

Slachtofferberekening bij een tunnelbrand



Een verkenning naar een kwantitatieve risico analyse voor het berekenen van gewonden bij een tunnelbrand

Robert Oosterveld – Oktober 2013

SLACHTOFFERBEREKENING BIJ EEN TUNNELBRAND

Een verkenning naar een kwantitatieve risico analyse voor het berekenen van
gewonden bij een tunnelbrand

Universiteit Twente

Faculteit Construerende Technische Wetenschappen

Construction Management & Engineering

Colofon

Thesis

Titel Gewondenberekening bij een tunnelbrand
Datum oktober 2013
Plaats Nijverdal
Projectperiode November 2011 – oktober 2013

Auteur

Naam Ing. Robert Oosterveld
Studentnummer s1026852
Email r.oosterveld@xs4all.nl

Afstudeerdocenten

Eerste begeleider Prof. dr. ir. J. I.M. Halman (Joop)
Tweede begeleider Dr. S. H. Al-Jibouri (Saad)

Externe begeleider B. van Duijnhoven (Bas) [Royal HaskoningDHV]

Onderwijsinstelling

Universiteit Twente
Faculteit Construerende technische wetenschappen
Master Construction Management & Engineering
Drienerlolaan 5
7522 NB Enschede

**UNIVERSITEIT
TWENTE.**

Opdrachtgever

Royal HaskoningDHV
Barbarossastraat 35
6522 DK Nijmegen



Woord vooraf

Hierbij presenteer ik met trots mijn Master afstudeeronderzoek waarmee ik met succes mijn Master Construction Management & Engineering aan de Universiteit van Twente afrond. Hiermee komt dan ook een einde aan mijn “lange” studentenleven. Ik kijk hier met gemengde gevoelens op terug, maar ik kijk nu vooral vooruit naar mijn welverdiende wereldreis wat na mijn afstuderen toch echt hoog op mijn verlanglijst staat.

In november 2011 ben ik in opdracht van Royal HaskoningDHV aan het onderzoek begonnen. Uiteindelijk, met hulp van Rijkswaterstaat, ben ik tot een onderzoeksvorstel gekomen. Daarnaast ben ik in de loop van het afstudeeronderzoek steeds meer facetten tegengekomen waarbij ik mij verdiept heb in o.a. de kansberekening van slachtoffers bij tunnelbrand. Ik heb me zelfs moeten verdiepen in de verschillende lagen van de huid van mensen, wat normaal gesproken een ‘ver van mijn bed-show’ is.

Tijdens het onderzoek, zijn er veel mensen geweest die mij geholpen hebben om mijn doel te bereiken: afstuderen. Ik wil graag iedereen bedanken die mij van enige begeleiding en hulp heeft voorzien. Vooral wil ik mijn afstudeerbegeleiders van de Universiteit Twente, Prof. dr. ir. J. I.M. Halman en met name Dr. S. H. Al-Jibouri, bedanken voor hun nuttige gesprekken, feedbacksessies en kritische houding tijdens het afstudeertraject. Op vele momenten zag ik door de bomen het bos niet meer en dankzij hun begeleiding ben ik tot een acceptabel resultaat gekomen. Daarnaast wil ik ook B. van Duijnhoven en zijn collega’s bedanken voor de mogelijkheden die ik intern bij Royal HaskoningDHV heb gekregen. Daarnaast wil ik alle andere betrokkenen van Rijkswaterstaat, de TU Delft en het Platform Transportveiligheid middels deze weg bedanken voor hun tijd en ingebrachte kennis.

Als laatste gaat mijn speciale dank uit naar: Cheryl, mijn vrienden waaronder Marten en mijn ouders. Het proces is niet altijd makkelijk voor mij geweest en zonder hun steun en toeverlaat was het waarschijnlijk voor mij niet mogelijk geweest om nu af te studeren.

Iedereen die ik nu nog vergeten ben: Bedankt!

Ik wens u veel leesplezier toe.

Ing. Robert Oosterveld

Nijverdal, oktober 2013

Summery

This report presents a model for performing a quantified risk analyses for injuries in road tunnels. This master thesis is written in the context of the Master Construction Management & Engineering commissioned by Royal HaskoningDHV.

During the construction of a road tunnel, the topic of tunnel safety remains very important for the building process. A road tunnel has different facilities to make a road tunnel “safe”. Besides the concrete structures and geometry of the road tunnel, the tunnel is equipped with advances facilities such as a ventilation system and escape doors. These facilities and tunnel characteristics have an effect on the consequences during an emergency case. Accidents in road tunnels occur frequently. Over the past few years there have been a series of tunnel fires in Europe. Examples are: The Mont Blanc tunnel fire in France/Italy (1999), Tauerntunnel in Austria (1999), Viamala in Switzerland (2006) and recently the Gudvangatunnel in Norway (2013). As a result of these tunnel fires, with many fatalities, the international focus on safety in road tunnels is increased. Risk analysis are conducted to investigate the effects of safety facilities on both individuals and groups. These analyses are tools to make rational decisions and support decision-making.

Since July 2013 a new tunnel law is introduced in the Netherlands. Several important changes have been introduced in this law. One of these changes is, that a Scenario Analysis (SA) is no longer required during planning and design. The SA is only required during the opening. As a result of this change, the emergency services are afraid that in the early stages the SA no longer will be executed. Therefore, the emergency services encounter the following problems; First of all there is missing an analyses of numbers of injured and the severity of the injuries as a result of the fire (or other incident) in a road tunnel. Furthermore the numbers of injured are only determined by expert opinion. Current injury modeling are only available for extern safety. There's no modeling for the safety in road tunnels available. Based upon this dilemma the following goal developed:

To design a model which can quantify the numbers of injured due to a tunnel fire, which can determine in the design phase the number of injured people due to a fire, in order that the proposed model can be used by emergency services to provide decision support in the field of calamity response and preparation for tunnel safety.

The proposed model is based on the existing QRA-tunnels, literature and expert opinion. The model contains different scenarios which may occur during a tunnel fire. Based on these scenarios a ‘fault tree analysis’ is performed to determine the probability of a ‘top event’, in this case fire. In addition the model uses an ‘event tree’ to estimate the probabilities for each scenario. For the different scenarios the consequences are determined which contains three elements: assessment of the effect, determine the number of injuries due to the effects and a calculation of the injuries and mortality. To assess the severity of the injury different injury categories are proposed. For each effect the injury categories are plotted in a FN-curve, this will allow to evaluate the social risk. It is obligated to comply with the standard.

Based on the proposed model three case studies are performed for three existing tunnel fires: The Mont Blanc tunnel fire (1999), the fire in the Tauerntunnel (1999) and the Viamala tunnel fire (2006). These case studies show a small chance of a ‘major fire’, but that the consequences in terms of injuries and fatalities can be enormous. Furthermore, they show that during a tunnel fire unexpected events can happen. In the results of the case studies bottlenecks are emerged. A ‘light’ overestimation of the number of persons present and an underestimation of the number of ‘CO-injury’. The latter result in also an underestimation of the number of fatalities. Therefore, the following recommendations are made.

1. The location and particular the starting point of the evacuation process of the exposed people should be estimate dynamically.
2. New CFD-Studies should be focused on the development of derivative formulas for injuries.
3. New research into different exit times of vehicles involving the exit times of buses.
4. Research the consequences of other toxic substances or combinations which injured persons.

However, further research is necessary to estimate injuries in the case of a tunnel fire for the implementation in the existing QRA-tunnels risk analysis.

Samenvatting

Dit rapport omvat het model dat het aantal gewonden kan kwantificeren in een risico-analyse voor wegtunnels. Dit afstudeeronderzoek is geschreven in het kader van de master Construction Management & Engineering in opdracht van Royal HaskoningDHV.

Binnen het bouwproces van een tunnel speelt veiligheid steeds een belangrijkere rol. Een tunnel heeft diverse voorzieningen die een tunnel 'veilig' moeten maken. Naast de betonnen constructie en geometrie van de tunnel is de tunnel uitgerust met geavanceerde voorzieningen, zoals ventilatie en vluchtdeuren. Deze voorzieningen en eigenschappen van de tunnel hebben invloed op de gevolgen tijdens een calamiteit in de tunnel. Ongelukken in tunnels komen regelmatig voor. De afgelopen jaren heeft een reeks van tunnelbranden in Europa plaatsgevonden. Voorbeelden zijn: de Mont Blanc tunnelbrand in Frankrijk/Italië (1999), Tauerntunnel in Oostenrijk (1999), Viamala in Zwitserland (2006) en onlangs in de Gudvangatunnel in Noorwegen (2013). Mede door deze tunnelbranden, waarbij veel dodelijke slachtoffers zijn gevallen, is de internationale aandacht voor veiligheid van tunnels toegenomen. Om de effecten op zowel individuen als groepen van de veiligheidsvoorzieningen in de tunnel te onderzoeken worden risicoanalyses uitgevoerd. Deze analyses dienen als hulpmiddel om rationele beslissingen te nemen en om besluitvorming te ondersteunen.

Per juli 2013 is in Nederland de nieuwe tunnelwet geïntroduceerd, waarin een aantal belangrijke wijzigingen hebben plaatsgevonden. Eén van die wijzigingen is, dat de Scenario Analyse (SA) geen verplicht onderdeel meer is tijdens de planfase en ontwerpfase. de SA is wel verplicht bij de openstelling. Ten gevolge van de verandering, zijn de hulpdiensten bang dat de SA indirect niet meer wordt uitgevoerd. Als gevolg van het niet uitvoeren van de SA stuiten hulpdiensten op de volgende problemen; ten eerste ontbreekt een analyse waarbij gekeken wordt naar het aantal gewonden en de ernst van het letsel ten gevolge van een brand (of ander incident) in een wegtunnel. Ten tweede wordt het aantal gewonden alleen bepaald door expert opinion. Huidige letselmodellerings zijn momenteel alleen geschikt voor externe veiligheid en er is nog geen letselmodellering voor de veiligheid in tunnels beschikbaar. Op basis van dit dilemma is in dit onderzoek de volgende doelstelling leidend:

Het ontwerpen van een model dat het aantal gewonden kwantificeert ten gevolge van een brand in een wegtunnel, waarmee in de ontwerpfase van een tunnel het aantal personen met brandletsel kan worden bepaald, zodat het voorgesteld model gebruikt kan worden door hulpdiensten als ondersteuning van de besluitvorming op gebied van calamiteitenbestrijding en preparatie bij tunnelveiligheid.

Voor het ontwerp van het voorgesteld model is gebruik gemaakt van de bestaande QRA-tunnels, de meest recente literatuur en van inzichten van professionals uit de praktijk. Het model bevat verschillende scenario's die zich kunnen voordoen tijdens een tunnelbrand. Er wordt op basis van deze scenario's een 'foutenboom analyse' gemaakt waarbij de kansen van een bepaalde 'top gebeurtenis', in dit geval brand, wordt berekend. Daarnaast bevat het model een 'gebeurtenissenboom' analyse die de kansen berekent voor elk scenario. Voor de verschillende scenario's worden de gevolgen geschat welke drie elementen bevat: beoordeling van het effect, bepalen van het aantal getroffen personen t.g.v. het effect en een berekening van de gewonden en sterfte onder deze personen. Om de ernst van het letsel te beoordelen zijn voor elk type effect verschillende letselcategorieën voorgesteld. Voor elk effect worden de letselcategorieën geplot in een FN-curve, waarmee het groepsrisico kan worden geëvalueerd. Hierbij is het is verplicht om aan de norm te voldoen.

Op basis van het voorgestelde model zijn casestudies uitgevoerd voor drie bestaande tunnelbranden te weten: De Mont Blanc tunnelbrand (1999), de brand in de Tauerntunnel (1999) en de Viamala tunnelbrand (2006). Uit deze casestudies komt naar voren dat er een kleine kans is op een 'grote brand', maar dat de gevolgen in termen van gewonden en dodelijke slachtoffers enorm kunnen zijn. Vanuit de casestudies blijkt dat tijdens een tunnelbrand zich onverwachte gebeurtenissen kunnen afspelen. Uit de resultaten van de casestudies zijn knelpunten naar voren gekomen. Een 'lichte' overschatting van het aantal aanwezige personen en een onderschatting van het aantal 'CO-letsel'. Mede hierdoor wordt ook een onderschatting gemaakt van het aantal dodelijke slachtoffers. Daarom zijn de volgende aanbevelingen gegeven:

1. De locatie en met name startpunt van het vluchtproces van de blootgestelde personen dynamisch inschatten.
2. Nieuwe CFD-studie doen gericht op het ontwikkelen van afgeleide formules voor gewonden.
3. Nieuw onderzoek naar verschillende uitstaptijden uit voertuigen, waarbij ook uitstaptijden van bussen wordt meegenomen.
4. De gevolgen van andere toxische stoffen of combinaties daarvan onderzoeken waaraan personen gewond raken.

Concluderend komt naar voren dat verder onderzoek naar de kansenberekening van gewonden bij een tunnelbrand nodig is om implementatie van een risicoanalyse bij de bestaande QRA mogelijk te maken.

Inhoudsopgave

1.	Inleiding.....	18
1.1	Aanleiding van dit onderzoek	18
1.2	Probleembeschrijving	18
1.3	Probleemstellingen	19
1.4	Doel en afbakening.....	19
1.5	Uitgangspunten en randvoorwaarden	20
1.6	Onderzoeksmodel.....	20
1.7	Onderzoeksvragen	21
1.8	Onderzoeksmethode	21
2.	Theoretisch kader	23
2.1	Inleiding	23
2.2	Standaard QRA-raamwerk	23
2.3	Brand effecten	27
2.4	Lichamelijke gevolgen	30
2.5	Letselmodelleringen.....	35
2.6	Letseldrempels	38
2.7	Conclusie	41
3.	Voorgesteld model.....	44
3.1	Inleiding	44
3.2	Identificatie systeem	44
3.3	Kansenberekening.....	45
3.4	Berekening gevolgen.....	46
3.5	Risico evaluatie.....	56
4.	Casestudies	57
4.1	Inleiding	57
4.2	Mont Blanc tunnel (1999)	57
4.3	Tauerntunnel (1999)	59
4.4	Viamalatunnel (2006).....	62
4.5	Conclusie	64
5.	Conclusie en aanbevelingen	66
5.1	Conclusie	66
5.2	Aanbevelingen	66
5.3	Integratie QRA-tunnels	67
6.	Bronnen	68

7. Bijlagen	71
A. Convectie vanuit de brand	71
B. Conversietabel LC waarde naar Probit (Finney, 1952)	72
C. Huidige werkwijze	73
D. Voorbeeld foutenboom voor het 'top gebeurtenis' brand in een tunnel.....	81
E. CFD-berekeningen uitgevoerd voor de QRA-tunnels.....	82
F. Beoordelingsmodel toxische en lichamelijke gevaren	89
G. Invoerparameters model.....	91
H. Gebeurtenissenboom	99
I. Extrapolatie grenswaarden lineaire en exponentiële.....	101
J. Casestudies	107

Figuren

voorblad: (www.hoorngids.nl)	1
figuur 1: Schematisch onderzoeksmodel gebaseerd op (Verschuren & Doorewaard, 2007)	20
figuur 2: Standaard QRA raamwerk (Qu, Meng, Yuanita, & Wong, 2011)	24
figuur 3: FN-curve die het groepsrisico representeert.	26
figuur 4: Rook stijgt op en vormt een rooklaag	27
figuur 5: Stratificatie in een tunnel (COB en Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2004)	28
figuur 6: Instabiele stratificatie en terugstroom naar brand	28
figuur 7: Verschillende brandcurves (Promat, 2013)	29
figuur 8: Thermisch tolerantie voor mensen in rust (Purser & Buckley, 1983)	31
figuur 9: Doorsnede van de huid i.c.m. verbrandingsgraad	32
figuur 10: Loopsnelheid in brandrook (Jin, 2002)	33
figuur 11: Kritische factoren voor 'zelfredzaamheid' bij brand (Kobes, 2010).	34
figuur 12: Voorbeeld van een discrete functie (Jonkman, Lentz, & Vrijling, 2010)	36
figuur 13: Probitrelatie schematisch weergegeven (Jonkman, Lentz, & Vrijling, 2010)	37
figuur 14: Schadeniveau versus stralingsdosis (Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2002)	40
figuur 15: Schematisch overzicht van invloedsgebieden	47
figuur 16: Schematisch overzicht van een bovenaanzicht in de tunnel met invloedsgebieden	47
figuur 17: Gemodelleerde temperatuursverloop (Rijkswaterstaat, 2012)	48
figuur 18: Gemodelleerde CO-concentratieverloop (Rijkswaterstaat, 2012)	49
figuur 19: Letselcategorieën temperatuur in functie tijd	52
figuur 20: Letselcategorieën straling in functie tijd	53
figuur 21: Letselcategorieën CO in functie tijd	54
figuur 22: Verloop van de vlucht in de tijd (Rijkswaterstaat, 2012)	56
figuur 24: FN-curve temperatuur maximaal Mont Blanc tunnel	58
figuur 25: FN-curve straling gemiddeld Tauerntunnel	61
figuur 27: FN-curve CO maximaal Viamalatunnel	63
figuur 28: Integratie QRA-tunnels	67
figuur 29: Voorbeeld van een vereenvoudigd gebeurtenissenboom (Rijkswaterstaat, 2012)	74
figuur 30: Deelgebieden in de tunnelbuis (Rijkswaterstaat, 2012)	77
figuur 31: Verloop van 'zelfredzaamheid' in de tijd (Rijkswaterstaat, 2012)	78
figuur 32: Fases Scenarioanalyse (COB en Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2004)	79
figuur 33: Foutenboom met 'top gebeurtenis' kans op brand (Qu, Meng, Yuanita, & Wong, 2011)	81
figuur 34: Gemodelleerde brandcurve van langzame branden	82
figuur 35: Gemodelleerde brandcurve van snelle branden	82
figuur 36: Ventilatie bij 'langzame brand'	83
figuur 37: Ventilatie bij 'snelle brand'	83
figuur 38: Gemodelleerde CO-concentratieverloop	85
figuur 39: Gemodelleerde temperatuursverloop	86
figuur 40: Gebeurtenissenboom 1.0	99
figuur 41: Sub-boom 1.1	99
figuur 42: Sub-boom 1.2	100
figuur 43: Sub-boom 1.3	100
figuur 44: Vergelijking lineair en exponentieel vergelijking te hoge temperaturen	102
figuur 45: Vergelijking lineair en exponentieel vergelijking straling	103
figuur 46: Grafiek minimale blootstellingsduur CO obv AEGL-2	104
figuur 47: Grafiek minimale blootstellingsduur CO obv AEGL-3	105
figuur 48: Vergelijking lineair en exponentieel vergelijking CO	106
figuur 49: Kansentabel Mont Blanc tunnel	110
figuur 50: FN-curve Co gemiddeld Mont Blanc tunnel	111
figuur 51: FN-curve Co maximaal Mont Blanc tunnel	111
figuur 52: FN-curve straling gemiddeld Mont Blanc tunnel	111
figuur 53: FN-curve straling maximaal Mont Blanc tunnel	111
figuur 54: FN-curve temperatuur gemiddeld Mont Blanc tunnel	112
figuur 55: FN-curve temperatuur maximaal Mont Blanc tunnel	112

figuur 56: Kansentabel Tauerntunnel	116
figuur 57: FN-curve Co gemiddeld Tauerntunnel	117
figuur 58: FN-curve Co maximaal Tauerntunnel	117
figuur 59: FN-curve straling gemiddeld Tauerntunnel	117
figuur 60: FN-curve straling maximaal Tauerntunnel	117
figuur 61: FN-curve temperatuur gemiddeld Tauerntunnel	118
figuur 62: FN-curve temperatuur maximaal Tauerntunnel	118
figuur 63: Kansentabel Viamala tunnel.....	122
figuur 64: FN-curve Co gemiddeld Viamala tunnel.....	123
figuur 65: FN-curve Co maximaal Viamala tunnel.....	123
figuur 66: FN-curve straling gemiddeld Viamala tunnel	123
figuur 67: FN-curve straling maximaal Viamala tunnel.....	123
figuur 68: FN-curve temperatuur gemiddeld Viamala tunnel.....	124
figuur 69: FN-curve temperatuur maximaal Viamala tunnel.....	124

Tabellen

tabel 1: Temperatuur versus responsie (Bryan, 1986)	31
tabel 2: Effecten van blootstelling aan koolmonoxide (Bryan, 1986)	32
tabel 3: Relaties tussen interventiewaarden en AEGL (RIVM, 2009)	39
tabel 4: Maximale toelaatbare blootstellingsduur temperatuur en straling (Purser D. A., 2002).....	39
tabel 5: Maximale blootstellingsduur toxische stoffen (Purser D. A., 2002)	41
tabel 6: Beschermingswaarde CO in rook.....	41
tabel 7: Vastgestelde menselijke probit-constanten voor letaliteit en 30-min LC50.....	41
tabel 8: Aannames brandvermogen voertuigen	46
tabel 9: Gemodelleerd 'snelle' brandverloop	47
tabel 10: Ondergrenzen van te hoge temperatuur	51
tabel 11: Ondergrenzen van te hoge concentratie CO.....	53
tabel 12: Mont Blanc scenario gewonden voor verschillende en gemiddelde dosis	59
tabel 13: Mont Blanc scenario gewonden voor verschillende en maximale dosis	59
tabel 14: Tauerntunnel scenario gewonden voor verschillende en gemiddelde dosis.....	61
tabel 15: Tauerntunnel scenario gewonden voor verschillende en maximale dosis	62
tabel 16: Viamalatunnel scenario gewonden voor verschillende en gemiddelde dosis	63
tabel 17: Viamalatunnel scenario gewonden voor verschillende en maximale dosis	63
tabel 18: Gebeurtenissen in de QRA-tunnels.....	74
tabel 19: Obstakels in de tunnel	82
tabel 20: Afgeleide CFD-resultaten $T_{hinder}(x)$	84
tabel 21: Afgeleide CFD-resultaten $T_{zelf}(x)$	84
tabel 22: Afgeleide CFD-resultaten modellering CO met ventilatie.....	86
tabel 23: Afgeleide CFD-resultaten modellering CO zonder ventilatie benedenstrooms.....	86
tabel 24: Afgeleide CFD-resultaten modellering CO zonder ventilatie bovenstrooms.....	86
tabel 25: Afgeleide CFD-resultaten modellering temperatuur met ventilatie.....	87
tabel 26: Afgeleide CFD-resultaten modellering temperatuur zonder ventilatie benedenstrooms.....	87
tabel 27: Afgeleide CFD-resultaten modellering temperatuur zonder ventilatie bovenstrooms.....	88
tabel 28: Letselgrenzen stellen voor berekenen van gewonden t.a.v. straling	91
tabel 29: Letselgrenzen stellen voor berekenen van gewonden t.a.v. CO	91
tabel 30: Letselgrenzen stellen voor berekenen van gewonden t.a.v. temperatuur	91
tabel 31: Interval	92
tabel 32: Geometrie	92
tabel 33: Voorzieningen.....	92
tabel 34: Motorvoertuigen.....	93
tabel 35: Periode en verkeersintensiteiten	93
tabel 36: Verkeerssamenstelling	93
tabel 37: Benedenstroomse file	94
tabel 38: Incidentkans.....	94
tabel 39: Overige defaultwaarden: uitstroming.....	95

tabel 40: Overige defaultwaarden: ontsteking	95
tabel 41: Overige defaultwaarden: brandgrootte	95
tabel 42: Overige defaultwaarden: faalkansen voorzieningen	95
tabel 43: Overige defaultwaarden: vluchtsnelheid	96
tabel 44: Tussenvariabel: filevorming	97
tabel 45: Tussenvariabel: lengte benedenstroomse file	97
tabel 46: Tussenvariabel: lengte bovenstroomse file	97
tabel 47: Tussenvariabel: dichtheden in de verschillende gebieden	98
tabel 48: Tussenvariabel: scenario's met explosieven	98
tabel 49: Maximale toelaatbare blootstellingsduur temperatuur en straling (Purser D. A., 2002)	101
tabel 50: Beschermingswaarde CO in rook	103
tabel 51: Maximale blootstellingsduur toxische stoffen (Purser D. A., 2002)	105
tabel 52: Inputwaarden Mont Blanc tunnel	107
tabel 53: Inputwaarden Tauerntunnel	113
tabel 54: Inputwaarden Viamala tunnel	119

1. Inleiding

Dit rapport beschrijft het onderzoek dat is uitgevoerd in opdracht van Royal HaskoningDHV en in samenwerking met Rijkswaterstaat. Het onderzoek omvat een model dat het aantal gewonden kan kwantificeren in de context van een risico-analyse voor tunnels. Dit afstudeeronderzoek is geschreven in het kader van de master Construction Management & Engineering aan de faculteit Construerende Technische Wetenschappen (CTW) van de Universiteit Twente.

