per personenauto is als gemiddelde in Nederland aan de hoge kant (dus conservatief).
2. Indien geen specifieke gegevens voor de beschouwde tunnel bekend zijn kan als eerste schatting worden aangehouden: 22 inzittenden in een bus en 1 persoon in een vrachtauto. Deze waarden zijn aangehouden bij de eerste studies voor de Westerscheldetunnel en later ook gebruikt in andere studies.
3. Hiermee worden personen bedoeld die niet in staat zijn om zelfstandig naar een veilige plek te lopen én alleen reizen. Deze variabele wordt gebruikt bij de berekening van slachtoffers ten gevolge van branden. Met deze variabele kan onderscheid worden gemaakt tussen niet-zelfredzame weggebruikers met of zonder begeleider(s).
4. Deze waarden zijn ontleend aan [16]. In [16] zijn, op basis van metingen in de praktijk en ervaringscijfers, formules afgeleid voor de maximaal mogelijke verkeersdichtheid bij een bepaalde rijsnelheid.

3.4 Periode en verkeersintensiteiten

Met de variabelen uit Tabel 3-4 wordt het etmaal (en het verkeer) verdeeld in de periodes 'spits', 'nacht' en 'dag'.

Let op dat de gegevens betrekking moeten hebben op het jaar waarvoor de berekening wordt uitgevoerd!

Tabel 3-4: Invoervariabelen en functies voor de periode en de verkeersintensiteiten.

symbool	omschrijving	eenheid	domein of functie $v(X)$
T_{spits}	gemiddeld aantal uren 'spits' per etmaal in de tunnelbuis ¹	uur	(0; 12)
T_{nacht}	gemiddeld aantal uren 'nacht' per etmaal in de tunnelbuis ²	uur	(0; 12]
T_{dag}	aantal uren per etmaal dat het 'dag' (niet spits of nacht) is	uur	$= 24 - T_{spits} - T_{nacht}$
I_{buis}	verkeersintensiteit per jaar in de tunnelbuis ³	mvt/jaar	$[10^3; 10^9]$
I_{max}	maximale verkeerscapaciteit per rijstrook ⁴	mvt/uur	[1; 3000]
$I_{spitsuur}$	gemiddelde verkeersintensiteit in de buis per spitsuur ⁵	mvt/uur	$(0; I_{max} \cdot N_{rij}]$
I_{spits}	verkeersintensiteit tijdens de 'spits' per jaar	mvt/jaar	$= I_{spitsuur} \cdot T_{spits} \cdot 365$
$I_{nachtuur}$	gemiddelde verkeersintensiteit in de buis per nachtuur ⁵	mvt/uur	$(0; I_{max} \cdot N_{rij}]$
I_{nacht}	verkeersintensiteit tijdens de 'nacht' per jaar	mvt/jaar	$= I_{nachtuur} \cdot T_{nacht} \cdot 365$
I_{dag}	verkeersintensiteit tijdens de 'dag' per jaar	mvt/jaar	$= I_{buis} - I_{spits} - I_{nacht}$
I_{daguur}	gemiddelde verkeersintensiteit per 'daguur'	mvt/uur	$= I_{dag} / 365 / T_{dag}$

Toelichting bij Tabel 3-4:

1. In het QRA-model wordt onder 'spits' verstaan: de periode waarin er verhoudingsgewijs zeer veel verkeer door de tunnelbuis gaat. Omdat in het model is aangenomen dat 'spits' op alle dagen optreedt (dus ook in het weekend) dient een correctie te worden toegepast indien er in het weekend géén spits is. Bijvoorbeeld: als het in de beschouwde tunnelbuis gemiddeld 3 uur per werkdag spits is,

maar er géén spits is in het weekend, dan dient voor het aantal uren per etmaal dat het spits is: $3 \text{ (uur)} \cdot 5 \text{ (dagen)} / 7 \text{ (dagen)} = 2,14 \text{ (uur)}$ te worden ingevoerd.

- In het QRA-model wordt onder 'nacht' verstaan: de periode waarin er verhoudingsgewijs zeer weinig verkeer door de tunnelbuis gaat.
- De verkeersintensiteit betreft het totaal aantal motorvoertuigen per jaar voor de betreffende tunnelbuis.
- Aanbevolen wordt geen grotere waarde te nemen dan 2300.
- Deze waarde mag niet hoger zijn dan het product van de maximale capaciteit per rijstrook (I_{\max}) en het aantal rijstroken per buis (N_{rij} , invoerparameter uit Tabel 3-1).

3.5 Verkeerssamenstelling

Met de invoervariabelen uit Tabel 3-5 wordt de samenstelling van het verkeer (personenauto's, bussen en vrachtverkeer) per periode gemodelleerd.

Tabel 3-5: Variabelen voor de verkeerssamenstelling.

symbool	omschrijving	eenheid	domein of functie $v(\mathbf{X})$
$A_{\text{auto},s}$	fractie personenauto's (of motor) tijdens de 'spits' ¹	-	[0; 1]
$A_{\text{auto},d}$	fractie personenauto's (of motor) tijdens de 'dag' ¹	-	[0; 1]
$A_{\text{auto},n}$	fractie personenauto's (of motor) tijdens de 'nacht' ¹	-	[0; 1]
$A_{\text{bus},s}$	fractie bussen tijdens de 'spits' ¹	-	[0; 1]
$A_{\text{bus},d}$	fractie bussen tijdens de 'dag' ¹	-	[0; 1]
$A_{\text{bus},n}$	fractie bussen tijdens de 'nacht' ¹	-	[0; 1]
$A_{\text{vracht},s}$	fractie vrachtauto's tijdens de 'spits'	-	$= 1 - A_{\text{bus},s} - A_{\text{auto},s}$
$A_{\text{vracht},d}$	fractie vrachtauto's tijdens de 'dag'	-	$= 1 - A_{\text{bus},d} - A_{\text{auto},d}$
$A_{\text{vracht},n}$	fractie vrachtauto's tijdens de 'nacht'	-	$= 1 - A_{\text{bus},n} - A_{\text{auto},n}$
I_{vracht}	totaal aantal vrachtauto's per jaar in de tunnelbuis	mvt/jaar	$= A_{\text{vracht},s} \cdot I_{\text{spits}} + A_{\text{vracht},d} \cdot I_{\text{dag}} + A_{\text{vracht},n} \cdot I_{\text{nacht}}$

Toelichting bij Tabel 3-5:

- Indien geen tunnelspecifieke gegevens voorhanden zijn kan een inschatting worden gemaakt aan de hand van de volgende kencijfers. Het over een week gemiddelde percentage zwaar verkeer in Nederland is 15% [14]. Aanbevolen wordt om voor de fractie bussen 0,01 aan te houden. Overige ervaringsgegevens voor Nederland:
 - in de buurt van industrieterreinen is het percentage vrachtverkeer hoger dan op andere wegen;
 - op werkdagen is het percentage vrachtverkeer gemiddeld 17%, waarbij geldt: tijdens de 'spits' circa 8%, tijdens de 'dag' 12-15% en tijdens de 'nacht' 25-30%;
 - tijdens het weekend is het percentage vrachtverkeer circa 6%.

3.6 Gevaarlijke stoffen

Ten aanzien van het vervoer van gevaarlijke stoffen dient het aantal (te verwachten) transporten (in bulk) per jaar per gevaarsklasse (stofcategorie) te worden ingevoerd; hierbij hoeft door de gebruiker géén onderverdeling naar de periode van het etmaal te worden gemaakt.

Ook hier geldt: de invoer betreft het aantal transporten voor één tunnelbuis.

Aandachtspunt: Indien het transport van gevaarlijke stoffen (in tankauto's) deels niet door de tunnel mag plaatsvinden dan dient voor deze stoffen een omleidingroute aangewezen te zijn. De veiligheid van deze omleidingroute dient zonodig in een aparte risicoanalyse te worden beschouwd.

De hier beschreven risicoanalysemethodiek behandelt alleen het risico in de tunnel zelf.

Opmerking over de uitsplitsing in stofcategorieën van gevaarlijke stoffen:

Normaliter wordt voor gevaarlijke stoffen in risicoanalyses de stofcategorie in plaats van de stofklasse gebruikt. De stofcategorie geeft een nadere onderverdeling van de stofklassen, aangegeven met een nummer achter de stofklasse (LF, LT, GF of GT) waarbij de hoogte van het nummer toeneemt bij toenemende brandbaarheid of toxiciteit van de stof. In de risicoanalyse wordt, op de invoer van de transportaantallen van brandbare vloeistoffen na, een dergelijke nadere onderverdeling vooralsnog niet opgenomen. Argumenten hiervoor zijn:

- In tunnels wordt de verwachtingswaarde gedomineerd door de bij het incident zelf vallende doden en de voertuigbranden. De bijdrage van het transport van gevaarlijke stoffen aan de verwachtingswaarde is veel kleiner, zodat een eventuele onder/overschatting van het risico ten gevolge van het niet onderverdelen van de stofklassen in stofcategorieën geen groot effect heeft op de totale verwachtingswaarde.
- Brandbare vloeistoffen worden in de berekening beschouwd als LF2. Brandbare vloeistoffen van de stofcategorie LF1 (vooral dieselolie) hebben een lagere *dampspanning* en een hogere *ontstekingsenergie* dan de brandbare vloeistoffen uit stofcategorie LF2 (vooral benzine). LF1 vloeistoffen zijn daarom minder makkelijk tot ontbranding te brengen dan LF2; in kwantitatieve risicoanalyses wordt voor de stofcategorie LF1 een 15 maal lagere directe ontstekingskans aangehouden dan voor de stofcategorie LF2 en een vertraagde ontstekingskans van 0 gehanteerd [5]. In het QRA model worden de berekeningen uitgevoerd met de ontstekingskans van de stofcategorie LF2; het aantal transporten van LF wordt daarom berekend door $1/15^e$ van de ingevoerde LF1 transporten op te tellen bij de transportaantallen van stofcategorie LF2. Dit is dus een pessimistisch uitgangspunt met betrekking tot de kans op vertraagde ontsteking! De invloed van deze wijze van modelleren op het risico is gering. Uit de 'Risicoatlas wegtransport gevaarlijke stoffen' [17] blijkt dat, op basis van het aantal verreden voertuigkilometers, in Nederland van het LF-transport 42% bestaat uit LF1 en 58% uit LF2.
- Het onderscheid van de toxische vloeistoffen in stofcategorieën is met name gelegen in de toxiciteit en vluchtigheid van de vloeistof. Uit de 'Risicoatlas wegtransport gevaarlijke stoffen' [17] blijkt dat, op basis van het aantal verreden voertuigkilometers, in Nederland van het LT-transport 63% bestaat uit LT1, 36% uit LT2, 0,9% uit LT3 en 0,1% uit LT4. Alle toxische vloeistoffen worden in dit rekenmodel beschouwd als LT2; de, hierdoor ontstane, overschatting van het risico van de stofcategorie LT1 zal slechts gedeeltelijk teniet worden gedaan door de onderschatting van het risico van de stofcategorieën LT3 en LT4.
- Brandbare gassen worden in de berekening beschouwd als GF3. Het onderscheid van de tot vloeistof verdichte brandbare gassen in de stofcategorieën GF1 t/m GF3 is met name gelegen in de brandbaarheid en dampdruk; de mogelijke effecten in tunnels zijn niet erg verschillend. Uit de 'Risicoatlas wegtransport gevaarlijke stoffen' [17] blijkt dat, op basis van het aantal verreden voertuigkilometers, in Nederland van het GF-transport 1% bestaat uit GF1, 6% uit GF2 en 93% uit GF3. Het aandeel van de stofcategorie GF3 (vooral LPG) is dus veel groter dan het aandeel van de stofcategorieën GF1 en GF2, zodat modellering van de stofklasse GF met behulp van de stofcategorie GF3 een geringe overschatting van het risico zal opleveren.
- Toxische gassen worden in de berekening beschouwd als GT3. Het onderscheid van de tot vloeistof verdichte toxische gassen in stofcategorieën is met name gelegen in de toxiciteit en dampdruk. Grote uitstromingen zullen tot gaswolken met (lokaal) hoge concentraties van de stof (en dus verdrijving van de in de tunnel aanwezige normale atmosfeer) leiden, waarin de weggebruikers slechts korte tijd kunnen overleven. Uit de 'Risicoatlas wegtransport gevaarlijke stoffen' [17] blijkt dat, op basis van het aantal verreden voertuigkilometers, in Nederland van het GT-transport 4% bestaat uit GT1, 2% uit GT2, 73% uit GT3, 17% uit GT4 en 4% uit GT5. Gelet op deze verhoudingen zal de modellering van de stofklasse GT met behulp van de stofcategorie GT3 mogelijk tot een geringe onderschatting van het berekende risico leiden.

Let op: maak zo veel mogelijk gebruik van actuele en tunnelspecifieke gegevens!

Tabel 3-6: Invoervariabelen voor gevaarlijke stoffen.

symbool	omschrijving	eenheid	domein of functie $v(\mathbf{X})$
I_{expl}	aantal vrachtwagens geladen met explosieven (E) per jaar in de tunnelbuis ¹	mvt/jaar	$[0; 0,1/_{\text{vracht}}]$
I_{LF1}	aantal (volle) tankwagens met stofcategorie LF1 (brandbare vloeistof gevaarsklasse 1) per jaar in de tunnelbuis ²	mvt/jaar	$[0; 0,3/_{\text{vracht}}]$
I_{LF2}	aantal (volle) tankwagens met stofcategorie LF2 (brandbare vloeistof gevaarsklasse 2) per jaar in de tunnelbuis ²	mvt/jaar	$[0; 0,3/_{\text{vracht}}]$
I_{LF}	Tussenvariabele, aantal (volle) tankwagens met brandbare vloeistof (LF) per jaar in de tunnelbuis ²	mvt/jaar	$= I_{\text{LF1}} / 15 + I_{\text{LF2}}$
I_{LT}	aantal (volle) tankwagens met toxische vloeistof (LT) per jaar in de tunnelbuis ²	mvt/jaar	$[0; 0,1/_{\text{vracht}}]$
I_{GF}	aantal (volle) druktankwagens met brandbaar tot vloeistof verdicht gas (GF) per jaar in de tunnelbuis ²	mvt/jaar	$[0; 0,1/_{\text{vracht}}]$
I_{GT}	aantal (volle) druktankwagens met toxisch tot vloeistof verdicht gas (GT) per jaar in de tunnelbuis ²	mvt/jaar	$[0; 0,1/_{\text{vracht}}]$
I_{GS}	Tussenvariabele, totaal aantal (volle) tankwagens met een gevaarlijke stof per jaar in de tunnelbuis	mvt/jaar	$= I_{\text{LF}} + I_{\text{LT}} + I_{\text{GF}} + I_{\text{GT}}$

Toelichting bij Tabel 3-6:

1. Bij tellingen van het transport van gevaarlijke stoffen worden alléén de in bulk (in tankwagens) vervoerde gevaarlijke stoffen (op basis van *VN-nummer*) geteld, zodat deze tellingen géén gegevens opleveren betreffende het transport van explosieven (vuurwerk en andere explosieven). In het algemeen zullen de transportaantallen van explosieven te verwaarlozen zijn, maar op routes van en naar havens, munitiedepots, vuurwerkfabrieken en dergelijke kan het nodig zijn om rekening te houden met dergelijke transporten. Informatie over de aantallen transporten kan men verkrijgen door die bedrijven of organisaties te benaderen waarvan men weet of het vermoeden heeft dat ze explosieven transporteren.
2. Het gaat hierbij om de aantallen volle transporten per jaar. De transportaantallen gevaarlijke stoffen dienen op basis van zo recent mogelijke tellingen te worden bepaald. Tellingen die op basis van de telmethodiek [18] zijn uitgevoerd leveren de aantallen volle transporten per *stofcategorie* per jaar op de betreffende weg. Deze dienen vervolgens te worden herleid tot de aantallen per jaar per tunnelbuis. Om een indruk te geven van de vervoersstroom van gevaarlijke stoffen in Nederland: in [17] is aangegeven dat de gemiddelde verdeling van het aantal voertuigkilometers per stofcategorie van het bulktransport is: 80,8% LF, 15% GF, 3,8% LT en 0,4% GT. Uit meer recente tellingen [18] blijkt een verdeling van 82,8% LF, 14,5% GF, 2,6% LT en 0,1% GT.

3.7 File benedenstreams

Met de invoervariabelen uit Tabel 3-7 wordt de kans op een benedenstroomse file gemodelleerd. Met een benedenstroomse file wordt in dit verband bedoeld: (nagenoeg) stilstaand verkeer buiten de tunnel waarbij de staart van de file de tunnel ingroeit. De kans op een benedenstroomse file is van belang voor het berekenen van de gevolgen van branden. Bij een brand in een file is het voor de gevolgen belangrijk of de voertuigen benedenstreams van de brand de tunnel nog kunnen verlaten. Bij snelheden van 20 km/uur of meer zal men vrijwel zeker de rook voor kunnen blijven.

Tabel 3-7: Invoervariabelen voor de benedenstroomse file.

symbool	omschrijving	eenheid	domein
N_{spits}	het aantal keren (per etmaal) dat er tijdens de periode 'spits' (nagenoeg) stilstaand verkeer in de buis komt te staan ¹	1/etmaal	[0; 10]
N_{dag}	het aantal keren (per etmaal) dat er tijdens de periode 'dag' (nagenoeg) stilstaand verkeer in de buis komt te staan ¹	1/etmaal	[0; 10]
N_{nacht}	het aantal keren (per etmaal) dat er tijdens de periode 'nacht' (nagenoeg) stilstaand verkeer in de buis komt te staan ¹	1/etmaal	[0; 10]
T_{filemax}	maximale tijdsduur voor de opbouw van een benedenstroomse file in de tunnelbuis ²	min	(0; 60]
N_{filerij}	aantal rijstroken waarover een benedenstroomse file zich kan opbouwen in de tunnelbuis ³	-	[1; N_{rij}]

Toelichting bij Tabel 3-7:

- Over het algemeen dient een waarde groter dan 0 te worden ingevoerd; er is immers altijd een kans dat er zich benedenstrooms van de tunnel een ongeval voordoet waarbij er een stilstaande file ontstaat. Indien er afdoende maatregelen zijn genomen om te voorkomen dat de staart van de file in de tunnel komt te staan zou deze waarde (vrijwel) 0 kunnen zijn. In het rekenmodel is een spitsperiode elk etmaal aanwezig. Bij de invoer dient hier rekening mee te worden gehouden.

Voorbeeld 1: Bij de beschouwde tunnelbuis treedt er elke werkdag in de spitsperiode om 07.00 uur (nagenoeg) stilstaand verkeer op benedenstrooms van de tunnel ten gevolge van een afslag kort na de tunnel. De staart van de file komt hierbij in de tunnelbuis te staan. Om 08.00 uur lost de file op. In het weekend is er geen stilstaand verkeer. De invoerwaarde voor N_{spits} dient in dit geval $5(\text{werkdagen per week})/7(\text{dagen per week}) = 0,714$ te zijn of: $260(\text{werkdagen per jaar})/365(\text{dagen per jaar}) = 0,712$. Indien het probleem zich echter 2x per werkdag tijdens de spits manifesteert (bijvoorbeeld om 08.30 uur ontstaat er opnieuw stilstaand verkeer) dan dient de invoerwaarde voor N_{spits} $2 \cdot 5/7 = 1,428$ te zijn.

Voorbeeld 2: Bij de beschouwde tunnelbuis treedt er benedenstrooms van de tunnel alleen filevorming op bij ernstige ongevallen. Voor het model is deze filevorming alleen van belang indien dit leidt tot een nagenoeg stilstaande file in de tunnelbuis, de kans hierop dient te worden geschat. Omdat voldoende betrouwbare gegevens hiervoor veelal ontbreken zou men bijvoorbeeld als volgt te werk kunnen gaan:

 - Neem voor het invloedsgebied benedenstrooms van de tunnelbuis 10 km, tenzij er op kortere afstand benedenstrooms van de tunnelbuis een omleidingroute van voldoende capaciteit beschikbaar is en wordt gebruikt (neem dan de afstand van de tunnelbuis tot deze omleidingroute).
 - Maak voor het beschouwde wegvak een schatting voor de kans op nagenoeg stilstaand verkeer op basis van de kans op een UMS-ongeval. Omdat deze kans sterk afhankelijk is van de verkeersintensiteit geldt voor elke periode (spits, dag, nacht) een andere kans. In dit voorbeeld wordt aangehouden dat tijdens de spits in 50% van de ongevallen nagenoeg stilstaand verkeer optreedt, tijdens de dag in 30% van de ongevallen en tijdens de nacht in 10% van de ongevallen.
 - Het aantal keren (per etmaal) dat er (nagenoeg) stilstaand verkeer benedenstrooms van de tunnel ontstaat (wat zonder maatregelen ook leidt tot een file in de tunnel) wordt dan:

Voor de 'spits' $N_{\text{spits}} = 0,5 \cdot F_{\text{UMS,hor}} \cdot 10$ (lengte invloedsgebied) $\cdot I_{\text{spitsuur}} \cdot T_{\text{spits}}$

Voor de 'dag' $N_{\text{dag}} = 0,3 \cdot F_{\text{UMS,hor}} \cdot 10$ (lengte invloedsgebied) $\cdot I_{\text{daguur}} \cdot T_{\text{dag}}$

Voor de 'nacht' $N_{\text{nacht}} = 0,1 \cdot F_{\text{UMS,hor}} \cdot 10$ (lengte invloedsgebied) $\cdot I_{\text{nachtuur}} \cdot T_{\text{nacht}}$

Voor I_{spitsuur} , T_{spits} , I_{daguur} , T_{dag} , I_{nachtuur} en T_{nacht} zie Tabel 3-4. $F_{\text{UMS,hor}}$ is de kans op een UMS-ongeval op het horizontale deel van de tunnel (zie Tabel 3-8).
- Hier kan een waarde voor de maximale tijdsduur voor de opbouw van een benedenstroomse file worden ingevoerd in het geval maatregelen zijn getroffen om het groeien van een benedenstroomse file tot in de tunnel te beperken.

3. Zonder maatregelen zal N_{filerij} in principe gelijk zijn aan N_{rij} ; het is echter mogelijk (door middel van het afkruisen van rijstroken) de fileopbouw te laten plaatsvinden over minder rijstroken.

3.8 Incidentkans

Met de invoervariabelen uit Tabel 3-8 worden, per deel van de tunnel, de kansen per voertuigkilometer op pech, UMS (ongevallen met uitsluitend materiële schade), letselongevallen en brand gemodelleerd.

Tabel 3-8 Invoervariabelen voor de incidentkansen.

symbool	omschrijving	eenheid	domein
$F_{\text{pech,neer}}$	kans op pech op neergaande deel	(mvtkm) ⁻¹	[10 ⁻⁷ ; 10 ⁻⁴]
$F_{\text{pech,hor}}$	kans op pech op horizontale deel	(mvtkm) ⁻¹	[10 ⁻⁷ ; 10 ⁻⁴]
$F_{\text{pech,op}}$	kans op pech op opgaande deel	(mvtkm) ⁻¹	[10 ⁻⁷ ; 10 ⁻⁴]
$F_{\text{UMS,neer}}$	kans op UMS ongeval op neergaande deel	(mvtkm) ⁻¹	[10 ⁻⁸ ; 10 ⁻⁴]
$F_{\text{UMS,hor}}$	kans op UMS ongeval op horizontale deel	(mvtkm) ⁻¹	[10 ⁻⁸ ; 10 ⁻⁴]
$F_{\text{UMS,op}}$	kans op UMS ongeval op opgaande deel	(mvtkm) ⁻¹	[10 ⁻⁸ ; 10 ⁻⁴]
$F_{\text{letsel,neer}}$	kans op letselongeval op neergaande deel	(mvtkm) ⁻¹	[10 ⁻⁹ ; 10 ⁻⁵]
$F_{\text{letsel,hor}}$	kans op letselongeval op horizontale deel	(mvtkm) ⁻¹	[10 ⁻⁹ ; 10 ⁻⁵]
$F_{\text{letsel,op}}$	kans op letselongeval op opgaande deel	(mvtkm) ⁻¹	[10 ⁻⁹ ; 10 ⁻⁵]
$F_{\text{brand,auto}}$	kans op brand van personenauto's	(mvtkm) ⁻¹	[10 ⁻⁹ ; 10 ⁻⁶]
$F_{\text{brand,bus}}$	kans op brand van bussen	(mvtkm) ⁻¹	[10 ⁻⁹ ; 10 ⁻⁶]
$F_{\text{brand,vracht}}$	kans op brand van vrachtauto's	(mvtkm) ⁻¹	[10 ⁻⁹ ; 10 ⁻⁶]

Toelichting bij Tabel 3-8:

Voor de kansen van bestaande tunnels dient zoveel mogelijk gebruik te worden gemaakt van tunnelspecifieke statistische gegevens.

Voor nieuwe (nog te bouwen) tunnels kan gebruik worden gemaakt van gegevens van vergelijkbare tunnels.

- In de 'Handreiking incidentkansen voor QRA-tunnels [19] worden ervaringscijfers voor de letselongevalskansen voor Nederlandse tunnels in het rijkswegennetwerk gegeven. In dit document wordt tevens voor verschillende weg-kenmerken een inschatting gegeven van de invloed op de letsel-ongevalskans. Deze inschattingen zijn overgenomen in de Gebruikershandleiding [1]
- In [14] is op basis van 145 branden in vracht- of tankauto's in 1984 een kans op brand van een vrachtauto afgeleid in de orde van $2,3 \cdot 10^{-8}$ per voertuigkilometer. 30% van deze branden resulteerde in een schadebedrag van fl.10.000 of meer (= > € 4.500) en 70% in een schadebedrag van minder dan fl.10.000. Onderzoek in het buitenland (onder andere in de Alpenlanden) [20] laat zien dat de kans op een brand in zwaar verkeer groter is dan de kans op een brand in het overige verkeer. Hierbij dient te worden opgemerkt dat deze hogere kans op brand in zwaar verkeer veelal veroorzaakt wordt door het oververhitten van de motor bij het klimmen of het oververhitten van de remmen bij het dalen op lange en/of steile hellingen. In Frankrijk blijkt dat 60 á 70% van de vrachtautobranden in tunnels wordt veroorzaakt door oververhitte remmen. Daar dergelijke lange en/of steile hellingen niet voorkomen in Nederland is er vooralsnog geen reden om voor de Nederlandse situatie uit te gaan van een hogere kans op brand voor zwaar verkeer. Aanbevolen wordt om voor de kans op brand in Nederland voor zowel personenauto's, bussen als vrachtauto's $2 \cdot 10^{-8}$ per mvtkm aan te houden.

NB: in de vermelde referenties wordt veelal gesproken over ongevalfrequenties per voertuigkilometer en brandfrequenties terwijl het in feite kansen per voertuigkilometer betreft.

3.9 Overige defaultwaarden

Uitstroming gevaarlijke stoffen

Voor de vervolgsans op uitstroming van gevaarlijke stoffen gegeven een letselongeval zijn in Tabel 3-9 de defaultwaarden aangegeven. De gebruiker van QRA-tunnels kan deze echter aanpassen als hier goede redenen voor zijn en dit van belang is voor een goede modellering van de specifieke situatie.

Tabel 3-9: Defaultwaarden uitstroming.

symbool	omschrijving	eenheid	domein	default/functie
$P_{uit,atm}$	vervolgkans op uitstroming >100 kg uit een atmosferische tankwagen (vloeistof) gegeven een letselongeval ¹	-	[0;1]	= 0,076
$P_{uit,druk}$	vervolgkans op uitstroming >100 kg uit een druktankwagen (tot vloeistof verdicht gas) gegeven een letselongeval ¹	-	[0;1]	= 0,039
P_{Linst}	vervolgkans op instantane uitstroming van een vloeistof gegeven een uitstroming > 100 kg	-	[0;1]	= $P_{Linst,smal}$ als $N_{rij} + N_{vlucht} \leq 2$ = $P_{Linst,breed}$ als $N_{rij} + N_{vlucht} > 2$
$P_{Linst,smal}$	P_{Linst} bij een smalle tunnelbuis ($N_{rij} + N_{vlucht} \leq 2$) ²	-	[0;1]	= 0,01
$P_{Linst,breed}$	P_{Linst} bij een brede tunnelbuis ($N_{rij} + N_{vlucht} > 2$) ²	-	[0;1]	= 0,02
P_{Lcongr}	vervolgkans op een 5m ³ uitstroming van een vloeistof gegeven een uitstroming > 100 kg	-	[0;1]	= $1 - P_{Linst} - P_{Lconkl}$
P_{Lconkl}	vervolgkans op een 0,5m ³ uitstroming van een vloeistof gegeven een uitstroming > 100 kg ²	-	[0;1]	= 0,25
P_{Ginst}	vervolgkans op een instantane uitstroming van een tot vloeistof verdicht gas gegeven een uitstroming > 100 kg ²	-	[0;1]	= 0,105
P_{Gcont}	vervolgkans op een continue uitstroming van een tot vloeistof verdicht gas gegeven een uitstroming > 100 kg ²	-	[0;1]	= 0,195
P_{Gnrel}	vervolgkans op een 'niet relevante' uitstroming van een tot vloeistof verdicht gas gegeven een uitstroming > 100 kg	-	[0;1]	= $1 - P_{Ginst} - P_{Gcont}$
P_{achter}	vervolgkans op een naar achter gerichte uitstroming bij een continue of 'niet relevante' uitstroming van gas ³	-	[0;1]	= 0,6
P_{warm}	vervolgkans op warme BLEVE gegeven instantane uitstroming van gas ⁴	-	[0;1]	= 0,7
$L_{hor,i,LF}$	plaslengte brandende plas LF op het horizontale deel bij instantane uitstroming ⁵	m	[0;500]	= 60
$L_{hel,i,LF}$	plaslengte brandende plas LF op het hellende deel bij instantane uitstroming ⁵	m	[0;500]	= 80
$L_{hor,g,LF}$	plaslengte brandende plas LF op het horizontale deel bij grote continue uitstroming ⁵	m	[0;100]	= 26
$L_{hel,g,LF}$	plaslengte brandende plas LF op het hellende deel bij grote continue uitstroming ⁵	m	[0;100]	= 40
$L_{hor,k,LF}$	plaslengte brandende plas LF op het horizontale deel bij kleine continue uitstroming ⁵	m	[0;100]	= 16
$L_{hel,k,LF}$	plaslengte brandende plas LF op het hellende deel bij kleine continue uitstroming ⁵	m	[0;100]	= 12
$L_{hor,i,LT}$	plaslengte LT op het horizontale deel bij instantane uitstroming ⁵	m	[0;2000]	= 260
$L_{hel,i,LT}$	plaslengte LT op het hellende deel bij instantane uitstroming ⁵	m	[0;2000]	= 500

	uitstroming ⁵			
$L_{hor,g,LT}$	plaslengte LT op het horizontale deel bij grote continue uitstroming ⁵	m	[0;100]	= 12
$L_{hel,g,LT}$	plaslengte LT op het hellende deel bij grote continue uitstroming ⁵	m	[0;100]	= 30
$L_{hor,k,LT}$	plaslengte LT op het horizontale deel bij kleine continue uitstroming ⁵	m	[0;100]	= 2
$L_{hel,k,LT}$	plaslengte LT op het hellende deel bij kleine continue uitstroming ⁵	m	[0;100]	= 20
$L_{expl,tm,gas}$	lengte van het schadegebied buiten de tunnel bij een gaswolkexplosie of BLEVE ⁶	m	[0;300]	= 150
$L_{e,tm,explosief}$	lengte van het schadegebied buiten de tunnel bij een explosie van vaste explosieven ⁷	m	[0;300]	= 40
L_{fakkel}	lengte van de fakkel bij grote (continue) uitstroming brandbaar gas ⁸	m	[0;100]	= 60
$L_{fakkel,klein}$	lengte van de fakkel bij kleine (continue) uitstroming brandbaar gas ⁸	m	[0;100]	= 15

Toelichting bij Tabel 3-9:

1. Defaultwaarde uit [7] voor auto(snel)wegen. Zie voor nadere toelichting paragraaf 4.3.
2. Zie voor nadere toelichting paragraaf 4.3.
3. Dit is een schatting. De locatie van een gat in een tankwagen is afhankelijk van het type incident. Bij een eenzijdig incident zal, als er een gat ontstaat, in de meeste gevallen een gat in de zijwand van de tank ontstaan omdat de tankwagen langs de wand schuurt. Bij een incident waarbij de tankwagen op een ander voertuig inrijdt zal veelal geen uitstroming optreden, omdat de cabine voor de tank de klap van het incident opvangt. Wanneer een ander voertuig tegen de tankwagen botst, zal een eventueel gat veelal achter in de tankwagen optreden.
4. Dit is de aanbevolen waarde uit [21].
5. De hier gegeven defaultwaarden zijn gebaseerd op berekeningen voor een tunnelbuis met een riolering die een capaciteit heeft van 4 m³ per minuut en een inlaatcapaciteit per put van 0,5 m³ per minuut. Zie voor nadere toelichting paragraaf 8.3.1 en Tabel 8-1.
6. Zie voor nadere toelichting paragraaf 8.5.
7. Zie voor nadere toelichting paragraaf 8.2.
8. Zie voor nadere toelichting paragraaf 8.5.1

Kans op ontsteking

In Tabel 3-10 zijn de defaultwaarden voor ontsteking aangegeven.

Tabel 3-10: Defaultwaarden ontsteking.

symbool	omschrijving	eenheid	domein	default
$P_{ont,dir,LF}$	kans op directe ontsteking brandbare vloeistof	-	[0;1]	0,1
$P_{ont,vert,LF}$	kans op vertraagde ontsteking brandbare vloeistof	-	[0;1- $P_{ont,dir,LF}$]	0,1
$P_{odLF,infile}$	kans op directe ontsteking brandbare vloeistof bij instantane uitstroming in een file	-	[0;1]	0,9
$P_{ovLF,infile}$	kans op vertraagde ontsteking brandbare vloeistof bij instantane uitstroming in een file	-	[0;1- $P_{odLF,infile}$]	0,1
$P_{ont,dir,GF}$	kans op directe ontsteking brandbaar gas	-	[0;1]	0,8
$P_{ont,vert,GF}$	kans op vertraagde ontsteking brandbaar gas	-	[0;1]	1- $P_{ont,dir,GF}$
$t_{warmeBLEVE}$	tijdstip waarop warme BLEVE optreedt	min	[0;60]	20
$t_{vertont}$	tijdstip waarop vertraagde ontsteking gassen plaatsvindt	min	[0;60]	2

Toelichting bij Tabel 3-10:

Voor brandbare gevaarlijke stoffen zijn de vervolgekansen op ontsteking op de open weg afgeleid:

- 0,065 voor de directe en 0,065 en voor de vertraagde ontsteking van brandbare vloeistoffen in de stofcategorie LF2 (benzine) [4]. Brandbare vloeistoffen in de stofcategorie LF1 (o.a. dieselolie) hebben een directe ontstekingskans van 0,0043, wat circa 15 maal lager is dan de ontstekingskans van de stofcategorie LF2, en een vertraagde ontstekingskans van 0 [4]. Bij de berekeningen wordt echter uitgegaan van stofcategorie LF2 en wordt de lagere ontstekingskans voor LF1 verrekend door het aantal de transporten te delen door 15 (zie paragraaf 3.5).
- 0,8 voor de directe en 0,2 voor de vertraagde ontstekingskans van brandbare tot vloeistof verdichte gassen stofcategorie GF3 [4].

Voor tunnels is de vervolgekans op ontsteking nog niet apart afgeleid.

De ontstekingskans van brandbare vloeistoffen (zowel direct als indirect) is naar verwachting in tunnels hoger dan op de open weg omdat de uitgestroomde vloeistof in een tunnel minder gemakkelijk weg kan stromen (op de open weg kan uitstroming naar de berm plaatsvinden). Voor de vervolgekans op ontsteking van uitgestroomde brandbare vloeistoffen, stofcategorie LF2 (benzine) in tunnels wordt default uitgegaan van 0,1 voor de directe en 0,1 voor de vertraagde ontsteking. Als er sprake is van een grote uitstroming in stilstaand verkeer dan zal de ontstekingskans vermoedelijk nog groter zijn omdat er veel potentiële ontstekingsbronnen boven de plas aanwezig zijn; default wordt, voor die situatie, voor de kans op ontsteking 1 aangehouden (0,9 direct en 0,1 vertraagd), zie ook paragraaf 8.3.3.

Voor brandbare, tot vloeistof verdichte gassen wordt, net als op de open weg, default aangehouden: 0,8 voor de directe en 0,2 voor de vertraagde ontsteking.

Kans op blussen

In veel tunnels zijn voor weggebruikers toegankelijke brandblusmiddelen (in de hulppost) aanwezig. Hierdoor zal er in een tunnel een hogere kans zijn op het blussen van een beginnende brand dan op de open weg. Deze (extra) bluskans is in de modellering opgenomen. De defaultwaarden zijn aangegeven in Tabel 3-11.

Tabel 3-11: Defaultwaarden kans op blussen.

symbool	omschrijving	eenheid	domein	default
$P_{\text{blus,auto}}$	kans op blussen van een 'langzame' brand met een personenauto (bij een pechgeval)	-	[0;1]	0,25
$P_{\text{blus,vracht}}$	kans op blussen van een 'langzame' brand met een vrachtauto of bus (bij een pechgeval)	-	[0;1]	0,1
$P_{\text{b,snel,auto}}$	kans op blussen van een 'snelle' brand met een personenauto (bij een letselongeval)	-	[0;1]	0
$P_{\text{b,snel,vracht}}$	kans op blussen van een 'snelle' brand met een vrachtauto of bus (bij een letselongeval)	-	[0;1]	0
$P_{\text{b,snel,LF}}$	kans op blussen van een brand met brandbare vloeistoffen	-	[0;1]	0
$P_{\text{b,snel,GF}}$	kans op blussen van een brand met brandbare gassen	-	[0;1]	0

Toelichting bij Tabel 3-11:

Deze waarden zijn een schatting gemaakt ten behoeve van de risicoberekening voor de Westerscheldetunnel. De aangehouden waarden voor de bluskans zijn erg laag waardoor een pessimistische berekening van het risico wordt verkregen (in de Mt Blanc tunnel bijvoorbeeld is 2/3 van de beginnende vrachtwagenbranden door de weggebruikers geblust).

Bij een pechgeval is er veelal sprake van een zich relatief langzaam ontwikkelende brand waardoor de kans op vroegtijdig blussen reëel is. Branden bij botsingen ontstaan vaak ten gevolge van het vrijkomen van brandstof, waardoor de brand vanaf het begin veel groter is en moeilijker te blussen zal zijn. Daarom wordt voor branden bij botsingen de bluskans default op nul gesteld.

Brandgrootte

In het model wordt rekening gehouden met de kans op het overslaan van de brand naar andere voertuigen. Hierbij is de volgende aanname gedaan.

Aanname 3-1 Bij een langzaam ontwikkelende brand zal de brand niet overslaan naar een ander voertuig. Bij branden die bij een ongeval ontstaan, bestaat de kans dat de brand overslaat naar een ander voertuig. De brandoverslag vindt plaats op het moment dat de brand zijn maximale omvang heeft.

Toelichting: *Deze aanname is een vereenvoudiging. Er wordt aangenomen dat bij een langzaam ontwikkelende brand de achteropkomende voertuigen op voldoende afstand van het voertuig kunnen en zullen stoppen om brandoverslag te voorkomen. In werkelijkheid is het wel mogelijk dat langzaam ontwikkelende branden overslaan naar andere voertuigen, echter verwacht mag worden dat dit vaak zo lang duurt dat dit voor de bedreigde mensen niet meer relevant is. Bij branden ten gevolge van een (letsel)ongeval wordt de kans op het overslaan van de brand naar één ander voertuig gemodelleerd. Het tijdstip van de brandoverslag is conservatief gekozen (deels omdat het moment van de brandoverslag niet bekend is en deels omdat het berekenen van de effecten anders véél complexer wordt).*

De vervolgekansen op brandoverslag en de overige defaultwaarde met betrekking tot de brandgrootte zijn aangegeven in Tabel 3-12.

Tabel 3-12: Defaultwaarden brandgrootte.

symbool	omschrijving	eenheid	domein	default
A_{brb}	fractie van de vrachtauto's (niet geladen met explosieven en geen tankwagens met gevaarlijke stoffen) met een brandbare lading	-	[0;1]	0,5 ¹
$P_{verd,snel}$	fractie voertuigbranden dat erg snel ontwikkelt	-	[0;1]	0,1 ²
$t_{uitvtg,snel}$	tijdstip waarop snelle brand buiten voertuig treedt	min	[0;2]	0 ³
$t_{uitvtg,langzaam}$	tijdstip waarop langzame brand buiten voertuig treedt	min	[0;10]	5 ³
P_{50}	vervolgkans op een 50 MW brand bij een met brandbare goederen geladen vrachtauto	-	[0;1]	0,6 ¹
$P_{over,auto}$	vervolgkans op brandoverslag vanaf een personenauto bij een letselongeval met brand	-	[0;1]	0,1 ¹
$P_{over,bus}$	vervolgkans op brandoverslag vanaf een bus of een lege, of met niet brandbare goederen geladen vrachtauto bij een letselongeval met brand	-	[0;1]	0,3 ¹
$P_{over,vracht}$	vervolgkans op brandoverslag vanaf een met brandbare goederen geladen vrachtauto bij een letselongeval met brand	-	[0;1]	0,5 ¹

Toelichting bij Tabel 3-12:

1. Deze defaultwaarden zijn schattingen van het Steunpunt Veiligheid. De vervolgkans op brandoverslag is hoger naar mate het maximaal brandvermogen van het eerste voertuig hoger is.
2. Deze defaultwaarde is ten opzichte van [14] erg conservatief. In [14] is aangegeven dat aan 99% van de branden geen ongeval vooraf is gegaan. In [14] is ook aangegeven dat 30% van de branden resulteerde in grote schade (meer dan fl.10.000 (circa € 4.500)) en 70% in kleine schade (schade minder dan fl.10.000).
3. Uit de literatuur blijkt: "Bij een pechbrand is de brandontwikkeling vrij traag: de eerste 5 – 10 minuten blijft de brand beperkt tot het motorcompartiment of de passagiersruimte. Daarna springen de ruiten, de brand komt buiten het voertuig en ontwikkelt zich vanwege de toegenomen zuurstoftoevoer vrij snel (2 - 5 minuten) tot maximale grootte. Bij personenauto's houdt de brand daarna circa 10 - 15 minuten flink aan en dooft vervolgens langzaam uit. Bij grotere voertuigen

houdt de brand veel langer aan." [10]. De meeste branden vertonen een snelle ontwikkeling in de eerste 5 – 10 (soms 15) minuten, waarbij na 7 – 10 minuten brandoverslag kan optreden. De meeste voertuigbranden duren 30 tot 60 minuten, terwijl benzine plasbranden tot 2 uur kunnen duren [20]. "Bij een ongevalsbrand is de brandontwikkeling meestal zeer snel omdat er vaak sprake is van vrijgekomen motorbrandstof en het brandbare materiaal goed in contact met lucht is. Het tijdstip van ontsteking is echter moeilijk te bepalen: dat kan direct na het incident zijn maar ook enige tijd later. Voor een veilige redenering kan worden aangenomen dat de brand maximaal 2 minuten na het ongeval ontsteekt en zich daarna binnen 3 – 5 minuten geheel ontwikkelt." [10].

Detectie: faalkansen en reactietijden

Voor de faalkansen en reactietijden van detectiesystemen zijn in Tabel 3-13 defaultwaarden aangegeven. Deze defaultwaarden zijn schattingen gemaakt door het Steunpunt Tunnelveiligheid.

Tabel 3-13: Defaultwaarden detectie.

symbool	omschrijving	eenheid	domein	default
$P_{f,snel}$	faalkans van het snelheidsdetectiesysteem ¹	-	[0;1]	0,001
$P_{f,autom}$	faalkans van het automatisch opstarten ¹	-	[0;1]	0,001
$P_{f,weg}$	faalkans van melding door weggebruiker ²	-	[0;1]	0,1
$P_{f,zicht}$	faalkans van zichtmeting	-	[0;1]	0,05
$P_{f,temp}$	faalkans van temperatuurmeting	-	[0;1]	0,05
$P_{f,CO}$	faalkans van CO-meting	-	[0;1]	0,01
$V_{rookfile}$	snelheid rookverspreiding bij file t.b.v. detectie ³	m/s	[0;5]	0,5
$V_{rookgeenfile}$	snelheid rookverspreiding zonder file t.b.v. detectie ³	m/s	[0;5]	2
$t_{d,CO}$	tijdsduur tot CO-detectie vanaf het moment dat de brand uit het voertuig treedt ⁴	min	[0;10]	3
$t_{d,temp}$	tijdsduur tot temperatuurdetectie vanaf het moment dat de brand uit het voertuig treedt ⁵	min	[0;10]	2
T_{snel}	tijdsduur tot snelheidsdetectie plaatsvindt ⁶	min	[0;5]	0,5
T_{meld}	tijdsduur tot melding door weggebruiker plaatsvindt ⁷	min	[1;10]	5
$P_{f,vert}$	faalkans van vertraagde detectie door operator ⁸	-	[0;1]	0,1

Toelichting bij de defaultwaarden van Tabel 3-13:

1. Er is aangenomen dat de faalkans van de snelheidsdetectie en het automatisch opstarten gelijk is aan die van automatische systemen in de industrie (0,001 per aanspraak). Voor de situatie dat er benedenstrooms van het incident een file staat (of gevormd wordt) is als faalkans van de snelheidsdetectie 1 aangehouden (zie paragraaf 4.8).
2. In deze faalkans is zowel het niet gebruiken van de voorzieningen als het falen van de voorzieningen en het niet doormelden aan de operator door een alarmcentrale opgenomen. Tevens is hiermee impliciet aangenomen dat de kans op melding onafhankelijk is van de periode van het etmaal (en dus de verkeersintensiteit). Verwacht wordt dat in verkeersluwe perioden de bereidheid om het incident te melden per weggebruiker hoger zal zijn dan in drukke perioden; in drukke perioden daarentegen zijn er meer weggebruikers aanwezig die een melding zouden kunnen doen.
3. De snelheid van branddetectie is bij een branddetectiesysteem gebaseerd op zichtmeting afhankelijk van de hart-op-hart afstand van de zichtmeters. De defaultwaarden zijn gebaseerd op het feit dat bij éénrichtingsverkeer (uitgangspunt bij dit model) er door het rijdend verkeer een langstroming van de lucht zal optreden. De snelheid van deze langstroming zal veelal beduidend meer zijn dan 2 m/s. Echter bij het tot stilstand komen van het verkeer zal deze snelheid langzaam afnemen. Conservatief is (voor het berekenen van de detectiesnelheid) aangenomen dat de luchtsnelheid constant 2 m/s is, tenzij er benedenstrooms al een file is gevormd.

4. Detectoren voor koolmonoxide worden in Nederland niet meer in nieuwe tunnels toegepast; in bestaande tunnels zijn ze op ongeveer ooghoogte aangebracht waardoor het bij brand enige tijd zal duren voordat een hoge CO-waarde wordt gemeten.
5. Voor temperatuurmeting dient de temperatuur voldoende hoog te zijn. Dit zal enige tijd duren.
6. Het duurt veelal enige tijd voordat de afwijking (snelheidsunderschrijding of stilstand) wordt vastgesteld. Bij een snelheidsunderschrijdingssysteem is soms de reactie van het overige verkeer hiervoor nodig en bij een stilstandsdetectie met camera's zal het beeld eerst enige tijd constant moeten zijn.
7. Bij de alarmering van de operator treedt altijd enige tijdvertraging op omdat de weggebruiker óf zijn voertuig stil moet zetten en naar een hulppost moet lopen, de deur moet openen en de telefoon moet pakken óf met zijn mobiele telefoon het alarmnummer moet bellen waarna via de alarmcentrale doormelding aan de tunneloperator dient te geschieden.
8. Met vertraagde detectie door de operator wordt bedoeld: het later alsnog ontdekken van een ernstig incident terwijl dat nog niet eerder door de operator onderkend was. De kans op het lang missen van een ernstig incident zal in verkeersdrukke perioden zeer gering zijn (er treedt dan namelijk een ernstige verstoring in het verkeer op), in verkeersluwe perioden is deze kans (veel) groter. Als vereenvoudiging van het model is de aangegeven defaultwaarde voor alle perioden gehanteerd. Met deze waarde is dus aangenomen dat, als een ernstig incident in de tunnel niet op andere wijze gedetecteerd is, de operator in 90% van de gevallen later alsnog met behulp van de camera's het (ernstige) incident zal ontdekken. Voor de hierbij gehanteerde tijdvertraging zie paragraaf 4.8.

Faalkansen en tijdvertraging voorzieningen

Het betreft het falen van de ventilatie, het ontgrendelen van de vluchtdeuren en het afsluiten van de tunnelbuis en de tijdvertraging bij het afsluiten van de tunnelbuis. Deze zijn aangegeven in Tabel 3-14.

Tabel 3-14: Faalkansen voorzieningen.

symbool	omschrijving	eenheid	domein	default/functie $\mathbf{v}(\mathbf{X})$
$P_{f,vent}$	faalkans van het ventilatiesysteem ¹	-	[0;1]	0,02
$P_{f,ontgr}$	faalkans van ontgrendelen (alle) vluchtdeuren ²	-	[0;1]	0,01
$P_{f,sluit}$	faalkans van het afsluiten van de tunnelbuis ³	-	[0;1]	0,01
T_{sluit}	tijdsduur tot het daadwerkelijk afsluiten van de tunnelbuis na opstartsignaal ⁴	min	[1;60]	$= T_{sluit,matrix}$ als $A_{sluit} = \text{matrixborden}$ $= T_{sluit,vrklicht}$ als $A_{sluit} = \text{verkeerslicht}$ $= T_{sluit,slagboom}$ als $A_{sluit} = \text{verkeerslicht en slagboom}$ $= T_{sluit,nee}$ in alle overige gevallen
$T_{sluit,matrix}$	tijdsduur tot het daadwerkelijk afsluiten van de tunnelbuis na opstartsignaal dmv matrixborden ⁴	min	[1;60]	= 5
$T_{sluit,vrklicht}$	tijdsduur tot het daadwerkelijk afsluiten van de tunnelbuis na opstartsignaal dmv verkeerslicht ⁴	min	[1;60]	= 3
$T_{sluit,slagboom}$	tijdsduur tot het daadwerkelijk afsluiten van de tunnelbuis na opstartsignaal dmv verkeerslicht en slagboom ⁴	min	[1;60]	= 1
$T_{sluit,nee}$	tijdsduur tot het daadwerkelijk afsluiten van de tunnelbuis na opstartsignaal ⁴	min	[1;60]	= 60

Toelichting bij de defaultwaarden van Tabel 3-14:

1. De faalkans van de ventilatie is hierbij gelijk genomen aan de kans op technisch falen: 0,02. Onder technisch falen wordt verstaan: het niet (voldoende) in werking treden van de installatie nadat een opstartsignaal is gegeven. Daarnaast bestaat er ook nog een kans op systeemfalen; onder systeemfalen wordt verstaan: het niet (blijvend) met de ventilatie voorkomen dat er bovenstreams van de brand rookverspreiding optreedt. Deze faalkans wordt in het model niet beschouwd omdat enerzijds enige backlayering niet direct tot slachtoffers leidt (de rook hangt tegen het dak) en

anderzijds omdat systeemfalen veelal pas optreedt na enige tijd (het uitvallen van ventilatoren ten gevolge van de brand).

2. Deze defaultwaarde is een inschatting van het SteunpuntTunnelveiligheid. De kans op het niet werken van de vergrendeling bij één bepaalde deur is niet apart beschouwd. In paragraaf 5.20 is wel de situatie beschouwd waarbij het incident de vluchtdeur blokkeert.
3. Deze defaultwaarde is een inschatting van het SteunpuntTunnelveiligheid. Met deze faalkans wordt impliciet aangenomen dat bij falen alle afsluitmiddelen falen, terwijl in de praktijk het falen van de slagboom in feite zal leiden tot een zelfde situatie als zonder slagboom (alleen verkeerslichten).
4. Weggebruikers zullen de signalen van een matrixbord in het algemeen opvolgen, maar bij het afkruisen van alle rijstroken is het maar de vraag of men zal stoppen, in het model is aangenomen dat na 5 minuten het verkeer voor de tunnel tot stilstand komt. Bij verkeerslichten zal men eerder geneigd zijn om te stoppen. Bij verkeerslichten én slagbomen wordt het stoppen min of meer direct afgedwongen.

Faalkansen en tijdvertraging operator

Het betreft het falen van (het niet ondernemen van actie door) de operator en de door de operator benodigde tijd om actie te ondernemen. De defaultwaarden zijn aangegeven in Tabel 3-15. Deze defaultwaarden zijn schattingen gemaakt door het Steunpunt Tunnelveiligheid.

Tabel 3-15: Defaultwaarden actie operator

symbool	omschrijving	eenheid	domein	default
$P_{f,oper}$	kans dat de operator geen (adequate) actie neemt na een detectie ¹	-	[0;1]	= 0,1
P_{reset}	kans dat operator ten onrechte automatisch opstarten onderbreekt na snelheidsdetectie ²	-	[0;1]	= 0,1
$P_{fo,cal,brand}$	kans dat de operator de calamiteitenknop niet gebruikt bij een snelle brand ³	-	[0;1]	= 0,1
$P_{fo,cal}$	kans dat de operator de calamiteitenknop niet gebruikt in overige gevallen ³	-	[0;1]	= 0,3
$P_{fo,ontgr}$	kans dat de operator de vluchtdeuren niet ontgrendelt ⁴	-	[0;1]	= 0,5
T_{cal}	benodigde tijd om voorzieningen met de calamiteitenknop te starten ⁵	min	[0;5]	= 0,5
T_{hand}	extra benodigde tijd (ten opzichte van het gebruik van de calamiteitenknop) om voorzieningen handmatig te starten ⁵	min	[0;5]	= 0,5
$t_{vert,file}$	tijdsduur totdat operator ernstig incident alsnog (na falen overige detectie) ontdekt bij een file ⁶	min	[0;60]	= 10
$t_{vert,geenfile}$	tijdsduur totdat operator ernstig incident alsnog (na falen overige detectie) ontdekt als er geen file is ⁶	min	[0;60]	= 15

Toelichting bij de defaultwaarden van Tabel 3-15:

1. Hier gaat het om de kans op menselijke falen per aanspraak.
2. Deze waarde is geschat door het Steunpunt Tunnelveiligheid. De kans op een het ten onrechte onderbreken van het automatisch opstarten na een snelheidsdetectie zal toenemen naar mate het onderbreken van het opstarten vaker voorkomt (het onderbreken van het opstarten is dan routine geworden). In tunnelbuizen met een hoge verkeersintensiteit zal deze kans daarom naar verwachting hoger zijn dan 0,1.
3. Door het Steunpunt Tunnelveiligheid wordt ingeschat dat de operator bij snelontwikkelende branden in 90% van de gevallen gebruik zal maken van de calamiteitenknop en bij overige gevallen in 70% van de gevallen. Als er een calamiteitenknop aanwezig is dient de operator deze bij ernstige incidenten altijd te gebruiken. Hij kan echter een verkeerde beslissing nemen door een verkeerde inschatting; de kans hierop is groter naarmate het incident zich in eerste instantie minder ernstig

voordoet. Daarnaast bestaat de kans dat de operator (naar gewoonte) alleen handmatig actie onderneemt.

4. Het afsluiten van een tunnelbuis is een actie die een operator tijdens zijn werk vaker moet uitvoeren en die hij daarom niet snel zal vergeten. Het inschakelen van de ventilatie bij brand zal ook niet snel worden vergeten omdat het ventilatiesysteem juist vooral bedoeld is om te werken bij brand. Het ontgrendelen van de vluchtdeuren zal gemakkelijker worden vergeten zeker in het geval er vanuit de verkeerscentrale meerdere tunnels worden bediend en het vergrendelen van vluchtdeuren niet standaard is. Door het Steunpunt Tunnelveiligheid wordt pessimistisch ingeschat dat de operator het ontgrendelen van de vluchtdeuren in 50% van de gevallen niet zal doen.
5. De operator heeft enige tijd nodig om de situatie in de tunnel te beoordelen voordat de calamiteitenknop wordt ingedrukt. Voor het handmatig opstarten van de voorzieningen heeft de operator extra tijd nodig. Dit is een pessimistische inschatting voor zeer ernstige situaties (zoals een snelle brandontwikkeling).
6. Met deze tijdsduur wordt bedoeld het later alsnog ontdekken van een ernstig incident terwijl dat nog niet eerder door de operator onderkend was. De defaultwaarden zijn geschat door het Steunpunt Tunnelveiligheid. 15 minuten is voor verkeersdrukte perioden erg lang (er treedt dan namelijk een ernstige verstoring in het verkeer op). Als vereenvoudiging van het model zijn de aangegeven waarden voor alle perioden gehanteerd. Bij een benedenstroomse file zal de operator extra alert zijn en daardoor eerder reageren

Defaultwaarden slachtoffers

Voor de berekening van het aantal 'directe' slachtoffers bij letselongevallen en het aantal 'extra' slachtoffers onder beknelden en zwaar gewonden bij een letselongeval met brand (zie paragraaf 2.3) zijn in Tabel 3-16 defaultwaarden opgenomen.

Tabel 3-16: Defaultwaarden slachtoffers.

symbool	omschrijving	eenheid	domein	default
N_{dir}	gemiddeld aantal doden per letselongeval ¹	pers/ongeval	(0;1]	0,036
N_{gew}	gemiddeld aantal gewonden per letselongeval ¹	pers/ongeval	(0;5]	1,164
$P_{bekneld}$	kans voor de gewonden bij een letselongeval om bekneld of zwaar gewond te raken ²	-	[0;1]	0,1
P_{extra}	(extra) kans voor de beknelden en zwaar gewonden om te overlijden bij een letselongeval met brand ³	-	[0;1]	1

Toelichting bij de defaultwaarden van Tabel 3-16:

1. Op basis van gemiddeld 1,164 gewonden en 0,036 doden per voertuig uit [14], waarbij is aangegeven dat 40% van de slachtoffers in personenauto's, 20% in zwaar verkeer en 40% onder kwetsbare verkeersdeelnemers (voetgangers, fietsers, e.d.) valt. Hoewel er op autowegen en autosnelwegen geen kwetsbare verkeersdeelnemers zijn wordt toch uitgegaan van deze waarden totdat er betere gegevens voor handen zijn. Bij de afleiding van het gemiddeld aantal doden en gewonden per letselongeval is al rekening gehouden met het overlijden van sommige van de (zwaar) gewonden enige tijd na het incident. Er is geen rekening gehouden met de mogelijk hogere kans op overlijden van beknelden en zwaar gewonden in een tunnel vanwege de mogelijk kleinere kans op het tijdig bevrijden.
2. Geschat door het Steunpunt Tunnelveiligheid. In [13] is opgenomen dat de kans op (alleen) beknelling 1 op 10 is.
3. Dit is een zeer pessimistische benadering. De kans op overlijden van beknelden en/of zwaar gewonden bij een, snelontwikkende, brand bij een letselongeval zal in werkelijkheid ook relatief hoog zijn; echter in de statistieken voor slachtoffers bij letselongevallen zijn, voor de 'open weg' situatie, de slachtoffers van voertuigbranden al inbegrepen. Hoe groot dit aandeel is, is onbekend.

Defaultwaarde vluchtsnelheid

Bij de berekening van het aantal slachtoffers bij branden en het vrijkomen van gevaarlijke stoffen worden voor de vluchtsnelheid de in Tabel 3-17 weergegeven defaultwaarden aangehouden.

Tabel 3-17: Defaultwaarden vluchtsnelheid.

symbool	omschrijving	eenheid	domein	default
V_{vlucht}	gemiddelde vluchtsnelheid zonder rook ¹	m/min	(0,250]	66
$V_{vluchtrook}$	gemiddelde vluchtsnelheid in rook ¹	m/min	[0,250]	18
$T_{uitstap}$	gemiddelde uitstaptijd van inzittenden uit een voertuig ²	min	[0;10]	0,2
$T_{duur,instructie}$	benodigde tijd voor het omroepen van de evacuatie instructies ²	min	[0;10]	0,5
$maxFIDrook$	FID waarde van rookgassen waarbij onvermogen tot vluchten optreedt	-	[0;1]	0,3
$maxdosistemp$	temperatuurdosis waarbij onvermogen tot vluchten optreedt	-	[0;1]	0,3

Toelichting bij de defaultwaarden van Tabel 3-17:

1. In [13] is opgenomen dat de maximale vluchtsnelheid in horizontale ruimten 1,6 m/s is bij minder dan 0,8 pers/m². In [20] is opgenomen dat de loopsnelheid in een rookvrije omgeving 1 tot 2 m/s is, en (geschat) dat de loopsnelheid in tunnels (afhankelijk van onder andere de zichtbeperking door de rook en de verlichting in de tunnel) 0,5 tot 1,5 m/s is. In paragraaf 7.4.2 wordt afgeleid dat de vluchtsnelheid zonder rook 1,1 m/s (= 66 meter per minuut) bedraagt en met rook 0,3 m/s (18 meter per minuut). In vergelijking met de hierboven genoemde bronnen wordt in het model default gebruikt gemaakt van conservatieve vluchtsnelheden.
2. De beslissing om te gaan vluchten wordt genomen op basis van eigen waarneming of het opvolgen van de instructies. Zowel het geven van de instructie als het uitstappen kosten tijd. Hiermee wordt impliciet aangenomen dat een vluchtinstructie wordt opgevolgd en het zelf onderkennen van het gevaar snel tot actie leidt. Hiermee is er geen rekening gehouden met het volledig ontruimen van een bus. Voor degenen die als laatste uit de bus stappen heeft dit tot gevolg dat de gevaarsaspecten groter (kunnen) zijn dan voor degenen die als eerste uitstappen; de loopafstand blijft voor alle passagiers dezelfde. Het gevolg, in extra slachtoffers, is afhankelijk van de plaats van de bus ten opzichte van een vluchtdeur; ook hiermee is in het model geen rekening gehouden.

4 Tussenvariabelen

In dit hoofdstuk wordt de voorbereiding van de invoer beschreven. Hierbij worden voor de berekening benodigde variabelen, tussenvariabelen genoemd, berekend uit de invoervariabelen. Ook worden de gehanteerde vaste waarden aangegeven; deze vaste waarden kunnen door de gebruiker van QRA-tunnels niet worden gewijzigd.

4.1 Incidentkansen

De gemiddelde incidentkansen (het aantal incidenten per voertuigkilometer) $F_{\text{pech,gem}}$ voor de gemiddelde kans op pech, $F_{\text{UMS,gem}}$ voor de gemiddelde kans op een UMS-ongeval en $F_{\text{letsel,gem}}$ voor de gemiddelde kans op een letselongeval, worden gegeven door:

$$\begin{aligned}
 F_{\text{pech,gem}} &= \frac{F_{\text{pech,neer}} \cdot L_{\text{neer}} + F_{\text{pech,hor}} \cdot L_{\text{hor}} + F_{\text{pech,op}} \cdot L_{\text{op}}}{L_{\text{buis}}} \\
 F_{\text{UMS,gem}} &= \frac{F_{\text{UMS,neer}} \cdot L_{\text{neer}} + F_{\text{UMS,hor}} \cdot L_{\text{hor}} + F_{\text{UMS,op}} \cdot L_{\text{op}}}{L_{\text{buis}}} \\
 F_{\text{letsel,gem}} &= \frac{F_{\text{letsel,neer}} \cdot L_{\text{neer}} + F_{\text{letsel,hor}} \cdot L_{\text{hor}} + F_{\text{letsel,op}} \cdot L_{\text{op}}}{L_{\text{buis}}}
 \end{aligned} \quad (4-1)$$

L_{buis} , L_{neer} , L_{hor} en L_{op} staan verklaard in Tabel 3-1 en $F_{\text{pech,neer}}$, $F_{\text{UMS,neer}}$, $F_{\text{letsel,neer}}$, $F_{\text{pech,hor}}$, $F_{\text{UMS,hor}}$, $F_{\text{letsel,hor}}$, $F_{\text{pech,op}}$, $F_{\text{UMS,op}}$ en $F_{\text{letsel,op}}$ in Tabel 3-8.

4.2 Verdeling voertuigen over perioden

Ten aanzien van het vervoer van gevaarlijke stoffen bleek uit nader onderzoek van tellingen bij de ontwikkeling van de telmethodiek conform [6]:

- tussen 6:30 uur en 18:30 uur is de vervoersintensiteit van gevaarlijke stoffen ongeveer constant;
- tussen 6:30 uur en 18:30 uur vindt circa 80% van het totale transport van gevaarlijke stoffen plaats;
- het transport van gevaarlijke stoffen is verwaarloosbaar in het weekend;
- de seizoensinvloeden op transportaantallen is nihil;
- gemiddeld is de helft van de waargenomen transportvoertuigen leeg.

Uit later onderzoek [18] is onder andere gebleken dat:

- het vervoer van gevaarlijke stoffen zich steeds meer buiten de spitsuren voltrekt;
- het vervoer van gevaarlijke stoffen in het weekend niet meer verwaarloosbaar is (tellingen op een aantal wegvakken geven 2 tot 8% aan);
- de aanname dat 50% van waargenomen transporten leeg is te hoog is; gemiddeld blijkt circa 60% van de waargenomen transporten beladen te zijn. Hiermee wordt bij het berekenen van het aantal transporten per jaar op basis van tellingen rekening gehouden.

Aanname 4-1 Voor het tanktransport van gevaarlijke stoffen wordt aangehouden dat: 20% van dit vervoer plaatsvindt in de avond en nacht (periode van 12 uur) en 80% gelijkmatig verdeeld over de rest van het etmaal. Voor het vervoer van explosieven wordt dezelfde verdeling aangehouden. Deze aanname is een vereenvoudiging.

Bij het transport van gevaarlijke stoffen wordt onderscheid gemaakt in tankauto's met gevaarlijke stoffen en vrachtauto's met explosieven. $A_{\text{tank,nr}}$, $A_{\text{tank,s}}$ en $A_{\text{tank,d}}$ zijn de fracties tankauto's met gevaarlijke stoffen tijdens respectievelijk de 'nacht', de 'spits' en de 'dag'; $A_{\text{expl,nr}}$, $A_{\text{expl,s}}$ en $A_{\text{expl,d}}$ zijn de fracties vrachtauto's geladen met explosieven tijdens respectievelijk de 'nacht', de 'spits' en de 'dag'. Voor deze fracties geldt:

$$\begin{aligned}
A_{\text{tank},n} &= 0,2 \cdot \frac{T_{\text{nacht}}}{12} \cdot \frac{I_{\text{gs}}}{I_{\text{nacht}}} \\
A_{\text{tank},s} &= \left(1 - 0,2 \cdot \frac{T_{\text{nacht}}}{12}\right) \cdot \frac{T_{\text{spits}}}{T_{\text{spits}} + T_{\text{dag}}} \cdot \frac{I_{\text{gs}}}{I_{\text{spits}}} \\
A_{\text{tank},d} &= \left(1 - 0,2 \cdot \frac{T_{\text{nacht}}}{12}\right) \cdot \frac{T_{\text{dag}}}{T_{\text{spits}} + T_{\text{dag}}} \cdot \frac{I_{\text{gs}}}{I_{\text{dag}}} \\
A_{\text{expl},n} &= 0,2 \cdot \frac{T_{\text{nacht}}}{12} \cdot \frac{I_{\text{expl}}}{I_{\text{nacht}}} \\
A_{\text{expl},s} &= \left(1 - 0,2 \cdot \frac{T_{\text{nacht}}}{12}\right) \cdot \frac{T_{\text{spits}}}{T_{\text{spits}} + T_{\text{dag}}} \cdot \frac{I_{\text{expl}}}{I_{\text{spits}}} \\
A_{\text{expl},d} &= \left(1 - 0,2 \cdot \frac{T_{\text{nacht}}}{12}\right) \cdot \frac{T_{\text{dag}}}{T_{\text{spits}} + T_{\text{dag}}} \cdot \frac{I_{\text{expl}}}{I_{\text{dag}}}
\end{aligned} \tag{4-2}$$

T_{spits} , T_{nacht} , T_{dag} , I_{spits} , I_{dag} en I_{nacht} staan verklaard in Tabel 3-4 en I_{expl} en I_{GS} in Tabel 3-6.

Tabel 4-1 toont de variabelen (in de eerste rij) die afhankelijk zijn van de periode van het etmaal.

Tabel 4-1: Tussenvariabelen per periode.

G_{periode}	T_{periode}	I_{periode}	$I_{\text{periodeuur}}$	$A_{\text{auto,periode}}$	$A_{\text{bus,periode}}$	$A_{\text{vracht,periode}}$	$A_{\text{expl,periode}}$	$A_{\text{tank,periode}}$
Spits	T_{spits}	I_{spits}	I_{spitsuur}	$A_{\text{auto,s}}$	$A_{\text{bus,s}}$	$A_{\text{vracht,s}}$	$A_{\text{expl,s}}$	$A_{\text{tank,s}}$
Dag	T_{dag}	I_{dag}	I_{daguur}	$A_{\text{auto,d}}$	$A_{\text{bus,d}}$	$A_{\text{vracht,d}}$	$A_{\text{expl,d}}$	$A_{\text{tank,d}}$
Nacht	T_{nacht}	I_{nacht}	I_{nachtuur}	$A_{\text{auto,n}}$	$A_{\text{bus,n}}$	$A_{\text{vracht,n}}$	$A_{\text{expl,n}}$	$A_{\text{tank,n}}$

Toelichting bij Tabel 4-1:

De in de tabel gebruikte invoervariabelen of tussenvariabelen zijn afkomstig uit Tabel 3-4 (T_{spits} , T_{nacht} , T_{dag} , I_{spitsuur} , I_{spits} , I_{nachtuur} , I_{nacht} , I_{dag} , I_{daguur}), Tabel 3-5 ($A_{\text{auto,s}}$, $A_{\text{auto,d}}$, $A_{\text{auto,n}}$, $A_{\text{bus,s}}$, $A_{\text{bus,d}}$, $A_{\text{bus,n}}$, $A_{\text{vracht,s}}$, $A_{\text{vracht,d}}$, $A_{\text{vracht,n}}$) en vergelijking (4-2) ($A_{\text{expl,s}}$, $A_{\text{expl,d}}$, $A_{\text{expl,n}}$, $A_{\text{tank,s}}$, $A_{\text{tank,d}}$, $A_{\text{tank,n}}$). Voor de betekenis van G_{periode} wordt verwezen naar Tabel 2-1.

4.3 Uitstroming gevaarlijke stoffen

Voor het bepalen van de kansen op uitstroming van gevaarlijke stoffen uit tankauto's in tunnels wordt gebruik gemaakt van gegevens van uitstromingen op de open weg.

Aanname 4-2 Uitstromingen van minder dan 100 kg gevaarlijke stof uit tankauto's leiden niet tot gevolgen in de tunnel.

Toelichting: *Met deze aanname worden uitstromingen van minder dan 100 kg, net als op de open weg, verwaarloosd. In [7] zijn alleen de uitstromingen groter dan 100 kg beschouwd, omdat uitstromingen tot 100 kg niet tot gevolgen buiten de weg (externe veiligheid) zullen leiden. De vervolgekans op uitstroming kleiner dan 100 kg is daarom ook niet afgeleid in [7]. Door deze aanname wordt het risico mogelijk iets onderschat. Echter de grote uitstromingen van gevaarlijke stoffen zullen bepalend zijn voor het risico (grotere effectgebieden, hogere concentraties in de gaswolk).*

In [7] zijn, voor de externe veiligheid, de 'uitstroomfrequenties' (in feite de uitstroomkans) > 100 kg per voertuigkilometer voor uitstromingen van gevaarlijke stoffen uit tankwagens afgeleid. Vervolgens is deze 'uitstroomfrequentie' uitgesplitst naar een, over alle wegen gemiddelde, 'letselonevalfrequentie' (de kans op een letseloneval per voertuigkilometer) en een bijbehorende vervolgekans op uitstroming:

uitstroomfrequentie = letselongevalfrequentie · vervolgcans op uitstroming

Omdat de vervolgcans op uitstroming gegeven een letselongeval mede afhankelijk is van de (toegestane) snelheid is deze vervolgcans op uitstroming gevarieerd en vastgelegd voor verschillende wegtypen. Dit is zodanig gedaan dat de gemiddelde 'uitstroomfrequentie' in Nederland constant is gehouden. De gevonden waarden voor de onderscheiden wegtypen zijn aangegeven in Tabel 4-2.

Tabel 4-2: Vervolgkans op uitstroming uit [7].

Wegtype	vervolgcans uitstroming > 100 kg druktankwagens	vervolgcans uitstroming > 100 kg atmosferische tankwagens
Autosnelweg	0,039	0,076
Wegen buiten de bebouwde kom (geen autosnelweg)	0,026	0,059
Wegen binnen de bebouwde kom	0,013	0,042

De bijbehorende 'letselongevalfrequentie' is de frequentie van letselongevallen met motorvoertuigen, exclusief de aanrijdingen met langzaam verkeer (voetgangers, fietsers en dergelijke). Die bijbehorende 'letselongevalfrequentie' zal voor autosnelwegen meestal (vrijwel) gelijk zijn aan de invoerwaarde van Tabel 3-8; voor andere wegtypen kan de bijbehorende 'letselongevalfrequentie' lager zijn dan de invoerwaarde van Tabel 3-8 waardoor een overschatting van het risico ontstaat. In aansluiting hierop wordt in onderstaande aanname uitgewerkt dat de uitstroming van gevaarlijk stoffen is gekoppeld aan letselongevallen en niet optreedt bij pech of UMS.

Aanname 4-3 Na pech of UMS treedt géén uitstroming van gevaarlijke stoffen op.

Toelichting: *Dit is als uitgangspunt aangehouden omdat er geen afleiding beschikbaar is voor de frequentie en/of vervolgcans op uitstroming per type incident. Het is ook een logisch gevolg van het volgen van de methodiek uit [7]. Het is een modelmatige aanpassing van de werkelijkheid; alle uitstromingen van gevaarlijke stoffen worden, onafhankelijk van het type incident waarbij ze in werkelijkheid optreden, gemodelleerd alsof het een uitstroming na een letselongeval betreft.*

In 1988 is door TNO een studie uitgevoerd naar uitstroomhoeveelheden en uitstroomkansen van brandbare vloeistoffen [22]. In deze studie werden de in de praktijk voorgekomen uitstromingen ingedeeld in 3 categorieën, namelijk < 1 m³, 1-10 m³ en 10-30 m³ (hoeveelheden van minder dan 100 kg worden als niet relevant beschouwd). TNO heeft vervolgens de bijbehorende gatgroottes in de tank afgeleid. Deze zijn weergegeven in Tabel 4-3.

Tabel 4-3: Gatgroottes uit [22].

Uitstroomhoeveelheid	Gatgrootte			
	Nummer	oppervlak [m ²]	Hoeveelheid [m ³]	Debiet [m ³ /s]
< 1 m ³	1	1,1·10 ⁻⁴	<1	0,0003
1-10 m ³	2	1,1·10 ⁻²	1-10	0,03
10-30 m ³	3a	0,05	10-30	0,10
	3b	0,15	10-30	0,20

Voor de categorie 10-30 m³ is afgeleid dat er twee gatgroottes, 3a en 3b, moeten worden onderscheiden waarbij werd vastgesteld deze alleen kunnen optreden indien de tankwagens bij het ongeluk is gekanteld. Dit gegeven werd gebruikt om een vervolgcans af te leiden voor wegtunnels. De kans op kantelen is in de tunnels veel kleiner dan op het gemiddelde wegennet omdat er in tunnels in veel gevallen onvoldoende fysieke ruimte is om te kantelen; bovendien is een aantal belangrijke oorzaken voor kantelen, zoals scherpe bochten en het in de berm geraken, in de tunnel niet aanwezig. In [22] werd op grond hiervan door de toenmalige dienst Verkeerskunde van Rijkswaterstaat de kans op kantelen op

0,0045 geschat voor een tunnel met 3 rijstroken (zonder vluchtstrook) en op nihil voor een tunnelbuis met 2 rijstroken. Hierbij werd de kans op kantelen in de tunnel gerelateerd aan een aanrijding met de barrier (en tunnelwand) en de inrijdhoek van de aanrijding. Beredeneerd werd dat de aanrijdhoek in de meeste gevallen klein is (kleiner dan 15 graden) waardoor de tankauto niet zal kantelen. De kans op kantelen zonder de afschermingsconstructie te raken werd op 0 geschat. De kansverdeling tussen gatgrootte 1 en gatgrootte 2 is door TNO geschat op 0,86 versus 0,14.

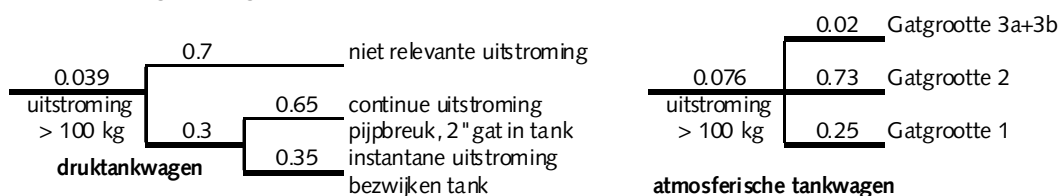
In een onderzoek van AVIV uit 1994 [7] werd, voor het totale Nederlandse wegennet, afgeleid dat de vervolgekans op een uitstroming van 0,5 m³ (vergelijkbaar met gatgrootte 1) 0,25 bedraagt, van 5 m³ (gatgrootte 2) 0,6 en van de gehele inhoud (gatgrootte 3a+3b) 0,15. Dit wijkt sterk af van de verdeling die TNO heeft afgeleid. Aangezien de door AVIV afgeleide kansen nog steeds in de externe veiligheidsberekeningen worden toegepast, ligt het voor de hand om ook in QRA-tunnels deze uitstroomkansen te gebruiken, waarbij een correctie wordt toegepast voor de beperkte kans op kantelen in wegtunnels.

In 1997 heeft TNO in opdracht van de Adviesdienst Verkeer en vervoer van Rijkswaterstaat nader onderzoek uitgevoerd naar kantelonevallen van zwaar verkeer [23]. Hierin is geconstateerd dat uit de processen-verbaal blijkt dat 35% van de kantelonevallen wordt veroorzaakt door een te scherpe bocht en 26% door het in de berm geraken. Beide oorzaken kunnen in Nederlandse tunnels niet optreden aangezien er geen scherpe bochten worden toegepast en er geen sprake is van (onverharde) bermen, maar barriers worden toegepast, die kantelen tegen gaan. Deze barriers en het gegeven dat de tankwagen in een tunnel ook niet over de barrier heen kan kantelen (want daar zit de tunnelwand) maakt dat de kans op kantelen in een tunnel aanzienlijk kleiner is dan op een gemiddelde Nederlandse weg. Een factor 10 kleinere kans op gatgrootte 3a of 3b (waarvoor kantelen nodig is) lijkt hier gerechtvaardigd.

Op grond hiervan wordt de kans op gatgrootte 3 voor een brede tunnel (3 of meer rijstroken) op 0,02 gesteld en voor smalle tunnels (2 rijstroken of minder) op 0,01. Dit is nog altijd aanzienlijk groter (en dus conservatiever) dan de in [22] aangegeven kansen van 0,0045 en 0. Overigens moet er wel bij worden bedacht dat de inschatting van deze kans is gebaseerd op het wegontwerp dat in Nederlandse tunnels gebruikelijk is, waarbij barriers langs de wand worden toegepast. Uit casuïstiek (bron: Rijkswaterstaat Dienst Verkeer en Scheepvaart) blijkt dat er in de periode 2004-2009 geen ongevallen met gekantelde vrachtwagens in Nederlandse tunnels zijn voorgekomen.

De kans op gatgrootte 1 wordt gelijk gehouden aan de door AVIV voorgestelde (en in de externe veiligheid gehanteerde) kans. De overige uitstromingen worden ingedeeld in gatgrootte 2.

In de studies van AVIV en TNO is niet aangegeven dat ook voor gassen een grote uitstroming alleen bij kantelen kan optreden. Daarom worden voor de uitstroomkansen van gassen dezelfde uitstroomkansen als in [7] gehanteerd, zoals bij de berekeningen voor de externe veiligheid. Dit leidt tot de volgende kansverdeling, zie Figuur 4-1.



Figuur 4-1 Vervolgkansen op uitstroming (voor een autosnelweg met meer dan 2 rijstroken) gegeven een letselongeval met motorvoertuigen (exclusief aanrijdingen met langzaam verkeer).

In werkelijkheid is natuurlijk elke grootte van uitstroming tussen 0 kg en de hele inhoud van de tank mogelijk. Voor de risicoanalyse wordt vanwege de beheersbaarheid van het aantal berekeningen echter uitgegaan van de in Figuur 4-1 aangegeven representatieve scenario's.

Bij gassen wordt bij continue uitstromingen (dus de 'continue' en de 'niet relevante' uitstroming) nog een nadere onderverdeling gemaakt naar uitstromingen die, ten opzichte van de druktankwagen, naar voor of naar achter plaatsvinden (respectievelijk benedenstrooms en bovenstrooms van het incident).

Bij tot vloeistof verdichte gassen kan een instantane uitstroming op twee manieren ontstaan:

- een zogenaamde koude BLEVE: een instantane uitstroming ontstaan ten gevolge van een mechanische impact, waarbij de tankwagen (bij de vervoersdruk) in één keer openscheurt;
- een zogenaamde warme BLEVE: een instantane uitstroming ontstaan door het opwarmen van de tankwagen (waarbij de druk in de tank oploopt en de sterkte van de tank afneemt).

In de risicoanalyse wordt hiermee rekening gehouden: een koude BLEVE treedt direct na het incident op; een warme BLEVE pas na enige tijd (veelal na meer dan 10 minuten). Vanwege het verschil in temperatuur en druk van de uitstroming en het tijdstip waarop de uitstroming plaatsvindt (van belang voor het aantal aanwezigen) zullen de effecten van een warme en koude BLEVE verschillen. De voor de berekeningen aangehouden waarden van de relevante variabelen zijn aangegeven in Tabel 4-4 en Tabel 3-9.

Tabel 4-4: Variabelen uitstroming.

symbool	omschrijving	eenheid	functie $v(\mathbf{X})$
P_{atm}	vervolgkans op uitstroming uit atmosferische tankwagen (vloeistof) > 100 kg	-	$= P_{uit,atm}$ als $G_{incident} = 'letsel'$ $= 0$ als $G_{incident} \neq 'letsel'$
P_{druk}	vervolgkans op uitstroming uit druktankwagen (tot vloeistof verdicht gas) > 100 kg	-	$= P_{uit,druk}$ als $G_{incident} = 'letsel'$ $= 0$ als $G_{incident} \neq 'letsel'$

Toelichting bij Tabel 4-4:

$P_{uit,atm}$ en $P_{uit,druk}$ zijn de (default) invoerwaarden uit Tabel 3-9. Voor $G_{incident}$ zie Tabel 2-1.

4.4 Voertuigbranden

Voor het bulktransport van gevaarlijke stoffen zijn de uitstroombrequenties en vervolgsansen in [7] op de open weg op basis van alle mogelijke incidentoorzaken bepaald. Hierbij zijn dus ook uitstromingen beschouwd die zijn ontstaan ten gevolge van een brand in de nabijheid van of onder de bulktank. Daarom wordt er in de risicoanalyse voor het transport van gevaarlijke stoffen niet meer apart rekening gehouden met een voertuigbrand. De kans op een voertuigbrand (F_{brand}) per voertuigkilometer is, per type voertuig (Gebeurtenis 'voertuig') aangegeven in Tabel 4-5.

Tabel 4-5: Kans op voertuigbrand.

$G_{voertuig}$	omschrijving	F_{brand} [(mvtkm) ⁻¹]
Pers	Personenauto	$F_{brand,auto}$
Bus	Bus	$F_{brand,bus}$
Vageen	Vrachtauto geen/niet brandbare lading	$F_{brand,vracht}$
Vabrb	Vrachtauto met brandbare lading	$F_{brand,vracht}$
Expl	Vrachtauto met explosieven	$F_{brand,vracht}$

$F_{brand,auto}$, $F_{brand,bus}$ en $F_{brand,vracht}$ worden verklaard in Tabel 3-8. Voor $G_{voertuig}$ zie Tabel 2-1.

Aanname 4-4 Een langzaam ontwikkelende brand zal na 10 minuten zijn maximale omvang bereiken. Een snel ontwikkelende brand bereikt na 2 minuten zijn maximale omvang.

Toelichting: Deze aanname is een vereenvoudiging en een conservatieve benadering van de in

de literatuur gevonden waarden.

Aanname 4-5 De snel ontwikkelende branden worden gekoppeld aan letselongevallen. De normaal/langzaam ontwikkelende branden worden gekoppeld aan pechgevallen.

Toelichting: Dit is een vereenvoudiging die conservatief is omdat:

- de kans op blussen door weggebruikers bij letselongevallen default op 0 is gesteld;
- er sprake kan zijn van beknelde inzittenden die daarom slachtoffer worden;
- verondersteld wordt dat de rijbaan bij een letselongeval onmiddellijk volledig is geblokkeerd.

In Tabel 4-6 zijn het tijdstip waarop de brand buiten het voertuig treedt (T_{uitvtg}), het tijdstip waarop de brand zijn maximale omvang bereikt (T_{max}), de deekans op brand per incidenttype (P_{verd}) en de gemiddelde incidentfrequentie ($F_{\text{incident,gem}}$) aangegeven.

Tabel 4-6: Variabelen voertuigbrand.

G_{incident}	T_{uitvtg} [min]	T_{max} [min]	P_{verd} [-]	$F_{\text{incident,gem}}$ [(mvtkm) ⁻¹]
Pech	$t_{\text{uitvtg,langzaam}}$	10	$1 - P_{\text{verd,snel}}$	$F_{\text{pech,gem}}$
UMS	-	-	0	$F_{\text{UMS,gem}}$
Letsel	$t_{\text{uitvtg,snel}}$	2	$P_{\text{verd,snel}}$	$F_{\text{letsel,gem}}$

Toelichting bij Tabel 4-6:

Voor $t_{\text{uitvtg,langzaam}}$, $t_{\text{uitvtg,snel}}$ en $P_{\text{verd,snel}}$ zie Tabel 3-12; voor T_{max} Aanname 4-4 en voor P_{verd} Aanname 4-5. $F_{\text{pech,gem}}$, $F_{\text{UMS,gem}}$ en $F_{\text{letsel,gem}}$ komen uit vergelijking 4-1. Voor G_{incident} zie Tabel 2-1.

Tabel 4-7 toont de kans op blussen P_{blus} .

Tabel 4-7: Kans op blussen voertuigbrand.

G_{incident}	G_{voertuig}	A_{blus}	P_{blus} [-]
Pech	Pers	ja	$P_{\text{blus,auto}}$
	Bus	ja	$P_{\text{blus,vracht}}$
	Vageen	ja	$P_{\text{blus,vracht}}$
	Vabrb	ja	$P_{\text{blus,vracht}}$
UMS	-		0
Letsel	Pers	ja	$P_{\text{b,snel, auto}}$
	Bus	ja	$P_{\text{b,snel,vracht}}$
	Vageen	ja	$P_{\text{b,snel,vracht}}$
	Vabrb	ja	$P_{\text{b,snel,vracht}}$
anders			0

Toelichting bij Tabel 4-7:

A_{blus} is een invoervariabele uit Tabel 3-2. $P_{\text{blus,auto}}$, $P_{\text{blus,vracht}}$, $P_{\text{b,snel, auto}}$ en $P_{\text{b,snel,vracht}}$ worden verklaard in Tabel 3-11. Voor G_{incident} en G_{voertuig} zie Tabel 2-1.

4.5 Tankbrand gevaarlijke stoffen

In QRA-tunnels geldt dat toxische vloeistoffen en tot vloeistof verdichte toxische gassen niet brandbaar zijn (wanneer stoffen zowel brandbaar als toxisch zijn wordt hiermee rekening gehouden bij de indeling

van de stoffen in de stofcategorieën [6] door de stof deels als brandbare en deels als toxische stof mee te tellen).

De vervolgcansen op directe ontsteking ($P_{ont,dir}$) en vertraagde ontsteking ($P_{ont,vert}$) bij uitstroming van gevaarlijke stoffen zijn per stofklasse aangegeven in Tabel 4-8.

Tabel 4-8: Variabelen ontsteking tankbrand.

$G_{stofklasse}$	$G_{uitstroming}$	G_{plaats}	$P_{ont,dir}$	$P_{ont,vert}$
LF	Lcontgr		$P_{ont,dir,LF} \cdot (1 - P_{b,snel,LF})$	$P_{ont,vert,LF} \cdot (1 - P_{b,snel,LF})$
	Lcontkl		$P_{ont,dir,LF} \cdot (1 - P_{b,snel,LF})$	$P_{ont,vert,LF} \cdot (1 - P_{b,snel,LF})$
	Linst	Neer	$P_{ont,dir,LF} \cdot (1 - P_{b,snel,LF})$	$P_{ont,vert,LF} \cdot (1 - P_{b,snel,LF})$
	Linst	In file	$P_{odLF,infile} \cdot (1 - P_{b,snel,LF})$	$P_{ovLF,infile} \cdot (1 - P_{b,snel,LF})$
	Linst	Op	$P_{odLF,infile} \cdot (1 - P_{b,snel,LF})$	$P_{ovLF,infile} \cdot (1 - P_{b,snel,LF})$
	Linst	Horizontaal	$P_{odLF,infile} \cdot (1 - P_{b,snel,LF})$	$P_{ovLF,infile} \cdot (1 - P_{b,snel,LF})$
GF			$P_{ont,dir,GF} \cdot (1 - P_{b,snel,GF})$	$P_{ont,vert,GF} \cdot (1 - P_{b,snel,GF})$
Anders			0	0

Toelichting bij Tabel 4-8:

Voor de aangegeven kansen zie Tabel 3-10. Voor $G_{stofklasse}$, $G_{uitstroming}$ en G_{plaats} zie Tabel 2-1.

4.6 Brandgrootte

De brandgrootte wordt bepaald door de bij de brand betrokken voertuigen. In de literatuur zijn de volgende te verwachten maximale brandvermogens beschreven:

- personenauto 5 – 6 MW [10]; kleine auto 2,5 MW en grote auto 5 MW [20].
- twee tot drie personenauto's 8 MW [20].
- bestelbus 15 MW [20].
- bus ca. 20 - 30 MW [10] en 20 MW [20].
- vrachtwagen (afhankelijk van lading): klein 30 - 50 MW en groot 100 MW [10]; in het algemeen 20 - 30 MW maar maxima van 100 - 120 MW mogelijk [20].
- tankwagens 200 - 300 MW [10] en [20].

Aanname 4-6

De te verwachten maximale brandvermogens per voertuigtype zijn:

- 5 MW voor een personenauto;
- 25 MW voor een bus of een lege of met niet-brandbare goederen geladen vrachtauto;
- 50 MW (60% van de branden) of 100 MW (40% van de branden) voor een met brandbare goederen geladen vrachtauto en 100 MW voor een met explosieven geladen vrachtauto;
- tankbrand (aantal MW afhankelijk van ventilatie) voor een brand van een uitgestroomde brandbare vloeistof of tot vloeistof verdicht brandbaar gas.

Toelichting:

De aanname is een vereenvoudiging. Bij deze aanname is ervan uitgegaan dat de lading van het voertuig altijd bij de brand betrokken zal zijn.

Op het moment dat de brand in een met explosieven geladen vrachtauto zijn maximale brandvermogen bereikt zullen de explosieven exploderen.

Door brandoverslag kan ook het maximale brandvermogen wijzigen. Er is eenhoudigheidshalve voor gekozen om het aantal brandgroottes in het model beperkt te houden tot 5, 10, 25, 50, 100, 200 MW en tankbrand zie Tabel 4-9. Het gemodelleerde brandvermogen is hierbij verkregen door het bij elkaar

optellen van de maximale brandvermogens van de (beide) betrokken voertuigen en, voor zoveel nodig, af te ronden naar beneden omdat het immers onwaarschijnlijk is dat de maxima samenvallen. Het maximale brandvermogen voor vrachtwagens is daarbij gehandhaafd op 100 MW.

Tabel 4-9: Gemodelleerde maximale brandvermogens bij brandoverslag.

1 ^e voertuig	2 ^e voertuig				
	Pers (5)	Bus/Vageen (25)	Vabrb(50)	Vabrb(100)	Tank
Personenauto (5 MW)	10 MW	25 MW	50 MW	100 MW	-
Bus (25 MW)	25 MW	50 MW	50 MW	100 MW	200 MW
Vrachtauto met geen of geen brandbare lading (25 MW)	25 MW	50 MW	50 MW	100 MW	200 MW
Vrachtauto met brandbare lading (P ₅₀) (50 MW)	50 MW	50 MW	100 MW	100 MW	200 MW
Vrachtauto met brandbare lading (1- P ₅₀) (100 MW)	100 MW	100 MW	100 MW	100 MW	200 MW
Tankauto (aantal MW is afhankelijk van ventilatie)	tankbrand	tankbrand	tankbrand	tankbrand	tankbrand

Toelichting bij Tabel 4-9:

Bij een tankbrand wordt de plasgrootte afhankelijk gesteld van het uitstroomdebiet (zie hoofdstuk 8) en wordt het brandvermogen bepaald in de CFD-berekeningen (zie hoofdstuk 7). Bij brandoverslag van een voertuigbrand naar een tankauto is er voor gekozen om het vervolg, ter vereenvoudiging, te modelleren als een 200 MW-brand (ongeacht de aard van de eventueel vrijkomende gevaarlijke stoffen). De gevolgen van een 200 MW-brand zijn al zodanig ernstig dat dit een voldoende conservatieve benadering is, behalve voor de situatie waarbij er door brandoverslag naar een tank met tot vloeistof verdicht gas een BLEVE ontstaat. De warme BLEVE is echter afzonderlijk in het model meegenomen.

Tabel 4-10 toont de kans op brandoverslag.

Tabel 4-10 Kans op brandoverslag.

G_incident	G_voertuig	P_overslag
pech	-	0
overig	Pers	P _{over,auto}
	Bus	P _{over,bus}
	Vageen	P _{over,bus}
	Vabrb	P _{over,vracht}
	Expl	0

Toelichting bij Tabel 4-10:

De variabelen $P_{over,auto}$, $P_{over,bus}$ en $P_{over,vracht}$ worden verklaard in Tabel 3-12. Voor $G_{incident}$ en $G_{voertuig}$ zie Tabel 2-1.

4.7 Filevorming

Voor het berekenen van de filelengte is het nodig om het gemiddelde ruimtebeslag van voertuigen in een file te kennen. De gemiddelde lengte van een voertuig in een stilstaande file L_{vtg} wordt berekend door:

$$L_{vtg} = L_{auto} \cdot A_{auto,periode} + L_{vracht} \cdot (A_{bus,periode} + A_{vracht,periode}) \quad (4-3)$$

$A_{auto,periode}$, $A_{bus,periode}$ en $A_{vracht,periode}$ worden verklaard in Tabel 4-1 en L_{auto} en L_{vracht} in Tabel 3-3.

File benedenstreams

Met een file wordt in dit verband bedoeld: (nagenoeg) stilstaand verkeer.

Voor de tijdsduur $T_{vulduur}$ (uur) voor het vullen van de gehele tunnelbuis bij filevorming geldt:

$$T_{vulduur} = \frac{L_{buis} \cdot N_{filerij}}{L_{vtg} \cdot I_{periodeuur}} \quad (4-4)$$

L_{buis} wordt verklaard in Tabel 3-1, $N_{filerij}$ in Tabel 3-7, $I_{periodeuur}$ in Tabel 4-1, en L_{vtg} in vergelijking (4-3). Voor de tijdsduur (uur) van filevorming bij een benedenstroomse file in de tunnelbuis (T_{file}) geldt:

$$T_{file} = \min\left(\frac{T_{filemax}}{60}, T_{vulduur}\right) \quad (4-5)$$

$T_{filemax}$ wordt verklaard in Tabel 3-7 en $T_{vulduur}$ in vergelijking (4-4).

Voor de kans op een file benedenstreams ($P_{file,ben}$) geldt nu:

$$\begin{array}{ll} \text{als } T_{periode} = 0 & P_{file,ben} = 0 \\ \text{als } T_{periode} > 0 \text{ en } N_{file} \leq 1 \text{ en } T_{file} > T_{periode} & P_{file,ben} = N_{file} \\ \text{als } T_{periode} > 0 \text{ en } N_{file} \leq 1 \text{ en } T_{file} \leq T_{periode} & P_{file,ben} = \frac{T_{file}}{T_{periode}} \cdot N_{file} \\ \text{als } T_{periode} > 0 \text{ en } N_{file} > 1 \text{ en } T_{file} \cdot N_{file} > T_{periode} & P_{file,ben} = 1 \\ \text{als } T_{periode} > 0 \text{ en } N_{file} > 1 \text{ en } T_{file} \cdot N_{file} \leq T_{periode} & P_{file,ben} = \frac{T_{file}}{T_{periode}} \cdot N_{file} \end{array} \quad (4-6)$$

$T_{periode}$ wordt verklaard in Tabel 4-1, T_{file} in vergelijking (4-5) en N_{file} in Tabel 4-11.

Tabel 4-11: Variabelen file benedenstreams.

$G_{periode}$	N_{file} [1/etmaal]
Spits	N_{spits}
Dag	N_{dag}
Nacht	N_{nacht}

Toelichting bij Tabel 4-11:

N_{file} is het aantal keren (per etmaal) dat er tijdens de betreffende periode (nagenoeg) stilstaand verkeer in de buis komt te staan. De in de tabel gebruikte variabelen N_{spits} , N_{dag} en N_{nacht} zijn afkomstig uit Tabel 3-7. Voor $G_{periode}$ zie Tabel 2-1.

File bovenstreams

Met file bovenstreams wordt bedoeld het ontstaan van een file ten gevolge van het incident.

Aanname 4-7

Voor de vervolgekans op een file bovenstreams van een voertuigbrand wordt aangenomen: bij langzaam ontwikkelende brand: 0 als tijdig de tunnelbuis kan worden afgesloten en er voldoende passeerruimte is, anders 1; bij een snel ontwikkelende brand: 1.

Toelichting:

Bij langzaam ontwikkelende brand (niet in combinatie met een letselongeval) zal een voertuig meestal aan de zijkant van de tunnelbuis tot stilstand komen en slechts één rijstrook of de vluchtstrook blokkeren. Het overige verkeer zal dan nog gedurende enige tijd langs het brandende voertuig kunnen rijden. Voor de kans op

file bij een langzaam ontwikkelende brand wordt alleen 0 aangehouden als de tunnelbuis (door een operator) tijdig wordt afgesloten (hiervoor wordt aangehouden $T_{afsluit} \leq 7$) en er voldoende passeerruimte is ($N_{rij} + N_{vlucht} > 1$). In [15] wordt uitgegaan van 0% kans op een file bovenstrooms van pech met brand. Bij snel ontwikkelende branden is er een grote kans op het blokkeren van meerdere rijstroken. Daarom wordt pessimistisch aangenomen dat hierbij altijd een bovenstroomse file ontstaat. In [15] wordt uitgegaan van 50% kans op een file bovenstrooms van een UMS-ongeval met brand en 100% bij letselongevallen met brand.

Aanname 4-8 Voor de vervolgcans op een file bovenstrooms van een incident met uitstroming van gevaarlijke stoffen wordt aangenomen: 1.

Toelichting: Bij een uitstroming van gevaarlijke stoffen is er veelal sprake van een ernstig ongeval. Bovendien zijn uitstromingen gemodelleerd na een letselongeval.

Als er benedenstrooms al een file staat, zal er uiteraard ook altijd bovenstrooms een file ontstaan. De vervolgcans op een file bovenstrooms van het incident ($P_{file,bov}$) wordt dan:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Als } G_{fileben} = \text{Wel fileben:} & P_{file,bov} = 1 \\
 \text{Anders: als } G_{incident} = \text{Pech, } T_{afsluit} \leq 7 \text{ en } (N_{rij} + N_{vlucht} > 1): & P_{file,bov} = 0 \\
 \text{Alle overige gevallen:} & P_{file,bov} = 1
 \end{array} \quad (4-7)$$

Voor de gehanteerde waarden zie Aanname 4-7 en Aanname 4-8. Voor $G_{incident}$ zie Tabel 2-1.

4.8 Detectie

In deze paragraaf wordt het detecteren van het incident behandeld.

Detectie heeft tot doel het waarschuwen van een operator die tot actie kan overgaan; in plaats van een operator kan het detectiesignaal ook naar een apparaat, dat voor een automatische actie zorgt, worden gestuurd. In QRA-tunnels worden de volgende detectiewijzen onderscheiden:

- Snelheidsdetectie
- Melding door een weggebruiker
- Branddetectie
- Vertraagde detectie door operator

Snelheidsdetectie

Snelheidsdetectie is alleen mogelijk als er een snelheidsdetectiesysteem is (als $A_{snel} = ja$).

Als er al een file in de tunnelbuis wordt gevormd is de snelheidsdetectie al eerder (bij het ontstaan van de file) geactiveerd en is het systeem als detectiemiddel van het incident niet meer functioneel. De alertheid van de operator zal echter wel hoger zijn dan in een situatie zonder filevorming, zie 'vertraagde detectie door operator'.

De kans op snelheidsdetectie (P_{sneld}) wordt gegeven door:

$$\begin{array}{ll}
 P_{sneld} = 0 & \text{als } A_{snel} = \text{nee} \\
 P_{sneld} = 0 & \text{als } A_{snel} = \text{ja en } G_{fileben} = \text{Wel fileben} \\
 P_{sneld} = (1 - P_{f,snel}) & \text{als } A_{snel} = \text{ja en } G_{fileben} = \text{Geen fileben}
 \end{array} \quad (4-8)$$

$P_{f,snel}$ wordt verklaard in Tabel 3-13, A_{snel} is een invoerwaarde uit Tabel 3-2. Voor $G_{fileben}$ zie Tabel 2-1.

Melding door een weggebruiker

Melding door een weggebruiker kan alleen plaatsvinden indien de middelen voor handen zijn (telefoon in hulppost en/of mobiele telefonie is mogelijk, dus als $A_{comm} = \text{ja}$, zie Tabel 3-2). In tunnels waar geen toezicht is door een operator (als $A_{oper} = \text{nee}$) is dit type detectie niet mogelijk.

De kans op melding door de weggebruiker P_{wegd} wordt gegeven door:

$$\begin{aligned} P_{wegd} &= 0 && \text{als } A_{comm} = \text{nee} \\ P_{wegd} &= 0 && \text{als } A_{comm} = \text{ja en } A_{oper} = \text{nee} \\ P_{wegd} &= (1 - P_{f,weg}) && \text{als } A_{comm} = \text{ja en } A_{oper} = \text{ja} \end{aligned} \quad (4-9)$$

$P_{f,weg}$ wordt verklaard in Tabel 3-13, en de invoerwaarden A_{comm} en A_{oper} in Tabel 3-2.

Branddetectie

Detectie van brand en de snelheid van detectie is afhankelijk van het type branddetectiesysteem.

De kans op branddetectie (P_{brandd}) wordt gegeven door:

$A_{brand,temp}$	$A_{brand,CO}$	$A_{brand,zicht}$	P_{brandd}
nee	nee	nee	0
nee	nee	ja	$1 - P_{f,zicht}$
nee	ja	nee	$1 - P_{f,CO}$
ja	nee	nee	$1 - P_{f,temp}$
nee	ja	ja	$1 - P_{f,CO} \cdot P_{f,zicht}$
ja	nee	ja	$1 - P_{f,temp} \cdot P_{f,zicht}$
ja	ja	nee	$1 - P_{f,temp} \cdot P_{f,CO}$
ja	ja	ja	$1 - P_{f,temp} \cdot P_{f,CO} \cdot P_{f,zicht}$

(4-10)

$P_{f,zicht}$, $P_{f,CO}$ en $P_{f,temp}$ worden verklaard in Tabel 3-13, en $A_{brand,temp}$, $A_{brand,CO}$ en $A_{brand,zicht}$ zijn invoerwaarden uit Tabel 3-2.

Vertraagde detectie door operator

Met vertraagde detectie door de operator wordt bedoeld: het later alsnog ontdekken van een ernstig incident terwijl dat nog niet eerder door de operator onderkend was.

De kans op vertraagde detectie door de operator P_{vertd} wordt gegeven door:

$$\begin{aligned} P_{vertd} &= 0 && \text{als } A_{oper} = \text{nee} \\ P_{vertd} &= 1 - P_{f,vert} && \text{als } A_{oper} = \text{ja} \end{aligned} \quad (4-11)$$

$P_{f,vert}$ wordt verklaard in Tabel 3-13, en A_{oper} is een invoerwaarde uit Tabel 3-2.

Tabel 4-12: Variabelen detectie.

symbool	omschrijving	eenheid	functie $v(\mathbf{X})$
T_{vert}	tijdsduur totdat het alsnog ontdekken van een ernstig incident door de operator plaatsvindt	min	$= t_{vert,file}$ als $G_{fileben} = \text{Wel fileben}$ $= t_{vert,geenfile}$ als $G_{fileben} \neq \text{Wel fileben}$
$V_{rookdet}$	snelheid rookverspreiding tbv detectie	m/s	$= v_{rookfile}$ als $G_{fileben} = \text{Wel fileben}$ $= v_{rookgeenfile}$ als $G_{fileben} \neq \text{Wel fileben}$
T_{co}	tijdstip waarop CO-detectie plaatsvindt	min	$= T_{uitvtg} + t_{d,CO}$
T_{temp}	tijdstip waarop temperatuurdetectie plaatsvindt	min	$= T_{uitvtg} + t_{d,temp}$

Voor $G_{fileben}$ zie Tabel 2-1. Voor $t_{vert,file}$ en $t_{vert,geenfile}$ zie Tabel 3-15. Voor $v_{rookfiler}$, $v_{rookgeenfiler}$, $t_{d,CO}$ en $t_{d,temp}$ zie Tabel 3-13. Voor T_{uitvtg} zie Tabel 4-6.

De tijdstippen (in minuten) waarop detectie plaatsvindt (T_{sneld} voor snelheidsdetectie, T_{wegd} voor melding door een weggebruiker, T_{brandd} voor branddetectie en T_{vertd} voor vertraagde detectie door de operator) worden gegeven door:

$$\begin{aligned} T_{sneld} &= T_{sneld} && \text{als } G_{sneldet} = \text{Wel sneldet} && (4-12) \\ T_{sneld} &= 60 && \text{als } G_{sneldet} = \text{Geen sneldet} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{wegd} &= T_{meld} && \text{als } G_{melding} = \text{Wel melding} && (4-13) \\ T_{wegd} &= 60 && \text{als } G_{melding} = \text{Geen melding} \end{aligned}$$

$$T_{brandd} = \frac{H_{zicht}}{2 \cdot V_{rookdet}} \cdot 60 \quad \text{als } G_{branddet} = \text{Wel branddet en } A_{brand,temp} = \text{nee, } A_{brand,CO} = \text{nee en } A_{brand,zicht} = \text{ja} \quad (4-14)$$

$$T_{brandd} = T_{co} \quad \text{als } G_{branddet} = \text{Wel branddet en } A_{brand,temp} = \text{nee, } A_{brand,CO} = \text{ja en } A_{brand,zicht} = \text{nee}$$

$$T_{brandd} = T_{temp} \quad \text{als } G_{branddet} = \text{Wel branddet en } A_{brand,temp} = \text{ja, } A_{brand,CO} = \text{nee en } A_{brand,zicht} = \text{nee}$$

$$T_{brandd} = \min\left(T_{co}; \frac{H_{zicht}}{2 \cdot V_{rookdet}} \cdot 60\right) \quad \text{als } G_{branddet} = \text{Wel branddet en } A_{brand,temp} = \text{nee, } A_{brand,CO} = \text{ja en } A_{brand,zicht} = \text{ja}$$

$$T_{brandd} = \min\left(T_{temp}; \frac{H_{zicht}}{2 \cdot V_{rookdet}} \cdot 60\right) \quad \text{als } G_{branddet} = \text{Wel branddet en } A_{brand,temp} = \text{ja, } A_{brand,CO} = \text{nee en } A_{brand,zicht} = \text{ja}$$

$$T_{brandd} = \min(T_{co}; T_{temp}) \quad \text{als } G_{branddet} = \text{Wel branddet en } A_{brand,temp} = \text{ja, } A_{brand,CO} = \text{ja en } A_{brand,zicht} = \text{nee}$$

$$T_{brandd} = \min\left(T_{co}; T_{temp}; \frac{H_{zicht}}{2 \cdot V_{rookdet}} \cdot 60\right) \quad \text{als } G_{branddet} = \text{Wel branddet en } A_{brand,temp} = \text{ja, } A_{brand,CO} = \text{ja en } A_{brand,zicht} = \text{ja}$$

$$T_{brandd} = 60 \quad \text{alle overige gevallen}$$

$$\begin{aligned} T_{vertd} &= T_{vertd} && \text{als } G_{vertrdet} = \text{Wel vertrdet} && (4-15) \\ T_{vertd} &= 60 && \text{als } G_{vertrdet} = \text{Geen vertrdet} \end{aligned}$$

T_{sneld} en T_{meld} staan verklaard in Tabel 3-13, H_{zicht} in Tabel 3-2 en $V_{rookdet}$, T_{co} , T_{temp} en T_{vertd} in Tabel 4-12. $A_{brand,temp}$, $A_{brand,CO}$ en $A_{brand,zicht}$ zijn invoerwaarden uit Tabel 3-2. Voor $G_{sneldet}$, $G_{melding}$, $G_{branddet}$ en $G_{vertrdet}$ zie Tabel 2-1.

Bij zichtmeting gaat het hierbij om een gemiddelde waarde (m.a.w. het incident vindt plaats halverwege de afstand tussen twee zichtmeters). Voor de situatie 'geen detectie' is aangehouden: detectie na 60 minuten; dit is een dermate hoge waarde dat dit geen invloed heeft op de berekeningen van het risico.

4.9 Beschikbaarheid voorzieningen

In deze paragraaf wordt de beschikbaarheid (het wel of niet aanwezig zijn en het wel of niet falen) van de ventilatie, het ontgrendelen van de vluchtdeuren en het afsluiten van de tunnelbuis behandeld.

Ventilatie:

Het betreft het wel of niet aanwezig zijn van een langsventilatiesysteem (A_{vent} uit Tabel 3-2).

Aanname 4-9 Als de langsventilatie wordt gestart zal dat altijd in de rijrichting van het verkeer zijn.

Toelichting: *Indien de richting van de ventilatie in de tunnelbuis omkeerbaar is, zal van de*

mogelijkheid tot omkering van de ventilatierichting pas worden gebruik gemaakt na aanwezigheid van, en in opdracht van, de brandweer. Het tijdstip waarop de ventilatierichting eventueel wordt omgekeerd ligt dermate ver in de tijd dat dit voor het berekenen van de risico's met dit model niet van belang is.

Ontgrendelen vluchtdeuren:

Het betreft het wel of niet vergrendeld zijn van de vluchtdeuren (A_{deur} uit Tabel 3-2).

Aanname 4-10 Bij zeer ernstige incidenten in tunnels waar de aanwezigen moeten vluchten naar een andere verkeersbuis (dus in tunnels zonder een apart vluchtkanaal), zal de operator die andere verkeersbuis ten behoeve van het vluchten altijd afsluiten als hij de vluchtdeuren ontgrendelt.

Toelichting: *Veelal is het afsluiten van de naastliggende verkeersbuis ook nodig om de hulpdiensten makkelijker toegang tot het incident te geven.*

Afsluiten tunnelbuis

Het betreft het wel of niet afsluiten van de tunnelbuis waarin het incident is opgetreden, indien mogelijk (A_{sluit} uit Tabel 3-2).

Aanname 4-11 Het afsluiten van een tunnelbuis gebeurt nooit automatisch na een branddetectie of een snelheidsdetectie.

Toelichting: *De mogelijkheid tot het automatisch afsluiten van de tunnelbuis na branddetectie of snelheidsdetectie is niet in het model ingebouwd. Het ten onrechte afsluiten van tunnelbuizen dient te worden voorkomen.*

De kansen P_{vent} , respectievelijk P_{ontgr} , respectievelijk P_{sluit} op het beschikbaar zijn van het ventilatiesysteem, de ontgrendeling van de vluchtdeuren en het afsluiten van de tunnelbuis worden gegeven door:

$$P_{\text{vent}} = 0 \quad \text{als } A_{\text{vent}} = \text{nee} \quad (4-16)$$

$$P_{\text{vent}} = 1 - P_{f,\text{vent}} \quad \text{als } A_{\text{vent}} = \text{ja}$$

$$P_{\text{ontgr}} = 0 \quad \text{als } A_{\text{deur}} = \text{nee} \quad (4-17)$$

$$P_{\text{ontgr}} = 1 \quad \text{als } A_{\text{deur}} = \text{altijd ontgrendeld}$$

$$P_{\text{ontgr}} = 1 - P_{f,\text{ontgr}} \quad \text{overige gevallen}$$

$$P_{\text{sluit}} = 0 \quad \text{als } A_{\text{sluit}} = \text{nee} \quad (4-18)$$

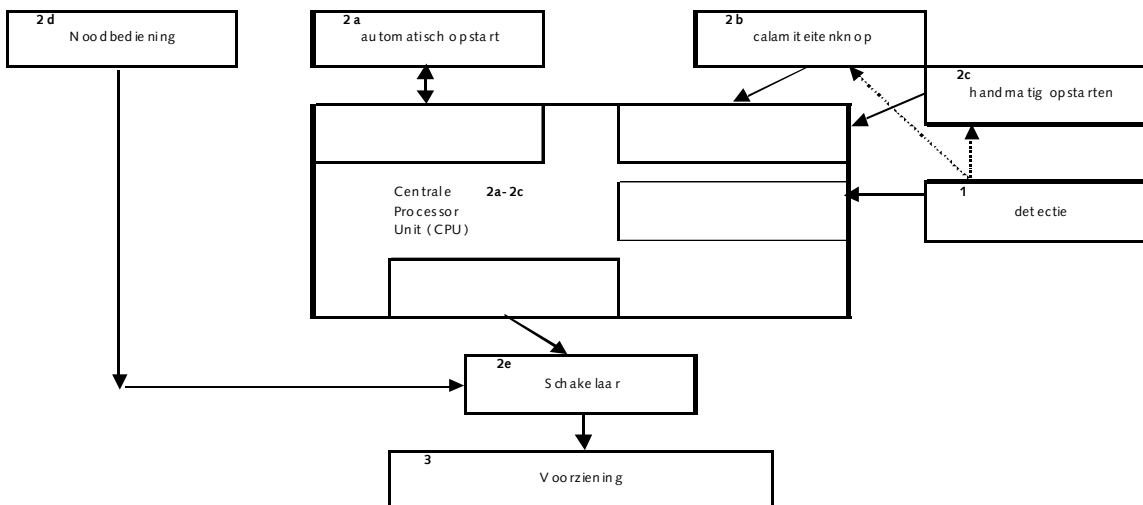
$$P_{\text{sluit}} = 1 - P_{f,\text{sluit}} \quad \text{in alle overige gevallen}$$

$P_{f,\text{vent}}$, $P_{f,\text{ontgr}}$ en $P_{f,\text{sluit}}$ worden verklaard in Tabel 3-14 en de invoerwaarden A_{vent} , A_{deur} en A_{sluit} in Tabel 3-2.

4.10 Opstartsignaal

In deze paragraaf wordt het ondernemen van actie, het geven van een opstartsignaal na detectie, behandeld.

In Figuur 4-2 is een schematisch overzicht gegeven van het besturingssysteem in de controlekamer voor zover het betreft detectie en het opstarten van voorzieningen.



Figuur 4-2: *Systeem van detectie en opstarten van voorzieningen in de controlekamer*

Onderdeel 1 (detectie) is behandeld in paragraaf 4.8; onderdeel 3 (beschikbaarheid voorzieningen) is behandeld in paragraaf 4.9.

Als uitgangspunt wordt aangehouden dat bij detectie door een snelheidsdetectiesysteem of een branddetectiesysteem de operator door een akoestisch signaal (en camerabeeld) in de controlekamer gewaarschuwd zal worden zodat de operator, indien nodig, actie kan ondernemen.

Het opstartsignaal aan de voorziening(en) kan op verschillende manieren gegeven worden:

- a. middels het automatisch opstarten na een detectie;
- b. door de operator.

De operator kan acties ondernemen door:

- (indien aanwezig) de calamiteitenknop (groepscommando) in te drukken;
- handmatig voorzieningen in te schakelen (per voorziening afzonderlijk);
- gebruik te maken van de noodbediening indien het starten van de voorzieningen middels het automatisch opstarten, het gebruik van de calamiteitenknop of het handmatig inschakelen faalt; het zal enige tijd duren (geschat circa 5 minuten) voordat de voorzieningen op deze wijze zijn gestart omdat de operator eerst zal pogen de voorzieningen alsnog via de normale bediening te starten en omdat de noodbediening zich veelal op een minder toegankelijke plek in de controlekamer bevindt.

Aanname 4-12 De (technische) faalkans van de Centrale Processor Unit (CPU) wordt niet apart in beschouwing genomen. Deze faalkans wordt geacht te zijn begrepen in de faalkans van detectie en de faalkans van de voorzieningen.

Toelichting: *Dit is een vereenvoudiging. De faalkans van de CPU is klein ten opzichte van de faalkans van detectie en de faalkans van de voorzieningen. Het opstarten van de voorzieningen met behulp van de noodbediening wordt daarom niet beschouwd.*

Automatisch opstarten

Bij automatisch opstarten zal een detectie automatisch leiden tot het geven van een opstartcommando aan de betreffende voorziening tenzij de operator gebruik maakt van de mogelijkheid tot het onderbreken van het opstarten.

In het model zijn de volgende mogelijkheden voor automatisch opstarten opgenomen:

- het starten van de ventilatie door een snelheidsdetectiesysteem;

- het starten van de ventilatie door een branddetectiesysteem;
- het ontgrendelen van de vluchtdeuren door een snelheidsdetectiesysteem;
- het ontgrendelen van de vluchtdeuren door een branddetectiesysteem.

Aanname 4-13 Het automatisch opstarten bij een branddetectie zal direct na detectie geschieden en niet door de operator worden onderbroken.

Toelichting: *Deze aanname sluit aan op de praktijk. De kans op valse meldingen is beperkt en wordt in de praktijk geaccepteerd.*

Bij een snelheidsdetectiesysteem is de kans op een 'valse' melding veel groter dan bij een branddetectiesysteem. Daarom is er in het model vanuit gegaan dat het daadwerkelijk automatisch opstarten met een tijdvertraging plaats zal vinden (zie invoerwaarde $T_{snelaut}$ uit Tabel 3-2) opdat de operator gebruik kan maken van de mogelijkheid tot onderbreken van het opstarten. Hierdoor ontstaat tevens de mogelijkheid dat de operator een verkeerde inschatting van de situatie maakt waardoor het automatisch opstarten ten onrechte wordt onderbroken; voor de kans hierop P_{reset} zie Tabel 3-15.

Aanname 4-14 Wanneer de operator een ernstig incident verkeerd beoordeelt en het automatisch opstarten daarom onderbreekt zal hij (op dat moment) niet op een andere wijze ingrijpen.

Toelichting: *Het ten onrechte onderbreken van het automatisch opstarten door de operator wordt hiermee feitelijk gelijkwaardig geacht aan het falen van het snelheidsdetectiesysteem.*

Er is sprake van automatisch opstarten als er een branddetectie is en de branddetectie stuurt de ventilatie of het ontgrendelen van de vluchtdeuren aan (dus als $C_{autventbrand} = ja$ of $C_{autdeurbrand} = ja$) en in andere gevallen als er een snelheidsdetectie is en de snelheidsdetectie stuurt de ventilatie of het ontgrendelen van de vluchtdeuren aan (dus als $C_{autventsnel} = ja$ of $C_{autdeursnel} = ja$) mits de operator het opstarten niet onderbreekt. De kans op het automatisch opstarten ($P_{autstart}$) wordt gegeven door:

$$P_{autstart} = 1 - P_{f,autom} \cdot P_{reset} \quad \text{als } G_{branddet} = \text{Wel branddet en } (C_{autventbrand} = ja \text{ of } C_{autdeurbrand} = ja) \text{ en } G_{sneldet} = \text{Wel sneldet en } (C_{autventsnel} = ja \text{ of } C_{autdeursnel} = ja)$$

Anders:

$$P_{autstart} = 1 - P_{f,autom} \quad \text{als } G_{branddet} = \text{Wel branddet en } (C_{autventbrand} = ja \text{ of } C_{autdeurbrand} = ja)$$

Anders:

$$P_{autstart} = 1 - P_{reset} \quad \text{als } G_{sneldet} = \text{Wel sneldet en } (C_{autventsnel} = ja \text{ of } C_{autdeursnel} = ja) \quad (4-19)$$

Anders:

$$P_{autstart} = 0 \quad \text{alle overige gevallen}$$

$P_{f,autom}$ wordt verklaard in Tabel 3-13, P_{reset} in Tabel 3-15, en $C_{autventsnel}$, $C_{autdeursnel}$, $C_{autventbrand}$ en $C_{autdeurbrand}$ in Tabel 3-2. Voor $G_{sneldet}$ en $G_{branddet}$ zie Tabel 2-1.

Actie door operator

Als er een operator is (als $A_{oper} = ja$, zie Tabel 3-2) en hij beschikt over een calamiteitenknop (als $A_{calam} = ja$, zie Tabel 3-2) dan kunnen met één handeling (het indrukken van de calamiteitenknop) alle bij een calamiteit benodigde commando's worden gegeven en de daarbij behorende acties direct worden uitgevoerd. Indien er geen calamiteitenknop is zal de operator de voorzieningen handmatig moeten opstarten. Ook bestaat de mogelijkheid dat de operator bewust geen gebruik maakt van de calamiteitenknop maar er voor kiest om de voorzieningen handmatig op te starten.

Tabel 4-13: Variabelen actie operator.

symbool	omschrijving	eenheid	functie v(x)
$P_{f,cal}$	kans dat de operator de calamiteitenknop niet gebruikt	-	$= 1$ (als $A_{calam} = \text{nee}$) $= P_{fo,cal,brand}$ (als $A_{calam} = \text{ja}$ en $G_{vtgbrand} = \text{Brand}$ en $G_{incident} = \text{Lettsel}$) $= P_{fo,cal,brand}$ (als $A_{calam} = \text{ja}$ en $G_{tankbrand} = \text{Direct of Vertraagd}$) $= P_{fo,cal}$ (overige gevallen)
P_{ont}	kans dat de operator de vluchtdeuren ontgrendelt	-	$= 0$ ($A_{deur} = \text{nee}$) $= 1$ ($A_{deur} = \text{altijd ontgrendeld}$) $= P_{fo,ontgr}$ overige gevallen

Zie voor $G_{vtgbrand}$, $G_{incident}$ en $G_{tankbrand}$ Tabel 2-1 en voor $P_{fo,cal,brand}$, $P_{fo,cal}$ en $P_{fo,ontgr}$ Tabel 3-15.

Het opstarten van de in het model beschouwde voorzieningen (ventilatie, ontgrendelen vluchtdeuren en het afsluiten van de tunnelbuis) kan op verschillende tijdstippen gebeuren.

Het tijdstip (in minuten) waarop het signaal voor automatisch opstarten wordt gegeven ($T_{auto,vent}$ voor ventilatie en $T_{auto,deur}$ voor het ontgrendelen van de deuren) wordt bepaald met vergelijking (4-20).

$$\begin{aligned}
 G_{autostart} = \text{Wel autostart} & \quad \text{als } C_{autventbrand} = \text{ja en } C_{autventsnel} = \text{ja:} & \quad T_{auto,vent} = \min(T_{brandd}, T_{sneld} + T_{snelaut}) \\
 & \quad \text{als } C_{autventbrand} = \text{ja en } C_{autventsnel} = \text{nee:} & \quad T_{auto,vent} = T_{brandd} \\
 & \quad \text{als } C_{autventbrand} = \text{nee en } C_{autventsnel} = \text{ja:} & \quad T_{auto,vent} = T_{sneld} + T_{snelaut} \\
 & \quad \text{als } C_{autventbrand} = \text{nee en } C_{autventsnel} = \text{nee:} & \quad T_{auto,vent} = 60 \\
 G_{autostart} = \text{Geen autostart} & \quad - & \quad T_{auto,vent} = 60
 \end{aligned}$$

(4-20)

$$\begin{aligned}
 G_{autostart} = \text{Wel autostart} & \quad \text{als } C_{autdeurbrand} = \text{ja en } C_{autdeursnel} = \text{ja:} & \quad T_{auto,deur} = \min(T_{brandd}, T_{sneld} + T_{snelaut}) \\
 & \quad \text{als } C_{autdeurbrand} = \text{ja en } C_{autdeursnel} = \text{nee:} & \quad T_{auto,deur} = T_{brandd} \\
 & \quad \text{als } C_{autdeurbrand} = \text{nee en } C_{autdeursnel} = \text{ja:} & \quad T_{auto,deur} = T_{sneld} + T_{snelaut} \\
 & \quad \text{als } C_{autdeurbrand} = \text{nee en } C_{autdeursnel} = \text{nee:} & \quad T_{auto,deur} = 60 \\
 G_{autostart} = \text{Geen autostart} & \quad - & \quad T_{auto,deur} = 60
 \end{aligned}$$

$C_{autventbrand}$, $C_{autventsnel}$, $C_{autdeurbrand}$, $C_{autdeursnel}$ en $T_{snelaut}$ zijn invoerwaarden uit Tabel 3-2. Voor T_{sneld} en T_{brandd} zie de vergelijkingen (4-12) en (4-14).

De tijdstippen voor de acties van de operator zijn afhankelijk van de tijdstippen waarop detectie plaatsvindt en de tijd die de operator nodig heeft om de actie uit te voeren. Op elk tijdstip waarop de operator een detectiesignaal krijgt ($T_{actieoper1}, \dots, T_{actieoper4}$) zal hij wel of niet actie ondernemen. Hiervoor is het nodig dat deze tijdstippen in de juiste tijdsvolgorde worden geplaatst waarbij geldt $T_{actieoper1} \leq T_{actieoper2} \leq T_{actieoper3} \leq T_{actieoper4}$:

$$\begin{aligned}
 T_{actieoper1} &= \min(T_{sneld}, T_{wegd}, T_{brandd}, T_{vertd}) & \quad \text{als } T_{sneld} - T_{actieoper1} &= 0 \\
 T_{actieoper2} &= \min(T_{wegd}, T_{brandd}, T_{vertd}) & \quad \text{als } T_{wegd} - T_{actieoper1} &= 0 \\
 T_{actieoper2} &= \min(T_{sneld}, T_{brandd}, T_{vertd}) & \quad \text{als } T_{brandd} - T_{actieoper1} &= 0 \\
 T_{actieoper2} &= \min(T_{sneld}, T_{wegd}, T_{vertd}) & \quad \text{als } T_{vertd} - T_{actieoper1} &= 0 \\
 T_{actieoper2} &= \min(T_{sneld}, T_{wegd}, T_{brandd}) & & \\
 T_{actieoper4} &= \max(T_{sneld}, T_{wegd}, T_{brandd}, T_{vertd}) & \quad \text{als } T_{sneld} - T_{actieoper4} &= 0 \\
 T_{actieoper3} &= \max(T_{wegd}, T_{brandd}, T_{vertd}) & \quad \text{als } T_{wegd} - T_{actieoper4} &= 0 \\
 T_{actieoper3} &= \max(T_{sneld}, T_{brandd}, T_{vertd}) & \quad \text{als } T_{brandd} - T_{actieoper4} &= 0 \\
 T_{actieoper3} &= \max(T_{sneld}, T_{wegd}, T_{brandd}) & \quad \text{als } T_{vertd} - T_{actieoper4} &= 0
 \end{aligned}$$

(4-21)

T_{sneld} , T_{wegd} , T_{brandd} en T_{vertd} worden verklaard in vergelijkingen (4-12) tot en met (4-15).

Vervolgens worden de kansen op het geven van een opstartsignaal door de operator op de verschillende tijdstippen $T_{\text{actieoper}i}$ ($i = 1, \dots, 4$) bepaald. $P_{i,\text{cal}}$ is de kans dat de operator op tijdstip T_i een opstartsignaal geeft via de calamiteitenknop. $P_{i,\text{handont}}$ is de kans dat de operator op tijdstip T_i een opstartsignaal geeft via handbediening met direct ontgrendelen van de vluchtdeuren. $P_{i,\text{handno}}$ is de kans dat de operator op tijdstip $T_{\text{actieoper}i}$ een opstartsignaal geeft via handbediening zonder direct ontgrendelen van de vluchtdeuren. $P_{\text{geenactie}}$ is de kans dat de operator geen actie onderneemt.

Deze kansen worden gegeven door:

Kans bij $T_{\text{actieoper}1}$:

Met calamiteitenknop: $P_{1,\text{cal}} = (1 - P_{\text{f,oper}}) \cdot (1 - P_{\text{f,cal}})$

Handbediening, direct ontgrendelen: $P_{1,\text{handont}} = (1 - P_{\text{f,oper}}) \cdot P_{\text{f,cal}} \cdot P_{\text{ont}}$ (4-22)

Handbediening, niet direct ontgrendelen: $P_{1,\text{handno}} = (1 - P_{\text{f,oper}}) \cdot P_{\text{f,cal}} \cdot (1 - P_{\text{ont}})$

Kans bij $T_{\text{actieoper}2}$:

Met calamiteitenknop: $P_{2,\text{cal}} = P_{\text{f,oper}} \cdot (1 - P_{\text{f,oper}}) \cdot (1 - P_{\text{f,cal}})$

Handbediening, direct ontgrendelen: $P_{2,\text{handont}} = P_{\text{f,oper}} \cdot (1 - P_{\text{f,oper}}) \cdot P_{\text{f,cal}} \cdot P_{\text{ont}}$ (4-23)

Handbediening, niet direct ontgrendelen: $P_{2,\text{handno}} = P_{\text{f,oper}} \cdot (1 - P_{\text{f,oper}}) \cdot P_{\text{f,cal}} \cdot (1 - P_{\text{ont}})$

Kans bij $T_{\text{actieoper}3}$:

Met calamiteitenknop: $P_{3,\text{cal}} = (P_{\text{f,oper}})^2 \cdot (1 - P_{\text{f,oper}}) \cdot (1 - P_{\text{f,cal}})$

Handbediening, direct ontgrendelen: $P_{3,\text{handont}} = (P_{\text{f,oper}})^2 \cdot (1 - P_{\text{f,oper}}) \cdot P_{\text{f,cal}} \cdot P_{\text{ont}}$

Handbediening, niet direct ontgrendelen: $P_{3,\text{handno}} = (P_{\text{f,oper}})^2 \cdot (1 - P_{\text{f,oper}}) \cdot P_{\text{f,cal}} \cdot (1 - P_{\text{ont}})$ (4-24)

Kans bij $T_{\text{actieoper}4}$:

Met calamiteitenknop: $P_{4,\text{cal}} = (P_{\text{f,oper}})^3 \cdot (1 - P_{\text{f,oper}}) \cdot (1 - P_{\text{f,cal}})$

Handbediening, direct ontgrendelen: $P_{4,\text{handont}} = (P_{\text{f,oper}})^3 \cdot (1 - P_{\text{f,oper}}) \cdot P_{\text{f,cal}} \cdot P_{\text{ont}}$ (4-25)

Handbediening, niet direct ontgrendelen: $P_{4,\text{handno}} = (P_{\text{f,oper}})^3 \cdot (1 - P_{\text{f,oper}}) \cdot P_{\text{f,cal}} \cdot (1 - P_{\text{ont}})$

Geen actie: $P_{\text{geenactie}} = (P_{\text{f,oper}})^4$ (4-26)

$P_{\text{f,oper}}$ wordt verklaard in Tabel 3-15 en $P_{\text{f,cal}}$ en P_{ont} in Tabel 4-13.

De bijbehorende tijdstippen (in minuten) waarop de voorzieningen in werking treden ($T_{\text{oper,vent}}$ voor ventilatie, $T_{\text{oper,deur}}$ voor het ontgrendelen van de vluchtdeuren en $T_{\text{oper,sluit}}$ voor het afsluiten van de tunnelbuis) zijn aangegeven in Tabel 4-14, Tabel 4-15 en Tabel 4-16.

Tabel 4-14: Tijdstip starten ventilatie door operator.

$G_{\text{ventilatie}}$	G_{operator}	C_{calvent}	$T_{\text{oper,vent}}$ [min]
-	-	-	= 60 als $A_{\text{oper}} = \text{nee}$
Geen ventilatie	-	-	= 60
Wel ventilatie	CalT1	ja	= $T_{\text{actieoper}1} + T_{\text{cal}}$
		nee	= $T_{\text{actieoper}1} + T_{\text{cal}} + T_{\text{hand}}$
	HandontT1	-	= $T_{\text{actieoper}1} + T_{\text{cal}} + T_{\text{hand}}$
	HandnoT1	-	= $T_{\text{actieoper}1} + T_{\text{cal}} + T_{\text{hand}}$

CalT2	ja	$= T_{actieoper2} + T_{cal}$
	nee	$= T_{actieoper2} + T_{cal} + T_{hand}$
HandontT2	-	$= T_{actieoper2} + T_{cal} + T_{hand}$
HandnoT2	-	$= T_{actieoper2} + T_{cal} + T_{hand}$
CalT3	ja	$= T_{actieoper3} + T_{cal}$
	nee	$= T_{actieoper3} + T_{cal} + T_{hand}$
HandontT3	-	$= T_{actieoper3} + T_{cal} + T_{hand}$
HandnoT3	-	$= T_{actieoper3} + T_{cal} + T_{hand}$
CalT4	ja	$= T_{actieoper4} + T_{cal}$
	nee	$= T_{actieoper4} + T_{cal} + T_{hand}$
HandontT4	-	$= T_{actieoper4} + T_{cal} + T_{hand}$
HandnoT4	-	$= T_{actieoper4} + T_{cal} + T_{hand}$
Geen actie	-	$= 60$

Toelichting bij Tabel 4-14:

Voor T_{cal} en T_{hand} zie Tabel 3-15. Voor $C_{calvent}$ zie Tabel 3-2. Voor $G_{ventilatie}$ en $G_{operator}$ zie Tabel 2-1.

Tabel 4-15: Tijdstip starten ontgrendelen door operator.

$G_{ontgrendelen}$	A_{deur}	$G_{operator}$	$C_{caldeur}$	$T_{oper,deur}$ [min]
-	-	-	-	$= 60$ als $A_{oper} = nee$
Geen ontgrendeld	-	-	-	$= 60$
Wel ontgrendeld	vergrendeld	altijd ontgrendeld	-	$= 0$
		CalT1	ja	$= T_{actieoper1} + T_{cal} + T_{vertontgr}$
			nee	$= T_{actieoper1} + T_{cal} + T_{hand} + T_{vertontgr}$
		HandontT1	-	$= T_{actieoper1} + T_{cal} + T_{hand} + T_{vertontgr}$
		HandnoT1	-	$= T_{actieoper2} + T_{cal} + T_{hand} + T_{vertontgr}^1$
		CalT2	ja	$= T_{actieoper2} + T_{cal} + T_{vertontgr}$
			nee	$= T_{actieoper2} + T_{cal} + T_{hand} + T_{vertontgr}$
		HandontT2	-	$= T_{actieoper2} + T_{cal} + T_{hand} + T_{vertontgr}$
		HandnoT2	-	$= T_{actieoper3} + T_{cal} + T_{hand} + T_{vertontgr}^1$
		CalT3	ja	$= T_{actieoper3} + T_{cal} + T_{vertontgr}$
			nee	$= T_{actieoper3} + T_{cal} + T_{hand} + T_{vertontgr}$
		HandontT3	-	$= T_{actieoper3} + T_{cal} + T_{hand} + T_{vertontgr}$
		HandnoT3	-	$= T_{actieoper4} + T_{cal} + T_{hand} + T_{vertontgr}^1$
		CalT4	ja	$= T_{actieoper4} + T_{cal} + T_{vertontgr}$
			nee	$= T_{actieoper4} + T_{cal} + T_{hand} + T_{vertontgr}$
HandontT4	-	$= T_{actieoper4} + T_{cal} + T_{hand} + T_{vertontgr}$		
HandnoT4	-	$= 60^1$		
Geen actie	-	$= 60$		

Toelichting bij Tabel 4-15:

1. Het niet ontgrendelen van de vluchtdeuren wordt, om de modellering eenvoudig te houden, in rekening gebracht door het ontgrendelen te verschuiven naar het volgende tijdstip waarop actie kan worden genomen. Voor T_{cal} en T_{hand} zie Tabel 3-15. Voor $T_{vertontgr}$ zie Tabel 3-2. Voor $G_{ontgrendelen}$ en $G_{operator}$ zie Tabel 2-1.

Tabel 4-16: Tijdstip afsluiten tunnelbuis door operator.

$G_{\text{afsluiten}}$	G_{operator}	C_{calsluit}	$T_{\text{oper,sluit}}$ [min]
-	-	-	= 60 als $A_{\text{oper}} = \text{nee}$
Geen afsluiten	-	-	= 60
Wel afsluiten	CalT1	ja	= $T_{\text{actieoper1}} + T_{\text{cal}} + T_{\text{sluit}}$
		nee	= $T_{\text{actieoper1}} + T_{\text{cal}} + T_{\text{hand}} + T_{\text{sluit}}$
	HandontT1	-	= $T_{\text{actieoper1}} + T_{\text{cal}} + T_{\text{hand}} + T_{\text{sluit}}$
	HandnoT1	-	= $T_{\text{actieoper1}} + T_{\text{cal}} + T_{\text{hand}} + T_{\text{sluit}}$
	CalT2	ja	= $T_{\text{actieoper2}} + T_{\text{cal}} + T_{\text{sluit}}$
		nee	= $T_{\text{actieoper2}} + T_{\text{cal}} + T_{\text{hand}} + T_{\text{sluit}}$
	HandontT2	-	= $T_{\text{actieoper2}} + T_{\text{cal}} + T_{\text{hand}} + T_{\text{sluit}}$
	HandnoT2	-	= $T_{\text{actieoper2}} + T_{\text{cal}} + T_{\text{hand}} + T_{\text{sluit}}$
	CalT3	ja	= $T_{\text{actieoper3}} + T_{\text{cal}} + T_{\text{sluit}}$
		nee	= $T_{\text{actieoper3}} + T_{\text{cal}} + T_{\text{hand}} + T_{\text{sluit}}$
	HandontT3	-	= $T_{\text{actieoper3}} + T_{\text{cal}} + T_{\text{hand}} + T_{\text{sluit}}$
	HandnoT3	-	= $T_{\text{actieoper3}} + T_{\text{cal}} + T_{\text{hand}} + T_{\text{sluit}}$
	CalT4	ja	= $T_{\text{actieoper4}} + T_{\text{cal}} + T_{\text{sluit}}$
		nee	= $T_{\text{actieoper4}} + T_{\text{cal}} + T_{\text{hand}} + T_{\text{sluit}}$
	HandontT4	-	= $T_{\text{actieoper4}} + T_{\text{cal}} + T_{\text{hand}} + T_{\text{sluit}}$
	HandnoT4	-	= $T_{\text{actieoper4}} + T_{\text{cal}} + T_{\text{hand}} + T_{\text{sluit}}$
Geen actie	-	-	= 60

Toelichting bij Tabel 4-16:

Voor T_{sluit} zie Tabel 3-14; voor T_{cal} en T_{hand} Tabel 3-15. Voor $G_{\text{afsluiten}}$ en G_{operator} zie Tabel 2-1.

Voor het tijdstip waarop de betreffende voorziening daadwerkelijk in werking treedt (T_{vent} voor de ventilatie, T_{ontgr} voor het ontgrendelen van de vluchtdeuren en T_{afsluit} voor het afsluiten van de tunnelbuis) geldt:

$$\begin{aligned} \text{Als } G_{\text{ventilatie}} = \text{Geen ventilatie} & \quad T_{\text{vent}} = 60 \\ \text{Anders:} & \quad T_{\text{vent}} = \min(T_{\text{auto,vent}}, T_{\text{oper,vent}}) \end{aligned} \quad (4-27)$$

$$\begin{aligned} \text{Als } G_{\text{ontgrendelen}} = \text{Geen ontgrendeld} & \quad T_{\text{ontgr}} = 60 \\ \text{Als } L_{\text{hart}} = L_{\text{buis}} & \quad T_{\text{ontgr}} = 60 \\ \text{Anders:} & \quad T_{\text{ontgr}} = \min(T_{\text{oper,deur}}, T_{\text{auto,deur}} + T_{\text{vertontgr}}) \end{aligned} \quad (4-28)$$

$$\begin{aligned} \text{Als } A_{\text{sluit}} = \text{nee} & \quad T_{\text{afsluit}} = 60 \\ \text{Als } A_{\text{oper}} = \text{nee} & \quad T_{\text{afsluit}} = 60 \\ \text{Anders:} & \quad T_{\text{afsluit}} = T_{\text{oper,sluit}} \end{aligned} \quad (4-29)$$

$T_{\text{auto,vent}}$ en $T_{\text{auto,deur}}$ staan verklaard in vergelijking (4-20), $T_{\text{oper,vent}}$ in Tabel 4-14, $T_{\text{oper,deur}}$ in Tabel 4-15 en $T_{\text{oper,sluit}}$ in Tabel 4-16.

4.11 Blokkade vluchtdeur

In deze paragraaf wordt de eventuele blokkade van een vluchtdeur behandeld; met blokkade van een vluchtdeur wordt het fysiek blokkeren van een vluchtdeur door het incident (brand) bedoeld.

De kans op een blokkade is afhankelijk van de positie van de deuren ten opzichte van de rijbaan.

Aanname 4-15 Als de vluchtdeuren in de buitenwand zitten is de kans op het blokkeren van een vluchtdeur door een langzaam ontwikkelende brand: 1,2 maal de gemiddelde lengte van een voertuig gedeeld door de hart-op-hart afstand van de vluchtdeuren. Als de vluchtdeuren in de middenwand zitten is de kans op het blokkeren van een vluchtdeur door een langzaam ontwikkelende brand 0. Bij letselongevallen met brand is de kans op het blokkeren van een vluchtdeur: het gemiddeld ruimtebeslag van het incident gedeeld door de hart-op-hart afstand van de vluchtdeuren. Voor het gemiddeld ruimtebeslag van een incident wordt hierbij 40 m aangehouden.

Toelichting: *Bij pech is slechts één voertuig direct betrokken, dit voertuig zal in het algemeen op de buitenste rijstrook of, indien aanwezig, de vluchtstrook stoppen. De kans op het blokkeren van een vluchtdeur in de middenwand is daardoor bij een langzaam ontwikkelende brand gering. Bij letselongevallen zal een brand snel uit het voertuig treden; voor het gemiddeld ruimtebeslag wordt hierbij (arbitrair en conservatief) 40 m aangehouden.*

Tabel 4-17: Waarden blokkade (zie Aanname 4-15).

symbool	omschrijving	eenheid	waarde
L_{lets}	gemiddeld ruimtebeslag van een letselongeval met brand	m	40

De kans op het blokkeren van een vluchtdeur bij brand P_{blok} wordt gegeven door:

$$\begin{aligned}
 P_{blok} &= 0 && \text{Als } G_{fileben} = \text{wel fileben en} \\
 & && L_{fileben} - L_{hart} > L_{lets}/2 \\
 P_{blok} &= 0 && \text{Als } G_{fileben} = \text{wel fileben en} \\
 & && L_{fileben} - L_{hart} < -L_{lets}/2 \\
 P_{blok} &= 1 && \text{Als } G_{fileben} = \text{wel fileben en} \\
 & && -L_{lets}/2 \leq L_{fileben} - L_{hart} \leq L_{lets}/2 \\
 \text{Anders:} & && (4-30) \\
 P_{blok} &= \min\left(1, 2 \cdot \frac{L_{vtg}}{L_{hart}}, 1\right) && \text{als } G_{incident} = \text{pech en } K_{vlucht} = \text{buitenwand} \\
 P_{blok} &= \min\left(\frac{L_{lets}}{L_{hart}}, 1\right) && \text{als } G_{incident} = \text{letsel} \\
 P_{blok} &= 0 && \text{overige gevallen}
 \end{aligned}$$

L_{hart} wordt verklaard in Tabel 3-1, K_{vlucht} in Tabel 3-2, L_{lets} in Tabel 4-17 en L_{vtg} in vergelijking (4-3). Voor $G_{incident}$ zie Tabel 2-1. Zie verder Aanname 4-15.

4.12 Plaats incident

Omdat de kans op, en de gevolgen van, een incident afhankelijk (kunnen) zijn van de plaats in de tunnelbuis wordt de tunnelbuis verdeeld in drie delen: het neergaande, het horizontale en het opgaande deel.

Aanname 4-16 Het incident zal plaatsvinden in het midden van het neergaande deel, het midden van het horizontale deel of het midden van het opgaande deel van de tunnelbuis. Voor de situatie met een benedenstroomse file wordt aangehouden dat het incident plaatsvindt in de file.

Toelichting: *De aanname is een vereenvoudiging van de werkelijkheid voor de modellering. Deze vereenvoudiging is gemaakt om het aantal benodigde effectberekeningen te*

beperken. Door deze vereenvoudiging zal zowel een onderschatting als een overschatting van het berekende risico optreden bij incidenten met een voertuigbrand en/of uitstroming van een gevaarlijke stof. De mate van onderschatting en overschatting is afhankelijk van het type incident, de werkelijke locatie van het incident, de lengte van de bovenstroomse en/of benedenstroomse file ten tijde van het incident en het al dan niet activeren van voorzieningen. Vooralnog wordt ervan uitgegaan dat de onderschatting en overschatting van het risico elkaar opheffen.

Tot dusver zijn de gemiddelde kansen per voertuigkilometer aangehouden zie vergelijking (4-1). De kans dat het incident plaatsvindt in de file (P_{infile}), op het opgaande deel (P_{op}) of op het horizontale deel (P_{hor}) van de tunnelbuis wordt gegeven door:

$$\begin{aligned}
 P_{infile} &= 1 && \text{als } G_fileben = \text{Wel fileben} \\
 P_{infile} &= 0 && \text{als } G_fileben = \text{Geen fileben} \\
 \\
 P_{op} &= 0 && \text{als } G_fileben = \text{Wel fileben} \\
 P_{hor} &= 0 && \text{als } G_fileben = \text{Wel fileben} \\
 \\
 P_{op} &= \frac{F_{pech,op} \cdot L_{op}}{F_{pech,gem} \cdot L_{buis}} && \text{als } G_incident = \text{Pech en } G_fileben = \text{Geen fileben} \\
 P_{hor} &= \frac{F_{pech,hor} \cdot L_{hor}}{F_{pech,gem} \cdot L_{buis}} && \text{als } G_incident = \text{Pech en } G_fileben = \text{Geen fileben} \\
 &&& (4-31) \\
 \\
 P_{op} &= \frac{F_{UMS,op} \cdot L_{op}}{F_{UMS,gem} \cdot L_{buis}} && \text{als } G_incident = \text{UMS en } G_fileben = \text{Geen fileben} \\
 P_{hor} &= \frac{F_{UMS,hor} \cdot L_{hor}}{F_{UMS,gem} \cdot L_{buis}} && \text{als } G_incident = \text{UMS en } G_fileben = \text{Geen fileben} \\
 \\
 P_{op} &= \frac{F_{letsel,op} \cdot L_{op}}{F_{letsel,gem} \cdot L_{buis}} && \text{als } G_incident = \text{Letsel en } G_fileben = \text{Geen fileben} \\
 P_{hor} &= \frac{F_{letsel,hor} \cdot L_{hor}}{F_{letsel,gem} \cdot L_{buis}} && \text{als } G_incident = \text{Letsel en } G_fileben = \text{Geen fileben}
 \end{aligned}$$

L_{buis} , L_{op} en L_{hor} worden verklaard in Tabel 3-1, $F_{pech,gem}$, $F_{UMS,gem}$ en $F_{letsel,gem}$ in vergelijking (4-1) en de overige in Tabel 3-8. Voor $G_incident$ en $G_fileben$ zie Tabel 2-1.

5 Gebeurtenissenboomanalyse

In dit hoofdstuk wordt de kans op, voor het risico relevante, scenario's beschreven. In dit hoofdstuk worden alle vertakkingen uit Tabel 2-1 in volgorde verder verklaard. Bijlage A toont de totale gebeurtenissenboom.

5.1 Gebeurtenis 'incident'

Met de gebeurtenis 'incident' wordt een onderverdeling gemaakt naar het type incident: pech, UMS, letselongeval en géén incident (zie Figuur 5-1).

één voertuigkilometer	Pech
	UMS
	Letsel
	Geen incident

Figuur 5-1: Uitsplitsing gebeurtenis 'incident'.

De kans op pech, UMS en letselongeval wordt bepaald uit de, over de gehele tunnel gemiddelde, incidentfrequenties. De differentiatie naar de locatie in de tunnel gebeurt bij de gebeurtenis 'plaats' (zie paragraaf 5.4). De kans op elk type incident is aangegeven in Tabel 5-1.

Tabel 5-1: Waarden gebeurtenis 'incident'.

$G_{incident}$	kans
Pech	$= F_{pech,gem}$
UMS	$= F_{UMS,gem}$
Letsel	$= F_{letsel,gem}$
Geen incident	$= 1 - F_{pech,gem} - F_{UMS,gem} - F_{letsel,gem}$

Toelichting bij Tabel 5-1:

De in de tabel gebruikte variabelen zijn afkomstig uit vergelijking (4-1).

Als er 'geen incident' in de tunnel optreedt zijn er ook geen effecten; daarom wordt voor deze tak geen verdere uitsplitsing gemaakt maar direct verder gegaan met de effectberekening (de effecten zijn in dit geval 0). Dus als $G_{incident} = \text{'geen incident'}$ dan gevolg = 0.

5.2 Gebeurtenis 'periode'

Met de gebeurtenis 'periode' wordt het etmaal in drie perioden onderverdeeld (zie Figuur 5-2). Deze uitsplitsing wordt gemaakt omdat per periode onder andere de verkeersintensiteit, de samenstelling van het verkeer en de kans op file (nagenoeg stilstaand verkeer) kunnen verschillen.

Pech, UMS of Letsel	Spits
	Dag
	Nacht

Figuur 5-2: Uitsplitsing gebeurtenis 'periode'.

De kans dat het betreffende incident in een bepaalde periode optreedt, is gelijk aan de kans dat een willekeurige voertuigkilometer in een bepaalde periode wordt verreden. Deze kans is aangegeven in Tabel 5-2.

Tabel 5-2: Waarden gebeurtenis 'periode'.

G_periode	kans
Spits	$= I_{spits} / I_{buis}$
Dag	$= I_{dag} / I_{buis}$
Nacht	$= I_{nacht} / I_{buis}$

Toelichting bij Tabel 5-2:

De variabelen I_{buis} , I_{spits} , I_{dag} en I_{nacht} komen uit Tabel 3-4.

5.3 Gebeurtenis 'file benedenstrooms'

Met een benedenstroomse file wordt in dit verband bedoeld: (nagenoeg) stilstaand verkeer buiten de tunnel waarbij de staart van de file de tunnel ingroeit. Deze gebeurtenis wordt onderscheiden voor alle takken met brand en/of uitstroming van gevaarlijke stoffen omdat het bij deze incidenten voor de gevolgen van grote invloed is of er benedenstrooms (nagenoeg) stilstaand verkeer aanwezig is, zie Figuur 5-3.

Wel fileben
Geen fileben

Figuur 5-3: Uitsplitsing gebeurtenis 'file benedenstrooms'.

De kans op wel of geen filevorming benedenstrooms in de tunnelbuis is aangegeven in Tabel 5-3.

Tabel 5-3: Waarden gebeurtenis 'file benedenstrooms'

G_fileben	kans
Wel fileben	$= P_{file,ben}$
Geen fileben	$= 1 - P_{file,ben}$

Toelichting bij Tabel 5-3:

De in de tabel gebruikte variabele ($P_{file,ben}$) is afkomstig uit vergelijking (4-6).

5.4 Gebeurtenis 'plaats'

Met de gebeurtenis 'plaats' wordt de plaats van het incident onderverdeeld in: (het midden van) de neergaande helling, (het midden van) het horizontale deel, (het midden van) de opgaande helling en in de file, zie Figuur 5-4. Voor de situatie met benedenstroomse file wordt aangehouden dat het incident plaatsvindt in de file (zie Aanname 4-16); de berekende plaats van het incident wordt dan bepaald door de lengte van de file.

Op
Horizontaal
Neer
In file

Figuur 5-4 Uitsplitsing gebeurtenis 'plaats'.

De kans dat het incident op de betreffende plaats in de tunnelbuis plaatsvindt, is aangegeven in Tabel 5-4.

Tabel 5-4: Waarden gebeurtenis 'plaats'.

G_{plaats}	kans
Op	$= P_{\text{op}}$
Horizontaal	$= P_{\text{hor}}$
In file	$= P_{\text{infile}}$
Neer	$= 1 - P_{\text{op}} - P_{\text{hor}} - P_{\text{infile}}$

Toelichting bij Tabel 5-4:

De in de tabel gebruikte variabelen (P_{op} , P_{hor} en P_{infile}) zijn afkomstig uit vergelijking (4-31).

5.5 Gebeurtenis 'snelheidsdetectie'

Met de gebeurtenis 'snelheidsdetectie' wordt het wel of niet optreden van een snelheidsdetectie gemodelleerd, zie Figuur 5-5.

	Wel sneldet
	Geen sneldet

Figuur 5-5: Uitsplitsing gebeurtenis 'snelheidsdetectie'.

De kans op wel of geen snelheidsdetectie is aangegeven in Tabel 5-5.

Tabel 5-5: Waarden gebeurtenis 'snelheidsdetectie'.

G_{sneldet}	kans
Wel sneldet	$= P_{\text{sneld}}$
Geen sneldet	$= 1 - P_{\text{sneld}}$

Toelichting bij Tabel 5-5:

De in de tabel gebruikte variabele (P_{sneld}) is afkomstig uit vergelijking (4-8).

5.6 Gebeurtenis 'voertuig'

Met de gebeurtenis 'voertuig' wordt het (incident veroorzakende) voertuig onderverdeeld in personenauto (en motor), bus en vrachtauto. De vrachtauto's worden verder onderverdeeld in vrachtauto's met géén of een niet-brandbare lading, vrachtauto's met een brandbare lading, vrachtauto's met explosieven én tankauto's met gevaarlijke stoffen, zie Figuur 5-6. Deze onderverdeling is nodig omdat de effecten van incidenten afhankelijk (kunnen) zijn van het voertuigtype en (bij vrachtauto's) de lading van het voertuig.

Deze uitsplitsing wordt gemaakt voor alle takken van de gebeurtenis 'periode'.

	Pers
	Bus
	Vageen
	Vabrb
	Expl
	Tank

Figuur 5-6: Uitsplitsing gebeurtenis 'voertuig'.

De vervolgekans op een bepaald type voertuig is aangegeven in Tabel 5-6.

Tabel 5-6: Waarden gebeurtenis 'voertuig'.

G_{voertuig}	omschrijving	kans
Pers	personenauto	$= A_{\text{auto,periode}}$
Bus	bus	$= A_{\text{bus,periode}}$
Vageen	vrachtauto geen/niet brandbare lading	$= (A_{\text{vracht,periode}} - A_{\text{expl,periode}} - A_{\text{tank,periode}}) \cdot (1 - A_{\text{brb}})$
Vabrb	vrachtauto brandbare lading	$= (A_{\text{vracht,periode}} - A_{\text{expl,periode}} - A_{\text{tank,periode}}) \cdot A_{\text{brb}}$
Expl	vrachtauto explosieven	$= A_{\text{expl,periode}}$
Tank	tankauto met gevaarlijke stoffen	$= A_{\text{tank,periode}}$

Toelichting bij Tabel 5-6:

De in de tabel gebruikte variabelen zijn afkomstig uit Tabel 4-1 en Tabel 3-12 (A_{brb}).

5.7 Gebeurtenis 'stofklasse'

Met de gebeurtenis 'stofklasse' wordt, *alleen* voor de tankauto's met gevaarlijke stoffen (dus alléén als $G_{\text{voertuig}} = \text{Tank}$), een onderverdeling gemaakt naar de stofklasse van de gevaarlijke stof.

Deze onderverdeling wordt gemaakt omdat de effecten van het vrijkomen van gevaarlijke stoffen afhankelijk zijn van de stofklasse.

Bij de stofklasse wordt onderscheid gemaakt in (zie Figuur 5-7):

- brandbare vloeistof (LF),
- toxische vloeistof (LT),
- brandbaar (tot vloeistof verdicht) gas (GF)
- toxisch (tot vloeistof verdicht) gas (GT)

Als $G_{\text{voertuig}} = \text{Tank}$	LF
	LT
	GF
	GT

Figuur 5-7: Uitsplitsing gebeurtenis 'stofklasse'.

De kans op een stofklasse is aangegeven in Tabel 5-7.

Tabel 5-7: Waarden gebeurtenis 'stofklasse'.

$G_{\text{stofklasse}}$	omschrijving	kans
LF	Brandbare vloeistof	$= I_{\text{LF}} / I_{\text{GS}}$
LT	toxische vloeistof	$= I_{\text{LT}} / I_{\text{GS}}$
GF	Brandbaar tot vloeistof verdicht gas	$= I_{\text{GF}} / I_{\text{GS}}$
GT	toxisch tot vloeistof verdicht gas	$= I_{\text{GT}} / I_{\text{GS}}$

Toelichting bij Tabel 5-7:

De in de tabel gebruikte variabelen zijn afkomstig uit Tabel 3-6.

5.8 Gebeurtenis 'uitstroming'

Met de gebeurtenis 'uitstroming' wordt voor elke stofklasse een onderverdeling gemaakt naar de grootte van de uitstroming. Deze onderverdeling wordt gemaakt omdat de effecten van het vrijkomen van gevaarlijke stoffen afhankelijk zijn van de grootte van de uitstroming.

Vloeistoffen

Voor vloeistoffen, die worden vervoerd in tanks onder atmosferische druk, wordt onderscheid gemaakt in: kleine continue (0,5 m³), grote continue (5 m³), instantane (45 m³) en geen uitstroming, zie Figuur 5-8. Bij vloeistoffen is van belang in welk deel van de tunnel de uitstroming plaatsvindt. Op het neergaande deel zal de vloeistof benedenstrooms van het incident stromen, op het opgaande deel bovenstrooms én op het horizontale deel van de tunnel zal de plas zich symmetrisch rond het incident vormen.

Als $G_{\text{stofklasse}} = \text{LF of LT}$	Linst
	Lcontgr
	Lcontkl
	Lgeen

Figuur 5-8: Uitsplitsing gebeurtenis 'uitstroming' voor vloeistoffen.

De kans op een uitstroming van een bepaalde grootte is voor vloeistoffen (als $G_{\text{stofklasse}} = \text{LF of LT}$) aangegeven in Tabel 5-8.

Tabel 5-8: Waarden gebeurtenis 'uitstroming' voor vloeistoffen.

$G_{\text{uitstroming}}$	omschrijving	kans
Linst	instantane vloeistof uitstroming	$= P_{\text{atm}} \cdot P_{\text{Linst}}$
Lcontgr	grote continue vloeistof uitstroming	$= P_{\text{atm}} \cdot P_{\text{Lcongr}}$
Lcontkl	kleine continue vloeistof uitstroming	$= P_{\text{atm}} \cdot P_{\text{Lconkl}}$
Lgeen	geen uitstroming vloeistof of < 100 kg	$= 1 - P_{\text{atm}}$

Toelichting bij Tabel 5-8:

De in de tabel gebruikte variabelen zijn afkomstig uit Tabel 4-4 (P_{atm}) en Tabel 3-9.

Gassen

Voor tot vloeistof verdichte gassen, die worden vervoerd in druktanks, wordt uitgegaan van een niet-relevante, continue en instantane uitstroming. Hierbij zijn de benamingen van de uitstroombrootten afkomstig uit de voor de externe veiligheid uitgevoerde studie [7]. In tegenstelling tot studies naar de (externe) veiligheid op de open weg wordt aangenomen dat de 'niet relevante' uitstromingen in tunnels wel bij kunnen dragen aan het risico. Daarom worden hier alle 3 de uitstroombrootten in de risicoanalyse beschouwd.

Instantane uitstromingen zijn uitstromingen die direct optreden wanneer de tankwagen in één keer faalt (bijv. openscheuren). Hierbij worden 2 typen onderscheiden (zie ook paragraaf 4.3):

- een zogenaamde koude BLEVE: hieronder wordt in QRA-tunnels verstaan een instantane uitstroming ontstaan ten gevolge van een mechanische impact, waarbij de tankwagen (bij de vervoersdruk) in één keer openscheurt;
- een zogenaamde warme BLEVE: hieronder wordt in QRA-tunnels verstaan een instantane uitstroming ontstaan door het opwarmen van de tankwagen (waarbij de druk in de tank oploopt en de sterkte van de tank afneemt).

Bij de continue uitstromingen (dus de 'continue' en de 'niet relevante' uitstroming) wordt een nadere onderverdeling gemaakt naar uitstromingen die, ten opzichte van de druktankwagen, naar voor of naar achter plaatsvinden (zie ook paragraaf 4.3).

De gehanteerde uitsplitsing is aangegeven in Figuur 5-9.

Als $G_{\text{stofklasse}} = GF$ of GT	Gwarm
	Gkoud
	Gcontach
	Gcontvoor
	Gnietrelach
	Gnietrelvoor
	Ggeen

Figuur 5-9: Uitsplitsing gebeurtenis 'uitstroming' voor gassen.

De kans op een uitstroming van een bepaalde grootte is voor gassen (dus als $G_{\text{stofklasse}} = GF$ of GT) aangegeven in Tabel 5-9.

Tabel 5-9: Waarden gebeurtenis 'uitstroming' voor gassen.

$G_{\text{uitstroming}}$	omschrijving	kans
Gwarm	instantane uitstroming tot vloeistof verdicht gas tgv opwarming	$= P_{\text{druk}} \cdot P_{\text{Ginst}} \cdot P_{\text{warm}} \cdot (1 - P_{\text{b,snel,vracht}})$
Gkoud	instantane uitstroming tot vloeistof verdicht gas tgv impact	$= P_{\text{druk}} \cdot P_{\text{Ginst}} \cdot (1 - P_{\text{warm}})$
Gcontach	continue uitstroming tot vloeistof verdicht gas naar achter	$= P_{\text{druk}} \cdot P_{\text{Gcont}} \cdot P_{\text{achter}}$
Gcontvoor	continue uitstroming tot vloeistof verdicht gas naar voor	$= P_{\text{druk}} \cdot P_{\text{Gcont}} \cdot (1 - P_{\text{achter}})$
Gnietrelach	niet-relevante uitstroming tot vloeistof verdicht gas naar achter	$= P_{\text{druk}} \cdot P_{\text{Gnrel}} \cdot P_{\text{achter}}$
Gnietrelvoor	niet-relevante uitstroming tot vloeistof verdicht gas naar voor	$= P_{\text{druk}} \cdot P_{\text{Gnrel}} \cdot (1 - P_{\text{achter}})$
Ggeen	geen uitstroming tot vloeistof verdicht gas of < 100 kg	$= 1 - P_{\text{druk}}$

Toelichting bij Tabel 5-9:

De in de tabel gebruikte variabelen zijn afkomstig uit Tabel 4-4 (P_{druk}), Tabel 3-9 en Tabel 3-11.

Het effect van het invoeren van de bluskans $P_{\text{b,snel,vracht}}$ bij Gwarm is dat als $P_{\text{b,snel,vracht}} > 0$ de som van de deeltkansen niet meer 1 is.

Bij de takken waarbij géén uitstroming van een gevaarlijke stof optreedt, wordt direct verder gegaan met de effectberekening.

Uitstroming van brandstof uit de brandstoftank van het voertuig ten gevolge van het ongeval wordt hier niet als een aparte uitstroming beschouwd omdat in [7] alle mogelijke oorzaken die tot een uitstroming van een gevaarlijke stof leiden bij de afleiding van de uitstroomfrequentie beschouwd zijn. Dus ook uitstromingen van brandstof uit de brandstoftank die (bijvoorbeeld door het ontsteken en vervolgens verzwakken van de bulk tank door aanstralen) leiden tot een uitstroming uit de bulk tank; zie paragraaf 5.9.

5.9 Gebeurtenis 'voertuigbrand'

Bij de gebeurtenis 'voertuigbrand' wordt een onderverdeling gemaakt in incidenten die wel of niet resulteren in een voertuigbrand. Voor het bulktransport van gevaarlijke stoffen zijn de uitstroomfrequenties en vervolgekansen in [7] op de open weg op basis van alle mogelijke

incidentoorzaken bepaald. Hierbij zijn dus ook uitstromingen beschouwd die zijn ontstaan ten gevolge van een brand in de nabijheid van of onder de bulktank. Daarom wordt er in de risicoanalyse voor het transport van gevaarlijke stoffen niet meer apart rekening gehouden met een voertuigbrand. De onderverdeling van de gebeurtenis 'voertuigbrand' is weergegeven in Figuur 5-10.

Als G_{voertuig} geen 'Tank' is	Brand
	Geblust
	Geen brand

Figuur 5-10: Uitsplitsing gebeurtenis 'voertuigbrand'.

De vervol kans voor een voertuigbrand is aangegeven in Tabel 5-10.

Tabel 5-10: Waarden gebeurtenis 'voertuigbrand'.

G_{vtgbrand}	kans
Brand	$= F_{\text{brand}} \cdot (1 - P_{\text{blus}}) \cdot P_{\text{verd}} / F_{\text{incident,gem}}$
Geblust	$= F_{\text{brand}} \cdot P_{\text{blus}} \cdot P_{\text{verd}} / F_{\text{incident,gem}}$
Geen brand	$= 1 - F_{\text{brand}} \cdot P_{\text{verd}} / F_{\text{incident,gem}}$

Toelichting bij Tabel 5-10:

F_{brand} komt uit Tabel 4-5, P_{blus} uit Tabel 4-7 en P_{verd} en $F_{\text{incident,gem}}$ uit Tabel 4-6.

5.10 Gebeurtenis 'tankbrand'

Voor de uitstromingen wordt een onderverdeling gemaakt naar uitstromingen met directe, vertraagde én géén ontsteking. Dit geldt dus alleen voor de takken: Linst, Lcontgr, Lcontkl, Gwarm, Gkoud, Gcontach, Gcontvoor, Gnietrelach en Gnietrelvoor.

Bij uitstroming	Direct
	Vertraagd
	Geen ontsteking

Figuur 5-11: Uitsplitsing gebeurtenis 'tankbrand'.

Toxische vloeistoffen en tot vloeistof verdichte toxische gassen zijn niet brandbaar (wanneer stoffen zowel brandbaar als toxisch zijn wordt hiermee rekening gehouden bij de indeling van de stoffen in de stofcategorieën [6] door de stof deels als brandbare en deels als toxische stof mee te tellen). Daarom is voor de ontstekingskans voor toxische stoffen 0 aangehouden (zie paragraaf 4.5).

De kansverdeling voor de gebeurtenis 'tankbrand' is aangegeven in Tabel 5-11.

Tabel 5-11: Waarden gebeurtenis 'tankbrand.'

$G_{\text{tankbrand}}$	kans
Direct	$= P_{\text{ont,dir}}$
Vertraagd	$= P_{\text{ont,vert}}$
Geen ontsteking	$= 1 - P_{\text{ont,dir}} - P_{\text{ont,vert}}$

Toelichting bij Tabel 5-11:

De in de tabel gebruikte variabelen zijn afkomstig uit Tabel 4-8.

5.11 Gebeurtenis 'brandgrootte'

Deze gebeurtenis verdeelt de voertuigbranden in verschillende brandgroottes:

De volgende brandgroottes (maximale brandvermogens) worden onderscheiden (zie ook paragraaf 4.6):

- 5 MW bij brand in één personenauto;
- 10 MW bij brand van een personenauto die overslaat naar een andere personenauto;
- 25 MW bij:
 - brand in een bus of een lege, of met niet-brandbare goederen geladen vrachtauto wel of niet overslaand naar een personenauto;
 - een brand van een personenauto die overslaat naar een bus óf een lege, of met niet-brandbare goederen geladen vrachtauto;
- 50 MW bij:
 - brand in een met brandbare goederen geladen vrachtauto wel of niet overslaand naar een personenauto, een bus of een lege, of met niet-brandbare goederen geladen vrachtauto;
 - een brand van een personenauto die overslaat naar een met brandbare goederen geladen vrachtauto;
 - een brand van bus óf lege, of met niet-brandbare goederen geladen vrachtauto die overslaat naar een andere bus of een andere lege, of met niet-brandbare goederen geladen vrachtauto of naar een met brandbare goederen geladen vrachtauto;
- 100 MW bij:
 - een brand in een met zeer brandbare goederen geladen vrachtauto wel of niet overslaand naar een personenauto, een bus of een andere vrachtauto (met of zonder brandbare lading);
 - een brand van een personenauto die overslaat naar een met zeer brandbare goederen geladen vrachtauto;
 - een brand van bus óf lege, of met niet-brandbare goederen geladen vrachtauto die overslaat naar een met zeer brandbare goederen geladen vrachtauto;
 - een brand van een met brandbare goederen geladen vrachtauto die overslaat naar een andere, met brandbare of zeer brandbare goederen geladen vrachtauto;
- 200 MW bij:
 - een brand van voertuig (geen personenauto) die overslaat naar een voertuig met brandbare gevaarlijke stoffen (zie ook de toelichting in paragraaf 4.6).

De onderverdeling naar brandgrootte is voor een voertuigbrand aangegeven in Figuur 5-12.

Als $G_{vtgbrand} = \text{'Brand'}$	B5 MW
	B10 MW
	B25 MW
	B50 MW
	B100 MW
	B200 MW

Figuur 5-12: Uitsplitsing gebeurtenis 'brandgrootte' voor voertuigbrand.

De kansen op een bepaalde brandgrootte (P_{5MW} , P_{10MW} , P_{25MW} , P_{50MW} , P_{100MW} en P_{200MW}) zijn aangegeven in Tabel 5-12

Tabel 5-12: Waarden gebeurtenis 'brandgrootte'.

$G_{brandgrootte}$	$G_{voertuig}$	kans P_{5MW} , P_{10MW} , P_{25MW} , P_{50MW} , P_{100MW} en P_{200MW}
B5 MW	Pers	$= 1 - P_{overslag}$
	Bus	0
	Vageen	0

	Vabr _b	0
	Expl	0
B10 MW	Pers	$= P_{\text{overslag}} \cdot A_{\text{auto,periode}}$
	Bus	0
	Vageen	0
	Vabr _b	0
	Expl	0
B25 MW	Pers	$= P_{\text{overslag}} \cdot (A_{\text{bus,periode}} + A_{\text{vracht,periode}} \cdot (1 - A_{\text{brb}}))$
	Bus	$= (1 - P_{\text{overslag}}) + P_{\text{overslag}} \cdot A_{\text{auto,periode}}^1$
	Vageen	$= (1 - P_{\text{overslag}}) + P_{\text{overslag}} \cdot A_{\text{auto,periode}}^1$
	Vabr _b	0
	Expl	0
B50 MW	Pers	$= P_{\text{overslag}} \cdot A_{\text{vracht,periode}} \cdot A_{\text{brb}} \cdot P_{50}$
	Bus	$= P_{\text{overslag}} \cdot (A_{\text{bus,periode}} + (A_{\text{vracht,periode}} - A_{\text{tank,periode}}) \cdot (1 - A_{\text{brb}} + A_{\text{brb}} \cdot P_{50}))$
	Vageen	$= P_{\text{overslag}} \cdot (A_{\text{bus,periode}} + (A_{\text{vracht,periode}} - A_{\text{tank,periode}}) \cdot (1 - A_{\text{brb}} + A_{\text{brb}} \cdot P_{50}))$
	Vabr _b	$= (1 - P_{\text{overslag}}) \cdot P_{50} + (A_{\text{auto,periode}} + A_{\text{bus,periode}} + (A_{\text{vracht,periode}} - A_{\text{tank,periode}}) \cdot (1 - A_{\text{brb}})) \cdot P_{\text{overslag}} \cdot P_{50}^1$
	Expl	0
B100 MW	Pers	$= P_{\text{overslag}} \cdot A_{\text{vracht,periode}} \cdot A_{\text{brb}} \cdot (1 - P_{50})$
	Bus	$= P_{\text{overslag}} \cdot (A_{\text{vracht,periode}} - A_{\text{tank,periode}}) \cdot A_{\text{brb}} \cdot (1 - P_{50})$
	Vageen	$= P_{\text{overslag}} \cdot (A_{\text{vracht,periode}} - A_{\text{tank,periode}}) \cdot A_{\text{brb}} \cdot (1 - P_{50})$
	Vabr _b	$= (1 - P_{\text{overslag}}) \cdot (1 - P_{50}) + P_{\text{overslag}} \cdot (1 - P_{50}) \cdot (A_{\text{auto,periode}} + A_{\text{bus,periode}} + (A_{\text{vracht,periode}} - A_{\text{tank,periode}}) \cdot (1 - A_{\text{brb}})) + P_{\text{overslag}} \cdot (A_{\text{vracht,periode}} - A_{\text{tank,periode}}) \cdot A_{\text{brb}}$
	Expl	1
B200 MW	Pers	0^2
	Bus	$= P_{\text{overslag}} \cdot A_{\text{tank,periode}}$
	Vageen	$= P_{\text{overslag}} \cdot A_{\text{tank,periode}}$
	Vabr _b	$= P_{\text{overslag}} \cdot A_{\text{tank,periode}}$
	Expl	0^3

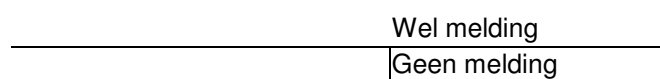
Toelichting bij Tabel 5-12:

De in de tabel gebruikte variabelen zijn afkomstig uit Tabel 4-1 ($A_{\text{auto,periode}}$, $A_{\text{bus,periode}}$, $A_{\text{vracht,periode}}$ en $A_{\text{tank,periode}}$), Tabel 4-10 (P_{overslag}) en Tabel 3-12 (A_{brb} en P_{50}).