1.1 Aanleiding van dit onderzoek

Binnen het bouwproces van een tunnel speelt veiligheid steeds een belangrijkere rol. Ongelukken in tunnels komen regelmatig voor. Een tunnelbrand heeft echter een grote impact door de verschillende gevolgen van een dergelijke brand. De afgelopen jaren heeft een reeks van tunnelbranden in Europa plaatsgevonden. Voorbeelden zijn: de Mont Blanc tunnelbrand in Frankrijk/Italië (1999), de tunnelbrand in de Tauerntunnel in Oostenrijk (1999) en onlangs nog in Gudvangatunnel in Noorwegen (2013). Mede door deze tunnelbranden in de Alpenlanden, waarbij veel dodelijke slachtoffers zijn gevallen, is de internationale aandacht voor veiligheid van tunnels toegenomen. Om de veiligheid voor zowel individuele personen als voor groepen tunnelgebruikers te waarborgen worden risicoanalyses uitgevoerd. Deze analyses dienen als hulpmiddel om rationele beslissingen te nemen en om besluitvorming te ondersteunen.

Het rapport van RIVM (2009) geeft aan dat bestuurders en hulpdiensten in een vroegtijdig stadium van het ontwerpproces van een nieuw te bouwen tunnel, behoefte hebben aan informatie omtrent het aantal slachtoffers die vallen ten gevolge van mogelijke incidenten. Volgens het rapport van TNO (2010) zijn gewondenberekeningen noodzakelijk voor het adequaat handelen van de hulpdiensten in het kader van het bestrijden van een tunnelbrand en in hun advisering naar het lokaal bevoegd gezag. Met name het aantal gewonde slachtoffers dat valt ten gevolge van de gebeurtenis brand is hierbij van belang. Vandaar dat dit onderzoek zich richt op het kwantificeren van het aantal gewonden in een tunnel tijdens een brand.

In de externe veiligheid worden momenteel modellen gebruikt die gericht zijn op het uitbreken van gevaarlijke stoffen. Het letsel dat door het uitbreken van een incident wordt bepaald aan de hand van een hoeveelheid 'dosis'. Deze 'dosis' wordt bepaald door een concentratie en blootstellingsduur. Bij het model wordt gekeken hoeveel personen in een bepaald invloedsgebied vallen, gegeven een incident. Door de gesloten tunnelconstructie zal het verloop van de effecten anders reageren dan in de open lucht. Daarnaast is het aannemelijk dat personen die zich in een invloedsgebied bevinden proberen te vluchten. Daarom is het voor de toepassing voor het model in tunnels is het noodzakelijk om de te veranderen naar de omstandigheden in een tunnel.

1.2 Probleembeschrijving

Voor 2013 waren in Nederland twee risicoanalyses wettelijk verplicht om een gedegen inzicht te geven in de veiligheid van het gehele tunnelsysteem. Dit waren de kwantitatieve risicoanalyse (QRA), of wel de RWSQRA v1, en de scenarioanalyse (SA). De QRA is een probabilistische deterministische analyse die een veiligheidsniveau berekent, gekwantificeerd in het aantal dodelijke slachtoffers. Hiermee wordt gekeken of een tunnel aan de vastgestelde criteria voldoet. De SA is een meer deterministische methode die kwalitatief het veiligheidsproces visualiseert voor een specifiek scenario. Hiermee wordt kennis opgedaan over de inzet van hulpdiensten en wordt een calamiteitenplan opgesteld. Naast het aantal dodelijke slachtoffers dat voor één scenario wordt uitgewerkt worden ook gewonden geschat op basis van kennis en ervaring van personen die bij een SA bijeenkomst betrokken zijn.

Per juli 2013 is de nieuwe tunnelwet geïntroduceerd. De nieuwe wetgeving uniformeert en standaardiseert de functionele eisen, het proces, ontwerp en inrichting van een tunnel. Eén van de belangrijkste wijzigingen is, dat de SA geen verplicht onderdeel meer is tijdens de planfase en ontwerpfase. Daarom worden in deze fases de SA niet meer als toetsingsinstrument gebruikt om het veiligheidsniveau te beoordelen. Desalniettemin is de SA wel verplicht bij de openstelling en is deze als bijlage opgenomen in het zogenoemde Veiligheidsbeheerplan (Wiersma T., Mante R., Steunpunt Tunnelveiligheid en Rijkswaterstaat, 2013). Ten gevolge van bovengenoemde wijziging, zijn de hulpdiensten bang dat de SA indirect niet meer wordt uitgevoerd, met als gevolg dat er geen inzicht

meer wordt verworven over de gewonden en de ontwikkelingen tijdens een calamiteit. Hierdoor ontbreekt een kwantitatief model, waarbij gekeken wordt naar de gewonden die kunnen vallen bij een brand.

Er zijn kwantitatieve letselmodellerings in ontwikkeling voor de scenario's brand om het aantal gewonden te bepalen (NVBR, VNG en IPO, 2010). Deze modellen zijn met name gericht op de externe veiligheid. De impact van de verschillende gebeurtenissen in wegtunnels is vaak groter door de gesloten tunnelbuis. Hierdoor kan bijvoorbeeld de hitte, straling en giftige stoffen van een brand in een wegtunnel niet naar buiten treden, waardoor o.a. de temperaturen en concentraties snel en hoog oplopen. Door deze omstandigheden moeten de modellerings worden aangepast gericht op de interne veiligheid in de tunnel. Een integraal effect- en QRA model ontbreekt, waarbij zowel doden als gewonden bij een brand in een tunnel worden gekwantificeerd.

1.3 Probleemstellingen

Vanuit de bovenstaande probleembeschrijving worden de onderstaande probleemstellingen geformuleerd:

- In Nederland is momenteel geen kwantitatief model beschikbaar dat in een vroeg stadium inzicht kan geven over het aantal gewonden ten gevolge van een brand in een wegtunnel. Laat staan de onderverdeling in de ernst van de verwonding.
- Het bepalen van het aantal gewonden geschiedt momenteel alleen op kennis, ervaring of door gebruik te maken van vuistregels. Met andere woorden het bepalen van gewonden gebeurt door expert opinion.
- Letselmodellerings zijn momenteel alleen geschikt voor externe veiligheid.

1.4 Doel en afbakening

Gebaseerd op de bovenstaande probleemstelling is de volgende hoofddoelstelling tot stand gekomen:

Het ontwerpen van een model dat het aantal gewonden kwantificeert ten gevolge van een brand in een wegtunnel, waarmee in de ontwerpfase van een tunnel het aantal personen met brandletsel kan worden bepaald, zodat het voorgesteld model gebruikt kan worden door hulpdiensten als ondersteuning van de besluitvorming op gebied van calamiteitenbestrijding en preparatie bij tunnelveiligheid.

In de doelstelling staan vier begrippen die beter gedefinieerd dienen te worden. Deze worden hieronder uitgebreider gedefinieerd.

- *Brandletsel* is het letsel dat blootgestelde personen oplopen door een brand;
- De gebeurtenis *brand* is een voertuigbrand of ladingbrand zonder lading giftige stoffen;
- Een *hulpdienst* is een instantie met een hulpverlenende taak bij ongevallen, rampen en andere calamiteiten. In het geval van een tunnelbrand de politie, brandweer en geneeskundige hulpverleningsorganisatie in de Regio (GHOR);
- Besluitvorming is het proces waarbij diverse actoren tijdens de totstandkoming van een tunnel samen werken om uiteindelijk een veilige tunnel te creëren.

Om de hoofddoelstelling te realiseren, moeten de volgende subdoelstellingen eerst worden bereikt.

- Het vaststellen hoe gewonden, ten gevolge van brand, gekwantificeerd moeten worden, waarbij ook een onderverdeling in de ernst van de gewonden wordt geclassificeerd;
- Het bepalen of de QRA kan worden gebruikt om het aantal gewonden ten gevolgen van de gebeurtenis brand te kwantificeren;
- Het opstellen van een rekenmodel, waarmee gewonden ten gevolge van een brand in een tunnel berekend worden;
- Het valideren van het model om de betrouwbaarheid van het model te toetsen.

1.5 Uitgangspunten en randvoorwaarden

Om van te voren duidelijkheid te verschaffen over wat wel of niet wordt meegenomen in het model zijn hier uitgangspunten en randvoorwaarden vermeld.

1.5.1 Randvoorwaarden

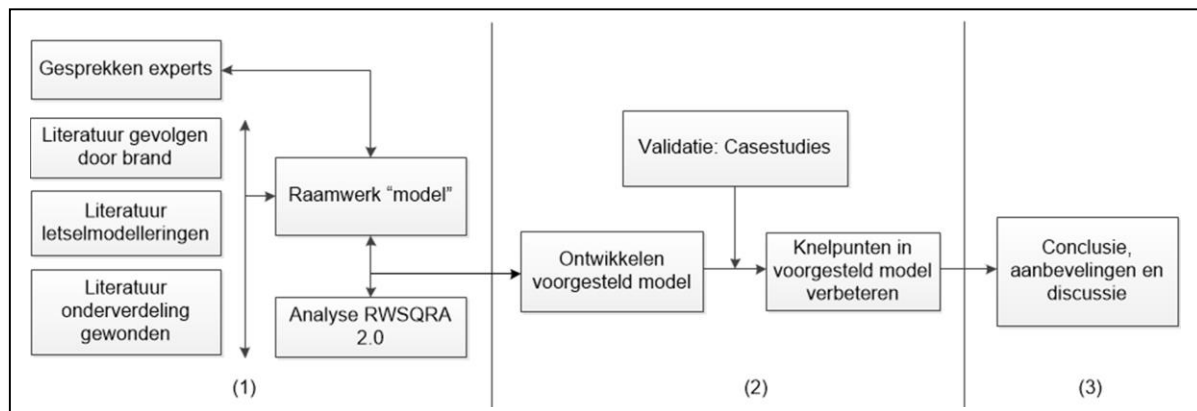
- Het model moet 'open' zijn dat door een ieder gecontroleerd kan worden gebruikt;
- De invoer moet variabel zijn, zodat het model geschikt is voor meerdere typen wegtunnels;
- Het model moet bruikbaar zijn voor bestuurders en hulpdiensten voor de verantwoording of het bepalen van de benodigde capaciteit van de hulpdiensten;
- Gezien het tijdsbestek van dit afstudeeronderzoek wordt gekozen om alleen gewonden te berekenen voor de gebeurtenis brand.

1.5.2 Uitgangspunten

- Het betreft hier interne veiligheid die wordt toegepast in de ontwerpfase. Personen die buiten de tunnel ietsel oplopen ten gevolge van brand in de tunnel worden niet meegenomen;
- Zelfredzaamheid van personen is leidend bij het bepalen van het aantal gewonden;
- De nadruk ligt op de input van de QRA-tunnels;
 - o Het vaste aantal brandgrootten uit de QRA-tunnels wordt gebruikt als basis voor de gewondenmodule. Te weten: 5MW, 10MW, 25MW, 50 MW, 100MW en 200MW;
 - o Tankautobranden met de bijbehorende uitstromingen worden niet meegenomen in dit onderzoek. Het betreft hier alleen autobranden en vrachtautobranden zonder giftige stoffen;
- Het indirecte effect van brand zoals het bezwijken van de tunnel door brand zal niet worden meegenomen, het bezwijken van een tunnel wordt gedekt door de genomen passieve veiligheidsmaatregelen hierdoor wordt het risico dat de tunnel instort bij de brand (tot een maximale brandgrootte van 200 MW) geminimaliseerd.

1.6 Onderzoeksmodel

Om de hoofddoelstelling, welke geformuleerd is in paragraaf 1.4, te beantwoorden wordt in deze paragraaf een globale representatie gegeven hoe dat wordt behaald. In figuur 1 wordt het onderzoeksmodel van dit afstudeeronderzoek schematisch weergegeven.



figuur 1: Schematisch onderzoeksmodel gebaseerd op (Verschuren & Doorewaard, 2007)

Het afstudeermodel bestaat globaal uit drie fases verder te noemen (1), (2) en (3). In fase (1) wordt eerst een theoretische grondslag gemaakt door literatuurstudies en informele gesprekken/interviews met professionals uit de praktijk. Deze vormen tezamen het raamwerk voor het te ontwerpen model. Daarna wordt door middel van bureauonderzoek en een brainstormsessie de huidige QRA geanalyseerd. Vervolgens worden literatuur en de QRA met elkaar geconfronteerd. Dit zal de input leveren voor het voorgestelde model. In fase (2) wordt het voorgestelde model gevalideerd door verschillende casestudies en waar nodig verbeterd. Uiteindelijk wordt in fase (3) een conclusie geschreven, aanbevelingen aangereikt en afgesloten met een discussie. De implementatie van het model in de huidige QRA valt buiten de scope van het afstudeeronderzoek.

1.7 Onderzoeksvragen

Hieronder bevindt zich de hoofdvraag van dit onderzoek.

Hoe kunnen aantallen gewonden worden gekwantificeerd die ontstaan ten gevolge van een tunnelbrand vallen?

Alvorens de hoofdvraag beantwoord kan worden zijn een aantal deelvragen geformuleerd. De gezamenlijke antwoorden van de deelvragen moeten antwoord geven op de hoofdvraag. De eerste twee onderzoeksvragen en onderliggende deelvragen hebben betrekking op fase (1) in figuur 1.

- 1 Welke invloed heeft een tunnelbrand op (het aantal) gewonden?
 - 1.1 *Wat zijn de eigenschappen van een tunnelbrand?*
 - 1.2 *Welke effecten ondervinden mensen tijdens een tunnelbrand?*
 - 1.3 *Welke huidige theoretische/wetenschappelijke letselmodellerings bestaan op dit moment en welke worden toegepast bij een brand?*

De tweede onderzoeksvraag en deelvragen hebben betrekking op fase (2) in figuur 1.

- 2 Welke criteria kunnen onderdeel vormen voor het voorgestelde model op basis van de huidige analyses?
 - 2.1 *Welke criteria uit de literatuur zijn van belang voor het opstellen van het voorgestelde model van gewonden?*
 - 2.2 *Welke eventuele knelpunten bevinden zich in het voorgestelde model die worden onderkend door experts en resulteren uit de casestudies.*

De derde onderzoeksvraag en deelvragen hebben betrekking op fase (3) in figuur 1.

- 3 Welke meerwaarde hebben hulpdiensten aan het onderzoeksmodel met het oog op het doen van conclusies en aanbevelingen bij het inschatten van het aantal gewonden die vallen ten gevolge van een tunnelbrand?
 - 3.1 *Wat kan geconcludeerd worden ten aanzien van het inschatten van het aantal gewonden die vallen ten gevolge van een tunnelbrand?*
 - 3.2 *Welke aanbevelingen kunnen worden gegeven ter aanvulling voor het inschatten van het aantal gewonden die vallen ten gevolge van een tunnelbrand?*

1.8 Onderzoeksmethode

Om tot de kennis te komen voor het te ontwerpen model wordt de strategie deskresearch, ofwel bureauonderzoek toegepast. Bureauonderzoek is een onderzoeksstrategie waarbij de onderzoeker gebruik maakt van materiaal dat door anderen is geproduceerd. De onderzoeker probeert daarbij via reflectie en het raadplegen van literatuur tot nieuwe inzichten te komen (Verschuren & Doorewaard, 2007). Deze strategie wordt in veel onderzoeken gebruikt om informatie in te winnen en zo eigen inzicht te krijgen in het te bestuderen onderwerp. Bureauonderzoek heeft als groot voordeel dat snel een groot aantal gegevens beschikbaar zijn. Een nadeel is dat de theorieën in principe voor andere doeleinden zijn verzameld. Daarom is het noodzakelijk om hier vanuit meerdere invalshoeken naar te kijken, zie figuur 1 fase (1). Hiermee wordt het nadeel zo veel mogelijk gecompenseerd.

Daarnaast heeft bureauonderzoek een ander groot nadeel en dat is dat de onderzoeker geen direct contact heeft met de onderzoekseenheden. Hierdoor krijgt de onderzoeker geen toelichting als iets niet of verkeerd wordt begrepen. Om dit nadeel te verhelpen worden gesprekken met experts en een brainstormsessie georganiseerd die een bepaald onderwerp kunnen toelichten. Om bias te voorkomen worden meerdere experts gevraagd.

Om een betrouwbaar en valide onderzoek te waarborgen wordt het te ontwerpen model getoetst. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de strategie casestudie. Een casestudie is een specifiek individueel programma of gebeurtenis, dat grondig wordt bestudeerd voor een bepaalde tijd (Leedy & Ormrod, 2010). Een voordeel van een casestudie is dat de onderzoeker de gegevens zelf verzamelt. Dit betekent

dat de onderzoeker kan bepalen welke gegevens worden gebruikt en welke niet (Verschuren & Doorewaard, 2007). Om de gegevens van het model te kunnen generaliseren is het noodzakelijk meerdere casestudies te bekijken. Daarom wordt gekozen om de strategie multi-casestudie toe te passen, ook wel collectieve casestudie genoemd, zie figuur 1 fase (2).

2. Theoretisch kader

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk staat de wetenschappelijke literatuur centraal. Hier worden de belangrijkste invalshoeken van dit onderzoek nader toegelicht aan de hand van literatuur. Doordat de QRA een belangrijk onderdeel is van dit onderzoek wordt eerst een standaard QRA-raamwerk beschreven. Met behulp van onderzoeksvragen worden de opeenvolgende onderwerpen besproken: brand effecten, lichamelijke gevolgen, letselmodelleringen en letseldrempels.

2.2 Standaard QRA-raamwerk

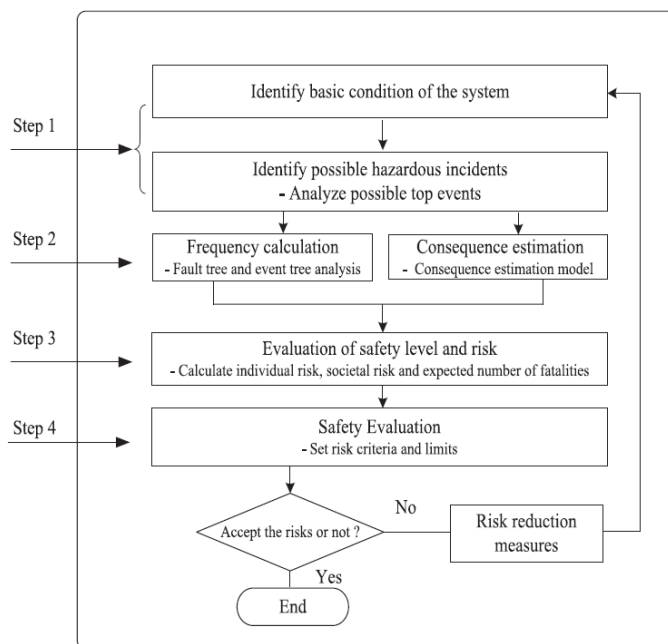
In 1975 is voor het eerst gebruik gemaakt van een QRA model om de risico's van een kernenergiecentrale te beoordelen (U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1975). Daarna is deze tool veelvuldig gebruikt bij grote technologische systemen, zoals bij NASA die de tool gebruikt heeft voor de ontwikkeling van een risicomodel voor het gehele systeem van een ruimteschip. NASA (2011) definieert een QRA model (waarin het beschreven wordt als Probabilistic Risk Assessment - PRA) als een uitgebreide, gestructureerde en logische analyse methode dat gericht is op het identificeren en beoordelen van risico's in complexe technologische systemen met als doel de kostenefficiëntie te verbeteren en de veiligheid en prestaties daarvan te verbeteren. Volgens VROM (1997) wordt een QRA gebruikt om risico's te beoordelen door drie vragen te beantwoorden:

1. Wat kan er verkeerd gaan?
2. Wat is de kans daarvan?
3. Wat zijn de gevolgen daarvan?

Persson (2002) vult deze vraag aan met een evaluatievraag: "Wat kunnen we er aan doen?" Verder geeft hij aan dat men per situatie moet beoordelen welke mate van detailniveau men zal handhaven bij het beantwoorden van deze vragen. Het detailniveau wordt vaak pragmatisch bepaald. In de literatuur zijn verschillende methodes te vinden over de werkwijze van een QRA model. Uit de literatuur van (Jonkman, van Gelder, & Vrijling (2003) en Vrouwenfelder, Lovegrove, Holicky, Tanner, & Canisius, (2001)) blijkt dat een QRA globaal in vier fases kan worden verdeeld:

- *Kwalitatieve analyse*: waarin het systeem, afbakening, risico identificatie, faalwijzen en scenario's worden gedefinieerd;
- *Kwantitatieve analyse*: Bepalen van de kansen en gevolgen van de gedefinieerde gebeurtenissen. Kwantificeren van de risico's in een risico getal of grafiek als functie van kans en gevolg;
- *Risico-evaluatie*: Evaluatie van de risico's op grond van de resultaten van de vorige analyses. In deze fase wordt een beslissing gemaakt of het risico toelaatbaar is;
- *Controle van de risico's en reductiemaatregelen*: Afhankelijk van de uitkomsten van de risico-evaluatie, moeten maatregelen worden genomen om het risico te reduceren. Bovendien moet worden aangegeven hoe de risico's worden beheerst.