1. De kans op géén brandoverslag wordt hierbij vermeerderd met de kans op brandoverslag naar een voertuig waarbij het brandvermogen volgens Tabel 4-9 niet toeneemt.
2. Aangenomen is dat het brandvermogen van een personenauto te gering is om brandoverslag naar een tankwagen te bewerkstelligen.
3. De effecten van de explosie zijn al zo ernstig dat overslag niet meer relevant is.

5.12 Gebeurtenis 'melding weggebruiker'

Met de gebeurtenis 'melding weggebruiker' wordt het wel of niet melden van een incident door een weggebruiker gemodelleerd, zie Figuur 5-13.



Figuur 5-13: Uitsplitsing gebeurtenis 'melding weggebruiker'.

De kans op wel of geen melding is aangegeven in Tabel 5-13.

Tabel 5-13: Waarden gebeurtenis 'melding weggebruiker'.

G_{melding}	kans
Wel melding	$= P_{\text{wegd}}$
Geen melding	$= 1 - P_{\text{wegd}}$

Toelichting bij Tabel 5-13:

De in de tabel gebruikte variabele (P_{wegd}) is afkomstig uit vergelijking (4-9).

5.13 Gebeurtenis 'branddetectie'

Met de gebeurtenis 'branddetectie' wordt het wel of niet optreden van een branddetectie gemodelleerd, zie Figuur 5-14.

	Wel branddet
	Geen branddet

Figuur 5-14: Uitsplitsing gebeurtenis 'branddetectie'.

De kans op wel of geen branddetectie is aangegeven in Tabel 5-14.

Tabel 5-14: Waarden gebeurtenis 'branddetectie'.

G_{branddet}	kans
Wel branddet	$= P_{\text{brandd}}$
Geen branddet	$= 1 - P_{\text{brandd}}$

Toelichting bij Tabel 5-14:

De in de tabel gebruikte variabele (P_{brandd}) is afkomstig uit vergelijking (4-10).

5.14 Gebeurtenis 'vertraagde detectie'

Met de gebeurtenis 'vertraagde detectie' wordt het wel of niet later alsnog ontdekken van een ernstig incident door de operator gemodelleerd, zie Figuur 5-15.

	Wel vertrdet
	Geen vertrdet

Figuur 5-15: Uitsplitsing gebeurtenis 'vertraagde detectie'.

De kans op wel of geen vertraagde detectie is aangegeven in Tabel 5-15.

Tabel 5-15: Waarden gebeurtenis 'vertraagde detectie.'

G_{vertrdet}	kans
Wel vertrdet	$= P_{\text{vertd}}$
Geen vertrdet	$= 1 - P_{\text{vertd}}$

Toelichting bij Tabel 5-15:

De in de tabel gebruikte variabele (P_{vertd}) is afkomstig uit vergelijking (4-11).

5.15 Gebeurtenis 'beschikbaarheid ventilatie'

Met de gebeurtenis 'beschikbaarheid ventilatie' wordt het wel of niet kunnen werken van de ventilatie gemodelleerd, zie Figuur 5-16.

	Wel ventilatie
	Geen ventilatie

Figuur 5-16: Uitsplitsing gebeurtenis 'beschikbaarheid ventilatie.'

De kans op wel of niet kunnen werken van de ventilatie is aangegeven in Tabel 5-16.

Tabel 5-16: Waarden gebeurtenis 'beschikbaarheid ventilatie'.

$G_{\text{ventilatie}}$	kans
Wel ventilatie	$= P_{\text{vent}}$
Geen ventilatie	$= 1 - P_{\text{vent}}$

Toelichting bij Tabel 5-16:

De in de tabel gebruikte variabele (P_{vent}) is afkomstig uit vergelijking (4-16).

5.16 Gebeurtenis 'beschikbaarheid ontgrendelen'

Met de gebeurtenis 'beschikbaarheid ontgrendelen' wordt het wel of niet kunnen ontgrendelen (of het ontgrendeld zijn) van de vluchtdeuren gemodelleerd, zie Figuur 5-17.

	Wel ontgrendeld
	Geen ontgrendeld

Figuur 5-17: Uitsplitsing gebeurtenis 'beschikbaarheid ontgrendelen'.

De kans op wel of niet kunnen ontgrendelen van de vluchtdeuren is aangegeven in Tabel 5-17.

Tabel 5-17: Waarden gebeurtenis 'beschikbaarheid ontgrendelen'.

$G_{\text{ontgrendelen}}$	kans
Wel ontgrendeld	$= P_{\text{ontgr}}$
Geen ontgrendeld	$= 1 - P_{\text{ontgr}}$

Toelichting bij Tabel 5-17:

De in de tabel gebruikte variabele (P_{ontgr}) is afkomstig uit vergelijking (4-17).

5.17 Gebeurtenis 'beschikbaarheid afsluiten'

Met de gebeurtenis 'beschikbaarheid afsluiten' wordt het wel of niet kunnen afsluiten van de tunnelbuis gemodelleerd, zie Figuur 5-18.

	Wel afsluiten
	Geen afsluiten

Figuur 5-18: Uitsplitsing gebeurtenis 'beschikbaarheid afsluiten'.

De kans op wel of niet kunnen afsluiten van de tunnelbuis is aangegeven in Tabel 5-18.

Tabel 5-18: Waarden gebeurtenis 'beschikbaarheid afsluiten'.

$G_{\text{afsluiten}}$	kans
Wel afsluiten	$= P_{\text{sluit}}$
Geen afsluiten	$= 1 - P_{\text{sluit}}$

Toelichting bij Tabel 5-18:

De in de tabel gebruikte variabele (P_{sluit}) is afkomstig uit vergelijking (4-18).

5.18 Gebeurtenis 'automatisch opstartsignaal'

Met de gebeurtenis 'automatisch opstartsignaal' wordt het wel of niet aanwezig zijn van een automatisch opstartsignaal (na een detectie) gemodelleerd, zie Figuur 5-19.

Wel autostart
Geen autostart

Figuur 5-19: Uitsplitsing gebeurtenis 'automatisch opstartsignaal'.

De kans op wel of geen automatisch opstartsignaal is aangegeven in Tabel 5-19.

Tabel 5-19: Waarden gebeurtenis 'automatisch opstartsignaal'.

$G_{\text{autostart}}$	kans
Wel autostart	$= P_{\text{autostart}}$
Geen autostart	$= 1 - P_{\text{autostart}}$

Toelichting bij Tabel 5-19:

De in de tabel gebruikte variabele ($P_{\text{autostart}}$) is afkomstig uit vergelijking (4-19).

5.19 Gebeurtenis 'actie operator'

Met de gebeurtenis 'actie operator' wordt het wel of niet nemen van actie door de operator gemodelleerd. De actie kan bestaan uit het gebruik van de calamiteitenknop op verschillende tijdstippen (CalT1, CalT2, CalT3 of CalT4), handbediening inclusief ontgrendelen van de vluchtdeuren (HandontT1, HandontT2, HandontT3 en HandontT4), handbediening zonder ontgrendelen van de vluchtdeuren (HandnoT1, HandnoT2, HandnoT3 en HandnoT4) of geen actie (Geen actie), zie Figuur 5-20.

CalT1
HandontT1
HandnoT1
CalT2
HandontT2
HandnoT2
CalT3
HandontT3
HandnoT3
CalT4
HandontT4
HandnoT4
Geen actie

Figuur 5-20: Uitsplitsing gebeurtenis 'actie operator'.

De kansverdeling van actie operator is aangegeven in Tabel 5-20.

Tabel 5-20: Waarden gebeurtenis 'actie operator'.

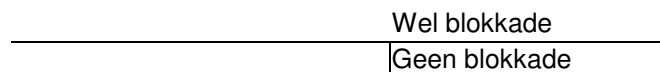
$G_operator$	kans
CaT1	$= P_{1cal}$
HandontT1	$= P_{1handont}$
HandnoT1	$= P_{1handno}$
CaT2	$= P_{2cal}$
HandontT2	$= P_{2handont}$
HandnoT2	$= P_{2handno}$
CaT3	$= P_{3cal}$
HandontT3	$= P_{3handont}$
HandnoT3	$= P_{3handno}$
CaT4	$= P_{4cal}$
HandontT4	$= P_{4handont}$
HandnoT4	$= P_{4handno}$
Geen actie	$= P_{geenactie}$

Toelichting bij Tabel 5-20:

De in de tabel gebruikte variabelen zijn afkomstig uit vergelijkingen (4-22) tot en met (4-26).

5.20 Gebeurtenis 'blokkade'

Met de gebeurtenis 'blokkade' wordt het wel of niet geblokkeerd zijn van één vluchtdeur door het incident (brand en/of het vrijkomen van gevaarlijke stoffen) gemodelleerd, zie Figuur 5-21.



Figuur 5-21: Uitsplitsing gebeurtenis 'blokkade'.

De kans op wel of niet geblokkeerd zijn van één vluchtdeur is aangegeven in Tabel 5-21.

Tabel 5-21: Waarden gebeurtenis 'blokkade'.

$G_blokkade$	kans
Wel blokkade	$= P_{blok}$
Geen blokkade	$= 1 - P_{blok}$

Toelichting bij Tabel 5-21:

De in de tabel gebruikte variabele (P_{blok}) is afkomstig uit vergelijking (4-30).

6 De gevolgen van de scenario's, algemeen

6.1 Inleiding

Voor elk scenario wordt het aantal weggebruikers dat overlijdt ten gevolge van het incident berekend.

Bij het aantal weggebruikers dat overlijdt ten gevolge van het incident worden drie 'typen' slachtoffers onderscheiden, omdat de invloed van de tunnel op elk van deze 'typen' verschillend is:

- de 'directe' slachtoffers E_{direct} : de 'normale' verkeersdoden. Aangenomen wordt dat de invloed van de tunnel op het aantal slachtoffers, gegeven een letselongeval, verwaarloosbaar is. De tunnel is wel van invloed op de kans op letselongevallen! De berekeningsmethodiek voor de 'directe' slachtoffers wordt beschreven in paragraaf 6.2.
- de 'extra' slachtoffers E_{extra} : de beknelden en/of zwaar gewonden in de direct bij een brand betrokken voertuigen die niet tijdig kunnen worden bevrijd en daardoor omkomen. Aangenomen wordt dat in de tunnel de bevrijding uit voertuigen wordt bemoeilijkt ten opzichte van de open weg. In paragraaf 6.3 wordt de berekeningsmethodiek voor de 'extra' slachtoffers beschreven.
- de 'kleine-kans-grote-gevolgen' slachtoffers E_{kkgg} : de niet direct bij het incident betrokken weggebruikers die, ten gevolge van de effecten van brand en/of uitstroming van gevaarlijke stoffen, niet tijdig kunnen vluchten en daardoor omkomen. De invloed van de tunnel op het aantal slachtoffers is hierbij zeer groot. De algemene principes en uitgangspunten die worden gevolgd bij het berekenen voor de 'kleine-kans-grote-gevolgen' slachtoffers wordt beschreven in paragraaf 6.4.

De uitwerking van de gevolgen verschilt voor de verschillende scenario's afhankelijk van de soort en hoeveelheid gevaarlijke stoffen die vrijkomt. In hoofdstuk 7 wordt dit nader uitgewerkt voor brandscenario's en in hoofdstuk 8 voor ongevalsscenario's met vrijkomen van gevaarlijke stoffen.

6.2 Berekening 'directe' slachtoffers

Aangezien bij pech en UMS-ongevallen geen slachtoffers vallen, komen 'directe' slachtoffers alleen bij letselongevallen voor. Het aantal 'directe' slachtoffers E_{direct} wordt gegeven door:

$$\begin{aligned} E_{\text{direct}} &= N_{\text{dir}} && \text{als } G_{\text{incident}} = \text{Letsel} \\ E_{\text{direct}} &= 0 && \text{in de overige gevallen,} \end{aligned} \quad (6-1)$$

waarbij N_{dir} het gemiddeld aantal doden per letselongeval is (de defaultwaarde uit Tabel 3-16).

6.3 Berekening 'extra' slachtoffers

De 'extra' slachtoffers zijn de personen die overlijden omdat ze bekneld en/of zwaar gewond zijn, in de direct bij een brand betrokken voertuigen zitten en niet tijdig kunnen worden bevrijd. De 'extra' slachtoffers komen daarom alleen bij letselongevallen met voertuigbrand voor. Het aantal 'extra' slachtoffers E_{extra} wordt gegeven door:

$$\begin{aligned} E_{\text{extra}} &= N_{\text{gew}} \cdot P_{\text{bekneld}} \cdot P_{\text{extra}} && \text{als } G_{\text{incident}} = \text{Letsel en } G_{\text{vtgbrand}} = \text{Brand} \\ E_{\text{extra}} &= 0 && \text{in de overige gevallen,} \end{aligned} \quad (6-2)$$

waarbij N_{gew} het gemiddeld aantal gewonden per letselongeval is, P_{bekneld} de kans om bekneld of zwaar gewond te raken en P_{extra} de (extra) kans voor een beknelde of zwaar gewonde om te overlijden in een brandend voertuig. N_{gew} , P_{bekneld} en P_{extra} zijn afkomstig uit Tabel 3-16.

Bij de afleiding van het gemiddeld aantal doden per letselongeval N_{dir} (zie Tabel 3-16) is al rekening gehouden met het overlijden van beknelden en/of (zwaar) gewonden bij voertuigbranden. Met de berekening van het aantal 'extra' slachtoffers is dus een negatieve invloed van de tunnel op de kans op het tijdig kunnen bevrijden van beknelden en/of zwaar gewonden ten opzichte van de open weg aangenomen.

De extra kans op overlijden van een beknelde of zwaar gewonde ten gevolge van het vrijkomen van gevaarlijke stoffen is niet apart beschouwd omdat:

- de kans op het vrijkomen van gevaarlijke stoffen ten opzichte van de kans op brand heel klein is;
- bij veel scenario's met vrijkomen van gevaarlijke stoffen het aantal 'extra' slachtoffers al is begrepen in de berekende slachtofferaantallen.

6.4 Modelling 'kleine-kans-grote-gevolgen' slachtoffers, algemeen

'Kleine-kans-grote-gevolgen' slachtoffers (kkgg-slachtoffers) zijn degenen die overlijden onder de niet direct bij het incident betrokken weggebruikers ten gevolge van de effecten van brand en/of uitstroming van gevaarlijke stoffen omdat zij niet tijdig kunnen vluchten.

De voorzieningen in de tunnel hebben bij dit type incident doorgaans een groot effect op het aantal slachtoffers onder de vluchtenden, bijvoorbeeld:

- *Vluchtdeuren* beperken de vluchtafstand en verhogen daardoor de kans op succesvol vluchten.
- *Hittewerende bekleding* zorgt ervoor dat de constructie bij brand lang intact blijft. Tevens zullen de rookgassen minder snel afkoelen waardoor de stratificatie langer in stand blijft (indien er geen hoge luchtsnelheden worden opgewekt door ventilatie).
- Met behulp van een *luidsprekersysteem* kan een operator de aanwezigen in de tunnel informeren over het incident en de noodzaak om te vluchten.
- Het *afsluiten van de tunnel(buis)* na een incident voorkomt dat voertuigen de tunnel in blijven rijden. Hierdoor wordt het aantal potentiële slachtoffers verkleind.
- *Mechanische langsventilatie* zal er bij de meeste incidenten (branden) voor zorgen dat weggebruikers bovenstrooms van het incident in een relatief veilige omgeving blijven doordat de (rook)gassen naar de tunneluitgang worden geblazen.

Bij scenario's met directe effecten, zoals bij een explosie, zullen de voorzieningen weinig nut hebben voor de aanwezigen in de tunnel.

Aanname 6-1 De hulpverlening is niet van invloed op het aantal 'kleine-kans-grote-gevolgen' slachtoffers.

Toelichting: *Deze aanname is een vereenvoudiging. Het effect van de hulpverlening wordt, zoals bij kwantitatieve risicoanalyses gebruikelijk is, niet meegenomen in de berekening van het aantal slachtoffers. De hulpverlening zal pas na enige tijd bij de tunnel arriveren, tijd moeten besteden aan het vaststellen van de incidentlocatie en het uitvoeren van een verkenning alvorens tot de daadwerkelijke hulpverlening wordt overgegaan. Bij de hier beschouwde scenario's zullen de aanwezigen in de tunnel dan doorgaans al in veiligheid zijn of omgekomen zijn. Wel is impliciet aangenomen dat de gevluchte gewonden adequaat worden geholpen.*

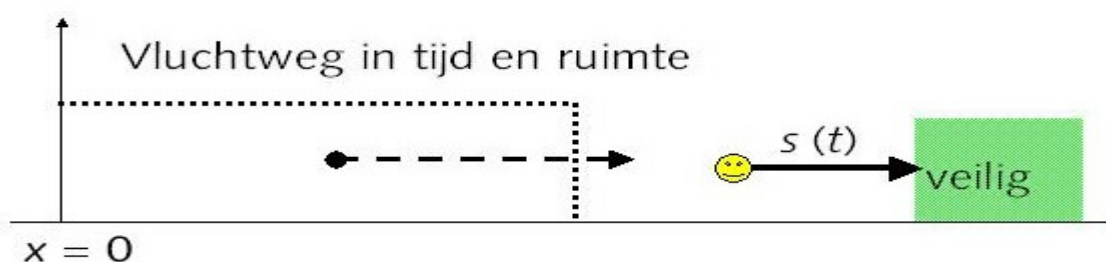
Voor het berekenen van de gevolgen van 'kleine-kans-grote-gevolgen' incidenten is het nodig de effecten in de tijd van deze incidenten te kennen (zie Figuur 6-1).



Figuur 6-1 Beschrijving van effecten in tijd en ruimte.

Het betreft:

- De ontwikkeling van voertuigbranden per voertuigtype. Daarvoor dienen de temperatuur, de rookgasontwikkeling en het brandvermogen als functie van de tijd bekend te zijn. Daarnaast dient ook de invloed van de voorzieningen in de tunnel (zoals ventilatie) op de brandontwikkeling bekend te zijn.
- Het tijdsverloop van de uitstroming en verdamping van een gevaarlijke stof. Voor de externe veiligheid op de 'open weg' zijn hiervoor modellen uitgewerkt in het Gele Boek [3]; deze zijn alléén geldig op enige afstand van de bron en in de open lucht. Voor tunnels zullen sommige van deze modellen ook gelden, maar andere modellen slechts in mindere mate of niet omdat in de tunnel de tunnelwanden en het tunneldak een barrière vormen bij de uitstroming (met name bij gassen) en de verdamping.
- De dispersie van rookgassen of van een uitgestroomde gevaarlijke stof. De dispersie is afhankelijk van de werking van een eventueel aanwezig ventilatiesysteem.
- De afstand tot het incident; hoe groter de afstand, hoe later de effecten optreden.
- Het tijdsverloop van het vluchten van de weggebruikers (zie Figuur 6-2). Hierbij dienen gegevens bekend te zijn over onder andere de vluchtsnelheid, de effecten van rookgassen of een uitgestroomde gevaarlijke stof op de vluchtsnelheid, de reactietijd en de wijze van reageren van de weggebruikers.



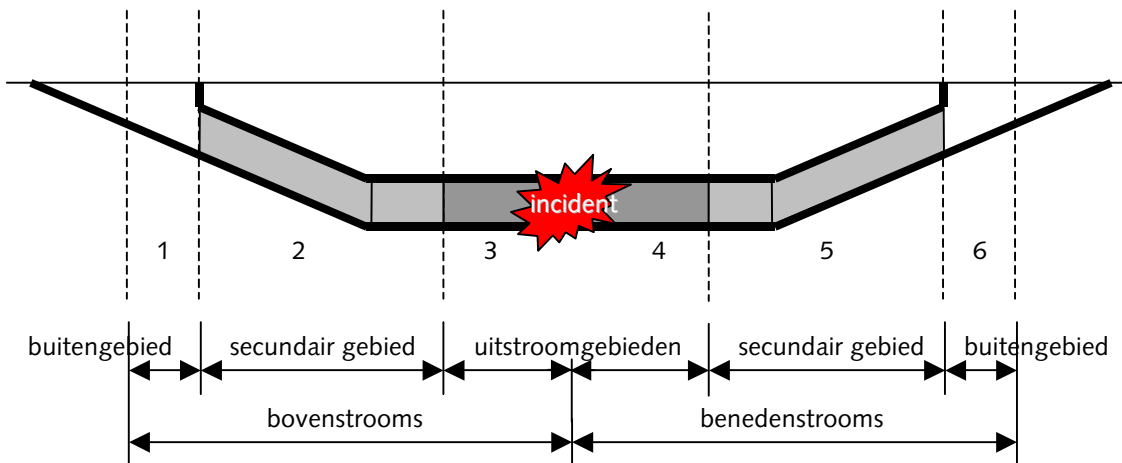
Figuur 6-2 Beschrijving van de vluchtweg in tijd en ruimte.

In QRA-tunnels is ervoor gekozen om de effecten 'semi-dynamisch' te modelleren. Hiermee wordt bedoeld dat met behulp van 'ijkmomenten' rekening wordt gehouden met het tijdsverloop van het scenario, het vluchten van de weggebruikers en de afstand tot het incident. Ijkmomenten zijn onder andere: het tijdstip waarop de aanwezigen starten met vluchten, het moment van uitstromen, het moment waarop een brand uit het voertuig treedt of het moment waarop het maximaal brandvermogen wordt bereikt en het tijdstip van ontsteking van een brandbare gaswolk. Deze 'ijkmomenten' worden waar mogelijk op basis van praktijkgegevens bepaald en daar waar dat niet mogelijk is op basis van (conservatieve) inschattingen.

De belangrijkste reden om 'semi-dynamisch' en niet 'dynamisch' (van seconde tot seconde) te modelleren is gelegen in het grote aantal door te rekenen scenario's. Op het moment van het maken van QRA-tunnels zou het doorrekenen van alle scenario's met dynamische modellen nog steeds (te) veel rekentijd vergen.

Deelgebieden

Ten behoeve van de effectmodellering is de tunnelbuis onderverdeeld in zes genummerde, elkaar uitsluitende deelgebieden, zie Figuur 6-3. Deze verdeling is gekozen omdat de effecten van de diverse scenario's per deelgebied (kunnen) verschillen.



Figuur 6-3 Deelgebieden voor de incidentlocatie op het horizontale deel van de tunnelbuis.

Er wordt allereerst onderscheid gemaakt in gebieden bovenstrooms en benedenstrooms van het incident. In geval van langsventilatie zullen bovenstrooms van een (voertuig)brand de aanwezigen bij voldoende ventilatie immers tegen de rookgassen worden beschermd. De gebieden bovenstrooms en benedenstrooms van het incident worden elk verder onderverdeeld in een gebied in de tunnelbuis en een gebied buiten de tunnelbuis. Bij enkele scenario's in de tunnelbuis, zoals explosies, kunnen namelijk ook buiten de tunnelbuis slachtoffers vallen; deze slachtoffers worden meegeteld bij de berekening van het aantal slachtoffers van dit scenario. In het gebied buiten de tunnel kunnen ook incidenten optreden die in de tunnel gevolgen kunnen hebben. Deze incidenten behoren echter niet tot dit risicomodel, omdat ze op de 'open' weg plaatsvinden en dus behoren bij de risicoberekening voor het betreffende wegvak.

De gebieden in de tunnelbuis worden elk nog weer onderverdeeld in een uitstroomgebied en een secundair gebied. Het uitstroomgebied is van toepassing bij uitstroming van gevaarlijke stoffen; het is het gebied dat wordt ingenomen door de vloeistofplas, jet of fakkel. Het secundaire gebied is het gebied tussen het uitstroomgebied en het uiteinde van de tunnelbuis. De uitstroomgebieden, secundaire gebieden en buiten gebieden zijn met de nummers 1 t/m 6 aangeduid, zoals aangegeven in Figuur 6-3.

Aanname 6-2 Op het moment dat de uitstroming plaatsvindt, zal deze direct het hele uitstroomgebied beslaan.

Toelichting: Deze aanname is een vereenvoudiging. De overschatting van het risico dat hierdoor ontstaat, is gering omdat uitstromingen van gevaarlijke stoffen (zeker bij gassen) veelal snel verlopen.

In het secundaire gebied zullen in het algemeen de effecten afnemen met toenemende afstand tot het incident.

Voor het ruimtebeslag van het incident wordt voor de bepaling van de lengte van de deelgebieden 0 m aangehouden; voor de bepaling van de kans op het blokkeren van een vluchtdoor is wel een waarde voor het gemiddeld ruimtebeslag van een letselongeval met brand (zie Tabel 4-17) aangehouden.

Bij enkele scenario's kunnen ook in andere tunnelbuizen slachtoffers vallen, bijvoorbeeld doordat de tunnel bezwijkt.

Gevolgen per scenario

Per scenario wordt de gemiddelde kans op overlijden in elk van de gebieden waar effecten optreden bepaald aan de hand van de opgelopen 'dosis' (de temperatuurseffecten en/of het blootstaan aan rookgassen of toxische gassen).

Het aantal slachtoffers per deelgebied wordt berekend door de overlijdenskans te vermenigvuldigen met het aantal blootgestelden in dat deelgebied. Dit wordt in hoofdstuk 7 voor de brandscenario's uitgewerkt en in hoofdstuk 8 voor de scenario's met het vrijkomen van gevaarlijke stoffen.

Uitgaande van de 6 deelgebieden en mogelijke slachtoffers in de nevenbuizen wordt het totaal aantal kkgg-slachtoffers van een scenario bepaald door:

$$E_{kkgg} = 0 \text{ als } G_{\text{incident}} = \text{Geen incident of } G_{\text{vtgbrand}} = \text{Geblust of } G_{\text{vtgbrand}} = \text{Geen brand of } G_{\text{uitstroming}} = \text{Lgeen of } G_{\text{uitstroming}} = \text{Ggeen} \quad (6-3)$$

Anders:

$$E_{kkgg} = L_1 \cdot D_1 \cdot p_1 + L_2 \cdot D_2 \cdot p_2 + L_3 \cdot D_3 \cdot p_3 + L_4 \cdot D_4 \cdot p_4 + L_5 \cdot D_5 \cdot p_5 + L_6 \cdot D_6 \cdot p_6 + E_{\text{nevenbuizen}}$$

Hierin is (voor i is 1 t/m 6) L_i de lengte van deelgebied i [m], D_i de (gemiddelde) personendichtheid in gebied i [personen/meter], p_i de (gemiddelde) overlijdenskans in gebied i [-] en $E_{\text{nevenbuizen}}$ het aantal slachtoffers in de nevenbuizen.

$L_i \cdot D_i$ is daarmee dus het aantal aanwezigen in gebied i .

Voor het aantal slachtoffers in de nevenbuizen geldt:

$$\begin{array}{ll} \text{als } T_{\text{expl}} < T_{\text{expl,geenexpl}} & E_{\text{nevenbuizen}} = (N_{\text{tot-rijstroken}} - N_{\text{rij}}) \cdot L_{\text{buis}} \cdot D_{\text{nevenbuis}} \cdot p_{\text{nevenbuis}} \\ \text{anders} & E_{\text{nevenbuizen}} = 0 \end{array} \quad (6-4)$$

$$\begin{array}{ll} \text{als } T_{\text{expl}} < T_{\text{expl,geenexpl}} & T_{\text{expl,geenexpl}} = 60 \\ & p_{\text{nevenbuis}} = 1 \\ \text{anders} & p_{\text{nevenbuis}} = 0 \end{array} \quad (6-5)$$

Hierbij zijn $N_{\text{tot-rijstroken}}$, N_{rij} en L_{buis} invoervariabelen uit Tabel 3-1. $D_{\text{nevenbuis}}$ is de dichtheid in de nevenbuis per rijstrook. Deze is afhankelijk van het moment dat het ongeval plaats vindt (heeft er bijvoorbeeld wel of nog geen ontruiming plaatsgevonden). T_{expl} is de tijd (in minuten) die verstrijkt totdat de explosie optreedt; voor de scenario's zonder explosie wordt $T_{\text{expl}} = 60$ gesteld.

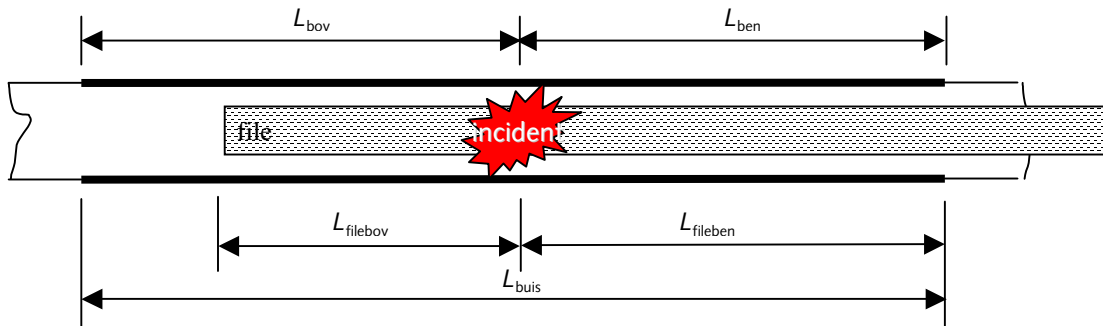
De waarden van L_i , p_i en T_{expl} worden voor de brandscenario's bepaald in hoofdstuk 7 en voor de scenario's met gevaarlijke stoffen in hoofdstuk 8.

De gemiddelde personendichtheid in de deelgebieden (D_i) is uitgewerkt in paragraaf 6.4.3.

De lengte van eventueel stilstaand verkeer benedenstrooms of bovenstrooms van het incident wordt berekend in de volgende paragrafen.

6.4.1 Bepaling lengte benedenstroomse file

Omdat is aangenomen dat bij een benedenstroomse file het incident plaatsvindt in de file (zie Aanname 4-16) zal er in die situatie benedenstrooms van het incident een file staan vanaf het incident tot (voorbij) het uiteinde van de tunnelbuis (zie Figuur 6-4). Er zal dan daarna ook altijd een file bovenstrooms van het incident ontstaan (zie vergelijking (4-7)).



Figuur 6-4 Situatie bij een benedenstroomse file

Van een incident in de tunnelbuis met een benedenstroomse file is alleen sprake als zich tijdens het vormen van een file (nagenoeg stilstaand verkeer) in de tunnelbuis een incident voordoet. Het aantal keren (per etmaal) dat er (nagenoeg) stilstaand verkeer in de tunnelbuis komt te staan en de maximale tijdsduur voor de opbouw hiervan zijn invoervariabelen (zie Tabel 3-7).

Aanname 6-3 Wanneer er in de tunnelbuis een file benedenstrooms van het incident staat, dan zal deze file altijd tot voorbij de uitgang van de tunnelbuis staan, waarbij het deel van deze file buiten de tunnel minimaal even lang is als de effectlengte buiten de tunnel.

Toelichting: Dit is een pessimistische aanname. In werkelijkheid kan de benedenstroomse file ook korter zijn dan de effectlengte buiten de tunnel, namelijk bij een ongeval vlak na de tunnel. Dit betreft echter slechts een klein deel van de incidenten zodat de overschatting van het risico door deze aanname beperkt is.

Aanname 6-4 De tijdsduur tot het moment waarop een incident zich in de tunnelbuis voordoet tijdens filevorming is de helft van de maximale tijdsduur van filevorming in de tunnelbuis.

Toelichting: Dit is een vereenvoudiging. Omdat in principe elk voertuig een gelijke kans heeft om een incident te veroorzaken aan het eind van een file zal gemiddeld het incident zich halverwege de tijdsduur van filevorming voordoen. Hierbij wordt uiteraard alleen de filevorming in de tunnelbuis in beschouwing genomen.

De lengte van de benedenstroomse file in de tunnelbuis ($L_{fileben}$) wordt gegeven door:

$$\begin{aligned}
 L_{fileben} &= 0 && \text{als } G_{fileben} = \text{Geen fileben} \\
 L_{fileben} &= 0,5 \cdot T_{file} \cdot I_{periodeuur} \cdot \frac{L_{vtg}}{N_{filerij}} && \text{als } G_{fileben} = \text{Wel fileben}
 \end{aligned}
 \tag{6-6}$$

waarbij T_{file} (zie vergelijking (4-5) de tijdsduur (in uur) is van filevorming bij een benedenstroomse file in de tunnelbuis, $I_{periodeuur}$ (zie Tabel 4-1) de verkeersintensiteit per uur tijdens de betreffende periode, L_{vtg} (zie vergelijking (4-3)) het gemiddelde ruimtebeslag van een voertuig in een stilstaande file en $N_{filerij}$ (zie Tabel 3-7) het aantal rijstroken waarover de file zich opbouwt. Merk op dat het aantal voertuigen in de file wordt gegeven door 0,5 maal T_{file} maal $I_{periodeuur}$, zie Aanname 6-4.

Afstand tot buiseinde

Omdat het incident voor de situatie zonder een benedenstroomse file plaatsvindt in het midden van het tunneldeel en voor de situatie met een benedenstroomse file *in* de file (zie Aanname 4-16 en paragraaf 5.4) geldt voor de afstand tussen het incident en het bovenstroomse buiseinde (L_{bov}):

$$\begin{aligned}L_{bov} &= \frac{L_{neer}}{2} && \text{als } G_{\text{plaats}} = \text{Neer} \\L_{bov} &= L_{neer} + \frac{L_{hor}}{2} && \text{als } G_{\text{plaats}} = \text{Horizontaal} \\L_{bov} &= L_{neer} + L_{hor} + \frac{L_{op}}{2} && \text{als } G_{\text{plaats}} = \text{Op} \\L_{bov} &= L_{buis} - L_{fileben} && \text{als } G_{\text{plaats}} = \text{In file}\end{aligned} \quad (6-7)$$

waarbij L_{buis} , L_{neer} , L_{hor} en L_{op} de lengten zijn van respectievelijk de tunnelbuis, het neergaande tunneldeel, het horizontale tunneldeel en het opgaande tunneldeel (zie Tabel 3-1). De lengte van de benedenstroomse file in de tunnelbuis ($L_{fileben}$) wordt bepaald met vergelijking (6-6).

Voor de afstand tussen het incident en het benedenstroomse buiseinde (L_{ben}) geldt:

$$L_{ben} = L_{buis} - L_{bov} \quad (6-8)$$

waarbij L_{buis} de lengte van de tunnelbuis is (zie Tabel 3-1) en L_{bov} de afstand tussen het incident en het bovenstroomse buiseinde (zie vergelijking (6-7)).

L_2 en L_5 worden afgeleid uit de lengte van L_{bov} en L_{ben} en L_3 en L_4 , waarbij L_3 en L_4 per scenario worden bepaald in hoofdstuk 8.

$$\begin{aligned}L_2 &= \max(L_{bov} - L_3; 0) \\L_5 &= \max(L_{ben} - L_4; 0)\end{aligned} \quad (6-9)$$

6.4.2 Bepaling lengte file bovenstrooms

Bij de berekening van de lengte van de bovenstroomse file wordt gebruik gemaakt van:

Aanname 6-5 Weggebruikers in het rijdend verkeer zullen het gevaar van een incident niet opmerken en blijven doorrijden. Wanneer er een file staat zullen zij achter aan de file stoppen.

Toelichting: *Deze aanname is een vereenvoudiging. Hiermee worden alle voertuigen die zich bovenstrooms van het incident in de tunnelbuis bevinden in de file gemodelleerd.*

De lengte van de bovenstroomse file is afhankelijk van:

- de tijdsduur van de bovenstroomse filevorming $T_{filebov}$,
- de verkeersintensiteit tijdens de betreffende periode in voertuigen per uur $I_{periodeuur}$ (zie Tabel 4-1),
- het gemiddelde ruimtebeslag van een voertuig in een (nagenoeg) stilstaande file in meters per voertuig L_{vtg} (zie vergelijking (4-3)),
- het aantal rijstroken waarover de file zich opbouwt $N_{filerij}$ (zie Tabel 3-7).

De lengte van de bovenstroomse file ($L_{filebov}$) in meters wordt gegeven door:

$$\begin{aligned}L_{filebov} &= 0 && \text{als } P_{file,bov} = 0 \\L_{filebov} &= \frac{T_{filebov} \cdot I_{periodeuur} \cdot L_{vtg}}{60 \cdot N_{filerij}} && \text{als } P_{file,bov} > 0\end{aligned} \quad (6-10)$$

$T_{filebov}$ is gelijk aan de tijdsduur voor het afleggen van de afstand tussen de plaats waar de tunnelbuis wordt afgesloten en de plaats waar het incident gebeurt plus de tijd die verstrijkt totdat de afsluiting tot stand is gekomen of (mogelijk eerder voor scenario's met explosies) totdat het effect optreedt.

De tijdsduur van de bovenstroomse filevorming in minuten ($T_{filebov}$) wordt gegeven door:

$$T_{filebov} = \min\left(\frac{L_{bov} + L_{afsluit}}{V_{vtg}} + T_{afsluit}; \frac{L_{bov} + L_1}{V_{vtg}} + T_{expl}\right) \quad (6-11)$$

waarin L_{bov} de afstand is tussen het incident en het bovenstroomse buiseinde (zie vergelijking (6-7)), $L_{afsluit}$ de afstand tussen de plaats waar de tunnelbuis wordt afgesloten en de ingang van de tunnelbuis (zie Tabel 3-2), $T_{afsluit}$ de tijd (in minuten) die verstrijkt totdat de afsluiting van de tunnelbuis tot stand is gekomen (zie vergelijking (4-29)) en V_{vtg} de gemiddelde snelheid van een voertuig in meter per minuut (zie vergelijking (6-12)). T_{expl} is de tijd (in minuten) die verstrijkt totdat de explosie optreedt; voor de scenario's zonder explosie geldt $T_{expl} = 60$. T_{expl} is per scenario aangegeven in hoofdstuk 8. Voor de gemiddelde snelheid van een voertuig in meter per minuut V_{vtg} geldt:

$$V_{vtg} = (V_{auto} \cdot A_{auto,periode} + V_{bus} \cdot A_{bus,periode} + V_{vracht} \cdot A_{vracht,periode}) \cdot \frac{1000}{60} \quad (6-12)$$

waarin de gebruikte variabelen afkomstig zijn uit Tabel 4-1 ($A_{auto,periode}$, $A_{bus,periode}$, $A_{vracht,periode}$) en Tabel 3-3 (V_{auto} , V_{bus} en V_{vracht}).

6.4.3 Bepaling dichtheden in de verschillende gebieden

In deze paragraaf wordt uitgewerkt wat de personendichtheid in de verschillende deelgebieden is.

Bij de berekening van de dichtheden, wordt gebruik gemaakt van de volgende 3 (basis) dichtheden:

- de dichtheid in een stilstaande file (D_{file});
- de dichtheid bij rijdend verkeer (D_{rij}), deze is afhankelijk van de verkeersintensiteit;
- de dichtheid in een lege tunnel: $D=0$; dit is bijvoorbeeld benedenstrooms van een incident het geval als er geen benedenstroomse file is én de ontwikkeling van het ongeval zodanig is dat het verkeer benedenstrooms van het incident nog in staat is om de tunnelbuis en het eventuele effectgebied buiten de tunnel (L_6) te verlaten. Dit is het geval als $T_{expl} > (L_{ben} + L_6)/V_{vtg}$; $(L_{ben} + L_6)/V_{vtg}$ is de maximaal benodigde tijd om voldoende ver benedenstrooms van de tunnel te komen.

Voor de dichtheid (het gemiddeld aantal personen per strekkende meter) bij een stilstaande file (D_{file}), respectievelijk bij rijdend verkeer (D_{rij}) geldt:

$$D_{file} = \frac{N_{vtg} \cdot N_{filerij}}{L_{vtg}} \quad (6-13)$$

$$D_{rij} = \frac{N_{vtg} \cdot I_{periodeuur}}{60 \cdot V_{vtg}}$$

$I_{periodeuur}$ wordt verklaard in Tabel 4-1, $N_{filerij}$ in Tabel 3-7, L_{vtg} in vergelijking (4-3) en V_{vtg} in vergelijking (6-12). Voor het gemiddeld aantal personen in een voertuig N_{vtg} geldt:

$$N_{vtg} = N_{auto} \cdot A_{auto,periode} + N_{bus} \cdot A_{bus,periode} + N_{vracht} \cdot A_{vracht,periode} \quad (6-14)$$

$A_{auto,periode}$, $A_{bus,periode}$ en $A_{vracht,periode}$ worden verklaard in Tabel 4-1 en N_{auto} , N_{bus} en N_{vracht} in Tabel 3-3.

De dichtheden in de deelgebieden 1 t/m 6 worden vervolgens als volgt bepaald:

$$D_1 = D_{rij} \quad \text{als } T_{expl} = 0 \quad (6-15)$$

anders	$D_1 = 0$	Als $L_1 = 0$
anders ¹	$D_1 = 0 + (\max(L_1 - L_{afsluit}; 0) / L_1) \cdot D_{file}$	als $L_3 > L_{filebov}$
anders ¹	$D_1 = 0 + (\max(L_1 - L_{afsluit}; 0) / L_1) \cdot D_{file}$	als $L_2 > L_{filebov} - L_3$
anders ¹	$D_1 = (\min((L_{filebov} - L_3 - L_2 + \max(L_1 - L_{afsluit}; 0)) / L_1; 1)) \cdot D_{file}$	als $L_1 > L_{filebov} - L_3 - L_2$
anders	$D_1 = D_{file}$	
	$D_2 = D_{rij}$	als $T_{expl} = 0$
anders	$D_2 = 0$	als $L_3 > L_{filebov}$
anders	$D_2 = ((L_{filebov} - L_3) / L_2) \cdot D_{file}$	als $L_2 > L_{filebov} - L_3$
anders	$D_2 = D_{file}$	
	$D_3 = D_{rij}$	als $T_{expl} = 0$
anders	$D_3 = (L_{filebov} / L_3) \cdot D_{file}$	als $L_3 > L_{filebov}$
anders	$D_3 = D_{file}$	
	$D_4 = D_5 = D_6 = D_{file}$	als $G_{fileben} = \text{wel fileben}$
anders	$D_4 = D_5 = D_6 = D_{rij}$	als $T_{expl} = 0$
anders	$D_4 = D_5 = D_6 = 0$	als $T_{expl} \geq (L_{ben} + L_e) / V_{vtg}$
anders ²	$D_4 = D_5 = D_6 = ((L_{ben} + L_6 - T_{expl} \cdot V_{vtg}) / (L_{ben} + L_6)) \cdot D_{rij}$	als $T_{expl} < (L_{ben} + L_e) / V_{vtg}$

1. Hiermee is er dus rekening gehouden met een situatie waarbij de afstand tussen de tunnelbuis en de plaats waar de afsluiting plaatsvindt kleiner is dan de reikwijdte van de effecten van een explosie.
2. Hiermee worden alle benedenstreams nog aanwezige personen gelijkmatig verdeeld over de deelgebieden 4 t/m 6. Omdat bij een explosiescenario voor de overlijdenskans 1 wordt aangehouden is dit een vereenvoudiging zonder invloed.

Wat in deze uitwerking nog niet is meegenomen is dat de het aantal blootgestelde personen ($L_i \cdot D_i$) ook nog kan afnemen doordat mensen al kunnen zijn gevlucht voordat de schadelijke effecten (rook, warmte, toxische dampen) hen hebben bereikt. De uitwerking hiervan is opgenomen in de hoofdstukken 7 en 8.

Voor de dichtheid in de nevenbuis geldt:

Als uitgangspunt wordt gekozen dat de nevenbuizen op hetzelfde tijdstip ($T_{afsluit}$) worden afgesloten als de incidentbuis. Ook wordt, ter vereenvoudiging, aangenomen dat in de nevenbuizen dezelfde verkeersintensiteit per rijstrook geldt als in de incidentbuis.

Als er een explosie optreedt voordat de nevenbuizen zijn afgesloten dan wordt de dichtheid per rijstrook in de nevenbuis gelijk aan de dichtheid van rijdend verkeer per rijstrook in de incidentbuis: D_{rij} / N_{rij} .

Als de explosie optreedt nadat de nevenbuizen zijn afgesloten en de tunnel is leeg gereden dan geldt $D_{nevenbuis} = 0$; het leegrijden duurt maximaal: $(L_{buis} + L_{afsluit}) / V_{vtg}$. Voor de periode daar tussen in geldt:

$$D_{nevenbuis} = (L_{buis} + L_{afsluit} - (T_{expl} - T_{afsluit}) \cdot V_{vtg}) / L_{buis} \cdot D_{rij} / N_{rij}$$

6.4.4 Start vluchten en vluchtproces

Voor het berekenen van de benodigde tijd voor vluchten is het nodig eerst het tijdstip vast te stellen waarop het vluchten begint.

Aanname 6-6 De aanwezigen in de tunnelbuis zullen met vluchten beginnen zodra zij tot vluchten worden opgeroepen door de operator óf zodra zij zelf het gevaar bespeuren. Voor het tijdstip waarop de aanwezigen zelf het gevaar bespeuren (T_{zelf}) wordt voor een brand aangehouden het tijdstip waarop de zichtlengte bij het plafond ter plaatse kleiner dan 5 m wordt; voor een uitstroming van een gevaarlijke stof wordt hiervoor aangehouden het tijdstip waarop de effecten merkbaar worden.

Toelichting: *De operator kan uiteraard alleen oproepen tot vluchten als hij beschikt over de middelen hiervoor (als $A_{luid} = ja$, zie Tabel 3-2). Voor het zelf ontdekken van het*

gevaar is het nodig dat er duidelijke signalen zijn. Er is bij brand gekozen voor zichtlengte ter plaatse van het plafond omdat het hierdoor donker wordt; op dat moment behoeven er nog geen effecten op ooghoogte merkbaar te zijn. Bij uitstromingen van gevaarlijke stoffen is aangenomen dat het zelf ontdekken van het gevaar pas plaatsvindt op het moment dat de effecten op ooghoogte merkbaar zijn.

Voor het tijdstip $T_{\text{zelf}}(x)$ waarop de aanwezigen zelf het gevaar bespeuren op plaats x geldt:

$$\begin{aligned} T_{\text{zelf},L5}(x) &= para_{\text{zicht}L5} \cdot x + parb_{\text{zicht}L5} \\ T_{\text{zelf},L2}(x) &= para_{\text{zicht}L2} \cdot x + parb_{\text{zicht}L2} \end{aligned} \quad (6-16)$$

Hierin is x de afstand in meters ten opzichte van de plaats van het incident. De waarden voor $para_{\text{zicht}L5}$, $parb_{\text{zicht}L5}$, $para_{\text{zicht}L2}$ en $parb_{\text{zicht}L2}$ zijn per brandscenario afgeleid uit de CFD-berekeningen en zijn opgenomen bijlage B, paragraaf 7.

Uit de gevoeligheidsanalyses van de resultaten van de CFD-berekeningen blijkt dat het tijdstip waarop het zicht op plafondhoogte kleiner wordt dan 5 m niet sterk afhangt van de breedte van de tunnel. Daarom wordt voor T_{zelf} voor alle tunnelbreedtes de waarde gebruikt voor tunnels van 13,5 m breed.

Voor het tijdstip $T_{\text{instructie}}$ (in minuten na het optreden van het incident) waarop de operator een vluchtinstructie geeft wordt aangehouden:

$$\begin{aligned} T_{\text{instructie}} &= 60 && \text{als } A_{\text{luid}} = \text{nee of als } A_{\text{oper}} = \text{nee} \\ T_{\text{instructie}} &= T_{\text{oper,deur}} && \text{als } A_{\text{luid}} = \text{ja en } A_{\text{deur}} = \text{vergrendeld} \\ T_{\text{instructie}} &= T_{\text{oper,sluit}} - T_{\text{sluit}} + T_{\text{duur,instructie}} && \text{in alle overige gevallen} \end{aligned} \quad (6-17)$$

Hiermee wordt voor het tijdstip van de vluchtinstructie dus aangehouden: als er geen voorzieningen voor instructie zijn (als $A_{\text{luid}} = \text{nee}$ of $A_{\text{oper}} = \text{nee}$) 60 minuten (voorbij de rekestijd), als de deuren vergrendeld zijn het tijdstip waarop de deuren door de operator ontgrendeld zijn ($T_{\text{oper,deur}}$) of (indien de deuren altijd ontgrendeld zijn) het tijdstip waarop de operator het signaal heeft gegeven tot het afsluiten van de tunnelbuis ($T_{\text{oper,sluit}} - T_{\text{sluit}} + T_{\text{duur,instructie}}$ (de benodigde tijd voor het omroepen van instructies). De gebruikte variabelen zijn afkomstig uit Tabel 3-2 (A_{deur} , A_{oper} en A_{luid}), Tabel 4-15 ($T_{\text{oper,deur}}$), Tabel 4-16 ($T_{\text{oper,sluit}}$), Tabel 3-14 (T_{sluit}) en Tabel 3-17 ($T_{\text{duur,instructie}}$).

Voor het tijdstip $t_{\text{vlucht}}(x)$ waarop de aanwezigen starten met vluchten op plaats x geldt:

$$\begin{aligned} t_{\text{vlucht},L5}(x) &= \min(T_{\text{zelf},L5}(x); T_{\text{instructie}}) + T_{\text{uitstap}} \\ t_{\text{vlucht},L2}(x) &= \min(T_{\text{zelf},L2}(x); T_{\text{instructie}}) + T_{\text{uitstap}} \end{aligned} \quad (6-18)$$

T_{uitstap} is afkomstig uit Tabel 3-17, $T_{\text{zelf}}(x)$ uit vergelijking (6-16) en $T_{\text{instructie}}$ uit vergelijking (6-17). Vergelijking (6-18) drukt het minimum van het tijdstip uit dat óf de operator de aanwezigen oproept om te gaan vluchten, óf de aanwezigen zelf het gevaar opmerken. De uitstaptijd moet worden bijgeteld.

Alleen reizende, niet-zelfredzame personen

Bovenstaande beschrijving van het vluchtproces geldt alleen voor mensen die zelf in staat zijn om te vluchten of die daarbij geholpen kunnen worden door medereizigers. Voor alleen reizende, niet-zelfredzame personen kan dit niet worden verwacht. Van deze personen wordt conservatief aangenomen dat ze niet worden geholpen door andere weggebruikers en in hun voertuig blijven. In het volgende hoofdstuk wordt toegelicht hoe de extra slachtoffers die hierdoor kunnen vallen onder niet zelfredzame personen wordt berekend.

7 Gevolgenmodellering brandscenario's

7.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt het model beschreven waarmee wordt bepaald hoeveel slachtoffers er vallen bij een brand in een tunnel. Hierbij worden drie doodsoorzaken meegenomen. Ten eerste kunnen aanwezigen in de tunnel overlijden door blootstelling aan warmtestraling (stralingswarmte). Ten tweede aan hoge temperaturen (convectiewarmte). Ten derde is het mogelijk dat personen in de tunnel door de aanwezigheid van rookgassen na een tijd niet meer in staat zijn om te vluchten. Er wordt conservatief aangenomen dat zulke personen overlijden door langdurige blootstelling aan hoge temperaturen of giftige rookgassen.

Het gevolgenmodel is ontwikkeld door TNO [24] en bestaat uit vier delen. Dit is vrijwel in zijn geheel overgenomen in dit achtergronddocument. Daar waar hier van afgeweken wordt, is dit aangegeven in dit document.

Het eerste deel beschrijft de wijze waarop het overlijden aan warmtestraling wordt gemodelleerd. Dit is beschreven in paragraaf 7.3.

Het tweede deel, dat beschreven wordt in paragraaf 7.4, is het bepalen van de maximaal mogelijke vluchttijd tot bezwijken door rookgassen. Er wordt een model van Purser [25] gebruikt om te bepalen hoe lang de aanwezigen kunnen vluchten tot ze niet meer verder kunnen door inademing van rookgassen.

Het derde deel, beschreven in paragraaf 7.5, is het bepalen van de maximaal mogelijke vluchttijd tot overlijden door hoge temperaturen. Een model van Purser [25] zegt dat personen overlijden als ze een temperatuurdosering te verwerken hebben gekregen van 1. Hiermee kan worden berekend hoe lang personen in de tunnel kunnen vluchten totdat ze overlijden aan hoge temperaturen.

Het vierde deel, tot slot, is beschreven in paragraaf 7.6. Hier worden deel twee en drie gecombineerd en wordt, uit de maximaal mogelijke vluchttijd tot bezwijken aan rookgassen of hoge temperaturen, bepaald hoe ver personen in de tunnel kunnen vluchten totdat ze bezwijken. Vervolgens wordt bepaald hoe groot het gebied is waarin de aanwezigen niet op tijd een vluchtdeur kunnen bereiken en overlijden.

Voor de eerste drie delen van het model worden de resultaten gebruikt van CFD-berekeningen. Op basis van deze resultaten zijn vereenvoudigde modellen afgeleid voor het verloop van de rookgasconcentratie en de temperatuur op elke plaats in de tunnel.

Ter vereenvoudiging wordt aangenomen dat er buiten de tunnel geen extra slachtoffers vallen ten gevolge van brand omdat de hete rook bij de tunnelmonden snel naar boven stijgt. De effecten bij de tunnelmonden zijn te verwaarlozen zijn ten opzichte van de effecten in de tunnel. Daarom geldt voor (voertuig)branden: $p_1 = p_6 = 0$.

7.2 De CFD-berekeningen

Het modelleren van de temperaturen en concentraties van CO ten gevolge van een brand is gebaseerd op de CFD-berekeningen. Een uitgebreide beschrijving van de simulaties staat in Bijlage B. In deze paragraaf worden de belangrijkste punten samengevat.

Beschrijving van de simulaties

Er zijn berekeningen gedaan voor verschillende combinaties van:

- tunnellengte: 400 m of 2000 m;
- brandgroottes: 5, 10, 25, 50, 100 of 200 MW voor voertuigbranden en 3 plasbranden;
- brandontwikkeling voor voertuigbranden: 'snelle' en 'langzame' brandontwikkeling;

- wel of geen ventilatie in de lengterichting van de tunnel.

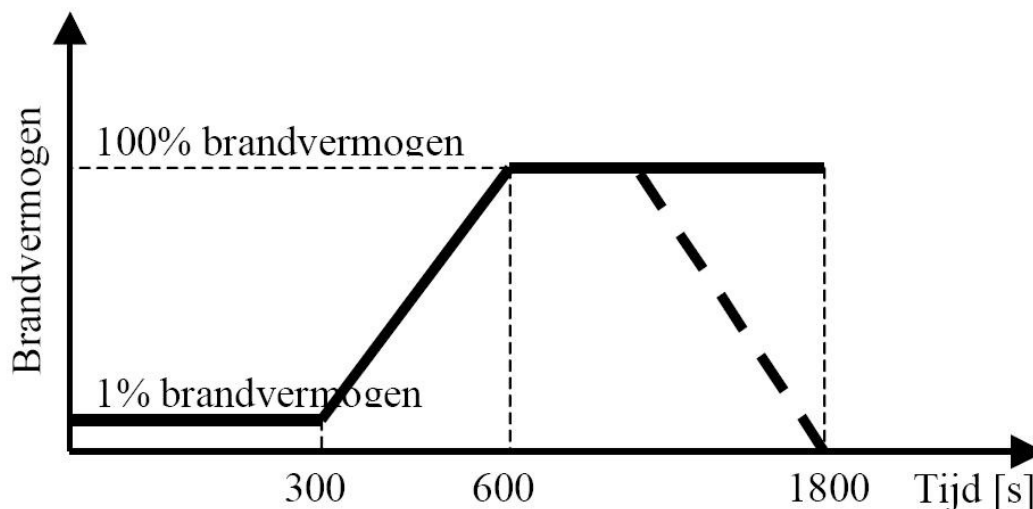
Met de CFD-berekeningen zijn onder andere het temperatuurverloop, de warmtestraling, de zichtlengte en concentraties van CO, CO₂ en zuurstof bepaald naar tijd en plaats in de tunnelbuis.

De beschouwde tunnels hebben een breedte van 13,5 m en een hoogte van 5 m. De tunnel loopt horizontaal. Voor tunnels van 400 m lang zijn obstakels in de tunnel geplaatst die 'overeenkomen' met vrachtwagens en personenauto's. De brand ontstaat in het midden van de tunnel.

Er zijn ook gevoeligheidsanalyses gedaan voor de invloed van de breedte van de tunnel, de helling van de tunnel, de mate van rookproductie, wel of geen hittewerende bekleding en de rijwind veroorzaakt door het verkeer in de tunnel. De conclusie van deze analyses is dat de snelheid waarmee de temperatuur stijgt ongeveer lineair afhangt van de tunnelbreedte (zie bijlage B) en dat de invloed van de overige factoren mag worden verwaarloosd. In de verdere uitwerking in dit hoofdstuk wordt aangegeven hoe de tunnelbreedte in rekening wordt gebracht.

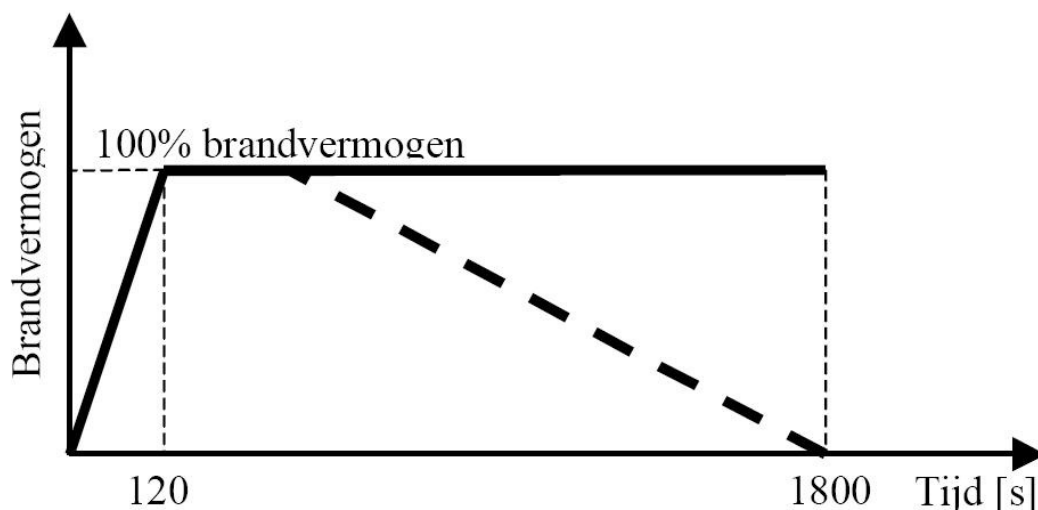
Brandontwikkeling in de tijd

In de CFD-berekeningen is voor voertuigbranden onderscheid gemaakt in branden met een 'snelle' brandontwikkeling en branden met een 'langzame' brandontwikkeling. Het verloop van het brandvermogen in de tijd is als volgt gemodelleerd:



Figuur 7-1: Brandcurve voor 'langzame' branden.

De neergaande stippellijn wordt gebruikt voor branden van 5 en 10 MW omdat bij zulke relatief kleine branden de brandstof binnen 1800 seconden opdraakt.



Figuur 7-2: Brandcurve voor 'snelle' branden.

De neergaande stippellijn wordt net als bij de 'langzame' branden gebruikt voor branden van 5 en 10 MW.

Voor een plasbrand wordt het vermogen op elk tijdstip door het CFD programma berekend op grond van de relevante gegevens, zoals plasoppervlak en beschikbare hoeveelheid zuurstof.

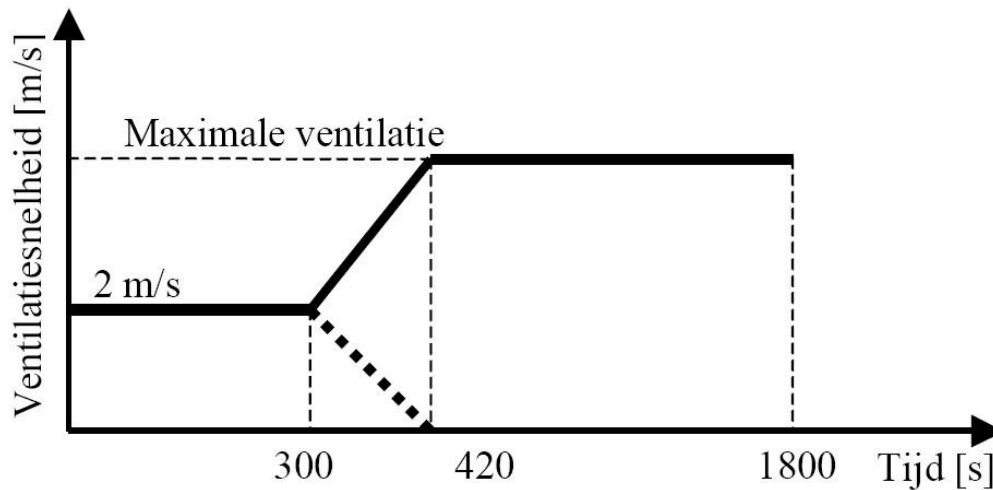
Ventilatie

Als uitgangspunt is aangehouden dat de ventilatie bij een 'langzame' brand wordt ingeschakeld na 5 minuten en bij een 'snelle' brand of plasbrand na 2 minuten. Daarna duurt het 2 minuten voordat de ventilatiesnelheid zijn maximum bereikt. De hoogte van dat maximum is afhankelijk van het brandvermogen doordat de brand weerstand opwekt. Er wordt gewerkt met de volgende maximale ventilatiesnelheden:

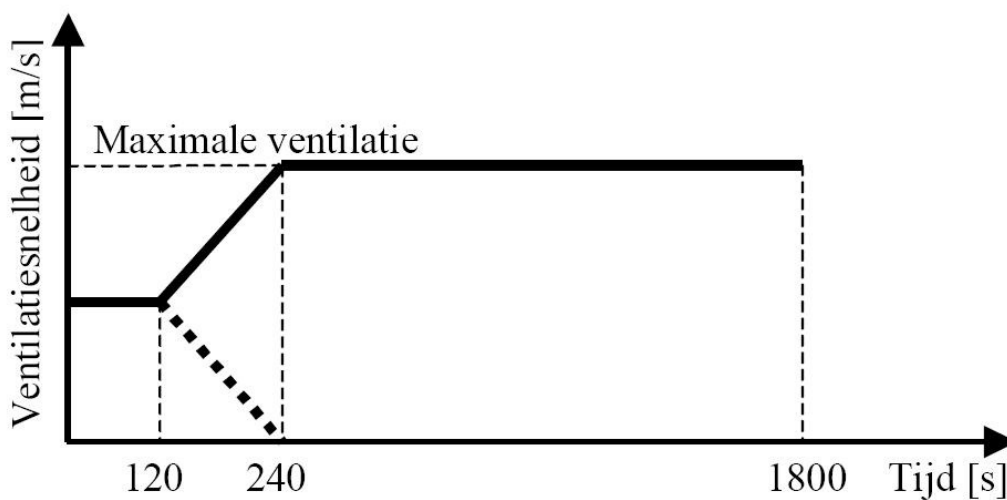
Tabel 7-1: Maximale ventilatiesnelheden.

<i>brandvermogen</i>	<i>maximale ventilatiesnelheid</i>
t/m 25 MW	5 m/s
50 MW	4 m/s
100 MW	3 m/s
200 MW	2,5 m/s
plasbrand	2,5 m/s

Tot het moment dat de ventilatie ingeschakeld wordt, staat er in de tunnel een rijwind van 2 m/s. Doordat het verkeer stopt ten gevolge van de brand neemt die rijwind vanaf dat moment in 2 minuten af tot 0. Het verloop van de ventilatiesnelheid in de tijd ziet er daardoor als volgt uit:



Figuur 7-3: Ventilatiecurve voor 'langzame' branden



Figuur 7-4: Ventilatiecurve voor 'snelle' branden en plasbranden

Bovenstaande figuren zijn dus gebaseerd op de aanname dat de ventilatie na 2 minuten wordt opgestart. De stippellijnen horen bij de situaties zonder ventilatie. In hoofdstuk 4 is uitgewerkt dat het tijdstip waarop de ventilatie, T_{ventr} , wordt opgestart afhankelijk is van de reacties van de operator (vergelijking 4.27). Ter vereenvoudiging wordt in het model gesteld dat indien de ventilatie niet binnen 4 minuten is opgestart ($T_{vent} > 4$) de gevolgen van de snel ontwikkelende brand, plasbranden en scenario's met vrijkomen gevaarlijke stoffen zullen worden gemodelleerd als een scenario zonder ventilatie. Voor $T_{vent} \leq 4$ worden de scenario's met ventilatie gebruikt. Aangezien bij langzaam ontwikkelende branden wordt uitgegaan van een inschakeling van de ventilatie na 5 minuten en de brand zich dan pas echt ontwikkelt, worden voor langzaam ontwikkelende branden vanaf $T_{vent} > 7$ de gevolgen gelijk genomen aan de gevolgen zonder ventilatie.

Dit is een conservatieve aanname omdat hiermee het positieve effect van een eventuele latere inschakeling van de ventilatie niet wordt meegenomen.

Overzicht uitgevoerde berekeningen

Voor de volgende situaties zijn CFD-berekeningen uitgevoerd.

Tabel 7-2: Uitgevoerde CFD-berekeningen.

	Lengte tunnel 400 m		Lengte tunnel 2000 m	
	met ventilatie	zonder ventilatie	met ventilatie	zonder ventilatie
'Langzame' brand	5, 10, 25, 50, 100 en 200 MW	5, 10, 25, 50, 100 en 200 MW	5 MW	50 MW
'Snelle' brand	5, 10, 25, 50, 100 en 200 MW	5, 10, 25, 50, 100 en 200 MW	5 MW, 100 MW	10, 25, 50, 100 en 200 MW
plasbrand ³	30, 300 en 1200 m ²	geen berekeningen	geen berekeningen	geen berekeningen

Voor tunnels van 2000 m zijn geen concentraties van CO, CO₂ en zuurstof bepaald. De reden hiervoor is dat de concentraties van die gassen ver van de brand niet meer sterk van de plaats zullen afhangen. Daarom kunnen de concentraties die vanaf 150 m van de brand gelden in tunnels van 400 m ook worden gebruikt voor lange tunnels op afstanden groter dan 150 m van de brand.

In het model worden uiteindelijk alleen de resultaten van de CFD-berekeningen van de 400 meter lange tunnel gebruikt, omdat hiervoor alle relevante gegevens beschikbaar zijn en deze voldoende representatief zijn voor de Nederlandse situatie. Voor de ontbrekende plasbrandscenario's zonder ventilatie zijn de resultaten van de 200 MW 'snelle' brand zonder ventilatie gebruikt (voor de 1200 m² en de 300 m² plas) en de 100 MW 'snelle' brand zonder ventilatie voor de 30 m² plas. Voor de situatie met ventilatie lijken de brandcurven van deze branden erg op elkaar. Het gelijkstellen van de 1200 m² en de 300 m² plasbrand zonder ventilatie aan een 'snelle' 200 MW brand zonder ventilatie is een voldoende conservatieve benadering; voor de situatie zonder ventilatie is het namelijk te verwachten dat het vermogen van de plasbrand lager zal zijn omdat er al vrij snel zuurstofgebrek zal optreden.

CO-productie

De hoeveelheid CO die per seconde gevormd wordt in de brand hangt af van het vermogen van de brand. Voor de CFD-berekeningen is aangenomen dat voor elke kilo verbrande brandstof (heptaan) er 6 gram CO ontstaat. Omdat het verbranden van een kilo heptaan 46,112 MJ energie oplevert, wordt er dus $6 \text{ gram} / 46,112 \text{ MJ} = 0,13 \text{ gram CO gevormd per MJ verbrandingswarmte}$. In [26] wordt voor auto- en treinbranden uitgegaan van 3,33 gram CO per MJ verbrandingswarmte in plaats van 0,13. Dit verschil wordt vermoedelijk veroorzaakt door het feit dat een pure heptaanbrand andere producten oplevert dan een autobrand in een tunnel. Om te compenseren voor dit verschil worden alle CO- concentraties die uit de CFD-berekeningen volgen vermenigvuldigd met $F_{\text{corCO-CFD}} = 3,33 / 0,13 = 25,6$.

7.3 Invloed van warmtestraling

Voor brandscenario's met een geactiveerde langsventilatie worden bovenstrooms van de brand de daar aanwezige personen alleen door warmtestraling bedreigd. Benedenstrooms is de bijdrage van warmtestraling aan het totale aantal slachtoffers gering en daarom niet berekend.

Een warmtestraling van 1 kW/m² is vergelijkbaar met de zonnestraling op een hete zomermiddag. Bij een stralingsniveau van 2,5 kW/m² kan na 1 minuut blaarvorming optreden; bij 6 kW/m² kan na 20 seconden blaarvorming optreden en na 1 minuut tweedegraads verbranding van de huid [20].

Toepassing van de in [2] deel 1A, paragraaf 4.3 gegeven probitfuncties voor eerstegraads verbranding en letaliteit geeft de volgende uitkomsten:

- 1% van de blootgestelden loopt eerstegraads verbranding op bij 3 kW/m² gedurende 30 seconden of 4,1 kW/m² gedurende 20 seconden of 6,9 kW/m² gedurende 10 seconden;

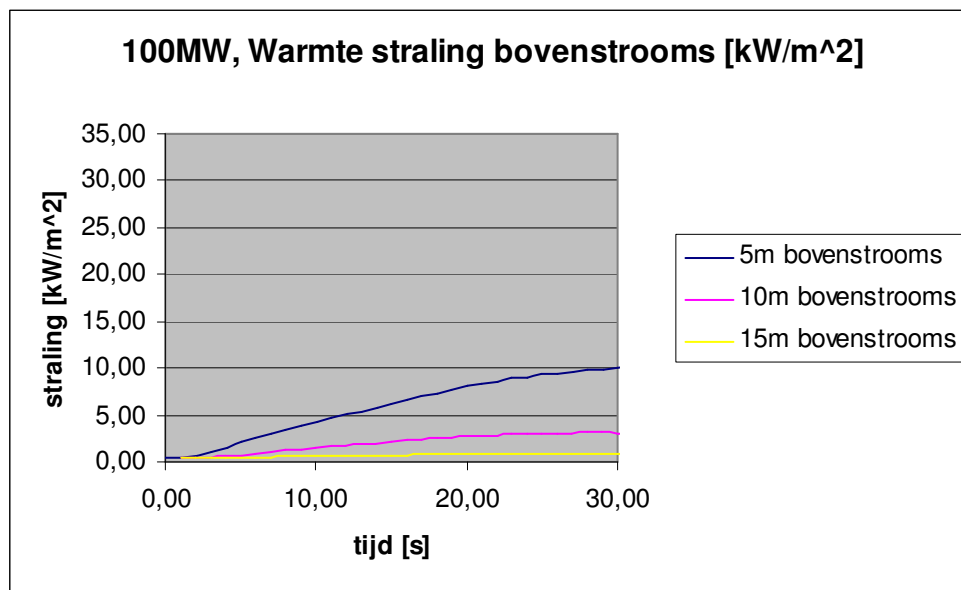
³ Voor een plasbrand van 300 m² zijn alleen resultaten gegeven tot 30 seconden na het ontstaan van de brand.

- 1% van de blootgestelden loopt letaal letsel op bij $7,2 \text{ kW/m}^2$ gedurende 30 seconden of $9,8 \text{ kW/m}^2$ gedurende 20 seconden of $16,5 \text{ kW/m}^2$ gedurende 10 seconden.

Hierbij is geen rekening gehouden met bescherming door kleding. Kleding geeft volgens [2] deel 1A, paragraaf 5.3 een bescherming met een factor 7.

Bij 'langzame' branden is er voldoende tijd beschikbaar om te vluchten en anderen te helpen. Voor het aantal letale slachtoffers ten gevolge van warmtestraling wordt, voor 'langzame' branden, daarom 0 aangehouden.

Uit de CFD berekeningen voor een 'snelle' 100 MW brand met ventilatie blijkt de onderstaande straling naar tijd en plaats.



Figuur 7-5 Warmtestraling 'snelle' 100 MW brand met ventilatie.

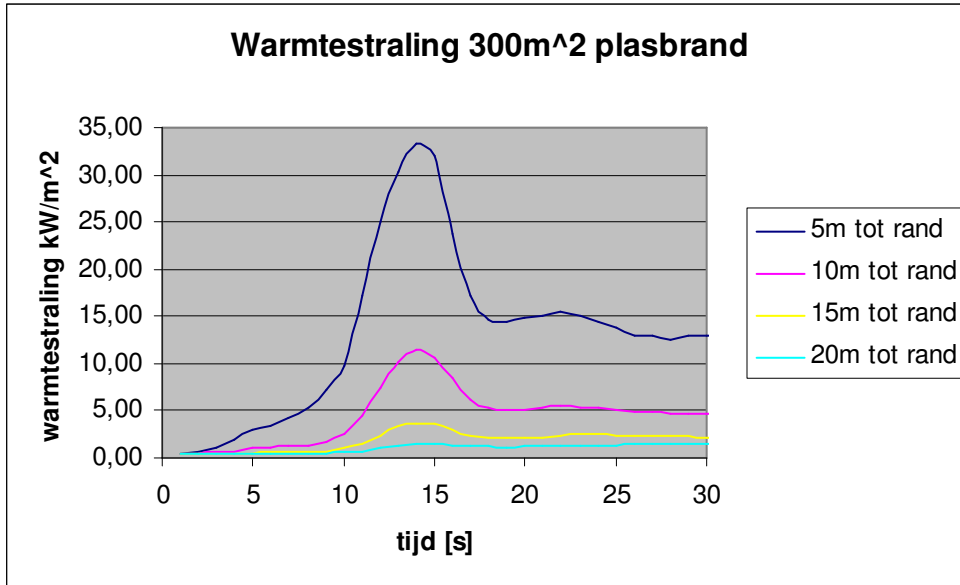
Uit de figuur wordt de conclusie getrokken dat er voor zelfredzame personen bij een 100 MW voertuigbrand nog voldoende tijd beschikbaar is om zich in veiligheid te brengen. Er zullen dan alleen slachtoffers kunnen vallen onder de functiebeperkten. Voor een deel van de functiebeperkten in een tunnel geldt dat ze sowieso worden begeleid; dit geldt bijvoorbeeld voor kleine kinderen en blinden. Ook voor deze groep lijkt er voldoende tijd en hulp aanwezig. Daarom wordt aangenomen dat er alleen slachtoffers vallen onder de alleen reizende functiebeperkten, als deze niet worden geholpen door omstanders. Hiervoor wordt het volgende aangehouden: op een afstand groter dan 7,5 meter vallen geen slachtoffers door warmtestraling. In het gebied tot 7,5 meter zullen de alleen reizende functiebeperkten overlijden. Dit wordt gemodelleerd door ook voor voertuigbranden van 100 MW een gebied te beschouwen waar slachtoffers kunnen vallen door warmtestraling. De overlijdenskans in dit gebied wordt gelijk gesteld aan de fractie niet-zelfredzame personen $FR_{nietzelfredzm}$ uit Tabel 3-3.

Voor een 200 MW brand met ventilatie worden dezelfde waarden genomen als voor de 100 MW brand omdat het groter worden van de brand hierbij ontstaat door brandoverslag wat in de praktijk enige tijd zal duren. Voor kleinere branden dan 100 MW met ventilatie wordt voor het aantal slachtoffers door warmtestraling 0 aangehouden.

Bij 'snel ontwikkelende' branden zonder ventilatie geldt dat in het bovenstroomse gebied aanwezigen ook worden blootgesteld aan (hete) rookgassen. Slachtoffers door warmtestraling zullen echter ook al

slachtoffer worden door deze (hete) rookgassen en worden daarom niet ook nog bij warmtestraling meegenomen. De berekening van het aantal slachtoffers door hete rookgassen wordt verder uitgewerkt in de volgende paragrafen.

Plasbranden ontwikkelen zich zeer snel, in 10 tot 15 seconden is de maximale warmtestraling reeds bereikt. Uit de CFD berekeningen voor een plasbrand van 300 m² met ventilatie blijkt de onderstaande straling naar tijd en plaats.



Figuur 7-6 Warmtestraling bij plasbrand.

Voor plasbranden wordt het gebied waar doden vallen door warmtestraling opgeteld bij het uitstroomgebied (L3). Dit wordt verder uitgewerkt in hoofdstuk 8.

Op basis van het bovenstaande wordt het aantal slachtoffers ten gevolge van een warmtestraling als volgt meegenomen in het model:

Tabel 7-3: Waarden voor warmtestraling.

Brandscenario	$L_{3warmtestraling}$	P_3
Alle langzaam ontwikkelende branden	0	0
Snel ontwikkelende branden zonder ventilatie	0	0
Snel ontwikkelende branden met ventilatie:		
5, 10, 25 en 50 MW	0	0
100 MW	7,5	$FR_{nietzelfredzm}$
200 MW	7,5	$FR_{nietzelfredzm}$
30 m ² plasbrand	zie hfst 8	1, zie hfst 8
300 m ² plasbrand	zie hfst 8	1, zie hfst 8
1200 m ² plasbrand	zie hfst 8	1, zie hfst 8
GF	zie hfst 8	1, zie hfst 8

7.4 Invloed van rookgassen op vluchtgedrag

7.4.1 Inleiding

Rookgassen hebben in dit model op twee manieren invloed op het vluchtgedrag. Aan de ene kant kunnen ze het vluchten bemoeilijken (in combinatie met beperkt zicht door rook), waardoor de vluchtsnelheid verlaagd wordt. Aan de andere kant kunnen sommige rookgassen ervoor zorgen dat personen na een bepaalde tijd helemaal niet meer in staat zijn om te vluchten. Personen die niet meer kunnen vluchten worden als slachtoffer beschouwd. Er wordt conservatief aangenomen dat ze zo lang worden blootgesteld aan hoge temperaturen en/of giftige rookgassen dat ze komen te overlijden. In de praktijk (zie de ongelukken in de Gotthard- en de Mont Blanc tunnel) blijken personen ook daadwerkelijk om te komen door inademen van schadelijke rookgassen.

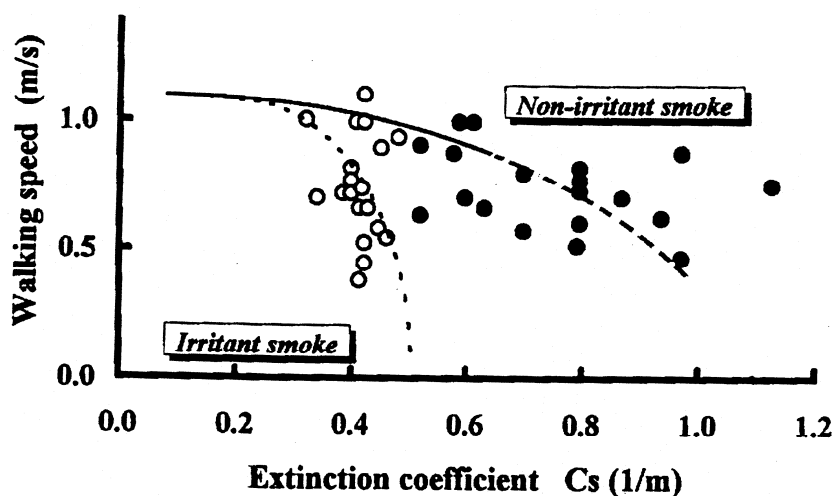
Het effect van rookgassen op de vluchtsnelheid wordt beschreven in paragraaf 7.4.2.

Voor het helemaal stoppen met vluchten door rookgassen wordt een gedetailleerd model gebruikt, gebaseerd op [25]. In dat artikel wordt een model gegeven waarmee bepaald kan worden wanneer personen niet meer kunnen vluchten door het inademen van CO, HCN en CO₂, en door zuurstofgebrek. Dan komt het belangrijkste deel van dit hoofdstuk: een schatting van de tijd dat mensen kunnen vluchten voordat ze bezwijken door inademen van schadelijke rookgassen. Hierbij wordt, conform [25], rekening gehouden met het feit dat mensen bij hoge concentraties CO₂ sneller gaan ademen en daardoor meer rookgassen per minuut binnenkrijgen. Om het model niet te ingewikkeld te maken wordt voor deze invloed van CO₂ een vaste waarde aangehouden per soort brand en tunnel, dus niet varieert naar plaats of tijd.

Het modelleren van het concentratieverloop van de rookgassen is gebaseerd op de CFD-berekeningen. De parameters in dit verloop zijn: het moment waarop de concentratie begint te stijgen, de snelheid waarmee de concentratie vervolgens stijgt, en de constante concentratie die dan wordt bereikt. Deze worden uit de resultaten van de CFD-berekeningen bepaald.

7.4.2 Verminderde vluchtsnelheid door rook

Rookgassen beperken de vluchtsnelheid doordat ze het zicht bemoeilijken en doordat ze irriterend kunnen zijn. Evenals in Building Exodus [27] wordt de invloed van de rookdichtheid op de vluchtsnelheid gebaseerd op experimenten van Jin [28]. Jin vindt de volgende relatie tussen loopsnelheid en de extinctiecoëfficiënt, voor irriterende en voor niet irriterende rook:



Figuur 7-7: Vluchtsnelheid als functie van extinctiecoëfficiënt.

Gezien het feit dat in de rook ook HCl, SO₂ en NO_x aanwezig kunnen zijn wordt conservatief de curve voor irriterende rook gebruikt. De maximale loopsnelheid is ca. 1,1 m/s. In de curve voor irriterende gassen is grofweg rond een extinctiefactor van 0,4/m een omslagpunt te zien naar lage snelheid. In het schademodel zal het tijdstip waarop deze extinctiefactor bereikt wordt aangeduid worden met t_{hinder} en zal op dat moment de vluchtsnelheid verlaagd worden tot een lagere waarde.

Voor die lagere waarde wordt default 0,3 m/s genomen. Die snelheid komt in de literatuur vaak voor als minimale vluchtsnelheid [29] [30]. In de Beneluxtunnel zijn gedragsproeven uitgevoerd [31], waaronder een proef met weggebruikers in rook. Jonkman [32] heeft uit deze gedragsproeven aanknopingspunten afgeleid voor de kwantitatieve analyse van vluchtgedrag. Ook hierbij werd een minimale vluchtsnelheid van 0,3 m/s gevonden. Ook is 0,3 m/s de minimumsnelheid voor "crawl" zoals in Building Exodus wordt gehanteerd (Tabel 2-6 in [27]).

Dit leidt tot de aanname dat de vluchtsnelheid gelijk is aan $V_{vlucht} = 1,1$ m/s (66m/min) vóór het tijdstip t_{hinder} waarop de extinctiecoëfficiënt 0,4/m wordt en daarna verlaagd wordt tot $V_{vluchtrook} = 0,3$ m/s (18m/min). Dit zijn de defaultwaarden uit Tabel 3-17. Het tijdstip t_{hinder} is afhankelijk van de plaats x in de tunnel. Voor deze afhankelijkheid wordt de volgende lineaire benadering gebruikt:

$$\begin{aligned} t_{hinderL2}(x) &= para_{hinderL2} \cdot x + parab_{hinderL2} \\ t_{hinderL5}(x) &= para_{hinderL5} \cdot x + parab_{hinderL5} \end{aligned} \quad (7-1)$$

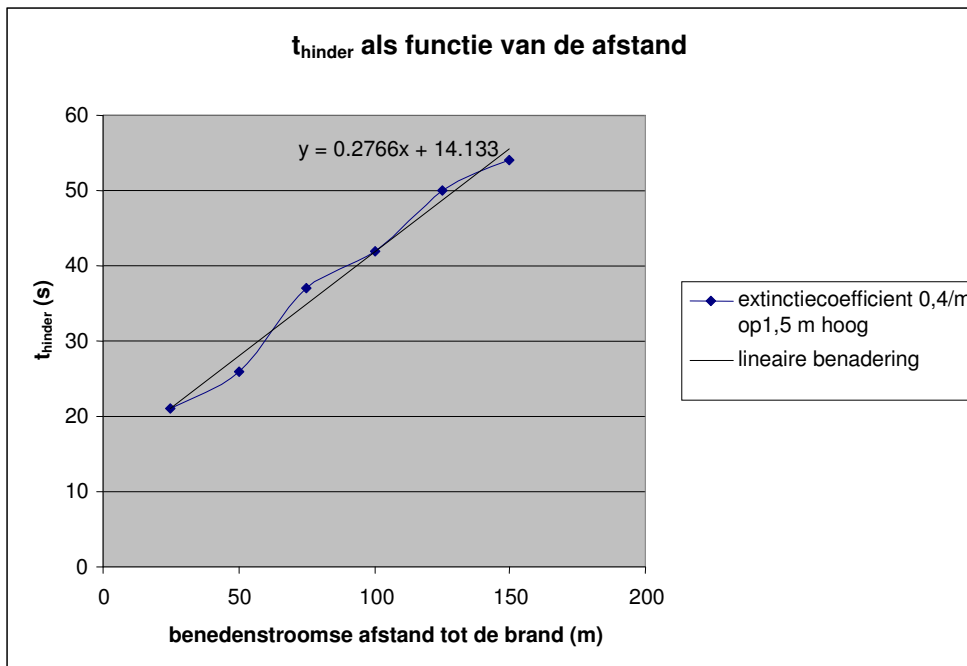
De parameters $para_{hinder}$ en $parab_{hinder}$ zijn bepaald uit de resultaten van de CFD-berekeningen⁴. Hierbij is onderscheid gemaakt naar het brandscenario, het brandvermogen, het al dan niet aanwezig zijn van ventilatie en de plaats (bovenstrooms of benedenstrooms van de brand). Deze parameters zijn gegeven in Bijlage B.

Uit de gevoeligheidsanalyses van de CFD-berekeningen blijkt dat het tijdstip waarop de extinctiefactor 0,4/m wordt is niet sterk afhankelijk van de breedte van de tunnelbuis. Daarom wordt aangenomen dat ook het tijdstip waarop mensen daadwerkelijk hinder ondervinden van de brand onafhankelijk is van de breedte van de tunnelbuis.

Voorbeeld

Voor een 'snelle' 200 MW brand in een tunnel van 400 m met ventilatie, is de plaatsafhankelijkheid van t_{hinder} hieronder weergegeven:

⁴ In de resultaten van de CFD-berekeningen staat een uitvoerparameter ext , die gelijk is aan de extinctiecoëfficiënt die door Jin wordt gebruikt.



De lineaire benadering is $t_{hinderL5}(x) = para_{hinderL5} \cdot x + parb_{hinderL5}$ met $para_{hinderL5} = 0,0046 \text{ min/m}$ ($0,2766/60$) en $parb_{hinderL5} = 0,24 \text{ min}$ ($14,133/60$).

7.4.3 Immobilititeit door rookgasvergiftiging

FID

Om te bepalen wanneer personen niet meer in staat zijn tot vluchten door het inademen van giftige stoffen, wordt in [25] de *Fractional Incapacitating Dose (FID)* gebruikt. Deze wordt ook gebruikt in Building Exodus [27]. Het criterium is dat iemand niet meer kan vluchten, als óf de FID_{CO_2} die de persoon ten gevolge van CO_2 te verwerken heeft gekregen minstens 1 is, óf de FID ten gevolge van de aanwezigheid van CO, HCN, CO_2 en zuurstofgebrek minstens 1 is. Deze doses zijn als volgt gedefinieerd (zie 2-110 en 2-111 van [25]):

$$FID_{CO_2} = \frac{t}{e^{6,1623 - 0,5189 \cdot V\%CO_2}}$$

$$FID = (FID_{CO} + FID_{HCN}) \cdot VCO_2 + FID_{O_2}$$

Hierin is t de tijd van blootstelling in minuten, geeft $V\%$... de concentratie van een stof in volumeprocent aan, zijn FID_{CO} , FID_{HCN} , en FID_{O_2} de Fractional Incapacitating Doses van CO, HCN en zuurstof(gebrek) apart (zoals hieronder gedefinieerd) en is VCO_2 een factor die beschrijft hoe de ademhaling versnelt door aanwezigheid van CO_2 (zoals hieronder wordt gedefinieerd).

$$FID_{HCN} = \frac{t}{e^{5,396 - 0,023 \cdot [HCN]}}$$

waarbij [...] de concentratie van een stof in ppm aangeeft.

$$FID_{O_2} = \frac{t}{e^{8,13 - 0,54 \cdot (20,9 - V\%O_2)}}$$

$$VCO_2 = \frac{e^{0,1903 \cdot V\%CO_2 + 2,004}}{7,1}$$

$$FID_{CO} = 1,11 \cdot 10^{-6} \cdot [CO]^{1,036} \cdot RMV \cdot t$$

met [CO] de CO- concentratie in ppm en RMV het Respiratory Minute Volume, het aantal liters dat iemand per minuut inademt. Voor lichte activiteit is dit gelijk aan 25 l/min. Voor RMV wordt daarom aangehouden:

$$RMV = 25 \quad (7-2)$$

Bovenstaande definitie gelden voor *constante* concentraties van de betreffende stoffen. Voor CO zal een tijdsafhankelijke concentratie [CO](t) gebruikt worden in het model. De definitie van de FID_{CO} is dan:

$$FID_{CO} = 1,11 \cdot 10^{-6} \cdot RMV \cdot \int_{t_1^{CO}}^t [CO](t')^{1,036} dt$$

Hierin is t_1^{CO} het tijdstip waarop de blootstelling aan CO begint.

Vereenvoudigingen

Voor enkele representatieve branden worden de relatieve bijdragen aan de FID van de verschillende stoffen gegeven ten opzichte van de bijdrage van CO. Hierbij is steeds uitgegaan van de maximale concentraties van CO en CO₂ en de minimale van O₂, die bij elk type brand en op elke afstand tot de brand bereikt werden volgens de resultaten van de CFD-berekeningen. Deze maximale en minimale concentraties waren vaak de uiteindelijke evenwichtsconcentratie. Er zijn alleen waarden gegeven voor tunnels van 400 m omdat voor lange tunnels in de CFD-berekeningen geen CO- concentraties bepaald zijn.

Er zijn geen HCN- concentraties bepaald in de resultaten van de CFD-berekeningen. Daarom worden die bepaald uit de gegeven CO- concentraties, zoals nu beschreven zal worden.

Om het effect van rookgassen op de vluchtsnelheid te bepalen is het belangrijk om te weten hoeveel van welke potentieel gevaarlijke rookgassen er worden geproduceerd in een brand. In [26] is hiervan een schatting gegeven voor treinbranden. Die schatting is gebaseerd op literatuurwaarden voor autobranden en de aanname dat treinen uit dezelfde materialen bestaan als auto's. Daarom zijn de waarden in dat rapport goed te gebruiken voor autobranden. Die waarden zijn:

Tabel 7-4: Productiefactoren voor giftige rookgassen.

<i>stof</i>	<i>productiefactor</i>
CO	3,33 g/MJ
HCl	1,95 g/MJ
NO _x	0,1 g/MJ
HCN	0,0125 g/MJ

Als het vermogen van de brand, in MW, wordt vermenigvuldigd met een van de bovenstaande productiefactoren, dan is het resultaat het aantal gram van de betreffende stof dat per seconde wordt geproduceerd in de brand.

Voor het effect op de vluchtsnelheid zijn van deze vier stoffen alleen CO en HCN van belang. De andere twee stoffen zijn toegevoegd omdat die een rol zullen spelen bij rookgasvergiftiging (zie paragraaf 7.4.4).

Het is te verwachten dat deze productiefactoren voor plas- en ladingbranden anders zijn dan voor autobranden. Ook zal de aan- of afwezigheid van ventilatie invloed hebben op de CO-vorming bij de brand. Omdat geen gegevens voorhanden zijn voor productie van giftige rookgassen bij plas- en ladingbranden, en de invloed van ventilatie, zal gewerkt worden met bovenstaande productiefactoren voor autobranden. Voor ladingbranden is het nog extra moeilijk om geschikte productiefactoren te bepalen, omdat die uiteraard sterk afhangen van de soort lading.

In de CFD-berekeningen zijn concentraties gegeven van CO, CO₂, en zuurstof. Er kan een schatting gemaakt worden van de concentraties van HCl, NO_x en HCN met behulp van de productiefactoren in Tabel 7-4. Voor elke gram CO die in de brand wordt geproduceerd, ontstaat er volgens die tabel bijvoorbeeld 1,95/3,33 = 0,59 gram HCl. Daarom wordt aangenomen dat de HCl- concentratie overal 0,59 maal zo groot is als de CO- concentratie. Voor de andere stoffen geldt:

- $[HCl] = 1,95/3,33 \cdot [CO] = 0,59 \cdot [CO]$;
- $[NO_x] = 0,1/3,33 \cdot [CO] = 0,030 \cdot [CO]$;
- $[HCN] = 0,0125/3,33 \cdot [CO] = 0,0038 \cdot [CO]$,

waarbij [...] de concentratie van een stof aangeeft. Verder is in paragraaf 7.2, op grond van de productiefactor van CO, beargumenteerd dat de CO- concentraties 25,6 maal hoger zijn dan in de resultaten van de CFD-berekeningen is aangegeven.

In onderstaande tabel zijn de bijdragen aan de FID van alle relevante stoffen gegeven, voor enkele representatieve brandscenario's voor locaties benedenstreams van de brand. Er is een blootstellingstijd van 5 minuten gebruikt. Voor de verhouding tussen de verschillende bijdragen is die blootstellingstijd niet van belang, omdat alle waarden in deze tabel daar recht evenredig mee zijn. De hyperventilatiefactor VCO₂ hangt echter niet af van de blootstellingstijd.

Tabel 7-5: Bijdragen aan FID van verschillende stoffen.

soort brand	locatie	FID _{CO}	FID _{HCN}	VCO ₂	FID _{CO} ·VCO ₂	FID _{O₂}	FID _{CO₂}
snelle brand 200 MW, geen ventilatie	25 m	1,88	0,053	10,25	19,26	117,38	5,33
	75 m	1,09	0,037	3,96	4,32	0,91	0,40
snelle brand 100 MW, geen ventilatie	25 m	0,42	0,028	1,85	0,78	0,02	0,05
	75 m	0,62	0,030	2,24	1,38	0,06	0,08
snelle brand 50 MW, geen ventilatie	25 m	0,33	0,026	1,53	0,50	0,01	0,03
	75 m	0,30	0,026	1,53	0,46	0,01	0,03
snelle brand 10 MW, geen ventilatie	25 m	0,080	0,024	1,05	0,083	0,002	0,01
	75 m	0,080	0,024	1,05	0,083	0,002	0,01
snelle brand 200 MW, wel ventilatie	25 m	1,22	0,039	3,27	3,98	1,56	0,24
	75 m	0,72	0,032	2,71	1,94	0,10	0,14
snelle brand 100 MW, wel ventilatie	25 m	0,14	0,024	1,26	0,17	0,004	0,02
	75 m	0,11	0,024	1,26	0,14	0,004	0,02
snelle brand 50 MW, wel ventilatie	25 m	0,089	0,024	1,26	0,11	0,002	0,02
	75 m	0,080	0,024	1,04	0,083	0,002	0,01
snelle brand 10 MW, wel ventilatie	25 m	0,018	0,023	1,04	0,02	0,001	0,01
	75 m	0,009	0,023	1,04	0,01	0,001	0,01
plasbrand 1200 m ² , wel ventilatie	25 m	1,85	0,052	10,25	19,00	117,38	5,33
	75 m	1,73	0,049	8,48	14,62	117,38	3,17
plasbrand 300 m ² , wel ventilatie	25 m	1,85	0,052	10,25	19,00	68,40	5,33
	75 m	1,88	0,053	10,25	19,26	117,38	5,33
plasbrand van 30 m ² , wel ventilatie	25 m	0,23	0,025	1,53	0,35	0,01	0,03
	75 m	0,28	0,026	1,53	0,42	0,01	0,03
langzame brand 200 MW, geen ventilatie	25 m	1,73	0,049	8,48	14,62	117,38	3,17
	75 m	0,67	0,031	2,24	1,49	0,06	0,08
langzame brand 100 MW, geen ventilatie	25 m	0,47	0,028	1,85	0,87	0,04	0,05
	75 m	0,52	0,029	2,24	1,16	0,06	0,08
langzame brand 50 MW, geen ventilatie	25 m	0,28	0,026	1,53	0,42	0,01	0,03
	75 m	0,33	0,026	1,53	0,50	0,01	0,03

Doordat steeds met maximale concentraties wordt gewerkt, zijn deze waarden voor langzaam ontwikkelende branden vergelijkbaar met die voor snel ontwikkelende branden.

Uit Tabel 7-5 blijkt dat in veel, maar niet alle, gevallen, de bijdragen van andere stoffen dan CO mogen worden verwaarloosd. De gevallen waarin dat niet zo is worden als volgt behandeld:

- Bij de plasbranden van 300 m² en 1200 m² kan de bijdrage van zuurstofgebrek uiteindelijk oplopen tot 8 maal die van CO en CO₂. HCN is dan wel te verwaarlozen. Voor deze branden wordt de uiteindelijke FID vermenigvuldigd met 9.
- Bij branden met ventilatie kunnen de andere stoffen dan CO een bijdrage aan de FID leveren die kan oplopen tot 50% van de bijdrage van CO. Daarom wordt voor deze branden de uiteindelijke FID vermenigvuldigd met 1,5.
- Bij branden van 10 MW kan de bijdrage van HCN substantieel zijn. Voor zulke branden is de FID na 5 minuten hoogstens gelijk aan 0,11. Omdat de FID lineair is in de blootstellingstijd, duurt het bij die branden 5 minuten/0,11 = 45 minuten voordat de FID gelijk wordt aan 1. Daarom zullen alle aanwezigen gevlucht zijn voordat een FID van 1 wordt bereikt, en heeft het geen gevolgen als de bijdragen van andere stoffen dan CO worden verwaarloosd.
- Bij 200 MW in tunnels zonder ventilatie speelt zuurstofgebrek een dominante rol, maar dit blijkt alleen uit de waarden op 25 m van de brand. Daar is het effect van de temperatuur veel groter dan dat van rookgassen of zuurstofgebrek, zoals in onderstaande tabel⁵ te zien is. Hierbij moet worden opgemerkt dat aangehouden is dat personen direct overlijden bij een temperatuur van 300 °C, zoals verderop zal worden beschreven. Het heeft dus ook in deze situaties geen gevolgen als zuurstofgebrek wordt verwaarloosd.

Tabel 7-6: Temperatuur en O₂-gebrek op 25 m van een brand van 200 MW zonder ventilatie.

Brandscenario	tijd tot temperatuur minimaal 300°C wordt op 25m	O ₂ -gehalte tot deze tijd	maximale FID _{O₂} na deze tijd
'snelle' brand 200 MW	70 s	18 %	0,0016
'langzame' brand 200 MW	530 s	15 %	0,063

Om deze redenen zullen FID_{HCN} , FID_{O_2} , en FID_{CO_2} niet expliciet afzonderlijk worden opgenomen in het model, maar zal de gevonden FID vermenigvuldigd worden met een correctiefactor F_{corgas} om deze termen in rekening te brengen. Het getal waar wij mee zullen werken is daarom:

$$FID = FID_{CO} \cdot VCO_2 \cdot F_{corgas}$$

Als de FID de waarde 1 bereikt dan houden personen op met vluchten. In QRA-tunnels wordt echter gerekend met de waarde $maxFID_{rook}$ in plaats van 1, voor de defaultwaarde zie Tabel 3-17. De waarde van de correctiefactor F_{corgas} is gegeven in de volgende tabel.

Tabel 7-7: Correctiefactor F_{corgas} voor correctie voor HCN, O₂, en CO₂.

soort brand	wel ventilatie	geen ventilatie
plasbrand 300 m ² en 1200 m ²	9	9 ⁶
plasbrand 30 m ²	1	1
voertuigbranden	1,5	1

Als verdere vereenvoudiging hanteren we één waarde voor de factor VCO_2 per soort brand, onafhankelijk van plaats of tijd. Deze waarden zijn gebaseerd op Tabel 7-5.

⁵ In Tabel 7-5 is te zien dat voor een langzaam ontwikkelende brand van 200 MW in een tunnel zonder ventilatie, de FID_{O₂} in 5 minuten stijgt tot 117,38, als wordt gerekend met de minimale zuurstofconcentratie (0%) die bij zo'n brand optreedt op 25 m van de brand. Die minimale concentratie wordt volgens de CFD-berekeningen pas bereikt na 750 seconden en daardoor is het mogelijk dat in Tabel 7-6 staat dat de FID_{O₂} na 530 seconden niet groter is dan 0,063

⁶ Deze waarde is niet bepaald in de CFD-berekening, uitgegaan wordt van zelfde waarde als brand met ventilatie

Tabel 7-8: Hyperventilatiefactor V_{CO_2} voor versnelde ademhaling door CO_2 .

<i>grootte brand</i>	<i>wel ventilatie</i>	<i>geen ventilatie</i>
plasbrand 1200 m ²	10	15 ⁷
plasbrand 300 m ²	10	15
plasbrand 30 m ²	1,5	3
200 MW	3	5
100 MW	1	2
50 MW	1	1,5
kleiner	1	1

7.4.4 Rookgasvergiftiging

Naast het effect van rookgassen op mobiliteit, kunnen deze gassen ook een direct dodelijk effect hebben. Dit effect kan bepaald worden met behulp van probitrelaties. In dit model zal het dodelijke effect van rookgassen echter op een eenvoudige manier verdisconteerd worden.

Ten eerste zal blijken dat de kans om te overlijden door inademing van giftige rookgassen, voordat een FID van 1 is bereikt in de meeste gevallen verwaarloosbaar is. Ten tweede zullen we laten zien dat als iemand niet meer in staat is om te vluchten doordat de FID de waarde 1 bereikt, het waarschijnlijk is dat deze persoon komt te overlijden door langdurige blootstelling aan giftige rookgassen. Daarom kan het effect van giftige rookgassen gemodelleerd worden door:

1. de aanname dat een FID van 1 leidt tot overlijden;
2. een verkleining van de tijd tot de FID gelijk wordt aan 1 in de (zeldzame) gevallen waarbij de kans op overlijden aan vergiftiging voor die tijd substantieel is.

De kans om te overlijden door rookgasverstikking voordat een FID van 1 wordt bereikt (voor personen die niet meer in staat zijn om te vluchten) wordt berekend op basis van een blootstellingstijd van een uur. De kans op overlijden door verstikking kan worden berekend via probitrelaties (zie ook paragraaf 8.4.2). De concentraties van de giftige rookgassen HCl, NO_x en HCN worden berekend uit de CO- concentratie, zoals beschreven in paragraaf 7.4.3. Vervolgens zijn voor elke stof de toxiciteitsparameters *a*, *b* en *n* nodig. Voor de beschouwde rookgassen hebben deze parameters de volgende waarden (zie Tabel 5.2 in [4]):

Tabel 7-9: Toxiciteitsconstanten.

<i>parameter</i>	<i>waarde voor CO</i>	<i>waarde voor HCl</i>	<i>waarde voor NO₂</i>	<i>waarde voor HCN</i>
<i>a</i>	-7,4	-37,3	-18,6	-9,8
<i>b</i>	1	3,69	1	1
<i>n</i>	1	1	3,7	2,4

Deze waarden gelden als concentraties worden uitgedrukt in mg/m³ en blootstellingstijden in minuten. Voor NO_x worden de parameters gebruikt die horen bij NO₂ conform [26], paragraaf 2.2 en [2], paragraaf 4.3.

Bij de branden waarvoor CFD-berekeningen gedaan zijn, komen CO- concentraties voor tot 10.000 ppm (inclusief de correctiefactor 25,6 uit paragraaf 7.2). Bij de kleinste branden is de maximale CO- concentratie 100 ppm. In onderstaande tabel zijn voor verschillende concentraties de kans op overlijden voor dat de FID_{CO} gelijk wordt aan 1 en de kans op overlijden bij blootstelling van een uur gegeven bij een constante concentratie. Deze overlijdenskansen zijn per stof apart gegeven.

In alle weergegeven waarden en grafieken van de CO-concentratie is de correctiefactor 25,6 al verwerkt.

⁷ Waarden voor plasbranden zonder ventilatie zijn niet bepaald in de CFD-berekeningen, uit de vergelijking van de gewone branden met en zonder ventilatie volgt een factor 1,5. Deze is ook genomen voor de plasbranden (met afronden naar boven)

Tabel 7-10: Kans op overlijden door verstikking.

[CO]	tijd tot FID _{CO} = 1 (minuten)	concentraties van alle stoffen (mg/m ³)	kans op verstikking voordat FID _{CO} = 1	kans op verstikking bij blootstelling van een uur
100 ppm	305	CO: 110	2 %	< 1 %
		HCl: 59	< 1 %	< 1 %
		NO _x : 3,0	< 1 %	< 1 %
		HCN: 0,41	< 1 %	< 1 %
1000 ppm	28	CO: 1100	2 %	3 %
		HCl: 586	< 1 %	1 %
		NO _x : 30	< 1 %	< 1 %
		HCN: 4,1	< 1 %	< 1 %
3000 ppm	9,0	CO: 3300	2 %	20 %
		HCl: 1759	< 1 %	97 %
		NO _x : 90	< 1 %	< 1 %
		HCN: 12	< 1 %	< 1 %
5000 ppm	5,3	CO: 5500	2 %	37 %
		HCl: 2928	< 1 %	100 %
		NO _x : 150	< 1 %	16 %
		HCN: 21	< 1 %	< 1 %
8000 ppm	3,3	CO: 8800	2 %	56 %
		HCl: 4685	< 1 %	100 %
		NO _x : 240	12 %	78 %
		HCN: 33	< 1 %	1 %
10000 ppm	2,6	CO: 11000	2 %	64 %
		HCl: 5856	< 1 %	100 %
		NO _x : 300	28 %	95 %
		HCN: 41	< 1 %	4 %

Uit deze tabel zijn de volgende conclusies te trekken:

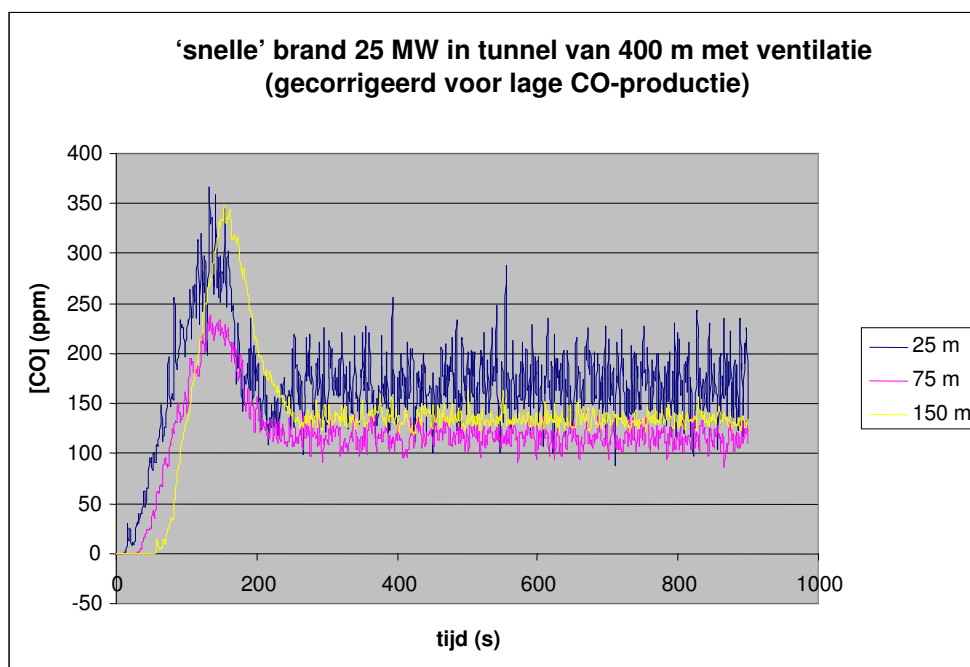
- Alleen bij de hoogste concentraties is de kans op verstikking voordat de FID_{CO} gelijk wordt aan 1 substantieel. Bij CO- concentraties van 8000 – 10.000 ppm ligt de kans op verstikken door NO_x voordat FID = 1 tussen 10 en 30 %. Echter dergelijke hoge concentraties komen alleen voor bij branden van 200 MW zonder ventilatie en bij plasbranden van 1200 m² met ventilatie⁸. Bij zulke branden zijn de factoren VCO₂ en F minstens gelijk aan 3 respectievelijk 1,5. De gehanteerde FID is daarom minstens 4,5 maal zo groot als de FID_{CO}. De tijd totdat de FID gelijk wordt aan 1 is voor 8.000 ppm CO daarom ten hoogste gelijk aan 0,72 minuut in plaats van de in de tabel vermelde 3,3 minuut en voor 10.000 ppm ten hoogste gelijk aan 0,58 minuut in plaats van de in de tabel vermelde 2,6 minuut. De kans op overlijden door verstikking voor die tijden is nooit groter dan 2%. Daarom is het in alle gevallen correct om de kans op verstikking voordat een FID van 1 wordt bereikt, te verwaarlozen.
- In situaties waarbij de FID_{CO} gelijk wordt aan 1 binnen 10 minuten, is de kans op verstikking binnen een uur zeer groot: de kans op verstikking door HCl is dan 97 %. Zelfs bij branden waarbij alleen CO als giftig rookgas wordt geproduceerd, is die kans nog aanzienlijk: 20 %.

⁸ CO- concentraties van 8.000 ppm of meer kunnen mogelijk ook voorkomen bij kleinere plasbranden in tunnels zonder ventilatie, maar voor die branden zijn nog geen CFD-resultaten beschikbaar.

Aangenomen wordt dat personen die niet meer in staat zijn om te vluchten doordat de FID gelijk wordt aan 1 overlijden aan rookgasvergiftiging. Hoewel de kans op overlijden bij een uur blootstelling aan giftige rookgassen bij concentraties tot 1.000 ppm verwaarloosbaar is (zie Tabel 7-10), duurt het in die gevallen minstens 28 minuten voordat een FID_{CO} van 1 bereikt wordt. Voor die situatie zullen die personen binnen deze tijd kunnen ontsnappen en dus ook niet als slachtoffers worden meegeteld.

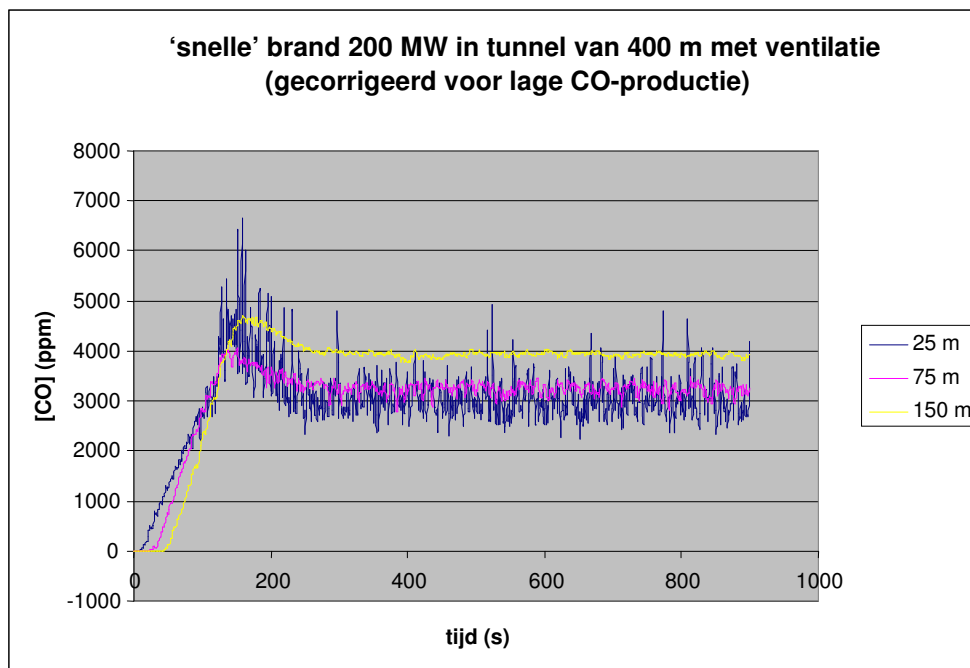
7.4.5 Modelling van het concentratieverloop

In de definitie van de dosis FID_{CO} komt het tijdsverloop van de CO- concentratie voor. In deze paragraaf geven we een model voor dat tijdsverloop. Het is gebaseerd op de resultaten van de CFD-berekeningen. Hieronder zijn resultaten van de CFD-berekeningen afgebeeld voor snel ontwikkelende branden in een tunnel van 400 m met ventilatie, voor brandvermogens van 25 en 200 MW. Het CO-verloop in de tijd is steeds weergegeven op 1,5 meter boven de vloer van de tunnel en op 25, 75 en 150 m van de brand benedenstrooms. Er is gekozen voor deze grafieken omdat een tunnel van 400 m met ventilatie redelijk representatief is voor de Nederlandse situatie. Verder zijn de resultaten gegeven voor een compleet ander geval: een langzaam ontwikkelende brand van 50 MW in een tunnel van 400 m, zonder ventilatie. Tot slot is het CO- concentratieverloop gegeven voor een grote plasbrand.



Figuur 7-8: CO- concentratieverloop voor een snel ontwikkelende brand van 25 MW.

De piek van de CO- concentratiegrafieken ligt rond het moment waarop de brand zijn maximale vermogen bereikt (120 s, zie Figuur 7-2). De ventilatiesnelheid blijft na dat moment nog twee minuten stijgen, en dit verklaart de afname in de CO- concentratie.

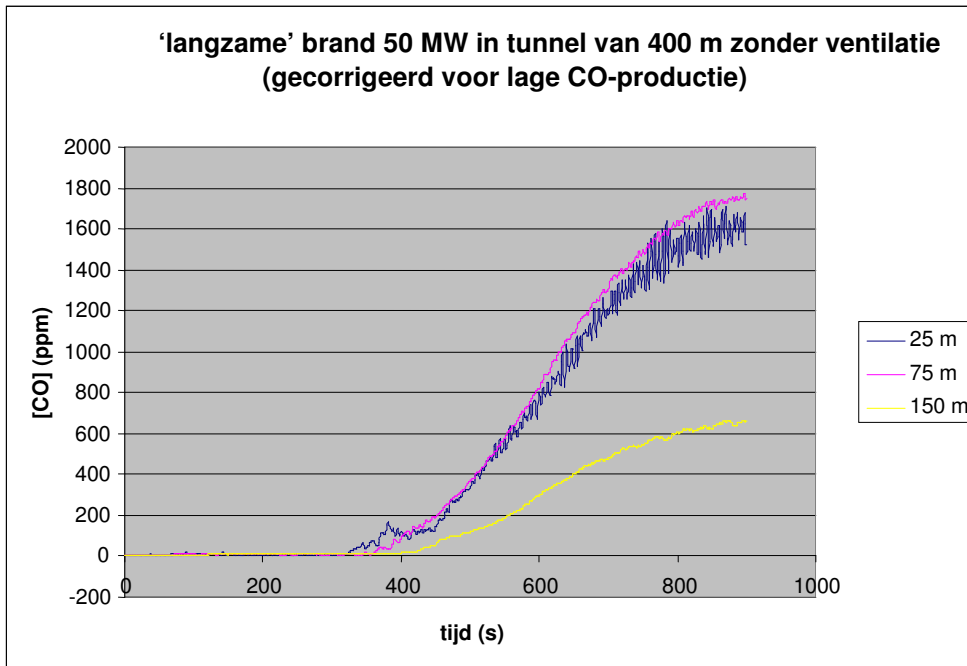


Figuur 7-9: CO- concentratieverloop voor een snel ontwikkelende brand van 200 MW.

Bij deze grote snel ontwikkelende brand is hetzelfde verloop te zien als bij de kleinere brand in de voorgaande grafiek. De piek is nu minder sterk doordat de ventilatiesnelheid minder groot is.

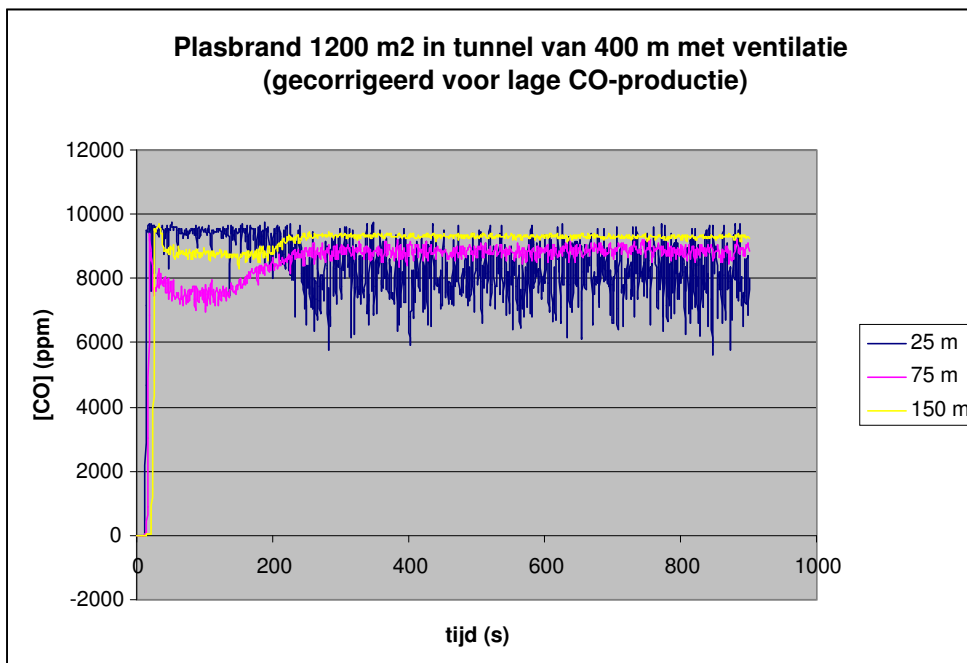
Voor het modelleren van het CO- concentratieverloop kan uit Figuur 7-8 en Figuur 7-9 een aantal conclusies getrokken worden voor tunnels met ventilatie:

- het tijdstip waarop de CO- concentratie begint te stijgen hangt, zoals verwacht, sterk af van de afstand tot de brand;
- de uiteindelijke constante concentratie hangt niet sterk af van de afstand tot de brand;
- de snelheid waarmee de concentratie stijgt, hangt niet sterk af van de afstand tot de brand.



Figuur 7-10: CO- concentratieverloop voor een langzaam ontwikkelende brand.

Bij een langzaam ontwikkelende brand begint het brandvermogen pas echt te stijgen na 300 seconden (zie Figuur 7-1) en dit is ook te zien in deze grafiek. Omdat er nu geen ventilatie is, is er geen piek te zien zoals in de vorige twee grafieken. Nu blijken de uiteindelijke CO- concentratie en de snelheid waarmee de concentratie stijgt, wel sterk af te hangen van de afstand tot de brand.



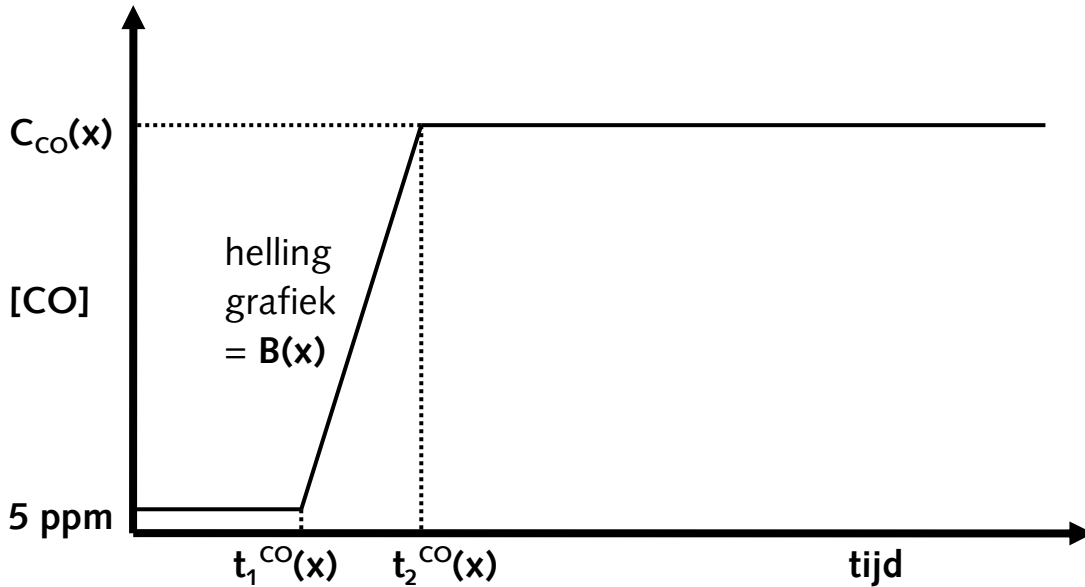
Figuur 7-11: CO- concentratieverloop voor een plasbrand.

Ook bij een plasbrand, met ventilatie is een (tijdelijke) afname in de CO- concentratie te zien doordat de ventilatiesnelheid toeneemt. De concentratie stijgt nu overal erg snel tot erg hoge waarden. De snelheid

waarmee de concentratie toeneemt en de uiteindelijke concentratie hangen weer niet sterk van de afstand tot de brand af.

Het model

Het verloop van de CO- concentratie op elke plaats x wordt als volgt gemodelleerd:



Figuur 7-12: Het gemodelleerde CO- concentratieverloop.

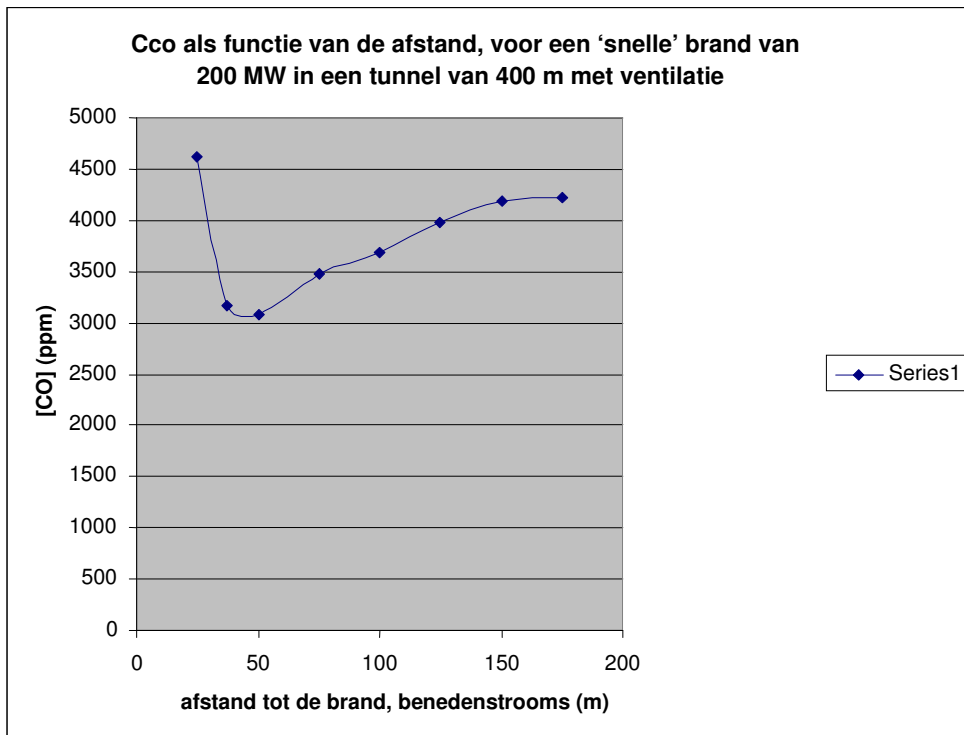
In formule:

$$[CO](t) = \begin{cases} 0 & \text{als } t \leq t_1^{CO}(x); \\ B_{hellingCO}(x) \cdot (t - t_1^{CO}(x)) + 5 \text{ ppm} & \text{als } t_1^{CO}(x) < t < t_2^{CO}(x); \\ C_{CO}(x) & \text{als } t \geq t_2^{CO}(x). \end{cases}$$

Voor de concentratie $C_{CO}(x)$ wordt de maximum concentratie genomen. Hiermee wordt, ter vereenvoudiging, afgeweken van het voorstel van TNO om het gemiddelde te nemen van de maximale concentratie en de uiteindelijke constante concentratie op 1,5 m boven de grond. Hieronder wordt de toelichting van TNO gegeven, en de door TNO afgeleide parameters. Aan het eind worden ter vergelijking de in het model gehanteerde parameters op basis van het maximum gegeven. In bijlage B zijn de parameters voor alle brandscenario's gegeven.

Bij branden met ventilatie zal de concentratie $C_{CO}(x)$ niet sterk afhangen van de afstand tot de brand bij branden zonder ventilatie wel. Daarom wordt $C_{CO}(x)$ bij branden met ventilatie als constant aangehouden en bepaald op een vaste plaats: 150 m van de brand. Op deze afstand tot de brand is te verwachten dat de rookgassen zich homogeen over de hoogte van de tunnel hebben verdeeld. De CO- concentratie op 1,5 m hoog zal daar hoger zijn dan dicht bij de brand, waar de rookgassen zich meer tegen het plafond van de tunnel bevinden. Anderzijds kan op kleine afstand van de brand (tot circa 25 m) de concentratie weer hoger liggen dan op 150 m.

In onderstaande grafiek is het gemiddelde van de maximale en de uiteindelijke constante CO- concentratie gegeven als functie van de afstand tot de brand, voor een snel ontwikkelende brand van 200 MW in een tunnel van 400 m met ventilatie.



Figuur 7-13: C_{CO} als functie van de afstand bij ventilatie.

Dichtbij de brand is de verwachting dat temperatuur een grotere rol zal spelen dan CO, daarom is het niet te optimistisch om met de concentraties op 150 m te rekenen. Daarnaast zijn op kleine afstand tot de brand (tot 25 m) de resultaten van de CFD-berekeningen minder betrouwbaar dan verder weg. Hieruit blijkt dat de CO- concentratie op 150 m een representatieve waarde is.

Bij branden zonder ventilatie wordt de volgende lineaire benadering gebruikt:

$$C_{CO}(x) = parC_{CO}a \cdot x + parC_{CO}b$$

Voor het tijdstip $t_{CO}1(x)$ wordt het moment genomen waarop de concentratie op plaats x voor het eerst 5 ppm wordt. De plaatsafhankelijkheid van $t_{CO}1(x)$ wordt gemodelleerd door een lineaire benadering:

$$t_{CO}1(x) = parT1_{CO}a \cdot x + parT1_{CO}b$$

In plaats van het tijdstip $t_{CO}2(x)$ wordt de helling $B_{hellingCO}(x)$ van het stijgende stuk van de grafiek gemodelleerd. De reden hiervoor is dat die helling bij branden met ventilatie nauwelijks afhangt van de afstand tot de brand, zodat het als een constante kan worden beschouwd. Bij branden met ventilatie wordt voor deze helling de waarde genomen op 150 m van de brand. Daar is die helling iets groter dan dicht bij de brand, zie Figuur 7-8 en Figuur 7-9. Bij branden zonder ventilatie wordt een lineaire benadering gebruikt:

$$B_{hellingCO}(x) = parhel_{CO}a \cdot x + parhel_{CO}b$$

Vervolgens kan $t_{CO}2(x)$ berekend worden via:

$$t_{CO}2(x) = t_{CO}1(x) + \frac{C_{CO}(x) - 5}{B_{hellingCO}(x)} \text{ voor } C_{CO} > 5 \text{ en } B_{hellingCO}(x) > 0$$

Hier zijn de tijdsduren $t_{CO1}(x)$ en $t_{CO2}(x)$ uitgedrukt in minuten, $C_{CO}(x)$ in ppm en $B_{hellingCO}(x)$ in ppm per minuut. Hierbij geldt dat $C_{CO} > 5$ en $B_{hellingCO}(x) > 0$. Als dit namelijk niet het geval is dan is sprake van een situatie waarbij de concentratie in een uur tijd niet boven de 5 ppm komt of niet toeneemt (en daardoor ook niet boven de 5 ppm komt). Voor die brandsituaties geldt dat de concentraties zo laag zijn dat er geen slachtoffers vallen door rookvergiftiging. Voor het model kan $t_{CO2}(x)$ dan gelijk aan 60 (minuten) worden gesteld.

Bij het bepalen van de parameters voor $C_{CO}(x)$, $t_{CO1}(x)$ en $B_{hellingCO}(x)$ moet onderscheid gemaakt worden naar het brandscenario, het vermogen van de brand, bovenstrooms of benedenstrooms van de brand en aanwezigheid van ventilatie. In bijlage B zijn de waarden voor $parC_{COa}$, $parC_{COb}$, $parT1_{COa}$, $parT1_{COb}$, $parhel_{COa}$ en $parhel_{COb}$ aangegeven.

Verder zijn $C_{CO}(x)$ en $B_{hellingCO}(x)$ afhankelijk van de breedte van de tunnel; voor deze afhankelijkheid wordt de volgende lineaire benadering gebruikt:

$$C_{CO}(x,b) = \frac{13,5}{B_{buis}} C_{CO}(x;13,5)$$

$$B_{hellingCO}(x,b) = \frac{13,5}{B_{buis}} B_{hellingCO}(x;13,5)$$

B_{buis} is de breedte van het wegdek (invoerwaarde uit Tabel 2-1).

Dit levert de volgende vergelijkingen:

$$\begin{aligned} t_{CO1L5}(x) &= parT1_{COaL5} \cdot x + parT1_{CObL5} \\ t_{CO1L2}(x) &= parT1_{COaL2} \cdot x + parT1_{CObL2} \end{aligned} \quad (7-3)$$

$$\begin{aligned} C_{CO}L5(x) &= \frac{13,5}{B_{buis}} (parC_{COaL5} \cdot x + parC_{CObL5}) \\ C_{CO}L2(x) &= \frac{13,5}{B_{buis}} (parC_{COaL2} \cdot x + parC_{CObL2}) \end{aligned} \quad (7-4)$$

$$\begin{aligned} B_{hellingCO}L5(x) &= \frac{13,5}{B_{buis}} (parhel_{COaL5} \cdot x + parhel_{CObL5}) \\ B_{hellingCO}L2(x) &= \frac{13,5}{B_{buis}} (parhel_{COaL2} \cdot x + parhel_{CObL2}) \end{aligned} \quad (7-5)$$

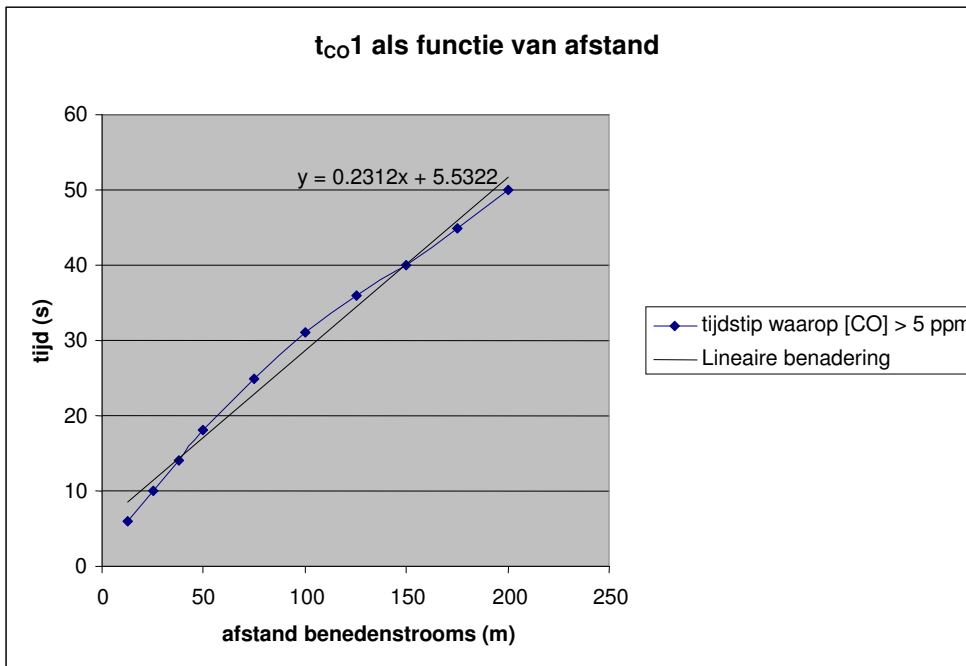
$$\begin{aligned} t_{CO2L5}(x) &= 60 \text{ als } C_{CO}L5 < 5 \text{ en/of } B_{hellingCO}L5(x) \leq 0 \\ t_{CO2L5}(x) &= t_{CO1L5}(x) + \frac{C_{CO}L5(x) - 5}{B_{hellingCO}L5(x)} \\ t_{CO2L2}(x) &= 60 \text{ als } C_{CO}L2 < 5 \text{ en/of } B_{hellingCO}L2(x) \leq 0 \\ t_{CO2L2}(x) &= t_{CO1L2}(x) + \frac{C_{CO}L2(x) - 5}{B_{hellingCO}L2(x)} \end{aligned} \quad (7-6)$$

Voorbeeld

In de voorbeeldsituatie, een snel ontwikkelende brand van 200 MW in een tunnel van 400 m met ventilatie, kunnen de parameters voor het CO- concentratieverloop als volgt bepaald worden uit de resultaten van de CFD-berekeningen, voor het benedenstroomse gebied.

Op 150 benedenstrooms van de brand is de maximale CO- concentratie 4531 ppm en de uiteindelijke constante concentratie 3840 ppm. Het gemiddelde hiervan is $C_{CO} = 4186$ ppm.

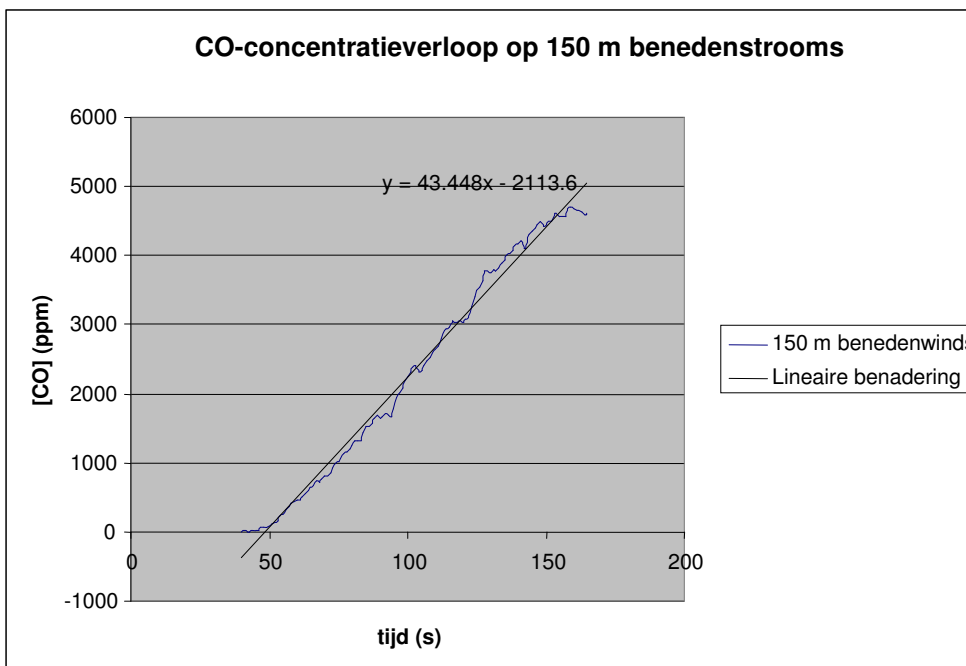
Het tijdstip $t_{co1}(x)$ waarop de CO- concentratie boven de 5 ppm komt, heeft het volgende verloop naar afstand:



Figuur 7-14: Tijdstip waarop CO- concentratie begint te stijgen.

De lineaire benadering is $t_{co1}(x) = parT1_{co}a \cdot x + parT1_{co}b$ met $parT1_{co}a = 0,0039 \text{ min/m}$ ($0,2312/60$) en $parT1_{co}b = 0,092 \text{ min}$ ($5,5322/60$).

Omdat dit voorbeeld gaat over een brand met ventilatie wordt een constante helling B in het concentratieverloop gebruikt. Op 150 m benedenstrooms van de brand ziet het stijgende stuk in het CO- concentratieverloop er zo uit:



Figuur 7-15: CO- concentratieverloop op 150 m benedenstrooms.

De helling in de lineaire benadering is $B_{hellingCO}L5 = 2607\text{ppm}/\text{min}$ (43,448 ppm/s).

Het tijdstip $t_{CO2}(x)$ is nu te berekenen door:

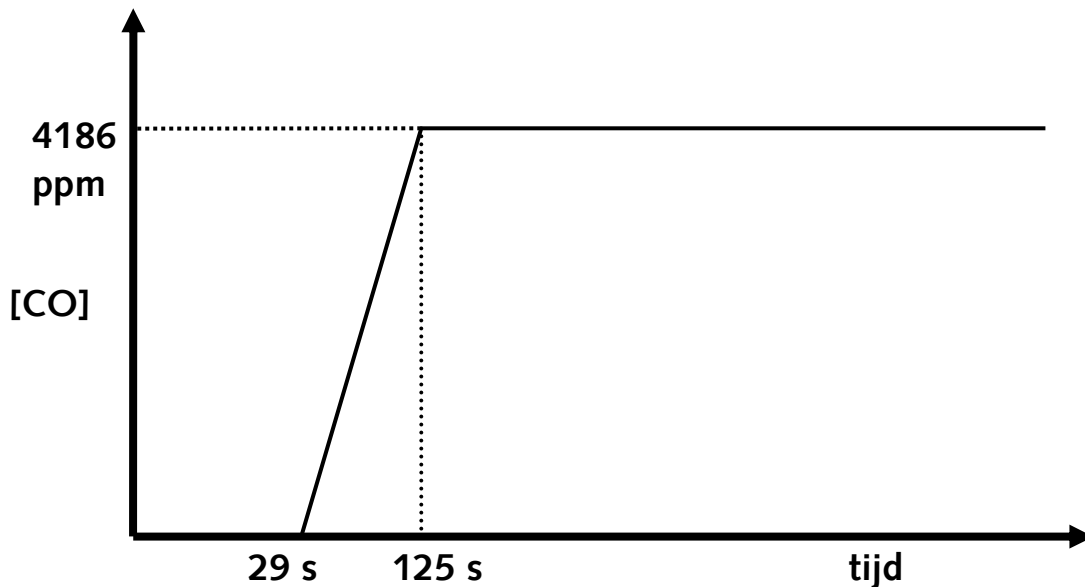
$$\begin{aligned} t_{CO2}L5(x) &= t_{CO1}L5(x) + \frac{C_{CO}L5(x) - 5}{B_{hellingCO}L5(x)} \\ &= 0,2312 \cdot x + 5,5322 + \frac{4186 - 5}{43,488} \\ &= 0,2312 \cdot x + 102 \end{aligned}$$

waarbij tijdsduren hier in seconden zijn gegeven en x in meters.

Samengevat gelden de volgende parameters voor de modellering van het CO-verloop:

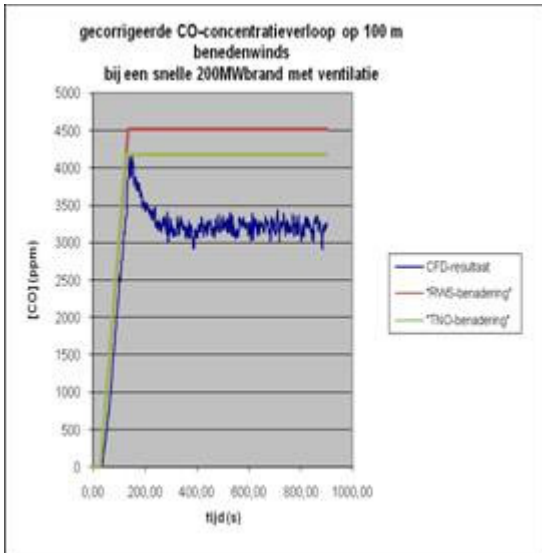
Brandscenario	$parT1_{CO}aL5$	$parT1_{CO}bL5$	$C_{CO}L5$	$B_{hellingCO}L5$
200 MW, snel, afleiding TNO	0,0039	0,092	4186	2607
200 MW, snel, afleiding RWS	0,0043	0,067	4523	2549

Het CO- concentratieverloop op 100 m benedenstrooms van de brand is volgens deze benadering gegeven door de volgende grafiek:



Figuur 7-16: Gemodelleerd CO- concentratieverloop op 100 m benedenstrooms.

In onderstaande figuur is ter vergelijking het CO-concentratieverloop weergegeven zoals bepaald in de CFD-berekeningen en de benaderingen van TNO en RWS:



Figuur 7-17: Vergelijk CO- concentratieverloop op 100 m CFD-berekeningen, TNO en RWS.

Conclusie: het gemodelleerde verloop ligt hoger dan de resultaten van de CFD-berekeningen maar klopt verder vrij goed.

7.4.6 De maximaal mogelijke vluchtijd

Gebruik makend van het model voor het verloop van de CO- concentratie uit paragraaf 7.4.5 en het model voor de invloed van rookgassen op de het vluchtgedrag uit paragraaf 7.4.3 kan een schatting gemaakt worden van de maximale tijd die iemand heeft voordat hij of zij niet meer kan vluchten door rookgassen. Deze tijdsduur zal worden aangegeven met $t_{rook,dood}$.

Gegeven het verloop van de CO- concentratie uit paragraaf 7.4.5 kan de FID (zie paragraaf 7.4.3) voor een vlucht van tijdstip $t = 0$ tot $t_{rook,dood}$ als volgt worden berekend:

$$\begin{aligned}
 FID(t_{rook,dood}) &= FID_{CO} \cdot VCO_2 \cdot F_{corgas} \\
 &= 1,11 \cdot 10^{-6} \cdot RMV \cdot VCO_2 \cdot F_{corgas} \cdot \int_0^{t_{rook,dood}} [CO]^{1,036}(t) dt
 \end{aligned}$$

waarbij $RMV = 25$, VCO_2 gegeven is in Tabel 7-8 en F_{corgas} in Tabel 7-7. Hoewel een vluchtende persoon natuurlijk niet constant op dezelfde plaats is, wordt toch gewerkt met het CO- concentratieverloop op het beginpunt van de vlucht.

Om te berekenen voor welke waarde van $t_{rook,dood}$ de FID gelijk is aan $maxFID_{rook}$ moet onderscheid gemaakt worden tussen de gevallen waarbij de FID gelijk wordt aan $maxFID_{rook}$ vóór of na het tijdstip $t_{co,2}(x)$ waarop de CO- concentratie constant is geworden. Dat wil zeggen, of $FID(t_{co,2})$ groter of kleiner is dan $maxFID_{rook}$.

Om $FID(t_{co,2})$ te berekenen kan het CO- concentratieverloop van paragraaf 7.4.5 worden ingevuld in bovenstaande formule. Dan blijkt dat:

$$\begin{aligned}
 FID(t_{co,2}) &= 1,11 \cdot 10^{-6} \cdot RMV \cdot VCO_2 \cdot F_{corgas} \cdot \int_0^{t_{co,2}} [CO]^{1,036}(t) dt \\
 &= 1,11 \cdot 10^{-6} \cdot RMV \cdot VCO_2 \cdot F_{corgas} \cdot \int_{t_{co,1}}^{t_{co,2}} (B_{hellingCO}(x, B_{buis}) \cdot (t - t_{co,1}))^{1,036} dt \quad (7-7) \\
 &= 1,11 \cdot 10^{-6} \cdot RMV \cdot VCO_2 \cdot F_{corgas} \cdot \frac{B_{hellingCO}(x, B_{buis})^{1,036}}{2,036} \cdot (t_{co,2} - t_{co,1})^{2,036}
 \end{aligned}$$

Als dit minstens $maxFID_{rook}$ is, dan is het constante stuk in het CO- concentratieverloop niet van belang. In dat geval is het tijdstip $t_{rook,dood}$ bepaald door:

$$maxFID_{rook} = FID(t_{rook,dood}) = 1,11 \cdot 10^{-6} \cdot RMV \cdot VCO_2 \cdot F_{corgas} \cdot \frac{B_{hellingCO}(x, B_{buis})^{1,036}}{2,036} \cdot (t_{rook,dood} - t_{CO1})^{2,036}$$

Oplossen van deze vergelijking geeft:

$$t_{rook,dood} = t_{CO1} + \left(\frac{2,036 \cdot maxFID_{rook}}{1,11 \cdot 10^{-6} \cdot RMV \cdot VCO_2 \cdot F_{corgas} \cdot B_{hellingCO}(x, B_{buis})^{1,036}} \right)^{\frac{1}{2,036}} \quad (7-8)$$

Als $FID(t_{CO2})$ echter kleiner is dan $maxFID_{rook}$ dan moet het constante stuk in het concentratieverloop wél worden meegenomen. Dan is $t_{rook,dood}$ bepaald door:

$$maxFID_{rook} = FID(t_{rook,dood}) = FID(t_{CO2}) + 1,11 \cdot 10^{-6} \cdot RMV \cdot VCO_2 \cdot F_{corgas} \cdot C_{CO}^{1,036} \cdot (t_{rook,dood} - t_{CO2})$$

Dit geeft:

$$t_{rook,dood} = t_{CO2} + \frac{maxFID_{rook} - FID(t_{CO2})}{1,11 \cdot 10^{-6} \cdot RMV \cdot VCO_2 \cdot F_{corgas} \cdot C_{CO}^{1,036}} \quad (7-9)$$

De tijd wordt hierbij uitgedrukt in minuten en de concentraties in ppm. De helling $B_{hellingCO}(x,b)$ wordt uitgedrukt in ppm/min!

Voorbeeld

In het voorbeeld van de snel ontwikkelende brand van 200 MW in een tunnel van 400 m met ventilatie, hebben de variabelen in de uitdrukking voor de maximaal mogelijke vluchttijd de volgende waarden op 100 m benedenstreams:

Tabel 7-11: Waarden van parameters in CO- concentratieverloop op 100 m benedenstreams.

variabele	waarde op 100 m		bron
	TNO	RWS	
t_{CO1}	29 s = 0,48 min	0,50	paragraaf 7.4.5
C_{CO}	4186 ppm	4523	paragraaf 7.4.5
$B_{hellingCO}$	43,448 ppm/s = 2607 ppm/min	2549	paragraaf 7.4.5
t_{CO2}	125 s = 2,08 min	2,27	paragraaf 7.4.5
RMV	25 l/min	25	paragraaf 7.4.3
VCO_2	3	3	Tabel 7-8
F_{corgas}	1,5	1,5	Tabel 7-7

Hiermee kan (met de waarden van TNO) worden berekend dat $FID(t_{CO2}) = 0,55$. Een FID van 1 wordt dus nog niet bereikt voor het tijdstip t_{CO2} . Daarom is $t_{rook,dood}$ (100 m) = 2,71 min = 163 s. Met de waarden van RWS wordt $t_{rook,dood}$ (100 m) = 2,71 min.

7.5 Schadelijke effecten van hoge temperaturen

7.5.1 Inleiding

Een van de oorzaken waardoor mensen kunnen overlijden bij een brand in een tunnel is blootstelling aan hoge temperaturen. In deze paragraaf wordt de methode beschreven om het aantal slachtoffers dat hierdoor valt te bepalen.

Allereerst is het verloop van de temperatuur in de tijd op een bepaalde plaats van belang. In het model zijn voor elke plaats drie gegevens nodig:

- de tijdsduur van het begin van de brand tot het moment waarop de temperatuur boven 50 °C komt;
- de snelheid waarmee de temperatuur vervolgens stijgt;
- de uiteindelijke constante temperatuur.

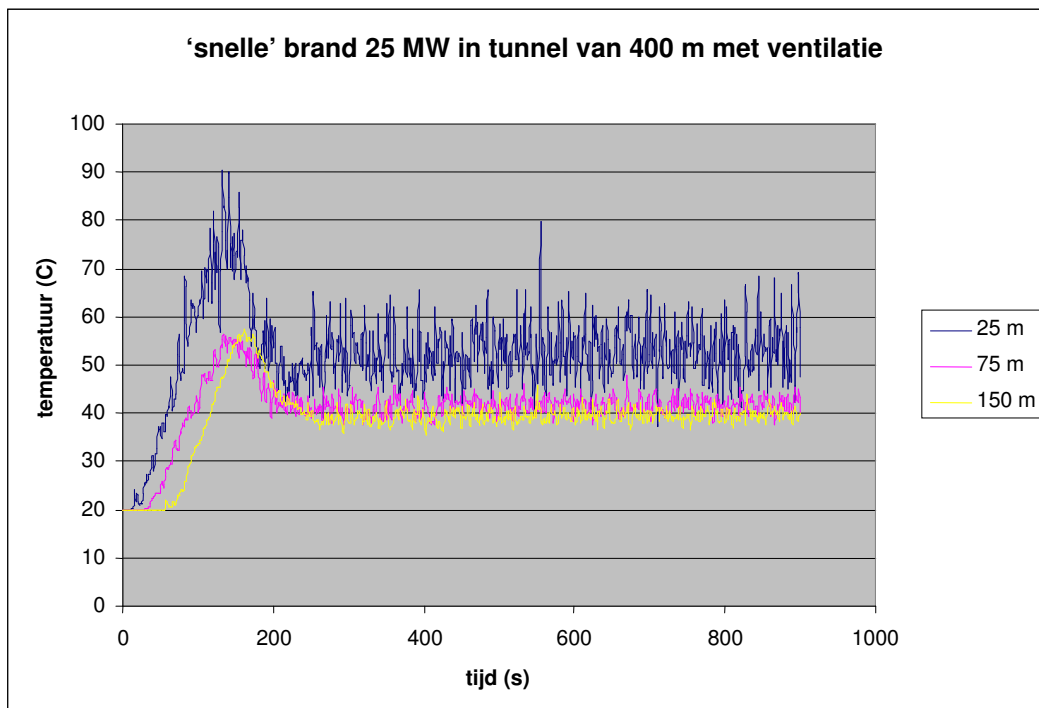
Deze gegevens zijn voor verschillende soorten branden en tunnels te halen uit de resultaten van de CFD-berekeningen.

Als het temperatuurverloop op elke plaats bekend is (en de verdeling van personen en vluchtdeuren over de tunnel) dan kan een schatting gemaakt worden van het aantal slachtoffers op basis van de 'temperatuurdosिस'. Die dosis geeft aan hoeveel schade een persoon heeft opgelopen door blootstelling aan hoge temperaturen. Als die dosis een bepaalde waarde overstijgt dan overlijdt die persoon. Hiermee kan berekend worden hoeveel tijd iemand heeft om te vluchten voordat de temperatuurdosिस te hoog wordt en dus hoe ver die persoon kan vluchten.

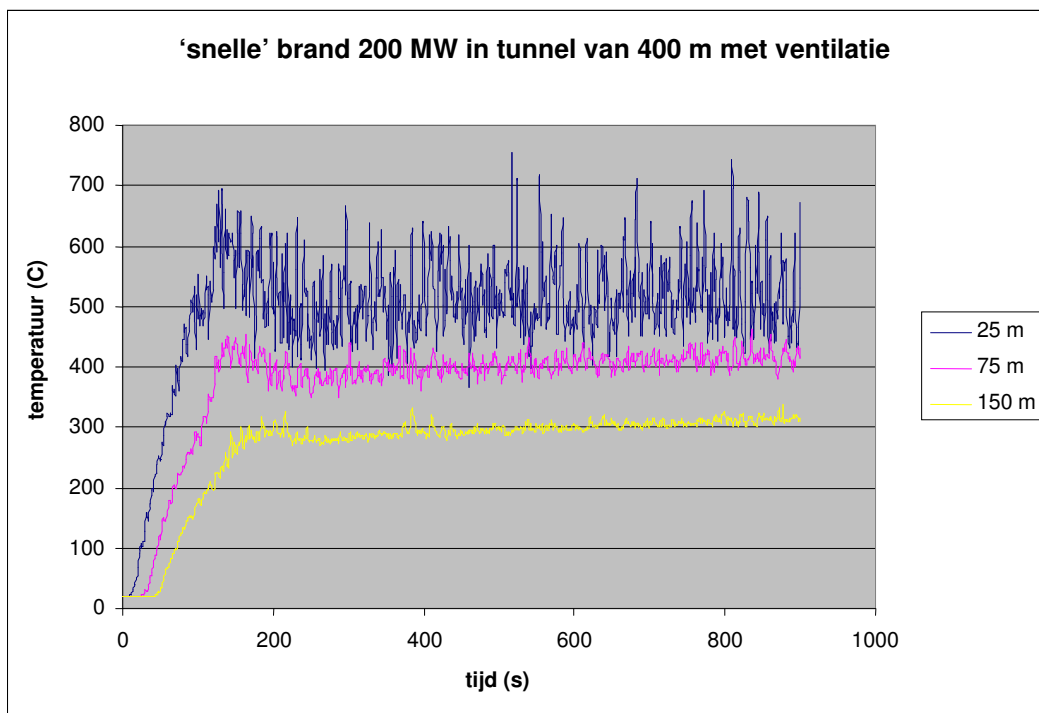
7.5.2 Resultaten CFD-berekeningen

Hieronder zijn resultaten van de CFD-berekeningen afgebeeld voor snel ontwikkelende branden in een tunnel van 400 m met ventilatie, voor brandvermogens van 25 en 200 MW. Het temperatuurverloop in de tijd is steeds weergegeven op 1,5 meter boven de vloer van de tunnel op 25, 75 en 150 m benedenstrooms van de brand. Er is gekozen voor deze grafieken omdat een tunnel van 400 m met ventilatie redelijk representatief is voor de Nederlandse situatie.

Verder zijn de resultaten gegeven in 2 compleet andere gevallen: een langzaam ontwikkelende brand van 50 MW in een tunnel van 2000 m, zonder ventilatie en voor een plasbrand.

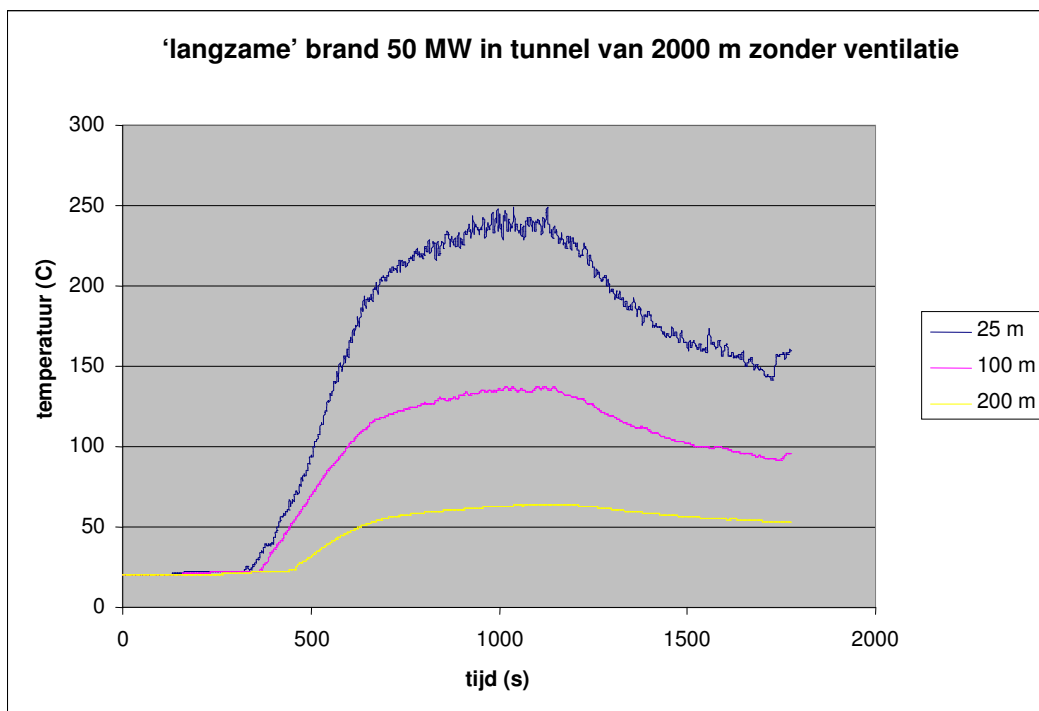


Figuur 7-18: Temperatuurverloop voor een snel ontwikkelende brand van 25 MW.



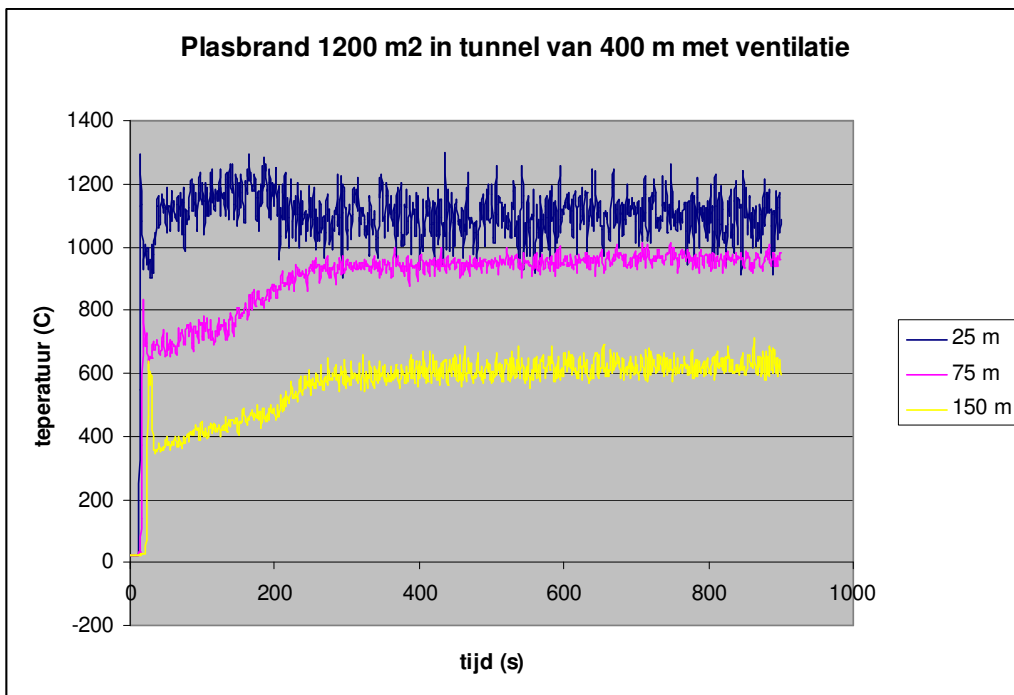
Figuur 7-19: *Temperatuurverloop voor een snel ontwikkelende brand van 200 MW.*

Het valt op dat de piek in het temperatuurverloop wordt bereikt vlak na het moment waarop het brandvermogen maximaal geworden is (120 s). Zoals verwacht kon worden wordt de maximale temperatuur later bereikt op grotere afstand van de brand. Na 240 seconden is de ventilatiesnelheid maximaal, dit verklaart het fenomeen dat de temperatuur na het bereiken van zijn maximum weer afneemt. Bij een brand met een groot vermogen is dit effect kleiner, doordat de maximale ventilatiesnelheid dan ook kleiner is.



Figuur 7-20: *Temperatuurverloop voor een langzaam ontwikkelende brand.*

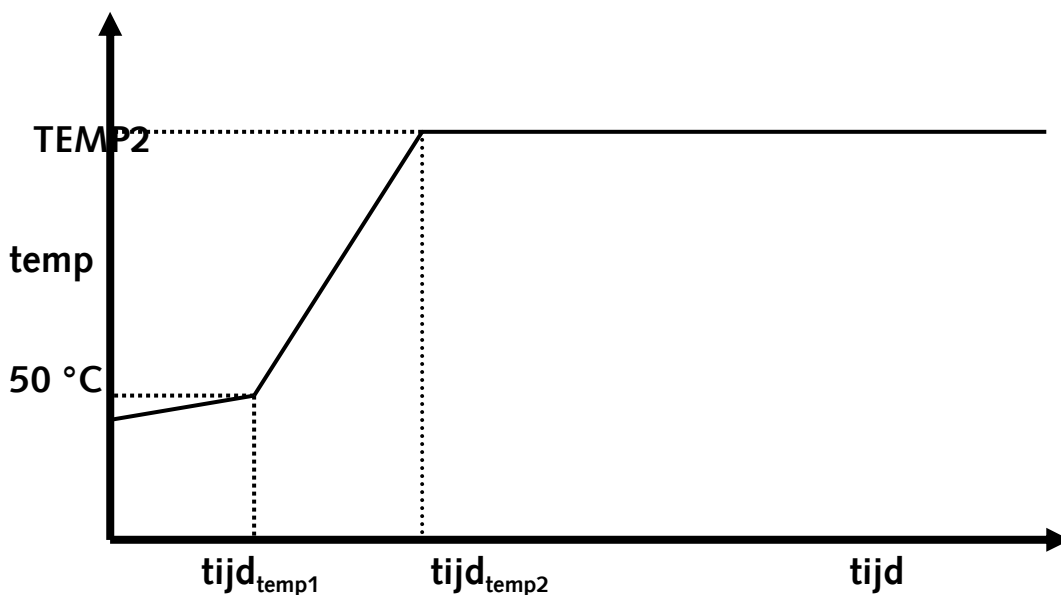
Ook in deze situatie volgt het temperatuurverloop de ontwikkeling van het brandvermogen redelijk, met een grotere vertraging bij grotere afstand tot de brand.



Figuur 7-21: Temperatuurverloop voor een plasbrand.

7.5.3 Modelling van het temperatuurverloop

Het temperatuurverloop wordt als volgt gemodelleerd:



Figuur 7-22: Gemodelleerd temperatuurverloop.

In formule:

$$TEMP(x, t, B_{buis}) = \begin{cases} < 50 \text{ }^\circ\text{C} & \text{als } t \leq tijd_{temp1}(x); \\ C_{heltemp}(B_{buis}) \cdot (t - tijd_{temp1}(x)) + 50 \text{ }^\circ\text{C} & \text{als } tijd_{temp1}(x) < t < tijd_{temp2}(x); \\ TEMP2(x, B_{buis}) & \text{als } t \geq tijd_{temp2}(x). \end{cases}$$

Hierbij zijn de tijdstippen $tijd_{temp1}$ en $tijd_{temp2}$ en de temperatuur $TEMP2$ afhankelijk van de afstand tot de brand. Voor de afhankelijkheid van $tijd_{temp1}$ en $TEMP2$ van de afstand tot de brand worden lineaire benaderingen gebruikt:

$$tijd_{temp1}(x) = para_{tijd1} \cdot x + parb_{tijd1}$$

$$TEMP2(x) = para_{temp2} \cdot x + parb_{temp2}$$

Het tijdstip $tijd_{temp2}$ wordt, met behulp van $tijd_{temp1}$ en de helling $C_{heltemp}$, als volgt bepaald:

$$tijd_{temp2}(x) = \frac{TEMP2(x) - 50}{C_{heltemp}(x)} + tijd_{temp1}(x)$$

Hierin zijn temperaturen uitgedrukt in $^\circ\text{C}$. $C_{heltemp}$ blijkt vrijwel niet afhankelijk te zijn van de afstand tot de brand; de waarde van $C_{heltemp}$ op 25 m benedenstreams wordt (conservatief) als maatgevende waarde aangehouden.

In Figuur 7-18 is te zien dat het temperatuurverloop een piek heeft en daarna een lagere, min of meer constante, waarde aanneemt. Door TNO wordt voorgesteld om voor $TEMP2$ het gemiddelde van de piektemperatuur en de uiteindelijke constante temperatuur te nemen. Ter vereenvoudiging wordt door RWS in dit achtergronddocument de piektemperatuur genomen. De waarden in bijlage B zijn derhalve gebaseerd op de piektemperatuur, de rekenvoorbeelden van TNO in dit document op het gemiddelde tussen de piektemperatuur en de constante temperatuur. Hierbij zijn ook de uitkomsten met de RWS-parameters gegeven.

Bij het bepalen van bovenstaande parameters is onderscheid gemaakt naar het brandscenario, wel of geen ventilatie en de plaats ten opzichte van de brand (bovenstreams of benedenstreams). Uit de CFD-berekeningen blijkt dat de tijdstippen waarop de temperatuur $50 \text{ }^\circ\text{C}$ wordt nagenoeg niet verschillen tussen tunnels van 400 m en 2000 m. Daarom is het niet nodig om extra berekeningen te doen voor tunnels van 2000 m en worden alleen de resultaten voor tunnels van 400 m gebruikt.

Uit de gevoeligheidsanalyse van de CFD-berekeningen (zie bijlage B) blijkt dat $TEMP2$ en $C_{heltemp}$ afhankelijk zijn van de breedte van de tunnel maar dat $tijd_{temp1}$ nauwelijks wordt beïnvloed door de breedte van de tunnel. Voor $C_{heltemp}$ is afgeleid dat deze als volgt van de breedte afhangt:

$$C_{heltemp}(x) = C_{heltemp}13,5(x) + parbreedtebrandi \cdot (13,5 - B_{buis})$$

waarbij $parbreedtebrandi$ een constante is die per brandscenario verschilt. De waarden voor $parbreedtebrandi$ zijn gegeven in bijlage B.

Aangenomen wordt dat $TEMP2$ op dezelfde manier is te benaderen:

$$TEMP2(x) = para_{temp2} \cdot x + parb_{temp2} + parbreedtebrandi \cdot (13,5 - B_{buis})$$

Uit de gevoeligheidsanalyse van de CFD-berekeningen blijkt tot slot een verschil in temperatuur tussen tunnels met en zonder hittewerende bekleding. In de onderzochte situaties blijken in tunnels zonder hittewerende bekleding de temperaturen tot 25 % lager zijn dan in tunnel met hittewerende bekleding.

Er wordt echter verder conservatief gerekend met de resultaten voor tunnels met hittewerende bekleding, ongeacht de aanwezigheid hittewerende bekleding.
Dit levert de volgende vergelijkingen:

$$\begin{aligned} \text{tijd}_{temp1}L5(x) &= \text{para}_{tijd1}L5 \cdot x + \text{parb}_{tijd1}L5 \\ \text{tijd}_{temp1}L2(x) &= \text{para}_{tijd1}L2 \cdot x + \text{parb}_{tijd1}L2 \end{aligned} \quad (7-10)$$

$$\begin{aligned} TEMP2L5(x) &= \text{para}_{temp2}L5 \cdot x + \text{parb}_{temp2}L5 + \text{parbreedtebrandi} \cdot (13,5 - B_{buis}) \\ TEMP2L2(x) &= \text{para}_{temp2}L2 \cdot x + \text{parb}_{temp2}L2 + \text{parbreedtebrandi} \cdot (13,5 - B_{buis}) \end{aligned} \quad (7-11)$$

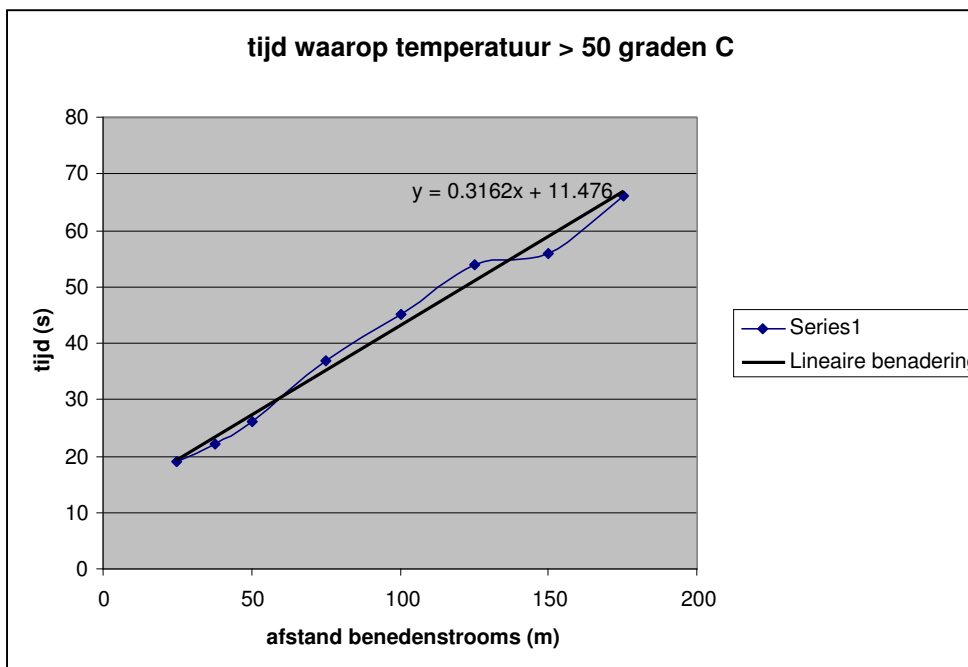
$$\begin{aligned} C_{heltemp}L5 &= C_{heltemp}13,5L5 + \text{parbreedtebrandi} \cdot (13,5 - B_{buis}) \\ C_{heltemp}L2 &= C_{heltemp}13,5L2 + \text{parbreedtebrandi} \cdot (13,5 - B_{buis}) \end{aligned} \quad (7-12)$$

$$\begin{aligned} \text{tijd}_{temp2}L5(x) &= \text{tijd}_{temp1}L5(x) + \frac{TEMP2L5(x) - 50}{C_{heltemp}L5} \\ \text{tijd}_{temp2}L2(x) &= \text{tijd}_{temp1}L2(x) + \frac{TEMP2L2(x) - 50}{C_{heltemp}L2} \end{aligned} \quad (7-13)$$

Voorbeeld

In de voorbeeldsituatie, een snel ontwikkelende brand van 200 MW in een tunnel van 400 m, met ventilatie wordt bovenstaande modellering van het temperatuurverloop als volgt uitgevoerd.

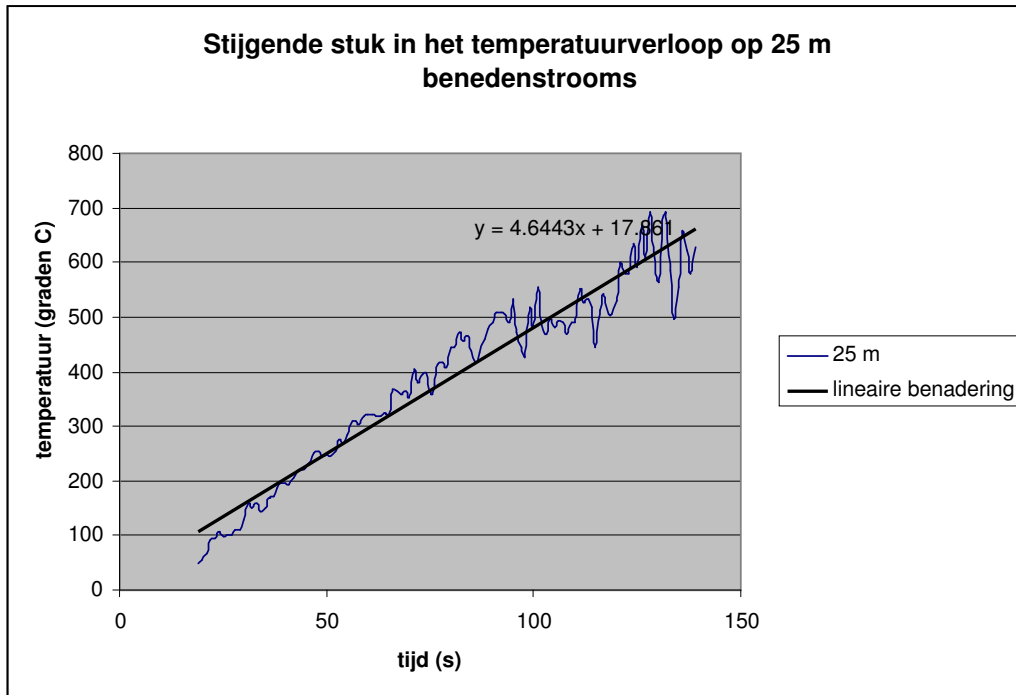
Uit de CFD-berekeningen blijkt voor het tijdstip waarop de temperatuur groter wordt dan 50 °C (tijd_{temp1}) als functie van de afstand tot de brand:



Figuur 7-23: Tijdstip waarop de temperatuur 50 °C wordt.