Deze vier fases dienen als basis voor een standaard QRA raamwerk zoals beschreven is in het artikel van o.a. PIARC (1999) en Qu, Meng, Yuanita, & Wong (2011), zie figuur 2. Hierin staat het proces systematisch weergegeven in een viertal stappen. De eerste twee stappen in het figuur worden volgens Qu et al. (2011) geassocieerd met het vormen van het QRA model (kwalitatieve en kwantitatieve analyse). Dit gebeurt door eerst alle mogelijke gevaren te identificeren, Daarna het opstellen van een 'foutenboom', 'gebeurtenissenboom analyse'. Vervolgens het maken van gevolg schattingen om uiteindelijk het aantal slachtoffers voor de verschillende scenario's te berekenen. De laatste twee stappen laten de toepassing van het QRA model zien (Evaluatie, controle en reductiemaatregelen van de risico's). In de volgende paragrafen worden de stappen nader toegelicht.



figuur 2: Standaard QRA raamwerk (Qu, Meng, Yuanita, & Wong, 2011)

2.2.1 Identificeren risico's

Allereerst worden de basisvoorwaarden en definitie van het systeem beschreven. Hierin worden de systeembeschrijving van de tunnel opgesteld, welke installaties en voorzieningen zitten in de tunnel en wat zijn de eigenschappen van de betreffende tunnel. Daarna wordt een analyse gemaakt van de mogelijke gevaren, zoals brand, vloed of lekken van gevaarlijke stoffen. Deze gevaren worden gekarakteriseerd als 'top gebeurtenissen'.

In Winch (2010) worden de risico's en onzekerheden volgens een cognitieve benadering omschreven. Hierin wordt een cognitief model van risico's en onzekerheden van projecten voorgesteld. Voor besluitvormers is het belangrijk de onzekerheden te onderkennen. Hieruit komt naar voren dat er vier verschillende soorten onzekerheden zijn. "Known knowns" zijn volgens Winch (2010) de cognitieve conditie van risico's, waarbij de bron van het risico is geïdentificeerd en de kans aan het risico kan worden toebedeeld. De zogenoemde "Known Unknowns" is de cognitieve conditie van onzekerheid waar de bron van het risico is geïdentificeerd, maar een kans kan niet aan het risico worden toegewezen. Daarnaast zijn er "Unknown Knowns". Dat is de cognitieve conditie van de onzekerheid waarbij iemand de bron van het risico en de kansen van de betreffende risico weet. Maar deze eventuele 'vertrouwelijke' informatie achterhoudt. Als laatste is er de cognitieve conditie van onzekerheden de zogenoemde "Unknown unknowns". Hierbij is de bron van het risico niet geïdentificeerd, waardoor men het risico ook niet kan weten, ook wel "black swan" genoemd. Dat betekent voor de risicoanalyse dat per definitie de "Unknown unknown" risico's niet in het model worden opgenomen. Daarnaast worden zeer kleine kansen, lager dan een kans 10^{-6} , in veel risicoanalyses niet opgenomen.

2.2.2 Kansen berekening

De 'foutenboom' en 'gebeurtenissenboom' worden gebruikt om de kansen van de verschillende scenario's te bepalen. Een 'foutenboom' is een tool dat kan worden gebruikt voor het bepalen van kansen. De kansen worden berekend voor een bepaalde 'top gebeurtenis'. Volgens Qu et al. (2011) tonen foutenbomen met behulp van verschillende diagrammen hoe de onwenselijke toestand van het systeem wordt geanalyseerd. Hierbij wordt gebruik gemaakt van Boolean algebra. Deze vorm van algebra noteert meestal waardes met 1 en 0 die respectievelijk overeenkomen met "true" of "false". De 'foutenboom' wordt opgesteld door middel van 'gates' en 'eind-notes', ook wel "leafs" genoemd. Doordat vanuit het 'top gebeurtenis' teruggekeken wordt naar welke oorzaken de bovenliggende gebeurtenis teweegbrengt, wordt dit ook wel 'backward logic' genoemd. Een voorbeeld wordt gegeven door Qu et al. (2011), zie bijlage D. Met de 'gebeurtenissenboom' worden de kansen voor elk verschillend scenario bepaald. De 'gebeurtenissenboom' kan worden omschreven als een boomdiagram dat volgens Meng,

Qu, Wang, Yuanita, & Chee Wong (2011) verwijst naar complexe gebeurtenissen die op hun beurt verwijzen naar uitkomsten of opeenvolgende serie eenvoudige gebeurtenissen. De 'top gebeurtenis' van de 'foutenboom' dient als input voor de 'gebeurtenissenboom'. Vervolgens is de boom met verschillende soorten gebeurtenissen die kunnen plaatsvinden (takken) opgebouwd. Dit principe wordt ook wel 'forward logic' genoemd, omdat op de feiten vooruit wordt gelopen.

2.2.3 Gevolgen berekening

De kansen berekeningen dient als input voor de gevolgen berekeningen. Voor de verschillende scenario's worden de gevolgen geschat. Volgens Jonkman, Lentz, & Vrijling (2010) bevat de gevolg berekening drie algemene elementen: beoordeling van het effect, bepalen aantal getroffen personen t.g.v. het effect en een berekening van de sterfte onder deze personen. De effecten van brand worden besproken in paragraaf 2.3. De lichamelijke gevolgen door brand worden verder toegelicht in 2.4. In paragraaf 2.5 wordt in gegaan op het aantal getroffen personen en berekening van de sterfte onder deze personen.

2.2.4 Risico evaluatie

Nu de kansen en gevolgen voor elk scenario zijn berekent, moeten deze worden beoordeeld. Uit verschillende invalshoeken kan worden beslist of de risico's wel of niet worden geaccepteerd. In een QRA worden normaliter dodelijke slachtoffers beoordeeld op de verwachtingswaarde, individueel risico en groepsrisico (PIARC, 1999; Vrouwenvelder et al., 2001). Andere invalshoeken waarop beoordeeld kan worden zijn: economische schade, omgevingsschade, geïntegreerde risico maatregelen of potentiële schade (Jonkman et al., 2003). Hieronder worden de drie belangrijkste beoordelingsinvalshoeken verder uitgelicht.

Volgens Qu et al. (2011) geeft de verwachtingswaarde (Expected Number of Fatalities) een verwachting van het aantal dodelijke slachtoffers. Deze wordt berekent door elk scenariokans en gevolg met elkaar te vermenigvuldigen en vervolgens al deze producten bij elkaar op te tellen volgens de onderstaande vergelijking.

vergelijking 1: Berekening verwachtingswaarde

$$ENF = \sum_{i=1}^N [F_i \times x_i]$$

Waarin

ENF	Verwachtingswaarde (Expected Number of Fatalities)
N	Aantal scenario's
F	Kans voor een specifiek scenario
x	Gevolg voor specifiek scenario

Jonkman et al. (2003) gebruikt de definitie van het ministerie van *Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (VROM)* om het individueel risico (persoonlijk risico) te beschrijven. Het individueel risico kan worden omschreven als de kans dat een gemiddeld onbeschermd persoon, permanent aanwezig is op een bepaalde locatie, overlijdt ten gevolge van een ongeluk van een gevaarlijke activiteit. Volgens Jonkman et al. (2003) kan de volgende vergelijking gebruikt worden om het individueel risico in te schatten:

vergelijking 2: berekening individueel risico

$$IR = P_f P_{d|f}$$

Waarin

IR	Individueel Risico
P _f	Kans op falen voor een specifiek scenario
P _{d f}	Kans op overlijden aan voor een specifiek scenario in het geval van falen

Jonkman et al. (2003) omschrijft het groepsrisico als een relatie tussen kans en het aantal mensen die lijden aan een bepaalde mate van schade in een bepaalde populatie ten gevolge van de realisatie van gespecificeerde gevaren. Groepsrisico geeft het aantal dodelijke slachtoffers voor een geheel gebied onafhankelijk ewaar de schade in het gebied gebeurd. Anders gezegd is het de kans dat een groep mensen in één keer komt te overlijden bij een ongeval in de tunnel. Volgens Jonkman et al. (2003) wordt het groepsrisico vaak grafisch weergegeven in een FN-curve. Een voorbeeld is weergegeven in figuur 3. Deze curve toont de kans van overschrijding als een functie in het aantal dodelijke slachtoffers, op een dubbel logaritmische schaal, zie vergelijking 3. De Y-as van deze grafiek geeft de verwachte kans F van het aantal N of meer doden. De X-as vertegenwoordigd de schaal van de gevolgen in het aantal dodelijke slachtoffers N (Qu et al., 2011).

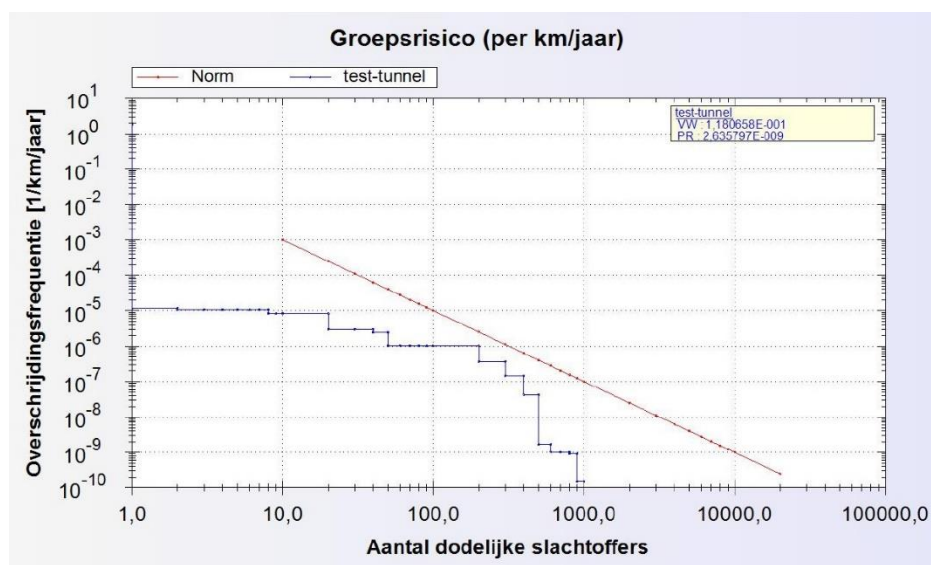
vergelijking 3: berekening groepsrisico

$$1 - F_N(x) = P(N > x) = \int_x^{\infty} f_N(x)$$

Waarin

$F_N(x)$	Kansverdelingsfunctie van het aantal dodelijke slachtoffers per jaar, betekent de waarschijnlijkheid van minder dan x doden per jaar;
$P(N > x)$	Kans dat het aantal dodelijke slachtoffers (x), is niet lager dan het aantal N
$f_N(x)$	Kansdichtheidsfunctie van het aantal dodelijke slachtoffers per jaar

De huidige wetgeving hanteert een norm voor het groepsrisico, de schuine lijn in figuur 3. Deze ligt op: $0,1 / N^2$ per kilometer per jaar, waarbij N het aantal dodelijke slachtoffers is. Deze is vastgelegd in de Nederlandse tunnelwetgeving (Wet aanvullende regels veiligheid wegtunnels 2013). Meer informatie is te vinden in de bijlage C.



figuur 3: FN-curve die het groepsrisico representeert.

Het is verplicht om aan de norm te voldoen anders moeten er maatregelen worden genomen. bijvoorbeeld extra vluchtdeuren. Vervolgens worden de stappen uit figuur 2 weer doorlopen tot het risico is gereduceerd tot onder de grenslijn. Door de vier stappen in het model te doorlopen kan relatief eenvoudig een afweging worden gemaakt of het risico voldoet aan de wet en daarmee wordt geaccepteerd. Door de systematische aanpak van een QRA kan volgens Jonkman et al. (2003) de tool een bijdrage leveren aan een basis voor rationeel besluitvorming over risico's. Het rapport van NASA (2011) is het hiermee eens en beargumenteert dat de tool gebruikt kan worden door besluitvormers voor kwantitatieve risicoschattingen voor verschillende inrichtingen en gevaarlijke activiteiten.

Nu een algemeen beeld is gevormd over de QRA en de werkwijze ervan zullen de onderzoeksvragen worden behandeld. De eerste onderzoeksvraag is het middelpunt van het theoretisch kader.

1. Welke invloed heeft een tunnelbrand op (het aantal) gewonden?
--

2.3 Brand effecten

Brand gedraagt zich anders in een tunnel dan op de open weg. Het is daarom noodzakelijk om inzicht te krijgen in het ontstaan en de natuurlijke eigenschappen van een tunnelbrand. In deze paragraaf wordt antwoord gegeven op de volgende deelvraag:

1.1 Wat zijn de eigenschappen van een brand?

Brand ontstaat alleen als sprake is van de volgende drie elementen: zuurstof, brandstof en ontbrandingstemperatuur. Deze drie elementen worden vaak weergegeven in een branddriehoek. Tenzij één van deze elementen niet of niet voldoende aanwezig is kan geen brand ontstaan. Bij een brand wordt de energie die vrijkomt bij het verbranden overgedragen op andere voorwerpen of andere materie. Deze vorm van overdracht wordt ook wel warmteoverdracht of transport genoemd. De overdracht van warmte geschiedt over het algemeen in drie vormen:

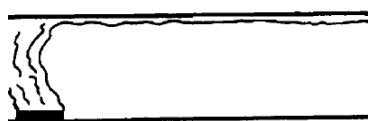
- Convectie
- Straling
- Conductie

Hieronder worden deze drie warmteoverdrachten verder toegelicht. Vervolgens wordt het brandverloop en effect modellen behandeld.

2.3.1 Convectie

Volgens Nolan (2011) is convectie de warmteoverdracht van de ene locatie naar de andere door middel van een bewegend medium. De warmte die bij een brand vrij komt wordt normaliter voor 75 tot 85 procent veroorzaakt door hete gassen en lucht. De rook die daarbij vrijkomt is een bijproduct van brand. Rook zijn verbrandingsresten van de brandstof. Deze verbrandingsresten worden meegevoerd met de warme lucht (thermische convectie). Rook ontstaat als gevolg van onvolledige oxidatie van de brandstoftoevoer bij een verbranding.

Door de hoge temperatuur van de rook stijgt deze op naar het plafond van de tunnel. Het plafond weerhoudt de rook van het stijgen. Hierdoor wordt een warme homogene rooklaag gevormd die zich langs het plafond van de brand verwijderd.

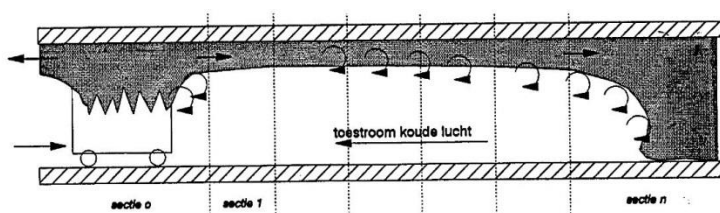


figuur 4: Rook stijgt op en vormt een rooklaag

Ondertussen wordt onderlangs koude lucht naar de brand aangezogen. Dit effect wordt stratificatie genoemd. Zolang stratificatie optreedt en de rooklaag niet te dik wordt zal dit weinig invloed hebben op de personen die zich op dat moment in de tunnel bevinden.

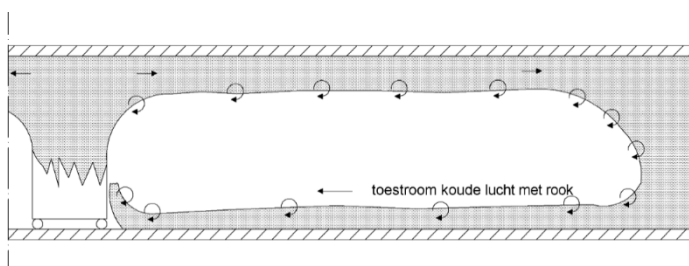
In 2000/2001 zijn in de Tweede Beneluxtunnel diverse full-scale brandproeven uitgevoerd. Hierdoor is veel praktijkinformatie verzameld. Met deze informatie heeft het rapport Bouwdienst Rijkswaterstaat (2002) getracht om de kennisleemte in te vullen tussen praktijk en theoretische benaderingen. Op basis van de gemeten snelheden en temperatuur concludeert het rapport dat de convectieve warmtestroom afneemt. Door de wanden en het plafond van de tunnel koelt de rooklaag af. Naarmate verder van de brand gemeten verliest de rooklaag daarom steeds meer warmte en wordt de stratificatie instabiel. Hierdoor treedt in de tunnelatmosfeer een diffusie op, welke veroorzaakt wordt door de turbulentie en

snelheidsverschillen tussen de rooklaag en koude toegestroomde lucht. Dit heeft als gevolg dat de rook zich in de tunnel verspreidt, zie figuur 5.



figuur 5: Stratificatie in een tunnel (COB en Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2004)

Doordat rook vol toxische stoffen zit en slecht zicht veroorzaakt, wordt op dat moment de rook een probleem voor de mensen die zich in het invloedsgebied bevinden. Daarnaast wordt de gezakte rook door de koude luchtstroom mee gevoerd richting de brand. Personen die zich nog in de koude lucht bevinden, zonder rook, lopen het risico te worden vergiftigd door de rook die hun in de rug tegemoet komt, figuur 6.



figuur 6: Instabiele stratificatie en terugstroom naar brand

2.3.2 Straling

Een brand zendt ook warmte uit in de vorm van straling. Dit is de overdracht van warmte tussen twee stoffen die elkaar niet aanraken. In tegenstelling tot convectie is bij straling dus geen medium nodig. De warmtestraling door een brand wordt veroorzaakt door elektromagnetische energie. Dit is infraroodstraling die verschillende golflengten heeft. In een onderzoek van Drysdale (1998) blijkt welke warmteoverdracht een grotere invloed heeft bij verschillende temperaturen. Bij lage temperaturen (< 150 - 200 graden Celsius) is convectie overheersend. Als de temperaturen boven de 400 graden Celsius komen wordt straling steeds belangrijker. Normaal gesproken hebben tunnelbranden een temperatuur in de rangorde van 800 - 1200 graden Celsius (Lemaire et al. 2006) (Lie, 2002). Daarom vormt de straling een directe bedreiging voor personen die zich in het invloedsgebied van de brandeffecten bevinden.

Naast de straling die door brand vrijkomt, vormt tevens de straling van de ontstane rook een bedreiging. Volgens Drysdale (1998) is straling van hete rook een belangrijke contributiefactor in de ontwikkeling van brand in gesloten ruimtes. Zoals te zien is in figuur 6 hoopt rook zich tijdens de ontwikkeling van een brand op onder het plafond. Deze rooklaag straalt significant warmte uit naar lagere niveaus.

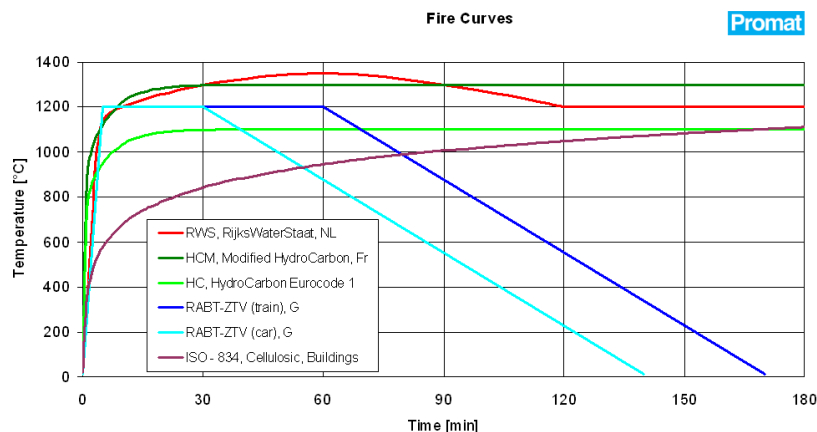
2.3.3 Conductie

Conductie wordt ook wel geleiding genoemd. Dat is de warmteoverdracht binnen een bepaalde stof. Bij het bepalen van letsel door een tunnelbrand wordt uitgegaan van een voertuig- of ladingbrand. Daarbij is de brand zo groot dat de invloed van convectie en straling moeten worden meegenomen in de berekeningen. De conductie is volgens Lemaire et al. (2006) alleen relevant voor de warmteoverdracht in het materiaal zelf, waardoor conductie niet maatgevend is om letsel te bepalen. Daarom zal dit onderwerp niet verder worden uitgelicht.

2.3.4 Brandverloop

Een brand ondergaat een aantal fases voordat deze op zijn hoogtepunt qua intensiteit is. Dit proces wordt ook wel de brandcurve van brand genoemd. In de laatste jaren is veel onderzoek gedaan naar de verschillende soorten brandcurves in tunnels (Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2002) (PIARC, 1999).

Verschillende instanties en landen hebben een eigen brandcurve ontwikkeld. In Nederland wordt de RWS-curve van Rijkswaterstaat het meest gebruikt. Promat (2013) heeft verschillende brandcurves uitgezet in één figuur, zie figuur 7.



figuur 7: Verschillende brandcurves (Promat, 2013)

Het rapport Bouwdienst Rijkswaterstaat (2002) heeft verschillende vermogenscurven van personenauto's vergeleken. Hieruit blijkt dat de vermogenscurven vier fases doorloopt. De eerste fase betreft de opwarmfase. Daarin is de brand net begonnen, waarbij het vermogen van de brand nog minimaal is. Alleen de directe omgeving van de brand wordt opgewarmd. Daarna ondergaat de brand een ontwikkelingsfase. Deze tweede fase duurt enkele minuten waarbij het vermogen van de brand doorgroeit naar een vermogen van één Mega Watt (MW). Als eenmaal deze sterkte bereikt is kan een autobrand zeer snel doorgroeien tot enkele MW's. In de derde fase bereikt de brand zijn piekvermogen. Deze liggen vaak tussen de drie en 10 MW. Uit experimenten blijkt dat het piekvermogen pas bereikt wordt na tenminste ca. 10 min. De laatste fase neemt de brand alleen af. Gemiddeld duurt het ca. 30 min. voordat de brand afneemt onder de één MW. Bij een autobrand met een personenwagen is het brandverloop redelijk consistent. Het brandverloop van vrachtauto's of bestelauto's is daarentegen erg variabel. Dat komt mede door de lading die deze auto's vervoeren. Lie (2002) stelt eveneens dat de brandcurve is onderverdeeld in verschillende fases. Volgens Lie kan de temperatuur tijdens een brand verdeeld worden in drie tijdsperiode, te weten:

- Groeitijd;
- Constante ontwikkelingstijd;
- Vervaltijd.

Daarnaast is de intensiteit van de brand afhankelijk van de hoeveelheid brandstof voor de brand. Een relatief kleine personenauto kan volgens de literatuur maximaal 10 MW aan warmte uitstoot produceren (Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2002) (PIARC, 1999). Volgens de literatuur komt dit doordat na verloop van tijd de brandstof voor de brand opdraakt. Grotere voertuigen hebben meer brandstof. Hierdoor is het mogelijk dat het brandvermogen toe neemt, langer duurt of een combinatie hiervan.