De lineaire benadering is gegeven door: $\text{tijd}_{temp1}(x) = \text{para}_{tijd1} \cdot x + \text{parb}_{tijd1}$ met $\text{para}_{tijd1} = 0,0053 \text{ min/m}$ ($0,3162/60$) en $\text{parb}_{tijd1} = 0,19 \text{ min}$ ($11,476/60$).

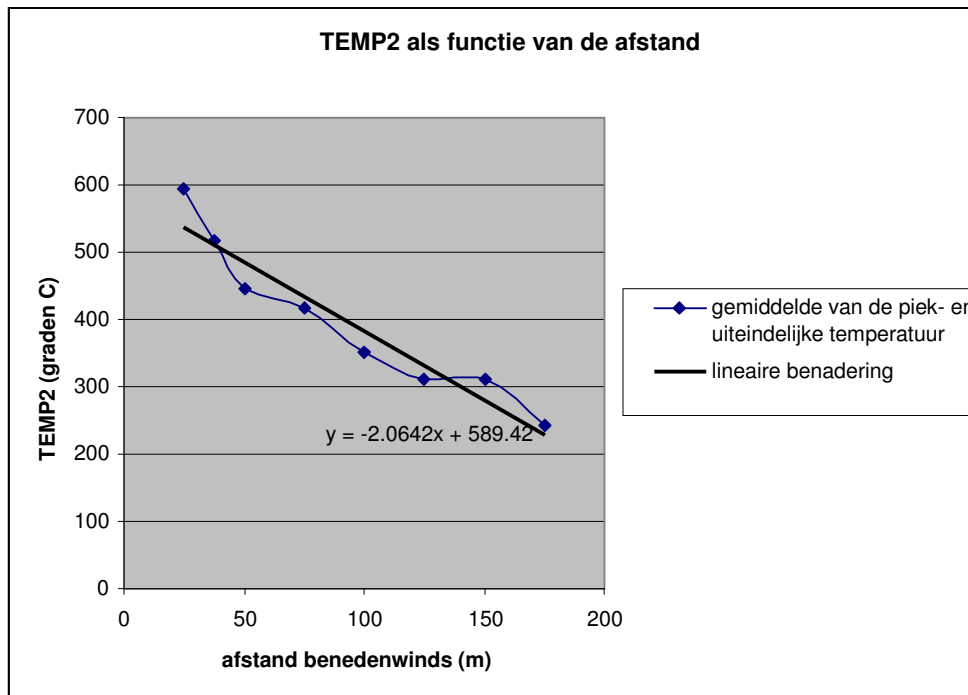
Om de helling C te bepalen, bekijken we het stijgende gedeelte van de grafiek in Figuur 7-19 voor een afstand van 25 m:



Figuur 7-24: *Temperatuurstijging op 25 m benedenstrooms.*

De helling van de lineaire benadering in deze figuur is $C_{heltemp}(13,5) = 279^\circ\text{C}/\text{min}$ ($60 \times 4,6443^\circ\text{C}$).

Voor de constante temperatuur $TEMP2(x)$ als functie van de afstand tot de brand geldt:



Figuur 7-25: *Lineaire benadering van $TEMP2(x)$, voor $B_{buis}=13,5$.*

Voor de lineaire benadering geldt dan: $TEMP2(x) = para_{temp2} \cdot x + parab_{temp2}$ met $para_{temp2} = -2,0642 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$, en $parab_{temp2} = 589,42 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Voor $tijd_{temp2}$ geldt dan: $tijd_{temp2} = \frac{TEMP2 - 50}{C_{heltemp}} + tijd_{temp1} = 115 \text{ s}$.

Samengevat, zijn voor een snelle 200MW-brand de volgende parameters vastgesteld om het temperatuurverloop te modelleren:

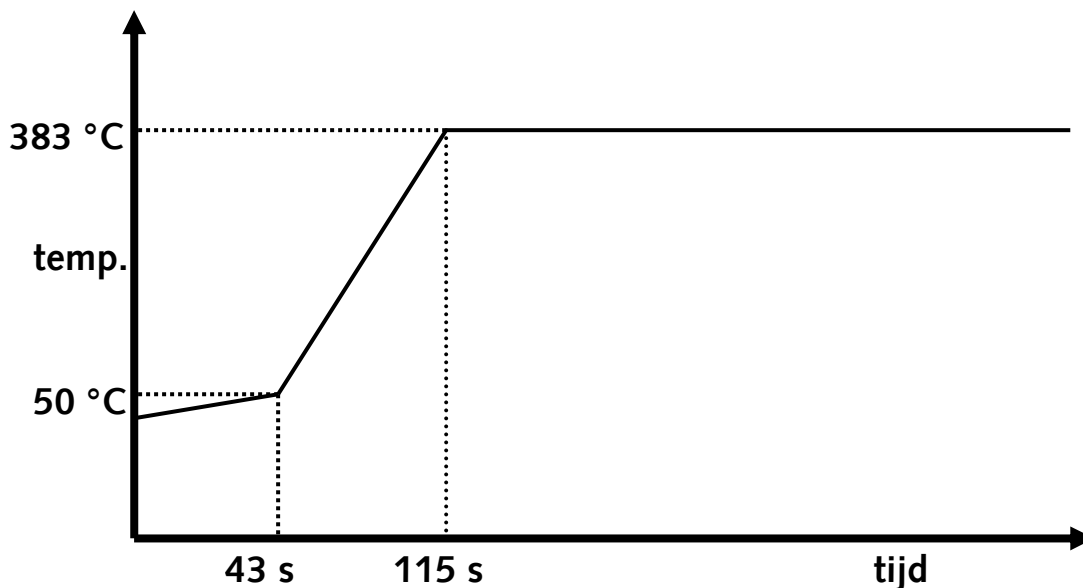
	$para_{tijd1}$	$parab_{tijd1}$	$para_{temp2}$	$parab_{temp2}$	$C_{heltemp}(13,5)$
200 MW, snel (TNO)	0,0053	0,19	-2,0642	589,42	279
200 MW, snel (RWS)	0,0053	0,19	-2,41	639	291

Op een afstand van 100 m van de brand benedenstrooms hebben de parameters de volgende waarden:

Tabel 7-12: Parameters in temperatuurverloop op 100 m benedenstrooms.

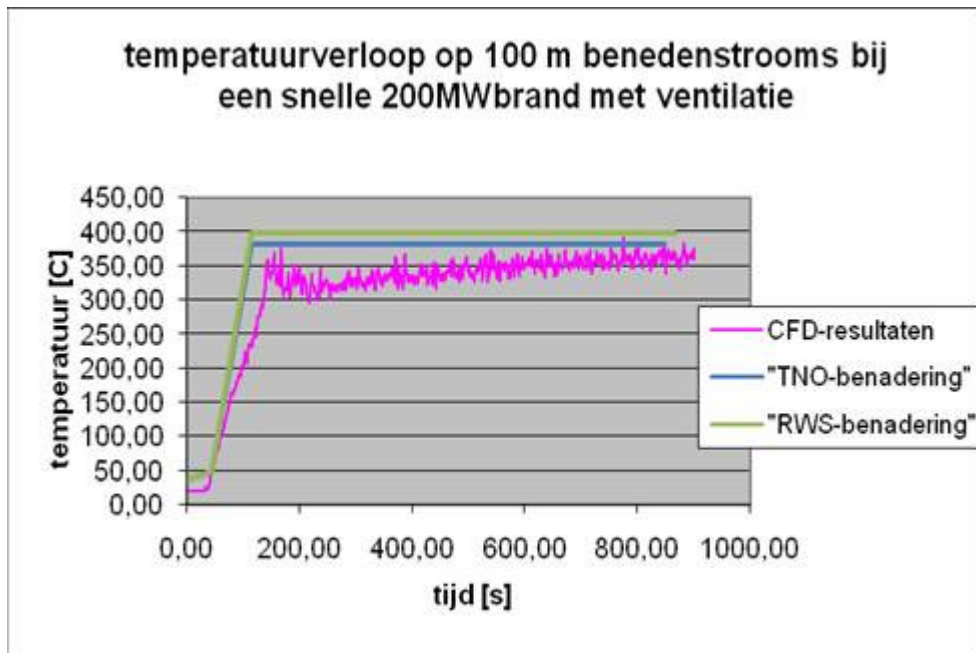
parameter	waarde op 100 m benedenstrooms	
	TNO	RWS
$tijd_{temp1}$	0,72 (43 s)	0,72 (43 s)
TEMP2	383 °C	398 °C
$C_{heltemp}$	279 °C/min	291 °C/min
$tijd_{temp2}$	1,91 (115 s)	1,91 (115 s)

En het benaderde temperatuurverloop wordt:



Figuur 7-26: Gemodelleerd temperatuurverloop op 100 m benedenstrooms.

Het verloop op die plaats is volgens de CFD-berekeningen, de TNO- en de RWS-benadering is:



Figuur 7-27: Temperatuurverloop op 100 m benedenstrooms uit CFD, TNO en RWS-benadering.

Het model overschat de uiteindelijke temperatuur iets. Dat is ook te zien in Figuur 7-25.

7.5.4 De temperaturosis

De schatting van de maximaal mogelijke vluchttijd tot overlijden door hoge temperaturen is gebaseerd op het begrip *temperaturosis*. Dit is afkomstig uit [25], bladzijde 116. Zie ook [33], bladzijde 247. Als de temperatuur van de lucht waarin een persoon zich op elk tijdstip t bevindt gegeven is als een functie $T(t)$ van de tijd, dan is de temperaturosis die de persoon ontvangen heeft op een tijdstip t_{eind} gedefinieerd als:

$$D(t_{\text{eind}}) = \int_{\text{tijd}_{\text{temp1}}}^{t_{\text{eind}}} \alpha \cdot e^{\beta \cdot T(t)} dt$$

waarin $\text{tijd}_{\text{temp1}}$ het tijdstip is waarop de temperatuur hoger wordt dan 50 °C, α een dimensieloze constante is met de waarde $\alpha = e^{-5,1849} = 0,005600$ en β een constante is met de waarde $\beta = 0,0273$. Deze waarde geldt als de temperatuur gegeven is in °C.

Als de temperatuur op het tijdstip t_{eind} niet boven de 50 °C is geweest, dan is de dosis nul.

Het schadelijke effect van temperatuur op personen is te modelleren door de aanname dat een persoon overlijdt als hij of zij een temperaturosis te verwerken heeft gekregen van minstens 1, waarbij alle tijdsduren zijn uitgedrukt in minuten. Verder bezwijken personen direct bij een temperatuur van minstens 300 °C. In QRA-tunnels wordt echter gerekend met de waarde *maxdosistemp* in plaats van 1, voor de defaultwaarde hiervan zie Tabel 3-17.

7.5.5 De maximaal mogelijke vluchttijd

Bij het bepalen van de maximaal mogelijke vluchttijd $t_{\text{temp,dood}}$ tot overlijden door temperatuur moeten twee gevallen onderscheiden worden: is het constante stuk in het temperatuurverloop van belang of niet. Als de dosis op het tijdstip $\text{tijd}_{\text{temp2}}$ (waarop het constante stuk begint) minstens *maxdosistemp* is, dan is het constante stuk niet van belang. De vluchtende personen zijn dan al bezweken voordat de temperatuur constant werd. Om dit criterium, $D(\text{tijd}_{\text{temp2}}) \geq \text{maxdosistemp}$, expliciet te maken kan het temperatuurverloop uit Paragraaf 7.5.3 worden ingevuld in de definitie van de temperaturosis:

$$D(tijd_{temp2}) = \int_{tijd_{temp1}}^{tijd_{temp2}} \alpha \cdot e^{\beta \cdot (C_{heltemp} \cdot (t - tijd_{temp1}) + 50)} dt$$

$$= \frac{0,803}{C_{heltemp}} \left(e^{0,0273 \cdot C_{heltemp} \cdot (tijd_{temp2} - tijd_{temp1})} - 1 \right)$$

met $C_{heltemp}$ in °C/min en $tijd_{temp1}$ en $tijd_{temp2}$ in minuten.

Als het constante stuk *niet* van belang is (dus als $D(tijd_{temp2}) \geq maxdosistemp$), dan is $t_{temp,dood} \leq tijd_{temp2}$ zodat

$$D(t_{temp,dood}) = \frac{0,803}{C_{heltemp}} \left(e^{0,0273 \cdot C_{heltemp} \cdot (t_{temp,dood} - tijd_{temp1})} - 1 \right).$$

Deze uitdrukking gelijk stellen aan $maxdosistemp$, en de resulterende vergelijking voor $t_{temp,dood}$ oplossen, geeft:

$$t_{temp,dood} = tijd_{temp1} + \frac{36,6}{C_{heltemp}} \ln(1,24 \cdot C_{heltemp} \cdot maxdosistemp + 1) \quad (7-14)$$

waarbij de parameter $C_{heltemp}$ wordt uitgedrukt in °C/min, en $t_{temp,dood}$ en $tijd_{temp1}$ in minuten.

Als het constante stuk *wel* van belang is (dus als $D(tijd_{temp2}) < maxdosistemp$), dan is $t_{temp,dood} > tijd_{temp2}$ zodat

$$D(t_{temp,dood}) = D(tijd_{temp2}) + \alpha \cdot e^{\beta \cdot TEMP2} \cdot (t_{temp,dood} - tijd_{temp2}).$$

Door hierin de expliciete uitdrukking voor $D(tijd_{temp2})$ in te vullen en de relatie $TEMP2 = 50 \text{ °C} + C_{heltemp} \cdot (tijd_{temp2} - tijd_{temp1})$ te gebruiken, ontstaat een vergelijking waaruit $t_{temp,dood}$ op te lossen is voor $D(t_{temp,dood}) = maxdosistemp$. Het resultaat is:

$$t_{temp,dood} = tijd_{temp2} + 45,6 \cdot \left(e^{-0,0273 \cdot C_{heltemp} \cdot (tijd_{temp2} - tijd_{temp1})} \left(maxdosistemp + \frac{0,803}{C_{heltemp}} \right) - \frac{0,803}{C_{heltemp}} \right) \quad (7-15)$$

Hier zijn $t_{temp,dood}$, $tijd_{temp1}$ en $tijd_{temp2}$ uitgedrukt in minuten en $C_{heltemp}$ in °C/min.

Als de temperatuur op een zeker tijdstip $t_{300 \text{ °C}}$ boven de 300 °C komt, dan bezwijken personen direct. Dit betekent dat de maximale vluchttijd hoogstens gelijk kan zijn aan $t_{300 \text{ °C}}$. Als $t_{temp,dood}$ groter is dan deze tijd, dan moet dus $t_{300 \text{ °C}}$ als maximale vluchttijd genomen worden. Expliciet is dit tijdstip gegeven door:

$$t_{300 \text{ °C}} = tijd_{temp1} + \frac{250 \text{ °C}}{C_{heltemp}}$$

Uit een nadere analyse is gebleken dat het tijdstip waarop de temperatuur boven de 300 °C komt niet maatgevend is. Daarom wordt deze controleberekening niet verder toegepast in het model.

Voorbeeld

Met de waarden voor de parameters in het temperatuurverloop in de voorbeeldsituatie, kan de maximaal mogelijke vluchttijd tot overlijden door temperatuur berekend worden.

In die situatie hebben de variabelen de waarden van Tabel 7-12:

Daarom is $D(tijd_{temp2}) = 24,6$ en overlijden door temperatuur gebeurt dus al voor het tijdstip $tijd_{temp2}$. (Nog los van het feit dat de temperatuur op $tijd_{temp2}$ boven de 300 °C ligt). De maximaal mogelijke vluchttijd $t_{temp,dood}$ is daarom:

$$t_{temp,dood} = tijd_{temp1} + \frac{36,6}{C_{heltemp}} \ln(1,24 \cdot C_{heltemp} + 1) = 1,49 \text{ minuut}$$

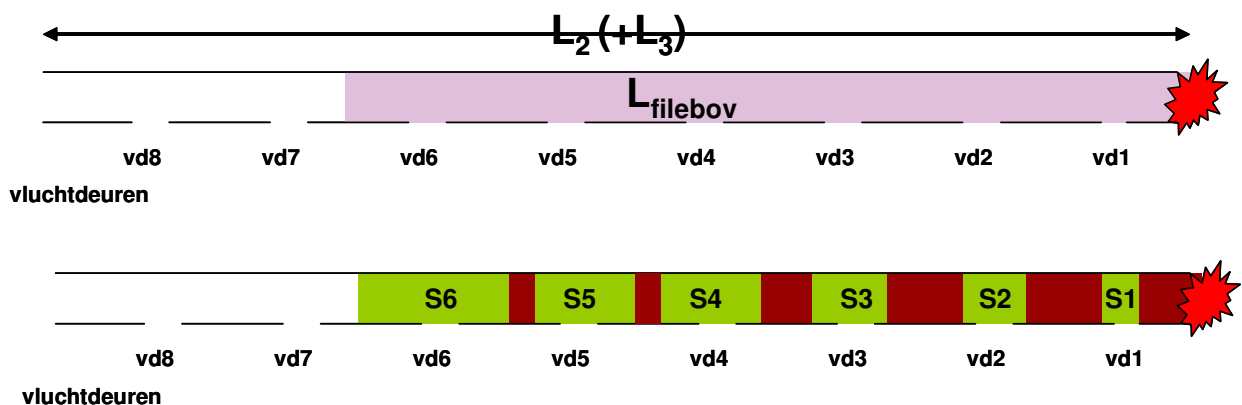
Het tijdstip waarop de temperatuur hoger wordt dan 300 °C is $0,72 + 250/279 = 1,62$.
Met de RWS-parameters wordt $t_{temp,dood} = 1,46$ minuut.

7.6 Het aantal slachtoffers door rookgassen en temperatuur

In de voorgaande twee paragrafen zijn methodes gegeven om te bepalen hoe lang aanwezig in de tunnel kunnen vluchten voordat ze bezwijken door inademen van rookgassen, of overlijden door hoge temperaturen. In deze paragraaf wordt aangegeven hoe met deze gegevens bepaald kan worden hoeveel slachtoffers er vallen in de gebieden in de tunnel boven- en benedenstrooms van de brand (gebied 2 respectievelijk gebied 5).

Bij voldoende en tijdige ventilatie komen bovenstrooms van de brand zelfs bij de grootste brand (de plasbrand van 1200 m²) geen gevaarlijke temperaturen of rookgasconcentraties voor. Daarom is het aantal slachtoffers ten gevolge van rookgasvergiftiging of hoge temperaturen bovenstrooms van de brand bij ventilatie 0. Wel kunnen er nog slachtoffers vallen door warmtestraling, doordat personen zich in de plas bevinden of direct bij het ongeval betrokken zijn.

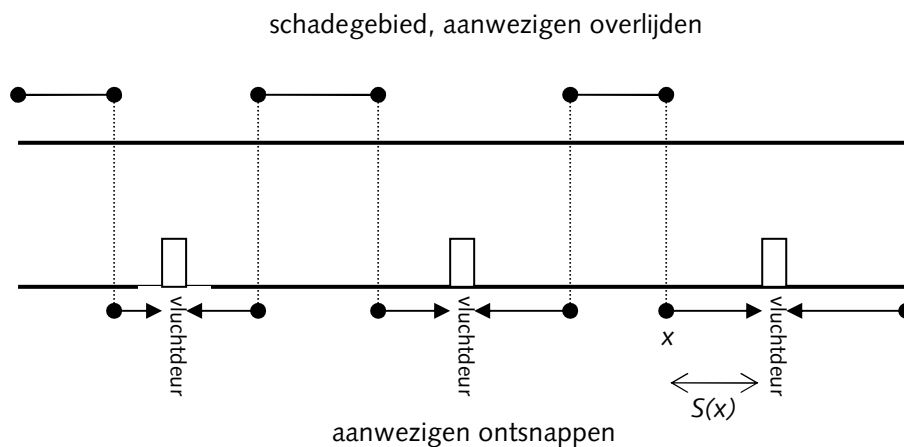
De schademodelen voor rookgassen en temperatuur maken geen gebruik van kansen op overlijden, maar geven een deterministische grens ($FID = 1$ of temperaturosis = 1) aan voor wel of niet overlijden. Hierbij wordt gekeken wat de benodigde vluchttijd om de dichtstbijzijnde veilige plek te bereiken (de dichtstbijzijnde vluchtdoor of het uiteinde van de tunnel. Personen in de gebieden dicht genoeg bij de vluchtdoor zijn gered, de anderen komen te overlijden. In de volgende figuur wordt dit geïllustreerd. Personen in een gebiedje S_i kunnen tijdig vluchten, de personen in de rood gekleurde gebieden niet. Bij brand (zonder explosie) wordt bij de berekening alleen het gebied beschouwd waarin zich ook daadwerkelijk personen bevinden ($L_{filebov}$ en $L_{fileben}$).



Figuur 7-28: Schematische weergave schadegebieden bij brand.

Het gebied waarbinnen de aanwezigen overlijden, dat bestaat uit alle rode gebieden bij elkaar, worden het schadegebied genoemd. In deze paragraaf bepalen we de lengte van dat schadegebied, $L_{i,dood}$. (Hierbij is $i = 2$ voor het gebied bovenstrooms van de brand, en $i = 5$ benedenstrooms van de brand).

Om de lengte van het schadegebied te bepalen, moet worden berekend hoe ver een persoon kan vluchten voordat hij of zij bezwijkt aan rookgassen of hoge temperaturen. Deze maximaal mogelijke vluchtafstand wordt aangeduid met $S(x)$. Hieronder is dat schematisch aangegeven.



Figuur 7-29: *Bepalen van het schadegebied.*

7.6.1 De maximaal mogelijke vluchtafstand

De maximaal mogelijke vluchtafstand $S(x)$ hangt af van:

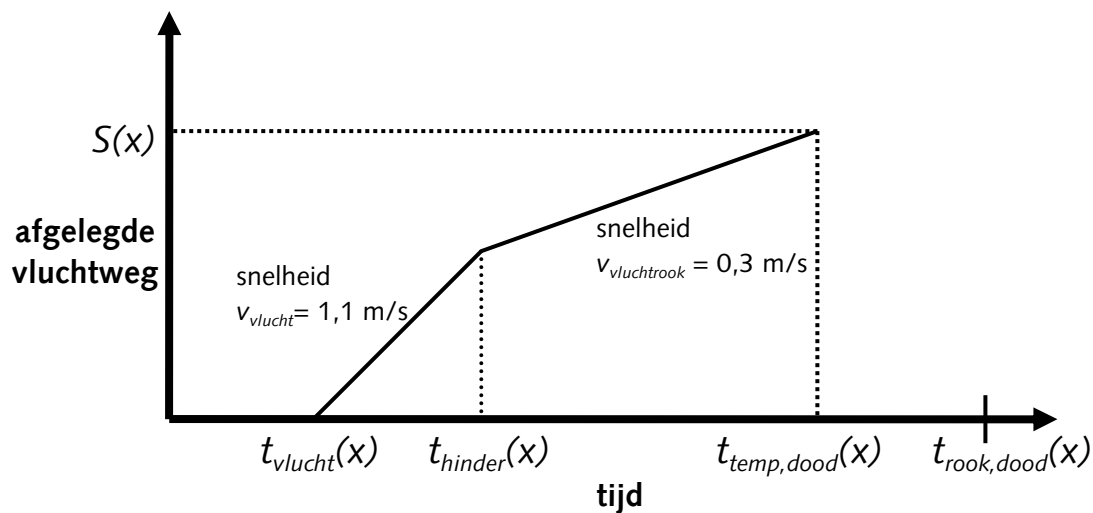
- het tijdstip $t_{vlucht}(x)$ waarop een persoon op plaats x begint met vluchten;
- het tijdstip $t_{hinder}(x)$ waarop de vluchtsnelheid van een persoon op plaats x verlaagd wordt van V_{vlucht} naar $V_{vluchtrook}$;
- het tijdstip $t_{dood}(x)$ waarop een persoon op plaats x bezwijkt aan rookgassen of hoge temperaturen.

Voor het tijdstip $t_{vlucht}(x)$ zie paragraaf 6.4.4; voor het tijdstip $t_{hinder}(x)$ zie Paragraaf 7.4.2. Het tijdstip $t_{dood}(x)$ is het minimum van de tijdstippen $t_{rook,dood}(x)$ en $t_{temp,dood}(x)$ waarop een persoon op plaats x bezwijkt aan rookgassen, respectievelijk overlijdt door hoge temperaturen. Deze tijdstippen worden bepaald in de paragrafen 7.4.6 en 7.5.5.

Bij het bepalen van $S(x)$ wordt geen rekening gehouden met het feit dat een vluchtende persoon zich niet voortdurend op plaats x bevindt, maar in beweging is. De tijdstippen $t_{vlucht}(x)$, $t_{hinder}(x)$ en $t_{dood}(x)$ worden alle drie bepaald op het punt x waar de vlucht begint. Dit is in het algemeen conservatief voor personen die van de brand weg vluchten, en optimistisch voor personen die naar de brand toe vluchten. Omdat de personen die het dichtst bij de brand beginnen van de brand weg vluchten, en die personen ook de grootste kans hebben om slachtoffer te worden, zal deze benadering geen onderschatting van het aantal slachtoffers geven.

Om het aantal slachtoffers te berekenen, of eigenlijk de lengte van het gebied waarin de aanwezigen overlijden, wordt de tunnel verdeeld in een aantal stukken. Per stuk wordt vervolgens bepaald waar in dat stuk de aanwezigen op tijd kunnen ontsnappen, en waar de aanwezigen overlijden. In tunnels met vluchtdeuren wordt steeds een gebied tussen twee vluchtdeuren als een dergelijk stuk genomen. Tunnels zonder vluchtdeuren worden verdeeld in stukken van hoogstens 50 m. In tunnels met vluchtdeuren wordt het gebied tussen de brand en de dichtstbijzijnde vluchtdeur verdeeld in stukken van hoogstens 50 m; dit gebeurt op dezelfde manier als het opdelen van tunnels zonder vluchtdeuren.

In de figuur hieronder is een voorbeeld gegeven van het verloop van de vlucht van een persoon die begint op plaats x .



Figuur 7-30: Verloop van de vlucht in de tijd.

In dit voorbeeld begint de persoon eerst te vluchten, wordt zijn vluchtsnelheid een tijdje later verlaagd tot 0,3 m/s, en weer later overlijdt deze persoon door hoge temperaturen als hij dan nog geen vluchtdeur bereikt heeft. Bezwijken aan rook gebeurt in dit voorbeeld later dan overlijden door temperatuur. In deze situatie is:

$$S(x) = v_{vlucht} \cdot (t_{hinder(x)} - t_{vlucht(x)}) + v_{vluchtrook} \cdot (t_{dood(x)} - t_{hinder(x)})$$

v_{vlucht} en $v_{vluchtrook}$ zijn gedefinieerd in Tabel 3-17.

In het algemeen hoeft de volgorde van de tijdstippen $t_{hinder(x)}$, $t_{rook,dood(x)}$, $t_{temp,dood(x)}$ en $t_{vlucht(x)}$ niet hetzelfde te zijn als in dit voorbeeld, en daarom wordt de algemene uitdrukking voor $S(x)$ iets ingewikkelder.

Om te beginnen wordt het tijdstip $t_{dood(x)}$ bepaald waarop de persoon op plaats x bezwijkt aan rook of overlijdt door temperatuur, of in geval er ook een brand met explosie is dit T_{expl} waarbij er conservatief vanuit gegaan wordt dat bij een explosie alle aanwezigen in de tunnelbuis komen te overlijden⁹. Dat tijdstip is gegeven door:

$$t_{dood(x)} = \min(t_{rook,dood(x)}; t_{temp,dood(x)}; T_{expl}) \quad (7-16)$$

Vervolgens moet onderscheid gemaakt worden naar de volgorde waarin vluchten, hinder door rook en bezwijken plaatsvinden. Dit leidt tot de volgende gevallen:

⁹ Indien bij een explosiescenario de gehele tunnel, of in ieder geval het vluchtkanaal bezwijkt dan dient er bij de bepaling van de benodigde vluchtweg lengte uit te worden gegaan van een situatie zonder vluchtdeuren, men is dan immers in het vluchtkanaal ook nog niet veilig. Zie voor een nadere toelichting hoofdstuk 8, paragraaf 8.2.

Tabel 7-13: berekenen van $S(x)$

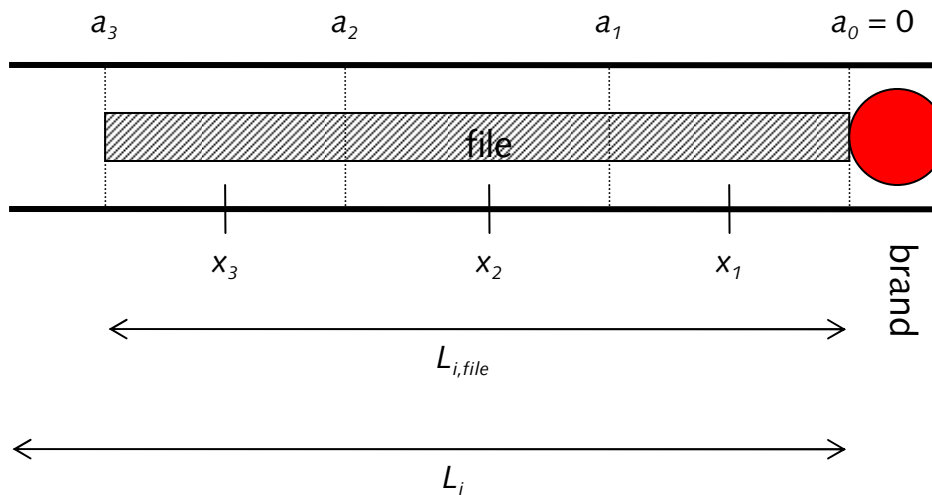
geval	$S(x) =$
$t_{vlucht}(x) \leq t_{hinder}(x) \leq t_{dood}(x)$	$v_{vlucht} \cdot (t_{hinder}(x) - t_{vlucht}(x)) + v_{vluchtrook} \cdot (t_{dood}(x) - t_{hinder}(x))$
$t_{vlucht}(x) \leq t_{dood}(x) \leq t_{hinder}(x)$	$v_{vlucht} \cdot (t_{dood}(x) - t_{vlucht}(x))$
$t_{hinder}(x) \leq t_{vlucht}(x)$ en $t_{hinder}(x) \leq t_{dood}(x)$	$v_{vluchtrook} \cdot (t_{dood}(x) - t_{vlucht}(x))$
$t_{dood}(x) \leq t_{vlucht}(x)$	0

Sommige gevallen, zoals $t_{hinder}(x) \leq t_{vlucht}(x)$ of $t_{dood}(x) \leq t_{vlucht}(x)$ kunnen onwaarschijnlijk lijken. Maar doordat bij het berekenen van $t_{vlucht}(x)$ rekening gehouden wordt met de tijd die het kost op uit de auto te stappen, zijn deze gevallen niet uit te sluiten.

7.6.2 Tunnels zonder vluchtdeuren

Voor gevallen waarin de vluchtdeuren niet (op tijd) ontgrendeld worden is wordt hetzelfde aangehouden als voor tunnels waarin geen vluchtdeuren aanwezig zijn. Dit wordt aangehouden voor de situatie waarbij: $T_{ontgr} > \min(T_{instructie} + T_{uitstap} + t_{wacht}; 60)$, met als vaste waarde voor $t_{wacht} = 2$ minuten.

In tunnels waarin geen vluchtdeuren aanwezig zijn wordt het gebied waarin de file staat verdeeld in stukken van hoogstens 50 m, in onderstaand plaatje tussen a_{j-1} en a_j . In elk stuk wordt de maximale vluchtafstand S berekend middenin dat gebied, op het punt x_j .



Benedenstrooms van de brand gaat het verdelen van de tunnel op dezelfde manier als bovenstrooms. Het enige verschil is dat in het benedenstroomse gebied de file altijd (per definitie) tot het eind van de tunnel staat (of er is geen file en het verkeer is de tunnel uitgereden).

Om te zorgen dat de gebieden niet langer zijn dan 50 m, wordt het aantal stukken (in het plaatje zijn dit er 3) gelijk genomen aan:

$$N_{geendeuren,i} = \left\lceil \frac{L_{i,file}}{50} \right\rceil \quad (7-17)$$

Hierbij staat $\lceil \dots \rceil$ voor afronden naar boven; $L_{i,file}$ is de lengte van de file in het betreffende gebied in meters. Hierbij geldt:

$$\text{Als } L_{filebov} \leq L_3 \quad L_{2,file} = 0 \quad (7-18)$$

Anders:
$$L_{2,file} = \min(L_{filebov} - L_3; L_{bov} - L_3)$$

$$L_{5,file} = \max(L_{fileben} - L_4; 0) \quad (7-19)$$

De lengte van elk stuk is dan gelijk aan $L_{i,file}/N_{geendeuren,i}$. Er van uitgaande dat a_j en x_j de afstanden zijn vanaf de brand of het uitstroomgebied geldt verder voor alle $j = 1, \dots, N_{geendeuren,i1}$:

$$\begin{aligned} a_{geendeuren,i}(j) &= j \cdot \frac{L_{i,file}}{N_{geendeuren,i}} \\ x_{geendeuren,i}(j) &= (j - \frac{1}{2}) \cdot \frac{L_{i,file}}{N_{geendeuren,i}} \end{aligned} \quad (7-20)$$

Lengte schadegebied

Nadat het boven- of benedenstroomse gebied in stukken is verdeeld, kan het aantal slachtoffers bepaald worden. Per stuk wordt bekeken hoe ver de aanwezigen daar kunnen vluchten voordat ze bezwijken. Daarmee kan de lengte van het gebied waarbinnen de aanwezigen overlijden $L_{i,dood}$ berekend worden en met behulp van de personendichtheid het aantal slachtoffers.

In tunnels zonder vluchtdeuren wordt de lengte $L_{i,dood}$ berekend door voor elk stuk j de lengte van het stuk waarbinnen de aanwezigen overlijden $L_{i,dood}^j$ te berekenen en al deze lengtes op te tellen.

Daarbij geldt voor $j = 1, \dots, N$:

- Als $S(x_j) \leq L_i - a_j$ dan overlijdt iedereen in het j^{de} stuk. Dan is $L_{i,dood}^j = a_j - a_{j-1}$.
- Als $S(x_j) \geq L_i - a_{j-1}$ dan ontsnapt iedereen in het j^{de} stuk. Er wordt dan aangenomen dat iedereen in de stukken die nog verder van de brand liggen ook op tijd weet te ontsnappen. Dan is voor alle $j' \geq j$: $L_{i,dood}^{j'} = 0$. De berekening voor alle $j' \geq j$ hoeft dus niet meer te worden uitgevoerd.
- Als $L_i - a_j < S(x_j) < L_i - a_{j-1}$ dan ontsnapt een deel van de aanwezigen in stuk j . Dan is $L_{i,dood}^j = L_i - a_{j-1} - S(x_j)$. Ook in deze situatie wordt aangenomen dat iedereen in de gebieden verder van de brand op tijd kan ontsnappen. Die gebieden bevinden zich immers dicht bij het eind van de tunnel en de temperatuur en CO- concentratie zijn er lager. Dus ook nu is voor alle $j' > j$: $L_{i,dood}^{j'} = 0$ en hoeft de berekening voor alle $j' > j$ niet meer te worden uitgevoerd.

Hierbij geldt dat $N = N_{geendeuren,i}$ en $a_j = a_{geendeuren,i}(j)$.

Tenslotte is:

$$L_{i,dood} = \sum_{j=1}^{N_{geendeuren,i}} L_{i,dood}^j \quad (7-21)$$

Aantal slachtoffers

De lengte van het schadegebied in gebied i ($i = 2$ of 5) is $L_{i,dood}$ en in dit schadegebied komt iedereen te overlijden. Als $L_{i,dood}$ dus vermenigvuldigd wordt met het aantal aanwezige personen per meter (dat gelijk is aan D_{file}), dan is het resultaat het aantal slachtoffers. In formule 6.3 zou dan de term $L_2 \cdot p_2 \cdot D_2$ en $L_5 \cdot p_5 \cdot D_5$ vervangen moeten worden voor: $L_{2,dood} \cdot D_{file}$ respectievelijk $L_{5,dood} \cdot D_{file}$.

Het heeft echter de voorkeur om aan te sluiten bij formule 6.3 omdat deze ook bij de scenario's met gevaarlijke stoffen (hoofdstuk 8) wordt gebruikt. Om die reden wordt p_i als volgt afgeleid:

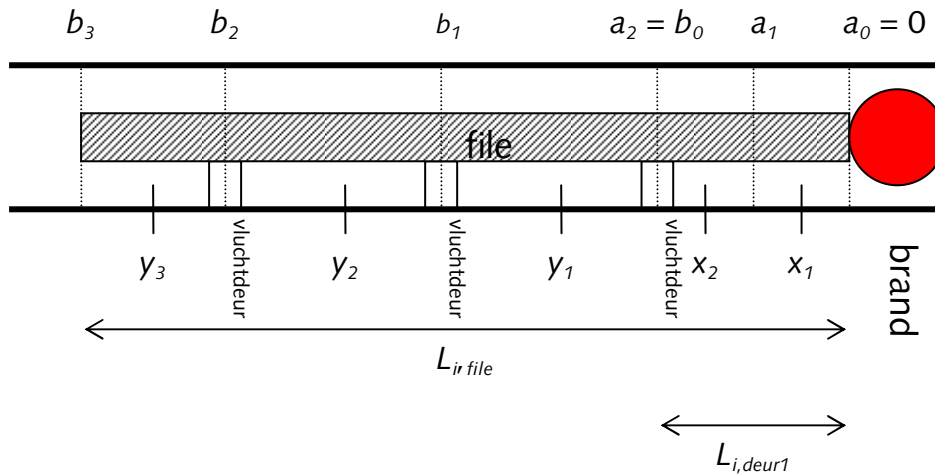
$$p_i = \frac{L_{i,dood} \cdot D_{file}}{L_i \cdot D_i} = \frac{L_{i,dood} \cdot D_{file}}{L_i \cdot (L_{i,file}/L_i) \cdot D_{file}} = \frac{L_{i,dood}}{L_{i,file}}$$

7.6.3 Tunnels met vluchtdeuren

In tunnels met vluchtdeuren wordt onderscheid gemaakt tussen het gebied van de brand tot de dichtstbijzijnde vluchtdeur en het gebied van de dichtstbijzijnde vluchtdeur tot het eind van de file. Dit om ervoor te zorgen dat de stukken waarin de tunnel wordt verdeeld vlak bij de brand klein genoeg zijn (hoogstens 50 m lang).

Verdelen van de tunnel in stukken

Als er wel vluchtdeuren aanwezig zijn, wordt het tunnelgedeelte als volgt in stukken verdeeld:



Voor het gebied benedenstrooms van de brand kan een analoog plaatje getekend worden, met het verschil dat de file dan (per definitie) altijd tot het eind van de tunnel staat.

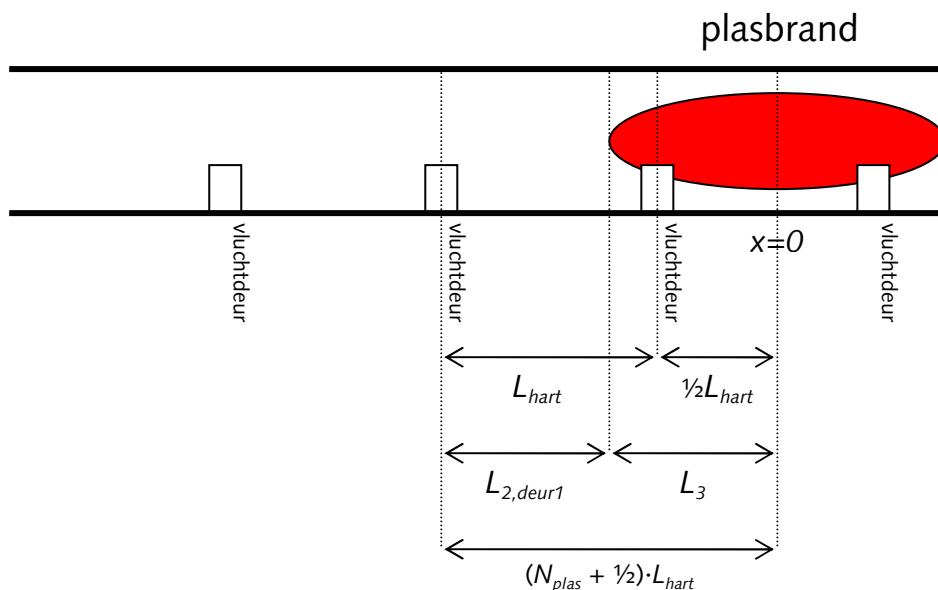
Het gebied tot de eerste vluchtdeur wordt op dezelfde manier in stukken verdeeld als voor tunnels zonder vluchtdeuren. Verderop is een stuk steeds een gebied tussen twee vluchtdeuren. Het laatste gebied loopt van een vluchtdeur tot het eind van de file (in de tekening van b_2 tot b_3). In het benedenstroomse gebied valt het eind van de file samen met het eind van de tunnel.

Om te beginnen wordt de afstand $L_{i, deur1}$ tussen de brand en de dichtstbijzijnde vluchtdeur bepaald. Voor voertuigbranden wordt aangehouden: als de brand geen vluchtdeur blokkeert dan is $L_{i, deur1} = L_{hart}/2$ en als de brand wel een vluchtdeur blokkeert dan is $L_{i, deur1} = L_{hart}$. Voor plasbranden ligt dit iets subtieler omdat er dan een uitstroombereik is (van lengte L_3 of L_4) waar rekening mee gehouden moet worden. Er moet dan onderscheid worden gemaakt worden tussen de situatie met het midden van de plas tussen twee vluchtdeuren in en de situatie met het midden van de plas naast een vluchtdeur.

In de situatie met het midden van de plas tussen twee vluchtdeuren in is het aantal vluchtdeuren in het bovenstroomse deel van de plas gelijk aan:

$$\begin{aligned}
 &\text{Als } G_{\text{blokkade}} = \text{Geen blokkade en } L_3 \leq 0,5L_{\text{hart}} & N_{\text{plas}L2} = 0 \\
 &\text{Als } G_{\text{blokkade}} = \text{Geen blokkade en } L_3 > 0,5L_{\text{hart}} & N_{\text{plas}L2} = \left\lceil \frac{L_3 - \frac{1}{2} \cdot L_{\text{hart}}}{L_{\text{hart}}} \right\rceil
 \end{aligned}
 \tag{7-22}$$

Hierbij staat $\lceil \dots \rceil$ voor afronden naar boven. Zie Figuur 7-31.



Figuur 7-31: De afstand tot de eerste vluchtdeur.

De afstand van de rand van de plas tot de dichtstbijzijnde vluchtdeur is dan:

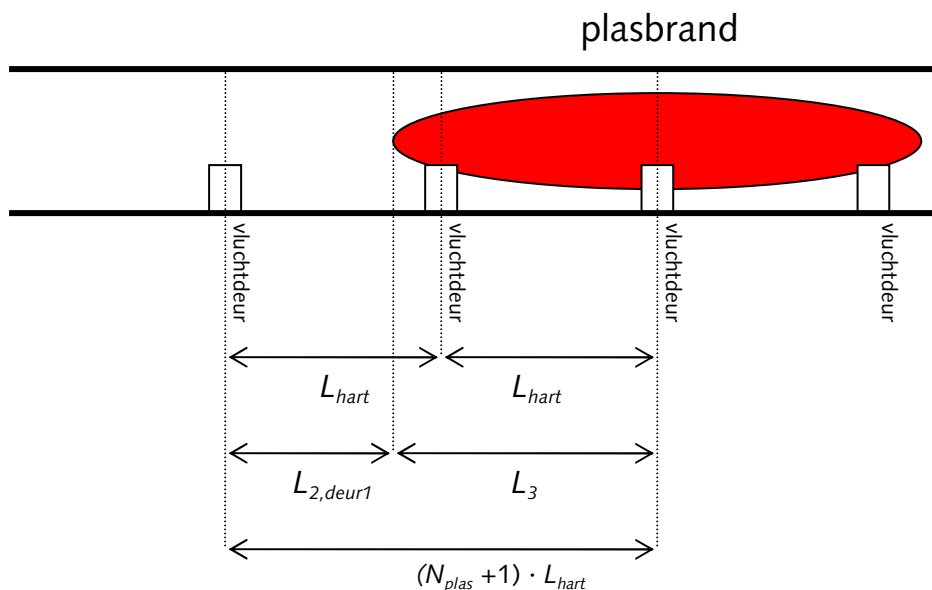
$$\text{Als } G_{\text{blokkade}} = \text{Geen blokkade} \quad L_{2, \text{deur1}} = \left(N_{\text{plas}L2} + \frac{1}{2}\right) \cdot L_{\text{hart}} - L_3 \quad (7-23)$$

Voor het gebied benedenstrooms van de brand kan $L_{5, \text{deur1}}$ op dezelfde manier berekend worden waarbij L_3 vervangen moet worden door L_4 .

In de situatie met het midden van de plas naast een vluchtdeur is het aantal vluchtdoeren in het bovenstroomse deel van de plas (exclusief de deur middenin de plas) gelijk aan:

$$\begin{aligned} \text{Als } G_{\text{blokkade}} = \text{Wel blokkade en } L_3 \leq L_{\text{hart}} \quad N_{\text{plas}L2} &= 0 \\ \text{Als } G_{\text{blokkade}} = \text{Wel blokkade en } L_3 > L_{\text{hart}} \quad N_{\text{plas}L2} &= \left\lceil \frac{L_3 - L_{\text{hart}}}{L_{\text{hart}}} \right\rceil \end{aligned} \quad (7-24)$$

Zie Figuur 7-32.



Figuur 7-32: De afstand tot de eerste vluchtdeur.

De afstand van de rand van de plas tot de dichtstbijzijnde vluchtdeur is dan:

$$\text{Als } G_{\text{blokkade}} = \text{Wel blokkade} \quad L_{2,\text{deur1}} = (N_{\text{plas}L2} + 1) \cdot L_{\text{hart}} - L_3 \quad (7-25)$$

Voor het gebied benedenstreams van de brand kan $L_{5,\text{deur1}}$ op dezelfde manier berekend worden waarbij L_3 vervangen moet worden door L_4 .

Als de file niet verder komt dan de eerste vluchtdeur ($L_{i,\text{file}} \leq L_{i,\text{deur1}}$) dan hoeft het gebied voorbij de eerste vluchtdeur niet beschouwd te worden en kan $L_{i,\text{dood}}$ op dezelfde manier berekend worden als in de situatie zonder vluchtdeuren zoals beschreven in Paragraaf 7.6.2, waarbij L_j moet worden vervangen door $L_{i,\text{deur1}}$.

Tot eerste deur

Als $L_{i,\text{file}} > L_{i,\text{deur1}}$ dan wordt het gebied tussen de brand en de eerste vluchtdeur op dezelfde manier in stukken verdeeld als bij de tunnel zonder vluchtdeuren zoals beschreven in Paragraaf 7.6.2. Hierbij geldt (voor gebied 2):

$$\begin{aligned} \text{Als } L_{2,\text{file}} > L_{2,\text{deur1}} \quad N_{\text{totdeur1L2}} &= \left\lceil \frac{L_{L2,\text{deur1}}}{50} \right\rceil \\ a_{\text{totdeur1L2}}(j) &= j \cdot \frac{L_{2,\text{deur1}}}{N_{\text{totdeur1L2}}} \\ x_{\text{totdeur1L2}}(j) &= (j - \frac{1}{2}) \cdot \frac{L_{2,\text{deur1}}}{N_{\text{totdeur1L2}}} \end{aligned} \quad (7-26)$$

Net als bij tunnels zonder vluchtdeuren wordt de lengte $L_{i,\text{doodtotdeur1}}$ berekend door voor elk stuk j de lengte van het stuk waarbinnen de aanwezigen overlijden $L_{i,\text{doodtotdeur1}}^j$ te berekenen en al deze lengtes op te tellen. Daarbij geldt voor $j = 1, \dots, N$:

- Als $S(x_j) \leq L_{i,\text{deur1}} - a_j$ dan overlijdt iedereen in het j^{de} stuk. Dan is $L_{i,\text{doodtotdeur1}}^j = a_j - a_{j-1}$.

- Als $S(x_j) \geq L_{i,deur1} - a_{j-1}$ dan ontsnapt iedereen in het j^{de} stuk. Er wordt dan aangenomen dat iedereen in de stukken die nog verder van de brand liggen ook op tijd weet te ontsnappen. Dan is voor alle $j' \geq j$: $L_{i,doodtotdeur1}^{j'} = 0$. De berekening voor alle $j' \geq j$ hoeft dus niet meer te worden uitgevoerd.
- Als $L_{i,deur1} - a_j < S(x_j) < L_{i,deur1} - a_{j-1}$ dan ontsnapt een deel van de aanwezigen in stuk j . Dan is $L_{i,doodtotdeur1}^j = L_{i,deur1} - a_{j-1} - S(x_j)$. Ook in deze situatie wordt aangenomen dat iedereen in de gebieden verder van de brand op tijd kan ontsnappen. Die gebieden bevinden zich immers dichterbij het eind van de tunnel en de temperatuur en CO- concentratie zijn er lager. Dus ook nu is voor alle $j' > j$: $L_{i,doodtotdeur1}^{j'} = 0$ en hoeft de berekening voor alle $j' > j$ niet meer te worden uitgevoerd.

Hierbij geldt dat $N = N_{totdeur1,i}$ en $a_j = a_{totdeur1,i}(j)$.

Tenslotte is:

$$L_{i,doodtotdeur1} = \sum_{j=1}^{N_{totdeur1,i}} L_{i,doodtotdeur1}^j \quad (7-27)$$

Vanaf eerste deur

Het gebied vanaf de eerste vluchtdeur wordt als volgt verder opgedeeld. Het aantal stukken is:

$$N_{weldeuren,i} = \left\lceil \frac{L_{i,file} - L_{i,deur1}}{L_{hart}} \right\rceil \quad (7-28)$$

De lengte van de stukken is L_{hart} behalve van het laatste stuk dat korter kan zijn.

Nu geldt voor b_j en y_j :

$$\begin{aligned} \text{Als } j = N_{weldeuren,i} & \quad b_i(j) = L_{i,file} \\ \text{Anders:} & \quad b_i(j) = (L_{i,deur1} + j \cdot L_{hart}) \\ \text{Als } j = N_{weldeuren,i} & \quad y_i(j) = \left(L_{i,file} - \frac{L_{i,file} - |b_i(N_{weldeuren,i} - 1)|}{2} \right) \\ \text{Anders:} & \quad y_i(j) = \left(L_{i,deur1} + \left(j - \frac{1}{2}\right) \cdot L_{hart} \right) \end{aligned} \quad (7-29)$$

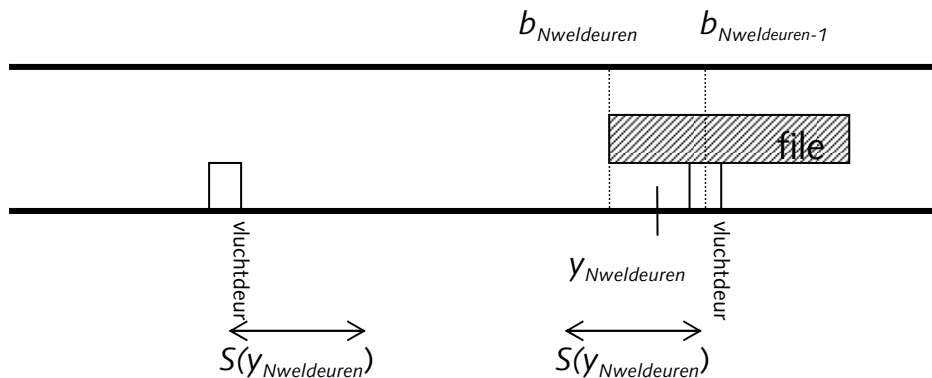
De lengte van de het gebied waarbinnen de aanwezigen overlijden $L_{i,doodvanafdeur1}$ wordt berekend door voor elk stuk j de lengte van het stuk waarbinnen de aanwezigen overlijden $L_{i,doodvanafdeur1}^j$ te berekenen en al deze lengtes op te tellen. Daarbij geldt voor $j = 1, \dots, N_{weldeuren,i}$:

- Als $S(y_j) \geq L_{hart}/2$ dan ontsnapt iedereen in het j^{de} stuk. Er wordt dan aangenomen dat iedereen in de stukken die nog verder van de brand liggen ook op tijd weet te ontsnappen. Dan is voor alle $j' \geq j$: $L_{i,doodvanafdeur1}^{j'} = 0$. De berekening voor alle $j' \geq j$ hoeft dus niet meer te worden uitgevoerd.
- Als $S(y_j) < L_{hart}/2$ dan ontsnapt een deel van de aanwezigen in stuk j . Dan is: $L_{i,doodvanafdeur1}^j = L_{hart} - 2 \cdot S(y_j)$

Het schadegebied in het laatste stuk moet apart worden berekend, omdat dat stuk in het bovenstroomse gebied niet precies tussen twee vluchtdeuren in ligt. In het benedenstroomse gebied kan voor het laatste stuk wel dezelfde rekenmethode gebruikt worden als voor de andere stukken omdat daar de file per aanneme tot aan het eind van de tunnel staat.

Voor het laatste stuk geldt, net als voor de andere stukken, dat $L_{i,doodvanafdeur1}^{N_{weldeuren,i}} = 0$ als $S(y_{N_{weldeuren,i}}) \geq L_{hart}/2$. In andere gevallen moet gekeken worden naar de lengte van het laatste stuk: $b_{N_{weldeuren,i}} - b_{N_{weldeuren,i}-1}$. Als deze

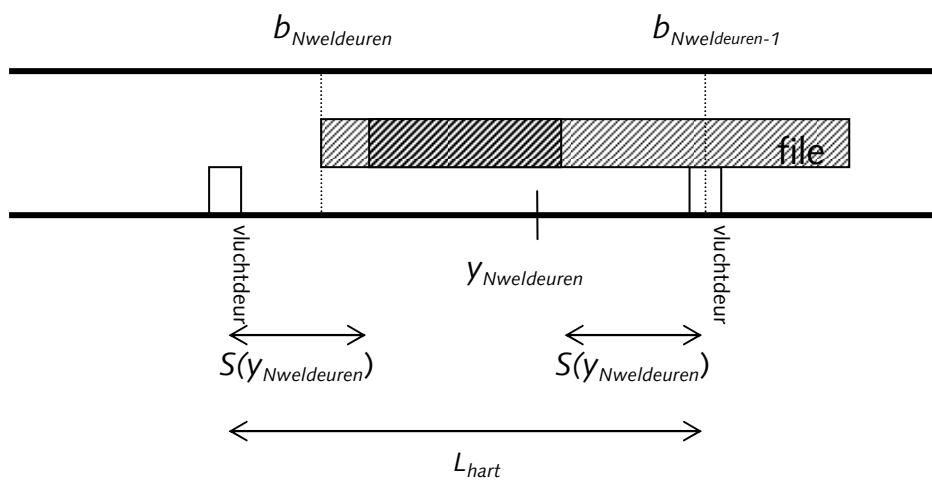
lengte niet groter is dan $S(y_{N_{welddeuren}})$ dan ontsnapt iedereen in het laatste stuk op tijd (zie Figuur 7-33) en geldt: $L_{i,doodvanafdeur1}^{N_{welddeuren}} = 0$.



Figuur 7-33: Iedereen ontsnapt.

Als $b_{N_{welddeuren}} - b_{N_{welddeuren-1}} \geq L_{hart} - S(y_{N_{welddeuren}})$ dan kan de lengte van het schadegebied op dezelfde manier berekend worden als voor de andere stukken na de eerste deur (zie Figuur 7-34):

$$L_{i,doodvanafdeur1}^{N_{welddeuren}} = L_{hart} - 2 \cdot S(y_{N_{welddeuren}}).$$



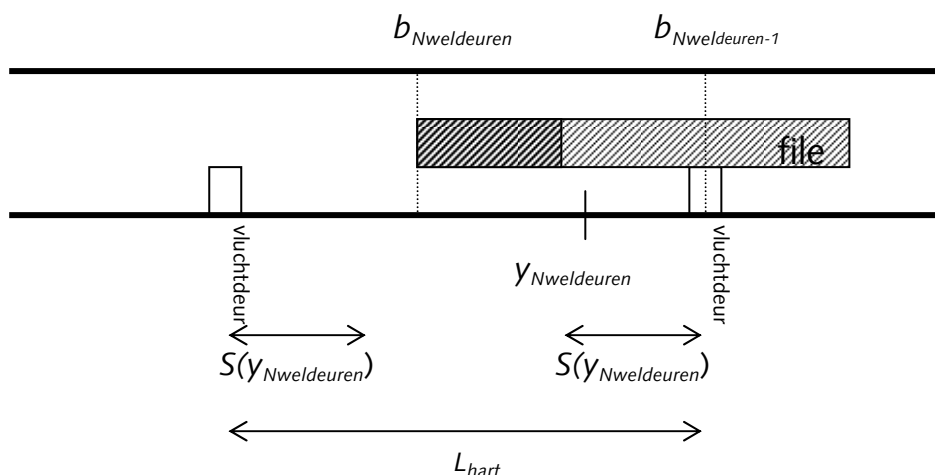
Figuur 7-34: Iedereen verder dan de maximale vluchtafstand van de deuren overlijdt.

In de tussenliggende gevallen, dus als:

$$S(y_{N_{welddeuren}}) < b_{N_{welddeuren}} - b_{N_{welddeuren-1}} < L_{hart} - S(y_{N_{welddeuren}})$$

dan is (zie Figuur 7-35)

$$L_{i,doodvanafdeur1}^{N_{welddeuren}} = b_{N_{welddeuren}} - b_{N_{welddeuren-1}} - S(y_{N_{welddeuren}}).$$



Figuur 7-35: Het derde geval.

De totale lengte van het schadegebied vanaf de eerste deur wordt nu berekend door de lengtes per stuk tunnel op te tellen:

$$L_{i,doodvanafdeur1} = \sum_{j=1}^{N_{weldeuren,i}} L_{i,doodvanafdeur1}^j \quad (7-30)$$

Tenslotte is:

$$L_{i,dood} = L_{i,doodtotdeur1} + L_{i,doodvanafdeur1} \quad (7-31)$$

Aantal slachtoffers

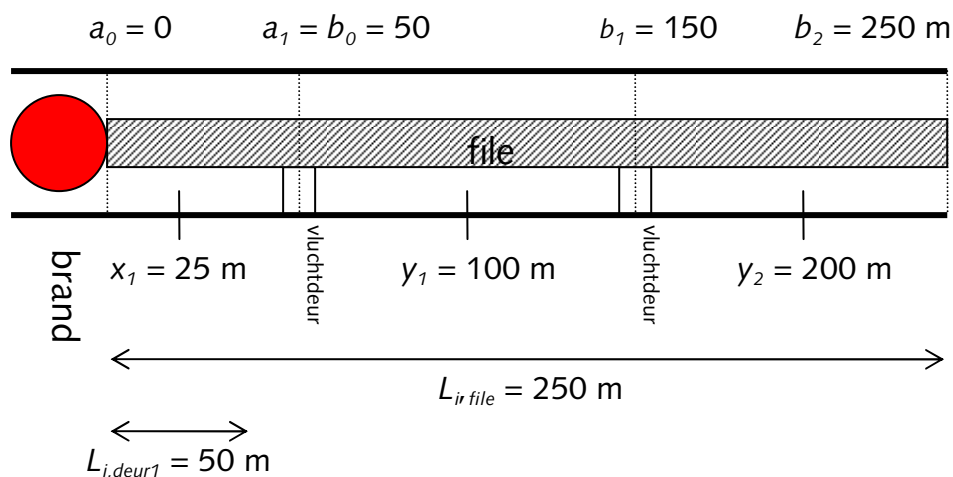
De lengte van het schadegebied in gebied i ($i = 2$ of 5) is $L_{i,dood}$ en in dit schadegebied is de kans op overlijden gelijk aan 1. Als $L_{i,dood}$ dus vermenigvuldigd wordt met het aantal aanwezige personen per meter, dan is het resultaat het aantal slachtoffers.

Om aan te sluiten bij formule 6.3 wordt ook hier p_i als volgt afgeleid:

$$p_i = \frac{L_{i,dood} \cdot D_{file}}{L_i \cdot D_i} = \frac{L_{i,dood} \cdot D_{file}}{L_i \cdot (L_{i,file}/L_i) D_{file}} = \frac{L_{i,dood}}{L_{i,file}}$$

Voorbeeld

In het voorbeeld dat in de loop van dit hoofdstuk doorgerekend is, woedt een snel ontwikkelende brand van 200 MW op 150 van de bovenstroomse ingang van een tunnel van 400 m met ventilatie. Op basis van de eerder gevonden resultaten voor deze situatie zal de lengte van het stuk in het benedenstroomse gebied 5 bepaald worden waarin mensen overlijden. We nemen aan dat er om de 100 m een vluchtdeur aanwezig is, dus $L_{hart} = 100$ m. In het benedenstroomse gebied staat de file minstens tot aan het eind van de tunnel, dus $L_{5,file} = L_{ben} = 250$ m. Het verdelen van het benedenstroomse gebied in stukken gaat daarom zo:



Om de lengte van het schadegebied te berekenen zijn de maximale vluchtafstanden $S(25)$, $S(100)$ en $S(200)$ nodig. Ter illustratie laten we zien hoe $S(25)$ berekend wordt.

Eerst moeten $t_{rook, dood}(25)$ en $t_{temp, dood}(25)$ berekend worden.

Tabel 7-14: berekenen van tijd tot bezwijken aan rookgas op 25 m benedenstreams

parameter	waarde op 25 m benedenstreams
t_{co1}	0,19 min
C_{CO}	4186 ppm
$B_{hellingCO}$	2607 ppm/min
t_{co2}	1,80 min
RMV	25 l/min
V_{CO_2}	3
F_{corgas}	1,5
$FID(t_2^{CO})$	0,55
$t_{rook, dood}$	2,43 min

Voor overlijden door temperatuur krijgen we:

Tabel 7-15: berekenen van tijd tot bezwijken aan temperatuur op 25 m benedenstreams

parameter	waarde op 25 m benedenstreams
$tijd_{temp1}$	0,32 min
$C_{heltemp}$	279°C/min
TEMP2	538°C
$tijd_{temp2}$	2,07 min
$D(tijd_{temp2})$	1751
$t_{temp, dood}$	1,09 min
t_{300}	1,22 min

Omdat $t_{temp, dood}(25) < t_{rook, dood}(25)$ is $t_{dood}(25) = t_{rook, dood}(25) = 1,09 \text{ min}$.

Vervolgens moeten $t_{vlucht}(25)$ en $t_{hinder}(25)$ worden bepaald. Voor de plaatsafhankelijkheid van t_{hinder} werd in paragraaf 7.4.2 de formule $t_{hinder}(x) = parahinder \cdot x + parbhinder$ met $parahinder = 0,0046 \text{ min/m}$ en $parbhinder = 0,24 \text{ min}$ gevonden. Daarom is:

$$t_{hinder}(25) = 0,0046 \cdot 25 + 0,24 = 0,35 \text{ min}$$

Voor t_{vlucht} gebruiken we formule (6-18): $t_{vlucht}(x) = \min(t_{zelf}(x), t_{instructie}) + t_{uitstap}$

Hierin is $t_{instructie}$ de tijd waarop een vluchtinstructie wordt gegeven. Daarvoor kan formule (6-17) gebruikt worden, maar voor dit voorbeeld gaan we uit van $t_{instructie} = 2$ minuten. Verder is $t_{uitstap}$ de tijd die het kost om uit een voertuig te stappen. Hiervoor wordt 0,2 minuut genomen. Tenslotte is t_{zelf} het tijdstip waarop de aanwezigen zelf beginnen te vluchten, ook als ze niet gewaarschuwd zijn door een vluchtinstructie. Hiervoor geldt: $t_{zelf}(x) = \text{parazicht}L5 \cdot x + \text{parbzicht}L5$, met in dit geval $\text{parazicht}L5 = 0,003$ minuut/m, en $\text{parbzicht}L5 = 0,2$ minuut. Daarom is

$$t_{vlucht}(25) = \min(0,003 \cdot 25 + 0,2; 2) + 0,2 = 0,47 \text{ min}$$

Op basis van Tabel 7-13 geldt dat

$$S(25) = v_{vlucht} \cdot (t_{dood}(x) - t_{vlucht}(x)) = 18 \cdot (1,09 \text{ min} - 0,47 \text{ min}) = 11,1 \text{ m.}$$

Op dezelfde manier kan berekend worden dat $S(100) = 14,2$ m en $S(200) = 43,8$ m.

Nu kan de lengte van het schadegebied berekend worden:

$$L_{5,doodtotdeur1} = L_{5,deur1} - S(25) = 50 - 11,1 = 38,9 \text{ m.}$$

Verder is $S(100) = 14,2$ m kleiner dan $L_{hart}/2 = 50$ m dus niet iedereen in het stuk tussen de eerste twee vluchtdeuren overleeft het. Daarom is:

$$L_{5,doodtotdeur1}^1 = L_{hart} - 2 \cdot S(100) = 100 - 2 \cdot 14,2 = 71,6 \text{ m.}$$

Op dezelfde manier is $S(200) = 43,8$ m kleiner dan $(b_2 - b_1)/2 = 50$ m en dus:

$$L_{5,doodtotdeur1}^2 = L_{hart} - 2 \cdot S(200) = 100 - 2 \cdot 43,8 = 12,4 \text{ m.}$$

Het schadegebied vanaf de eerste vluchtdeur is dus $L_{5,doodvanafdeur1} = 71,6 + 12,4 = 84,0$ m lang. Met het schadegebied tot de eerste vluchtdeur erbij, van 38,9 m lang, geeft dit een totaal schadegebied benedenstrooms van $L_{5,dood} = 122,9$ m. Binnen dit gebied is de kans op overlijden gelijk aan 1.

7.6.4 Extra slachtoffers onder de niet-zelfredzame weggebruikers

In voorgaande paragrafen is de berekeningsmethode toegelicht uitgaande van een situatie waarbij de aanwezigen in principe in staat zijn om te vluchten (tenzij teveel rook dit verhindert). Daarnaast zullen er mogelijk mensen in de tunnel aanwezig zijn die niet in staat zijn om zelfstandig hun voertuig en de tunnelbuis te verlaten. Indien deze personen alleen reizen mag worden aangenomen dat deze personen in hun voertuig blijven totdat zij hier uit worden gered door de hulpverleningsdiensten. Bij hoge rookgasconcentraties en/of hoge temperaturen zullen deze personen komen te overlijden als ze niet snel genoeg worden gered door de hulpverleningsdiensten. In het model worden hier de volgende pessimistische aannames voor gedaan:

- Indien de tijd tot bezwijken aan rookgasconcentraties $t_{rook,dood}(x)$ of hoge temperatuur $t_{temp,dood}(x)$ of een explosie T_{expl} kleiner is dan 60 minuten dan komen alle nog overgebleven alleen reizende niet-zelfredzame weggebruikers om het leven. De fractie extra slachtoffers in het gebied 5 is dan $FR_{nietzelfredzm} \cdot (1-p_5)$ en in gebied 2: $FR_{nietzelfredzm} \cdot (1-p_2)$
- Ter vereenvoudiging wordt $t_{dood}(x)$ niet voor alle locaties x in de tunnel bepaald, maar voor $x = 50$ (op 50 meter afstand van de brand). Dit is een pessimistische aanname.

Op basis hiervan wordt voor voertuigbranden gerekend met:

$$\begin{aligned}
 &\text{Als } L_{2,file} \leq 0 && p_2 = 0 \\
 &\text{Als } t_{doodL_2}(50) < 60 && p_2 = \frac{L_{2,dood}}{L_{2,file}} + \left(1 - \frac{L_{2,dood}}{L_{2,file}}\right) \cdot FR_{nietzelfredzm} \\
 &\text{Anders:} && p_2 = \frac{L_{2,dood}}{L_{2,file}}
 \end{aligned}
 \tag{7-32}$$

$$\begin{aligned}
 &\text{Als } L_{5,file} \leq 0 && p_5 = 0 \\
 &\text{Als } t_{doodL_5}(50) < 60 && p_5 = \frac{L_{5,dood}}{L_{5,file}} + \left(1 - \frac{L_{5,dood}}{L_{5,file}}\right) \cdot FR_{nietzelfredzm} \\
 &\text{Anders:} && p_5 = \frac{L_{5,dood}}{L_{5,file}}
 \end{aligned}
 \tag{7-33}$$

8 Gevolgenmodellering scenario's met uitstroming gevaarlijke stoffen

8.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de gevolgmodellering van scenario's met gevaarlijke stoffen uitgewerkt. Voor een aantal scenario's zijn representatieve berekeningen uitgevoerd.

De uitwerking in dit hoofdstuk heeft betrekking op de gebeurtenissen $G_{\text{voertuig}} = \text{Expl}$ en $G_{\text{voertuig}} = \text{Tank}$. De uitwerking voor ongevalsscenario's met explosieven ($G_{\text{voertuig}} = \text{Expl}$) is gegeven in paragraaf 8.2. Voor de gebeurtenis $G_{\text{voertuig}} = \text{Tank}$ is de uitwerking onderverdeeld in de stofklassen LF (brandbare vloeistoffen), LT (toxische vloeistoffen), GF (brandbare gassen) en GT (toxische gassen). Deze onderverdeling sluit aan bij de onderverdeling die ook gehanteerd wordt voor externe veiligheid. Voor de uitwerking van deze scenario's is gebruik gemaakt van voorstellen die TNO ten behoeve van de ontwikkeling van QRA-tunnels heeft gedaan [24]. De uitwerking van deze scenario's is beschreven in de paragrafen 8.3. t/m 8.6.

8.2 Scenario's met explosieven

In deze paragraaf worden de effecten van incidenten met brand in een met explosieven geladen vrachtauto uitgewerkt.

Uitgangspunt hierbij is dat er in eerste instantie sprake is van een initiële brand die op tijdstip T_{uitvtg} uit het voertuig treedt. Na het tijdstip T_{uitvtg} groeit deze brand naar de maximale grootte van 100 MW op tijdstip T_{max} . Op het tijdstip T_{max} ontsteekt de lading van de vrachtauto en treedt er een explosie op. Voor T_{uitvtg} en T_{max} zie Tabel 4-6.

$$\text{als } G_{\text{voertuig}} = \text{Expl en } G_{\text{vtgbrand}} = \text{Brand} \quad T_{\text{expl}} = T_{\text{max}} \quad (8-1)$$

Explosieven worden in vaste vorm in colli vervoerd. Bij een brand of bij schokgevoelige explosieven ook door andere oorzaken (in dat geval is de geschatte kans op ontsteking $1 \cdot 10^{-4}$) zullen de explosieven kunnen exploderen. Hierbij kan letsel en materiële schade optreden door de piekoverdruk en scherfinslag van de explosie, maar ook ten gevolge van de initiële brand. Voor de kans op ontsteking van de explosieven gegeven een brand is 1 aangehouden. Aangenomen wordt dat bij een explosie van een vrachtauto met explosieven de overdrukken zo groot zullen zijn, dat totaal verlies van de tunnel zal optreden. Alle aanwezigen in de tunnel zullen dodelijk worden getroffen [13].

Bij het uit de tunnel lopen van een detonatie zal de drukgolf direct ruimtelijk expanderen en in sterkte afnemen.

Op basis hiervan wordt als volgt gemodelleerd:

Aanname 8-1 Bij een brand van een met explosieven geladen vrachtwagen treedt een explosie op, op het moment dat de brand zijn maximale brandomvang bereikt. In de tunnel zullen alle dan nog aanwezigen ten gevolge van de explosie overlijden en zal de tunnel bezwijken. Buiten de verkeersbuis zullen aanwezigen tot op 40 m afstand van het buiseinde overlijden.

Toelichting: *Deze aanname is een vereenvoudiging. De bij de explosie gegenereerde overdruk zal groter zijn dan 100 kPa, zodat alle aanwezigen in de tunnel zullen overlijden. Voor de effecten buiten de tunnel wordt uitgegaan van de explosie effecten van een detonatie.*

Omdat op grond van Aanname 8-1 wordt aangenomen dat de tunnel bezwijkt, is het niet zinvol de effecten van de initiële brand op dezelfde manier te berekenen als de (andere) voertuigbranden. De gevluchte personen zijn ook in het vluchtkanaal of een andere tunnelbuis niet veilig. Voor het berekenen van het aantal slachtoffers wordt daarom de volgende benadering gehanteerd:

Het aantal slachtoffers wordt hetzelfde berekend als bij een brand van 100 MW, waarbij er echter vanuit wordt gegaan dat men pas veilig is als men de tunnel heeft verlaten én ook de afstand L_7 of L_6 heeft afgelegd. Dit wordt gemodelleerd als een brand van 100 MW waarbij gerekend wordt met een situatie zonder vluchtdeuren, een vluchtweg die is verlengd met L_7 of L_6 en de totaal beschikbare vluchttijd die is gemaximeerd op T_{expl} .

Dit is een conservatieve benadering omdat men bij deze benadering op de gehele vluchtweg (in dit geval door de tunnelbuis), afhankelijk van de positie ten opzichte van de brand ook last kan hebben van de rook en hitte waardoor het vluchtproces wordt belemmerd. In werkelijkheid kan men vanaf de eerste vluchtdeur ongehinderd verder vluchten. In dat geval zou men sneller de veilige zone bereiken. De overschatting van het risico hierdoor is beperkt omdat de bijdrage van dit scenario aan het totale risico zeer beperkt is vanwege het zeer geringe aantal transporten met explosieven door tunnels.

Kortom: de berekening vindt op dezelfde manier plaats als bij een brand van 100 MW. In vergelijking (7-16) is het tijdstip $t_{dood}(x)$ gemaximeerd op T_{expl} . Voor de berekening van $L_{2,dood}$ en $L_{5,dood}$ geldt vergelijking (7-21) waarbij in de berekening van $L_{2,dood}^j$ in plaats van L_2 met $(L_2 + L_1)$ wordt gerekend en in de berekening van $L_{5,dood}^j$ in plaats van L_5 met $(L_5 + L_6)$. Daarbij geldt:

$$\begin{aligned} \text{als } G_{\text{voertuig}} = \text{Expl en } G_{\text{vtgbrand}} = \text{Brand} \quad & \begin{aligned} L_1 &= L_{e,tm,explosief} \\ L_6 &= L_{e,tm,explosief} \end{aligned} \quad (8-2) \end{aligned}$$

Voor de defaultwaarde van $L_{e,tm,explosief}$ zie Tabel 3-9.

Voor de gebieden 1 en 6 zelf geldt dat iedereen die zich in het gebied met lengte $L_{e,tm,explosief}$ bevindt op het moment van de explosie komt te overlijden, dus $p_1 = 1$ en $p_6 = 1$. Het aantal aanwezigen in die gebieden wordt bepaald door de dichtheid, zie paragraaf 6.4.3.

8.3 Scenario's met brandbare vloeistoffen

Voor de stofklasse LF worden de volgende gebeurtenissen onderscheiden (zie Figuur 5-8):

- $G_{\text{uitstroming}} = \text{Linst}$ (instantane uitstroming, 20 m³);
- $G_{\text{uitstroming}} = \text{Lcontgr}$ (grote uitstroming, 5 m³);
- $G_{\text{uitstroming}} = \text{Lcontkl}$ (kleine uitstroming, 0,5 m³);
- $G_{\text{uitstroming}} = \text{Lgeen}$ (geen uitstroming).

Voor het scenario Lgeen (geen uitstroming) geldt dat er geen extra slachtoffers vallen ten gevolge van uitstroming gevaarlijke stoffen of brand: $E_{kkgg} = 0$ (zie vergelijking (6-3)).

Voor de gebeurtenissen Linst, Lcontgr en Lcontkl worden de volgende vervolgtakken onderscheiden (zie Figuur 5-11):

- $G_{\text{tankbrand}} = \text{Direct}$;
- $G_{\text{tankbrand}} = \text{Vertraagd}$;
- $G_{\text{tankbrand}} = \text{Geen ontsteking}$.

De dampen van brandbare vloeistoffen leiden niet tot letaliteit. Met brandbare vloeistoffen die tevens toxisch zijn, wordt al rekening gehouden bij de indeling van de getelde transporten in de stofcategorieën [6] door de stof dan deels als brandbare en deels als toxische stof mee te tellen. Voor uitstromingen van brandbare vloeistoffen zonder ontsteking geldt daarom:

$$\text{als } G_{\text{stofklasse}} = \text{LF en } G_{\text{tankbrand}} = \text{Geen ontsteking} \quad E_{kkgg} = 0 \quad (8-3)$$

Bij het vrijkomen van brandbare vloeistoffen wordt een plas gevormd. Door verdamping ontstaat brandbare damp boven de plas. Bij directe ontsteking ontstaat een plasbrand. Indien geen directe ontsteking optreedt, zal dispersie van de damp optreden, waarbij een brandbare gaswolk kan ontstaan. Doordat de brandbare gaswolk is opgesloten in de tunnelbuis kan vertraagde ontsteking eventueel tot een gaswolkexplosie leiden, waarbij vlamversnelling tot drukopbouw leidt. Als er geen vlamversnelling van betekenis optreedt, is er sprake van een flashfire of wolkbrand zonder drukopbouw.

8.3.1 Plasvorming

Bij uitstroming van vloeistof uit een tankwagen zal plasvorming optreden. Op de open weg wordt een instantane uitstroming gemodelleerd als een plas met een oppervlak van 1200 m² en een continue uitstroming (5 m³) als een plas van 300 m² [4]. In een tunnel zijn de plasmvorm en eventueel de plasmgrootte anders dan op de open weg, omdat:

- De breedte van de plas wordt beperkt door de breedte van het wegdek in de tunnelbuis.
- Er is een verschil tussen de verschillende delen van de tunnel: op het horizontale deel zal de uitstroming een plas (symmetrisch) rondom het uitstroompunt vormen vergelijkbaar met de plas die zich op de open weg vormt; op de hellende delen zal zich een plas vormen aan één zijde van het uitstroompunt in de richting van de lager gelegen delen van de tunnel (dus bovenstrooms op een opgaande helling en benedenstrooms op een neergaande helling). Door de aanwezige langshelling zal een plas op een hellend deel groter zijn dan een plas bij een zelfde uitstroming op een horizontaal deel.
- In een tunnelbuis met riolering zal een deel van de uitgestroomde vloeistof worden afgevoerd. Voor afwatering is er een dwarshelling aangebracht van het wegvlak. Zowel de dwarshelling als de afvoercapaciteit van de riolering zijn van invloed op de vorm en grootte van de plas.

De plasmgrootte is afhankelijk van een aantal parameters. Onderstaand wordt de plasmgrootte berekend met de volgende aannamen:

- De uitgestroomde hoeveelheden en het uitstroomdebiet. Hierbij wordt aangesloten bij de afleiding die door TNO [22] is gedaan:

Uitstroomhoeveelheid	Gatgrootte tank		Debiet [m ³ /s]
	Nr.	opp. [m ²]	
0,5 m ³ (klasse < 1 m ³)	1	1,1·10 ⁻⁴	0,0003
5 m ³ (klasse 1-10 m ³)	2	1,1·10 ⁻²	0,03
20 m ³ (klasse 10-30 m ³)	3a	0,05	0,10
	3b	0,15	0,20

- De hellingshoek van de stijgende of dalende delen van de tunnel. Hiervoor wordt uitgegaan van 4%.
- De dwarshelling van de weg. Hiervoor wordt uitgegaan van 2,5%.
- De afvoercapaciteit van het riool. In deze voorbeeldberekeningen is uitgegaan van 4 m³/min.).
- Het uitstroompunt. Hiervoor wordt het meest ongunstige punt genomen, namelijk het hoogste punt van het wegdek in de dwarsdoorsnede.

Berekening plasmgrootte bij de verschillende uitstroomscenario's

Voor de plasmbreedte werd door Ingason de volgende formule gevonden [34]:

$$B = 2,4 \cdot V^{0,46} \quad (8-4)$$

met:

V: het uitstroomdebiet in liter per seconde

B : de breedte van de plas.

Deze formule is opgesteld en gevalideerd met proeven [35]. Deze formule wordt tevens toegepast in QRAM, het in opdracht van OESO/PIARC ontwikkelde QRA-model [36].

In de Calandtunnel (nu Thomassentunnel genaamd) zijn in 2004 praktijkproeven uitgevoerd waarbij plasgroottes (van water) werden gemeten [37]. Gegevens tunnelbuis: 3 rijstroken, breedte 14,45 m, langshelling 4,5% en dwarshelling 3,3%. Bij een uitstroming van 2 m³/min bleek het plasoppervlak 285 m² te zijn.

Bij toepassing van de formule van Ingason op deze situatie blijkt $B = 12,04$ m. In de tijd dat in dwarsrichting 14,45 m is afgelegd wordt in langsricting $0,045^{0,5} / 0,033^{0,5} * 14,45 = 16,87$ m afgelegd. De lengte van de plas wordt daarmee $(14,45^2 + 16,87^2)^{0,5} = 22,22$.

Het oppervlak is dan $12,04 * 22,22 = 268$ m². Dit komt redelijk overeen met de gemeten waarde. Voor de breedte van de uitstroompas zal daarom worden uitgegaan van $B = 2,4 \cdot V^{0,46}$.

Als de plas de zijkant van het wegdek bereikt zal (een deel van) de vloeistof in de afvoerputten verdwijnen. Bij grote uitstromingen zal een deel "doorschieten" over de afvoerput(ten) en zal er een gootstroom ontstaan. Bij de uitstroomprouven in de Calandtunnel bleek dat deze gootstroom bij een uitstroming van 2 m³/min circa 30 meter lang is, met een gemiddelde breedte van circa 1 m.

Voor het berekenen van de stroomsnelheid van de gootstroom wordt gebruik gemaakt van de formule van Chézy:

$$v = C \cdot (R)^{0,5} \cdot I^{0,5} \quad (8-5)$$

met:

v : de stroomsnelheid (m/s);

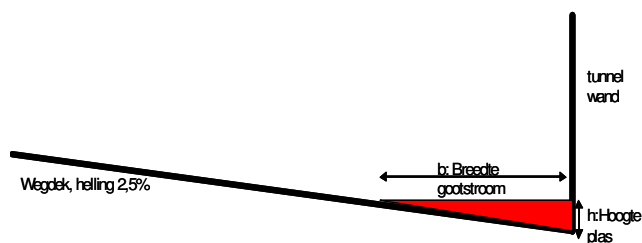
C : de coëfficiënt van Chézy; waarbij voor een hydraulisch ruwe wand geldt: $C = 18 \cdot \log \frac{12 \cdot R}{k}$.
Hierbij is k de wandoneffheid; hiervoor wordt 0,002 (2mm) aangehouden;

R : de hydraulische straal; bij een uitstroming in een open kanaal is de breedte veel groter dan de diepte, R wordt dan vrijwel gelijk aan de dikte van de plas;

I : het verhang (de helling).

Aangehouden wordt dat de putten in de opgaande helling om de 10 m worden aangebracht en dat de inlaathoeveelheid 0,5 m³ per minuut per put is (met een maximum van 4 m³ per minuut totaal). Voor de vorm van de gootstroom wordt een driehoek aangehouden, met breedte b ; R is ongeveer gelijk aan de gemiddelde dikte. Bij een dwarshelling van 2,5% geldt dan: $R = 0,025 * b / 2$.

Het stroomoppervlak is dan $A = 0,5 * b * 0,025 * b = b^2 / 80$. (zie Figuur 8-1).



Figuur 8-1 Dwarsdoorsnede gootstroom.

Dit oppervlak stroomt langs de helling naar een afvoerput. Bij een uitstroom van q m³ per minuut is de snelheid in m/s dan: $v = q / A = q / 60 / b^2 * 80 = 1,33 q / b^2$.

Tevens geldt $v = C * R^{0,5} * I^{0,5}$. Hierbij is $C = 18 * \log(12 * R / 0,002)$ en $I = 0,04$.

De snelheid en de dikte van de plas (en dus ook de breedte van de plas) zijn van elkaar afhankelijk. Door itereren wordt de stroomsnelheid en de plasbreedte bepaald. Hieronder wordt dit voor de verschillende gatgroottes en tunneldelen uitgewerkt.

Gatgrootte 2, hellend deel, 3 rijstroken:

- Uitstroming 1,8 m³/min (30 l/s); met een soortelijk gewicht van benzine van 720 kg/m³ komt dit neer op circa 1296 kg/min. = 21,6 kg/s;
- Langshelling wegdek 4%;
- Dwarshelling wegdek 1:40 = 2,5%;
- Uitstroompunt: op het hoogste punt van de dwarsdoorsnede;
- Wegbreedte (af te leggen afstand tot de wand): 13,5 m;
- Totaal uitgestroomde hoeveelheid 5 m³.

De breedte van het wegdek bedraagt 13,5 m. In de tijd dat deze 13,5 meter in de breedte wordt afgelegd wordt langs de langshelling 17,07 meter afgelegd: $(=13,5 * 0,04^{0,5} / 0,025^{0,5})$.

De lengte van de plas is dan $L = (13,5^2 + 17,07^2)^{0,5} = 21,76$ m.

Met de formule van Ignason wordt de plasbreedte op het wegdek berekend $B = 2,4 * V^{0,46} = 11,5$ m.

Hieruit volgt $A = 11,5 * 21,76 = 250$ m².

Gootstroom

Bij een uitstroom van 1,8 m³ per minuut is de snelheid in m/s: $v = q / A = 1,8 / 60 / b^2 * 80 = 2,4 / b^2$.

Tevens geldt $v = C * R^{0,5} * I^{0,5}$. Hierbij is $C = 18 * \log(12 * R / 0,002)$ en $I = 0,04$. Bij een uitstroming van 1,8 m³/min volgt na iteratie: breedte gootstroom $b = 1,54$ m en $v = 1$ m/s. Dit is de stroomsnelheid naar de eerste put. Tussen deze put en de volgende put geldt dan (omdat aangenomen wordt dat 0,5 m³/min in de put verdwijnt) $q = 1,3$ m³/min. Na iteratie volgt: $b = 1,36$ m en $v = 0,94$ m/s. Tussen de 2^e en de 3^e put geldt dan: $q = 0,8$ m³/min, $b = 1,13$ m en $v = 0,83$ m/s. Tussen de 3^e en de 4^e put: $q = 0,3$ m³/min, $b = 0,79$ m en $v = 0,64$ m/s. De vloeistof stroomt dan niet verder dan de 4^e put. Dit komt dus goed overeen met de constatering bij de proeven in de Calandtunnel (met een vergelijkbaar debiet) dat de gootstroom circa 30 meter bedroeg, met een gemiddelde breedte van circa 1 m.

Afhankelijk van de aanwezigheid van ontstekingsbronnen boven de plas kan er ontsteking plaatsvinden. Als de vloeistof ontsteekt is het aannemelijk dat dit snel gebeurt, omdat er dan nog rijdende voertuigen de plas inrijden en de voertuigen of de botsing zelf als ontstekingsbron fungeren, dit blijkt ook uit de beschouwing van de ontstekingskans in bijlage D. Bij vroegtijdige ontsteking van de plas zal de uitstroming van de plas worden beperkt. Voor de bepaling van de grootte van het brandende plasoppervlak wordt daarom voor de plasbrand uitgegaan van ontsteking na 1 minuut. Berekend wordt hoe snel de plas de zijkant bereikt en hoever de gootstroom vervolgens nog doorstroomt (in de resterende tijd tot 1 minuut). De stroomsnelheid op het wegdek ter plaatse van de plas is met de formule van Chézy te bepalen. Ten behoeve hiervan wordt de dikte van de uitstroomplas bepaald met de formule van Webber uit [3]:

$$H = [(6 \cdot v_L \cdot q_s) / (\rho_L \cdot \pi \cdot g)]^{0,25} \quad (8-6)$$

met:

H : de plasdikte bij een constante uitstroming [m];

v_L de kinematische viscositeit van de vloeistof [m²/s]; bij benzine is de kinematische viscositeit $0,44 * 10^{-6}$ m²/s bij 20 graden Celsius;

q_s het uitstromingsdebiet van de vloeistof [kg/s];

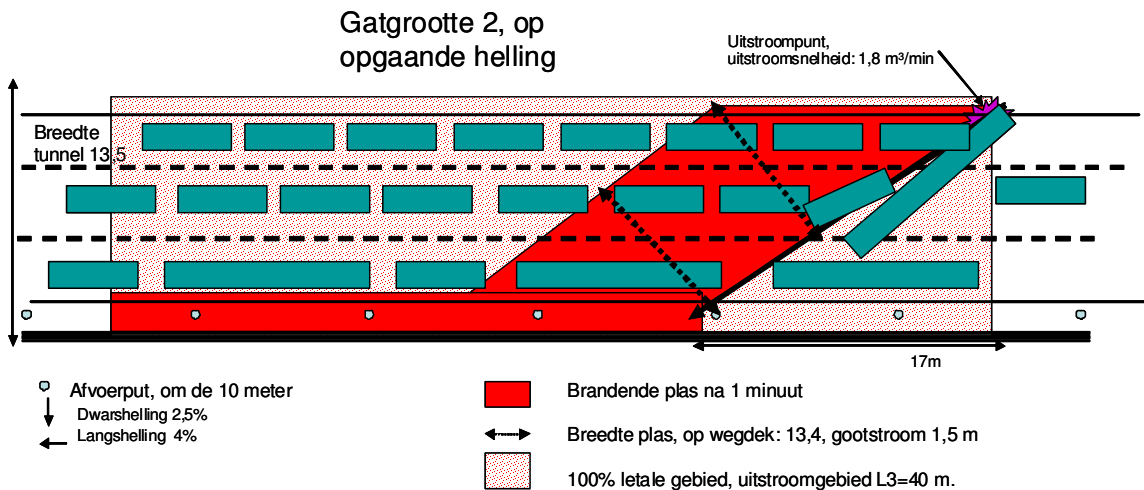
ρ_L de dichtheid van de vloeistof [kg/m³];

π constante = 3,14;

g de valversnelling van de zwaartekracht = 9,8 m/s².

Bij een uitstroom van 1,8 m³ per minuut blijkt de plasdikte 0,007 m te zijn. Hieruit volgt $C = 18 * \log(12 * 0,007 / 0,002) = 29,2$. De stroomsnelheid in dwarsrichting is dan volgens de formule van Chézy = 0,39

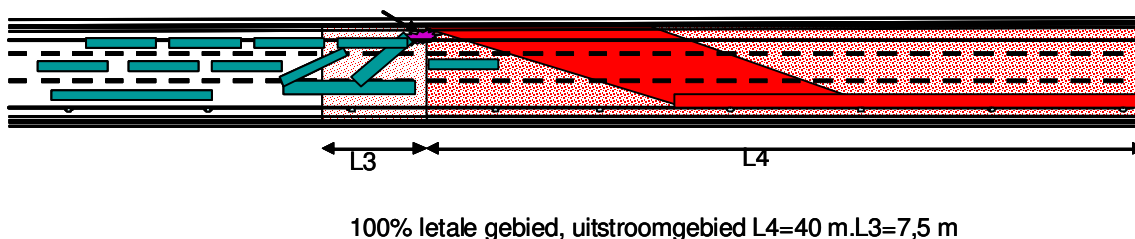
m/s. Na 35 s is dan de zijkant bereikt. In lengterichting is dan 17 m afgelegd. De stroomsnelheid van de plas zelf is 0,62 m/s ($21,76 / 35$). Deze stroomsnelheid is veel hoger dan de stroomsnelheid die, bij een zelfde dikte van de plas, wordt berekend met een breedte van de plas volgens de formule van Ignason: $v = 1,8 / 60 / 11,5 / 0,007 = 0,37$ m/s. Bovendien is de dikte van de plas niet constant. Conservatief wordt verder gerekend met de waarde van de snelheid berekend met de formule van Chézy. Er vanuit gaande dat de uitstroming precies tussen 2 putten plaatsvindt, bevindt de 1^e put waarin vloeistof verdwijnt, zich op 25 m (er wordt hier dus conservatief aangenomen dat er niets in de put op 15 m afstand van het uitstroompunt terecht komt). Deze 1^e put wordt bereikt na $35 + 8 / 1 = 43$ s; de 2^e put na $43 + 10 / 0,94 = 54$ s en de 3^e put na $54 + 10 / 0,83 = 66$ s. Na 1 minuut bevindt het front van de uitstroming zich op $35 + 6 * 0,83 = 40$ m. Zie schematische weergave in Figuur 8-2.



Figuur 8-2 Uitstroming gatgrootte 2 op opgaande helling.

In de brandende plas wordt uitgegaan van 100% letaliteit. Ook naast de plas zal sprake zijn van een overlijdenskans ten gevolge van warmtestraling. Gezien de snelle ontwikkeling van de brand zal het voor de aanwezigen nauwelijks mogelijk zijn om te vluchten. Het gebied waarin 100% van de aanwezigen overlijdt wordt, ter vereenvoudiging, genomen over de hele tunnelbreedte (alle rijstroken). In de figuur is dit aangeduid als het rood gearceerde gebied. Hiermee wordt een conservatieve benadering van het uitstroomgebied genomen. Bij een plas van brandbare vloeistoffen op een opgaande helling geldt daarmee dat de lengte van het uitstroomgebied ($L_{3,4hel}$) 40 m lang, waaruit volgt $L_3 = 40$. Voor een plas op de neergaande helling geldt dezelfde lengte. In dat geval is dus $L_4 = 40$. Bij een neergaande helling geldt echter dat men bovenstrooms ook bij werking van ventilatie direct na de ontsteking last zal hebben van de warmtestraling. In het model wordt met de warmtestraling bovenstrooms rekening gehouden door bij een neergaande helling voor L_3 in plaats van 0 de lengte $L_{3,warmtestraling}$ aan te houden (zie ook paragraaf 7.3), waarbij $L_{3,warmtestraling} = 7,5$ wordt aangehouden. In Figuur 8-3 wordt dit geïllustreerd.

Gatgrootte 2, op neergaande helling



Figuur 8-3 Uitstroming gatgrootte 2 op neergaande helling.

Bij ontsteking van de plas zal een plasbrand ontstaan met een vermogen van circa 2 MW per m² mits er voldoende zuurstof kan worden aangevoerd. Bij deze uitstroming van 1,8 m³/min is dus een plasbrand van meer dan 300 MW mogelijk bij voldoende luchtcirculatie.

Het verloop van dit scenario ziet er globaal zo uit: De uitstromende hoeveelheid van 5 m³ stroomt in 5 / 1,8 * 60 = 167 s uit. De laatste druppel bereikt 66 s later de derde put (233 s na het begin van de uitstroming). De plasbrand heeft dan 233 - 60 = 173 s geduurd. Bij een brandgrootte van 300 MW is dan 300 * 173 = 51900 MJ verbrand. Dit is ongeveer 51900 / 43,5 = 1193 kg en 1193 / 720 = 1,65 m³. De rest, 3,35 m³, is in het riool verdwenen. De situatie na circa 4 minuten zal dan waarschijnlijk zijn dat het dak van de tank zal zijn gesmolten, waardoor er een brandende bak benzine (met een vermogen van circa 50 MW) overblijft. Ook zullen de voertuigen die in de plas stonden in brand zijn geraakt. In het model worden voor de gehele brandduur de CFD-resultaten van de 300 m² plas genomen bij dit scenario (zie modelering brand hoofdstuk 7).

Uitstroming toxische vloeistof

Bij een uitstroming van toxische vloeistof gaan we er vanuit dat deze niet brandbaar is en niet ontsteekt. De gootstroom loopt dan door tot de 4^e put. Gezien de breedte van de gootstroom geldt echter dat er geen voertuigen in de gootstroom staan. De gootstroom wordt daarom in dit geval niet meegenomen bij het uitstroomgebied. Dit betekent dat voor het uitstroomgebied van toxische vloeistoffen een lengte van 17 + 11,5 = 28,5, afgerond op $L_{3,4hel} = 30$ m wordt genomen. Voor de verdere uitwerking van de gevolgen zie paragraaf 8.4

Gatgrootte 2, horizontaal deel, 3 rijstroken:

- Uitstroming 1,8 m³/min (30 l/s); met een soortelijk gewicht van benzine van 720 kg/m³ komt dit neer op circa 1296 kg/min. = 21,6 kg/s;
- Langshelling wegdek 0%;
- Dwarshelling wegdek 1:40 = 2,5%;
- Uitstroompunt: op het hoogste punt van de dwarsdoorsnede;
- Wegbreedte (af te leggen afstand tot de wand): 13,5 m;
- Totaal uitgestroomde hoeveelheid 5 m³.

Net als bij het hellend deel geldt in dwarsrichting: $v = 0,39$ m/s, de tijd om de zijkant te bereiken is 35 s. De breedte van de plas wordt wederom berekend met de formule van Ignason: $B = 11,5$ m. Hieruit volgt $A = 11,5 * 13,5 = 155$ m².

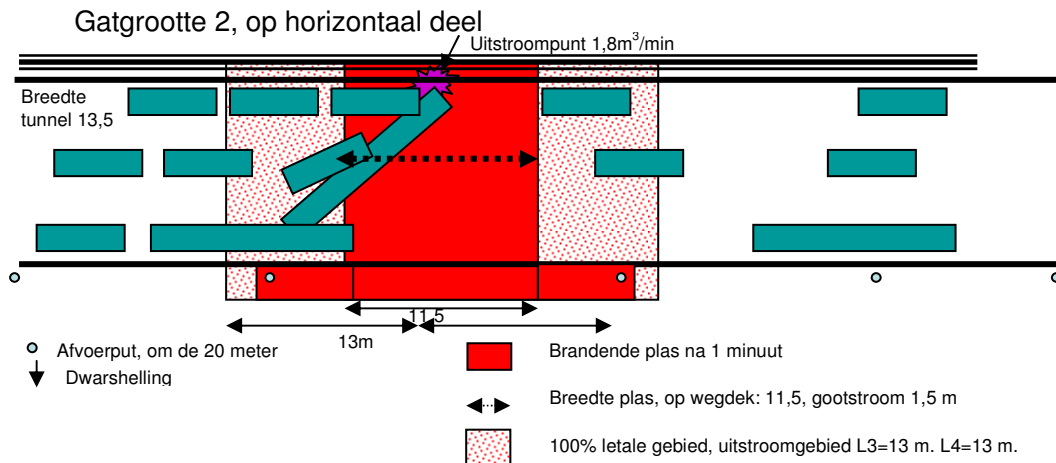
Gootstroom

Nadat de benzine de zijkant van het wegdek heeft bereikt zal de vloeistof als een 'gootstroom' verder stromen naar de putten aan weerszijden van de plas waarbij steeds een deel in de putten zal verdwijnen. Aangehouden wordt dat de putten in het horizontale deel om de 20 m worden aangebracht en dat de inlaathoeveelheid 0,5 m³ per put is (tot het maximum van 4 m³).

Ook hier wordt voor de vorm van de gootstroom een driehoek aangehouden, met breedte b ; de gemiddelde dikte (R) is dan bij een dwarshelling van 2,5%: $R = 0,025 * b / 2$. Het stroomoppervlak is dan $A = 0,5 * b * 0,025 * b = b^2 / 80$. Aangehouden wordt dat de uitstroming van de vloeistof naar beide zijden gelijk is, dus 0,9 m³ per minuut. De snelheid in m/s is dan: $v = q / A = 0,9 / 60 / b^2 * 80 = 1,2 / b^2$. Tevens geldt $v = C * R^{0,5} * l^{0,5}$. Hierbij is $C = 18 * \log(12 * R / 0,002)$. Omdat er in lengterichting geen sprake is van een helling van het wegdek dient voor het verhang de helling van het vloeistofoppervlak te worden genomen. Aangenomen wordt dat de dikte van de plas 1 mm per meter afneemt ($l = 0,001$).

Ook hier geldt dat de snelheid en de dikte van de plas van elkaar afhankelijk zijn. Bij een uitstroming van 0,9 m³/min naar beide zijden volgt: breedte gootstroom $b = 2,3$ m en $v = 0,22$ m/s. Dit is de stroomsnelheid naar de eerste put. Tussen deze put en de volgende put geldt dan (omdat aangenomen wordt dat 0,5 m³/min in de put verdwijnt) $q = 0,4$ m³/min, $b = 1,7$ m en $v = 0,18$ m/s. De vloeistof stroomt daarna niet verder.

Na 35 s is in lengterichting 5,75 m afgelegd. Er vanuit gaande dat de uitstroming precies tussen 2 putten plaatsvindt, bevindt de 1^e put zich op 10 m. Deze 1^e put wordt bereikt na $35 + 4,25 / 0,22 = 54$ s. Na 1 minuut bevindt het front van de uitstroming zich op $10 + 0,18 * 6 = 11$ m. In Figuur 8-4 is dit geïllustreerd. Met de invloed van warmtestraling (7,5 m vanaf de plas) wordt rekening gehouden door voor de lengte van het uitstroomgebied aan te houden $L_{3,4hor} = 26$ m ($L_3 = L_4 = 13$).



Figuur 8-4 Uitstroming gatgrootte 2 op horizontaal deel.

Uitstroming toxische vloeistof

Bij een uitstroming van toxische vloeistof gaan we er vanuit dat deze niet brandbaar is en niet ontsteekt. Ook hier geldt dat er geen voertuigen in de gootstroom staan, waardoor voor toxische vloeistoffen de gootstroom niet wordt meegenomen in het uitstroomgebied. Hiervoor geldt dan $L_{3,4hor} = 12$ ($L_3 = L_4 = 6$).

Gatgrootte 1, hellend deel, 3 rijstroken:

- Uitstroming 0,018 m³/min (0,3 l/s); met een soortelijk gewicht van benzine van 720 kg/m³ komt dit neer op circa 12,96 kg/min = 0,216 kg/s;
- Langshelling wegdek 4%;
- Dwarshelling wegdek 1:40 = 2,5%;
- Uitstroompunt: op het hoogste punt van de dwarsdoorsnede;
- Wegbreedte (af te leggen afstand tot de wand): 13,5 m;
- Totaal uitgestroomde hoeveelheid 0,5 m³.

Bij een uitstroming van 0,216 kg/s ontstaat volgens de formule van Webber een plasdikte (R) van 0,0023 m. Hieruit volgt $C = 18 * \log(12 * 0,0023 / 0,002) = 20,5$. Bij een dwarshelling van 2,5% volgt hieruit een snelheid in dwarsrichting van $v = 20,5 * 0,0023^{0,5} * 0,025^{0,5} = 0,16$ m/s. De tijd van een vloeistofdeeltje in de benzineplas om de zijkant te bereiken bedraagt dan: $13,5 / 0,16 = 84$ s. Vanwege de langshelling van 4% wordt in lengterichting in diezelfde tijd een afstand afgelegd van $13,5 * 0,04^{0,5} / 0,025^{0,5} = 17,07$ m.

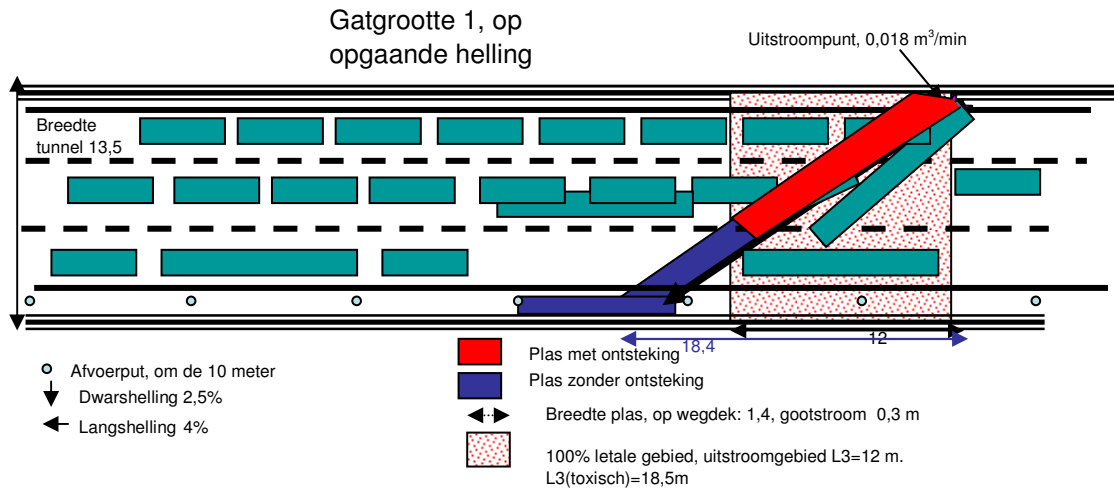
De breedte van de plas wordt wederom berekend met de formule van Ignason: $B = 1,38$ m
De lengte van de plas is na 84 s 21,76 m. Na 1 minuut is $A = 1,38 * 21,76 * 60 / 84 = 21,5$ m².

Gootstroom

Net als bij gatgrootte 2 zal een 'gootstroom' ontstaan. Bij een uitstroming van 0,018 m³/min volgt: breedte gootstroom $b = 0,3$ m en $v = 0,29$ m/s. Dit is de stroomsnelheid naar de eerste put. Deze put heeft voldoende capaciteit om alle vloeistof op te nemen.

Na 84 s is in lengterichting 17 m afgelegd. Er vanuit gaande dat de uitstroming precies tussen 2 putten plaatsvindt, bevindt de 1^e put zich op 25 m. Deze 1^e put wordt bereikt na $84 + 8 / 0,29 = 112$ s. Na 1

minuut heeft het front van de uitstroming dus nog niet de zijkant van de weg bereikt; in lengterichting is na 1 minuut 12 m afgelegd. In Figuur 8-5 is dit geïllustreerd:



Figuur 8-5 Uitstroming gatgrootte 1 op opgaande helling.

Voor het uitstroomgebied wordt voor brandbare vloeistoffen $L_{3,4\text{hel}} = 12$ m genomen (inclusief het deel voor de warmtestraling) en voor de toxische vloeistoffen 18,4 meter (afgerond op $L_{3,4\text{hel}} = 20$ m).

De plas heeft hier de vorm van een 0,5 m breed (deze breedte geldt bij de berekening met de formule van Chézy) en 2,3 mm dik spoor. Na 1 minuut is dit spoor circa 14 m lang. Per meter lengte bevat dit: $0,5$ (breedte) * $0,0023$ (dikte) * 1 (lengte) * 720 (kg/m³) * $43,5$ (MJ/kg) = 36 MJ. Er zal na ontsteking een plasbrand ontstaan met een vermogen van circa 2 MW per m², dus circa 1 MW per m¹. De brandduur van het spoor is dan ongeveer 36 seconden. Omdat het spoor inmiddels langer is geworden zal de brandduur van het spoor langer worden, de brandduur zal korter zijn dan 1 minuut en het vermogen van de brand zal kleiner blijven dan 25 MW. Daarna zal de nog steeds uitstromende vloeistof blijven branden. Het is twijfelachtig of de resterende brand voldoende groot is om ertoe te leiden dat het dak van de tank zal smelten. Zo ja dan blijft er een brandende bak benzine (met een vermogen van circa 50 MW) over. Ook kunnen voertuigen die in de plas stonden in brand zijn geraakt. Voor de modellering van de brand wordt gebruik gemaakt van de CFD-resultaten van de 30 m² plasbrand.

Gatgrootte 1, horizontaal deel, 3 rijstroken:

- Uitstroming 0,018m³/min (0,3 l/s); met een soortelijk gewicht van benzine van 720 kg/m³ komt dit neer op circa 12,96 kg/min. = 0,216 kg/s;
- Langshelling wegdek 0%;
- Dwarshelling wegdek 1:40 = 2,5%;
- Uitstroompunt: op het hoogste punt van de dwarsdoorsnede;
- Wegbreedte (af te leggen afstand tot de wand): 13,5 m;
- Totaal uitgestroomde hoeveelheid 0,5 m³.

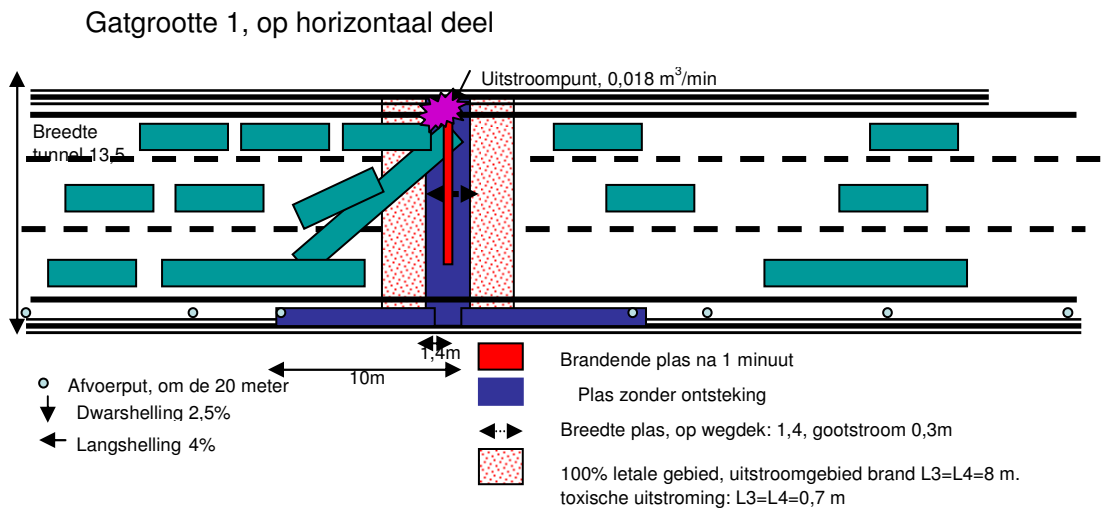
Net als bij het hellend deel geldt in dwarsrichting: $v = 0,16$ m/s, de tijd om de goot te bereiken is 84 s en een breedte van de plas van 1,38 m.

Na 1 minuut geldt voor het plasoppervlak $A = 1,38 * 13,5 * 60 / 84 = 13,3$ m².

Gootstroom

Net als bij gatgrootte 2 zal een 'gootstroom' ontstaan. Bij een uitstroming van 0,009 m³/min naar beide zijden en $l = 0,001$ volgt: breedte gootstroom $b = 0,4$ m en $v = 0,07$ m/s. Dit is de stroomsnelheid naar de eerste put. Deze put heeft voldoende capaciteit om alle vloeistof op te nemen.

Na 84 s is in lengterichting 0,7 m afgelegd. Er vanuit gaande dat de uitstroming precies tussen 2 putten plaatsvindt, bevindt de 1^e put zich op 10 m. Deze 1^e put wordt bereikt na $84 + 9,3 / 0,07 = 217$ s. Na 1 minuut heeft het front van de uitstroming nog niet de zijkant van de weg bereikt. In Figuur 8-6 is het uitstroomgebied geïllustreerd:



Figuur 8-6 Uitstroming gatgrootte 1 op horizontaal deel.

In het model wordt voor een brand het uitstroomgebied gelijk gesteld aan het de plasbreedte + het gebied van de warmtestraling. Voor gatgrootte 1 komt dit neer op een uitstroomgebied van 16 meter met $L_{3,4\text{hor}} = 16$ m ($L_3 = L_4 = 8$). Voor toxische vloeistoffen is het uitstroomgebied gelijk aan de breedte van de plas: 1,4 meter (wordt afgerond op 2 meter, dus $L_{3,4\text{hor}} = 2$ m, $L_3 = L_4 = 1$).

Gatgrootte 3a, hellend deel, 3 rijstroken:

- Uitstroming 6 m³/min (100 l/s); met een soortelijk gewicht van benzine van 720 kg/m³ komt dit neer op circa 4320 kg/min = 72 kg/s;
- Langshelling wegdek 4%;
- Dwarshelling wegdek 1:40 = 2,5%;
- Uitstroompunt: op het hoogste punt van de dwarsdoorsnede;
- Wegbreedte (af te leggen afstand tot de wand): 13,5 m;
- Totaal uitgestroomde hoeveelheid 20 m³.

Bij een uitstroming van 72 kg/s ontstaat volgens de formule van Webber een plasdikte (R) van 0,0096 m. Hieruit volgt $C = 18 * \log(12 * 0,0096 / 0,002) = 31,7$. Bij een dwarshelling van 2,5% volgt hieruit een snelheid in dwarsrichting van $v = 31,7 * 0,0096^{0,5} * 0,025^{0,5} = 0,49$ m/s. De tijd van een vloeistofdeeltje in de benzineplas om de zijkant te bereiken bedraagt dan: $13,5 / 0,49 = 28$ s. Vanwege de langshelling van 4% wordt in lengterichting in diezelfde tijd een afstand afgelegd van $13,5 * 0,04^{0,5} / 0,025^{0,5} = 17,07$ m.

De breedte van de plas wordt wederom berekend met de formule van Ignason: $B = 19,96$ m
De lengte van de plas is 21,76 m. $A = 19,96 * 21,76 = 434$ m².

Gootstroom

Net als bij gatgrootte 2 zal een 'gootstroom' ontstaan. Bij een uitstroming van 6 m³/min volgt: breedte gootstroom $b = 2,4$ m en $v = 1,4$ m/s. Dit is de stroomsnelheid naar de eerste put. Tussen deze put en de 2^e put geldt dan: $q = 5,5$ m³/min, $b = 2,3$ m en $v = 1,37$ m/s. Tussen de 2^e en de 3^e put geldt dan: $q = 5$ m³/min, $b = 2,23$ m en $v = 1,34$ m/s. Tussen de 3^e en de 4^e put: $q = 4,5$ m³/min, $b = 2,15$ m en $v = 1,3$ m/s. Tussen de 4^e en de 5^e put: $q = 4$ m³/min, $b = 2,06$ m en $v = 1,26$ m/s. Tussen de 5^e en de 6^e put: $q = 3,5$ m³/min, $b = 1,96$ m en $v = 1,22$ m/s. Tussen de 6^e en de 7^e put: $q = 3$ m³/min, $b = 1,85$ m en $v =$

1,17 m/s. Tussen de 7^e en de 8^e put: $q = 2,5 \text{ m}^3/\text{min}$, $b = 1,73 \text{ m}$ en $v = 1,12 \text{ m/s}$. Vanaf de 8^e put is het riool volledig gevuld en geldt: $q = 2 \text{ m}^3/\text{min}$, $b = 1,6 \text{ m}$ en $v = 1,06 \text{ m/s}$.

Vervolgens zal de stroom in de goot nog doorstromen totdat de toevoer stopt en het riool de vloeistof heeft verwerkt.

Na 28 s is in lengterichting 17 m afgelegd in een brede stroom. Er vanuit gaande dat de uitstroming precies tussen 2 putten plaatsvindt, bevindt de 1^e put waarin vloeistof zal verdwijnen zich op 15 m. De 8^e put bevindt zich op 85 m. Deze put wordt na 83 s bereikt. Na 83 s wordt de afvoer van het riool maximaal ($4 \text{ m}^3/\text{min}$). Na 1 minuut bevindt het front van de gootstroom zich op 60 m. Voor brandbare vloeistoffen is het uitstroomgebied daarmee $L_{3,4\text{hel}} = 60 \text{ m}$ ($L_3 = L_4 = 60 \text{ m}$).

Brand bij gatgrootte 3a

Afhankelijk van de aanwezigheid van ontstekingsbronnen boven de plas kan er ontsteking plaatsvinden. Als ontsteking plaatsvindt dan zal dit meestal snel gebeuren; aangenomen wordt dat ontsteking na precies 1 minuut plaatsvindt. Bij ontsteking van de plas zal een plasbrand ontstaan met een vermogen van circa 2 MW per m^2 mits er voldoende zuurstof kan worden aangevoerd. Bij deze uitstroming van $6 \text{ m}^3/\text{min}$ is dus een plasbrand van meer dan 300 MW mogelijk. Het vermogen wordt in dit geval geheel bepaald door de hoeveelheid beschikbare zuurstof.

Het verloop van dit scenario ziet er globaal zo uit: de uitstromende hoeveelheid van 20 m^3 stroomt in $20 / 6 * 60 = 200 \text{ s}$ uit. Het riool kan 4 m^3 per minuut afvoeren. Bij een aangenomen brandgrootte van 300 MW wordt dan $300 * 60 = 18000 \text{ MJ}$ per minuut verbrand. Dit is ongeveer $18000 / 43,5 = 414 \text{ kg}$ en $414 / 720 = 0,57 \text{ m}^3$ per minuut. Voorbij de 8^e put is de situatie globaal als volgt: er stroomt bijna $1,5 \text{ m}^3$ per minuut over het wegdek in een gootstroom van circa 1,5 m breed en met een snelheid van circa 1 m/s. Omdat de stroomsnelheid in het riool veel groter is dan de stroomsnelheid in de gootstroom, is na 283 s in totaal $13,3 \text{ m}^3$ door de putten 1 t/m 8 in het riool verdwenen en bevindt er zich voorbij de 8^e put een $(283 - 83) \text{ s} * \text{ca } 1 \text{ m/s} =$ bijna 200 m lange gootstroom waarvan, door de hogere stroomsnelheid in het riool, een deel ondertussen ook in het riool is verdwenen. Deze gootstroom zal nog langer worden maar daarna snel in het riool verdwijnen. Inmiddels zal één zijkant van de gekantelde tankwagen zijn gesmolten waardoor het restant van de benzine in de tankwagen in de ontstane 'schaal' opbrandt met een vermogen van circa 50 MW. Ook zullen de voertuigen die in de plas stonden in brand zijn geraakt. In het model wordt voor de modellering van de brandgevolgen de resultaten van de CFD-analyse van een 1200 m^2 plas gebruikt (zie hoofdstuk 7).

Uitstroming toxische vloeistof

Omdat de gootstroom breed is (in het begin meer dan 2 m) kunnen er ook voertuigen in de gootstroom staan. Daarom wordt voor toxische vloeistoffen de lengte van de gootstroom bij gatgrootte 3 wel bij de lengte van het uitstroomgebied opgeteld. Voor de lengte van het uitstroomgebied wordt dan aangehouden: 85 (afstand tot 8^e put) + 200 (lengte gootstroom voorbij 8^e put na 283 s) + 65 (geschatte extra lengte waarover de gootstroom nog verder zal lopen) $L_{3,4\text{hel}} = 350 \text{ m}$, $L_3 = L_4 = 350$. Deze lengte wordt overigens gemaximeerd door de lengte van de helling zelf + de lengte van het horizontale deel. Omdat uitgegaan wordt van uitstroming halverwege de helling (zie paragraaf 5.4) is de plaslengte maximaal gelijk aan de halve hellingslengte + de lengte van het horizontale deel.

Gatgrootte 3a, horizontaal deel, 3 rijstroken:

- Uitstroming $6 \text{ m}^3/\text{min}$ (100 l/s); met een soortelijk gewicht benzine van $720 \text{ kg}/\text{m}^3$ komt dit neer op circa $4320 \text{ kg}/\text{min} = 72 \text{ kg/s}$;
- Langshelling wegdek 0%;
- Dwarshelling wegdek 1:40 = 2,5%;
- Uitstroompunt: op het hoogste punt van de dwarsdoorsnede;
- Wegbreedte (af te leggen afstand tot de wand): 13,5 m;
- Totaal uitgestroomde hoeveelheid 20 m^3 .

Net als bij het hellend deel geldt in dwarsrichting: $v = 0,49 \text{ m/s}$, de tijd om de goot te bereiken is 28 s.

De breedte van de plas wordt wederom berekend met de formule van Ignason: $B = 19,96$ m
De lengte van de plas is $13,5$ m. $A = 19,96 * 13,5 = 269$ m².

Gootstroom

Net als bij gatgrootte 2 zal een 'gootstroom' ontstaan. De breedte van de plas is bijna 20 meter. Er vanuit gaande dat de uitstroming precies tussen 2 putten plaatsvindt, is dus net de eerste put bereikt (aan beide kanten). Voor de verdere stroming van $2,5$ m³/min naar beide zijden volgt bij $l = 0,001$: breedte gootstroom $b = 3,4$ m en $v = 0,29$ m/s. De 2^e put wordt bereikt na $20 / 0,29 + 28 = 97$ s. Voorbij deze put is er sprake van 2 m³/min en geldt $b = 3,1$ m en $v = 0,27$ m/s. De 3^e put wordt bereikt na $20 / 0,27 + 97 = 171$ s. Voorbij deze put is er sprake van $1,5$ m³/min en geldt $b = 2,8$ m en $v = 0,25$ m/s. De 4^e put wordt bereikt na $20 / 0,25 + 171 = 251$ s. Voorbij de 4^e put is er sprake van een volledig gevuld riool en een gootstroom van 1 m³/min met $b = 2,4$ m en $v = 0,23$ m/s.

Na 1 minuut bevindt het front van de gootstroom zich op $(60 - 28) * 0,29 + 10 = 19$ m. Voor gatgrootte 3a komt dit neer op een uitstroomgebied van 38 m, afgerond op $L_{3,4\text{hor}} = 40$ m ($L_3 = L_4 = 20$).

Het verloop van dit scenario ziet er globaal zo uit: de uitstromende hoeveelheid van 20 m³ stroomt in $20 / 6 * 60 = 200$ s uit. Het riool kan 4 m³ per minuut afvoeren. Bij een aangenomen brandgrootte van 300 MW wordt dan $300 * 60 = 18000$ MJ per minuut verbrand. Dit is ongeveer $18000 / 43,5 = 414$ kg en $414 / 720 = 0,57$ m³ per minuut. Voorbij de 4^e put aan weerszijden is de situatie globaal als volgt: er stroomt bijna $0,75$ m³ per minuut over het wegdek in een gootstroom van circa $2,2$ m breed en met een snelheid van circa $0,21$ m/s. Na 251 s is er door put 1 $(251 - 28) = 223$ s lang vloeistof afgevoerd met een snelheid van $0,5$ m³ per minuut; door put 2 $(251 - 97) = 154$ s en put 3 $(251 - 171) = 80$ s. In totaal is dan aan elke kant afgevoerd $457 / 60 * 0,5 = 3,8$ m³. De resterende hoeveelheid $(10 - 3,8 = 6,2$ per kant) zal daarna, in naar schatting ongeveer 4 minuten tijd, worden afgevoerd door de putten 1 t/m 5 . Inmiddels zal één zijkant van de gekantelde tankwagen zijn gesmolten waardoor het restant van de benzine in de tankwagen in de ontstane 'schaal' opbrandt met een vermogen van circa 50 MW. Ook zullen de voertuigen die in de plas stonden in brand zijn geraakt. In het model wordt voor de modellering van de brandgevolgen de resultaten van de CFD-analyse van een 1200 m² plas gebruikt (zie hoofdstuk 7).

Uitstroming toxische vloeistof

Uit het bovenstaand aangegeven verloop van het scenario volgt dat de uitstroming zich tot maximaal de 5^e put aan weerszijden van de uitstrooplek zal uitstrekken. De 5^e put bevindt zich op 90 m vanaf de uitstrooplek. Voor toxische vloeistoffen wordt daarom aangehouden $L_{3,4\text{hor}} = 180$ m ($L_3 = L_4 = 90$).

Gatgrootte 3b, hellend deel, 3 rijstroken:

- Uitstroming 12 m³/min (200 l/s); met een soortelijk gewicht benzine van 720 kg/m³ komt dit neer op circa 8640 kg/min = 144 kg/s;
- Langshelling wegdek 4% ;
- Dwarshelling wegdek $1:40 = 2,5\%$;
- Uitstroompunt: op het hoogste punt van de dwarsdoorsnede;
- Wegbreedte (af te leggen afstand tot de wand): $13,5$ m;
- Totaal uitgestroomde hoeveelheid 20 m³.

Bij een uitstroming van 144 kg/s ontstaat volgens de formule van Webber een plasdikte (R) van $0,0114$ m. Hieruit volgt $C = 18 * \log(12 * 0,0114 / 0,002) = 33$. Bij een dwarshelling van $2,5\%$ volgt hieruit een snelheid in dwarsrichting van $v = 33 * 0,0114^{0,5} * 0,025^{0,5} = 0,56$ m/s. De tijd van een vloeistofdeeltje in de benzineplas om de goot te bereiken bedraagt dan: $13,5 / 0,56 = 24$ s. Vanwege de langshelling van 4% wordt in lengterichting in diezelfde tijd een afstand afgelegd van $13,5 * 0,04^{0,5} / 0,025^{0,5} = 17,07$ m.

De breedte van de plas wordt berekend met de formule van Ignason: $B = 27,5$ m. De lengte van de plas is $21,76$ m. $A = 27,5 * 21,76 = 598$ m².

Gootstroom

Net als bij gatgrootte 2 zal een 'gootstroom' ontstaan. Na 24 s is in lengterichting 17 m afgelegd in een brede stroom. Er vanuit gaande dat de uitstroming precies tussen 2 putten plaatsvindt, bevindt de 1^e put waarin vloeistof zal verdwijnen zich op 15 m. Tussen deze put en de 2^e put geldt dan: $q = 11,5 \text{ m}^3/\text{min}$, $b = 3,05 \text{ m}$ en $v = 1,65 \text{ m/s}$. Vanaf deze 2^e put nemen de breedte en de snelheid af. Vanaf de 8^e put is het riool volledig gevuld en geldt: $q = 8 \text{ m}^3/\text{min}$, $b = 2,65 \text{ m}$ en $v = 1,5 \text{ m/s}$.

De 8^e put bevindt zich op 85 m. Deze put wordt na 65 s bereikt. Na 1 minuut bevindt het front van de gootstroom zich op bijna 80 m, $L_{3,4\text{hel}} = 80 \text{ m}$ ($L_3 = L_4 = 80$).

De brand die bij gatgrootte 3b kan ontstaan, zal qua vermogen vrijwel gelijk zijn als die bij gatgrootte 3a omdat het vermogen geheel wordt bepaald door de hoeveelheid beschikbare zuurstof. Het verloop van dit scenario ziet er globaal hetzelfde uit als bij scenario 3a; de uitstromende hoeveelheid van 20 m^3 stroomt nu echter in $20 / 12 * 60 = 100 \text{ s}$ uit. Het riool kan 4 m^3 per minuut afvoeren. Voorbij de 8^e put is de situatie globaal als volgt: er stroomt bijna $7,5 \text{ m}^3$ per minuut over het wegdek in een gootstroom van circa $2,5 \text{ m}$ breed en met een snelheid van circa $1,5 \text{ m/s}$. Omdat deze stroomsnelheid ongeveer $1,5$ zo groot is als bij gatgrootte 3a zal ook de gootstroom voorbij de 8^e put ongeveer $1,5$ keer zo lang worden, dus bijna 300 m . Voor de lengte van het uitstroomgebied van toxische vloeistoffen wordt aangehouden $L_{3,4\text{hel}} = 500 \text{ m}$ ($L_3 = L_4 = 500$); dit is de afstand tot de 8^e put + ruim $1,5$ keer de bij gatgrootte 3a aangehouden lengte van de gootstroom.

Gatgrootte 3b, horizontaal deel, 3 rijstroken:

- Uitstroming $12 \text{ m}^3/\text{min}$ (200 l/s); met een soortelijk gewicht benzine van 720 kg/m^3 komt dit neer op circa 8640 kg/min . = 144 kg/s ;
- Langshelling wegdek 0% ;
- Dwarshelling wegdek $1:40 = 2,5\%$;
- Uitstroompunt: op het hoogste punt van de dwarsdoorsnede;
- Wegbreedte (af te leggen afstand tot de wand): $13,5 \text{ m}$;
- Totaal uitgestroomde hoeveelheid 20 m^3 .

Net als bij het hellend deel geldt in dwarsrichting: $v = 0,56 \text{ m/s}$, de tijd om de goot te bereiken is 24 s .

Voor de breedte van de plas geldt $B = 27,5 \text{ m}$. De lengte van de plas is $13,5 \text{ m}$. hieruit volgt $A = 13,5 * 27,5 = 371 \text{ m}^2$.

Gootstroom

Na 24 s is in lengterichting bijna 14 m afgelegd. Er vanuit gaande dat de uitstroming precies tussen 2 putten plaatsvindt, is dus de eerste put bereikt. Voor de verdere stroming van $5,5 \text{ m}^3/\text{min}$ naar beide zijden en $l = 0,001$ volgt: breedte gootstroom $b = 4,6 \text{ m}$ en $v = 0,35 \text{ m/s}$. De 2^e put wordt bereikt na $16 / 0,35 + 24 = 70 \text{ s}$. Voorbij deze put is er sprake van $5 \text{ m}^3/\text{min}$ en geldt $b = 4,45 \text{ m}$ en $v = 0,34 \text{ m/s}$. De 3^e put wordt bereikt na $20 / 0,34 + 70 = 129 \text{ s}$. Voorbij deze put is er sprake van $4,5 \text{ m}^3/\text{min}$ en geldt $b = 4,25 \text{ m}$ en $v = 0,33 \text{ m/s}$. De 4^e put wordt bereikt na $20 / 0,33 + 129 = 190 \text{ s}$. Voorbij de 4^e put is er sprake van een volledig gevuld riool en een gootstroom van $4 \text{ m}^3/\text{min}$ met $b = 4,1 \text{ m}$ en $v = 0,32 \text{ m/s}$. De 5^e put wordt bereikt na $20 / 0,32 + 190 = 252 \text{ s}$.

Na 1 minuut bevindt het front van de gootstroom zich op $(60 - 24) * 0,35 + 14 = 27 \text{ m}$. Aangehouden wordt afgerond $L_{3,4\text{hor}} = 60 \text{ m}$ ($L_3 = L_4 = 30$).

Het verloop van dit scenario ziet er globaal zo uit: de uitstromende hoeveelheid van 20 m^3 stroomt in $20 / 12 * 60 = 100 \text{ s}$ uit. Het riool kan 4 m^3 per minuut afvoeren. Bij een aangenomen brandgrootte van 300 MW wordt dan $300 * 60 = 18000 \text{ MJ}$ per minuut verbrand. Dit is ongeveer $18000 / 43,5 = 414 \text{ kg}$ en $414 / 720 = 0,57 \text{ m}^3$ per minuut. Voorbij de 4^e put aan weerszijden is de situatie globaal als volgt: er stroomt bijna $3,75 \text{ m}^3$ per minuut over het wegdek in een gootstroom van circa 4 m breed en met een snelheid van circa $0,32 \text{ m/s}$. Na 252 s is er door put 1 $(252 - 24) = 228 \text{ s}$ lang vloeistof afgevoerd met een snelheid van $0,5 \text{ m}^3$ per minuut; door put 2 $(252 - 70) = 182 \text{ s}$, put 3 $(252 - 129) = 123 \text{ s}$ en put 4

$(252 - 190) = 62$ s. In totaal is dan aan elke kant afgevoerd $595 / 60 * 0,5 = 5$ m³. De resterende hoeveelheid ($10 - 5 = 5$ per kant) zal daarna, in naar schatting ongeveer 3 minuten tijd, worden afgevoerd door de putten 1 t/m 6. Inmiddels zal één zijkant van de gekantelde tankwagens zijn gesmolten waardoor het restant van de benzine in de tankwagens in de ontstane 'schaal' opbrandt met een vermogen van circa 50 MW. Ook zullen de voertuigen die in de plas stonden in brand zijn geraakt. In het model wordt voor de modellering van de brandgevolgen de resultaten van de CFD-analyse van een 1200 m² plas gebruikt (zie hoofdstuk 7).

Uitstroming toxische vloeistof

Op basis van het bovenstaand aangegeven verloop van het scenario wordt verwacht dat de uitstroming zich tot maximaal de 7^e put aan weerszijden van de uitstrooplek zal uitstrekken. De 7^e put bevindt zich op 130 m vanaf de uitstrooplek. Voor toxische vloeistoffen wordt daarom aangehouden $L_{3,4hor} = 260$ m ($L_3 = L_4 = 130$).

Bovenstaande berekeningen leiden tot de in Tabel 8-1 aangegeven uitstroo lengten $L_{3,4hor}$ en $L_{3,4hel}$. De waarden in de tabel die zijn voorzien van een naam (zoals $L_{hor,k,LF}$) zijn de defaultwaarden die in Tabel 3-9 zijn aangegeven. Uitgangspunt hierbij is een rioolcapaciteit van 4 m³ per minuut, een inlaatcapaciteit van 0,5 m³ per minuut per put en een hart op hart afstand van de putten van 20 m op het horizontale deel en 10 m op het hellende deel.

Tabel 8-1: Plaslengte (m) afhankelijk van uitstroomhoeveelheid.

Uitstroming	Brandbare vloeistoffen		Toxische vloeistoffen	
	Horizontaal deel	Hellend deel	Horizontaal deel	Hellend deel
	$L_{3,4hor}$	$L_{3,4hel}$	$L_{3,4hor}$	$L_{3,4hel}$
Gatgrootte 1	$L_{hor,k,LF} = 16$	$L_{hel,k,LF} = 12$	$L_{hor,k,LT} = 2$	$L_{hel,k,LT} = 20$
Gatgrootte 2	$L_{hor,g,LF} = 26$	$L_{hel,g,LF} = 40$	$L_{hor,g,LT} = 12$	$L_{hel,g,LT} = 30$
Gatgrootte 3a	40	60	180	350
Gatgrootte 3b	$L_{hor,i,LF} = 60$	$L_{hel,i,LF} = 80$	$L_{hor,i,LT} = 260$	$L_{hel,g,LT} = 500$

Voor het model wordt, ter vereenvoudiging en conservatief, bij de instantane uitstroming alleen gatgrootte 3b meegenomen (uitstroming bij gatgrootte 3a wordt dus gelijk verondersteld aan 3a).

Voor de bepaling van de schade is het van belang waar in de tunnel de plas ligt. De helling bepaalt of de plas geheel achter het incident (stijgende helling), geheel voor het incident (dalende helling) of rondom het incident ligt. Voor scenario's die in de staart van de file optreden dient daarbij nog te worden bepaald of dit op het opgaande, horizontale of dalende deel plaatsvindt. Omdat uitgegaan wordt van uitstroming halverwege de helling (zie paragraaf 5.4) is de plaslengte maximaal gelijk aan de halve hellingslengte + de lengte van het horizontale deel. Voor L_3 geldt dan:

als $G_{stofklasse} = LF$ of $G_{stofklasse} = LT$ en $G_{uitstroming} <> L_{geen}$: (8-7)

Als $G_{plaats} = \text{Neer}$ $L_3 = 0 + L_{3warmtestraling}$

Als $G_{plaats} = \text{Horizontaal}$ $L_3 = \min\left(\frac{L_{3,4hor}}{2}; \frac{L_{hor}}{2}\right)$

Als $G_{plaats} = \text{Op}$ en $0,5L_{op} \geq L_{3,4hel}$ $L_3 = L_{3,4hel}$

Als $G_{plaats} = \text{Op}$ en $0,5L_{op} < L_{3,4hel}$ $L_3 = 0,5L_{op} + \min((L_{3,4hel} - 0,5L_{op}); L_{hor})$

Anders ($G_{plaats} = \text{In file}$)

Als $L_{fileben} \leq L_{op}$ en $L_{op} - L_{fileben} \geq L_{3,4hel}$ $L_3 = L_{3,4hel}$

Als $L_{fileben} \leq L_{op}$ en $L_{op} - L_{fileben} < L_{3,4hel}$ $L_3 = L_{op} - L_{fileben} + \min((L_{3,4hel} - (L_{op} - L_{fileben})); L_{hor})$

$$\begin{aligned} \text{Als } L_{op} < L_{fileben} \leq L_{op} + L_{hor} & \quad \min(L_{op} + L_{hor} - L_{fileben}; \frac{L_{3,4hor}}{2}) \\ \text{Als } L_{op} + L_{hor} < L_{fileben} < L_{buis} & \quad L_3 = 0 + L_{3warmtestraling} \end{aligned}$$

Hierin is $L_{3warmtestraling}$ de extra lengte die wordt meegerekend om de invloed van warmtestraling in rekening te brengen. Voor $L_{3warmtestraling}$ geldt:

$$\begin{aligned} \text{als } G_{stofklasse} = \text{LF en } G_{plaats} = \text{Neer} & \quad L_{3warmtestraling} = 7,5 \\ \text{als } G_{stofklasse} = \text{LF en } G_{plaats} = \text{In file en } L_{fileben} > L_{op} + L_{hor} & \quad L_{3warmtestraling} = 7,5 \end{aligned} \quad (8-8)$$

Voor L_4 geldt:

als $G_{stofklasse} = \text{LF}$ of $G_{stofklasse} = \text{LT}$ en $G_{uitstroming} \langle \rangle L_{geen}$:

$$\begin{aligned} \text{Als } G_{plaats} = \text{Neer en } 0,5L_{neer} \geq L_{3,4hel} & \quad L_4 = L_{3,4hel} \\ \text{Als } G_{plaats} = \text{Neer en } 0,5L_{neer} < L_{3,4hel} & \quad L_4 = 0,5L_{neer} + \min((L_{3,4hel} - 0,5L_{neer}); L_{hor}) \\ \text{Als } G_{plaats} = \text{Horizontaal} & \quad L_4 = \min(\frac{L_{3,4hor}}{2}; \frac{L_{hor}}{2}) \\ \text{Als } G_{plaats} = \text{Op} & \quad L_4 = 0 \\ \text{Anders } (G_{plaats} = \text{In file}) & \quad L_4 = 0 \\ \quad \text{Als } L_{fileben} \leq L_{op} & \quad L_4 = 0 \\ \quad \text{Als } L_{op} < L_{fileben} \leq L_{op} + L_{hor} & \quad L_4 = \min(L_{fileben} - L_{op}; \frac{L_{3,4hor}}{2}) \\ \quad \text{Als } L_{op} + L_{hor} < L_{fileben} < L_{buis} & \quad L_4 = \min((L_{fileben} - L_{op}); L_{3,4hel}) \end{aligned} \quad (8-9)$$

8.3.2 Directe ontsteking: plasbrand

Indien de plas onmiddellijk na uitstroming wordt ontstoken zal een plasbrand ontstaan. Het scenario plasbrand gaat gepaard met zeer grote warmteproductie. De hete verbrandingsgassen zullen zich door de tunnel verspreiden.

Op de open weg is de verbrandingssnelheid van benzine in een plas 0,08 tot 0,1 [l/m²s]. In een tunnel is minder zuurstof beschikbaar voor brand, waardoor de verbrandingssnelheid bij kleine branden lager zal zijn (factor 0,52 – 0,65) en bij grote branden nog lager [20]. Bij een dichtheid van 0,72 kg/l en een verbrandingsenthalpie van 43,5 MJ/per kg betekent dit dat per m² 1,3 tot maximaal 2 MW vrijkomt.

Alle aanwezigen binnen de contour van de plas zullen overlijden door het directe vlamcontact; dus geldt: $p_3 = 1$ en $p_4 = 1$.

Door de verspreiding van hete rookgassen kunnen de overige aanwezigen in de tunnel, indien zij niet tijdig vluchten en afhankelijk van de ventilatie, worden blootgesteld aan zeer hete rookgassen en warmtestraling. De modellering van de effecten van brand en de formules voor p_2 en p_5 zijn beschreven in hoofdstuk 7. Voor de plasbranden met plasoppervlakten van 30 m², 300 m² en 1200 m² met ventilatie zijn CFD-berekeningen gedaan. De daarbij behorende parameters zijn opgenomen in Bijlage B. Voor plasbranden zonder ventilatie zijn geen CFD-berekeningen uitgevoerd. Uit de nadere analyse van de CFD-berekeningsresultaten blijkt dat de resultaten van de 1200 m² en de 300 m² plasbrand met ventilatie sterk lijken op de resultaten van de berekeningen van de snelle 200 MW brand met ventilatie. Daarom worden voor de 1200 m² en de 300 m² plasbrand zonder ventilatie dezelfde parameters genomen als voor de 200 MW brand zonder ventilatie. Om dezelfde reden worden voor de 30 m² plasbrand zonder ventilatie de parameters van de 100 MW brand zonder ventilatie genomen.

Bij branden (zonder explosie-effecten) geldt dat de (hete) rookgassen buiten de tunnel snel zullen opstijgen. Buiten de tunnel treden daarom geen effecten op: $L_1 = L_6 = 0$. Voor de berekening van de overlijdenskansen p_2 en p_{5i} , zie hoofdstuk 7.

8.3.3 Vertraagde ontsteking

Plasverdamping

Indien de plas niet direct wordt ontstoken, zal de vloeistof verdampen. Deze damp zal zich in de tunnel verspreiden. De bronterm in kg/s uit de plasverdamping is afhankelijk van de plasgrootte en de verdampingsflux. De verdampingsflux is afhankelijk van de luchtsnelheid in de tunnel en de dampspanning. Met behulp van verdampingsflux en plasgrootte wordt de verdampingssnelheid in kg/s uit de plas bepaald:

$$Q = \Phi \cdot A_{plas} \quad (8-10)$$

met:

Q = verdampingssnelheid ofwel bronterm uit de plas (kg/s)

Φ = verdampingsflux in (kg/m²s), afhankelijk van de dampspanning en de luchtsnelheid in de tunnel

A_{plas} = oppervlakte van de plas in m².

De verdampingssnelheid is berekend voor representatieve plasgrootten van 1200 m², 300 m², 100 m² en 50 m² zie Tabel 8-2.

Tabel 8-2: Verdampingssnelheid van LF2 (pentaan) in kg/s bij 20 °C.

Plasoppervlak (m ²)	ventilatiesnelheid		
	0,1 m/s	2 m/s	5m/s
1200	0,88	7,62	13,99
300	0,23	1,86	3,23
100	0,08	0,62	1,08
50	0,04	0,31	0,54

Dispersie

De verdampte gassen zullen zich in de tunnel verspreiden onder invloed van de (geforceerde) luchtsnelheid in de tunnel. Als ruwe benadering voor de concentratie van de gevormde hoeveelheid damp wordt uitgegaan van [38]:

$$\text{Als } X > 10 \cdot H \quad C = \frac{Q}{U \cdot A} \quad (8-11)$$

$$\text{Als } X \leq 10 \cdot H \quad C = \frac{Q}{0,1 \cdot X \cdot U \cdot B} \quad (8-12)$$

waarin:

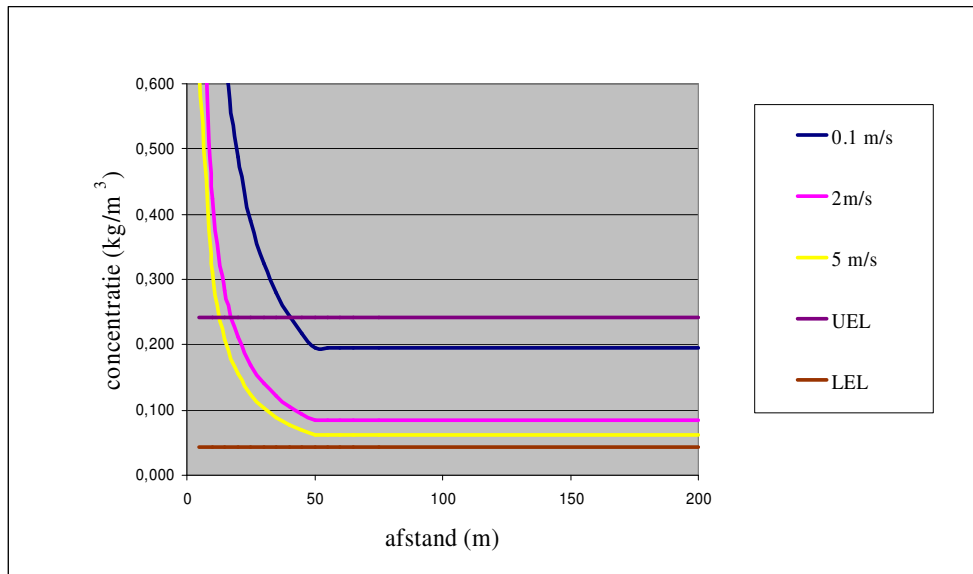
- Q verdampingssnelheid in kg/s,
- U de luchtsnelheid in de tunnelbuis in m/s,
- B de breedte van de tunnelbuis in m,
- H de hoogte van de tunnelbuis in m,
- X de afstand in windafwaartse richting in m,
- A de doorsnede van de tunnelbuis in m².

Met behulp van een (open veld) zwaar gas dispersieberekening in EFFECTS is getoetst of deze benadering toepasbaar en conservatief is voor verspreiding van brandbare dampen in een tunnel (zie

bijlage C). Voor de berekende verdampingssnelheden uit Tabel 8-2 zijn de concentraties van de gaswolk berekend. De berekeningen zijn uitgevoerd voor een tunnel met een breedte van 9 meter. Omdat voor een tunnel van 13,5 m breed (conservatief) ook uitgegaan wordt van een plas over de gehele breedte van de tunnel, mogen de voorbeeldberekeningen voldoende representatief en conservatief worden geacht voor een tunnel met een breedte van meer dan 9 m.

Gaswolkengte bij instantaan vrijkomen

In Figuur 8-7 is te zien dat bij een plas van 1200 m² de concentraties op korte afstand (nog niet volledige opmenging) boven de bovenste explosiegrens liggen en dat verderop (afstand groter dan 10 * H; na volledige opmenging) de concentraties zich in het explosieve gebied zullen bevinden.



Figuur 8-7 Concentratie als functie van de afstand voor 1200 m².

Voor de 1200 m² plas is vervolgens de wolkengte bepaald van de brandbare wolk, die zou kunnen ontstaan, aangenomen dat de wolk niet direct wordt ontstoken. Voor het gevolgenmodel van QRA-tunnels wordt voor vertraagde ontsteking aangenomen dat ontsteking 2 minuten na uitstroming plaatsvindt. Met deze aanname wordt enerzijds bereikt dat er nog personen tijdig de tunnelbuis kunnen verlaten (als de operator tijdig een vluchtinstructie geeft) en anderzijds dat er voldoende tijd beschikbaar is voor het ontwikkelen van een gaswolk, die bij ontsteking tot een explosie leidt. De daarbij behorende wolkengte wordt bepaald met:

$$L_{\text{wolk}} = U \cdot t_{\text{ontsteking}} \quad (8-13)$$

waarbij:

- L_{wolk} lengte van de wolk (m),
- U windsnelheid in de tunnel (m/s),
- $t_{\text{ontsteking}}$ tijdstip waarop ontsteking plaatsvindt (s).

Aangenomen wordt dat tot 2 minuten na het ongeval er een rijwind heerst van 2 m/s. De wolkengte is daarmee na 2 minuten beperkt tot maximaal 240 m. Bij een eerdere ontsteking dan 2 minuten zal de wolk korter zijn. Bij ontsteking van een gaswolk met een lengte van meer dan 10 tunnelhoogtes (> 50 m) zal een deflagratie en mogelijk zelfs een detonatie kunnen optreden [39]. Dit leidt tot 100% letaal letsel in de gehele tunnelbuis. Indien detonatie optreedt, wat bij een aan de rand ontstoken wolk na 20 tunnelhoogtes (100 m) mogelijk is [39], dan bezwijken ook de nevenbuizen en moet ook daar met 100 % letaliteit worden gerekend.

Deflagratie van de gaswolk kan alleen optreden als de gaswolk wordt ontstoken nadat de gaswolk een lengte van meer dan 10 tunnelhoogtes (50 m) heeft bereikt. Bij een rijwind van 2 m/s is dit na 25 seconden al het geval zodat eventuele mechanische ventilatie hiervoor niet van belang is. Indien ontsteking binnen deze 25 s plaatsvindt, zal geen deflagratie optreden en zijn er alleen de gevolgen van een gaswolk verbranding. De kans op ontsteking binnen 25 s kan worden bepaald met de in Bijlage D gegeven formule. Bij de aanwezigheid van 20 voertuigen in de, 50 m lange, file benedenstrooms van het uitstroompunt bedraagt de ontstekingskans 96,4 %. De kans dat de ontsteking later optreedt (met potentiële drukeffecten, deflagratie) is 3,6 %. Een deflagratie betekent 100% sterfte in de gehele tunnelbuis, buiten de tunnel treedt geen sterfte op ($L_7 = L_6 = 0$). Dit wordt in het model in rekening gebracht door voor de defaultwaarden voor de kans ontsteking bij een benedenstroomse file 0,9 voor directe ontsteking en 0,1 voor vertraagde ontsteking aan te houden, zie Tabel 3-10.

Indien er geen file benedenstrooms van het ongeval staat, wordt de kans op ontsteking verwaarloosbaar klein geacht, verondersteld wordt dat de (niet explosievrije) elektrische installatie in de tunnel geen ontsteking zal geven doordat het gas eerst in de armaturen zou moeten doordringen.

De kans dat een gaswolk van 100 m lang met daarin 40 voertuigen na 50 s nog niet is ontstoken bedraagt $2 \cdot 10^{-4}$ %. Een detonatie van de gaswolk hoeft op basis van deze lage kans van optreden niet in de risicoanalyse te worden beschouwd. Dit betekent dat voor alle scenario's met LF geldt:

$$\text{Als } G\text{-stofklasse} = \text{LF} \quad P_{\text{nevenbuis}} = 0 \quad (8-14)$$

Auto's bovenstrooms van het ongeval kunnen op het horizontaal deel en in het opgaande tunneldeel in de plas staan en daardoor ook als ontstekingsbron dienen. Verondersteld wordt dat, doordat deze auto's dicht bij het ongeval staan, de ontsteking snel zal geschieden waardoor er geen deflagratie zal optreden.

Voor ongevallen met een instantane uitstroming met vertraagde ontsteking, gecombineerd met een file benedenstrooms van het ongeval wordt uitgegaan van het optreden van een explosie. De berekening van de overlijdenskansen p_2 en p_5 gebeurt met vergelijking (7-16) waarbij geldt:

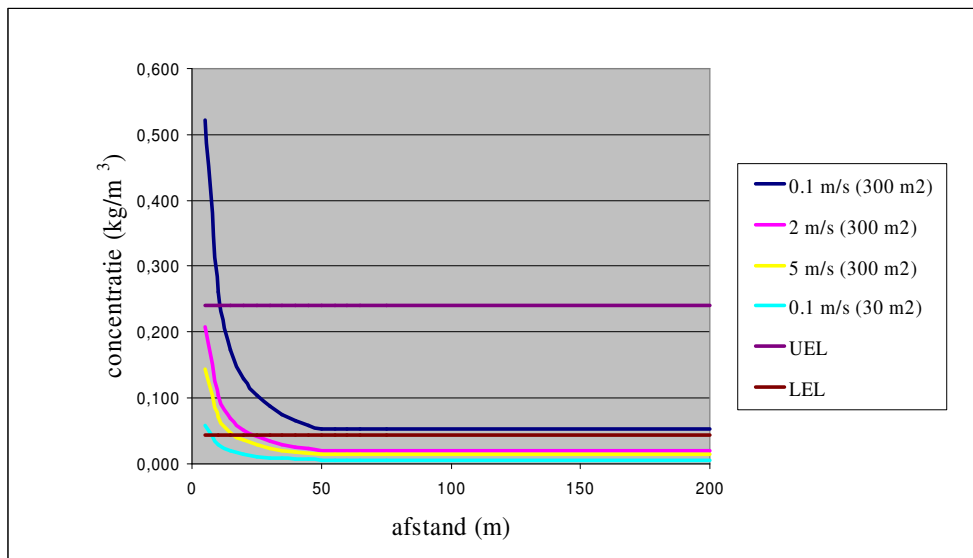
$$\begin{aligned} \text{Als } G\text{-stofklasse} = \text{LF en } G\text{-uitstroming} = \text{Linst en} \\ G\text{-tankbrand} = \text{vertraagd en } G\text{-fileben} = \text{wel fileben:} \end{aligned} \quad T_{\text{expl}} = 2 \quad (8-15)$$

Voor de berekening wordt aangehouden dat bij vertraagde ontsteking er geen sterfte optreedt buiten de tunnelbuis ($L_7 = L_6 = 0$).

De gevolgen van instantane uitstroming met vertraagde ontsteking zonder benedenstroomse file worden gelijk gemodelleerd als een plasbrand met directe ontsteking, zie paragraaf 8.3.2.

Gaswolklengte bij continue uitstroming

Figuur 8-8 laat zien dat bij brandbare dampconcentraties bij plasoppervlakten van 300 m² en 30 m² de concentraties zich bij volledige opmenging niet in het explosieve gebied zullen bevinden, behalve in het geval van een 300 m² plas *zonder* ventilatie. Bij plasoppervlaktes van 30 m² ontstaan geen lange brandbare gaswolken. Explosie effecten worden bij de ontsteking van deze brandbare wolken niet verwacht [39].



Figuur 8-8 Concentratie als functie van de afstand voor 300 m² en 30 m².

Tabel 8-3: Lengte van brandbare gaswolk in de tunnel voor wolkbrand.

Grote continue uitstroming Plasoppervlak 300 m ²			
ventilatiesnelheid	0,1 m/s	2 m/s	5m/s
Lengte explosieve wolk zonder ontsteking (m)	> 100 m	20	15
Lengte wolk bij ontsteking na 2 minuten	12	20	15

Ten aanzien van de schade bij continue uitstroming kunnen de volgende conclusies worden getrokken.

Kleine continue uitstroming

Zowel bij een kleine continue uitstroming (0,5 m³) op een horizontaal gedeelte als op een hellend deel worden geen lange brandbare gaswolken gevormd. Er treedt alleen schade op ten gevolge van de brand. De gevolgen van een kleine continue uitstroming met vertraagde ontsteking worden gelijk gemodelleerd als een kleine continue uitstroming met directe ontsteking, zie paragraaf 8.3.2.

Grote continue uitstroming

Bij een uitstroming van 5 m³ op het hellend deel van de tunnel zal zich een plas vormen van 300 m². Er wordt op een hellend tunnel deel bij 2 en 5 m/s ventilatiesnelheid een brandbare gaswolk gevormd van 20 m lengte, dit is nog binnen de contour van de plas. Binnen deze wolk treedt 100% sterfte op door direct vlamcontact. Verdere schade zal optreden door de verspreiding van de hete rookgassen in de tunnel. Ook bij een (kleinere) plas op een horizontaal deel worden geen brandbare gaswolken buiten de contour van de plas gevormd. Hier is dus de schade veroorzaakt door de plasbrand bepalend. De gevolgen van grote continue uitstroming met vertraagde ontsteking worden daarom gelijk gemodelleerd als een grote continue uitstroming met directe ontsteking, zie paragraaf 8.3.2.

8.4 Scenario's met toxische vloeistoffen

8.4.1 Effecten bij vrijkomen, algemeen

Bij vrijkomen van toxische vloeistoffen wordt een plas gevormd. Door verdamping en dispersie vanuit de plas vormt zich een toxische gaswolk. De concentraties in de gaswolk zijn afhankelijk van de grootte van de plas en de windsnelheid in de tunnel. Afhankelijk van concentratie, blootstellingsduur en toxiciteit van

de vloeistof, kan letsel optreden. Dit kan tijdelijk letsel zijn, maar ook blijvend of zelfs letaal letsel. De takken van de gebeurtenissenboom verschillen van elkaar in de grootte van de uitstroming: zeer klein (0,5 m³), klein (5 m³) en groot (instantaan). De concentraties in de tunnel en daarmee de ernst van het letsel hangt samen met de grootte van de plas.

In het model worden verschillende gebieden onderscheiden waarvoor verschillende schademodeleringen worden gehanteerd:

Bovenstreams van de plas

Personen die zich bovenstreams van de plas bevinden zullen geen letsel oplopen. De toxische wolk zal zich bovenstreams alleen verspreiden bij ontbreken van ventilatie. De snelheid waarmee het zich dan verspreid is dusdanig klein dat verondersteld kan worden dat personen tijdig kunnen vluchten. Aangenomen wordt dat buiten de tunnel de concentratie zo laag is dat geen schade optreedt. Dit betekent dus dat $L_1 = 0$ en $p_2 = 0$.

In de plas

Conservatief wordt aangenomen dat personen die zich in de plas bevinden niet tijdig zullen vluchten. Voor sommige toxische stoffen (zoals propylamine) is dit aannemelijk omdat deze stof tevens bijtend is. Ook bij andere toxische vloeistoffen is het mogelijk dat personen in de auto blijven vanwege de over het algemeen sterk riekende dampen. De blootstellingsduur voor niet vluchtende inzittenden wordt, evenals bij de externe veiligheid, gelimiteerd tot een half uur; verondersteld wordt dat daarna de inzittenden gered zijn of dat er maatregelen aan de bron zijn genomen. Voor de lengte van de plas zie paragraaf 8.3.1 en Tabel 8-1. De overlijdenskans wordt uitgewerkt aan de hand van een voorbeeldberekening in paragraaf 8.4.2.

Benedenstreams

Personen die zich benedenstreams van het incident bevinden, zullen worden blootgesteld aan de toxische stof. De lengte van het gebied benedenstreams van de plas waarbinnen personen letsel ondervinden (de effectafstand) wordt gelijk genomen aan de blootstellingsduur * ventilatiesnelheid. Voor de situatie zonder ventilatie wordt (net als in het gebied bovenstreams van de plas) aangenomen dat de damp zo traag verdampt en zo traag door de tunnel beweegt dat de aanwezige personen tijdig in staat zijn om te vluchten, $L_6 = 0$.

8.4.2 Voorbeeldberekening LT2 (propylamine)

In de voorbeeldberekening worden voor de 3 scenario's (instantaan vrijkomen, vrijkomen van 5 m³ en vrijkomen van 0,5 m³) de plasgrootten gehanteerd zoals deze voor de open weg gelden: respectievelijk 1200 m², 300 m² en 30 m². Tabel 8-4 geeft de geometrie van de plas voor de scenario's van de voorbeeldberekeningen¹⁰.

Tabel 8-4: Scenario's en bijbehorende afmetingen van de plas in de voorbeeldberekeningen.

Scenario	Plasoppervlak (m ²)	Lengte plas (m) bij 13.5 m breedte	Lengte plas (m) bij 9 m breedte
Instantaan vrijkomen	1200	89	133
5 m ³	300	22	33
0,5 m ³	30	2.2	3.3

¹⁰ De voorbeeldberekeningen zijn overgenomen uit het TNO-rapport [13], hierin zijn, in afwijking van het model in QRA-tunnels de plaslengtes wel gevarieerd met de tunnelbreedte. In QRA-tunnels zijn de plaslengtes ter vereenvoudiging, conservatief, bij elke tunnelbreedte gelijk genomen.

Verdamping

De bronterm in kg/s uit de plasverdamping is afhankelijk van het plasoppervlak en de verdampingsflux. De verdampingsflux van propylamine is afhankelijk van de windsnelheid in de tunnel. De verdampingsflux is berekend met EFFECTS [40] en is weergegeven in Tabel 8-5.

Tabel 8-5: Verdampingsflux van propylamine bij verschillende windsnelheden.

Windsnelheid in tunnel (m/s)	0,1	2	5
Verdampingsflux (kg/m ² s)	3,33*10 ⁻⁴	2,91*10 ⁻³	5,32*10 ⁻³

Met behulp van de verdampingsflux en de plasgrootte kan de bronterm (in kg/s) uit de plas worden berekend met vergelijking (8-10). De resultaten voor de voorbeeldberekening zijn in Tabel 8-6 weergegeven.

Tabel 8-6: Bronterm van propylamine bij verschillende ventilatiesnelheden.

Plasoppervlak	Ventilatiesnelheid		
	0,1 m/s	2 m/s	5 m/s
1200 m ²	0,4	3,5	6,4
300 m ²	0,1	0,9	1,6
30 m ²	0,01	0,09	0,16

Dispersie

Het dispersieproces verloopt vergelijkbaar als bij brandbare vloeistoffen, zie paragraaf 8.3.3. Net als daar is ook hier een vergelijkende toets gedaan met een open veld dispersieberekening. De resultaten hiervan zijn gegeven in bijlage C. Op grond daarvan wordt aannemelijk gemaakt dat onderstaande vergelijkingen mogen worden toegepast.

De uniforme concentratie is voor de verschillende scenario's en windsnelheden berekend met vergelijking (8-11). Deze vergelijking is geldig vanaf afstanden groter dan 10 keer de tunnelhoogte.

Omdat bij toxiciteit de concentratie op neushoogte (1,5 m) relevant is, is voor afstanden minder dan 10 keer de tunnelhoogte een aanpassing op vergelijking (8-12) toegepast:

$$\text{Als } X \leq 10 \cdot H \quad C = \frac{Q}{1,5 \cdot U \cdot B} \quad (8-16)$$

Met deze aanpassing nemen we aan dat, mede door wervelingen van obstakels (auto's), de toxische stof zich opmengt in het onderste deel van de tunnel tot 1,5 m hoogte. Dit betekent dat bij een tunnelhoogte van 5 m tot 15 m afstand een lagere concentratie wordt berekend dan met vergelijking (8-12) en bij afstanden groter dan 15 m een hogere concentratie. Deze conservatieve benadering is gekozen om een bovengrens van een maximale concentratie te verkrijgen, voor de situaties waarbij nog geen uniforme concentratieverdeling over de gehele hoogte mag worden verondersteld. De resultaten van een aantal representatieve concentratieberekeningen voor een tunnel van 13,5 m breed zijn weergegeven in Tabel 8-7.

Tabel 8-7: Concentraties voor propylamine in tunnel van 13,5 m breed en 5 m hoog.

Scenario	Instantaan vrijkomen		Vrijkomen 5 m ³		Vrijkomen 0.5 m ³	
Lengte plas	90 m		22 m		2 m	
Plasoppervlak	1200 m ²		300 m ²		30 m ²	
Windsnelheid (m/s)	uniforme concentratie (kg/m ³)	concentratie tot 1,5 m (kg/m ³)	uniforme concentratie (kg/m ³)	concentratie tot 1,5 m (kg/m ³)	uniforme concentratie (kg/m ³)	concentratie tot 1,5 m (kg/m ³)
0,1	0,0592	0,200	0,0148	0,0493	0,00148	0,00493
2	0,0259	0,086	0,006	0,022	0,0006	0,002
5	0,0189	0,063	0,005	0,016	0,0005	0,002

Alleen bij instantane uitstroming is de plaslengte groter dan 10 keer de tunnelhoogte (50 m). Daarom is voor instantane uitstroming de uniforme concentratieberekening de beste benadering. Voor de continue uitstroming is, wegens het nog niet volledig opmengen over de gehele tunnelhoogte de benadering van de concentratie verspreiding tot 1,5 m conservatief; die wordt daarom voor de hele tunnel gebruikt¹¹.

Letaliteitspercentage

Het percentage letaliteit wordt berekend met een probitfunctie.

$$Pr = a + b \cdot \ln(C^n \cdot t) \quad (8-17)$$

waarin:

Pr probit waarde, waaruit de kans op overlijden kan worden bepaald.

a,b,n constanten die de toxiciteit van een stof karakteriseren.

C concentratie (kg/m³)

t blootstellingsduur (s)

Voor propylamine (LT2) geldt: a = 8,5; b = 1 en n = 2 [4]

De kans op letaal letsel, P, wordt vervolgens bepaald met [4]:

$$P = 0.5 \cdot \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{Pr-5}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (8-18)$$

waarin:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

Letaliteit bij instantane uitstroming

In Tabel 8-8 is voor instantane uitstroming van LT2 de berekende blootstellingsduur vermeld waarbij een bepaald percentage letaliteit gaat optreden, voor een tunnelbuis van 13,5 m breed.

Tabel 8-8: Blootstellingsduur tot aangegeven letaliteitspercentage bij instantaan vrijkomen.

Ventilatiesnelheid	Concentratie (kg/m ³)	Blootstellingsduur tot optreden letaliteitspercentage				
		99% letaal	90%	50%	10%	1%
0,1 m/s	0,0592	89	31	9	2	1
2 m/s	0,0259	462	162	45	12	4
5 m/s	0,0189	869	304	85	23	8

Door de daadwerkelijke blootstellingsduur te vergelijken met de waarden in de tabel kan vervolgens het letaliteitspercentage in het effectgebied worden bepaald. De uitstroombuis van instantane uitstroming is aangehouden op 100 s (gatgrootte 3b) en 200 (gatgrootte 3a), zie paragraaf 8.3.1. Personen in de plas worden minstens gedurende die tijd blootgesteld aan een concentratie die, omdat de ventilatiesnelheid in de eerste minuten niet hoog is, leidt tot meer dan 90 % letaliteit (zie Tabel 8-8). Voor instantaan vrijkomen wordt daarom in de plas conservatief 100 % letaal letsel aangehouden:

$$\text{Als } G_{\text{stofklasse}} = \text{LT en } G_{\text{uitstroming}} = \text{Linst} \quad p_3 = p_4 = 1 \quad (8-19)$$

¹¹ Men zou een minder conservatieve benadering kunnen nemen door voor de continue uitstroombuis scenario's tot op 50 m afstand (10 tunnelhoogtes) de concentratieverspreiding tot 1,5 m te gebruiken en op afstanden groter dan 50 m de uniforme concentratie te gebruiken.

Zonder ventilatie treedt buiten de plas vanwege het kleine effectgebied geen letaliteit op. Voordat de schadelijke concentraties buiten de plas komen zijn de aanwezigen al gaan vluchten en worden ze niet meer ingehaald door de gaswolk aangezien de ventilatiesnelheid lager is dan de vluchtsnelheid. Uit Tabel 8-8 is af te lezen dat bij een ventilatiesnelheid van 2 m/s na circa 160 s blootstelling 90% letaliteit geldt. Dit resultaat is niet erg gevoelig voor veranderingen in tunnelbreedte. In het model wordt bij ventilatie 90% letaal letsel aangenomen benedenstrooms van het uitstroompunt. Buiten de tunnel wordt geen letaliteit verwacht door de snelle verdunning en de mogelijkheden om te kunnen vluchten uit de pluim.

Daarom wordt aangehouden:

$$\begin{aligned} \text{Als } G_{\text{stofklasse}} = \text{LT en } G_{\text{uitstroming}} = \text{Linst en } T_{\text{vent}} > 4 & \quad p_5 = 0 \\ \text{Als } G_{\text{stofklasse}} = \text{LT en } G_{\text{uitstroming}} = \text{Linst en } T_{\text{vent}} \leq 4 & \quad p_5 = 0,9 \end{aligned} \quad (8-20)$$

Dit resultaat kan worden overgenomen voor alle tunnels, ongeacht de tunnelbreedte of helling, aangezien de plasgrootte bij instantaan vrijkomen altijd groot is.

Letaliteit bij continu vrijkomen 300 m² plas

In Tabel 8-9 is voor grote continue uitstroming van LT2 (plas 300 m²) de berekende blootstellingsduur vermeld waarbij een bepaald percentage letaliteit gaat optreden, voor een tunnelbuis van 13,5 m breed.

Tabel 8-9: Blootstellingsduur tot aangegeven letaliteitspercentage bij plas van 300 m².

Ventilatiesnelheid	Concentratie (kg/m ³)	Blootstellingsduur tot optreden letaliteitspercentage				
		99% letaal	90%	50%	10%	1%
0,1 m/s	0,049	128	45	13	3	1
2 m/s	0,022	641	224	62	18	6
5 m/s	0,016	1212	424	118	33	11

De uitstroomduur van continue uitstroming van 5 m³ is 167 s (gatgrootte 2), zie paragraaf 8.3.1. Personen in de plas worden minstens gedurende die tijd blootgesteld aan een concentratie die, omdat de ventilatiesnelheid in de eerste minuten niet hoog is, leidt tot circa 80 % letaliteit (zie Tabel 8-9). Voor grote continue uitstroming wordt in de plas conservatief 100 % letaal letsel aangehouden:

$$\text{Als } G_{\text{stofklasse}} = \text{LT en } G_{\text{uitstroming}} = \text{Lcontgr} \quad p_3 = p_4 = 1 \quad (8-21)$$

Zonder ventilatie treedt buiten de plas vanwege het kleine effectgebied geen letaliteit op. Voordat de schadelijke concentraties buiten de plas komen zijn de aanwezigen al gaan vluchten en worden ze niet meer ingehaald door de gaswolk aangezien de ventilatiesnelheid lager is dan de vluchtsnelheid. Bij ventilatie treden benedenstrooms effecten op die kleiner zijn dan in de plas omdat er enerzijds meer vluchttijd beschikbaar is en anderzijds de concentratie lager is vanwege de volledige opmenging, aangehouden wordt bij ventilatie 70% letaal letsel benedenstrooms van het uitstroompunt. Buiten de tunnel wordt geen letaliteit verwacht door de snelle verdunning en de mogelijkheden om te kunnen vluchten uit de pluim.

Daarom wordt aangehouden:

$$\begin{aligned} \text{Als } G_{\text{stofklasse}} = \text{LT en } G_{\text{uitstroming}} = \text{Lcontgr en } T_{\text{vent}} > 4 & \quad p_5 = 0 \\ \text{Als } G_{\text{stofklasse}} = \text{LT en } G_{\text{uitstroming}} = \text{Lcontgr en } T_{\text{vent}} \leq 4 & \quad p_5 = 0,7 \end{aligned} \quad (8-22)$$

Letaliteit bij continu vrijkomen 30 m² plas

In Tabel 8-10 is voor kleine continue uitstroming van LT2 (plas 30 m²) de berekende blootstellingsduur vermeld waarbij een bepaald percentage letaliteit gaat optreden, voor een tunnelbuis van 13,5 m breed. De blootstellingsduren zijn 100 keer zo groot als bij de grote continue uitstroming.

Tabel 8-10: Blootstellingsduur tot aangegeven letaliteitspercentage bij plas van 30 m².

Ventilatiesnelheid	Concentratie (kg/m ³)	Blootstellingsduur tot optreden letaliteitspercentage				
		99% letaal	90%	50%	10%	1%
0,1 m/s	0,0049	12800	4500	1300	340	120
2 m/s	0,0022	64100	22400	6200	1800	600
5 m/s	0,0016	121200	42400	11800	3300	1100

De uitstroomduur van een kleine continue uitstroming van 0,5 m³ is vanwege het geringe debiet bijna een half uur (gatgrootte 1), zie paragraaf 8.3.1. Er van uitgaande dat personen in de plas gedurende 1800 s worden blootgesteld leidt dat tot circa 50 % letaliteit in de plas in de situatie zonder ventilatie en tot circa 10 % letaliteit in de plas in de situatie met ventilatie (zie Tabel 8-10). Buiten de plas treedt geen sterfte op. Voor kleine continue uitstroming wordt dus aangehouden:

$$\begin{aligned}
 \text{Als } G_{\text{stofklasse}} = \text{LT en } G_{\text{uitstroming}} = L_{\text{contkl}} \text{ en } T_{\text{vent}} > 4 & \quad p_3 = p_4 = 0,5 \\
 \text{Als } G_{\text{stofklasse}} = \text{LT en } G_{\text{uitstroming}} = L_{\text{contkl}} \text{ en } T_{\text{vent}} \leq 4 & \quad p_3 = p_4 = 0,1 \\
 \text{Als } G_{\text{stofklasse}} = \text{LT en } G_{\text{uitstroming}} = L_{\text{contkl}} & \quad p_5 = 0
 \end{aligned}
 \tag{8-23}$$

8.4.3 Toepassing in QRA-tunnels

In voorgaande paragraaf zijn enkele berekeningen gedaan voor vrijkomen van toxische vloeistoffen. Hierbij is uitgegaan van de voorbeeldstof propylamine, die valt in stofklasse LT2. Naast LT2 kunnen ook andere toxische vloeistoffen worden vervoerd, die minder toxisch zijn (LT1). Daarnaast is het ook mogelijk dat stoffen in de stofcategoriën LT3, LT4 en LT5 worden vervoerd. Deze stoffen zijn toxischer maar worden maar in zeer beperkte mate vervoerd.

In het model worden de gevolgen van alle toxische vloeistoffen gemodelleerd conform de hierboven gegeven voorbeeldberekeningen met de LT2-voorbeeldstof. Aangezien het aandeel LT1 in het totaal aantal transporten aanzienlijk groter is dan dat van LT3, LT4 en LT5 is dit een conservatieve benadering.

Gezien de vrije hoge overlijdenskansen in de schadegebieden, ten gevolge van de conservatieve benadering voor toxische vloeistoffen, wordt er niet aanvullend nog een extra overlijdenskans voor niet-zelfredzame personen bij deze scenario's in rekening gebracht.

8.5 Scenario's met brandbare gassen

Zoals aangegeven in hoofdstuk 5, paragraaf 5.8 worden de volgende ongevalsscenario's met vrijkomen van brandbare gassen onderscheiden:

- Ggeen
- Gnietrelach ("niet-relevante" uitstroming aan de achterzijde van het voertuig)
- Gnietrelvoor ("niet-relevante" uitstroming aan de voorzijde van het voertuig)
- Gcontach (continue uitstroming aan de achterzijde van het voertuig)
- Gcontvoor (continue uitstroming aan de voorzijde van het voertuig)
- Gkoud (instantaan vrijkomen, koude BLEVE)
- Gwarm (instantaan vrijkomen, warme BLEVE)

Voor de vervolgebeurtenis Ggeen geldt dat er geen extra slachtoffers vallen ten gevolge van het ongeval met een tankwagen met gevaarlijke stoffen: $E_{kkgg} = 0$, zie vergelijking (6-3).