2.3.5 Effect modellen

Volgens Rew, Hulbert, & Deaves (1997) worden algemeen twee methodes gebruikt voor het voorspellen en uitrekenen van de brandeigenschappen, te weten veld modellen en semi-empirische modellen. Veldmodellen zijn beter bekend onder de term Computational Fluid Dynamics (CFD) modellen. Deze modellen zijn goed in het voorspellen van vloeistofstromen wanneer geen ontbranding optreedt. Veldmodellen zijn gebaseerd op de uitkomsten van tijdgemiddelden. Deze zijn gebaseerd op de Navier-Stokes- vergelijkingen. Dit zijn differentiaalvergelijkingen, die het transport van massa, impuls, warmte in een samendrukbaar medium in vloeistofstromen beschrijven. Veldmodellen zijn wiskundig zeer complex, veelal verwerkt in computerprogramma's. Daarom zijn ze geschikt om het verloop van diverse scenario's uit te rekenen. Voor deze complexe berekeningen is veel computerrekenkracht nodig. Het uitrekenen neemt daardoor veel tijd en computing power in beslag. Semi-empirische modellen zijn relatief simpele technieken om de effecten van branden te voorspellen. Door de eenvoud en

systematische techniek zijn de modellen makkelijk te begrijpen en daarom zeer geschikt voor risicobeoordelingen Rew et al. (1997). Als gevolg van de relatief simpele technieken zijn deze modellen alleen geschikt om de warmte straling over een afstand te schatten en niet ontworpen om andere fenomenen te voorspellen.

2.4 Lichamelijke gevolgen

Personen die aan een brand in een tunnel worden blootgesteld ondervinden verschillende effecten. Daarom wordt in deze paragraaf de volgende deelvraag beantwoord:

1.2 Welke effecten ondervinden mensen tijdens een tunnelbrand?

In de rampengeneeskunde worden vier letseltypen onderscheiden (COB en Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2004) (Codex Medicus, 2013)^a.

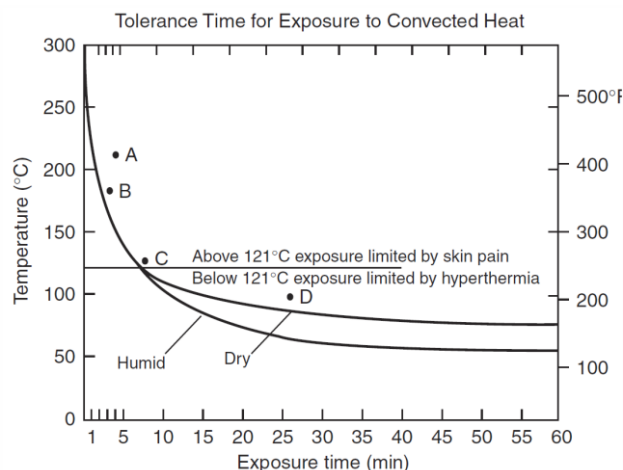
- Mechanisch letsel;
- Thermisch letsel;
- RNBC letsel;
- Geestelijk letsel.

Het *Mechanisch letsel* kan men oplopen door botsenergie, die tijdens een botsing vrijkomt, of door een drukgolf tijdens een explosie. Dit type letsel wordt gekenmerkt door scherp- en stompletsel van de ledematen, de romp, hoofd of het aangezicht, zoals fractures, bloedingen of kneuzingen. *Thermisch letsel* wordt veroorzaakt door korte of langdurige blootstelling aan extreme temperaturen van convectie of straling, zoals een explosie of brand. Hierbij treden de letseltypen huid- longverbranding (brandwonden), koude letsels en onderkoeling op. *RNBC letsel* staat voor Radiologisch, Nucleair, Biologisch en Chemisch letsel. Radiologisch en Nucleair letsel kan ontstaan door een ongeval met radioactief materiaal. Biologisch letsel wordt veroorzaakt door besmetting met levende micro-organismen of toxines. Chemisch letsel wordt veroorzaakt door toxische producten die lokaal en over het lichaam verspreide effecten kunnen veroorzaken. Voorbeelden van lokale effecten zijn irritaties aan de ogen, huid en bovenste luchtwegen. Absorptie van de toxische stoffen in de bloedbaan die het centrale zenuwstelsel, lever of nieren kunnen beïnvloeden zijn voorbeelden van over het lichaamsverspreide effecten. Deze laatste genoemde effecten kunnen vroeg- of laattijdige symptomen geven. Het laatste letseltype dat men in de rampengeneeskunde onderscheidt is het *geestelijk letsel*. Dit zijn voornamelijk psychotrauma's die bij elk incident kunnen voorkomen en zijn mede afhankelijk van zaken als dodental, betrokkenheid van kinderen en eigen beïnvloedingsmogelijkheden.

Bij een tunnelbrand zijn met name het thermisch, chemisch en geestelijk letsel van belang. Geestelijk letsel wordt in dit onderzoek echter buiten beschouwing gelaten, omdat o.a. psychotrauma's moeilijk zijn in te schatten en hierover zover bekend geen literatuur beschikbaar is. Afhankelijk van een korte of lange blootstellingsduur is het letsel verschillend. De effecten in tijd van thermisch letsel; hoge temperaturen en straling, worden in respectievelijk paragraaf 2.4.1 en 2.4.2 besproken. In paragraaf 2.4.3 wordt dieper op chemische stoffen ingegaan en in paragraaf 2.4.4 wordt het verminderd zicht, dat door rook wordt veroorzaakt, besproken.

2.4.1 Hoge temperaturen

De effecten die optreden als personen aan hoge temperaturen worden blootgesteld worden besproken in het artikel van Purser & Buckley (1983). Hierbij zijn de personen ongekleeed en in rust onder lage luchtbewegingomstandigheden (0.5 m/s). Uit figuur 8 blijkt dat bij temperaturen onder de 120 graden Celsius de blootstelling beperkt is tot oververhitting. Mits de temperatuur boven de 120 graden Celsius uitkomt kan dit pijn en verbranding veroorzaken.



figuur 8: Thermisch tolerantie voor mensen in rust (Purser & Buckley, 1983)

Op basis van Pryor (1968) heeft Bryan (1986) een overzicht gegeven van de blootstelling aan onder ander hoge temperaturen op personen in gebouwen. Uit brandproeven op ware grootte is de volgende tabel opgesteld.

tabel 1: Temperatuur versus responsie (Bryan, 1986)

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

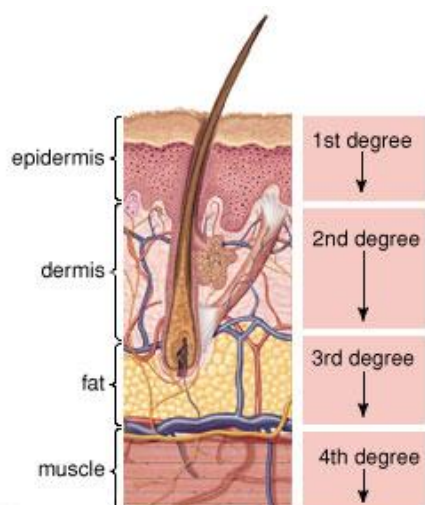
Tijdens een tunnelbrand wordt over het algemeen rekening gehouden met droge lucht in de tunnel. Indien een tunnel voorzien is van een sprinklerinstallatie ontstaat tijdens een tunnelbrand een watermist omgeving waarbij vochtige lucht ontstaat. Volgens de richtlijnen van PIARC (1999) wordt dan gesteld dat personen al bij een temperatuur van 50 graden Celsius overlijden als gevolg van de toenemende warmteoverdracht naar de huid en condensatie in de longen.

2.4.2 Straling

De warmtestraling van brand kan fysiologische effecten en pathologische effecten veroorzaken. Volgens VROM (2003) zijn fysiologische effecten: een stijging van de hartslag, zweten of stijging van de lichaamstemperatuur. Deze effecten treden pas op bij een lange blootsteldingsduur. Pathologische effecten hebben betrekking op het ontstaan van brandwonden door warmtetransport naar de huid. Dit zijn ernstige verwondingen en kunnen blijvende schade aanbrengen aan het menselijk lichaam. Brandwonden worden over het algemeen verdeeld in drie verschillende verbrandingsgraden afhankelijk van de diepte van de wond. Eerstegraads brandwonden zijn doorgaans pijnlijk en de oppervlakte van de huid (epidermis) is rood en droog. Bij tweedegraads brandwonden is de epidermis verbrand. Een tweedegraads verbranding kenmerkt zich door blaarvorming en een natte huid, die nog rood is. Derdegraads brandwonden strekt zich uit tot in de dermis. Deze vorm van verbranding geeft een gevoelloze, droge huid en een witte, gele of zwarte kleur. Volgens Hardee & Lee (1977) is een temperatuurstijging van 9 kelvin (K) voldoende om cellen van de huid te vernietigen. In het voorgestelde conductie model van Hardee et al. (1977) kan de diepte van een brandwond worden berekend als een temperatuursverhoging van ten minste 9 K voordoet. Voor verschillende dieptes worden de volgende brandwonden bereikt:

- Eerstegraads brandwonden < 0.12 mm;
- Tweedegraads brandwonden < 2 mm;
- Derdegraads brandwonden > 2 mm.

In figuur 9 is een doorsnede van de huid met daarbij de verbrandingsgraden afgebeeld. In het figuur wordt zelfs een verbrandingsgraad van vier aangegeven. Dan wordt over het algemeen meer gesproken van verkoling. De maximale toelaatbare blootstellingsduur voor straling is gegeven in tabel 4.



figuur 9: Doorsnede van de huid i.c.m. verbrandingsgraad¹

2.4.3 Chemische stoffen

Bij een brand komen gevaarlijke chemische verbrandingsproducten vrij. Belangrijke verstikkingsstoffen die hierbij vrijkomen zijn o.a.: koolmonoxide (CO), kooldioxide en waterstofcyanide (Purser D. A., 2002). Volgens Purser (2002) wordt de mate van toxiciteit bepaald door concentratie van het chemische product in het beoogde orgaan van het lichaam en de tijdsperiode waarvoor een chemische concentratie wordt gehandhaafd. Bouwdienst Rijkswaterstaat (2002) deelt effecten van rook in twee categorieën:

- Oogirritaties en disfunctioneren van ademhalingsorganen;
- Verstikkende toxische stoffen die worden opgenomen in het bloed.

Oogirritaties kunnen het zicht op de vluchtweg verminderen. Hierdoor wordt de loopsnelheid van blootgestelde personen beïnvloed, welke wordt behandeld in paragraaf 2.4.4. Daarnaast kan een toxische stof het ademen bemoeilijken en zelfs leiden tot het disfunctioneren van de ademhalingsorganen. Tenslotte is het mogelijk dat de toxische gassen door ademhalingen in het bloed worden opgenomen. Dit kan het functioneren belemmeren of zelfs een narcotisch (verdovend) effect hebben. In het artikel van Bryan (1986) zijn de effecten van blootstelling aan CO weergegeven in een tabel, zie tabel 2. Deze tabel is gebaseerd op het rapport van (Pryor, 1968).

tabel 2: Effecten van blootstelling aan koolmonoxide (Bryan, 1986)

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

¹ <http://kids.britannica.com/elementary/art-91955/First-degree-burns-damage-the-outer-skin>

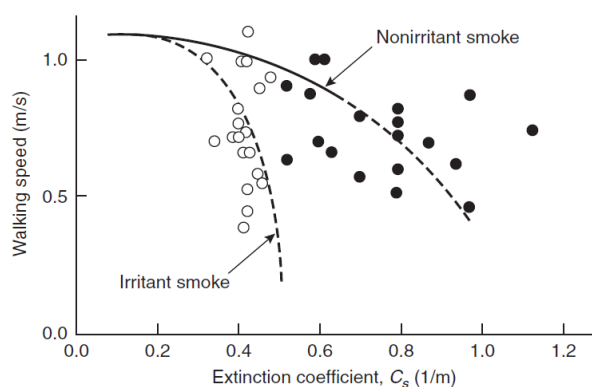
2.4.4 Verminderd zicht

Naast de toxische stoffen die in rook zitten kan rook de loopsnelheid en evacuatiegedrag van personen die risico lopen beïnvloeden. Hierbij speelt de functiebeperking van de populatie ook een rol. Deze begrippen worden hieronder toegelicht.

Loopsnelheid

De rook van een brand kan oogirritatie veroorzaken, waardoor het zicht op de vluchtweg wordt verminderd. Door deze zichtvermindering kunnen personen die aan een tunnelbrand worden blootgesteld minder snel vluchten. Het rapport Bouwdienst Rijkswaterstaat (2002) geeft aan dat de zichtlengte maatgevend is voor de zichtomstandigheden. De zichtafstand is de afstand waarover een persoon voorwerpen kan waarnemen. Als de zichtafstand minder wordt dan gaan mensen langzamer lopen, wat als gevolg heeft dat de blootstellingsduur oploopt. Dit betekent dat de kans op letselschade groter en ernstiger wordt. Blootgestelden ondervinden lichte hinder als de rookdichtheid gelijk is aan 0.05 m^{-1} , matige hinder als de rookdichtheid gelijk is aan 0.10 m^{-1} en ernstige hinder als de rookdichtheid gelijk is aan 0.2 m^{-1} . Men spreekt van desoriëntatie als de rookdichtheid gelijk is aan 0.5 m^{-1} .

In het onderzoek van Jin (2002) is de relatie van rookdichtheid en loopsnelheid bij rook door brand onderzocht. Hierbij hangt de loopsnelheid af van de rookdichtheid en of de rook wel of niet irriterend is. Dit heeft Jin (2002) in een figuur tegen elkaar uitgezet.



figuur 10: Loopsnelheid in brandrook (Jin, 2002)

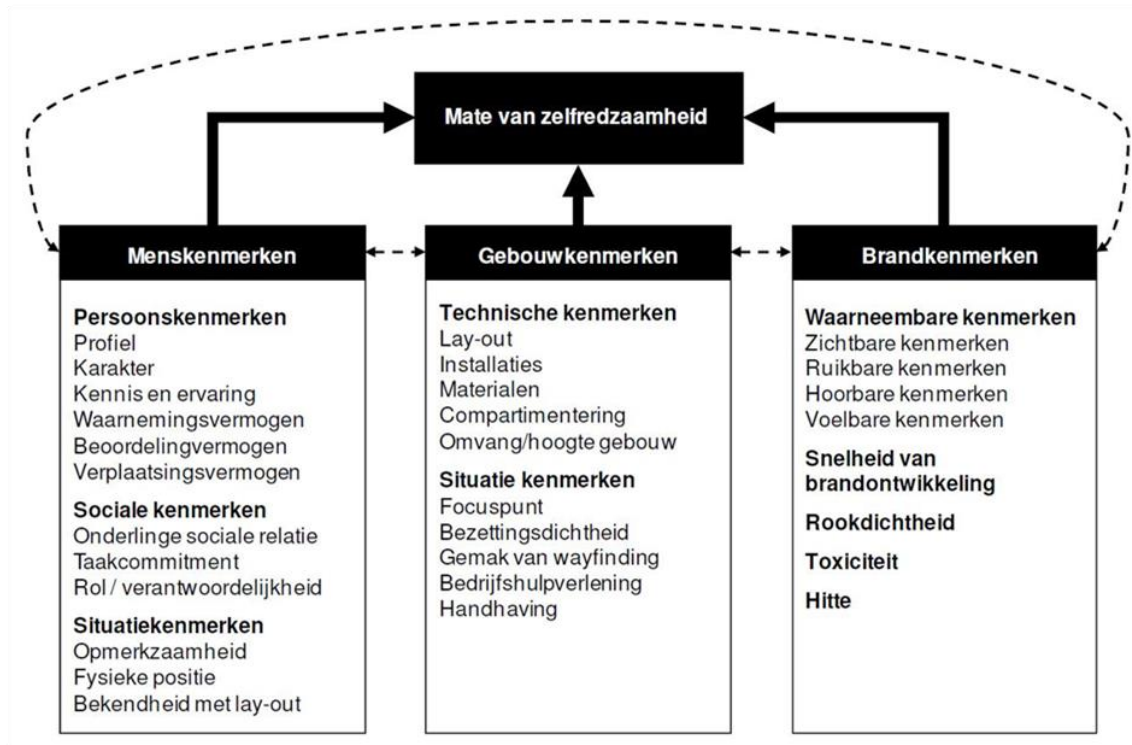
Naarmate de rookdichtheid (extinctiecoëfficiënt) toeneemt neemt de loopsnelheid bij niet irriterende rook geleidelijk af. Bij irriterende rook is dit bijna kwadratisch.

Evacuatie gedrag

In het proefschrift van Kobes (2010) wordt een nieuwe onderzoeksmethode voorgesteld waardoor inzicht wordt verworven in het evacuatiegedrag en het effect van het gebouwonwerp op dat evacuatiegedrag, en in het bijzonder op wayfinding. Hierbij wordt wayfinding gedefinieerd als: '*het proces van ruimtelijke oriëntatie en besluitvorming, waarbij voor de navigatie in een gebouwde omgeving gebruik wordt gemaakt van ruimtelijke kennis en aanwezigen uit die omgeving*'. In een onderzoek over het wayfinding gedrag in gebouwen hebben Veeraswamy, Galea, & Lawrence (2011) wereldwijd 1166 mensen geënquêteerd. Hieruit blijkt dat de genetische factor van een links of rechtshandige voorkeurshand en de culturele factor van het links of rechts rijden op een autoweg een belangrijke invloed uitoefenen op hun padkeuze. Naast de definitie van wayfinding zijn soortgelijke definities die het evacuatie gedrag van personen die worden blootgesteld aan een brand of ernstige gebeurtenis beschrijven. Het zelf in veiligheid brengen door te vluchten voor een gevaar wordt in de Nederlandse literatuur 'zelfredzaamheid' genoemd (Helsloot, Groenendaal, & Warners, 2011) (Kobes, 2010) (TNO, 2010). In de internationale literatuur wordt over het algemeen over de evacuatie van personen die risico lopen gesproken (Jonkman et al. 2010).

Volgens Kobes (2010) wordt de mate van 'zelfredzaamheid' beïnvloed door mens-, gebouw- en brandkenmerken. In figuur 11 zijn de kritische factoren weergegeven voor elk van deze drie kenmerken. Tevens zijn tussen de kenmerken onderlinge verbanden weergegeven. Een voorbeeld van het verband van gebouwkenmerk en brandkenmerk is bijvoorbeeld brandwerende materialen van een tunnel.

Hierdoor kan een brand minder goed uitbreiden of elementen kunnen zelfs helemaal niet vlam vatten. Het verband van gebouwkenmerken en menselijk kenmerken kan goed worden uitgelegd met vluchtborden in een tunnel. De vluchtborden geven een indicatie waar de gebruikers heen moeten vluchten. Hierdoor weten de personen enigszins hun fysieke positie in een tunnel. Het laatste verband tussen mensenkenmerken en brandkenmerken is een voorbeeld te zien in figuur 10. Hierbij heeft rookdichtheid invloed op het verplaatsingsvermogen van de aanwezige personen.



figuur 11: Kritische factoren voor 'zelfredzaamheid' bij brand (Kobes, 2010).

Uit de literatuurstudie van Kobes (2010) komt naar voren dat het werkelijke gedrag van mensen bij brand gebaseerd is op drie basisactiviteiten. De eerste activiteit wordt aangeduid met een periode van *bewustwording*. In deze periode worden de signalen van de gevaren herkend. In de tweede activiteit worden de signalen beoordeeld en vinden de eerste reacties plaats. Deze fase wordt ook wel de periode van *besluitvorming* genoemd. De derde activiteit betreft de periode van *ontvluchting*. De ontvluchting gaat gepaard met de verplaatsing naar een veilige plaats. Kobes (2010) concludeert dat de extra psychische spanningen de cognitieve processen en het menselijk gedrag kunnen aantasten. Daarnaast bevestigt ze het feit dat mensen langzamer gaan lopen als gevolg van een brandscenario, maar stelt wel voor dat verder onderzoek naar het menselijk gedrag bij brand nodig is. Verder heeft ze geconstateerd dat reactietijd om een brand te detecteren belangrijker is dan loopsnelheid.

Functiebeperking

Volgens NVBR, VNG en IPO (2010) is het bij 'zelfredzaamheid' van belang om onderscheid te maken tussen verschillende omgevingen, bewoners, alarmeringsmogelijkheden en de mate waarin het gevaar voldoende kan worden ingeschat. Naast personen die kunnen vluchten zijn ook mensen die een functiebeperking hebben of zelfs 'niet-zelfredzaam' zijn. Volgens Kobes (2010) worden deze personen over het algemeen geassocieerd met kinderen, ouderen en gehandicapten. Bij deze groep mensen is het mogelijk dat de verplaatsing en reactietijd langer en hoger zijn dan een gemiddelde populatie.

Het rapport van Stichting Werkgemeenschap tussen Techniek en Zorg, Landelijk Bureau Toegankelijkheid en Steunpunt Tunnelveiligheid (2005) heeft o.a. de groep minder zelfredzame personen onder de Nederlandse populatie onderzocht. Hierbij is gekeken naar de mensen die een functiebeperking hebben in Nederland. Het rapport concludeert dat een substantieel deel van de bevolking een functiebeperking ondervindt. Volgens het rapport hebben veel ouderen een

persoonsgebonden functiebeperking, waardoor verwacht mag worden dat naar schatting één derde van de van de gehele populatie c.q. bevolkingsgroep één of meer functiebeperkingen ondervindt in vluchtsituaties. Het is daarom van belang om naar de samenstelling van de tunnelpopulatie te kijken.

2.5 Letselmodelleringen

Vanuit de wetenschappelijke literatuur zijn al diverse modellen beschikbaar die de gevolgen van een brand in relatie met het letsel bepalen (Jonkman et al. 2010) (Purser D. A., 2002). Deze modellen zijn globaal gebaseerd op drie parameters, te weten:

- Dosis
- Blootstellingsduur
- Zelfredzaamheid

Een 'dosis' wordt gekenmerkt door een hoeveelheid stof te vermenigvuldigen met de intensiteit. Een voorbeeld is de hoeveelheid toxische stof in ppm die door een persoon in-of uitwendig wordt opgenomen voordat deze komt te overlijden. Afhankelijk van een korte of lange blootstellingsduur aan hitte, toxische stoffen of combinatie hiervan ontstaat letsel. Voor het berekenen van blootstellingsduur is geen eenduidige formule te geven Purser (2002). Factoren die de blootstellingsduur o.a. beïnvloeden zijn de omgevingsomstandigheden, zoals schuil- en vluchtmogelijkheden, en groepssamenstelling van de populatie die op dat moment in de tunnel aanwezig is (Jonkman et al. 2010). Van origine is de mens geneigd om zichzelf te beschermen tegen lichamelijke bedreigingen. Zolang de 'dosis' en blootstellingsduur beperkt blijven is het mogelijk voor de blootgestelde personen om te vluchten naar een veilige plaats in de tunnel (zelfredzaamheid). Tijdens het vluchten is het mogelijk dat de blootgestelde personen hinder ondervinden doordat de 'dosis' en blootstellingsduur in de tunnel te hoog oplopen. Hierdoor kan de gezondheidsschade toenemen waardoor hulpverlening nodig is. Volgens het rapport (COB en Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2004) is hulpverlening vooral noodzakelijk bij verbrandingen van de huid of luchtwegen en stres gerelateerde klachten, zoals pijn op de borst. Letselmodellering levert de benodigde informatie voor het inschatten van de noodzakelijke capaciteit van de hulpverleningsdiensten.

Afhankelijk van de brand effecten en lichamelijke gevolgen is het mogelijk om het letsel van de blootgestelde personen in te schatten. De effecten van brand zijn besproken in paragraaf 2.3. De blootstellingen aan hoge temperaturen, straling en chemische stoffen zijn respectievelijk besproken in de paragrafen 2.4.1, 2.4.2 en 2.4.3. De eigenschappen van 'zelfredzaamheid' zijn eerder toegelicht in paragraaf 2.4.4. Om inzicht te krijgen in welke letselmodellering bestaan wordt in deze paragraaf de volgende deelvraag beantwoord:

1.3 *Welke huidige theoretische/wetenschappelijke letselmodelleringen bestaan op dit moment en welke worden toegepast bij een brand?*

Volgens Jonkman et al. (2010) bevat de gevolg berekening drie algemene elementen:

- Beoordelen welk fysieke effect verband houdt met de kritieke gebeurtenis;
- Bepalen van het aantal personen in het getroffen gebied die worden blootgesteld aan het fysieke effect;
- Sterfte onder de blootgestelde populatie bepalen.

De effecten van brand en lichamelijke effecten zijn respectievelijk in paragrafen 2.3 en 2.4 besproken. Voor het berekenen van de blootgestelden in de tunnel is het noodzakelijk te weten hoeveel mensen in de tunnel zijn in de periode dat een kritische gebeurtenis plaatsvindt. Volgens Jonkman et al. (2010) kan de blootgestelde populatie worden bepaald door de populatie die risico loopt te corrigeren met de fractie personen die in staat zijn om te evacueren door te vluchten of beschutting te zoeken. De mogelijkheden om succesvol te evacueren is afhankelijk van de tijd die beschikbaar is en de tijd die nodig is om te vluchten. Daarnaast kan rook het evacuatie proces negatief beïnvloeden, zie paragraaf 2.4.4. Om de effecten van sterfte van een persoon of dier te bepalen wordt meestal gebruik gemaakt van 'dosis – response functie' voor een specifiek gebeurtenis. Door een concentratie 'dosis' te vermenigvuldigen met de tijdsduur van een lichamenlijk effect (blootstellingsduur) wordt een 'dosis –

response functie' (Ct) samengesteld. Een 'dosis – response functie' wordt door Covello & Merkhoffer (1993) gedefinieerd als “een functionele relatie tussen de dosis en een nadelig gezondheidseffect”. Een 'dosis – response functie' geeft de relatie tussen de intensiteit van het effect en de sterfte onder de blootgestelde populatie. Deze functie vormt volgens Jonkman et al. (2010) de kansverdelingsfunctie van de weerstand van een populatie, waarbij de populatie wordt blootgesteld aan een bepaalde intensiteit van de gebeurtenis. Afhankelijk van de weerstand is het ook mogelijk het letsel in te schatten. In de literatuur wordt onderscheid gemaakt in de volgende drie verschillende soorten 'dosis – response functie' (Jonkman et al., 2010) (Purser D. A., 2002), welke in de onderliggende paragrafen verder worden toegelicht:

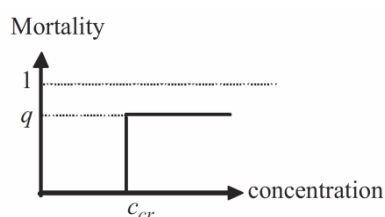
- Vuistregel
- FID model
- Probitrelatie

2.5.1 Vuistregel

De eerste en eenvoudigste 'dosis – response functie' is een constante ratio, waarbij wordt aangenomen dat een deel of fractie van de populatie sterft. Deze vorm wordt een vuistregel genoemd. Het rapport van Jonkman (2007) bevat een theoretische benadering om het bestaan van een constante correlatie tussen gewonden en dodelijke slachtoffers te bepalen. In deze benadering wordt een vergelijking gemaakt tussen de 'dosis – response functies' van zowel gewonden als sterfte. Alleen als de intensiteit van het fysieke effect voor elke ongeluk hetzelfde is kan verwacht worden dat er een constante ratio is. Deze ratio is ongeacht de impact van het fysieke effect. Bijvoorbeeld bij een vliegtuigramp sterven altijd 10 op de honderd mensen. Doordat de blootstelling concentratie per ongeluk verschilt concludeert Jonkman (2007) dat geen constante ratio is tussen dodelijke slachtoffers en gewonden.

2.5.2 FID-model

Een Fractional Incapacitating Dose (FID) model is een meer geavanceerde 'dosis – response functies'. Deze wordt uitgedrukt in een (continue) functie van het niveau van de effecten. Dit zijn over het algemeen distributie functies die de weerstand van de blootgestelde personen vertegenwoordigen. De weerstand van personen of dieren wordt uitgedrukt in een waarde tussen 0 en 1. Zodra de concentratie van een bepaalde stof zo hoog wordt dat de weerstand van de blootgestelde personen wordt overschreden (≥ 1) gaan deze personen dood (Jonkman et al. 2010). De weerstand wordt hieronder schematisch weergegeven.

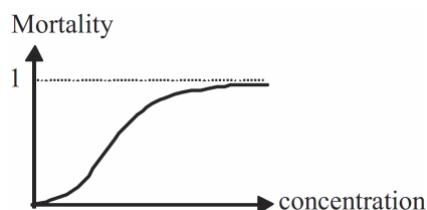


figuur 12: Voorbeeld van een discrete functie (Jonkman, Lentz, & Vrijling, 2010)

Een voorbeeld van de werking van FID-modellen wordt besproken in het artikel van Purser (2002). Om de toxische en lichamelijke gevaren bij een brand te bepalen heeft Purser (2002) in zijn artikel een toxische en lichamelijk gevaren beoordelingsmodel voorgesteld. Volgens Purser (2002) moet elk soort brandmodel in staat zijn om concentratie- en tijdsprofielen voor verstikking, lichamelijke factoren en irritatie te berekenen. Het doel van dit model is om het tijdsmoment te bepalen wanneer bij de geschatte potentiële slachtoffers een dermate letsel optreedt dat zij niet meer kunnen ontsnappen of hun vermogen om te kunnen ontsnappen ernstig in gevaar wordt gebracht tijdens de blootstelling aan een brand. Eerst worden de verstikkingsstoffen (fysieke effecten) die narcotische verschijnselen veroorzaken onderzocht (CO, HCN O₂ en CO₂). Purser (2002) gebruikt FID-modellen om te bepalen wanneer personen niet meer in staat zijn tot vluchten ten gevolge van het inademen van giftige stoffen. Voor elk soort verstikkingsstof is het noodzakelijk de FID te berekenen. Meer informatie zoals de berekeningen zijn terug te vinden in bijlage F.

2.5.3 Probitrelatie

In Nederland is het meest voorkomende ‘dosis – response functie’ de probitrelatie. Met een probitrelatie kan voor elke stof iedere willekeurige concentratie en blootstellingsduur het percentage sterfte voor een populatie worden berekend. De probitrelatie zijn inverse cumulatieve distributie functies die aannemen dat de relatie tussen de logaritmische waarde beschreven kan worden als een cumulatieve normale distributie (VROM, 2005)^a. Anders gezegd geeft een probitrelatie het verband tussen de opgelopen ‘dosis’ en de respons weer. Hierbij wordt de ‘dosis’ uitgedrukt als functie van de concentratie gevaarlijke stof c.q. effect en de blootstellingsduur op een bepaalde afstand. De respons wordt uitgedrukt in de fractie van de blootgestelde populatie die een bepaald effect vertoont. Daarom geeft een probitrelatie het groepspercentage aan dat bij een bepaalde blootstelling van een gegeven effect wordt ondervonden. Een probitrelatie kan schematisch worden weergegeven zoals in figuur 13 en kan worden berekend met vergelijking 4.



figuur 13: Probitrelatie schematisch weergegeven (Jonkman, Lentz, & Vrijling, 2010)

vergelijking 4: Probitrelatie

$$PR = a + b * \ln (C^N * t)$$

Waarin

PR	Geeft de waarde van de probit weer (kans van oplopen van het gegeven letsel)
a, b, N	Constanten
C	Concentratie van het schadelijke effect
t	Blootstellingsduur in minuten

Met een probitrelatie wordt een letaliteit percentage berekend. Volgens VROM (2005)^a kan de kans op letaal letsel berekend worden met:

vergelijking 5: kans op letaal letsel

$$P = 0.5 * \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{Pr - 5}{\sqrt{2}} \right) \right]$$

Waarin

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} * \int_0^x e^{-t^2}$$

e Wiskundige constante 2.7182

Bij het inschatten van groepspercentages moet rekening worden gehouden dat niet bij elk persoon hetzelfde letsel wordt vastgesteld als de ‘dosis’ en blootstellingsduur hetzelfde zijn. De ene persoon krijgt bijvoorbeeld eerder tweedegraads brandwonden dan een ander. Om dit probleem te verhelpen wordt gebruik gemaakt van een interventiewaarde ook wel letseldrempel (LC) genoemd. Een interventiewaarde is een percentage van een bepaalde deel van de populatie die bekijkt wat het desbetreffende effect doet. Hieronder staan de meest voorkomende interventiewaarden:

LC01	Bij 1% van de populatie treed het betreffende letsel op
LC50	Bij 50% van de populatie treed het betreffende letsel op
LC98	Bij 98% van de populatie treed het betreffende letsel op
LC99	Bij 99% van de populatie treed het betreffende letsel op

Een nadeel van probit berekeningen is dat deze zeer gedetailleerd is en dat per persoon wordt bijgehouden hoeveel 'dosis' van een effect men heeft ontvangen. Naast de probitfuncties zijn ook andere modellen ontwikkeld zoals het Lees- en Prugh model, maar deze zijn alleen geschikt om fatale wonden te berekenen die veroorzaakt worden door het plotseling vrijkomen van warmte. In de volgende paragraaf zullen de letseldrempels uitvoeriger worden behandeld.

2.6 Letseldrempels

Voor de hulpverlening is het daarnaast interessant om een onderverdeling in de letselernst te maken. In het rapport van (RIVM, 2009) zijn drie verschillende methodieken onderzocht waarmee bevoegd gezag de letselernst van gewonden kan beoordelen. Hierin zijn de systemen interventiewaarden en met name Acute Exposure Guideline Level (AEGL), triage en Disability Adjusted Life Years (DALY) in opgenomen. Volgens RIVM (2009) geven AEGL's richtwaarden die zijn vastgesteld voor kortdurende blootstelling aan stoffen via de lucht die hulpverleners snel inzicht in de gevolgen van deze stoffen. Triage is het beoordelen door medisch deskundigen van de hulpbehoefte bij slachtoffers en DALY is een maat om het gezondheidsverlies te berekenen voor een aandoening of ziekte. Volgens RIVM (2009) bleek het alleen mogelijk om gewonden in te schatten met behulp van de AEGL en triage. De DALY methodiek is volgens het RIVM (2009) minder geschikt voor preventief gebruik per case op lokaal niveau. Daarom zullen alleen interventiewaarden en triage hieronder worden toegelicht.

Volgens COB en Bouwdienst Rijkswaterstaat (2004) worden de gevolgen van te hoge temperaturen, straling en toxische gewoonlijk onderverdeelt in de categorieën D1 tot en met D4. Deze worden respectievelijk aangeduid met:

- Detectability
- Discomfort
- Disability
- Death

Hierbij wordt "detectability" gedefinieerd als het zien of ruiken van de schadelijke stoffen, maar deze stoffen veroorzaken geen hinder. "Discomfort" zijn de onaangename en hinderlijke verschijnselen. Bij "Disability" treedt onomkeerbare of anderszins ernstige gezondheidsschade op, met hulpbehoefte of vermindering van het vluchtvermogen. En "Death" wordt geassocieerd met levensbedreigende gezondheidsschade, die zonder adequate behandeling binnen enkele dagen de dood tot gevolg kan hebben. Interventie waarden zijn volgens RIVM (2009) in feite de drempelwaarden die aangeven waar de scheiding ligt tussen deze vier D's.

In Amerika zijn interventiewaarden ontwikkeld en worden gebruikt onder de naam: AEGL. Deze AEGL's zijn ontwikkeld door de US-EPA. Volgens Committee on Acute Exposure Guideline Levels; Committee on Toxicology; National Research Council (2010) zijn AEGL's drempelwaarden die aangeven boven welke concentratie (bij bepaalde blootstellingsduur) er een toename van mate van ernst van effecten kan optreden voor algemeen publiek en toepasbaar voor hulpverleners voor blootstellingsduur van 10 min tot 8 uur. Er bestaan drie verschillende AEGL's die voor de blootstellingsduur en hoeveelheid 'dosis' toxische stof zijn ontwikkeld.

- AEGL-1 is de concentratie stof in de lucht in PPM waarboven wordt voorspeld dat de algemene populatie, met inbegrip van minder valide personen, merkbaar ongemak of irritatie kan ervaren.
- AEGL-2 is de concentratie stof in de lucht in PPM waarboven wordt voorspeld dat de algemene populatie, met inbegrip van minder valide personen, onomkeerbare of ander ernstig, langdurig nadelige effecten op de gezondheid of een verminderd vermogen om te vluchten kan ervaren.
- AEGL-3 is de concentratie stof in de lucht in PPM waarboven wordt voorspeld dat de algemene populatie, met inbegrip van minder valide personen, levensbedreigende bijwerkingen op de gezondheid of dood kan veroorzaken.

In de onderstaande tabel worden de relaties aangeduid tussen de interventiewaarden en de AEGL die eerder is besproken.

tabel 3: Relaties tussen interventiewaarden en AEGL (RIVM, 2009)

Drempel tussen Detectability en Discomfort	AEGL-1
Drempel tussen Discomfort en Disability	AEGL-2
Drempel tussen Disability en Death	AEGL-3

Daarnaast is wordt door hulpverleners ook veel gebruik gemaakt van triageklassen. Dat zijn klasse waarbij in geval van nood prioriteiten worden gesteld voor geneeskundige hulpverlening. Volgens Codex Medicus, (2013)^b worden gewonden beoordeeld op vitale functies- , vrije ademweg, ademhaling en bloedsomloop, op basis van vier triageklassen:

- Triage 1 (T1) zijn gewonden van wie het leven onmiddellijk wordt bedreigd door een obstructie van de ademwegen en/of door een stoornis van de ademhaling en of van de circulatie.
- Triage 2 (T2) zijn gewonden van wie het leven wordt bedreigd door een obstructie van de ademwegen, een stoornis van de ademhaling of van de circulatie of die gevaar lopen op een ernstige infectie of invaliditeit, tenminste wanneer zij niet binnen zes uur na het oplopen van het letsel behandeld zullen worden.
- Triage 3 (T3) zijn gewonden van wie het leven niet bedreigd wordt door een ademwegobstructie, door een stoornis van ademhaling en/of circulatie, door een ernstige infectie of invaliditeit.
- Triage 4 (T4) zijn gewonden bij wie onder de gegeven omstandigheden een afwachterende houding moeten worden aangenomen en bij wie niet met behandeling begonnen moet worden.

Volgens Codex Medicus, (2013)^b wordt in Nederland T4 alleen in oorlogsomstandigheden gehanteerd, maar zodra de gelegenheid zich aandient, zullen ook deze slachtoffers de noodzakelijke zorg ontvangen. In de onderstaande paragrafen worden letselgrenzen voor de lichamelijke gevolgen van te hoge temperaturen, straling en een belangrijke chemische stof CO bepaald.

2.6.1 Hoge temperaturen

Volgens Lemaire, Leur, & Kenyon (2002) is een verband te vinden tussen de blootstellingsduur en temperatuur. Onder de 70 graden Celsius kan men oncomfortabel, maar wel veilig een langere tijd verblijven. Tussen de 70 en 150 graden Celsius wordt de onderstaande formule voorgesteld. Boven de 150 graden Celsius gaat gepaard met veel pijn en binnen vijf minuten huidbrandwonden.

vergelijking 6: maximale blootstellingsduur in functie van tijd en temperatuur

$$t = 5.33 \times 10^8 \times \left(\frac{1}{T^{3.66}} \right)$$

Waarin

t	Blootstellingsduur in seconden
T	Temperatuur in °C

Volgens Purser D. A. (2002) moet de maximale blootstellingsduur in functie van tijd en temperatuur progressiever worden aangenomen. De maximale toelaatbare blootstellingsduur in functie van tijd van temperatuur en straling zijn weergegeven in de onderstaande tabel.

tabel 4: Maximale toelaatbare blootstellingsduur temperatuur en straling (Purser D. A., 2002)

Mode of Heat Transfer	Intensity	Tolerance Time
Radiation	<2.5 kW·m ⁻²	>5 min
	2.5 kW·m ⁻²	30 s
	10 kW·m ⁻²	4 s
Convection	<60°C 100% saturated	>30 min
	100°C <10% H ₂ O ^a	12 min
	120°C <10% H ₂ O	7 min
	140°C <10% H ₂ O	4 min
	160°C <10% H ₂ O	2 min
	180°C <10% H ₂ O	1 min

In het rapport van (COB en Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2004) wordt een minimale blootstellingsduur aan temperatuur gegeven. Volgens het rapport is er tot 60 graden Celsius weinig afname in het 'zelfredzaam' vermogen van de personen. Bij hogere rookgassen en luchttemperaturen zal het letsel toenemen.

2.6.2 Straling

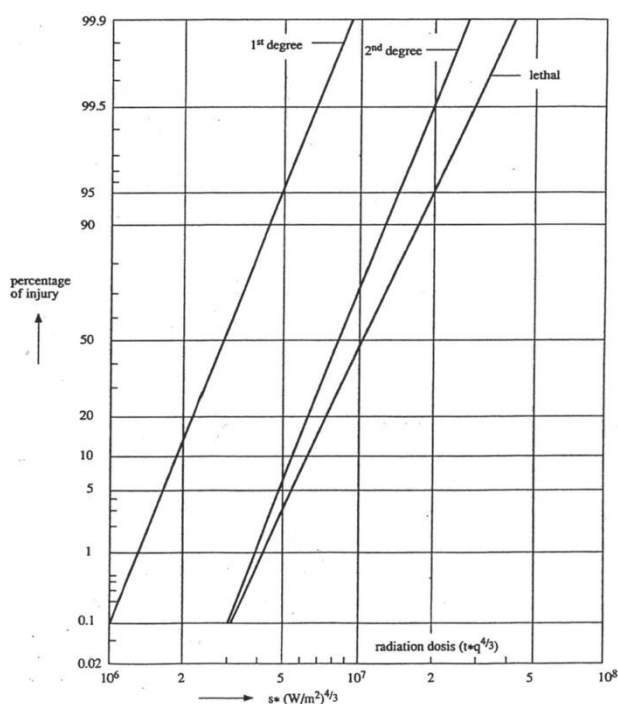
De grenzenwaarden van straling worden bepaald aan de hand van probitrelaties die in paragraaf 2.5.3 zijn behandeld. Voor eerstegraads en tweedegraads brandwonden en letaal letsel zijn probit relaties ontworpen. Probit relaties zijn ontwikkeld voor zowel thermisch als toxisch letsel. Op basis van Eisenberg, Lynch, & Breeding (1975) heeft de VROM (2003) probitrelaties afgeleid voor thermisch letsel. Deze gegevens zijn afkomstig van experimenten met vloeistofbranden en straling die vrijkomen bij een nucleaire reactie. Volgens het rapport is het schadeniveau afhankelijk van de opgenomen 'dosis' warmte door de blootstellingsduur (t) te vermenigvuldigen met de stralingsflux (q), volgens de relatie $t * q^{4/3}$.

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

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

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

Het ontstaan van de bovenstaande grenswaarden is verschillend per persoon. Bij volwassenen wordt er onderscheid gemaakt tussen de schade ten gevolgen van stralingswarmte met zogenoemde LC waarden, welke behandeld zijn in paragraaf 2.5.3. De probit waarden worden via een conversietabel (Bijlage B) omgerekend naar de kans op optreden van het betreffende schadeniveau, zie onderstaande figuur 14.



figuur 14: Schadeniveau versus stralingsdosis (Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2002)

2.6.1 CO

De maximale blootstelling voordat personen verstikken door chemische stoffen is afhankelijk van de tijdstuur van de blootstelling. Purser (2002) geeft voor CO en diverse andere chemische verstikkingsstoffen een maximale blootstellingsduur in functie van tijd. Deze zijn weergegeven in het onderstaande tabel.

tabel 5: Maximale blootstellingsduur toxische stoffen (Purser D. A., 2002)

	5 min		30 min	
	Incapacitation	Death	Incapacitation	Death
CO	6000–8000 ppm	12,000–16,000 ppm	1400–1700 ppm	2500–4000 ppm ^{44,45}
HCN	150–200 ppm	250–400 ppm	90–120 ppm	170–230 ppm ^{45,59}
Low O ₂	10–13%	<5%	<12%	6–7% ^{21,25,45}
CO ₂	7–8%	>10%	6–7%	>9% ^{21,25,45}

Voor CO en andere toxische stoffen worden naast maximale blootstellingsduur ook een concentratie gegeven waarbij juist in 10 minuten nog geen gezondheidsschade optreedt, zogenoemde AEGL (COB en Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2004). De minimale ondergrenzen worden bepaald door middel van AEGL-2 en AEGL-3. Voor AEGL-1 is voor CO onvoldoende data beschikbaar (Committee on Acute Exposure Guideline Levels; Committee on Toxicology; National Research Council, 2010). De AEGL waarden voor CO worden in de onderstaande tabel weergegeven.

tabel 6: Beschermingswaarde CO in rook

CO AEGL's	Blootstellingsduur 10 min. (ppm)	Blootstellingsduur 30 min. (ppm)
AEGL-1	-	-
AEGL-2	420	150
AEGL-3	1700	600

Er zijn naast maximale blootstellingsduur en AEGL ook probit relaties voor chemische stoffen ontwikkeld. Deze probit geven alleen maar de maximale blootstellingsduur aan voor een LC50. Het schadeniveau is afhankelijk van de opgenomen 'dosis' toxische stof. Door de blootstellingsduur (t) te vermenigvuldigen met de gemiddelde concentratie tijdens de blootstellingsduur in ppm (C), volgens de relatie $t * C$. In VROM (2005)^a worden diverse probit-constanten voorgesteld:

tabel 7: Vastgestelde menselijke probit-constanten voor letaliteit en 30-min LC50

Stof	30-min LC50 (mg/m ³)	n	b	a
Koolstofmonoxide (CO)	7949	1	1	-7.4
Stikstofdioxide (NO ₂)	235	3.7	1	-18.6
Waterstofcyanide (HCN)	114	2.4	1	-9.8

Deze probit-constanten zijn voor de mens berekend op basis van geëxtrapoleerde LC50-waarden.

2.7 Conclusie

In de voorgaande paragrafen is een standaard QRA-raamwerk besproken. Een QRA ondergaat systematisch een aantal stappen. Zo worden eerst de risico's geïdentificeerd. Vervolgens worden met behulp van een 'foutenboom' en 'gebeurtenissenboom' de kansen en gevolgen berekend. Daarna worden de scenario's, die volgen uit de 'gebeurtenissenboom', geëvalueerd. De evaluatie wordt vaak beoordeeld in de vorm van een verwachtingswaarde, individueel risico en een groepsrisico.