Voor uitstromingen van brandbare gassen zonder ontsteking geldt:

$$\text{als } G_{\text{stofklasse}} = \text{GF en } G_{\text{tankbrand}} = \text{Geen ontsteking} \quad E_{kkgg} = 0 \tag{8-24}$$

De kans op geen ontsteking van brandbare gassen is default op 0 gesteld, zie Tabel 3-10. Voor de overige ongevalsscenario's geldt dat er nog onderscheid gemaakt wordt naar directe ontsteking en vertraagde ontsteking. In de volgende paragrafen worden deze scenario's verder uitgewerkt.

8.5.1 Grote continue uitstroming, directe ontsteking

Bij directe ontsteking van een continue uitstroming van tot vloeistof verdicht brandbaar gas ontstaat een fakkel. In het vrije veld is de schadeafstand van een fakkel nauwelijks groter dan de lengte van de fakkel. In Tabel 8-11 zijn de verbrandingssnelheid en de lengte van een fakkel in het vrije veld weergegeven (bron: RBMII).

Tabel 8-11: Uitstroomdebiet en lengte van een fakkel in open veld uit RBMII [45].

uitstroomdebiet propaan (kg/s)	30.67
Lengte fakkel bij vrij uitstromen (m)	59

De richting van de fakkel is afhankelijk van de locatie van het gat en de aanwezigheid van obstakels. In een tunnel, met daarin diverse obstakels (tunnelwand, andere voertuigen) zal de fakkel niet vrij uitstromen, waardoor de vorm en lengte van de fakkel niet eenvoudig te berekenen zijn. Er zal sprake van een groot brandend gebied.

In het model wordt er (conservatief) vanuit gegaan de lengte van de fakkel even groot is als bij open lucht situaties (afgerond op $L_{\text{fakkel}} = 60$ meter, zie Tabel 3-9).

Bovenstrooms

Bovenstrooms wordt onderscheid gemaakt naar letaliteit in het uitstroomgebied en daarbuiten. De lengte van het uitstroomgebied wordt in eerste instantie gelijkgesteld aan de lengte van de fakkel (60 m), waarbinnen 100 % letaal letsel wordt aangenomen. Voor de kans dat de fakkel bovenstrooms is gericht wordt 60% aangehouden ($P_{\text{achter}} = 0,6$, zie Tabel 3-9).

Voor het bovenstroomse gebied wordt aangenomen dat de rookgassen zich bij rijwind of ventilatie niet tegen de windrichting in zullen bewegen. Dit is aangetoond aan de hand van het volumedebiet aan warme rookgassen dat uit een fakkelbrand vrijkomt. Het volumedebiet van rookgassen van 800 °C is ongeveer 3,8 keer ($1093 / 293$) zo groot als dat van propaangas bij kamertemperatuur. Het massadebiet van propaan 30,67 kg/s komt overeen met circa 70 m³/s aan warme verbrandingsgassen (door (volledige) verbranding ontstaan 7 moleculen, uit 6 moleculen). Het debiet aan verbrandingsproducten over de gehele dwarsdoorsnede van de tunnel verdeeld geeft een 'rookgassnelheid' van 1 m/s voor een 13,5 m brede tunnel en 1,6 m/s voor een 9 m brede tunnel (ongeveer 15/breedte van de tunnelbuis). Hieruit blijkt dat de rookgassnelheden kleiner zijn dan de rijwindsnelheid van 2 m/s; de rookgassen zullen zich in de eerste 2 minuten na het ontstaan van de fakkel in rijrichting verplaatsen. Indien de ventilatie wordt ingeschakeld blijft dit ook het geval en zal p_2 dus 0 zijn. Wel moet bovenstrooms bij het uitstroomgebied het gebied worden opgeteld waar alle mensen ten gevolge van de warmtestraling overlijden, $L_{3\text{warmtestraling}}$. Voor $L_{3\text{warmtestraling}}$ wordt de zelfde waarde genomen als voor een plasbrand, zie vergelijking (8-8). Voor $L_{3\text{warmtestraling}}$ geldt:

$$\begin{aligned} \text{als } G_{\text{stofklasse}} = GF \text{ en } G_{\text{uitstroming}} = G_{\text{contach}} \text{ en } G_{\text{tankbrand}} = \text{direct} & \quad L_{3\text{warmtestraling}} = 7,5 \\ \text{als } G_{\text{stofklasse}} = GF \text{ en } G_{\text{uitstroming}} = G_{\text{contvoor}} \text{ en } G_{\text{tankbrand}} = \text{direct} & \quad L_{3\text{warmtestraling}} = 7,5 \end{aligned} \quad (8-25)$$

Indien de ventilatie niet wordt ingeschakeld zullen de rookgassen bij een tegen de rijrichting gerichte fakkel zich na enige tijd (aangehouden wordt 2 minuten) bovenstrooms verspreiden waarbij de snelheid zal oplopen naar 1 m/s voor een tunnel van 13,5 m breed en 1,6 m/s voor een 9 m brede tunnel. Aangezien deze snelheden gelijk of groter zijn dan de aangehouden vluchtsnelheden wordt aangenomen dat degenen die in de wolk komen tot het moment dat men start met vluchten ($T_{\text{instructie}} + T_{\text{uitstap}}$) letaal

zullen worden getroffen. De lengte van dit bovenstroomse gebied bedraagt dan $(T_{instructie} + T_{uitstap} - 2) * 60 * 15 / B_{buis}$.

De lengte van L_3 wordt daarmee als volgt bepaald:

$$\begin{aligned}
 &\text{als } G_{\text{stofklasse}} = \text{GF en } G_{\text{uitstroming}} \\
 &= G_{\text{contach}} \text{ en } G_{\text{tankbrand}} = \text{direct} \quad L_3 = L_{3\text{warmestraling}} + L_{\text{fakkel}} \\
 &\text{en } T_{\text{vent}} \leq 4 \\
 &\text{als } G_{\text{stofklasse}} = \text{GF en } G_{\text{uitstroming}} \\
 &= G_{\text{contach}} \text{ en } G_{\text{tankbrand}} = \text{direct} \quad L_3 = L_{3\text{warmestraling}} + L_{\text{fakkel}} + \max\left(\frac{900 \cdot (T_{\text{instructie}} + T_{\text{uitstap}} - 2)}{B_{\text{buis}}}; 0\right) \quad (8-26) \\
 &\text{en } T_{\text{vent}} > 4 \\
 &\text{als } G_{\text{stofklasse}} = \text{GF en } G_{\text{uitstroming}} \\
 &= G_{\text{contvoor}} \text{ en } G_{\text{tankbrand}} = \text{direct} \quad L_3 = L_{3\text{warmestraling}}
 \end{aligned}$$

Bovenstrooms wordt voor de modellering van de gevolgen van de brand buiten dit uitstroomgebied (p_2) de CFD-resultaten van de 1200 m² plasbrand genomen. Voor het gebied buiten de tunnel geldt dat er geen letaliteit optreedt omdat de hete rookgassen bij het uitreden van de tunnel zullen opstijgen.

Daarom wordt aangehouden:

$$\begin{aligned}
 &\text{als } G_{\text{stofklasse}} = \text{GF en } (G_{\text{uitstroming}} = G_{\text{contvoor}} \text{ of } G_{\text{uitstroming}} = \\
 &G_{\text{contach}}) \text{ en } G_{\text{tankbrand}} = \text{direct} \quad \begin{array}{l} L_1 = 0 \\ p_3 = 1 \end{array} \quad (8-27)
 \end{aligned}$$

Benedenstrooms

Benedenstrooms is de lengte van de fakkel voor de gevolgen niet erg relevant: door de verbranding van 30.67 kg/s propaan zou theoretisch 1400 MW aan warmte vrij komen. Deze grote hoeveelheid hete verbrandingsgassen zal zich door de tunnel heen bewegen. Iedereen die zich in deze warme "wolk" bevindt zal komen te overlijden.

- In geval van een fakkel in rijrichting (G_{contvoor}) verspreiden de rookgassen zich met een snelheid van $15/B_{\text{buis}}$ + de rijwind of de ventilatiesnelheid. Bij een fakkel wordt benedenstrooms 100% letaal letsel aangenomen over de lengte van de fakkel. Voor de modellering van de gevolgen van de brand buiten het directe uitstroomgebied worden de CFD-resultaten van de 1200 m² plasbrand genomen. Voor de modellering van de brand zie hoofdstuk 7.
- In geval van een fakkel tegen rijrichting in ($G_{\text{contachter}}$) verspreiden de rookgassen zich met een snelheid van $-15/B_{\text{buis}}$ + de rijwind of ventilatiesnelheid. Bij ventilatie zal de hete rook zich dus ook vrij snel in de benedenstroomse richting gaan verspreiden. Voor de modellering van de gevolgen van de brand buiten het directe uitstroomgebied worden ook hier de CFD-resultaten van de 1200 m² plasbrand genomen.

Buiten de tunnel treedt geen schade op doordat de warme lucht snel opstijgt.

Voor de continue uitstroming, directe ontsteking geldt daarom:

$$\begin{aligned}
 &\text{als } G_{\text{stofklasse}} = \text{GF en } (G_{\text{uitstroming}} = G_{\text{contach}} \text{ of } \\
 &G_{\text{uitstroming}} = G_{\text{contvoor}}) \text{ en } G_{\text{tankbrand}} = \text{direct} \quad \begin{array}{l} p_4 = 1 \\ L_6 = 0 \end{array} \quad (8-28)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\text{als } G_{\text{stofklasse}} = \text{GF en } G_{\text{uitstroming}} = G_{\text{contach}} \text{ en } \\
 &G_{\text{tankbrand}} = \text{direct} \quad L_4 = 0 \\
 &\text{als } G_{\text{stofklasse}} = \text{GF en } G_{\text{uitstroming}} = G_{\text{contvoor}} \text{ en } \\
 &G_{\text{tankbrand}} = \text{direct} \quad L_4 = L_{\text{fakkel}} \quad (8-29)
 \end{aligned}$$

Voor de modellering van de gevolgen van de brand buiten het directe uitstroomgebied (p_5) worden de CFD-resultaten van de 1200 m² plasbrand genomen.

8.5.2 Grote continue uitstroming, vertraagde ontsteking

Bij continue uitstroming zonder directe ontsteking zal het tot vloeistof verdicht gas als een twee fasen turbulente vrijstraal in de tunnel vrijkomen. Een deel van de vloeistof druppels in de turbulente vrijstraal zal uitregenen. Voor de representatieve stof propaan (voor de stofklassen GF3) is berekend dat van de 31 kg/s circa 21 kg/s in damp zal overgaan [41]. Dit betekent circa 11 m³/s propaandamp. Gedurende de eerste twee minuten na het ongeval wordt voor de luchtbeweging in de tunnel circa 2 m/s aangehouden. In de volgende tabel is de berekende concentratie bij volledige opmenging van de propaandamp met de lucht in de tunnel gegeven.

Tabel 8-12: Concentratie propaandamp bij volledige opmenging met lucht.

Tunnel hoogte	5 m	
Tunnel breedte	9 m	13,5 m
Tunneldoorsnede	45 m ²	67,5 m ³
Luchtverversing in tunnel bij luchtsnelheid 2 m/s	90 m ³ /s	135 m ³ /s
Propaan concentratie bij volledige menging	11/(90+11)=11 vol%	11/146=7,5 vol%
Lengte gaswolk bij ontsteking na 2 minuten	240 m	240 m

De verbrandingsgrenzen van propaan in lucht liggen tussen 2,2% en 9,5% (vol). De opmenging met lucht zal niet volledig homogeen zijn, daarom zullen in de gaswolk de concentraties zowel hoger als lager zijn dan berekend bij homogene opmenging. Dit betekent dat op basis van de bovenstaande voorbeeldberekening voor propaan er vanuit moet worden gegaan dat bij continue uitstroming een brandbare gaswolk ontstaat. Indien we ontsteking na 2 minuten veronderstellen ($T_{\text{expl}} = 2$) betekent dit een gaswolklengte van circa 240 m. Bij ontsteking van dit gasmengsel van deze lengte ontstaat er een vlamfront dat zich aanvankelijk in de vorm van een bol vanuit het ontstekingspunt voortplant. Nadat het front de tunneldoorsnede heeft gevuld, beweegt het zich vervolgens door het brandbare gasmengsel naar de open tunneluiteinden. Een tunnel met eventueel daarin (stilstaand) verkeer vormt ideale omstandigheden voor een gasdeflagratie om zich snel te ontwikkelen tot hoge sterkte [42]; er kan detonatie optreden.

De schade die bij de gaswolkverbranding optreedt, is als volgt:

- Binnen de contour van de gaswolk zal iedereen door direct vlamcontact overlijden. Door de verbranding stijgt de temperatuur van de gaswolk en zal het volume van de gaswolk ruim 3 keer zo groot worden. Het schadegebied in de tunnel wordt hierdoor circa 750 m (met 100% letaal letsel).
- Benedenstrooms van de contour van de gaswolk zal ook sterfte optreden doordat de hete verbrandingsgassen van de gaswolk met de tunnelventilatie worden meegevoerd naar het eind van de tunnel. Bij de gaswolkverbranding komt circa 120 s x 21 kg/s x 45 MJ/kg = 1,14·10⁵ MJ vrij. Daarna ten gevolge van de resterende uitstroming 31 kg/s x 45 MJ/kg = bijna 1400 MW indien voldoende zuurstof beschikbaar zou zijn. Door zuurstoftekort zal de wolk onvolledig verbranden, maar er komt zoveel energie vrij dat benedenstrooms 100% sterfte zal optreden.
- Door de explosie-effecten zal in de tunnel ook sterfte optreden. De gegenereerde overdrukken zijn zo groot dat waarschijnlijk 100% van alle aanwezigen in de tunnelbuis zal overlijden.
- Conservatief wordt aangenomen dat de gegenereerde overdrukken zo groot zijn dat de tunnel zal bezwijken. Hierdoor zal in de andere tunnelbuizen ook sterfte optreden.
- Bij de tunnelmonden treedt binnen een straal van 150 m een overdruk van > 0,3 bar op [42]. Volgens het Paarse Boek moet in dit gebied rekening worden gehouden met 100% sterfte.

Voor de berekening van het aantal slachtoffers is hierbij een uitsplitsing in een uitstroomgebied en gebieden buiten het uitstroomgebied niet van belang.

Voor de continue uitstroming, vertraagde ontsteking wordt daarom aangehouden:

$$\begin{aligned}
& \text{als } G_{\text{stofklasse}} = \text{GF en } (G_{\text{uitstroming}} = G_{\text{contach of}} \\
& G_{\text{uitstroming}} = G_{\text{contvoor}}) \text{ en } G_{\text{tankbrand}} = \text{vertraagd} \\
& p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = p_5 = p_6 = 1 \\
& L_1 = L_6 = L_{\text{expl,tm,gas}} \\
& T_{\text{expl}} = t_{\text{vertont}} \\
& p_{\text{nevenbuizen}} = 1
\end{aligned}
\tag{8-30}$$

Voor t_{vertont} is in Tabel 3-10 als defaultwaarde 2 aangehouden; voor $L_{\text{expl,tm,gas}}$ is in Tabel 3-9 als defaultwaarde 150 aangehouden.

8.5.3 Kleine (niet-relevante) continue uitstromingen

Met de zogenaamde 'niet-relevante uitstroming' voor gassen onder druk (GF3 en GT3) wordt een uitstroming uit een klein gat bedoeld. Dit scenario leidt in de open lucht niet tot schade en wordt daarom beschouwd als niet relevante uitstroming en is daarom niet opgenomen in het rekenmodel voor de externe veiligheid RBMII. In een tunnel zou door de besloten omgeving dit scenario mogelijk wel tot schade kunnen leiden.

Door TNO [24] worden voor het toepassen van de zogenaamde 'niet-relevante' uitstromingen twee benaderingen genoemd:

1. De gevolgen van een niet-relevante uitstroming worden op dezelfde manier gemodelleerd als de 'gewone' continue uitstroming, waarbij de kans op continue uitstroming uit een klein gat (aangehouden op 0,5 inch) wordt opgeteld bij de kans op uitstroming uit een gat van 2 inch.
2. Verwaarlozing van de niet relevante uitstromingen vanwege de beperkte schade die in een tunnel optreedt.

De eerste benadering geeft een aanzienlijke toename van de kans op een 2 inch gat, waardoor het risico te conservatief wordt ingeschat. De tweede benadering geeft mogelijk een iets te lage inschatting van het risico in een tunnel. Omdat de uitstroming uit een 0,5 inch gat 16 keer lager is dan uit een 2 inch gat zullen de effecten veel beperkter zijn, en de schade veel kleiner dan bij een 2 inch gat. TNO stelt om die reden voor om de niet relevante uitstromingen niet mee te nemen in de berekening van het tunnelrisico. Hiermee wordt het risico iets onderschat, echter de fout is minder groot dan de overschatting bij de eerste benadering. Tevens beveelt TNO aan om ook voor niet relevante uitstromingen alsnog effect en schadeberekeningen uit te voeren om te toetsen of deze verwaarlozing niet tot een grote onderschatting van het tunnelrisico leidt. Deze effect- en schadeberekeningen zijn bij het afronden van het model echter niet beschikbaar, daarom wordt om pragmatische redenen op basis van het TNO-advies de volgende modellering gekozen in QRA-tunnels:

- Explosie-effecten ten gevolge van een 'niet-relevante' uitstroming worden niet meegenomen.
- Branden ten gevolge van een 'niet-relevante' uitstroming worden wel meegenomen. Hierbij worden de gevolgen van de vertraagde ontsteking gelijk gemodelleerd als de gevolgen van directe ontsteking.
- Voor de modellering van de directe ontsteking wordt voor het uitstroomgebied (de lengte van de fakkel) 0,25 keer de lengte van de fakkel bij continue uitstroming genomen (default $L_{\text{fakkel,klein}} = 15$ zie Tabel 3-9).
- Vanwege de beperkte omvang van de fakkel wordt niet tevens een extra lengte voor warmtestraling meegenomen.
- Voor de modellering van de gevolgen van de fakkelbrand benedenstrooms (en bovenstrooms bij het ontbreken van ventilatie) worden de CFD-resultaten van de 300 m² plasbrand gebruikt.
- In de gevoeligheidsanalyse is de invloed van deze (conservatieve) aannamen op het risico onderzocht. De conclusie is dat de invloed op het groepsrisico beperkt is (vanwege de lage frequenties). Op grond hiervan is een nauwkeuriger (minder conservatieve) modellering op dit moment niet nodig.

Voor de 'niet relevante' continue uitstroming geldt daarom:

$$\begin{aligned}
& \text{als } G_{\text{stofklasse}} = \text{GF en } G_{\text{uitstroming}} = G_{\text{nietrelach en}} \\
& G_{\text{tankbrand}} = \text{direct of } G_{\text{tankbrand}} = \text{vertraagd} \\
& L_3 = L_{\text{fakkel,klein}} \\
& L_4 = 0
\end{aligned}
\tag{8-31}$$

als $G_{\text{stofklasse}} = \text{GF}$ en $G_{\text{uitstroming}} = \text{Gnietrelvoor}$ en
 $G_{\text{tankbrand}} = \text{direct}$ of $G_{\text{tankbrand}} = \text{vertraagd}$

$$L_3 = L_{3\text{warmestraling}} = 7,5$$

$$L_4 = L_{\text{fakkel, klein}}$$

als $G_{\text{stofklasse}} = \text{GF}$ en ($G_{\text{uitstroming}} = \text{Gnietrelach}$ of
 $G_{\text{uitstroming}} = \text{Gnietrelvoor}$) en ($G_{\text{tankbrand}} = \text{direct}$ of
 $G_{\text{tankbrand}} = \text{vertraagd}$)

$$p_3 = p_4 = 1$$

$$L_1 = L_6 = 0$$

$$T_{\text{expl}} = T_{\text{expl, geenexpl}} \quad (8-32)$$

$$p_{\text{nevenbuizen}} = 0$$

Voor de modellering van de gevolgen van de brand buiten het directe uitstroombied worden de CFD-resultaten van de 300 m² plasbrand genomen.

8.5.4 Instantaan vrijkomen, koude BLEVE

Door een mechanische impact ten gevolge van een verkeersongeval of intrinsiek falen, kan een tank met tot vloeistof verdicht gas openbarsten. Dat wordt (hier) een koude BLEVE genoemd. Indien de tank faalt ten gevolge van de hittebelasting van een brand wordt hier gesproken van een warme BLEVE.

Bij een koude BLEVE scheurt de tank open en verdampt de inhoud instantaan. Door deze flash verdamping kan een drukgolf ontstaan. De blast plant zich door een tunnelbuis min of meer onverzwakt voort. Pas als de blastgolf het tunneleinde bereikt, kan deze ruimtelijk expanderen en zal deze in sterkte afnemen. De verbranding van het gas is slechts mogelijk waar contact met lucht mogelijk is [42] en ontstekingsbronnen aanwezig zijn.

De dampdruk van propaan is bij 282 K 700 kPa. Bij instantaan falen van de tank is de bijbehorende initiële overdruk van de blast voor propaan circa 200 kPa [39]. Bij een BLEVE met een overdruk van meer dan 1 bar kan de tunnel, afhankelijk van de constructieve sterkte, bezwijken en moet gerekend worden met 100% sterfte. In QRA-tunnels wordt conservatief uitgegaan van 100% letaliteit in de tunnelbuis. Indien het gas tijdens of onmiddellijk na het vrijkomen niet wordt ontstoken dan zal de gaswolk zich verspreiden in de tunnel. Een vertraagde ontsteking van deze gaswolk zal tot een deflagratie en mogelijk detonatie leiden met bezwijken van de tunnel tot gevolg.

Bij dit scenario wordt, net als bij de gaswolkexplosie ten gevolge van continue uitstroming een letaal schadegebied van 150 meter buiten de tunnelmonden aangenomen [42].

Voor de koude BLEVE wordt daarom aangehouden:

als $G_{\text{stofklasse}} = \text{GF}$ en $G_{\text{uitstroming}} = \text{Gkoud}$

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = p_5 = p_6 = 1$$

$$L_1 = L_6 = L_{\text{expl, tm, gas}} \quad (8-33)$$

$$T_{\text{expl}} = 0$$

$$p_{\text{nevenbuizen}} = 1$$

Voor $L_{\text{expl, tm, gas}}$ is in Tabel 3-9 als defaultwaarde 150 aangehouden.

8.5.5 Warme BLEVE

De warme BLEVE wordt veroorzaakt doordat een reeds aanwezige brand de druk in de tank doet oplopen, totdat de tank bezwijkt. Dit bezwijken resulteert in een blast en een instantane verbranding. In de open lucht vormt zich een vuurbal, in een tunnel zal, door tekort aan zuurstof, het verbrandingsproces minder snel verlopen.

Bij een warme BLEVE zullen de temperatuur en de dampdruk op het moment van falen van een aantal factoren afhangen. Voor de dampdruk is het vooral van belang of de druktank is voorzien van

overdrukventielen. In Nederland zijn de meeste druktankwagens voorzien van overdrukventielen. De overdrukventielen van LPG-wagens gaan open bij een druk van circa 17 bar [43]. Dit is voor alle druktankwagens aangehouden. De bijbehorende initiële overdruk van de blast voor propaan is dan circa 400 kPa [39]. Bij de warme BLEVE wordt aangenomen dat het gas zich hierbij voor 50% in benedenstroomse en 50% in bovenstroomse richting verspreidt, waarbij wordt aangenomen dat er voldoende lucht in de tunnelbuis is voor volledige verdamping van de uitstroming.

In tegenstelling tot een koude BLEVE duurt het een tijd voordat de BLEVE optreedt. Er zal een file bovenstrooms van het ongeval ontstaan waarbij de ontstane (grote) brand de aanwezigen bedreigt. Voor dit scenario wordt voor die (grote) brand uitgegaan van een 200 MW (letsel)brand. Voor dit scenario is ook van belang of de nevenbuizen tijdig worden ontruimd, omdat bij het optreden van de warme BLEVE ook daar slachtoffers kunnen vallen.

Net als bij explosieven (zie paragraaf 8.2) wordt aangenomen dat de tunnel bezwijkt en is het niet zinvol de effecten van de initiële brand op dezelfde manier te berekenen als voertuigbranden. De gevluchte personen zijn namelijk ook in het vluchtkanaal of een andere tunnelbuis niet veilig. Voor het berekenen van het aantal slachtoffers wordt daarom de volgende benadering gehanteerd.

Het aantal slachtoffers wordt hetzelfde berekend als bij een brand van 200 MW, waarbij er echter vanuit wordt gegaan dat men pas veilig is als men de tunnel heeft verlaten én ook de afstand L_7 of L_6 heeft afgelegd. Dit wordt gemodelleerd als een brand van 200 MW waarbij gerekend wordt met een situatie zonder vluchtdeuren, een vluchtweg die is verlengd met L_7 of L_6 en de totaal beschikbare vluchttijd die is gemaximeerd op T_{expl} .

Dit is een conservatieve benadering omdat men bij deze benadering op de gehele vluchtweg (in dit geval door de tunnelbuis), afhankelijk van de positie ten opzichte van de brand ook last kan hebben van de rook en hitte waardoor het vluchtproces wordt belemmerd. In werkelijkheid kan men vanaf de eerste vluchtdeur ongehinderd verder vluchten. De overschatting van het risico hierdoor is beperkt omdat de bijdrage van dit scenario aan het totale risico beperkt.

De berekening vindt op dezelfde manier plaats als bij een brand van 200 MW. In vergelijking (7-16) is het tijdstip $t_{dood}(x)$ gemaximeerd op T_{expl} dat wil zeggen dat iedereen die op tijdstip T_{expl} nog aanwezig is in de tunnel of in de gebieden 1 en 6 net buiten de tunnel zal overlijden. Voor de berekening van $L_{2,dood}$ en $L_{5,dood}$ geldt vergelijking (7-21) waarbij in de berekening van $L_{2,dood}^j$ in plaats van L_2 met $(L_2 + L_7)$ wordt gerekend en in de berekening van $L_{5,dood}^j$ in plaats van L_5 met $(L_5 + L_6)$. Daarbij geldt:

$$\begin{aligned} \text{als } G_{\text{stofklasse}} = GF \text{ en } G_{\text{uitstroming}} = G_{\text{warm}} \quad \begin{aligned} L_1 &= L_{expl,tm,gas} \\ L_6 &= L_{expl,tm,gas} \end{aligned} \end{aligned} \quad (8-34)$$

Voor de defaultwaarde van $L_{expl,tm,gas}$ zie Tabel 3-9.

Voor de gebieden 1 en 6 zelf geldt dat iedereen die zich in het gebied met lengte $L_{expl,tm,gas}$ bevindt op het moment van de explosie komt te overlijden, dus $p_1 = 1$ en $p_6 = 1$. Het aantal aanwezigen in die gebieden wordt bepaald door de dichtheid, zie paragraaf 6.4.3.

Uitgegaan wordt van een ontwikkelingstijd van de warme BLEVE van 20 minuten [44].

Bij het optreden van een warme BLEVE zullen nog aanwezigen in andere tunnelbuizen door het bezwijken van de gehele tunnel ook slachtoffer worden.

Net als bij de gaswolkexplosie wordt een letaal schadegebied van 150 m buiten de tunnel aangenomen.

Voor de warme BLEVE wordt daarom aangehouden:

als $G_{\text{stofklasse}} = GF$ en $G_{\text{uitstroming}} = G_{\text{warm}}$

$$\begin{aligned} p_1 &= p_3 = p_4 = p_6 = 1 \\ L_3 &= L_{3\text{warmestraling}} = 7,5 \\ L_4 &= 0 \\ T_{\text{expl}} &= t_{\text{warmeBLEVE}} \\ p_{\text{nevenbuizen}} &= 1 \end{aligned} \quad (8-35)$$

Voor $t_{\text{warmeBLEVE}}$ is in Tabel 3-10 als defaultwaarde 20 aangehouden.

Voor de modellering van de gevolgen van de brand buiten het directe uitstroomgebied worden de CFD-resultaten van de snelle 200 MW brand genomen.

8.6 Scenario's met toxische gassen

Bij toxische gassen wordt eveneens onderscheid gemaakt tussen continu en instantaan vrijkomen. Door inhalatie van de verspreide toxische gassen kan letsel ontstaan, vergelijkbaar met het scenario uitstroming toxische vloeistof. Het verschil met uitstroming van een toxische vloeistof is dat de verspreiding door de flash-off (snelle verdamping met grote expansie) veel sneller gaat. Hierdoor wordt het schadegebied groter, zeker voor de instantane release. Een instantane release kan zich uiten als een BLEVE (zoals bij brandbare gassen), waarbij drukeffecten de tunnel zwaar kunnen beschadigen. Een BLEVE kan pas optreden als het tot vloeistof verdichte gas een dampspanning van minstens 5 à 6 bar heeft. Bij een continue release, modelgatgrootte 2'', komt de toxische stof langzamer vrij. Uiteraard zijn in dit scenario het vluchtgedrag en de vluchtmogelijkheden van belang. Net als bij brandbare gassen worden de volgende scenario's onderscheiden:

- Ggeen
- Gnietrelach ("niet-relevante" uitstroming aan de achterzijde van het voertuig)
- Gnietrelvoor ("niet-relevante" uitstroming aan de voorzijde van het voertuig)
- Gcontach (continue uitstroming aan de achterzijde van het voertuig)
- Gcontvoor (continue uitstroming aan de voorzijde van het voertuig)
- Gkoud (instantaan vrijkomen, koude BLEVE)
- Gwarm (instantaan vrijkomen, warme BLEVE)

Voor het vervolgsenario $G_{\text{uitstroming}}=G_{\text{geen}}$ geldt dat er geen extra slachtoffers t.g.v. de gevaarlijke stoffen optreden: $E_{\text{kkgg}}=0$, zie vergelijking (6-3). Voor de scenario's met toxische gassen is een onderscheid naar directe, vertraagde of geen ontsteking niet nodig. In de volgende paragrafen wordt de uitwerking gegeven van de verschillende scenario's.

8.6.1 Grote continue uitstroming

De uitstroming van toxisch gas verloopt vergelijkbaar als die van brandbaar gas (zie paragraaf 8.5.1), een deel verdampt onmiddellijk en een deel regent uit, dit deel vormt een plas van waaruit weer verdamping plaatsvindt.

Bovenstreams:

Personen die zich bovenstreams van het uitstroomgebied bevinden zullen geen letsel oplopen omdat de rijwind de toxische wolk in rijrichting zal verspreiden. Indien de ventilatie wordt ingeschakeld blijft dit het geval. Indien de ventilatie niet wordt ingeschakeld dan zal de gaswolk zich met een geringe snelheid tegen de rijrichting in kunnen verspreiden. Deze snelheid is zodanig klein dat verondersteld kan worden dat personen bovenstreams tijdig kunnen vluchten.

Uitstroomgebied en benedenstreams:

De lengte van het gebied waarbinnen personen letsel ondervinden (de effectafstand) is gelijk aan de blootstellingsduur * ventilatiesnelheid. Voor het geval zonder ventilatie wordt aangenomen dat de damp

zo traag door de tunnel beweegt (circa 0,3 m/s) dat personen buiten het uitstroomgebied tijdig in staat zijn om te vluchten.

Lengte uitstroomgebied

De lengte van het uitstroomgebied wordt als volgt bepaald. Bij een continue uitstroming van onder druk vloeibaar gemaakt gas, zal een deel van de stof direct als damp uitstromen, met daarin kleine vloeistofdruppels die gedeeltelijk alsnog verdampen of uitregenen en een plas vormen. Vanuit de plas vindt verdere verdamping plaats. De uitstromende turbulente vrijstraal en de expanderende gaswolk zullen zich in eerste instantie ook tegen de ventilatierichting in bewegen, aangezien er een aanzienlijke volumestroom vrijkomt, die (ondanks de botsingen tegen wand en auto's) nog een deel van de impuls behouden heeft. De lengte van het uitstroomgebied wordt bepaald door de hoeveelheid damp en kleine vloeistofdruppels, voor ammoniak is de uitstroming 10,47 kg/s gedurende 480 s (bron: RBMII [45]).

Bronsterkte	$Q = 10,47 \text{ kg/s}$	[RBMII]
Uitstroomduur:	$t_{\text{uitstroom}} = 480 \text{ s}$	[RBMII]
Dichtheid	$\rho = 0,736 \text{ kg/m}^3$	[database EFFECTS]

De lengte van het uitstroomgebied wordt dan, bij een tunnelhoogte van 5 m:

$$L_{\text{uitstroom,GT}} = \frac{Q \cdot t_{\text{uitstroom}}}{\rho \cdot B_{\text{buis}} \cdot H} = \frac{1365}{B_{\text{buis}}} \quad (8-36)$$

Voor een tunnel met breedte 13,5 m en hoogte 5 m is de lengte van het uitstroomgebied dus circa 100 m, voor een tunnel met breedte 9 m is de lengte van het uitstroomgebied circa 150 m.

Dispersie

Voor de verspreiding van de (inmiddels gevormde) gaswolk in de tunnel wordt dezelfde benadering gevolgd als bij de toxische damp, na vloeistofverdamping). De uniforme concentratie is voor de verschillende scenario's en windsnelheden berekend met vergelijking (8-11):

Aangezien de uitstroming in de vorm van een vrijstraal is, waarbij veel turbulentie, een sterke verdamping en expansie optreedt hoeft bij de dispersie geen rekening te worden gehouden met de tunnelhoogte van 5 m. Er mag van worden uitgegaan dat de stof zich uniform over de hoogte zal verdelen. De breedte heeft een belangrijke invloed op de concentratie in de tunnel: hoe smaller de tunnel des te hoger de concentraties. De resultaten van een aantal representatieve concentratieberekeningen voor een tunnel van 13,5 m breed zijn weergegeven in Tabel 8-13.

Tabel 8-13: Concentratieberekeningen voor ammoniak in tunnel 13,5 m breed.

Scenario	Continu vrijkomen uit 2" gat
windsnelheid in tunnel (m/s)	Uniforme concentratie (mg/m ³)
0,1	1 600 000
2	78 000
5	31 000

Letaliteitspercentage

Voor de verschillende concentraties uit Tabel 8-13 is de blootstellingsduur tot het optreden van 99%, 90%, 50%, 10% en 1% letaal letsel berekend met behulp van probitrelaties voor ammoniak [40]:

$$\text{Pr} = -15,6 + \ln(C^2 \cdot t) \quad (8-37)$$

waarin:

Pr	probitwaarde, waaruit de kans op overlijden kan worden bepaald
C	concentratie ammoniak in mg/m ³
t	blootstellingstijd in minuten

De resultaten voor een tunnel van 13,5 m breed zijn per weergegeven in Tabel 8-14.

Tabel 8-14: Concentraties en blootstellingduur tot optreden letsel.

Ventilatiesnelheid	Concentratie (mg/m ³)	Blootstellingsduur tot optreden letsel (s)				
		99% letaal	90% letaal	50% letaal	10% letaal	1% letaal
Geen ventilatie: 0,1 m/s	1,6 10 ⁶	0	0	0	0	0
2 m/s	78 000	89	31	9	2	1
5 m/s	31 000	566	198	55	15	5

In de doorgerekende voorbeelden voor een tunnel van 13.5 breed met continue releases van ammoniak is na 30 seconden blootstelling al 90% van de personen letaal getroffen bij een ventilatiesnelheid van 2 m/s. In de praktijk zal er nauwelijks verschil zijn in het tijdstip dat letale concentraties de personen bereiken en eventuele lagere concentraties, die overigens al snel tot onvermogen tot vluchten zouden leiden (levensbedreigende grenswaarde voor ammoniak is 1000 mg/m³).

Op grond van bovenstaande berekeningen wordt aangenomen dat zowel in het uitstromingsgebied als benedenstrooms 100% letaal letsel optreedt zodra de wolk de personen heeft bereikt. Indien de operator niet oproept tot vluchten zal er benedenstrooms in de tunnel 100% letaal letsel zijn. Voor de berekening van het effectgebied benedenstrooms wordt conservatief aangenomen dat met ventilatie 100 % letaliteit optreedt en zonder ventilatie dat het uitstroomgebied zich nog gedurende 2 minuten met een afnemende snelheid (van 2 m/s naar 0, gemiddeld 1 m/s) in de rijrichting verplaatst. Bij L_4 wordt daartoe 120 meter opgeteld.

Voor L_3 en L_4 geldt dan:

$$\begin{aligned}
 &\text{als } G_{\text{stofklasse}} = GT \text{ en } G_{\text{uitstroming}} = G_{\text{contvoor}} && L_3 = 0 \\
 & && L_4 = L_{\text{uitstroomGT}} + 120 \\
 &\text{als } G_{\text{stofklasse}} = GT \text{ en } G_{\text{uitstroming}} = G_{\text{contach}} && L_3 = L_{\text{uitstroomGT}} \\
 & && L_4 = 120
 \end{aligned} \tag{8-38}$$

Verder geldt:

$$\begin{aligned}
 &\text{als } G_{\text{stofklasse}} = GT \text{ en } G_{\text{uitstroming}} = G_{\text{contach}} \text{ of} && p_2 = 0 \\
 &G_{\text{uitstroming}} = G_{\text{contvoor}} && L_1 = L_6 = 0 \\
 & && p_3 = p_4 = 1 \\
 & && p_{\text{nevenbuizen}} = 0 \\
 & && T_{\text{expl}} = T_{\text{expl,geenexpl}}
 \end{aligned} \tag{8-39}$$

$$\begin{aligned}
 &\text{als } G_{\text{stofklasse}} = GT \text{ en } G_{\text{uitstroming}} = G_{\text{contach}} \text{ of} && p_5 = 1 \\
 &G_{\text{uitstroming}} = G_{\text{contvoor}} \text{ en } T_{\text{vent}} \leq 4 && \\
 &\text{als } G_{\text{stofklasse}} = GT \text{ en } G_{\text{uitstroming}} = G_{\text{contach}} \text{ of} && p_5 = 0 \\
 &G_{\text{uitstroming}} = G_{\text{contvoor}} \text{ en } T_{\text{vent}} > 4 &&
 \end{aligned} \tag{8-40}$$

8.6.2 Kleine, 'niet-relevante' uitstroming

Net als bij brandbare gassen ontbreken op het moment van afronding van dit rapport nog de berekeningen voor de 'niet-relevante' uitstromingen. Net als bij de brandbare gassen wordt als eenvoudige benadering gekozen om de effectgebieden van de grote continue uitstroming gedeeld door 4 te nemen. Omdat de bronsterkte 16 keer zo klein is als bij grote continue uitstroming is de concentratie ook 16 keer zo klein (zonder uitregenen uit de wolk). De blootstellingsduren voor kleine continue uitstroming worden daardoor 256 keer zo lang als bij grote continue uitstroming. Daarom wordt buiten

de plas niet gerekend met letaliteit en wordt geen bijtelling voor L_4 toegepast. Dit geeft dan de volgende waarden:

$$\begin{aligned}
 &\text{als } G_{\text{stofklasse}} = \text{GT en } G_{\text{uitstroming}} = \text{Gnietrelvoor} && L_3 = 0 \\
 & && L_4 = \frac{L_{\text{uitstroomGT}}}{4} \\
 &\text{als } G_{\text{stofklasse}} = \text{GT en } G_{\text{uitstroming}} = \text{Gnietrelach} && L_3 = \frac{L_{\text{uitstroomGT}}}{4} \\
 & && L_4 = 0
 \end{aligned}
 \tag{8-41}$$

Verder geldt:

$$\begin{aligned}
 &\text{als } G_{\text{stofklasse}} = \text{GT en } G_{\text{uitstroming}} = \text{Gnietrelach of} && p_2 = p_5 = 0 \\
 &\text{ } G_{\text{uitstroming}} = \text{Gnietrelvoor} && L_1 = L_6 = 0 \\
 & && p_3 = p_4 = 1 \\
 & && p_{\text{nevenbuizen}} = 0 \\
 & && T_{\text{expl}} = T_{\text{expl,geenexpl}}
 \end{aligned}
 \tag{8-42}$$

8.6.3 Instantaan vrijkomen

Net als bij tot vloeistof verdichte brandbare gassen kan ook bij tot vloeistof verdichte toxische gassen door mechanisch impact ten gevolge van een verkeersongeval of intrinsiek falen de tank openbarsten. Dit kan bij snelle verdamping een koude BLEVE zijn. Een warme BLEVE waarbij de tank faalt ten gevolge van de hittebelasting van een brand is ook bij tot vloeistof verdichte toxische gassen mogelijk. Het belangrijkste verschil is dat toxische gassen meestal niet brandbaar zijn en er geen vuurbol optreedt. Voor de verspreiding van het gas geldt echter in grote lijnen hetzelfde als beschreven in paragraaf 8.5.4. Dit betekent dat ook bij deze scenario's 100% letaliteit ten gevolge van de overdruk wordt aangenomen in de gehele tunnelbuis. Het vaststellen van het letaliteitspercentage ten gevolge van de blootstelling aan de toxische gassen is dan niet meer nodig.

Net als bij tot vloeistof verdichte brandbare gassen wordt een schadegebied van 150 meter met 100% letaliteit bij de tunnelmonden aangenomen.

Voor de warme BLEVE geldt, net als bij de warme BLEVE voor brandbare gassen, dat er voorafgaand aan het vrijkomen van de toxische stoffen, sprake is van een brand. Hierbij wordt uitgegaan van een 200MW brand. Voor het tijdstip waarop de warme BLEVE optreedt ($t_{\text{warmeBLEVE}}$) wordt dezelfde waarde aangehouden als bij brandbare gassen (defaultwaarde 20 minuten, zie Tabel 3-10). Tot het moment van optreden van de explosie wordt het aantal slachtoffers net zo bepaald als bij de warme BLEVE van brandbare gassen, zie paragraaf 8.5.5.

9 Berekening risico's

9.1 Inleiding

Het risico wordt berekend voor één tunnelbuis. Wel worden in de berekening de slachtoffers die in andere tunnelbuizen vallen (ten gevolge van een incident in de beschouwde tunnelbuis) meegenomen. Voor het totale risico in een tunnel met meer dan één tunnelbuis dient dus voor elke tunnelbuis het risico te worden berekend en dienen de risico's van elke tunnelbuis bij elkaar te worden opgeteld.

Het risico wordt uitgedrukt in de volgende risicokentallen:

- Verwachtingswaarde
- Persoonlijk risico
- Groepsrisico

In de volgende paragrafen wordt toegelicht hoe deze kentallen worden bepaald.

9.2 Verwachtingswaarde

De verwachtingswaarde is het verwachte aantal slachtoffers dat per jaar in de betreffende tunnelbuis valt. Dit wordt bepaald door voor elk scenario kans en gevolg met elkaar te vermenigvuldigen en vervolgens al deze producten bij elkaar op te tellen. Aangezien de kansen in hoofdstuk 5 zijn uitgedrukt in kansen per voertuigkilometer moet deze som nog worden vermenigvuldigd met de lengte van de tunnelbuis en het aantal voertuigen per jaar.

In hoofdstuk 5 is uitgewerkt welke scenario's (combinaties van gebeurtenissen) worden meegenomen en hoe de kans per voertuigkilometer op deze scenario's wordt berekend. In de hoofdstukken 6 t/m 8 is de berekening van de gevolgen per scenario aangegeven. Voor elk beschouwd scenario is aldus zowel de kans per voertuigkilometer als het gevolg bekend, zie Tabel 9-1.

Tabel 9-1: Scenario's kansen en gevolgen.

Scenario	Scenariokans per mvtkm	Gevolg (doden)
1	P_1	E_{totaal1}
2	P_2	E_{totaal2}
...
M	P_M	E_{totaalM}

Voor de verwachtingswaarde in doden per jaar geldt dan:

$$\text{Verwachtingswaarde} = \frac{L_{\text{buis}}}{1000} \cdot I_{\text{buis}} \cdot \sum_i^M P_i \cdot E_{\text{totaali}} \quad (9-1)$$

waarbij M het totaal scenario's is, P_i de kans op scenario i per voertuigkilometer. L_{buis} is de lengte van de tunnelbuis in meters en I_{buis} de verkeersintensiteit in de buis (aantal voertuigen per jaar). L_{buis} en I_{buis} zijn gedefinieerd in respectievelijk Tabel 3-1 en Tabel 3-4.

E_{totaali} is het totaal aantal berekende slachtoffers van scenario i , waarvoor geldt

$$E_{\text{totaal}} = E_{\text{direct}} + E_{\text{extra}} + E_{\text{kkgg}} \quad (9-2)$$

Voor E_{direct} , E_{extra} en E_{kkgg} zie hoofdstuk 6.

9.3 Persoonlijk risico

Het persoonlijk risico geeft de kans per afgelegde kilometer in de tunnelbuis voor een weggebruiker om in de tunnel te overlijden als gevolg van een incident in de betreffende tunnelbuis.

Het persoonlijk risico is gelijk aan de verwachtingswaarde gedeeld door het aantal reizigerskilometers per jaar. Het aantal reizigers per jaar is gelijk aan het aantal motorvoertuigen per jaar maal het gemiddeld aantal inzittenden per motorvoertuig. Het gemiddeld aantal inzittenden N_{gem} is gelijk aan:

$$N_{gem} = (I_{spits} \cdot (N_{auto} \cdot A_{auto,s} + N_{bus} \cdot A_{bus,s} + N_{vracht} \cdot A_{vracht,s}) + (I_{nacht} \cdot (N_{auto} \cdot A_{auto,n} + N_{bus} \cdot A_{bus,n} + N_{vracht} \cdot A_{vracht,n})) + (I_{dag} \cdot (N_{auto} \cdot A_{auto,d} + N_{bus} \cdot A_{bus,d} + N_{vracht} \cdot A_{vracht,d}))) \cdot \frac{1}{I_{buis}} \quad (9-3)$$

Het persoonlijk risico is dan:

$$PersR = \frac{1000 \cdot \text{Verwachtingswaarde}}{N_{gem} \cdot I_{buis} \cdot L_{buis}} \quad (9-4)$$

9.4 Groepsrisico

Het groepsrisico is de kans per jaar dat in één keer een groep mensen komt te overlijden bij een ongeval in de tunnel. Het groepsrisico kan in beeld gebracht worden met een f-N curve. In deze grafiek wordt de overschrijdingsfrequentie $f(N)$ van ongelukken met N of meer doden op een dubbellogaritmische schaal weergegeven.

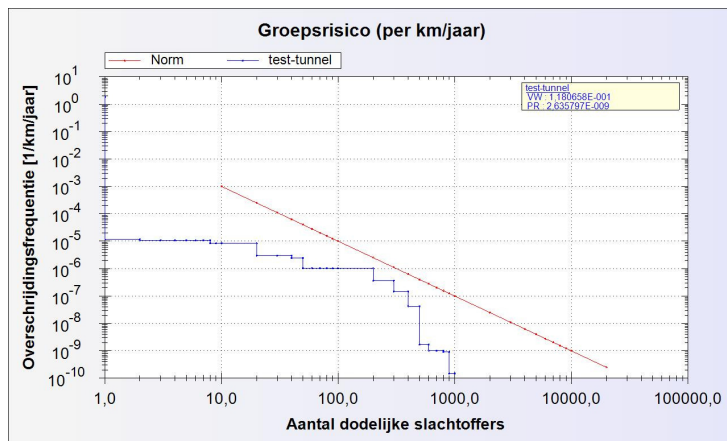
Tabel 9-2 toont hoe de gevolgen (doden) vervolgens kunnen worden gesorteerd in slachtofferklassen tussen 0 en het maximaal waargenomen aantal slachtoffers E'_{M^*} . De breedte van de slachtofferklasse is enigszins arbitrair.

Tabel 9-2: Overschrijdingskansen na sortering in M^* slachtofferklassen ($M^* \leq M$).

Scenario	Scenariokans per mvtkm	Gevolg (doden)	Product (doden per mvtkm)	Overschrijdingskans (per mvtkm)
1	P'_1	$E'_{\text{totaal1}} = (0,1)$	$P'_1 \cdot 1$	$P'_M + \dots + P'_2 + P'_1$
2	P'_2	$E'_{\text{totaal2}} = [1,2)$	$P'_2 \cdot 2$	$P'_{M^*} + \dots + P'_2$
...
M^*	P'_{M^*}	$E'_{\text{totaalM}^*} = [\max(E'_{\text{totaal1}}, \dots, E'_{\text{totaalM}}), \infty)$	$P_{M^*} \cdot E'_{M^*}$	P'_{M^*}

Gekozen is voor een toekenning naar slachtofferklassen om het aantal punten in de tabel enigszins beperkt te houden. Zonder slachtofferklassen kan het aantal waargenomen slachtoffers op de x-as in principe gelijk zijn aan het aantal beschouwde scenario's, wat in bepaalde gevallen boven een half miljoen ligt. De breedte van de slachtofferklasse is enigszins arbitrair: de breedte van de klasse is in de orde grootte van 10% van de ondergrens van de klasse waarbij bij grotere aantallen is afgerond op ronde getallen. In de output van het model wordt zowel een grafiek als een tabel getoond. In zowel de grafiek als de tabel wordt in, bijvoorbeeld, de slachtofferklasse 20-22 slachtoffers de frequentie van voorkomen van scenario's met 20 of meer slachtoffers getoond. In de grafiek uit zich dit door bij 20 tot 22 slachtoffers dezelfde frequentie (die van 20 of meer) slachtoffers weer te geven.

In onderstaande tabel worden de gehanteerde ongevalsklassen in QRA-tunnels getoond in een voorbeeld van een groepsrisicocurve. Ook de op dit moment geldende oriëntatiewaarde voor het groepsrisico is in deze grafiek weergegeven.



Referenties

- [1] *Gebruikershandleiding QRA-tunnels 2.0*, RWS, Steunpunt Tunnelveiligheid, februari 2012,
- [2] Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen (PGS), *Methoden voor het bepalen van mogelijke schade, PGS 1 (het groene boek)* VROM, maart 2005 (aangepaste versie van CPR 16); www.publicatiereeksgevaarlijkestoffen.nl/publicaties.
- [3] Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen (PGS), *Methods for the calculation of physical effects, PGS 2 (Yellow Book)*, VROM, november 2005 (aangepaste versie van CPR 14E); www.publicatiereeksgevaarlijkestoffen.nl/publicaties
- [4] Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen (PGS), *Guidelines for quantitative risk assessment, PGS 3 (Purple Book)*, VROM, december 2005 (gelijk aan CPR 18E); www.publicatiereeksgevaarlijkestoffen.nl/publicaties
- [5] Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen (PGS), *Methods for determining and processing probabilities, PGS 4 (Red Book)*, VROM, december 2005 (gelijk aan 2^e versie van CPR 12E); www.publicatiereeksgevaarlijkestoffen.nl/publicaties
- [6] *Systematiek voor indeling van stoffen ten behoeve van risicoberekeningen bij het vervoer van gevaarlijke stoffen*, Tweede editie, AVIV, Enschede, 1999.
- [7] *Fundamenteel onderzoek naar kanscijfers voor risicoberekeningen bij wegtransport gevaarlijke stoffen: hoofdrapport AVIV*, Enschede, oktober 1994.
- [8] *Handleiding risicoberekening wegtransport gevaarlijke stoffen: Bepaling faalkansen* AVIV, Enschede, oktober 1994.
- [9] *Actualisatie uitstroomfrequenties wegtransport*, AVIV, 05860, Enschede, 16 december 2005; www.rws-avv.nl.
- [10] *Veiligheidsrichtlijnen deel C (VRC) Basismaatregelen & Bijlagen*, Rijkswaterstaat Bouwdienst, Steunpunt Tunnelveiligheid (www.rws.nl/tunnelsafety).
- [11] Het RWSQRA-model voor wegtunnels, versie 1,1 definitief, Rijkswaterstaat Bouwdienst, Steunpunt Tunnelveiligheid, 28 april 2006. (het bijbehorende rekenmodel zelf is versie 1.5).
- [12] Kruiskamp en Hoeksma, *Gebeurtenissenboom tunnel risicoanalysemodel*, Bouwdienst Rijkswaterstaat 14-10-1997.
- [13] M. Molag, A. Ragetlie, L.P.Sluijs, T. Wiersma, *Conceptueel risicoanalyse model voor transport door wegtunnels* (CUR/COB onderzoeksrapport N110-03), TNO-MEP, rapport TNO-MEP-R97/228, Apeldoorn, april 1998.
- [14] *Veiligheid Vervoer over de Weg*, Handreikingen, VeVoWeg Handreikingen voor de bepaling van interne en externe veiligheidsrisico's bij zwaar verkeer, inclusief het transport van gevaarlijke stoffen. Handreiking voor het afwegen van maatregelen. Analyse ongevallen en maatregelen zwaar verkeer inclusief het transport van gevaarlijke stoffen. Ministeries van V&W, VROM en BZK, archiefnummer VVWA-R-99.004, Utrecht, 4 januari 1999
- [15] C.M.A. Jansen, *Handleiding van het toepassen van het beslissingsmodel vervoer brandbare vloeistoffen door tunnels of via omleidingen*, TNO, rapport 85-03659, Apeldoorn, 1986.
- [16] *Aanbevelingen ventilatie van verkeertunnels*, Steunpunt Tunnelveiligheid, ISBN 90-369-0001-8, december 2005.
- [17] *Risicoatlas wegtransport gevaarlijke stoffen*, AVIV, 02494, Enschede, 24 Maart 2003; www.rws-avv.nl.

- [18] *Telmethodiek voor het vervoer van gevaarlijke stoffen op de weg*, Rijkswaterstaat Adviesdienst Verkeer en Vervoer (AVV), Rotterdam, 23 augustus 2005; www.rws-avv.nl.
- [19] *Handreiking incidentkansen voor QRA-tunnels*, Arcadis, februari 2012.
- [20] PIARC Committee on Road Tunnels (C5), *Fire and smoke control in road tunnels*, World Road Association, 1999.
- [21] J.P. Kamperveen, M. Molag, *Onderzoek naar de verhouding van optreden van koude en warme BLEVE's*, TNO-MEP, rapport R2003/492, Apeldoorn, December 2003.
- [22] *Vervoer van gevaarlijke stoffen door tunnels. Detaillering van uitstroomhoeveelheden en uitstroomkansen en de gevolgen voor het resultaat van het beslismodel*, C.M.A. Jansen, TNO, Hoofdgroep Maatschappelijke technologie, refnr. 88-040
- [23] *Kantelongevallen met zwaarverkeer op Nederlandse wegen*, Hoogvelt, Ruijs en Kootwijk, TNO Wegtransportmiddelen, ref 97.OR.VD.021
- [24] Molag, Hochs, Trijsenaar, *Uitwerking gevolgenmodel incidenten in tunnels*, , TNO, juni 2009, TNO-034-UT-2009-01346_RPT-ML
- [25] P. A. Purser, "Toxicity assessment of combustion products", in "The SPFE handbook of fire protection engineering", 2nd edition, NFPA, Quincy, Massachusetts, 1995.
- [26] M. Molag, C. M. A. Jansen, "HSL-zuid: Analyse veiligheid tunnel – Schademodel; bronterm treinbrand en beschermingswaarde voor minimaal zicht", TNO-rapport R99/436, 1999.
- [27] University of Greenwich, "Building exodus manual", 2004.
- [28] Jin T., Studies on Human Behaviour and Tenability in Fire Smoke", Proc. 5th Int. Symp. On Fire Safety pp. 3-21, IAFSS, USA 1997.
- [29] "Smoke gets in your eyes", *FROCC, Zero halogen compound => "People and fire"* , Purser D.A., University of Greenwich, Inaugral lecture 17th February, 1999.
- [30] Purser, D., "Smoke Toxicity", Improved Fire- and Smoke-resistant materials for commercial aircraft interiors: a proceedings, 1995.
- [31] Boer, L.C., Gedrag van automobilisten bij evacuatie van een tunnel, TNO rapport: TM-02-C034, 24 mei 2002.
- [32] Jonkman S.N., "Afleiding richtwaarden voor kwantitatieve uitwerking uit de gedragsproeven in de beneluxtunnel", documentnummer OLS-4818-2002-0074, okt. 2002.
- [33] D. A. Charters, "Fire risk assessment of rail tunnels", artikel 20 in Proceedings of the first international conference on safety in road and rail tunnels, 1992, Basel, Zwitserland.
- [34] Ingason H. 'Small Scale test of a Road Tanker Fire'. Proc Int Conf on Fires in Tunnels, 10-11 October 1994;
- [35] CETU 'Essais hydrauliques des systèmes de recueil des liquides répandus sur la chaussée des tunnels routiers', Centre d'Etudes des Tunnels, Août 1994
- [36] Transport of dangerous goods through road tunnels, Quantitative Risk Assessment Model (versions 3.60 and 3.61), Reference manual, Ineris, research report no. 20504, 01/08/2005

- [37] Eindrapportage afvoercapaciteit riolering Calandtunnel, Steunpunt Tunnelveiligheid, doc.nr. 4818-2004-0033, juni 2004.
- [38] Aanzet tot een berekeningsmethodiek voor in- en extern risico bij tunnels/overkappingen (ABIETO), Ingenieurs/adviesbureau SAVE, rapport 982223-C54, Apeldoorn, november 1998.
- [39] A.C. van den Berg, M.P.M. Rhijnsburger, J. Weerheijm, Vuistregels voor explosiebelasting en respons van verkeerstunnels, TNO rapport PML 2001-C121, Rijswijk, augustus 2001.
- [40] EFFECTS 7.4
- [41] EFFECTS 7.5
- [42] A.C. van den Berg, B. Nelemans, Advies inzake de lengte van een open deel in een tunnel met betrekking tot beperking van explosieschade, TNO rapport PML 1999-C90, Rijswijk, oktober 1999.
- [43] Bezwijkgedrag van tankauto's bij brand in tunnels, Solico b.v., Oosterhout, 30 november 2006.
- [44] Birk A.M., Scale effects with fire exposure of pressurized liquefied gas tanks. J. Loss. Prev., Vol. 8 No. 5 pp. 275-290 (1995).
- [45] RBMII, versie 1.1.1

Bijlage B. Effectberekeningen branden

1 Inleiding

Voor de onderbouwing van de effecten van branden is gebruik gemaakt van CFD berekeningen.

Er zijn berekeningen gemaakt voor:

- tunnallengte: 400 m en 2000 m;
- brandgroottes: 5, 10, 25, 50, 100 en 200 MW voertuigbranden en 3 plasbranden (1200 m², 300 m² en 30 m²);
- brandontwikkeling voor voertuigbranden: "langzaam/normaal", in tien minuten op maximum vermogen en "snel", waarbij de brand in 2 minuten op maximum vermogen is.
- wel of geen mechanische langsventilatie.

In deze bijlage wordt achtereenvolgens beschreven:

- het CFD model;
- de modellering van de tunnel;
- de modellering van de branden;
- de modellering van de ventilatie;
- de van de CFD-resultaten afgeleide functies en parameters waarmee:
 - het tijdstip waarop personen hinder ondervinden van rook en warmte
 - het tijdstip waarop personen zelf de gevolgen van de brand waarnemen
 - het concentratieverloop van rookgassen
 - het temperatuurverloop in de tunnel
- een gevoeligheidsanalyse met betrekking tot een aantal tunnelparameters.

2 CFD model

Voor het berekenen van de fysische effecten van branden wordt gebruik gemaakt van een CFD model van het National Institute of Standards and Technology (NIST) uit de USA. Het gebruikte CFD model is via internet <http://fire.nist.gov> vrij te downloaden en te gebruiken. Het rekenhart bestaat uit het Fire Dynamics Simulator (FDS) programma; voor onderstaande berekeningen is gebruik gemaakt van FDS versie 4.06. De grafische uitvoer is te bekijken via het programma 'smokeview'. Alle benodigde handleidingen, beschrijving invoer, de database en diverse voorbeelden zijn op de website te vinden.

Met dit computerprogramma kunnen de temperatuur, rookdichtheid, zichtlengte, straling, O₂-gehalte en dergelijke worden berekend naar tijd en plaats in de tunnelbuis. Een aantal van de brandproeven die in de Beneluxtunnel zijn gedaan, is met dit programma nagerekend; de resultaten van de berekeningen komen redelijk overeen met de metingen bij de brandproeven.

Het FDS programma maakt gebruik van de Navier-Stokes vergelijkingen voor lage stroomsnelheden (dus geen explosie snelheden) die numeriek opgelost worden waarbij de nadruk ligt op transport van rook en warmte bij branden. Naast het modelleren van de situatie in de tunnel (o.a. de brand, de ventilatiesnelheid en de positie van voertuigen) moet ook vooraf worden opgegeven welke uitvoer gewenst is.

Omdat voor de, in QRA-tunnels, gekozen modellering vooral het verloop van de temperatuur, de rookdichtheid en de warmtestraling van belang is, is gekozen voor de volgende uitvoer:

- het temperatuurverloop op ooghoogte (1,5 m boven het wegdek) over de gehele lengte van de tunnel;
- het temperatuurverloop tegen het dak over de gehele lengte van de tunnel;
- het warmtestralingsverloop in 3 richtingen op ooghoogte tot 30 m bovenstrooms van de brand;
- de zichtlengte op ooghoogte over de gehele lengte van de tunnel;
- de zichtlengte vlak onder het dak over de gehele lengte van de tunnel;
- het O₂-gehalte op ooghoogte over de gehele lengte van de tunnel;

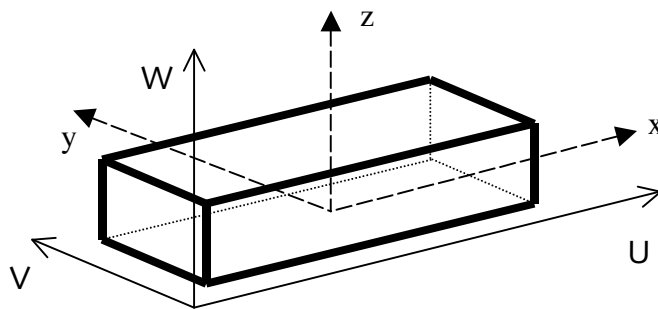
- het CO-gehalte op ooghoogte over de gehele lengte van de tunnel;
- het CO₂-gehalte op ooghoogte over de gehele lengte van de tunnel;
- de dichtheid van rook (en roet) op ooghoogte over de gehele lengte van de tunnel;
- de dichtheid van rook (en roet) tegen het dak over de gehele lengte van de tunnel;
- de lichtsnelheid op twee punten, bovenstrooms en benedenstrooms van de brand;
- de totaal vrijkomende hoeveelheid rook en roet;
- het daadwerkelijk gerealiseerde brandvermogen als functie van de tijd.

Alle invoergegevens en resultaten van de berekeningen zijn vastgelegd op een aantal DVD's.

3 Modelling van de tunnel

De berekeningen zijn uitgevoerd voor twee tunnellen: een (korte) tunnel met een lengte van 400 m en een (lange) tunnel met een lengte van 2000 m. Uitgegaan is van een tunnel met 3 rijstroken; de aangehouden breedte is 13,5 m. Voor de hoogte van de tunnelbuis is 5 m aangehouden.

In de CFD modellen is geen rekening gehouden met opgaande en neergaande delen van de tunnel; in het rekenmodel ligt de tunnel dus horizontaal. Van het gehanteerde assenstelsel (u,v,w) bevindt het nulpunt zich bij het ingangsportaal. Daarnaast wordt, voor de bepaling van de effecten, gerekend met een lokaal assenstelsel (x,y,z) met $x = 0$ ter plaatse van de brand.



Bij de tunnel met een lengte van 400 m zijn in de tunnelbuis obstakels gemodelleerd die voertuigen in een file moeten voorstellen. De rechterraai is volledig vol gezet met 'vrachtwagens' met een afmeting van 16,5 x 2,5 x 4,0 m. De twee overige rijbanen zijn vol gezet met 'personenwagens' van 4,5 x 2,0 x 1,5 m. De brand is in het midden van de tunnelbuis gemodelleerd ($u = 200$ m).

De 'meetpunten' zijn om de 25 m aangebracht; dicht bij de brand om de 12,5 m.

Over een afstand van 30 m vanaf de brand zijn om de 5 m kolommen geplaatst waarop de inkomende warmtestraling kan worden 'gemeten'.

Bij de tunnel met een lengte van 2000 m is wegens beperkingen van het model het aantal 'voertuigen' in de tunnel aanzienlijk beperkt tot enkele voertuigen. Daarnaast zijn ook de stralingsmetingen achterwege gelaten. De brand is gemodelleerd op een afstand van 500 m van de ingang van de tunnel ($u = 500$ m).

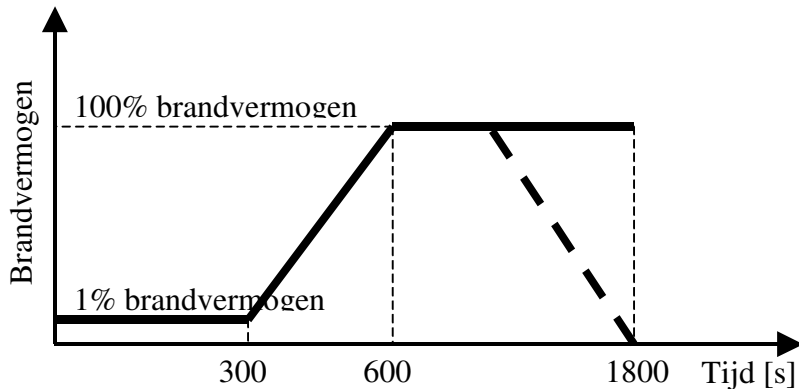
4 Modelling van de branden

De berekeningen zijn gemaakt voor 5, 10, 25, 50, 100 en 200 MW voertuigbranden en 3 plasbranden. Verder is onderscheid gemaakt in 2 soorten brandontwikkeling: een 'langzame brand' en een 'snelle brand'. Onder 'langzame brand' wordt verstaan een relatief langzame ontwikkeling van een brand die is ontstaan door technische mankementen, oververhitting en dergelijke. Onder 'snelle brand' wordt verstaan een snelle ontwikkeling van een brand die is ontstaan ten gevolge van een ongeval.

Hierbij zijn de volgende aannamen gedaan:

- Voertuigbranden duren 30 minuten (de maximale tijd van de berekening).

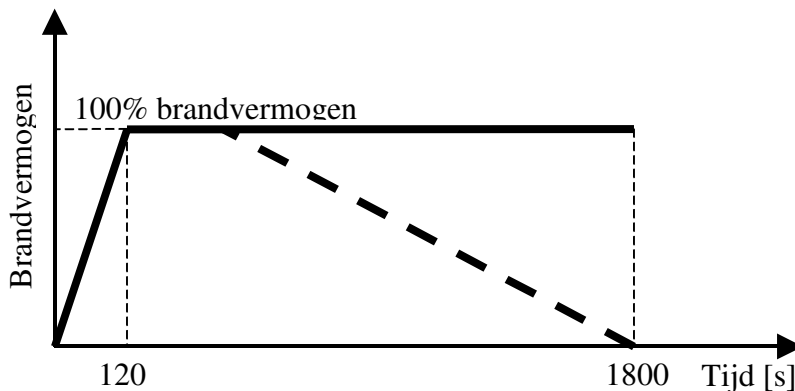
- Bij relatief kleine branden (van 5 en 10 MW) zal kort nadat de maximale brandomvang is bereikt, het brandvermogen geleidelijk afnemen door gebrek aan brandstof. Bij branden met een vermogen van meer dan 10 MW zal het vermogen niet afnemen (conservatieve aanname).
- Bij een 'langzaam ontwikkelende brand' blijven de vlammen gedurende de eerste 5 minuten binnen het voertuig. Het brandvermogen is gedurende die tijd 1% van het maximale brandvermogen. Daarna treedt de brand uit het voertuig en zal de brand in 5 minuten groeien naar zijn maximale vermogen (zie onderstaande figuur).



Ontwikkeling 'langzame brand'

Het verdere verloop van de brand hangt af van de energie-inhoud van het brandende object. Het oppervlak onder de lijn geeft de energie-inhoud weer. Voor branden van 5 MW en 10 MW volgt het brandvermogen de getekende stippellijn. Voor branden groter dan 10 MW wordt de berekening na 1800 seconden gestopt waardoor de afname van de brand niet meer is beschouwd.

- Bij een 'snelle brand' is er direct sprake van een uitslaande brand. Daarna zal de brand in 2 minuten groeien naar zijn maximale vermogen (zie onderstaande figuur).



Ontwikkeling 'snelle brand'

- Bij de plasbrand is een vaste beschrijving van het brandvermogen in de tijd losgelaten. Het CFD programma bepaald hier zelf hoe de brand zich ontwikkelt bij de gegeven omstandigheden (zoals de beschikbare hoeveelheid zuurstof, brandstof en temperatuur).

Door de grote diversiteit aan voertuigen en ladingen is het moeilijk te voorspellen welke materialen aanwezig zijn bij een voertuigbrand. Daardoor is het lastig te voorspellen hoeveel en welke (rook)gassen vrijkomen tijdens een brand. Gekozen is de brandende voertuigen te modelleren als een brandende

vloeistofplas (Heptaan) waarbij het oppervlak van de plas toeneemt met groter wordende brandvermogens.

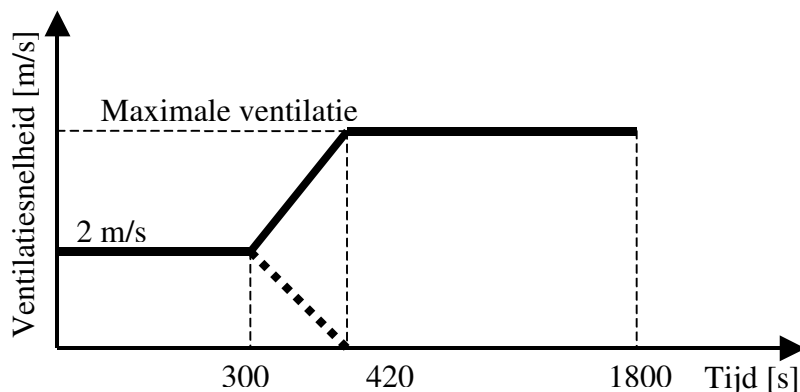
De rookontwikkeling van een brand is sterk afhankelijk van de (on)zuiverheid van de brandstof. Een veel gebruikte waarde voor het rookpotentieel (RP waarde) is het zogenaamde RP_mengsel Benelux dat een rookpotentie geeft van $400 \text{ m}^{-1}\text{m}^3/\text{kg}$ wat ongeveer overeenkomt met een rookproductie van dieselolie. Wanneer zuiver Heptaan wordt verbrand, is deze RP waarde ongeveer $100 \text{ m}^{-1}\text{m}^3/\text{kg}$. In het CFD model zijn de branden met Heptaan gemodelleerd en is de rookproductie van de Heptaan met een factor 4 verhoogd. Het rookpotentieel wordt daardoor dus aangehouden op $400 \text{ m}^{-1}\text{m}^3/\text{kg}$.

5 Modelling van de ventilatie

De berekeningen zijn gemaakt voor 2 situaties: wel of geen mechanische langsventilatie.

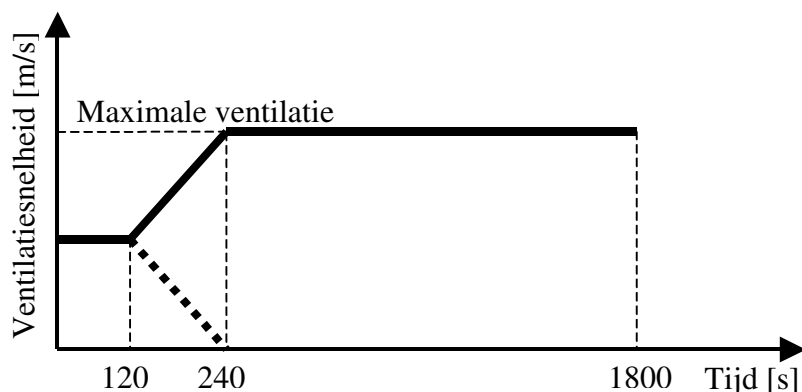
De uitgangspunten ten aanzien van de ventilatie bij brand zijn:

- Bij de aanvang van het incident is er een, door het verkeer opgewekte, rijwind van 2 m/s.
- De maximale ventilatiesnelheid wordt bereikt 2 minuten na het starten van de ventilatie.
- De brandgrootte is van invloed op de ventilatiesnelheid vanwege de weerstand die door de brand wordt opgewekt. Voor de maximale ventilatiesnelheid wordt aangehouden: 5 m/s voor branden van 5, 10 of 25 MW, 4 m/s voor 50 MW, 3 m/s voor 100 MW en 2,5 m/s voor 200 MW en tankbrand.
- De door het verkeer opgewekte rijwind neemt in 2 minuten af naar 0.
- Bij een 'langzame brand' wordt de ventilatie na 5 minuten gestart; tot dat tijdstip is er sprake van een rijwind van 2 m/s. Na 7 minuten is er dus sprake van maximale ventilatie of een ventilatiesnelheid van 0, zie onderstaande figuur.



Ventilatie bij 'langzame brand'

- Bij een 'snelle brand' wordt de ventilatie na 2 minuten gestart (op dat moment is de brand dus maximaal ontwikkeld); tot dat tijdstip is er sprake van een rijwind van 2 m/s. Na 4 minuten is er dus sprake van maximale ventilatie of een ventilatiesnelheid van 0, zie onderstaande figuur.



Ventilatie bij 'snelle brand'

Deze uitgangspunten zijn gebaseerd op het feit dat het rijdend verkeer lucht zal meesleuren, waardoor een luchtstroming in de rijrichting ontstaat. Om de berekeningen te vereenvoudigen wordt uitgegaan van 2 m/s. Uit praktijkmetingen bij de Coentunnel blijkt dat de maximale ventilatiesnelheid binnen 2 minuten na het starten van de ventilatie wordt bereikt. Als het verkeer stil staat is de luchtstroming in de tunnelbuis afhankelijk van de meteorologische condities buiten de tunnel. Hierdoor kan het zijn dat de rook zich (voornamelijk) in één richting zal verplaatsen. In de risicoanalyse wordt echter uitgegaan van een luchtstroming van 0 m/s waardoor de rook zich naar beide zijden zal verplaatsen. Deze situatie is met behulp van een stippellijn in de figuren opgenomen.

De ventilatie in het model wordt bereikt door bij de ingang van de tunnelbuis lucht in te blazen.

6 Tijdstip waarop de aanwezigen hinder ondervinden bij het vluchten (t_{hinder})

De achtergrond van het tijdstip waarop de aanwezigen hinder ondervinden bij het vluchten (en de vluchtsnelheid daardoor sterk afneemt) in uitgeschreven in paragraaf 7.4.2. Hiervoor is de volgende formule gegeven:

Benedenstrooms: $t_{\text{hinderL5}}(x) = \text{para}_{\text{hinderL5}} \cdot x + \text{parb}_{\text{hinderL5}}$

Bovenstrooms: $t_{\text{hinderL2}}(x) = \text{para}_{\text{hinderL2}} \cdot x + \text{parb}_{\text{hinderL2}}$

De waarden van deze parameters zijn afgeleid uit de CFD-resultaten en gegeven in onderstaande tabel.

Brandscenario	Met ventilatie		Zonder ventilatie			
	$\text{para}_{\text{hinderL5}}$ min/m	$\text{parb}_{\text{hinderL5}}$ min	$\text{para}_{\text{hinderL5}}$ min/m	$\text{parb}_{\text{hinderL5}}$ min	$\text{para}_{\text{hinderL2}}$ min/m	$\text{parb}_{\text{hinderL2}}$ min
plasbrand 1200 m ²	0,0010	0,18	0,0059	0,32	0,0183	0,60
plasbrand 300 m ²	0,0007	0,19	0,0059	0,32	0,0183	0,60
plasbrand 30 m ²	0,0027	0,17	0,0041	0,88	0,0182	1,24
200 MW, snel	0,0046	0,24	0,0059	0,32	0,0183	0,60
100 MW, snel	0,0038	0,59	0,0041	0,88	0,0182	1,24
50 MW, snel	0,0036	0,94	0,0031	1,30	0,0184	2,01
25 MW, snel	0,0222	12,43	0,0012	1,98	0,0191	3,09
10 MW, snel	0	60	0,0379	5,04	0,0069	7,58
5 MW, snel	0	60	0,0302	10,10	0,0804	8,66
200 MW, langzaam	0,0057	5,32	0,0092	5,22	0,0126	6,22
100 MW, langzaam	0,0013	6,4022	0,0038	6,70	0,0134	6,64
50 MW, langzaam	0,0013	10,4333	0,0103	7,00	0,0161	7,20
25 MW, langzaam	0,0013	12,4	0,0214	7,16	0,0213	7,83
10 MW, langzaam	0	60	0,0082	12,58	0,0062	13,48
5 MW, langzaam	0	60	0	60	0	60

Bij een aantal van bovenstaande scenario's blijft het zicht gedurende de gehele simulatie periode voldoende goed en zal de vluchtsnelheid niet verlagen door het verslechterde zicht. In dat geval kan t_{hinder} gelijk worden gesteld aan 60 minuten (de maximale tijdsduur die in het model wordt beschouwd). Dit geldt ook voor het gehele bovenstroomse gebied, in de situaties dat er geventileerd wordt.

7 Tijdstip waarop de aanwezigen zelf het gevaar bespeuren ($T_{zelf}(x)$)

Aangenomen is dat de aanwezigen in de tunnelbuis met vluchten zullen beginnen zodra zij tot vluchten worden opgeroepen door de operator óf zodra zij zelf het gevaar bespeuren. Voor het tijdstip waarop de aanwezigen zelf het gevaar bespeuren (T_{zelf}) wordt voor een brand aangehouden: het tijdstip waarop de zichtlengte bij het plafond ter plaatse kleiner dan 5 m wordt (zie Aanname 6-6).

Voor het tijdstip $T_{zelf}(x)$ in minuten na het incident waarop de aanwezigen zelf het gevaar bespeuren op x (afstand vanaf de brand) geldt (zie vergelijking (6-16)):

$$\begin{aligned} T_{zelfL5}(x) &= para_{zichtL5} \cdot x + parab_{zichtL5} && \text{benedenstrooms} \\ T_{zelfL2}(x) &= para_{zichtL2} \cdot x + parab_{zichtL2} && \text{bovenstrooms} \end{aligned}$$

Hierin is x de afstand in meters ten opzichte van de plaats van het incident. De waarden voor $para_{zichtL5}$, $parab_{zichtL5}$, $para_{zichtL2}$ en $parab_{zichtL2}$ worden onderstaand bepaald.

De zichtlengte wordt doorgaans bepaald met een uit de meteorologie afkomstige empirische formule waarmee wordt uitgedrukt hoeveel licht er over een zekere afstand a overblijft van het licht dat wordt uitgezonden door een lichtbron:

$$T_{atm} = e^{-3a/Vm}$$

waarin:

- T_{atm} = fractie overblijvend licht
- a = waarnemersafstand [m]
- Vm = het meteorologische zicht [m]

Voor de situatie in een tunnel wordt in [20] gerekend met een uitdovingcoëfficiënt k waarbij geldt:

$$T_{atm} = e^{-kL}$$

waarin:

- L = lengte waarover het licht wordt gemeten [m]
- k = de uitdovingcoëfficiënt [1/m]

Uit vergelijking van deze beide formules blijkt dat geldt: $-3a/Vm = -kL$ en omdat de waarnemersafstand a gelijk is aan de meetlengte L volgt hieruit dat:

$$Vm = 3/k.$$

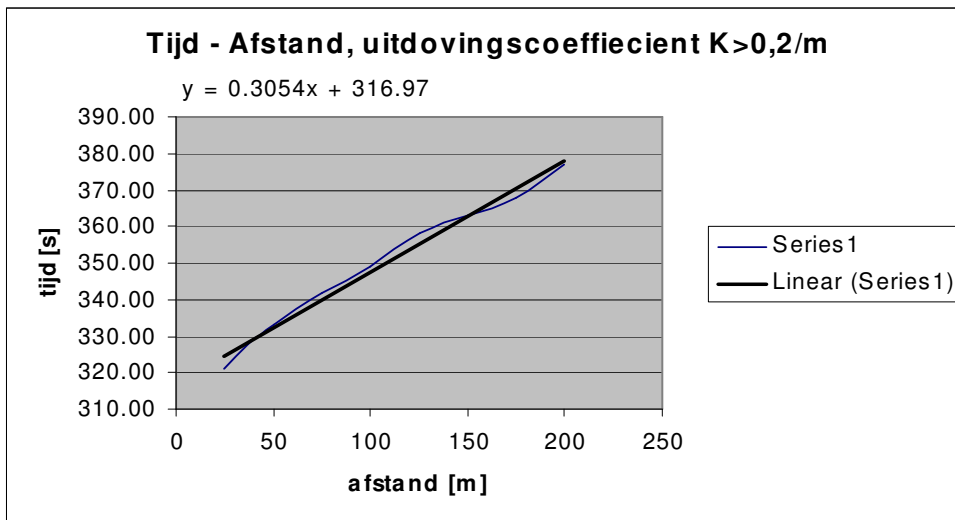
Deze laatste expressie wordt vaak in de literatuur gebruikt om zichtcondities weer te geven. De 3 in de formule wijst op lichtgevende voorwerpen, in dit geval de verlichting tegen het dak van de tunnel of de evacuatieverlichting. Voor voorwerpen die geen licht uitzenden geldt $Vm = 1/k$.

In 'Project 'Safety Proef' rapportage brandproeven, Steunpunt Tunnelveiligheid, augustus 2002' is uitgegaan van $Vm = 2,5/k$ en wordt de hinder als volgt omschreven:

- Lichte hinder: $k = 0,05 \text{ m}^{-1}$; zichtlengte voor lichtgevende voorwerpen is 50 m.
- Matige hinder: $k = 0,1 \text{ m}^{-1}$; zichtlengte voor lichtgevende voorwerpen is 25 m.
- Ernstige hinder: $k = 0,2 \text{ m}^{-1}$; zichtlengte voor lichtgevende voorwerpen is 12,5 m.
- Desoriëntatie: $k > 0,5 \text{ m}^{-1}$; zichtlengte voor lichtgevende voorwerpen is < 5 m.

Voor het bepalen van de waarden van de parameters $para_{zichtL5}$, $parb_{zichtL5}$, $para_{zichtL2}$ en $parb_{zichtL2}$ is gebruik gemaakt van $k = 0,2 \text{ m}^{-1}$ nabij het dak van de tunnelbuis. Voor $k = 0,2 \text{ m}^{-1}$ geldt een zichtlengte van 12,5 m voor lichtgevende voorwerpen en een zichtlengte van 5 m voor niet licht uitstralende voorwerpen zoals wanden (de waarde uit Aanname 6-6).

Voor elke berekening is in een grafiek voor elke 'gemeten' plaats het tijdstip uitgezet waarop voor het eerst $k = 0,2 \text{ m}^{-1}$ wordt bereikt. Door deze punten is een 'fitlijn' getrokken. Hieruit zijn de waarden van $para_{zichtL5}$, $parb_{zichtL5}$, $para_{zichtL2}$ en $parb_{zichtL2}$ direct te bepalen. In onderstaande figuur is als voorbeeld deze grafiek getekend voor het benedenstroomse deel van een tunnel van 400 m bij een 50 MW langzame brand met ventilatie.



Hieruit blijkt dat voor dit scenario $para_{zichtL5} = 0,3054/60 = 0,005$ en $parb_{zichtL5} = 316,97/60 = 5,28$.

In onderstaande tabel zijn alle berekende waarden van $para_{zichtL5}$, $parb_{zichtL5}$, $para_{zichtL2}$ en $parb_{zichtL2}$ vermeld. Alle waarden zijn afgerond. De waarden van $para_{zichtL5}$ en $para_{zichtL2}$ zijn aangegeven in minuten per meter en $parb_{zichtL5}$ en $parb_{zichtL2}$ in minuten.

Bij branden waarbij geventileerd wordt, zullen bovenstroms van het incident geen effecten merkbaar zijn. Voor deze situaties is aangehouden: $para_{zichtL2} = 0$ en $parb_{zichtL2} = 60$.

Brandscenario	Met ventilatie		Zonder ventilatie			
	$para_{zichtL5}$ min/m	$parb_{zichtL5}$ min	$para_{zichtL5}$ min/m	$parb_{zichtL5}$ min	$para_{zichtL2}$ min/m	$parb_{zichtL2}$ min
plasbrand 1200 m ²	0,001	0,17	0,005	0,21	0,016	0,07
plasbrand 300 m ²	0,001	0,13	0,005	0,21	0,016	0,07
plasbrand 30 m ²	0,002	0,05	0,006	0,23	0,020	0,67
200 MW, snel	0,003	0,17	0,005	0,21	0,016	0,07
100 MW, snel	0,004	0,16	0,006	0,21	0,019	0,17
50 MW, snel	0,005	0,21	0,006	0,23	0,020	0,67
25 MW, snel	0,006	0,28	0,007	0,26	0,020	1,36
10 MW, snel	0,007	0,38	0,009	0,28	0,027	1,43
5 MW, snel	0,072	0	0,012	0,33	0,030	2,00
200 MW, langzaam	0,004	5,15	0,007	5,05	0,012	5,60
100 MW, langzaam	0,005	5,18	0,009	5,04	0,013	5,73
50 MW, langzaam	0,005	5,28	0,011	5,04	0,015	5,95
25 MW, langzaam	0,008	5,40	0,014	5,05	0,018	6,21
10 MW, langzaam	0,020	5,77	0,024	4,94	0,027	6,08
5 MW, langzaam	0,093	3,07	0,031	5,12	0,032	6,32

8 Parameters modelering concentratieverloop rookgassen

De concentratie van schadelijke rookgassen is gekoppeld aan de CO-concentraties (zie hoofdstuk 7). In deze paragraaf wordt daarom alleen gesproken over CO-concentraties.

Modellering met ventilatie:

Met betrekking tot CO moeten 3 variabelen worden bepaald, met de volgende parameters:

- $C_{CO}L5(150)$: maximum/peikconcentratie op 150 meter,
- $t_{CO}1(x) = parT1_{CO}a \cdot x + parT1_{CO}b$, is het tijdstip waarop de CO-concentratie op plaats x het eerst hoger wordt dan 5 ppm. Voor langzaam ontwikkelende branden met ventilatie geldt dat de brandontwikkeling pas begint vanaf 5 minuten. De beste benadering van het werkelijke verloop van de grafiek wordt verkregen door $t_{CO}1(x)$ gelijk te stellen aan 6 (minuten) en de helling af te leiden vanaf $t_{CO}1(x) = 6$. Dit geeft voor elke x een redelijke benadering.
- $B_{hellingCO}(x,13,5)$ is de helling van het stijgende stuk van de CO-grafiek. Voor tunnels met ventilatie wordt hiervoor de waarde op 150 meter genomen.