Daarnaast is door middel van de voorgaande paragrafen een antwoord gevonden op de eerste onderzoeksvraag:

1. Welke invloed heeft een tunnelbrand op (het aantal) gewonden?

Een brand veroorzaakt straling, convectie, conductie en stratificaties. Zolang stratificatie optreedt en deze warme rook boven in de tunnel blijft drijven, wordt verwacht dat de blootgestelden geen letsel oplopen. Daarnaast is het brandverloop besproken waarbij een brand verschillende fases ondergaat. Een brand neemt eerst toe, dan is de brand in ontwikkeling en uiteindelijk neemt de brand af. Met behulp van CFD-modellen en/of semi-empirische modellen is het mogelijk om inzicht te krijgen in de effecten van brand.

Een tunnelbrand brengt gevolgen met zich mee. Eén gevolg daarvan is dat blootgestelden hiervan letsel kunnen ondervinden. In dit onderzoek zijn de gevolgen door hoge temperaturen, straling, toxisch letsel en verminderd zicht onderzocht. Door hoge temperaturen kan men longverbranding en huidverbranding oplopen. Blootstelling aan te hoge straling kan 1^e, 2^e of 3^e graads brandwonden veroorzaken. Chemische stoffen in rook veroorzaakt over het algemeen irritatie aan de ogen en luchtwegen. Tevens kunnen deze een verstikkend effect hebben op mensen. Daarnaast veroorzaakt rook die vrijkomt bij een brand een verminderd zicht in de tunnel en kan deze de loopsnelheid van aanwezige personen tijdens een tunnelbrand negatief beïnvloeden. Bij alle onderzochte gevolgen is een relatie tussen de hoogte van de 'dosis' en blootstellingsduur: hoe hoger de 'dosis' des te lager de maximale blootstellingsduur. Desalniettemin valt er geen eenduidige relatie te geven.

Bij het vluchtproces moet gelet worden op het werkelijke gedrag van mensen bij brand. Het vluchtproces is gebaseerd op een periode van bewustwording, besluitvorming en uiteindelijk ontvluchting. Rook, die bij een brand vrijkomt, heeft een negatief effect op de loopsnelheid en zo genoemd "wayfinding" van vluchtende personen. Hierdoor worden cognitieve processen en het menselijk gedrag beïnvloed. Deze groep vluchtende personen wordt langer blootgesteld aan de effecten van een brand, waardoor deze personen een grotere kans hebben op letsel. Daarnaast is het bij de personen die een functiebeperking hebben mogelijk dat de verplaatsing en reactietijd langer en hoger zijn dan een gemiddelde populatie.

Voor het berekenen van slachtoffers in een tunnelbrand zijn volgens Jonkman et al. (2010) drie algemene elementen van belang: beoordeling van het effect, bepalen aantal getroffen personen t.g.v. het effect en een berekening van de sterfte onder deze personen. Het berekenen van de sterfte gebeurt vaak door middel van 'dosis – response functies'. Afhankelijk van de weerstand is het ook mogelijk het letsel in te schatten voor deze personen. In dit onderzoek zijn de vuistregels, FID-modellen en probitrelaties behandeld.

Voor de hulpverlening is het interessant om de ernst van het letsel te beoordelen. Om het letsel te beoordelen zijn letseldrempels voorgesteld voor hoge temperaturen, straling en CO. Dit zijn grenswaarden om een bepaald letsel te categoriseren of te definiëren. Hierdoor kunnen de beoogde slachtoffers worden onderverdeelt in de ernst van het letsel. In de literatuur zijn interventiewaarden en triageklassen behandeld. Interventiewaarden zijn in feite de grenswaarden die aangeven waar de scheiding ligt tussen de vier genoemde D's: "Detectability", "Discomfort", "Disability" en "Death". De behandelde interventiewaarden, AEGL's zijn richtwaarden die zijn vastgesteld voor kortdurende blootstelling aan stoffen via de lucht die hulpverleners snel inzicht in de gevolgen van deze stoffen. Er zijn drie verschillende soorten AEGL's behandeld: AEGL-1, AEGL-2 en AEGL-3. Triage is het beoordelen door medisch deskundigen van de hulpbehoefte bij slachtoffers. Triageklassen zijn klasse waarbij in geval van nood prioriteiten worden gesteld voor geneeskundige hulpverlening

In het voorgesteld model worden foutenboom en gebeurtenissenboom gebruikt om de kansen te berekenen. Om alle gevolgen te berekenen wordt een 'snelle' brandverloop gebruikt om de verschillende branden te dimensioneren. De gevolgen van te hoge temperaturen, straling en concentratie-CO zullen in het voorgesteld model worden berekend. Hierbij wordt effecten van straling berekenend met behulp van een semi-empirische model. Voor de effecten van te hoge temperatuur en concentratie-CO zijn gemodelleerde CFD-resultaten beschikbaar, waardoor deze gegevens worden gebruikt. In het voorgesteld model wordt aangenomen dat alle aanwezige personen kunnen vluchten. Voor het bepalen van het vluchtproces wordt gebruik gemaakt van de bewustwording, besluitvorming en uiteindelijke ontvluchting. Daarnaast zullen de effecten van rook worden meegenomen op het vluchtproces. Om uiteindelijk de gewonden te berekenen zijn vuistregels niet afdoende gedetailleerd. FID-modellen worden gebruikt in de huidige QRA-tunnels. Deze modellen zijn met name geschikt om dodelijke slachtoffers te kwantificeren. Doordat de probitfunctie het verband tussen de opgelopen 'dosis' en de respons geleidelijk weergeeft, wordt deze modellering toegepast in het voorgesteld model. Desalniettemin zijn alleen voor straling probitfuncties voor verschillende gradatie letsel gegeven. Daarom worden er letselscategorieën voorgesteld. Hierdoor heeft de gebruiker zelf de vrijheid om letseldrempels te stellen. Er is geen duidelijk 'letselbeeld' voor de effecten van te hoge temperatuur en concentratie-CO gedefinieerd. Daarom worden voor de effecten van te hoge temperaturen en

concentratie-CO de gegevens geëxtrapoleerd. Voor concentratie-CO worden de AEGL gegevens gebruikt, omdat per stof kan worden bepaald wat de effecten zijn in de tijd.

3. Voorgesteld model

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt het voorgestelde model beschreven. De formules in de huidige QRA-tunnels zijn in beheer door Rijkswaterstaat (RWS). Aanpassingen kunnen alleen door RWS worden geregeld. Om een zelf een open model te maken is daarom een nieuw opzichzelfstaand QRA model gemaakt in Microsoft Excel. Het nieuwe model is gebaseerd op formules uit de bestaande QRA-tunnels en gevonden literatuur. Door beperkt tijdsbestek van het onderzoek is het niet mogelijk om alle facetten van het model te implementeren. Daarom zijn concessies en aannames gedaan ten aanzien van gebeurtenissen, gevolgen en effecten. De tweede onderzoeksvraag heeft betrekking op het voorgestelde model.

2. Welke criteria kunnen onderdeel vormen voor het voorgestelde model op basis van de huidige analyses?

Deze hoofdvraag is onderverdeeld in twee onderliggende vragen, waarvan de eerste in dit hoofdstuk en de tweede in het volgende hoofdstuk worden behandeld. In dit hoofdstuk wordt antwoord gegeven op de volgende deelvraag:

2.1 Welke criteria uit de literatuur zijn van belang voor het opstellen van het voorgestelde model voor gewonden?

In het theoretisch kader is een standaard QRA-raamwerk met bijbehorende stappen besproken. Deze stappen dienen als leidraad voor de basis van het voorgesteld model. Het identificeren van de risico's wordt besproken in paragraaf 3.2. De kans worden berekent met behulp van een foutenboom en gebeurtenissenboom. Deze worden in paragraaf 3.3 behandeld. In paragraaf 3.4 worden de gevolgen behandeld. In dit onderzoek worden gevolgen van de effecten hoge temperatuur, straling en concentratie CO behandeld. Daarnaast wordt met behulp van letselcategorieën een onderverdeling gemaakt van de gevolgen voor deze drie verschillende effecten. Het aantal gewonden ten gevolgen van een tunnelbrand wordt bepaald aan de hand van de op dat moment aanwezige personen in de tunnel, het vluchtproces dat de personen ondervinden en de totale blootstellingsduur. Tenslotte wordt in paragraaf 3.5 de risico-evaluatie beschreven.

3.2 Identificatie systeem

Een tunnel heeft diverse voorzieningen die een tunnel "veilig" moeten maken. Naast de betonnen constructie en geometrie van de tunnel is de tunnel uitgerust met geavanceerde voorzieningen, zoals ventilatie en vluchtdeuren. Deze voorzieningen en eigenschappen van de tunnel hebben invloed op de gevolgen tijdens een calamiteit in de tunnel. Volgens Torn et al. (2007) kan het effect van dergelijke voorzieningen op semi-kwantitatieve wijze in een scenario-analyse worden uitgedrukt in tijdswinst voor zelfredding en hulpverlening. Deze tijdswinst kan worden vertaald naar aantallen extra mensen die zich in veiligheid kunnen stellen, of minder letsel oplopen ten gevolge van een calamiteit. Deze eigenschappen verschillen per tunnel.

Door gebruik te maken van diverse invoerparameters kan een systeembeschrijving gegeven worden van de tunnel. Afhankelijk van de tunnel kan worden gekozen om de lengte van de tunnel, verkeersintensiteit of diverse voorzieningen in de tunnel aan te passen. Zo kan gekozen worden voor wel of geen vluchtdeuren en op welke 'hart-op-hart afstand' deze vluchtdeuren worden gedimensioneerd. Al deze parameters zijn van invloed op het effect en/of de kans van een calamiteit in de tunnel. In het voorgestelde model zijn 42 belangrijke parameters die de gebruiker handmatig moet invoeren en 22 tussenparameters die automatisch worden berekent. Deze zijn voor zover mogelijk onder verdeeld in categorieën die ook in de bestaande QRA-tunnels voorkomen, zoals geometrie, voorzieningen en/of motorvoertuigen. De parameters bevatten onder andere de lengte en intensiteit van de tunnelbuis, defaultwaarden van onder andere de faalkans van het ventilatiesysteem en gemiddelde uitstaptijd van inzittenden, voor het berekenen van het vluchtproces.

3.3 Kansenberekening

Uit de literatuur blijkt dat de kansenberekening bestaat uit een 'foutenboom' en een 'gebeurtenissenboom' deze worden in de onderstaande paragrafen voor het voorgestelde model toegelicht.

3.3.1 Foutenboom

Het model is alleen voor de 'top gebeurtenis' brand ontworpen. Andere risico's die zich kunnen voordoen zijn daarom niet in de calculaties meegenomen. In dit onderzoek wordt historische data en kennis van experts gebruikt die in de QRA-tunnels wordt voorgesteld. Hieruit blijkt dat de data uit 1984 in Nederland van 145 onderzochte branden van vracht – of tankauto's een kans is afgeleid van $2,3 \times 10^{-8}$. In het buitenland, waaronder Oostenrijk en Zwitserland, worden grotere kansen geconstateerd. Op basis van PIARC (1999) stelt Steunpunt Tunnelveiligheid dat deze grotere kans wordt veroorzaakt door oververhitting bij het klimmen of remmen bij het dalen op lange en/of steile hellingen. Zulke hellingen komen in Nederland niet voor. Daarom wordt aanbevolen dat de kans op brand gelijk is aan 2×10^{-8} (Rijkswaterstaat, 2012). Vervolgens moet deze kans vermenigvuldigd worden met de verkeersintensiteit per jaar.

3.3.2 Gebeurtenissenboom

In dit onderzoek zijn de gevolgen gebruikt die enerzijds voort komen uit de QRA-tunnels en anderzijds uit de literatuur van Meng et al. (2011) en Persson (2002). De volgende gebeurtenissen zijn in dit onderzoek opgenomen, en zijn weergegeven in bijlage H.

Periode - Spits

Een calamiteit kan op verschillende momenten van de dag plaatsvinden. De verkeersintensiteit, welke door de tunnel stroomt, is afhankelijk van de periode waarop een calamiteit plaatsvindt. Tijdens de spits bevinden zich doorgaans meer voertuigen in de tunnel dan bijvoorbeeld 's nachts. Het etmaal wordt daarom onderverdeeld in spits, dag en nacht. Deze uitsplitsing is mede afkomstig vanuit de QRA-tunnels en wordt o.a. in de literatuur gebruikt. Vanwege gelimiteerde tijd van dit onderzoeksmodel wordt alleen het drukste moment in een tunnel, de spits, gehanteerd. Desalniettemin is de intensiteit van spits handmatig aan te passen waardoor tevens berekeningen gemaakt kunnen worden voor zowel dag als nacht.

File Benedenstrooms

Met 'file benedenstrooms' wordt de file bedoeld die stroomafwaarts van een calamiteit ontstaat, waarvan de staart van de file de tunnel in groeit. Aangenomen wordt dat de calamiteit de weg blokkeert, waardoor er geen verkeer langs kan rijden. Hiermee wordt verondersteld dat voertuigen zich ophopen achter een calamiteit, waardoor bovenstrooms een file ontstaat. Het model houdt daarom altijd rekening met een bovenstrooms file. Er bestaat ook een kans dat zich benedenstrooms een file ontstaat. Meestal betekent dit dat een calamiteit dan in een file ontstaat.

Voertuig

In de 'gebeurtenissenboom' wordt onderscheidt gemaakt tussen personenauto's, vrachtauto's en tankauto's. De effecten van deze voertuigen onderscheiden zich van o.a. brandgrootte, tijdsduur van de brand, aantal inzittenden en de lengte van de voertuigen voor het bepalen van de file lengte. Aangenomen wordt dat voor bussen de lengte, brandgrootte en tijdsduur gelijk is aan die van vrachtauto's. De inzittenden kunnen daarentegen onafhankelijk van elkaar worden ingevoerd, omdat deze per voertuig verschillen.

Uitstroming en Beperkte uitstroming

Uitstroming en beperkte uitstroming van gevaarlijke stoffen kan voorkomen bij de lading van vrachtauto's en tankauto's. Een voorbeeld is een gat in een tanklading, waardoor brandbare vloeistof uitstroomt. In dit onderzoek worden alleen voor tankauto's uitstromingen beperkt berekend. Deze twee gebeurtenissen zijn met name gebaseerd op gegevens uit de literatuur. In het artikel van Persson (2002) worden deze scenario's geschetst als benzine uitstroom van een tankauto. Vanwege het tijdslimiet van het onderzoek zijn er concessies gedaan ten aanzien van de scenario's. Daarom zijn voor uitstroming en beperkte uitstroming alleen de scenario's van Persson (2002) in het model verwerkt.

Ontsteking

Als een ontsteking plaatsvindt dan ontstaat er brand en is er een kans op letsel van de aanwezigen in de tunnel. Als geen sprake is van ontsteking, dan wordt aangenomen dat er geen brand ontstaat, waardoor geen gewonden vallen.

Brandgrootte

Uit literatuur blijkt dat het brandvermogen per voertuig kan verschillen. Tevens is het mogelijk dat bij tankauto's explosies ontstaan. Het onderzoek van dit onderzoek richt zich op gewonden ten aanzien van brand. Daarom worden gewonden ten aanzien van explosies in dit onderzoek uitgesloten. De volgende aannames per voertuig zijn in tabel 8 weergegeven.

tabel 8: Aannames brandvermogen voertuigen

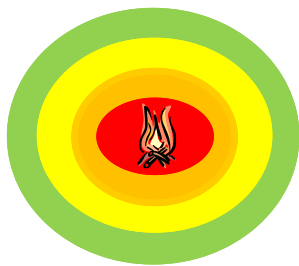
Voertuig		Brandvermogen
Personenauto		5 en 10 MW
Vrachtauto		25, 50 en 100 MW
Tankauto	Kleine plasbrand	50 MW
	Middelgrote plasbrand	100 MW
	Grote plasbrand	200 MW

Ventilatie

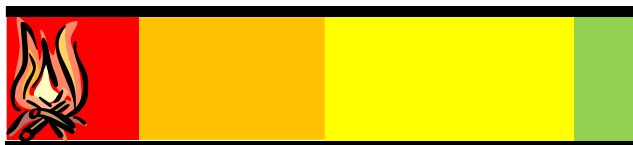
Een belangrijke voorziening in de tunnel is de 'langsventilatie'. In geval van een calamiteit kan deze ventilatie de schadelijke rook in de tunnel afvoeren naar buiten. Dit gebeurt met de rijrichting van het verkeer mee, omdat een file ontstaat achter het incident. Er wordt aangenomen dat het overige verkeer dat nog in de tunnel aanwezig is kan weggrijden. Dit is niet mogelijk als er benedenstrooms een file ontstaat, zie 'file benedenstrooms'. Er bestaat een faalkans dat deze voorziening niet werkt, wat effecten heeft op de gevolgen.

3.4 Berekening gevolgen

In de voorgaande paragraaf zijn de verschillende scenario's berekend. Afhankelijk van de scenario's worden de gevolgen bepaald. Deze gevolgen bepalen het effect wat de personen ondervinden die bij het incident betrokken zijn. Uit de literatuur zijn modellen beschikbaar die gericht zijn op het uitbreken van een calamiteit. Deze modellen worden voornamelijk gebruikt in de externe veiligheid. Hierin wordt het letsel bepaald aan de hand van een hoeveelheid 'dosis'. De 'dosis' wordt bepaald door een concentratie en blootstellingsduur. Bij het model wordt gekeken hoeveel personen in een bepaald invloedsgebied vallen gegeven een calamiteit. Vervolgens wordt het aantal personen geschat die zich in het invloedsgebied bevinden. Als de 'dosis' in het invloedsgebied te hoog is wordt aangenomen dat die personen komen te overlijden. Veronderstel dat een brand ontstaat bij een LPG tankstation. In figuur 15 worden de invloedsgebieden van deze brand weergegeven. In het rode gebied dicht bij de brand vallen zeer ernstige gewonden waarbij zelfs dodelijke slachtoffers. Verder weg van de brand, in het oranje gebied, is de invloed van de brand minder sterk maar toch sterk genoeg dat zwaargewonden vallen. In het gele gebied, nog verder van de brand verwijderd, vallen enkel lichtgewonden. En in het groene gebied zijn mensen veilig, waardoor geen slachtoffers vallen. Het totaal aantal slachtoffers die risico lopen worden berekend door de slachtoffers in de invloedsgebieden bij elkaar op te tellen. Daarnaast kan per invloedsgebied het letsel worden geschat.



figuur 15: Schematisch overzicht van invloedsgebieden



figuur 16: Schematisch overzicht van een bovenaanzicht in de tunnel met invloedsgebieden

Voor de toepassing van het model in tunnels is het noodzakelijk om de effecten te veranderen naar de omstandigheden in een tunnel, zie figuur 16. Door de gesloten tunnelconstructie zullen de effecten anders zijn dan in de open lucht. Voor elk van de 'dosis' is het schadelijk effect anders. Uit de literatuurstudie blijkt dat voor het bepalen van letsel door brand met name de hoge temperatuur, straling en concentratie chemische stoffen van belang zijn. Daarnaast is gebleken dat de rook van een brand verschillende gevaarlijke chemische stoffen bevat. Eén van de belangrijkste stoffen is koolstofmonoxide (CO). Daarom worden de effecten van de volgende factoren beschouwd:

- Hoge temperatuur
- Straling
- Concentratie CO

Om het letsel per effect te schatten worden letselcategorieën voorgesteld in paragraaf 3.4.2. Afhankelijk van de locatie waar een persoon zich in de tunnel bevindt zal het effect anders zijn. Volgens de literatuur vertonen personen evacuatiegedrag in geval van een calamiteit. Rook kan hierbij het vluchtproces beïnvloeden. Uiteindelijk zal het aantal gewonden geschat worden in paragraaf 3.4.3. Eerst zullen de effecten van temperatuur, straling en CO worden behandeld.

3.4.1 Effecten

Deze effecten zijn afhankelijk van de grootte c.q. vermogen en verloop van de brand. Doordat het model zo goed mogelijk toepasbaar moet zijn voor de QRA-tunnels zal het zo veel mogelijk gebruik maken van de modelleringen uit deze QRA. Waar nodig zal worden afgeweken en een andere modellering worden voorgesteld. In de QRA-tunnels wordt een snel en langzaam brandverloop gemodelleerd. Vanwege conservatieve aanname is voor gekozen om in dit onderzoek een snelle brandcurve toe te passen. Voor elke brandgrootte, uit tabel 8, zal hetzelfde 'snelle' brandverloop worden uitgevoerd. Uit de literatuur blijkt dat het brandverloop eerst toeneemt in de groeifase. Vervolgens is er een fase waarin de brand constant zal zijn en uiteindelijk zal de brand afnemen, welke wordt aangeduid met de verval-fase. Voor elk van deze fases is het brandverloop vanuit de QRA-tunnels beschreven, zie tabel 9. Meer informatie over het brandverloop is te vinden in bijlage E.

tabel 9: Gemodelleerd 'snelle' brandverloop

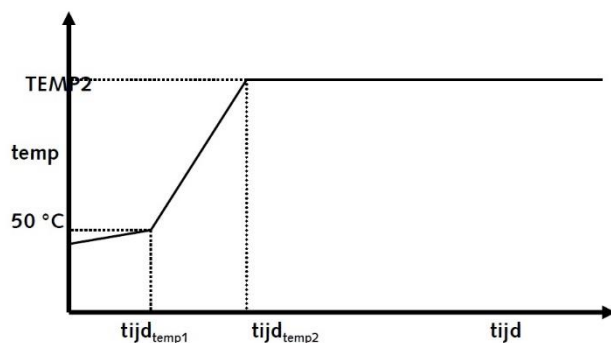
Groei fase	De brand stijgt van 0 naar zijn maximale brandgrootte in 120 seconden (2 min)
Constante fase	Voor vracht- en tankauto's blijft deze gedurende 1800 seconden (30 min) de maximale brandgrootte uitstoten. Voor personenauto's wordt aangenomen dat deze 480 seconden (8 min) de maximale brandgrootte uitstoot.
Verval-fase	Alleen van toepassing voor personenauto's: na 600 seconden (10 min) neemt de brandgrootte geleidelijk af, zodat deze na 1800 seconden is uitgebrand.

De exacte 'dosis' waaraan aanwezigen worden blootgesteld is lastig in te schatten in de dimensies tijd en afstand. In de literatuur zijn effectmodellen beschreven om deze effecten zo goed mogelijk in te schatten. Hierbij kan gebruik gemaakt worden van semi-empirische of CFD-modellen, zie paragraaf 2.3.5. In de QRA-tunnels zijn de effecten van temperatuur, straling en CO gemodelleerd door middel

van CFD-resultaten. De CFD-resultaten van CO en temperatuur zijn voor de verschillende brandgrootte, brandverloop, ventilatiesnelheid en locatie voor zowel boven als benedenstrooms berekend. Voor straling zijn echter alleen globale gegevens beschikbaar, daarom zal voor straling een semi-empirisch model worden voorgesteld. Door middel van deze modelleringen zullen de effecten in gemiddelde en maximale 'dosis' voor elk individu of groep personen die zich in een gegeven invloedsgebied bevinden worden bepaald.

Hoge temperatuur

Het temperatuursverloop wordt in Rijkswaterstaat (2012) als volgt gemodelleerd:



figuur 17: Gemodelleerde temperatuursverloop (Rijkswaterstaat, 2012)

Hierbij zijn de parameters $tijd_{temp1}$, $tijd_{temp2}$ en de temperatuur $TEMP2$ plaats afhankelijk in relatie tot de brand. Daarnaast moet de parameter $C_{heltemp}$ worden bepaald. Deze parameters worden bepaald met de volgende vergelijkingen.

vergelijking 7: tijdstip waarop temperatuur hoger wordt dan 50 °C

$$tijd_{temp1}(x) = para_{tijd1} \times x + parb_{tijd1}$$

vergelijking 8: helling grafiek temperatuursverloop

$$C_{heltemp}(x) = C_{heltemp} 13.5(x) + parbreedtebrandi \times (13.5 - B_{buis})$$

vergelijking 9: maximale temperatuur

$$TEMP2(x) = para_{temp2} \times x + parb_{temp2}$$

vergelijking 10: tijdstip maximale temperatuur bereikt

$$tijd_{temp2}(x) = \frac{(TEMP2(x) - 50)}{C_{heltemp}(x)} + tijd_{temp1}(x)$$

Waarin

$tijd_{tijd1}(x)$	Tijdstip waarop de temperatuur hoger wordt dan 50 °C
$C_{heltemp}(x)$	De helling van het stijgende stuk van de grafiek op afstand x
$TEMP2(x)$	Maximum temperatuur op afstand x
$tijd_{temp2}(x)$	Tijdstip waarop de maximale temperatuur is bereikt op afstand x
x	Afstand van de brand
Overige parameters zijn ontleend aan tabel 25, tabel 26 en tabel 27 uit bijlage E.	

Voor de QRA-tunnels zijn de schadelijke effecten van hoge temperaturen berekend door gebruik te maken van een CFD-model, zie bijlage E. De CFD-resultaten resulteren in een modellering die de effecten van temperatuur over de afstand en tijd berekend. Met behulp van deze modellering is voor een afstand van 1000 meter en 1800 seconden (30 min) een matrix ontworpen. Blootstellingsduur langer dan een half uur worden niet beschouwd, omdat wordt aangenomen dat de aanwezigen ofwel zelf zijn

ontvlucht of zijn overleden. Op deze wijze is een matrix gemaakt van elke brandgrootte, zodat eenvoudig de data hieruit kan worden onttrokken.

Straling

Voor straling zijn in de QRA-tunnels geen parameters gegeven, daarom wordt een semi-empirisch model voorgesteld. Voor straling stelt Persson (2002) de semi-empirisch puntbron methode voor uit VROM (2005)^b, welke 'warmte-flux' op een afstand kan berekenen. Deze methode prognosticeert niet elke vorm van de brand. Het model gaat er vanuit dat de bron van de straling een puntbron is. Hierbij wordt aangenomen dat de straling evenredig is als een bol in elke richting wordt uitgestoten. De volgende vergelijking wordt gebruikt als input voor het berekenen van de straling op een afstand:

vergelijking 11

$$q'' = \frac{F_s \times m \times \Delta H_c}{4 \times \pi \times X^2}$$

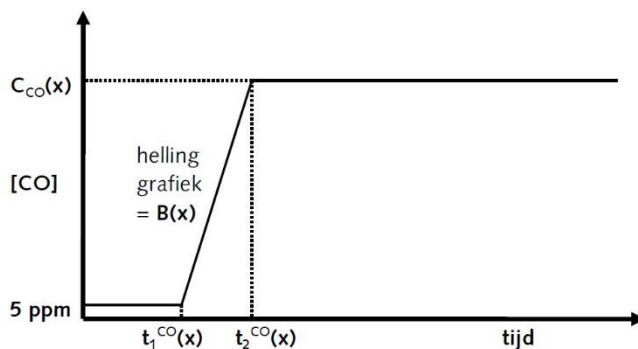
Waarin

q''	Warmteflux op een bepaalde afstand [kW/m ²]
F_s	Fractie verbrande straling van het vlamoppervlak ≈ 0.3
m	Verbrandingssnelheid [kg/s] = 0.055 kg/(s·m ²) (voor benzine);
ΔH_c	Netto verbrandingswarmte op het kookpunt van het brandbaar materiaal [MJ/kg] = 43.7
X	Afstand van de bron tot de ontvanger [m]

Met inachtneming van het brandverloop uit tabel 7 kan door deze formule een matrix worden ontworpen voor een afstand van 1000 meter en 1800 seconden (30 min).

Concentratie CO

Het verloop van de CO-concentratie op elke plaats in de tunnel wordt door Rijkswaterstaat (2012) schematisch weergegeven zoals in figuur 36.



figuur 18: Gemodelleerde CO-concentratieverloop (Rijkswaterstaat, 2012)

Om het CO-concentratieverloop te modelleren moeten drie variabelen worden bepaald. In Rijkswaterstaat (2012) zijn de volgende formules afgeleid van CFD-berekeningen. De waarden van de verschillende parameters zijn terug te vinden in bijlage E.

vergelijking 12: tijdstip CO-concentratie >5 ppm

$$t_{CO1}(x) = parT1_{COa} \times x + parT1_{COb}$$

vergelijking 13: helling grafiek CO-concentratieverloop

$$B_{helingCO}(x) = \frac{13.5}{B_{buis}} \times parhel_{COa} \times x + parhel_{COb} \text{ anders } B_{helingCO} L5(150)$$

vergelijking 14: maximale CO-concentratieverloop

$$C_{CO}(x) = \frac{13.5}{B_{buis}} \times parC_{CO}a \times x + parC_{CO}b \text{ anders } C_{CO}L5(150)$$

vergelijking 15: tijdstip maximale CO-concentratie

$$t_{CO2}(x) = t_{CO1} + \frac{(C_{CO}(x) - 5)}{B_{hellingCO}(x)}$$

Waarin

$t_{CO1}(x)$	Tijdstip waarop CO-concentratie op plaats x voor het eerst hoger wordt dan 5 ppm
$B_{hellingCO}(x)$	De helling van het stijgende stuk van de grafiek op afstand x
$C_{CO}(x)$	Maximum CO-concentratie op afstand x
$t_{CO2}(x)$	Tijdstip waarop de maximale CO-concentratie is bereikt op afstand x
x	Afstand van de brand

Overige parameters zijn ontleend aan tabel 22, tabel 23 en tabel 24 uit bijlage E.

Op basis van de bovenstaande vergelijkingen kunnen de effecten van CO in de dimensie tijd en afstand worden geschat. Voor CO is eveneens een matrix ontworpen met een afstand van 1000 meter en 1800 seconden (30 min). Hierbij moet worden vermeld dat voor het scenario met ventilatie een constante waarde van concentratie CO wordt aangehouden. Hierbij wordt de concentratie CO op een afstand van 150 meter van de brand berekend. Tot op deze afstand van de brand is het namelijk te verwachten dat de rookgassen zich homogeen over de hoogte van de tunnel hebben verdeeld.

3.4.2 Letselcategorieën

Om de ernst van het letsel te bepalen zijn er in het model voor elk effect, behandeld in bovenstaande paragraaf, drie categorieën opgesteld. Het is van belang om grenzen te berekenen waar wordt aangenomen dat personen in de tunnel een gegeven letsel ondervinden als gevolg van een gevaarlijk effect. Afhankelijk van het effect kunnen personen in bepaalde letselgrenzen worden gecategoriseerd. In de literatuur, paragraaf 2.6, zijn letselgrenzen/drempels voor de effecten hoge temperaturen, straling en concentratie CO behandeld. Daarin zijn interventiewaarden en triageklassen besproken. Triageklassen is het beoordelen door medische deskundige van slachtoffers die medisch hulp nodig hebben. Hierin wordt onderscheidt gemaakt in onmiddellijke hulp, hulp nodig, maar niet acuut levensbedreigend (binnen 6 uur) en hulp nodig op niveau van huisarts of EHBO. De besproken interventiewaarden, AEGL's, zijn ontwikkeld om letsel in te schatten afgeleid voor tijdsperiodes van 10 minuten tot 8 uur. Het model berekent het letsel dat ontstaat alvorens de hulpdiensten ter plaatse zijn. Daarnaast worden de gevolgen van de effecten voor een tijdslimiet van 30 minuten gemodelleerd. Daarom is er voor gekozen om interventiewaarden te gebruiken om de letselcategorieën op te stellen. In de onderstaande paragrafen worden de grenzen voor elk letselcategorieën van te hoge temperatuur, straling en concentratie CO voorgesteld.

Hoge temperatuur

Volgens het rapport (COB en Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2004) is tot 60 graden Celsius weinig afname in het 'zelfredzaam vermogen' van de personen. Daarom wordt deze waarde als minimale blootstellingsduur aangenomen. Uit de literatuur van Bryan (1986) en Purser & Buckley (1983) blijkt dat als de temperatuur onder de 120 graden Celsius de blootstelling beperkt is tot oververhitting. Temperaturen boven de 120 graden Celsius kan pijn en verbranding veroorzaken. Daarnaast is voor verschillende luchttemperaturen de response weergegeven in tabel 1 uit paragraaf 2.4.1. Een duidelijk of gedefinieerd letselbeeld ten gevolge van de effecten aan te hoge temperatuur ontbreekt. Hierdoor is het lastig de gewonden te categoriseren. Daarom is in het model gekozen om variabele ondergrenzen te bepalen voor letsel ten gevolge van hoge temperaturen. Zodra een gemiddelde of maximale 'dosis' te hoge temperatuur de ondergrens van de betreffende categorie overschrijdt, komt deze persoon of groep voor die categorie in aanmerking. In totaal wordt onderscheid gemaakt in drie categorieën, zie tabel 10.

tabel 10: Ondergrenzen van te hoge temperatuur

Categorie	Invoer- waarde	Eenheid	Opmerking
Temperatuursletsel 1	60	°C	Gegevens COB en Bouwdienst Rijkswaterstaat (2004)
Temperatuursletsel 2	120	°C	Gegevens Purser & Buckley (1983) en Bryan (1986)
Temperatuur waarop mensen overlijden	179	°C	Extrapolatie van gegevens Purser (2002)

Uit de literatuur blijkt dat letsel afhankelijk is van de blootstellingsduur. In de literatuur van Purser (2002) en Lemaire et al. (2002) is de maximale toelaatbare blootstellingsduur, zodra personen bezwijken aan te hoge temperaturen, besproken. In bijlage I is een vergelijking gemaakt van lineaire en exponentiële extrapolatie op basis van de gegevens uit Purser (2002) en Lemaire et al. (2002). De gegevens van Purser geven ook voor de tolerantietijd boven de 150 graden Celsius een duidelijk beeld. Daarom zijn de gegevens van Purser (2002), uit tabel 4 paragraaf 2.4.1, gekozen om de maximale blootstellingsduur per tijdsinterval te berekenen. Door deze gegevens te extrapoleren kan voor een tijdsduur van 1800 seconden de maximale toelaatbare blootstellingsduur worden bepaald. Voor het model wordt aangenomen dat alle categorieën zich exponentieel verhouden volgens de formule:

vergelijking 16: standaard exponentiële vergelijking

$$y = a \times e^{(b \times x)}$$

Waarin

a	Constante
b	Constante
x	Tijdsduur in seconden

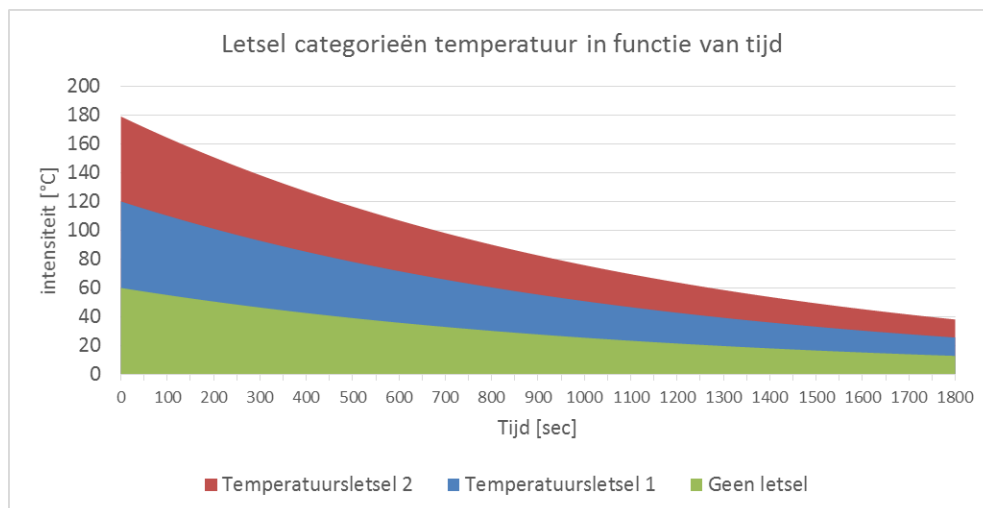
Voor te hoge temperatuur zijn de volgende constante berekent:

a	179 °C
b	-0.00086

Voor deze formule geldt een determinatiecoëfficiënt (R^2) van 0.9962

Het determinatiecoëfficiënt is het kwadraat van een correlatiecoëfficiënt en kan liggen tussen de waarde 0 en 1. Deze geeft aan welk oppervlak of percentage overeenstemt met de gegeven waarden. Als het determinatiecoëfficiënt 1 bedraagt is er een perfecte overeenstemming ofwel correlatie.

Afhankelijk van de ingevoerde waarde kan de maximale toelaatbare blootstelling grafisch worden weergegeven. De onderstaande grafiek gebruikt de parameters uit tabel 10. Zodra de intensiteit boven de categorie 'temperatuursletsel 2' uitkomt, overlijden deze personen.



figuur 19: Letselcategorieën temperatuur in functie tijd²

Straling

Uit de literatuur blijkt dat een te hoge 'dosis' straling brandwonden kan veroorzaken. Afhankelijk van de diepte en kleur van de wond zijn verschillende gradaties af te leiden, welke internationaal en algemeen bekend zijn. Het letsel dat men op kan lopen ten gevolge van straling zijn eerste, tweede en derdegraads brandwonden. Om de maximale stralingsdosis te berekenen zijn voor de verschillende gradaties brandwonden 'probitfuncties' voorgesteld.

Eerstegraads brandwonden:	$\text{Probit} = -39,83 + 3,0186 \cdot \ln(t \cdot q^{4/3})$
Tweede en derdegraads brandwonden:	$\text{Probit} = -43,14 + 3,0186 \cdot \ln(t \cdot q^{4/3})$
Letaal:	$\text{Probit} = -36,38 + 2,5600 \cdot \ln(t \cdot q^{4/3})$

Waarin

t	Blootstellingsduur in seconden
q	Stralingsflux

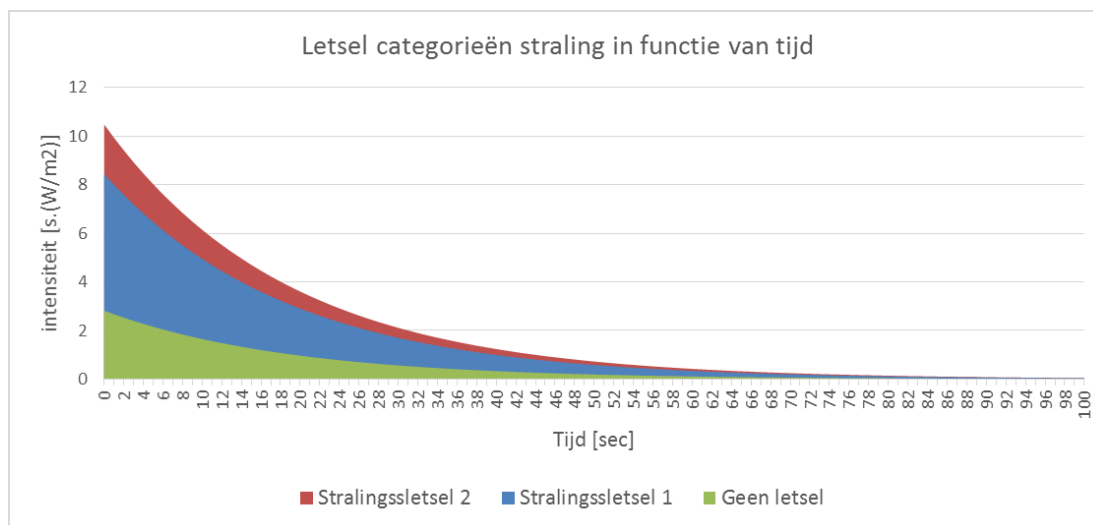
Vervolgens kan voor de bovenstaande 'probitfuncties' een LC-waarde worden vastgesteld, waardoor het percentage van de populatie dat op het letsel reageert kan worden berekend. Deze LC-waarde is variabel zodat deze door de gebruiker kan worden aangepast. Elk van de voorgestelde 'probitfuncties' zijn ondergrenzen. Zodra een gemiddelde of maximale 'dosis' te hoge straling de ondergrens van de bijvoorbeeld eerstegraads brandwonden overschrijdt, wordt deze persoon of groep ingedeeld bij de categorie eerstegraads brandwonden. Om de maximale 'dosis' straling over tijd te bepalen zijn de gegevens van Purser (2002) geëxtrapoleerd, zie tabel 4 uit paragraaf 2.4.1. De gegevens worden geëxtrapoleerd over een tijdsduur van 1800 seconden, gegeven de ondergrenzen die voortkomen uit de 'probitfuncties' hierboven. In bijlage I is een vergelijking gemaakt van lineair en exponentiële extrapolatie op basis van de gegevens uit Purser (2002). Voor het model wordt aangenomen dat alle categorieën zich exponentieel verhouden volgens de standaard exponentiële vergelijking, welke is weergegeven in vergelijking 16. Voor straling zijn de volgende constante berekend:

a	12.4 kW*m ² /s
b	-0.05332

Voor deze formule geldt een determinatiecoëfficiënt (R²) van 1.0

² NB. Door de aanname van de exponentiële vergelijking wordt nu de suggestie nu gewekt dat bij een tijdsduur van 1800 seconden en een temperatuur van 40 graden Celsius de mensen komen te overlijden. Dit is in werkelijkheid niet zo.

Afhankelijk van de ingevoerde waarde kan de maximale toelaatbare blootstelling ten aanzien van straling grafisch worden weergegeven. De waarden zijn gebaseerd op de 'probitfuncties' bij een LC van 50%. Merk op dat boven categorie stralingsletsel 2 de personen komen te overlijden.



figuur 20: Letselcategorieën straling in functie tijd

Concentratie CO

In de literatuur zijn de effecten van blootstelling aan CO weergegeven, zie tabel 2. In de gevonden literatuur is geen onderverdeling gemaakt in categorieën of definities van CO-letsel. Voor CO is alleen een probit relatie gevonden die ontwikkeld is om dodelijke slachtoffers te bepalen. Hierdoor is het lastig om gewonden ten gevolge van te hoge concentratie CO te categoriseren. Daarom is in het model voor gekozen om variabele ondergrenzen voor CO toe te passen, zoals bij hoge temperaturen. In het model wordt voor CO drie categorieën opgesteld, zie tabel 11.

tabel 11: Ondergrenzen van te hoge concentratie CO

Categorie	Invoer- waarde	Eenheid	Opmerking
CO-letsel 1	703	ppm	Extrapolatie van gegevens AEGL-2
CO-letsel 2	2862	ppm	Extrapolatie van gegevens AEGL-3
CO waarop mensen overlijden	9463	ppm	Extrapolatie van gegevens Purser (2002)

Voor CO zijn minimale toelaatbare blootstellingsduur door AEGL beschreven en maximale toelaatbare blootstellingsduur door Purser (2002) gegeven. Om per categorie de minimale en maximale blootstellingsduur te bepalen zijn de gegevens van AEGL en Purser (2002) geëxtrapoleerd, zie tabel 5 uit paragraaf 2.4.3. Deze gegevens zijn wederom geëxtrapoleerd voor een tijdsduur van 1800 seconden. Voor het model wordt aangenomen dat alle categorieën zich exponentieel verhouden volgens de standaard exponentiële vergelijking, welke is weergegeven in vergelijking 16. Voor de minimale blootstellingsduur zijn de volgende constante berekend:

- a 703 ppm
b -0.00086

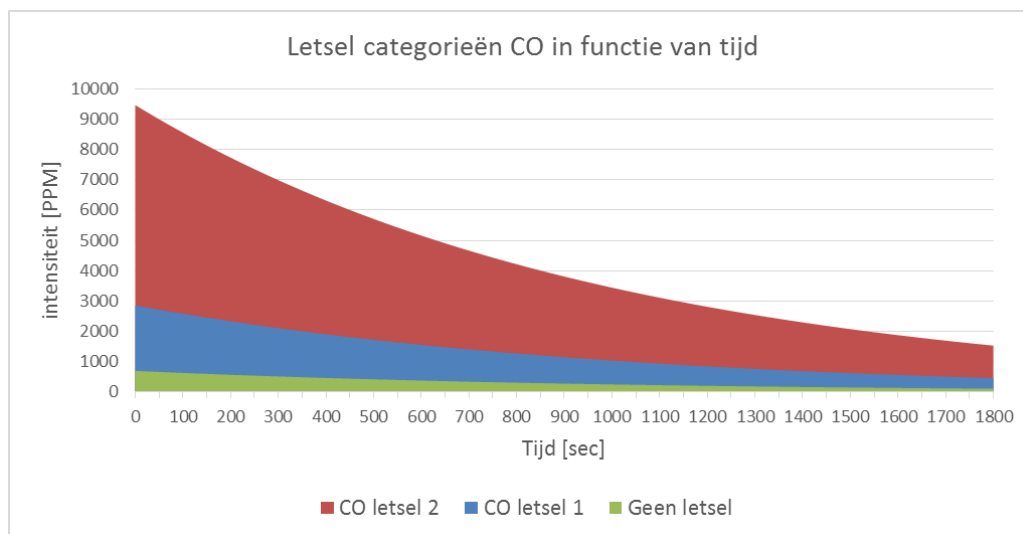
Voor deze formule geldt een determinatiecoëfficiënt (R^2) van 1.0

Voor de maximale blootstellingsduur van CO zijn de volgende constante berekend:

- a 9463 ppm
b -0.00101

Voor deze formule geldt een determinatiecoëfficiënt (R^2) van 1.0

Afhankelijk van de ingevoerde waarde kan de maximale toelaatbare blootstelling ten aanzien van CO grafisch worden weergegeven. De volgende grafiek gebruikt de parameters uit tabel 11. Merk op dat boven categorie CO-letsel 2 de personen komen te overlijden.



figuur 21: Letselcategorieën CO in functie tijd

3.4.3 Aantal gewonden

Het aantal gewonden ten gevolgen van een tunnelbrand wordt bepaald aan de hand van de op dat moment aanwezige personen in de tunnel, het vluchtproces dat de personen ondervinden en de totale tijdsduur hoelang ze aan de effecten van temperatuur, straling en CO worden blootgesteld. Deze worden hieronder nader toegelicht.