Met ventilatie				
Brandscenario	$parT1_{CO}aL5$ min/m	$parT1_{CO}bL5$ min	$C_{CO}L5(150)$ ppm	$B_{hellingCO}L5$ ppm/min
plasbrand 1200 m ²	0,0006	0,1369	9703	77974
plasbrand 300 m ²	0,0010	0,1221	9822	92185
plasbrand 30 m ²	0,0023	0,0885	1571	1032
200 MW, snel	0,0043	0,0670	4523	2549
100 MW, snel	0,0049	0,0967	1817	925
50 MW, snel	0,0059	0,0876	663	448
25 MW, snel	0,0064	0,0967	347	255
10 MW, snel	0,0051	0,5137	70	38
5 MW, snel	0,0051	0,5820	42	23
200 MW, langzaam	0	6	3887	829
100 MW, langzaam	0	6	1265	223
50 MW, langzaam	0	6	351	62
25 MW, langzaam	0	6	155	28
10 MW, langzaam	0	6	64	10
5 MW, langzaam	0	6	43	6

Modellering zonder ventilatie:

Voor tunnels zonder ventilatie geldt: $C_{CO}(x,13,5) = parC_{CO}a \cdot x + parC_{CO}b$.

$t_{CO}1(x) = parT1_{CO}a \cdot x + parT1_{CO}b$, is het tijdstip waarop de CO-concentratie op plaats x het eerst hoger wordt dan 5 ppm.

$B_{hellingCO}(x,13,5) = parhel_{CO}a \cdot x + parhel_{CO}b$

Zonder ventilatie, benedenstrooms						
Brandscenario	$parT1_{CO}aL5$ min/m	$parT1_{CO}bL5$ min	$parC_{CO}aL5$	$parC_{CO}bL5$	$parhel_{CO}aL5$	$parhel_{CO}bL5$
plasbrand 1200 m ²	0,0053	0,1637	-61,00	12430	-34,76	5557
plasbrand 300 m ²	0,0053	0,1637	-61,00	12430	-34,76	5557
plasbrand 30 m ²	0,0054	0,2605	-17,12	4116	-2,62	482
200 MW, snel	0,0053	0,1637	-61,00	12430	-34,76	5557
100 MW, snel	0,0054	0,2605	-17,12	4116	-2,62	482
50 MW, snel	0,0065	0,2938	-11,46	2525	-1,65	291
25 MW, snel	0,0071	0,3402	-6,50	1422	-0,83	139
10 MW, snel	0,0079	0,4938	-2,52	572	-0,28	56
5 MW, snel	0,0088	0,6144	-1,06	267	-0,12	27
200 MW, langzaam	0,0097	0,1526	-58,35	9827	-7,81	1581

100 MW, langzaam	0,0090	0,3677	-17,49	3897	-2,45	601
50 MW, langzaam	0,0095	0,4614	-11,35	2405	-1,23	275
25 MW, langzaam	0,0127	0,6634	-6,52	1309	-0,69	142
10 MW, langzaam	0,0231	4,4630	-1,33	353	-0,26	69
5 MW, langzaam	0,0298	4,4480	-0,43	141	-0,13	33

Zonder ventilatie, bovenstrooms

Brandscenario	parT1 _{COaL2} min/m	parT1 _{CObL2} min	parC _{COaL2}	parC _{CObL2}	parhel _{COaL2}	parhel _{CObL2}
plasbrand 1200 m ²	0,0179	0,3141	-70,37	12713	-6,31	1745
plasbrand 300 m ²	0,0179	0,3141	-70,37	12713	-6,31	1745
plasbrand 30 m ²	0,0213	0,5360	-20,76	4948	-2,56	544
200 MW, snel	0,0179	0,3141	-70,37	12713	-6,31	1745
100 MW, snel	0,0213	0,5360	-20,76	4948	-2,56	544
50 MW, snel	0,0208	1,1663	-14,24	3135	-2,61	465
25 MW, snel	0,0201	1,9252	-7,28	1591	-1,02	176
10 MW, snel	0,0302	2,0928	-2,40	600	-0,29	74
5 MW, snel	0,0338	2,8722	-1,09	290	-0,11	31
200 MW, langzaam	0,0127	5,7892	-37,67	7374	-8,97	1744
100 MW, langzaam	0,0136	6,0023	-14,76	3764	-4,46	1041
50 MW, langzaam	0,0163	6,3052	-12,79	2801	-1,56	408
25 MW, langzaam	0,0200	6,6473	-6,16	1332	-1,10	263
10 MW, langzaam	0,0291	6,9222	-1,06	315	-0,03	43
5 MW, langzaam	0,0340	7,5337	-0,22	98	-0,001	15

9 Parameters modelering temperatuurverloop

Ten aanzien van de temperatuur moeten de volgende parameters worden bepaald:

- $t_{\text{temp1}}(x) = \text{para}_{\text{tijd1}} \cdot x + \text{parb}_{\text{tijd1}}$; t_{temp1} is het tijdstip waarop de temperatuur hoger wordt dan 50°C.
- C_{heltemp} .
- $\text{TEMP2}(x) = \text{para}_{\text{temp2}} \cdot x + \text{parb}_{\text{temp2}}$ waarbij TEMP2 de piektemperatuur is.
- Als de temperatuur niet boven de 50°C komt, zullen er geen slachtoffers door te hoge temperaturen vallen.
- *Afhankelijkheid C_{heltemp} en TEMP2 van B_{buis} :* $C_{\text{heltemp}} = C_{\text{heltemp}}(x, 13,5) + \text{parbreedtebrandi} \cdot (13,5 - B_{\text{buis}})$ en $\text{TEMP2}(x, B_{\text{buis}}) = \text{TEMP2}(x, 13,5) + \text{parbreedtebrandi} \cdot (13,5 - B_{\text{buis}})$. Parbreedtebrandi is afgeleid in de gevoeligheidsanalyse

Met ventilatie

Brandscenario	para _{tijd1} L5 min/m	parb _{tijd1} L5 min	para _{temp2} L5 °C/m	parb _{temp2} L5 °C	C _{heltemp} L5(13,5) °C/min	parbreedtebrandi
plasbrand 1200 m ²	0,0013	0,1707	-5,05	1322	22372	0
plasbrand 300 m ²	0,0014	0,1878	-4,35	1163	26347	0
plasbrand 30 m ²	0,0040	0,1967	-0,90	289	164	0
200 MW, snel	0,0053	0,19	-2,41	639	291	29,6
100 MW, snel	0,0053	0,4633	-0,32	193	88	16,8
50 MW, snel	0,0066	0,7437	-0,15	110	30	10,4
25 MW, snel	0,0063	1,5379	-0,17	77	24	7,2
10 MW, snel	0	60	0	50	1	5,3
5 MW, snel	0	60	0	50	1	4,6
200 MW, langzaam	0,0072	5,2198	-1,93	553	99	25,0
100 MW, langzaam	0,0058	6,0517	-0,33	186	34	11,5
50 MW, langzaam	0,0108	7,7183	-0,11	79	11	5,1
25 MW, langzaam	0	60	0	50	1	1,38
10 MW, langzaam	0	60	0	50	1	0,6
5 MW, langzaam	0	60	0	50	1	0,2

Zonder ventilatie benedenstrooms						
Brandscenario	para _{tijd1} L5 min/m	parb _{tijd1} L5 min	para _{temp2} L5 °C/m	parb _{temp2} L5 °C	C _{heltemp} L5(13,5) °C/min	parbreedtebrandi
plasbrand 1200 m ²	0,0066	0,2588	-4,73	781	330	0
plasbrand 300 m ²	0,0066	0,2588	-4,73	781	330	0
plasbrand 30 m ²	0,0068	0,7405	-1,46	294	81	0
200 MW, snel	0,0066	0,2588	-4,73	781	330	20,0
100 MW, snel	0,0068	0,7405	-1,46	294	81	11,7
50 MW, snel	0,0066	1,1665	-0,89	198	9	7,6
25 MW, snel	0,0917	0	-0,37	105	4	5,5
10 MW, snel	0	60	0	50	1	4,3
5 MW, snel	0	60	0	50	1	3,8
200 MW, langzaam	0,016	5	-2,91	469	31	11,7
100 MW, langzaam	0,016	5	-1,37	249	35	6,0
50 MW, langzaam	0,050	5	-0,92	176	18	3,1
25 MW, langzaam	0,066	6	-0,50	106	7	1,7
10 MW, langzaam	0	60	0	50	1	0,9
5 MW, langzaam	0	60	0	50	1	0,6

Zonder ventilatie bovenstrooms						
Brandscenario	para _{tijd1} L2 min/m	parb _{tijd1} L2 min	para _{temp2} L2 °C/m	parb _{temp2} L2 °C	C _{heltemp} L2(13,5) °C/min	parbreedtebrandi
plasbrand 1200 m ²	0,0470	0,4906	-3,55	534	56	0
plasbrand 300 m ²	0,0470	0,4906	-3,55	534	56	0
plasbrand 30 m ²	0,0455	0,2414	-1,61	273	57	0
200 MW, snel	0,0470	0,4906	-3,55	534	56	4,3
100 MW, snel	0,0455	0,2414	-1,61	273	57	2,5
50 MW, snel	0,0766	-0,4928	-1,07	193	13	1,6
25 MW, snel	0,0986	-0,0148	-0,58	117	4	1,2
10 MW, snel	0	60	0	50	1	0,9
5 MW, snel	0	60	0	50	1	0,8
200 MW, langzaam	0,029	5	-1,71	288	35	17,8
100 MW, langzaam	0,048	5	-1,55	263	35	8,4
50 MW, langzaam	0,048	6	-0,96	174	21	3,7
25 MW, langzaam	0,058	7	-0,46	103	8	1,38
10 MW, langzaam	0	60	0	50	1	0,7
5 MW, langzaam	0	60	0	50	1	0,4

10 Gevoeligheidsanalyse

Om de invloed van een aantal parameters op de standaard berekeningen te beschouwen, zijn gevoeligheidsberekeningen uitgevoerd. De gevoeligheidsberekeningen richten zich op het vaststellen van de snelheid waarmee de effecten zich door de tunnel verplaatsen. De beschouwde aspecten zijn:

- Breedte tunnelbuis: 10 m en 7,5 m in plaats van 13,5 m;
- Helling van de buis: opgaand of neergaand, situatie met ventilatie;
- Rookproductie;
- Invloed hittewerende bekleding;
- Rijwind: 3 m/s in plaats van 2 m/s;
- Lengte > 60°C gebied.

Bij de beschouwingen zijn alleen de bovenstaande variabelen aangepast, de overige parameters zijn constant gehouden.

Opgemerkt wordt dat de resultaten van de gevoeligheidsberekeningen in SI eenheden worden gegeven. QRA-tunnels maakt gebruik van minuten in plaats van seconden. Overige eenheden zijn gelijk, de conclusies en resultaten worden omgerekend naar minuten.

Conclusies:

Uit de gevoeligheidsanalyse volgt dat de breedte van de tunnel een grote invloed heeft op de wijze waarop rook, roet en temperatuur zich ten gevolge van een incident met voertuigbrand door de tunnel bewegen. Het blijkt dat bij afnemende tunnelbreedte de temperatuur in de tunnel hoger wordt. Bij een gelijkblijvende ventilatiesnelheid, wordt gevonden dat de temperatuurstijging per seconde hoger wordt. Uit diverse CFD berekeningen blijkt dat deze stijging min of meer evenredig is met de breedte toename van de tunnel. Hierdoor kan een relatief simpele vergelijking afgeleid worden voor de toename van de temperatuur als functie van de breedte van de tunnel.

Het "schoorsteen effect" bij hellende buizen treedt pas na lange tijd op omdat dit een evenwichtssituatie is. Zolang ventilatie aanwezig is, zal deze de luchtsnelheid domineren. Pas bij volledige afwezigheid van ventilatie treedt het schoorsteeneffect op.

De hoeveelheid vrijkomende rook heeft nagenoeg geen invloed op de temperatuur en het moment waarop de effecten op een willekeurige plaats aankomen.

De invloed van hittewerende bekleding is duidelijk waarneembaar in de modellen. De hoogst te bereiken temperatuur is in tunnels zonder hittewerkende bekleding lager dan in tunnels waar deze bekleding wel aanwezig is.

Een verhoging van de ventilatiesnelheid met een factor 1,5 heeft tot gevolg dat de lucht sneller door de tunnel geblazen wordt waardoor de rook, roet en temperatuur zich sneller door de tunnel verspreiden. Echter de extra lucht heeft een koelend en verdunnend effect op de vrijkomende verbrandingsgassen. Hierdoor heeft de snelheidsverhoging van de ventilatie een beperkte invloed op het moment waarop de effecten op een willekeurig punt aankomen.

Breedte tunnelbuis

De invloed van de breedte van de tunnelbuis is onderzocht door voor het scenario 100 MW snelle brand met ventilatie, twee berekeningen te maken met andere breedten. De beschouwde breedten zijn: 10,0 m en 7,5 m. Om een vergelijking met de 13,5 m brede tunnelbuis mogelijk te maken, dient de verhouding tussen het bruto oppervlak (het tunnelportaal oppervlak waardoor geventileerd wordt) en het netto oppervlak (bruto oppervlak minus het oppervlak van de personenvoertuigen) gelijk te blijven. Veranderingen in luchtsnelheden en dus van de effecten worden nu alleen veroorzaakt door de kleinere tunnelbreedte. Een tweede berekening wordt gemaakt voor een 25 MW snelle brand met ventilatie. Op deze wijze kan ook de invloed van de brandgrootte beschouwd worden.

De gevoeligheidsanalyse van de breedte betreft alleen voertuigbranden. De plasbranden zijn over de gehele breedte van de tunnelbuis gemodelleerd en kennen daardoor een ander brandverloop. De brandgrootte is afhankelijk van de breedte van de buis. Hierdoor zal de invloed van de breedte van de buis op de vrijkomende verbrandingsgassen en temperatuurstijging per seconde beperkt zijn.

De afgeleide resultaten gelden alleen voor tunnelbuizen die breder zijn dan 5m, met een bovengrens van 15m.

100 MW snelle brand met ventilatie, breedte = 13,5 m, 10,0 m en 7,5 m

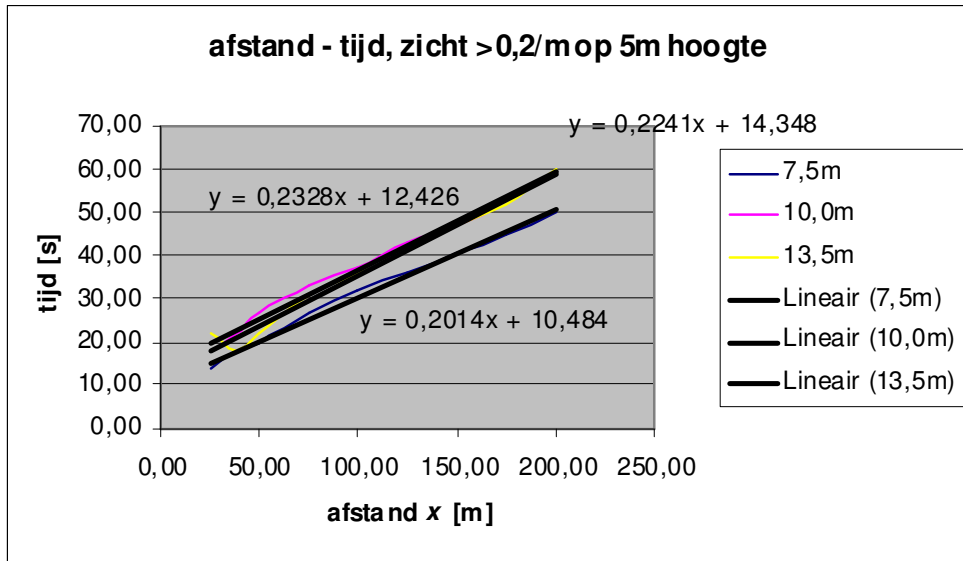
In de oorspronkelijke berekening met een breedte van 13,5m zijn 3 rijstroken gemodelleerd. Voor de 10,0 m en de 7,5 m brede tunnelbuis zijn respectievelijk 2 en 1 rijstroken gemodelleerd. In alle drie de gevallen is het netto oppervlak in de tunnelbuis circa 80% van het bruto oppervlak.

De beschouwde effecten zijn:

- Het tijdstip waarop de aanwezigen zelf het gevaar bespeuren: de zichtlengte wordt kleiner dan 5 m. ($K > 0,2/m$), factoren a en b uit de vergelijking $a * x + b$.
- Het tijdstip waarop de blootstelling aan het gevaar begint: een temperatuurstijging van 5°C, factoren c en d uit de vergelijking $c * x + d$.
- De gemiddelde stijging van de temperatuur per tijdseenheid in een gebied van 200 m lengte aansluitend (benedenstrooms) op de brand. Factor $C_{t(i)}$

Bespeuren gevaar: zichtlengte kleiner dan 5m, factoren a en b.

In onderstaande figuur is voor de 3 verschillende breedten het verloop van de zichtlengte (kleiner dan 5 m, $K > 0,2/m$) naar plaats en tijd weergegeven.

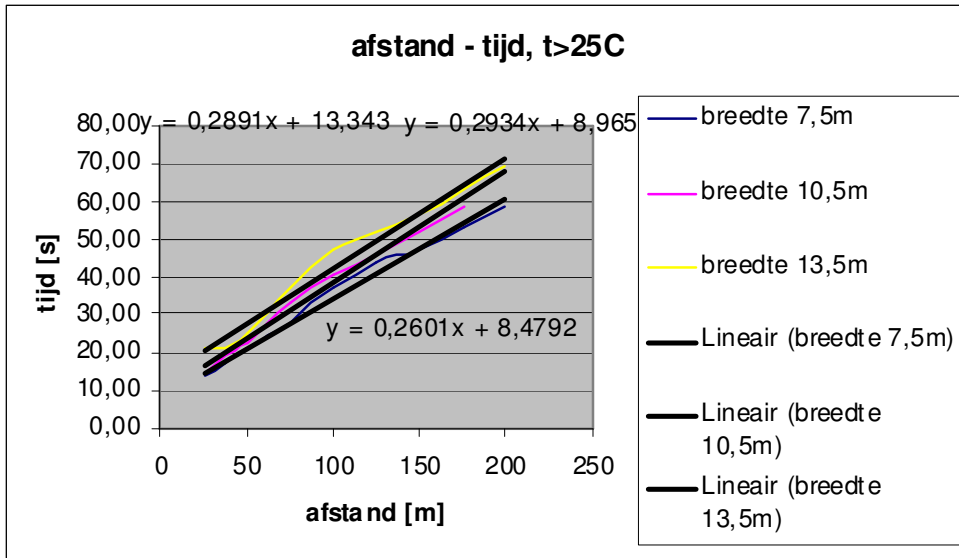


Breedte [m]	a	b
7,5	0,20	10,48
10,0	0,22	14,35
13,5	0,23	12,43

De breedte heeft nauwelijks effect op het tijdstip waarop de weggebruikers het gevaar ontdekken $T_{zelf}(x)$ op plaats x. De rijwind bepaalt het tijdstip waarop de aanwezigen de brand ontdekken

Start blootstelling aan gevaar, temperatuur = 25°C

In onderstaande figuur is voor de drie breedten het moment naar plaats en tijd weergegeven waarop het gevaar op ooghoogte start. Voor het moment van starten is hier 25°C aangehouden.



Breedte [m]	c	d
7,5	0,26	8,48
10,0	0,29	8,97
13,5	0,29	13,34

Het tijdstip $T_{\text{hinder}}(x)$ waarop de blootstelling aan het gevaar begint, is vrijwel onafhankelijk van de breedte van de tunnel. De rijwind bepaalt het tijdstip waarop de weggebruikers effecten ondervinden van de brand.

De gemiddelde stijging van de temperatuur per tijdseenheid in een gebied van 200 m lengte aansluitend (benedenstrooms) op de brand

Door een versmalling van de tunnel naar 10,0 m of 7,5 m wordt de uiteindelijke temperatuur op ooghoogte hoger. Dit zal door twee redenen ontstaan:

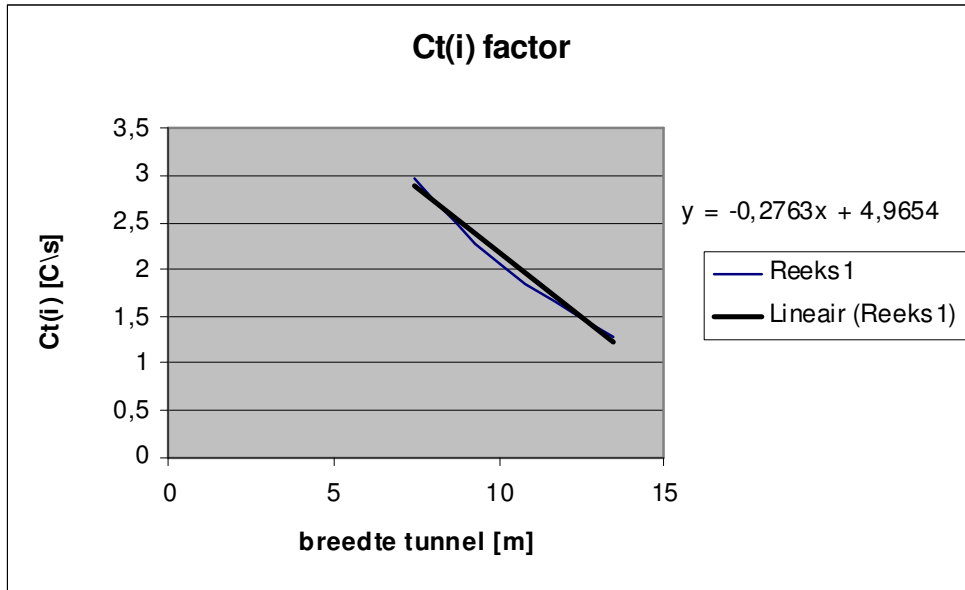
1. Wanneer aangenomen wordt dat de rookproductie van een 100 MW brand onafhankelijk is van de breedte, zal de dikte van de hete rooklaag bij afnemende breedte toenemen. De hoeveelheid te bergen rook blijft immers gelijk. Hierdoor staan de weggebruikers op ooghoogte in een dikkere laag verbrandingsgassen met daardoor op ooghoogte een hogere temperatuur.
2. Het koelende oppervlak van het beton is kleiner. Hierdoor blijven de verbrandingsgassen langer warm.

Bij een gelijk blijvende verplaatsingssnelheid van het 25°C front, moet de temperatuur per tijdseenheid sneller stijgen wat gevolgen heeft voor de temperatuurstijging $C_{t(i)}$.

In onderstaande tabel is de temperatuurstijging $C_{t(i)}$ per seconde gegeven:

Breedte tunnel [m]	$C_{t(i)}$ [$^\circ\text{C}/\text{s}$]	$C_{t(i)}$ [$^\circ\text{C}/\text{min}$]
7,5	2,97	178,2
10,0	2,07	124,2
13,5	1,29	77,4

Wanneer de $C_{t(i)}$ factor tegen de breedte van de tunnel in een grafiek zetten, ontstaat de onderstaande figuur:



De $C_{t(i)}$ factor kent een nagenoeg lineair verloop over de breedte. In formule vorm zou dit zijn:

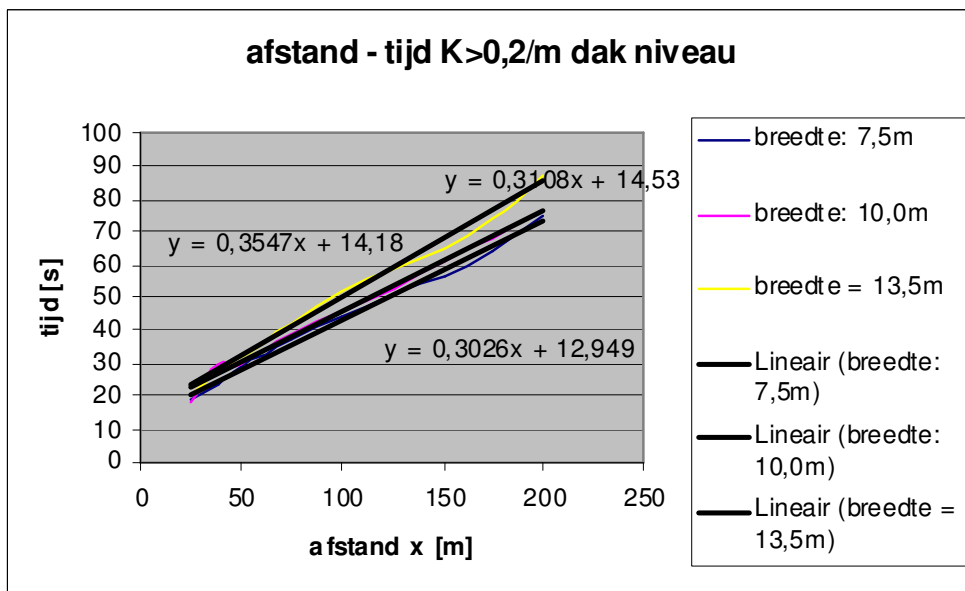
$C_{t(i)} = 1,29 + 0,28(13,5-b)$ waarin b de breedte van de tunnel is en $C_{t(i)}$ in °C/s.

$C_{t(i)} = 77,4 + 16,8(13,5-b)$ voor QRA-tunnels dat in °C/ minuut werkt.

25 MW snelle brand met ventilatie, breedte = 13,5 m, 10,0 m en 7,5 m

Voor een 25MW brand is een gelijke analyse gemaakt. Volstaan wordt met de weergave van de belangrijkste grafieken

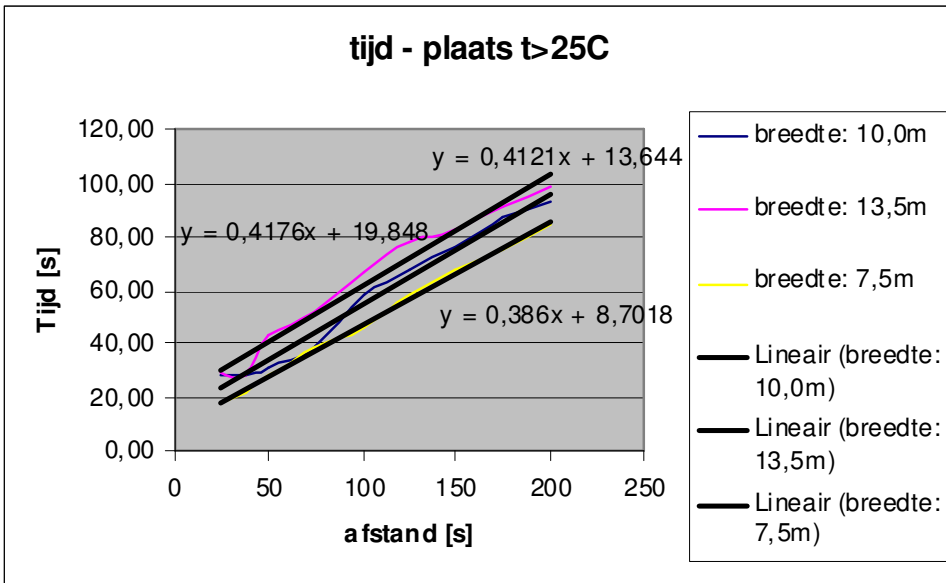
Bespeuren gevaar: zichtlengte kleiner dan 5 m, factoren a en b .



Breedte [m]	a	b
7,5	0,30	12,95
10,0	0,31	14,53
13,5	0,35	14,18

Zoals te verwachten zijn er ook voor de kleine branden geen grote verschillen in het moment waarop de aanwezigen gewaarschuwd worden voor het naderende gevaar.

Start blootstelling aan gevaar, factoren c en d



Breedte [m]	a	b
7,5	0,39	8,70
10,0	0,41	13,64
13,5	0,42	19,85

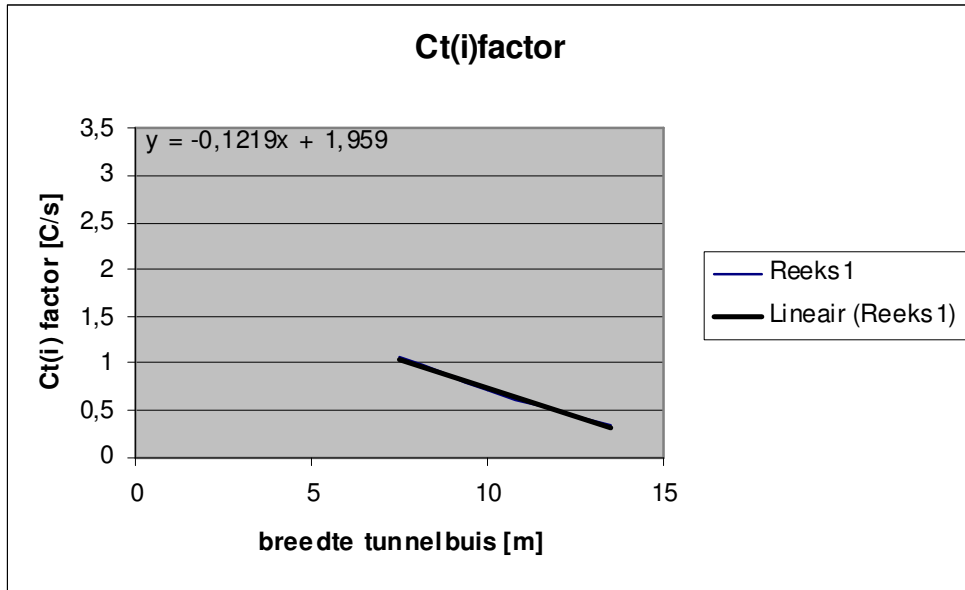
Zoals te verwachten zijn ook voor de kleine branden geen grote verschillen in het moment waarop de effecten de aanwezigen bereiken.

De gemiddelde stijging van de temperatuur per tijdseenheid in een gebied van 200 m lengte aansluitend (benedenstrooms) op de brand.

De invloed van de versmalling van de tunnelbuis is voor een 25 MW snelle brand met ventilatie in onderstaande tabel gezet.

Breedte tunnel [m]	$C_{t(i)}$ [°C/s]	$C_{t(i)}$ [°C/min]
7,5	1,07	64,2
10,0	0,69	41,4
13,5	0,33	19,8

In grafiekvorm geeft dit ook weer een nagenoeg lineair verband tussen $C_{t(i)}$ en de breedte van de tunnel:



Om de invloed te verrekenen zou $C_{t(i)}$ moeten worden:

$C_{t(i)} = 0,33 + 0,12(13,5-b)$ waarin b de breedte van de tunnel is.

$C_{t(i)} = 19,8 + 7,2(13,5-b)$ voor QRA-tunnels dat in °C/minuut werkt.

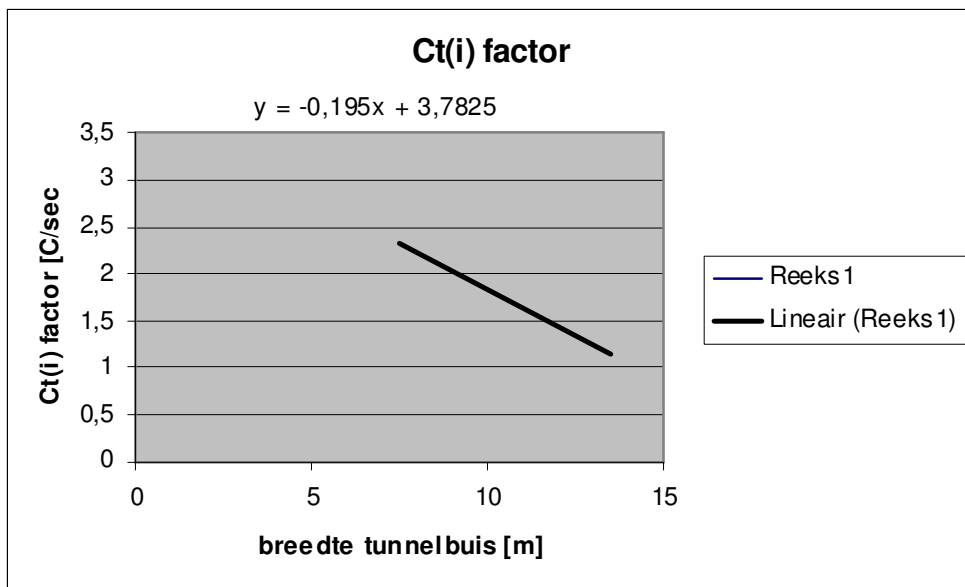
Op gelijke wijze is de invloed van de breedte op de $C_{t(i)}$ voor de overige scenario's bepaald. Voor deze beschouwingen is alleen de invloed van de 7,5 m brede tunnel bepaald. Vergeleken wordt de 7,5 m brede tunnel met de 13,5 m brede tunnel. De tussenliggende waarden worden lineair geïnterpoleerd.

Snelle brand zonder ventilatie 100 MW: BENEDENSTROOMS

De gemiddelde stijging van de temperatuur per tijdseenheid van een 100 MW snelle brand zonder ventilatie in een gebied van 200 m lengte aansluitend (benedenstrooms) op de brand.

Breedte tunnel [m]	$C_{t(i)}$ [°C/s]	$C_{t(i)}$ [°C/min]
7,5	2,33	139,6
13,5	1,15	69,0

Deze tabel in grafiekvorm geeft voor de situatie *benedenstrooms* het volgende beeld:



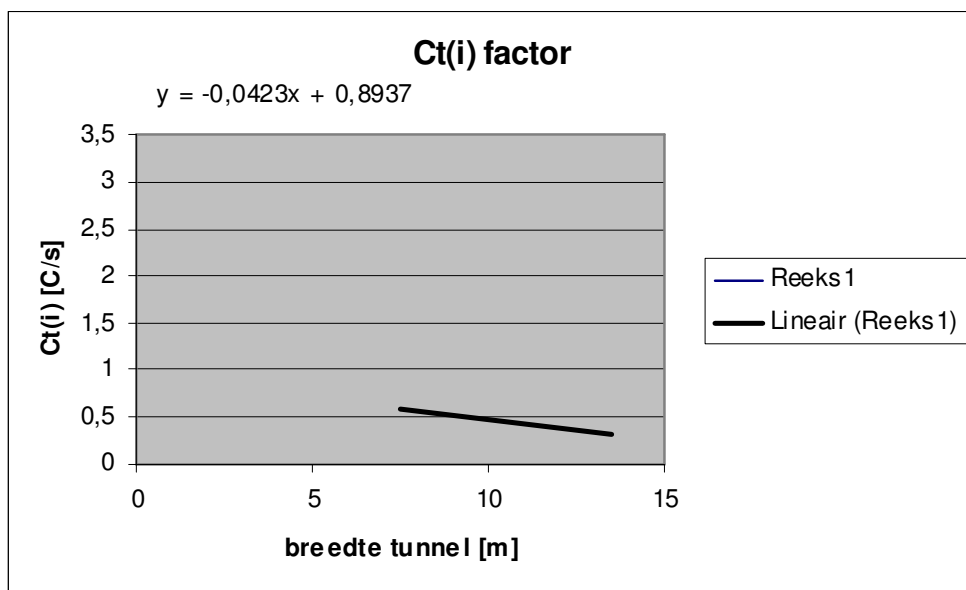
$C_{t(i)} = 1,15 + 0,19(13,5-b)$ waarin b de breedte van de tunnel is.

$C_{t(i)} = 69,0 + 11,7(13,5-b)$ voor QRA-tunnels dat in °C/ minuut werkt.

Snelle brand zonder ventilatie 100 MW: BOVENSTROOMS

De gemiddelde stijging van de temperatuur per tijdseenheid van een 100 MW snelle brand zonder ventilatie in een gebied van 200 m lengte aansluitend (bovenstrooms) op de brand.

Breedte tunnel [m]	$C_{t(i)}$ [°C/s]	$C_{t(i)}$ [°C/min]
7,5	0,58	34,6
13,5	0,32	19,4



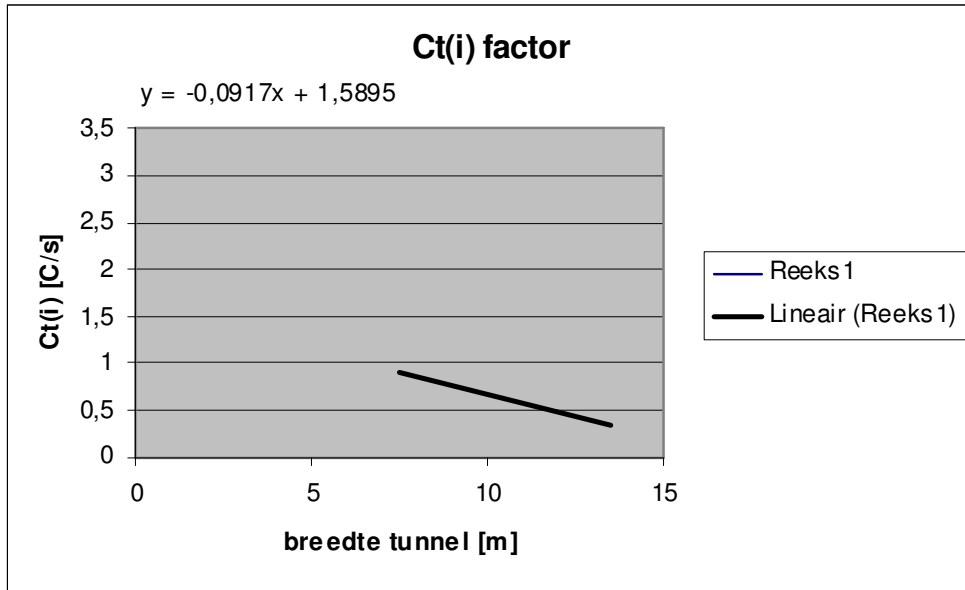
$C_{t(i)} = 0,32 + 0,04(13,5-b)$ waarin b de breedte van de tunnel is.

$C_{t(i)} = 19,4 + 2,5(13,5-b)$ voor QRA-tunnels dat in °C/ minuut werkt.

Snelle brand zonder ventilatie 25 MW: BENEDENSTROOMS

De gemiddelde stijging van de temperatuur per tijdseenheid van een 25 MW snelle brand zonder ventilatie in een gebied van 200 m lengte aansluitend (benedenstrooms) op de brand.

Breedte tunnel [m]	$C_{t(i)}$ [°C/s]	$C_{t(i)}$ [°C/min]
7,5	0,90	54,1
13,5	0,35	21,1



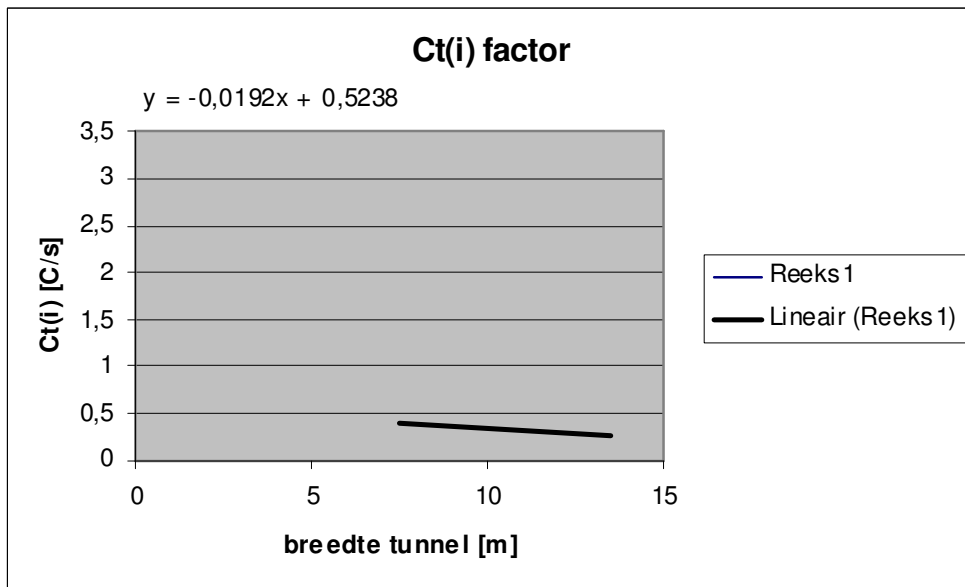
$C_{t(i)} = 0,35 + 0,09(13,5-b)$ waarin b de breedte van de tunnel is.

$C_{t(i)} = 21,1 + 5,5(13,5-b)$ voor QRA-tunnels dat in °C/minuut werkt.

Snelle brand zonder ventilatie 25 MW: BOVENSTROOMS

De gemiddelde stijging van de temperatuur per tijdseenheid van een 25 MW snelle brand zonder ventilatie in een gebied van 200 m lengte aansluitend (bovenstrooms) op de brand.

Breedte tunnel [m]	$C_{t(i)}$ [°C/s]	$C_{t(i)}$ [°C/min]
7,5	0,38	23,0
13,5	0,27	15,9



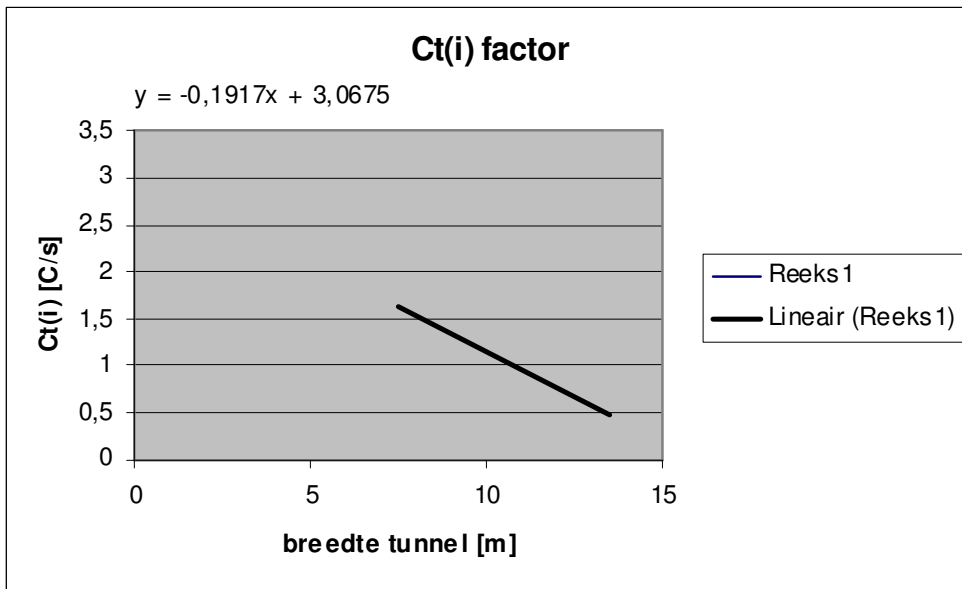
$C_{t(i)} = 0,27 + 0,019(13,5-b)$ waarin b de breedte van de tunnel is.

$C_{t(i)} = 15,9 + 1,15(13,5-b)$ voor QRA-tunnels dat in minuten werkt

Langzame brand met ventilatie 100 MW: BENEDENSTROOMS

De gemiddelde stijging van de temperatuur per tijdseenheid van een 100 MW 'langzame' brand met ventilatie in een gebied van 200 m lengte aansluitend (benedenstrooms) op de brand.

Breedte tunnel [m]	$C_{t(i)}$ [°C/s]	$C_{t(i)}$ [°C/min]
7,5	1,63	98,3
13,5	0,48	28,9

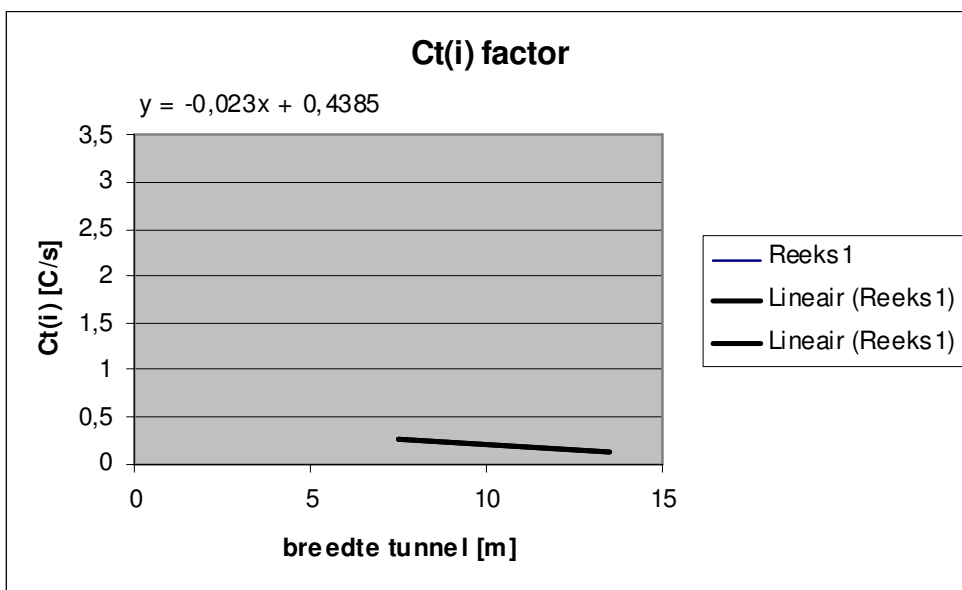


$C_{t(i)} = 0,48 + 0,19(13,5-b)$ waarin b de breedte van de tunnel is.

$C_{t(i)} = 28,9 + 11,4(13,5-b)$ voor QRA-tunnels dat in °C/ minuut werkt.

Langzame brand met ventilatie 25 MW: BENEDENSTROOMS

De gemiddelde stijging van de temperatuur per tijdseenheid van een 25MW 'langzame' brand met ventilatie in een gebied van 200 m lengte aansluitend (benedenstrooms) op de brand.



Breedte tunnel [m]	$C_{t(i)}$ [°C/s]	$C_{t(i)}$ [°C/min]
7,5	0,27	15,95
13,5	0,13	7,65

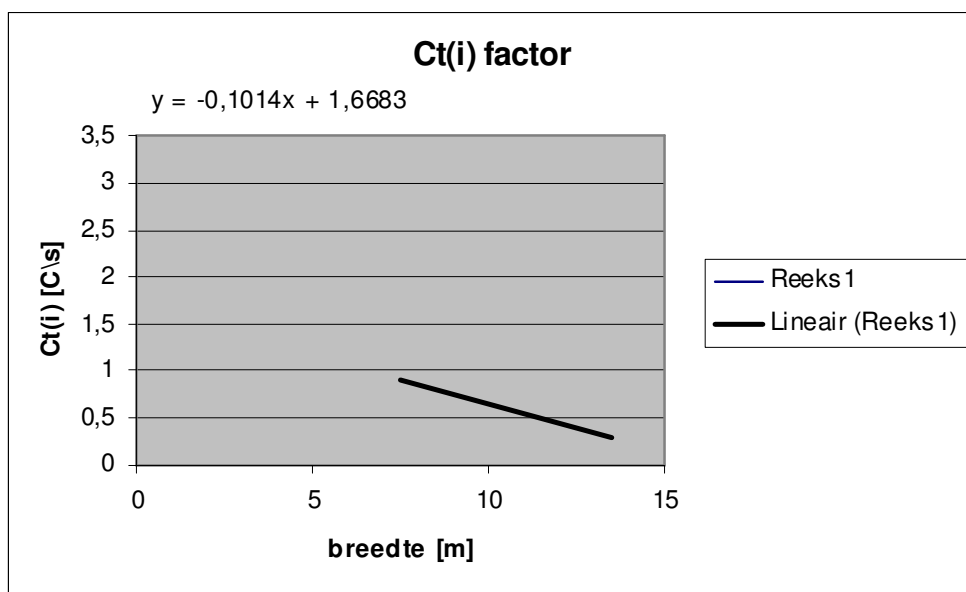
$C_{t(i)} = 0,13 + 0,023(13,5-b)$ waarin b de breedte van de tunnel is.
 $C_{t(i)} = 7,65 + 1,38(13,5-b)$ voor QRA-tunnels dat in °C/ minuut werkt.

Langzame brand zonder ventilatie 100 MW: BENEDENSTROOMS

De gemiddelde stijging van de temperatuur per tijdseenheid van een 100 MW 'langzame' brand zonder ventilatie in een gebied van 200 m lengte aansluitend (benedenstrooms) op de brand.

Breedte tunnel [m]	$C_{t(i)}$ [°C/s]	$C_{t(i)}$ [°C/min]
7,5	0,91	54,4
13,5	0,45	18

In grafiekvorm voor de $C_{t(i)}$ factor geeft dit in °C/s *benedenstrooms*:



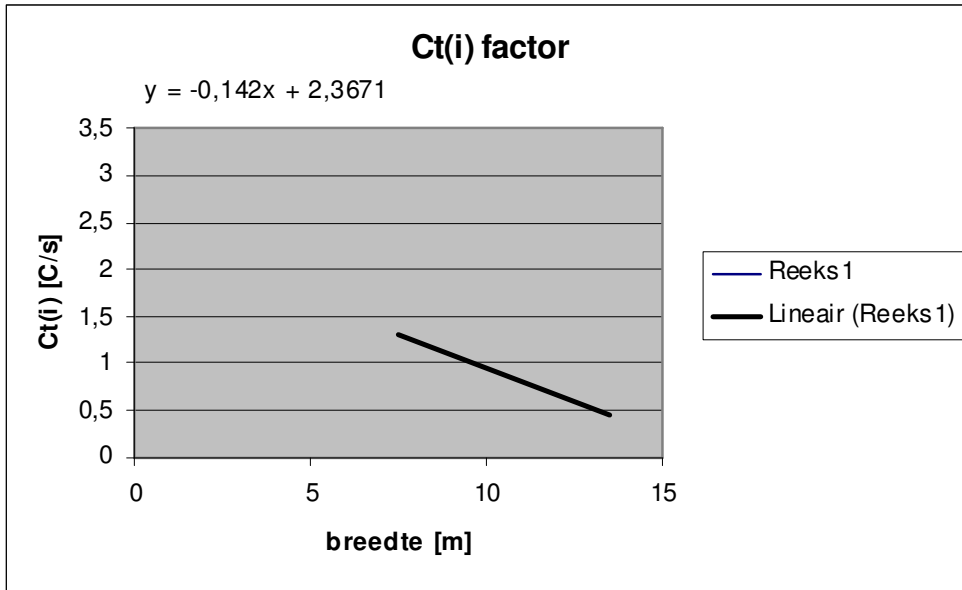
$C_{t(i)} = 0,45 + 0,10(13,5-b)$ waarin b de breedte van de tunnel is.
 $C_{t(i)} = 18 + 6(13,5-b)$ voor QRA-tunnels dat in °C/ minuut werkt.

Langzame brand zonder ventilatie 100 MW: BOVENSTROOMS

De gemiddelde stijging van de temperatuur per tijdseenheid van een 100 MW 'langzame' brand zonder ventilatie in een gebied van 200 m lengte aansluitend (bovenstrooms) op de brand.

Breedte tunnel [m]	$C_{t(i)}$ [°C/s]	$C_{t(i)}$ [°C/min]
7,5	1,30	78
13,5	0,45	27

In grafiekvorm voor de $C_{t(i)}$ factor geeft dit in °C/s *bovenstrooms*:



$C_{t(i)} = 0,45 + 0,14(13,5-b)$ waarin b de breedte van de tunnel is.

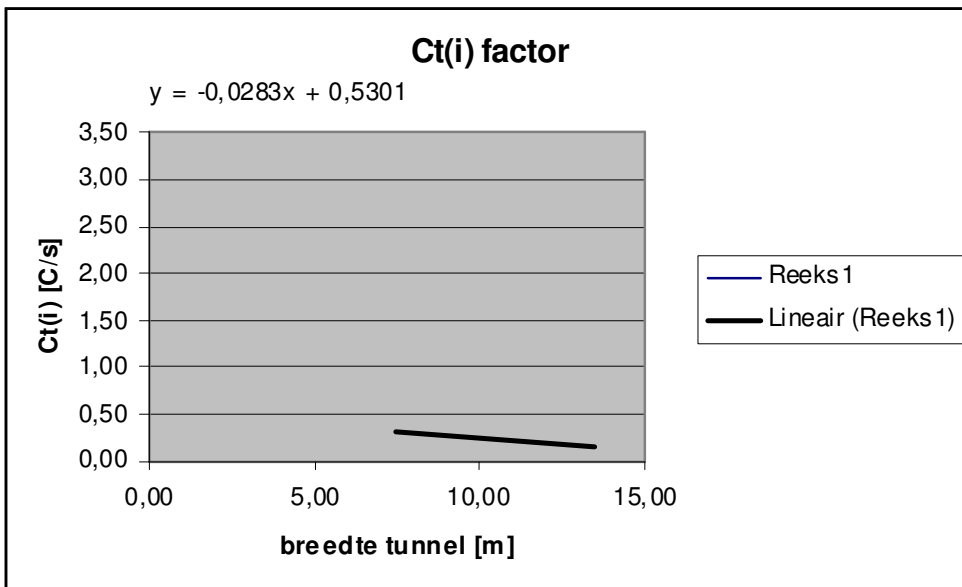
$C_{t(i)} = 27 + 8,4(13,5-b)$ voor QRA-tunnels dat in °C/ minuut werkt.

Langzame brand zonder ventilatie 25 MW BENEDENSTROOMS

De gemiddelde stijging van de temperatuur per tijdseenheid van een 25 MW 'langzame' brand zonder ventilatie in een gebied van 200 m lengte aansluitend (benedenstrooms) op de brand.

Breedte tunnel [m]	$C_{t(i)}$ [°C/s]	$C_{t(i)}$ [°C/min]
7,5	0,32	19,06
13,5	0,15	8,86

In grafiekvorm voor de $C_{t(i)}$ factor geeft dit in °C/s benedenstrooms:



$C_{t(i)} = 0,15 + 0,0283(13,5-b)$ waarin b de breedte van de tunnel is.

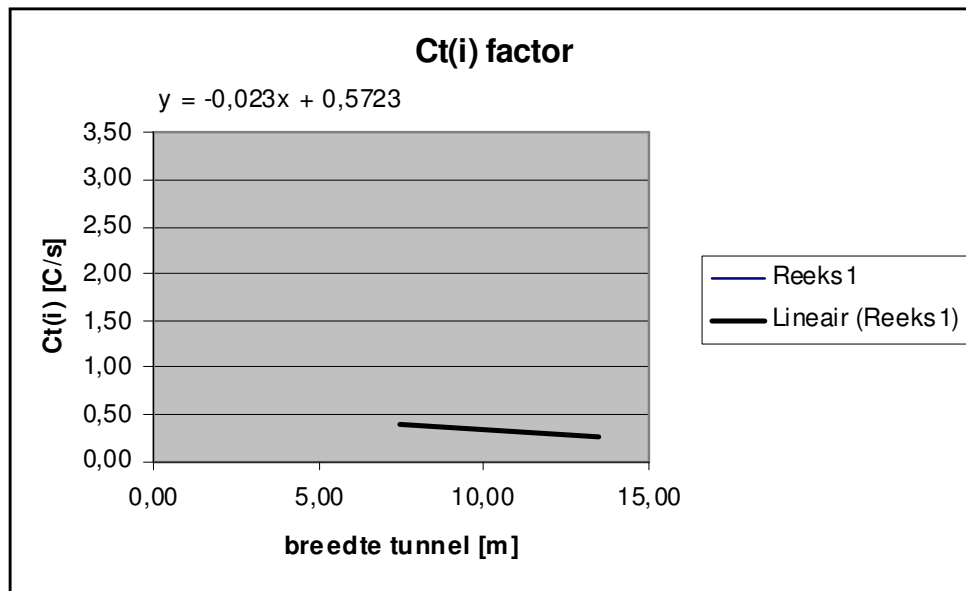
$C_{t(i)} = 8,86 + 1,70(13,5-b)$ voor QRA-tunnels dat in °C/ minuut werkt.

Langzame brand zonder ventilatie 25 MW: BOVENSTROOMS

De gemiddelde stijging van de temperatuur per tijdseenheid van een 25 MW 'langzame' brand zonder ventilatie in een gebied van 200 m lengte aansluitend (bovenstrooms) op de brand.

Breedte tunnel [m]	$C_{t(i)}$ [°C/s]	$C_{t(i)}$ [°C/min]
7,5	0,40	24,0
13,5	0,26	15,7

In grafiekvorm voor de $C_{t(i)}$ factor geeft dit in °C/s bovenstrooms:



$C_{t(i)} = 0,26 + 0,023(13,5-b)$ waarin b de breedte van de tunnel is.

$C_{t(i)} = 15,7 + 1,38(13,5-b)$ voor QRA-tunnels dat in °C/minuut werkt.

Overzicht scenario's.

Overzicht van de invloed van de breedte. De berekende scenario's zijn cursief weergegeven, de niet berekende scenario's zijn lineair geïnterpoleerd/geëxtrapeleerd, afgerond op 1 cijfer achter de komma.

Bij een 'langzame' of snelle brand *met* ventilatie is de invloed bovenstrooms 0.

'langzame' brand met ventilatie benedenstrooms:

Brandgrootte [MW]:	$C_{t(i)}$ [C/min] afhankelijk van de breedte b
5	<i>2,0+0,2(13,5-b)</i>
10	<i>3,3+0,6(13,5-b)</i>
25	<i>7,65+1,38(13,5-b)</i>
50	<i>14,7+5,1(13,5-b)</i>
100	<i>28,8+11,5(13,5-b)</i>
200	<i>57,0+25,0(13,5-b)</i>

'langzame' brand zonder ventilatie, benedenstrooms:

Brandgrootte [MW]:	$C_{t(i)}$ [C/min] afhankelijk van de breedte b
5	<i>6,4+0,6(13,5-b)</i>
10	<i>7,0+0,9(13,5-b)</i>
25	<i>8,9+1,7(13,5-b)</i>
50	<i>11,9+3,1(13,5-b)</i>
100	<i>18,0+6,0(13,5-b)</i>
200	<i>30,2+11,7(13,5-b)</i>

'langzame' brand zonder ventilatie, bovenstrooms:

Brandgrootte [MW]:	$C_{t(i)}$ [C/min] afhankelijk van de breedte b
5	$21,7+0,4(13,5-b)$
10	$13,4+0,7(13,5-b)$
25	$15,7+1,38(13,5-b)$
50	$19,5+3,7(13,5-b)$
100	$27,0 + 8,4(13,5-b)$
200	$42,0+17,8(13,5-b)$

Snelle brand met ventilatie benedenstrooms:

Brandgrootte [MW]:	$C_{t(i)}$ [C/min] afhankelijk van de breedte b
5	$2,4 + 4,6 (13,5-b)$
10	$4,8+5,3(13,5-b)$
25	$19,8+7,2(13,5-b)$
50	$39,0+ 10,4(13,5-b)$
100	$77,4+16,8(13,5-b)$
200	$154,2+29,6(13,5-b)$

Snelle brand zonder ventilatie, benedenstrooms:

Brandgrootte [MW]:	$C_{t(i)}$ [C/min] afhankelijk van de breedte b
5	$8,3+3,8(13,5-b)$
10	$11,5+4,3(13,5-b)$
25	$21,1+5,5(13,5-b)$
50	$37,1+7,6(13,5-b)$
100	$69+11,7(13,5-b)$
200	$132,9+20,0(13,5-b)$

Snelle brand zonder ventilatie, bovenstrooms:

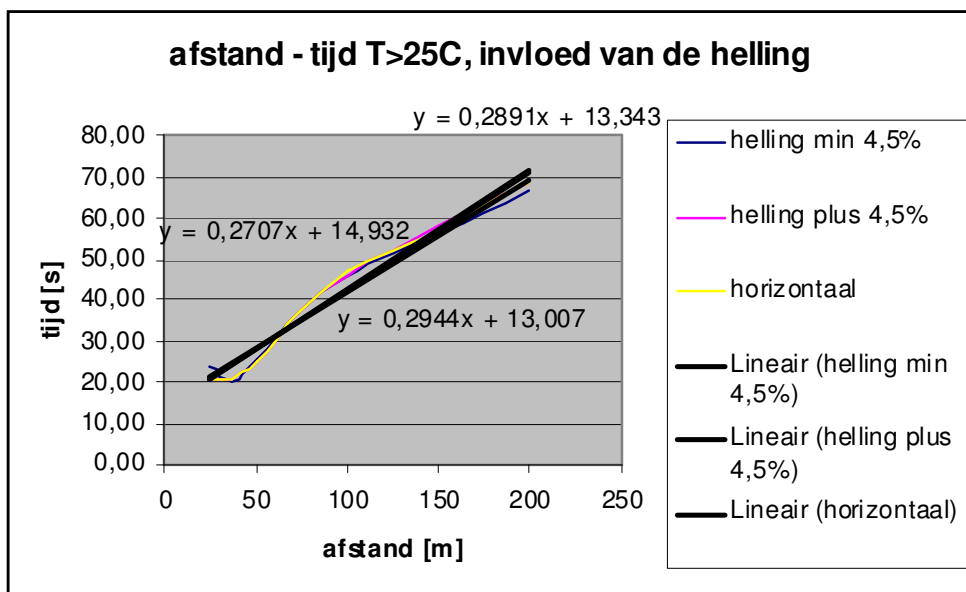
Brandgrootte [MW]:	$C_{t(i)}$ [C/min] afhankelijk van de breedte b
5	$15,0+0,8(13,5-b)$
10	$15,2+0,9(13,5-b)$
25	$15,9+1,2(13,5-b)$
50	$17,1+1,6(13,5-b)$
100	$19,4+2,5(13,5-b)$
200	$24,0+4,3(13,5-b)$

Waarin b de breedte van de tunnelbuis is in meters. De resultaten zijn verwerkt in de coëfficiëntentabel.

Helling van de buis: 4,5% opgaand en 4,5% neergaand

De helling van een buis wordt gesimuleerd door de zwaartekracht onder een hoek te laten aangrijpen. Ook hier is het beschouwde geval een 100 MW snelle brand met ventilatie en een breedte van 13,5 m.

In de onderstaande figuren zijn de c en d, factoren ten opzichte van een opgaande, neergaande en horizontale buis gegeven. Het zogenaamde schoorsteeneffect bij een opgaande buis is nauwelijks te zien. Ook een vertraging bij een neergaande buis (met ventilatie) is amper aanwezig. Doordat de hellingen relatief klein zijn, is het schoorsteeneffect beperkt. De ventilatie heeft ook hier de eerste tijd de overhand.

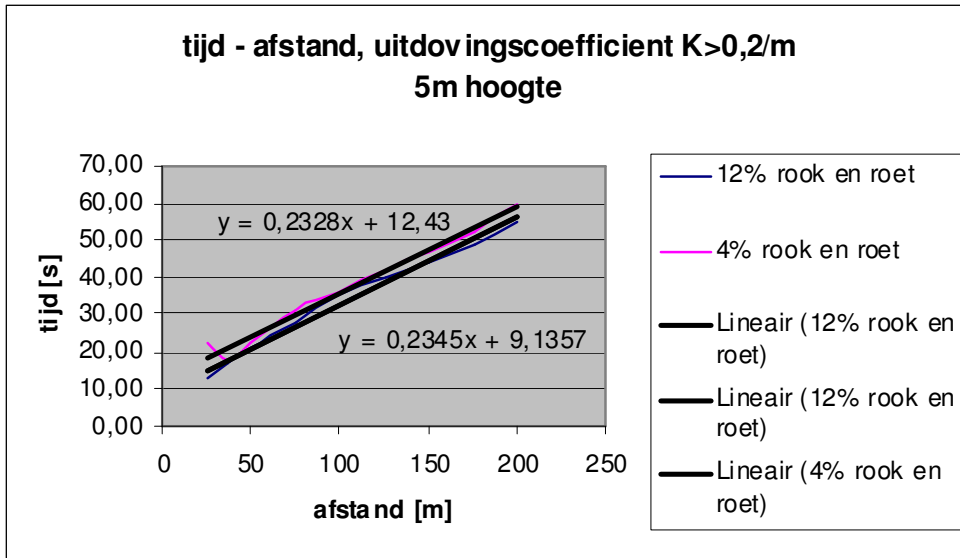


Voor situatie waarbij de ventilatie na 2 minuten stopt, neemt de brand langzaam de controle over de rookverspreiding over. Na verloop van tijd zal de rook naar de hoger gelegen uitgang stromen.

De CFD berekeningen worden gebruikt om het startmoment te bepalen wanneer een bepaald effect op een plaats x optreedt. Het zogenaamde schoorsteeneffect treedt pas op zodra de brand zijn eigen evenwicht kan bepalen. De in het beginstadium altijd aanwezige rijwind verstoort dit evenwicht. Voor QRA-tunnels wordt voorsnog aangenomen dat de voortplantingssnelheid van de diverse (initiële) effecten niet beïnvloed wordt door de helling van de tunnel. In die scenario's waar na 2 minuten geen ventilatie meer aanwezig is, zal na verloop van enige tijd wel een afwijkend beeld ontstaan, de schoorsteen gaat dan "trekken". Deze afwijking is niet van belang voor QRA-tunnels.

Rookproductie

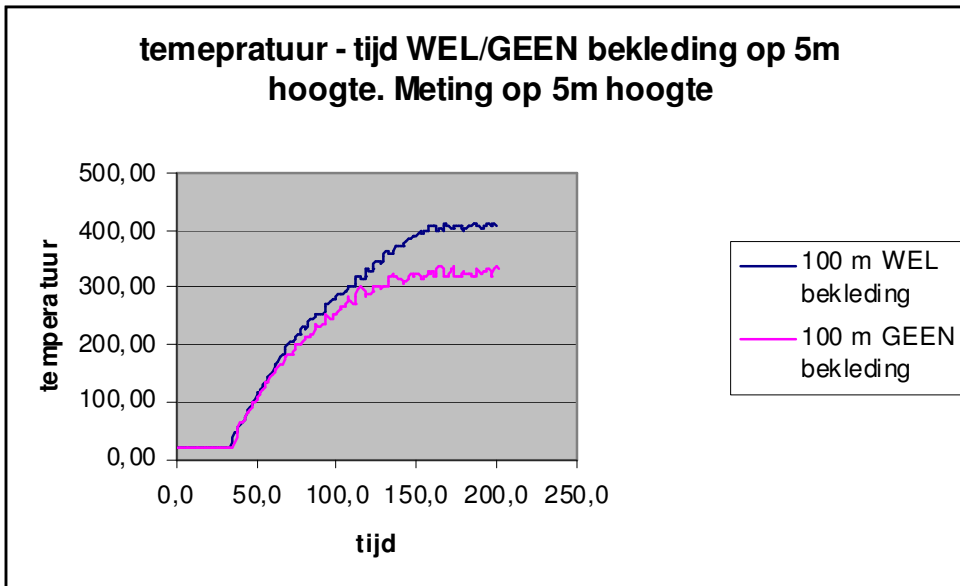
In QRA-tunnels is er van uitgegaan dat van de verbrande brandstof (heptaan) 4% wordt omgezet in rook- en roetdeeltjes. In de praktijk is het echter volledig onbekend wat de lading of de samenstelling van de brandende voertuigen zal zijn. In deze gevoeligheidsanalyse wordt daarom een berekening voor 12% rook- en roetdeeltjes (factor 3 hoger dan de basisberekeningen) gemaakt. Het brandscenario speelt zich af in een tunnel met een breedte van 13,5 m met een snelle 100 MW brand en werkende ventilatie na 120 seconden. Beschouwd is alleen het moment waarop de zichtlengte aan het plafond groter wordt dan 0,2/m (minder dan 5 meter zicht). In onderstaande figuur is de beweging van het $K > 0,2/m$ front gegeven:



De verhoogde rookproductie heeft nauwelijks invloed op de voortplantingssnelheid.

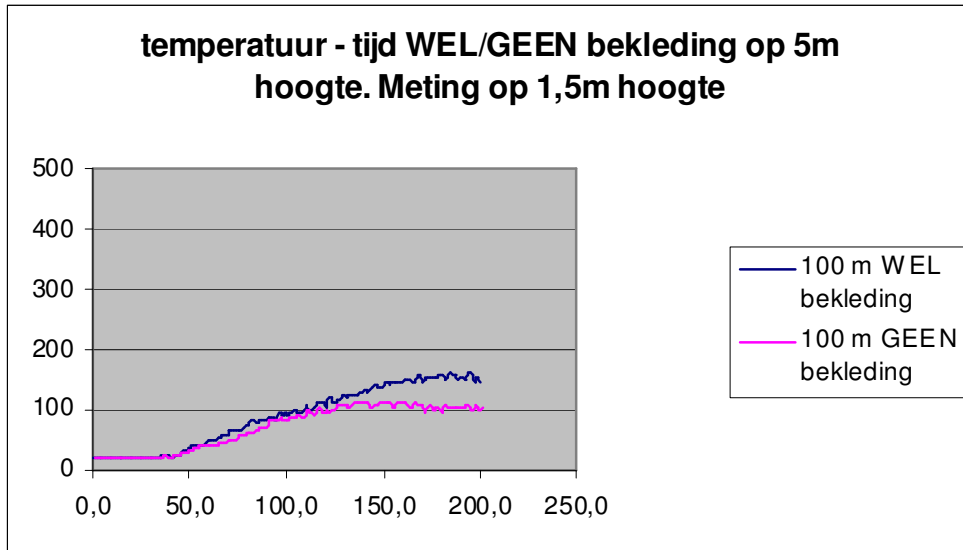
Invloed hittewerende bekleding

Niet alle tunnels zijn voorzien van hittewerende bekleding tegen het dak en een deel van de wanden. Het niet aanbrengen van de bekleding kan gevolgen hebben voor de warmteafdracht van de rookgassen aan het beton. In onderstaande figuur is het verloop van de temperatuur aan het dak bekeken op een afstand van 100 m benedenstreams van een 100 MW snelle brand met ventilatie en een breedte van 13,5 m. In dezelfde figuur is de situatie voor een gelijke tunnel zonder hittewerende bekleding gegeven op 5 m hoogte:



De temperatuur is circa 75°C lager terwijl ook de toename van de temperatuur per tijdseenheid iets vertraagt.

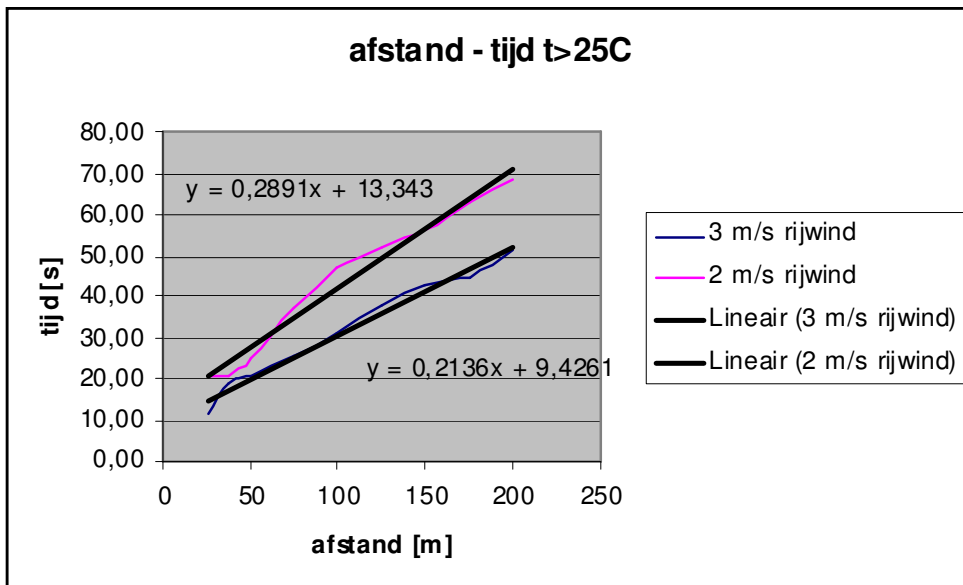
Op ooghoogte (1,5 m hoogte) loopt de temperatuur ook terug; deze teruggang is minder groot dan op dakkniveau. De snelheid waarmee de warmte zich door de tunnel verplaatst blijft nagenoeg gelijk. De uiteindelijk te bereiken eindtemperatuur ligt lager. Vooral voor kleine branden kan dit consequenties hebben voor de temperatuurdosis die weggebruikers gedurende het vluchtproces oplopen.



Rijwind 3m/s i.p.v. 2m/s

Bovenstaande gevoeligheidsbeschouwingen laten zien dat de initiële rijwind maatgevend is voor de situatie in de tunnel. Het beschouwd scenario is een 100 MW snelle brand met ventilatie waarbij de initiële rijwind verhoogd is van 2 m/s/ naar 3 m/s. De diverse constanten worden in onderstaande figuren beschouwd.

Voortplantingssnelheid van het 25°C front:

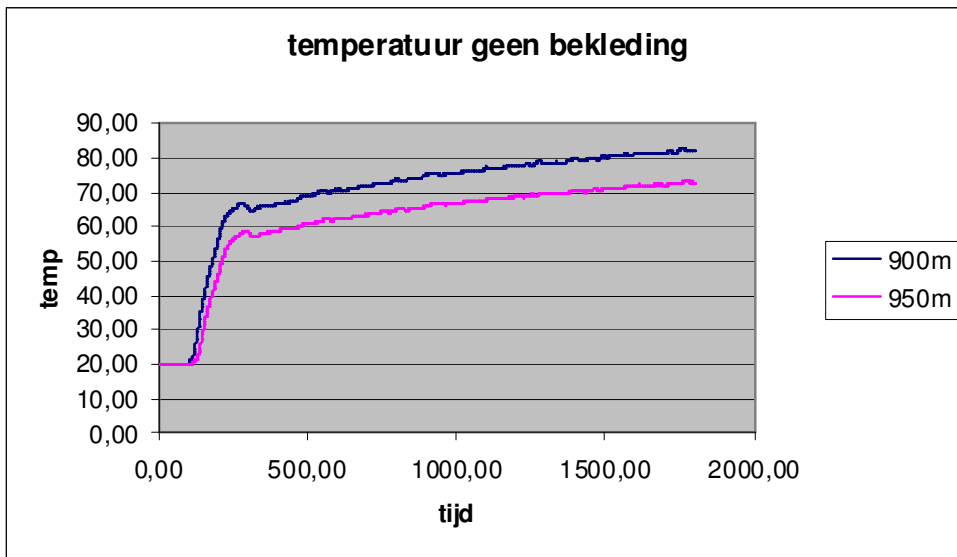


Bij een verhoging van de initiële rijwind van 2m/s naar 3 m/s wordt de snelheid van het 25°C front met slechts een factor 1,1 verhoogd. Deze lage waarde is te verklaren door het feit dat naast een verhoging van de luchtsnelheid met een factor 1,5 er ook 1,5 maal zoveel koude lucht toegevoerd wordt waardoor de verbrandingsgassen als het ware gekoeld en verdund worden. Het 25°C front beweegt zich uiteindelijk maar iets sneller door de tunnel.

Lengte $>60^{\circ}\text{C}$ gebied

Strikt genomen zijn onderstaande tabellen geen gevoeligheidsanalyse, maar een mogelijke aanvulling voor de verdere modellering van branden binnen QRA-tunnels. In de tabellen zijn de lengteafmetingen

gegeven van de gebieden bovenstrooms of benedenstrooms van een brand waar de temperatuur hoger is dan 60°C. Hierboven is aangetoond dat hittewerende bekleding invloed heeft op de maximale temperatuur van een brand. Daarom zijn er twee sets tabellen gegeven: 1 set voor een tunnel met hittewerende bekleding en 1 set voor een tunnel zonder hittewerende bekleding. Het temperatuurverloop kent twee takken: bij de start van de brand stijgt de temperatuur per tijdseenheid snel; zodra de brand volledig ontwikkeld is, zal de temperatuur nog maar langzaam stijgen. In onderstaande figuur is het temperatuurverloop voor een brand met ventilatie gegeven waarbij in de tunnel geen hittewerende bekleding is aangebracht. Het 60°C gebied is met behulp van deze min of meer horizontale lijn bepaald. Op een afstand van 950 m benedenstrooms van de brand is de temperatuur op $t = 250$ seconden circa 60°C.



In de vergelijking is niet meegenomen het verschil tussen een langzame en een snelle brand. Langzame branden hebben een langere tijd nodig om tot ontwikkeling te komen maar hebben geen verschil in de uiteindelijk te bereiken temperatuur.

Voor alle branden wordt gevonden:

De gemarkeerde waarden **300** betreffen een schatting

GEEN_ventilatie	Wel hittewerende bekleding		Geen hittewerende bekleding	
	Lengte benedenstrooms [m]	Lengte bovenstrooms [m]	Lengte benedenstrooms [m]	Lengte bovenstrooms [m]
5MW	0	0	0	0
10MW	0	0	0	0
25MW	75	75	70	70
50MW	125	125	110	110
100MW	140	140	125	125
200MW	150	150	135	135

WEL_ventilatie	Wel hittewerende bekleding		Geen hittewerende bekleding	
	Lengte benedenstrooms	Lengte bovenstrooms	Lengte benedenstrooms	Lengte bovenstrooms

	[m]	[m]	[m]	[m]
5MW	0	0	0	0
10MW	0	0	0	0
25MW	37,5	0	35	0
50MW	375	0	350	0
100MW	1050	0	950	0
200MW	L _{ben}	0	L _{ben}	0

Bijlage C. Toetsing vergelijkingen dispersie in tunnel aan open veld berekening

De verdampte gassen zullen zich in de tunnel verspreiden onder invloed van de (geforceerde) luchtsnelheid in de tunnel. Als ruwe benadering voor de concentratie van de gevormde hoeveelheid damp wordt uitgegaan van [38], zie vergelijkingen (8-11) en (8-12):

$$\begin{aligned} \text{Als } X > 10 \cdot H & \quad C = \frac{Q}{U \cdot A} \\ \text{Als } X \leq 10 \cdot H & \quad C = \frac{Q}{0,1 \cdot X \cdot U \cdot B} \end{aligned}$$

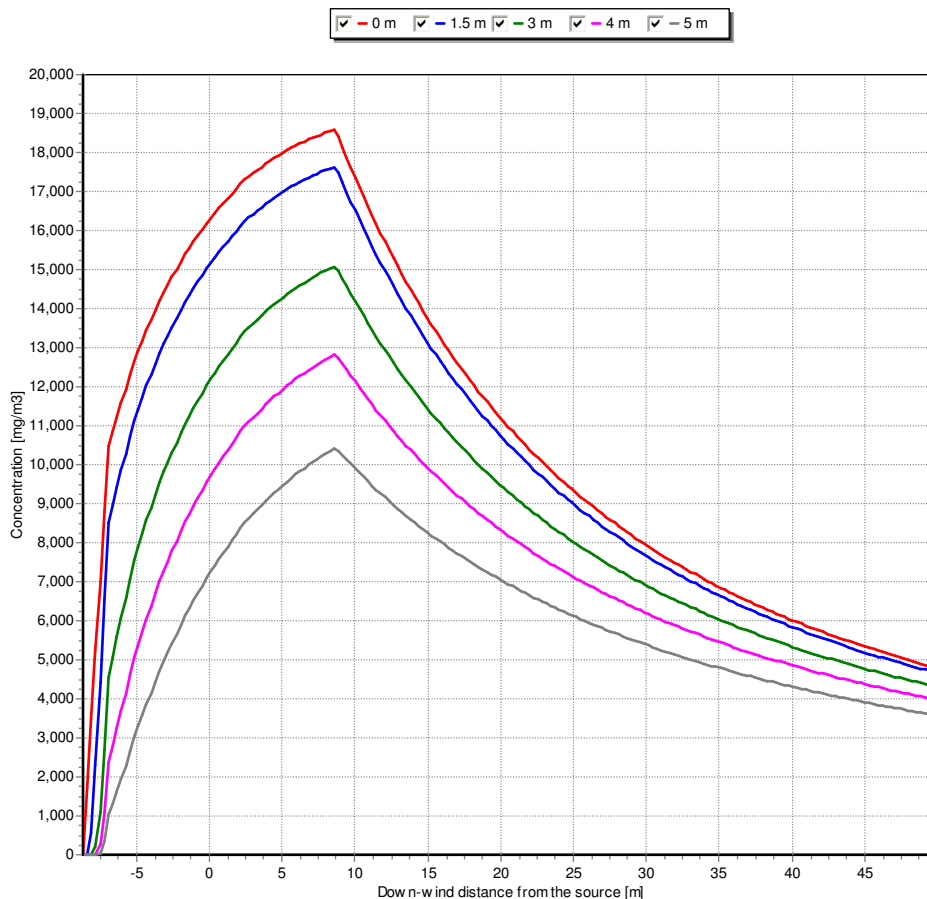
waarin:

- Q verdampingssnelheid in kg/s,
- U de luchtsnelheid in de tunnelbuis in m/s,
- B de breedte van de tunnelbuis in m,
- H de hoogte van de tunnelbuis in m,
- X de afstand in windafwaartse richting in m,
- A de doorsnede van de tunnelbuis in m².

Met behulp van een (open veld) zwaar gas dispersieberekening in EFFECTS is getoetst of deze benadering toepasbaar en conservatief is voor verspreiding van dampen in een tunnel. Dit is uitgevoerd voor benzine (LF2) en propylamine (LT2).

Benzine

Uitgangspunten van de EFFECTS berekeningen zijn een plasoppervlak van 300 m², Pasquill klasse D2, pentaan is geselecteerd als modelstof voor benzine. Voor de waarde van de ruwheidslengte is rekening gehouden met de relatieve hoogte van de obstakels in de tunnel ten opzichte van de totale beschikbare hoogte. Voor de ruwheidslengte in het open veld dispersiemodel is daarom een relatief hoge waarde van 3 m gekozen, dat karakteristiek is voor een "stadscentrum met hoge gebouwen". Onderstaande figuur laat zien dat de pentaanconcentratie inderdaad afhankelijk is van de hoogte en dat de orde grootte van de afstand tot totale opmenging iets minder is dan 50 m.



Concentratie als functie van de benedenstroomse afstand van de bron voor verschillende hoogten LF2

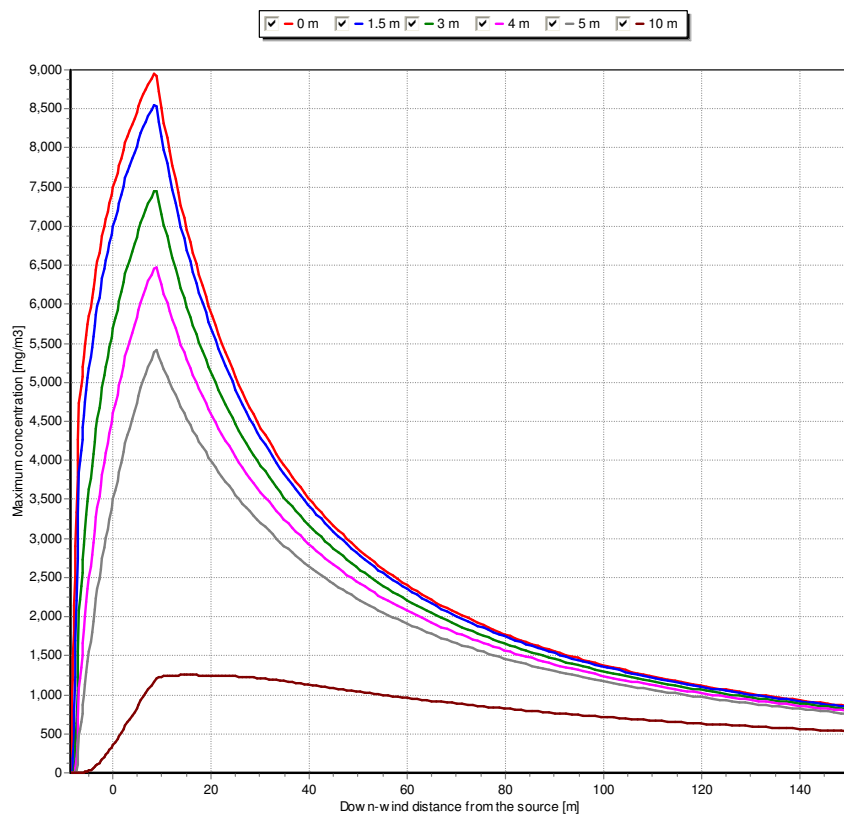
Propylamine

Onderstaande figuur laat zien dat de propylamine concentratie inderdaad afhankelijk is van de hoogte en dat op 50 m afstand, de concentratie op 5 m hoogte nog maar 30 % lager is dan op 0 m hoogte. In een tunnel zal de opmenging nog iets vlotter tot stand komen, doordat er slechts 5 m hoogte beschikbaar is. De aanname dat op 50 meter (10x de tunnelhoogte) de vergelijking mag worden toegepast, wordt daarmee in voldoende mate ondersteund door de voorbeeldberekening.

Bij het gebruik van de vergelijking wordt tevens verondersteld dat de concentratie als functie van de afstand gelijk is. Uit de figuur blijkt dat ook op 50 meter afstand de concentratie nog wel afneemt als functie van de afstand. In een tunnel zal de verdunning echter in veel mindere mate optreden dan in de open lucht, vanwege het feit dat het gas opgesloten zit. De aanname dat de concentratie onafhankelijk is van de afstand vanaf de bron, is daarom voor een tunnel aanvaardbaar, maar wel enigszins conservatief.

De open veld dispersie berekeningen zijn ook uitgevoerd voor instantaan vrijkomen en 30 m^2 , de resultaten zijn vergelijkbaar met die voor 300 m^2 .

Effects version 7.5.1.0817 Calculation: 22 Jan 2008 14:13:23
Model: Dense gas release; concentration (199)
Graph: Maximum concentration vs. Down-wind distance at (Yd, Zd)



Concentratie als functie van de benedenstroomse afstand van de bron voor verschillende hoogten LT2

Bijlage D. Bepaling ontstekingsstijd

De gemiddelde tijd tot ontsteking kan worden bepaald met [4]:

$$P(t) = 1 - e^{-(d \cdot \omega t)}$$

waarin:

- P kans op ontsteking binnen het tijdsinterval van 0 tot t ;
- ω ontstekingseffectiviteit van een enkel voertuig [s^{-1}];
- d gemiddeld aantal ontstekingsbronnen aanwezig in de wolk;

Een auto heeft een ontstekingseffectiviteit ω van 0,4 per minuut. Uit bovenstaande vergelijking blijkt dat als er zich 1 voertuig in de brandbare gaswolk bevindt, dat er 95% kans op ontsteking is binnen 7,5 min. Met 3 voertuigen in de gaswolk is er 95% kans op ontsteking binnen 2,5 min en met 4 voertuigen in de gaswolk is er 95% kans op ontsteking binnen 2 minuten. Bij een plasmavorming of gasuitstroming zullen er al snel meerdere voertuigen in de wolk bevinden, waardoor een relatief snelle ontsteking te verwachten is.