Personendichtheid

Het aantal aanwezige personen tijdens een calamiteit is afhankelijk van wel of geen file in de tunnel. Deze file kan zich opbouwen voor het incident, ook wel 'file bovenstrooms' genoemd. Daarnaast kan buiten de tunnel het verkeer vaststaan, waarbij de staart van de file de tunnel ingroeit, ook wel 'file benedenstrooms'. Het model bepaald aan de hand van bestaande formules uit de QRA-tunnels de lengte en tijdsduur van het opbouwen van zowel benedenstroomse als bovenstroomse file, zie bijlage G. Vervolgens kunnen de dichtheden voor zowel rijdend als stilstaand verkeer in de file worden bepaald. Afhankelijk van de intensiteit, lengte, toegestane snelheid en inzittende van zowel auto's, bussen als vrachtauto's wordt de gemiddelde personendichtheid per gegeven interval in de tunnel berekend. Hierbij worden de voertuigen en personen uniform verdeeld over de tunnelbuis. Voor elke afstand kan zo worden berekend hoeveel personen zich op een gegeven locatie bevinden.

Vluchtproces

Afhankelijk waar de personen zich in de tunnel bevinden, en eventueel hinder ondervinden ten gevolge van rook, wordt het vluchtproces voor deze personen geschat. Uit de literatuur van Kobes (2010) blijkt dat het vluchtproces globaal in drie fases kan worden onderverdeeld:

- *Bewustwording*
- *Besluitvorming*
- *Ontvluchting*

Elke fase ondergaat een bepaalde tijd, waardoor het risico op letsel groter wordt. In de fase 'bewustwording' worden de gevaren herkend. Het model gebruikt een modellering die wordt voorgesteld in de QRA-tunnels. Hierin wordt het tijdstip bepaald waarop de aanwezigen zelf het gevaar bespeuren. Deze modellering is afgeleid van CFD-resultaten, zie bijlage E.

vergelijking 17: 'zelfredzaamheid' bepalen benedenstrooms

$$T_{zelfL5}(x) = para_{zichtL5} \times x + parab_{zichtL5}$$

vergelijking 18: 'zelfredzaamheid' bepalen bovenstrooms

$$T_{zelfL2}(x) = para_{zichtL2} \times x + parab_{zichtL2}$$

Waarin

$T_{zelfL5}(x)$	Tijdstip waarop aanwezigen benedenstrooms zelf gevaar bespeuren [min]
$T_{zelfL2}(x)$	Tijdstip waarop aanwezigen bovenstrooms zelf gevaar bespeuren [min]
x	Afstand van de brand
Overige parameters zijn ontleend aan tabel 21 uit bijlage E	

Afhankelijk van de locatie en tijd zullen de effecten van temperatuur, straling en CO in de tunnel gevaarlijker zijn voor de aanwezige personen.

In de fase 'besluitvorming' worden de signalen beoordeeld en vinden de eerste reacties plaats. Zodra de aanwezigen in de auto zelf gevaar bespeuren wordt aangenomen dat ze uitstappen. Deze parameters zijn als gemiddelde variabelen in het model verwerkt, daardoor is deze door de gebruiker handmatig aan te passen. Deze parameters is ook terug te vinden in de QRA-tunnels, waar tevens een defaultwaarde wordt voorgesteld van 0.2 minuten. Hiermee is in de QRA tunnels geen rekening gehouden met het volledig ontruimen van een bus. Dit betekent dat de gevaarsaspecten groter kunnen zijn voor degenen die als laatste uitstappen.

In de laatste fase 'ontvluchting' staat de verplaatsing naar een veilige plaats centraal. Uit onderzoek van Bouwdienst Rijkswaterstaat (2002) en Jin (2002) blijkt dat de blootgestelde personen in de tunnel hinder kunnen ondervinden door de rook die vrijkomt bij een brand. Naarmate de rookdichtheid toeneemt wordt de loopsnelheid beïnvloed. Het moment en afstand waarop personen hinder ondervinden wordt in het model bepaald aan de hand van een formule uit de QRA-tunnels. Deze formule is gemodelleerd en afgeleid uit CFD-resultaten, zie bijlage E. Het tijdstip waarop aanwezigen hinder ondervinden wordt aangenomen dat dit gebeurt bij een extinctiefactor van 0.4/m. Uit de curve van figuur 10 blijkt dat rond deze extinctiefactor een omslagpunt bereikt is dat voor irriterende rook een lagere loopsnelheid geldt. Afhankelijk of de aanwezigen wel of geen hinder ondervinden is de loopsnelheid verschillend. De loopsnelheid in of zonder rook kan door de gebruiker handmatig worden aangepast in de parameters, bijlage G. Rijkswaterstaat (2012) beschrijft de volgende formules:

vergelijking 19: hinder bepalen benedenstrooms

$$T_{hinderL5}(x) = para_{hinderL5} \times x + parab_{hinderL5}$$

vergelijking 20: hinder bepalen bovenstrooms

$$T_{hinderL2}(x) = para_{hinderL2} \times x + parab_{hinderL2}$$

Waarin

$T_{hinderL5}(x)$	Tijdstip waarop aanwezigen benedenstrooms hinder ondervinden [min]
$T_{hinderL2}(x)$	Tijdstip waarop aanwezigen bovenstrooms hinder ondervinden [min]
x	Afstand van de brand
Overige parameters zijn ontleend aan tabel 20 uit bijlage E	

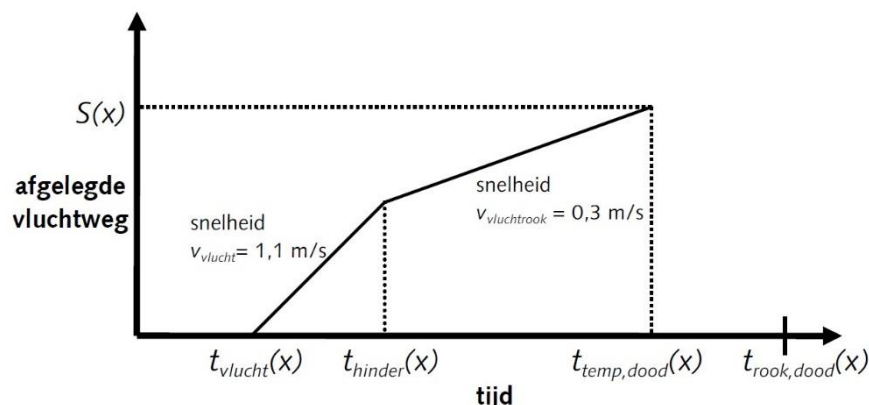
Met een functiebeperking wordt in dit model geen rekening gehouden. Alleen voor straling wordt de populatie van een groep bepaald.

Blootstellingsduur

Nu het aantal personen, ofwel personendichtheid, in de tunnel per locatie en het vluchtproces is bepaald, kan voor deze personen de totale blootstellingsduur per persoon of groep worden vastgesteld. De blootstellingsduur per persoon wordt berekend door het moment dat de personen uit een voertuig stappen en gevlucht zijn naar een veilige plek. Met een veilige plek worden de vluchtdeuren of de in- en uitgang van de tunnel bedoeld. Afhankelijk waar de blootgestelde personen zich bevinden in de tunnel kunnen ze vluchten naar een linker of rechter vluchtdeur. Het model gaat er vanuit dat deze personen

altijd naar de vluchtdoor met de kortste afstand vluchten. Dit kan dus betekenen dat deze personen naar het incident toelopen, waarbij de effecten van temperatuur, straling en CO gevaarlijker zijn.

Het model maakt gebruik van het verloop van de vlucht in de tijd uit de QRA-tunnels, zie figuur 22.



figuur 22: Verloop van de vlucht in de tijd (Rijkswaterstaat, 2012)

Waarin

$S(x)$	Maximaal mogelijke vluchtafstand
$t_{vlucht}(x)$	Tijdstip waarop een persoon op plaats x begint met vluchten
$t_{hinder}(x)$	Tijdstip waarop de vluchtsnelheid van een persoon op plaats x wordt verlaagd
$t_{temp,dood}(x)$	Tijdstip waarop een persoon bezwijkt aan hoge temperaturen op plaats x
$t_{rook,dood}(x)$	Tijdstip waarop een persoon bezwijkt aan rookgassen op plaats x
V_{vlucht}	Gemiddelde vluchtsnelheid in m/s in een rookvrije omgeving
$V_{vluchtrook}$	Gemiddelde vluchtsnelheid in m/s in rook

Als de personen worden gehinderd door rook doen ze langer over hun vluchtweg, zie vergelijking 19 en vergelijking 20. Hierdoor neemt de totale blootstellingsduur toe. De gemiddelde vluchtsnelheid in rook en een rookvrije omgeving kan in het model handmatig worden aangepast. Vanuit de Europese en Nederlandse wetgeving is het tegenwoordig verplicht dat er minimaal om de 250 meter een veilige ruimte is om naar toe te vluchten. Daarom is het model een maximale vluchtdoor afstand aangenomen van 250 meter.

3.5 Risico evaluatie

De output van het model wordt gegeven in het groepsrisico die grafisch wordt gerepresenteerd in een FN-curve. Voor elk scenario worden de gevolgen in het aantal gewonden per letselcategorie weergegeven. De kansen en gevolgen zijn vervolgens bepaald om op basis daarvan een FN-curve op te stellen. Voor elk effect van zowel temperatuur, straling als CO wordt een FN-curve gegenereerd. Hierbij is onderscheid gemaakt in gemiddelde 'dosis' en maximale 'dosis'. Dit betekent dat drie FN-curves op basis van gemiddelde 'dosis' en drie FN-curves op basis van maximale 'dosis' worden opgebouwd.

Interpretatie grafieken

Beide combinatie van drie grafieken moeten onafhankelijk van elkaar worden bekeken. Van het totaal aantal blootgestelde personen zijn een aantal personen die stralings- CO- en temperatuursletsel ondervinden. Het is dus mogelijk dat één persoon meerdere soorten letsel ondervindt ten gevolge van de verschillende effecten. Omdat in dit onderzoek alleen de gevolgen van brand zijn meegenomen zullen de werkelijke kansen van het letsel en dodelijke slachtoffers die nu gemodelleerd worden lager uitvallen. Om deze 'dubbeltelling' te voorkomen zou per effect en per letselcategorie nader gekeken moeten worden hoe deze verdeling beter kan worden onderverdeeld in de letselcategorieën.

4. Casestudies

4.1 Inleiding

Tunnelbranden zijn (gelukkig) een zeldzaam fenomeen. Daarnaast vinden deze branden onregelmatig plaats en er is slechts voor enkele tunnels data voorhanden. Daardoor zijn de werkelijke effecten moeilijk te voorspellen. In dit hoofdstuk worden voor verificatie drie catastrofale tunnelbranden uitgelicht en ingevoerd in het voorgestelde model. Deze betreffen de tunnelbranden uit 1999 in de Mont Blanc tunnel en Tauerntunnel en Viamala tunnelbrand uit 2006. De reden dat voor deze drie casestudies is gekozen zijn het grote aantal dodelijke slachtoffers en gewonden. Daarnaast is de Viamalatunnel ongeveer 750 meter lang dat binnen het bereik van het model valt. Door het uitvoeren van deze drie casestudies kan de tweede deelvraag van de tweede onderzoeksvraag worden beantwoord.

2.2 Welke eventuele knelpunten bevinden zich in het voorgestelde model die resulteren uit de casestudies.

Hieronder zullen de casestudies worden behandeld. In elke casestudie wordt eerst de achtergrond van de case gegeven en vervolgens de resultaten die voortkomen uit het model. De eerste casestudie die zal worden besproken is de Mont Blanc tunnel in Frankrijk. Daarna zal gekeken worden naar de Tauerntunnel in Oostenrijk. vervolgens wordt een casestudie over de Viamalatunnel in Zwitserland worden bestudeerd. Tenslotte wordt er een conclusie getrokken van de eventuele knelpunten die voortkomen uit de uitkomsten van de drie casestudies.

4.2 Mont Blanc tunnel (1999)

4.2.1 Achtergrond

Sinds de opening van de Mont Blanc tunnel in 1965 maakt deze tunnel de verbinding mogelijk tussen Frankrijk en Italië. Deze autotunnel is 11,6 km lang en 8,60 m breed. Deze tunnel bevatte één enkele tunnelbuis met tweerichtingsverkeer elk één rijbaan. De ingang, aan de Franse zijde, is 1274 m lang. De Italiaanse zijde is 1381 m lang. Op elke 300 m ligt een parkeergelegenheid welke is afgewisseld voor beide richtingen. Tegenover elke parkeerplaats is een keerplek voor vrachtwagens gecreëerd. Op het gebied van veiligheidsvoorzieningen zijn er om de 100 m brandalarmknoppen, een telefoon, en twee brandblussers geplaatst. Deze zijn gebouwd in veiligheidsnissen. Eén op de twee parkeerplekken is voorzien van een schuilplaats met externe luchttoevoer en een brandwerende wand met een bestendigheid van 2 uur. De Mont Blanc tunnel heeft geen vluchttunnel. Vanuit de service stations kan de ventilatie geregeld worden. Het ventilatiesysteem bestaat uit 4 luchttoevoerbuisen onder het wegdek met blaasroosters om de 10 m, een zogenoemd 'dwarsventilatiesysteem'. Daarnaast is er één groot afvoerkanal om rook en verbrandingsgassen af te voeren.

Uit het rapport van Duffé & Marec (1999) blijkt dat op 24 maart 1999 is in het midden van deze tunnel een vrachtwagen in brand gevlogen. De vrachtwagen was geladen met gekoelde margarine meel, en was vooraf bij een weging niet te zwaar bevonden. Uit het onderzoeksrapport komt naar voren dat waarschijnlijk oververhitting van motoren en turbines de oorzaak van de brand is. Dit zou veroorzaakt zijn door de lange en steile toegangsweg naar de tunnelingang. Het tunnelpersoneel zou door communicatieproblemen te laat en onjuist hebben gehandeld waardoor de situatie verergerde. Mede hierdoor is alleen vanuit de Italiaanse tunnelzijde verse lucht ingezogen. Hierdoor is een langsventilatie ontstaan. De personen die zich 'bovenstrooms' van de brand bevinden zijn normaliter 'veilig', omdat de rook doorgaans van deze personen wordt afgeblazen. In deze situatie is de rook juist naar deze personen toe geblazen. Het maximum brandvermogen wordt geschat op 180 MW met een gemiddelde van 75 MW tot 100 MW (PIARC, 2006).

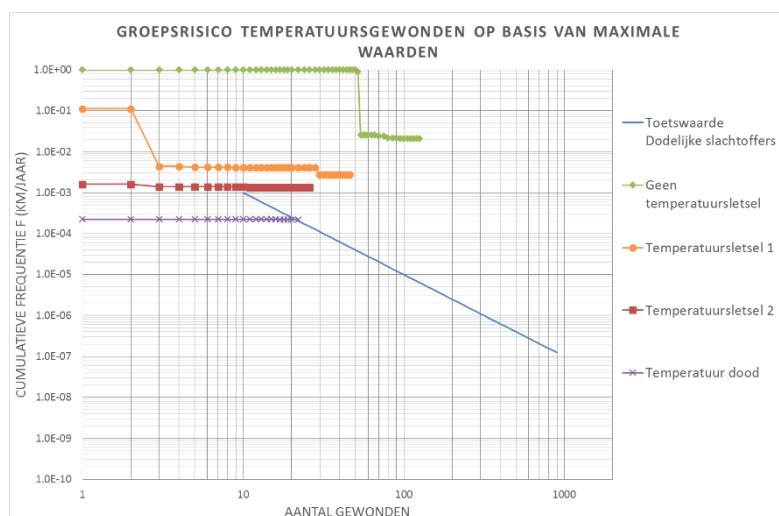
Volgens het rapport van PIARC (2006) zijn, voordat de tunnel gesloten werd, 29 voertuigen (waarvan 19 vrachtauto's, 9 auto's, 1 pick-up en 1 motor) de tunnel binnengekomen aan de Franse zijde. Vier van de vrachtauto's hebben de vrachtwagen die in brand stond gepasseerd. De andere 25 voertuigen zijn opgesloten door de rook en vlogen later in brand. Tegelijkertijd hebben aan de Italiaanse zijde ook voertuigen de tunnel betreden. Het is niet precies duidelijk hoeveel voertuigen dat waren omdat sommige voertuigen ook de brandende vrachtauto passeerden en ontsnapten. Wel is bekend dat acht

vrachtauto's en een paar personenauto's die via de Italiaanse kant naar binnen zijn gegaan zijn gestopt voor de brand, omdat zij de rook voor zich zagen. De personenauto's waren in staat om een U-bocht te nemen en de tunnel te ontvluchten. De acht vrachtauto's die hierin niet in staat waren vlogen later in brand.

De slachtoffers die zijn omgekomen zijn volgens PIARC (2006) gevonden in of naast de voertuigen. De 38 personen die zich tijdens het begin van de brand in de tunnel bevonden zijn allen gedood. Hiervan zijn 27 personen in het voertuig gebleven, twee zochten toevlucht in een andere auto en negen werden gedood buiten hun voertuig. Van de negen die buiten de auto hun toevlucht zochten, zijn een motorrijder en een bestuurder dood gevonden in een schuilplaats vlak bij de brand. Van de 10 personenauto's die achter de brandende vrachtauto stonden hebben vier auto's geprobeerd om U-bochten te maken, maar werden praktisch geïmmobiliseerd bij het beginpunt. Het is niet precies duidelijk ten gevolge van welk letsel deze mensen om het leven zijn gekomen. In totaal zijn 39 mensen om het leven gekomen.

4.2.2 Resultaten

De parameters en onderbouwing die voor de Mont Blanc tunnel zijn ingevoerd zijn terug te vinden in bijlage J.1, *paragraaf input*. Op basis van deze inputgegevens worden de kansen gegenereerd die voortkomen uit de 'gebeurtenissenboom'. Vervolgens worden de gevolgen voor elke gebeurtenis berekend zoals beschreven is in hoofdstuk 3.4. De kansen en gevolgen in termen van totaal aantal blootgestelden en verschillende letselcategorieën voor zowel gemiddelde als maximale waarden staan gesommeerd in een tabel, zie bijlage J.1, *paragraaf output*. Hieruit blijkt dat voor de gebeurtenissen in de file 130 personen worden blootgesteld en voor de scenario's zonder file er 55 personen worden blootgesteld. In het onderstaande figuur is de FN-curve van temperatuur op basis van maximale waarde weergegeven. Overige FN-curves zijn terug te vinden in bijlage J.1, *paragraaf output*.



figuur 23: FN-curve temperatuur maximaal Mont Blanc tunnel

De FN-curves hierboven geven de gevolgen van elke van de 42 scenario's. De resultaten van alleen de Mont Blanc tunnelbrand zijn terug te vinden in de kansentabel, zie bijlage J.1, *paragraaf output*. Hieronder is alleen het scenario van de Mont Blanc tunnelbrand uitgewerkt.

In de Mont Blanc tunnel zijn door een grote brand 39 personen om het leven gekomen. Alhoewel de brand is ontstaan door een normale vrachtauto en niet door een tankwagen liepen de temperaturen en het brandvermogen toch hoog op. Tijdens de brand ontstond achter de brand een file. Doordat de rook de verkeerde kant werd opgeblazen kan dit gezien worden als een 'file benedenstrooms' van de brand. Daarom wordt in het voorgesteld model het scenario van de Mont Blanc brand als volgt geschetst: Er is 'file benedenstrooms', doordat de brand zo hevig is rekening gehouden met een brand van 200 MW met 'ventilatie' (G19). Hierbij worden totaal 130 mensen blootgesteld, zie tabel 12 en tabel 13. In 'Scenario' wordt het afgekorte scenario getoond, in dit geval G19. In 'Kansen' wordt de kans voor het betreffende scenario weergegeven. In 'Totaal aantal blootgestelden' worden het totaal aantal slachtoffers getoond die op het gegeven scenario aanwezig zijn in de tunnel. Deze 'Totaal aantal blootgestelden' worden

vervolgens door de gevolgberoekeningen verdeelt over de verschillende letselcategorieën gerangschikt per effect.

Uit tabel 12 valt op te merken dat er van de 130 blootgestelde personen: 60 geen 'CO-letsel', 46 'CO-letsel 1' en 24 'CO-letsel 2' ondervinden. Als gekeken wordt naar de categorie temperatuursletsel valt op dat er 18 personen komen te overlijden aan de gevolgen van te hoge temperatuur. Als gekeken wordt naar tabel 13, de maximale dosis, zijn er zelfs 25 slachtoffers die omkomen door te hoge temperatuur. Het voorgesteld model kwantificeert geen dodelijke slachtoffers door CO-letsel. In de Mont Blanc tunnel zijn totaal 39 omgekomen en is het vermoeden dat de meeste mensen zijn overleden aan immobiliteit door toxische stoffen. Het voorgesteld model geeft bij deze casestudy een onderschatting van het aantal dodelijke slachtoffers.

tabel 12: Mont Blanc scenario gewonden voor verschillende en gemiddelde dosis

			Waarden op basis van gemiddelde dosis											
			Gewonden ten aanzien van CO-letsel				Gewonden ten aanzien van stralingsletsel				Gewonden ten aanzien van temperatuursletsel			
Scenario	Kansen	Totaal aantal blootgesteld	Geen CO-letsel	CO-letsel 1	CO-letsel 2	CO dood	Geen stralingsletsel	Stralingsletsel 1	Stralingsletsel 2	Straling dood	Geen temperatuursletsel	Temperatuursletsel 1	Temperatuursletsel 2	Temperatuur dood
G19	0.0002195	130	60	46	24	0	123	5	0	2	102	4	6	18

tabel 13: Mont Blanc scenario gewonden voor verschillende en maximale dosis

Scenario			Waarden op basis van maximale dosis											
			Gewonden ten aanzien van CO-letsel				Gewonden ten aanzien van stralingsletsel				Gewonden ten aanzien van temperatuursletsel			
			Geen CO-letsel	CO-letsel 1	CO-letsel 2	CO dood	Geen stralingsletsel	Stralingsletsel 1	Stralingsletsel 2	Straling dood	Geen temperatuursletsel	Temperatuursletsel 1	Temperatuursletsel 2	Temperatuur dood
G19	0.0002195	130	49	16	65	0	119	5	1	5	97	5	3	25

4.3 Tauerntunnel (1999)

4.3.1 Achtergrond

In Oostenrijk bevindt zich de Tauerntunnel. Deze tunnel is in 1975 in gebruik gegaan en is 6,4 km lang en ligt 1300 m boven zeeniveau. De tunnel heeft één tunnelbuis met tweerichtingsverkeer. De tunnel bevindt zich tussen Salsburg en Klagenfurt. In de tunnel is een semi-dwarsventilatiesysteem dat zorgt voor aanvoer van frisse lucht en eventueel afvoer van schadelijke rookgassen. Dit systeem bevindt zich boven in de tunnelbuis. Aan de beide uiteinden van de tunnel zijn ventilatiegebouwen. Dwars door de 600 m lange berg is halverwege de tunnel een schacht naar boven gemaakt, welke ook voor ventilatie wordt gebruikt. Daarnaast bevinden zich om de 212 meter nissen waar personen naar toe kunnen

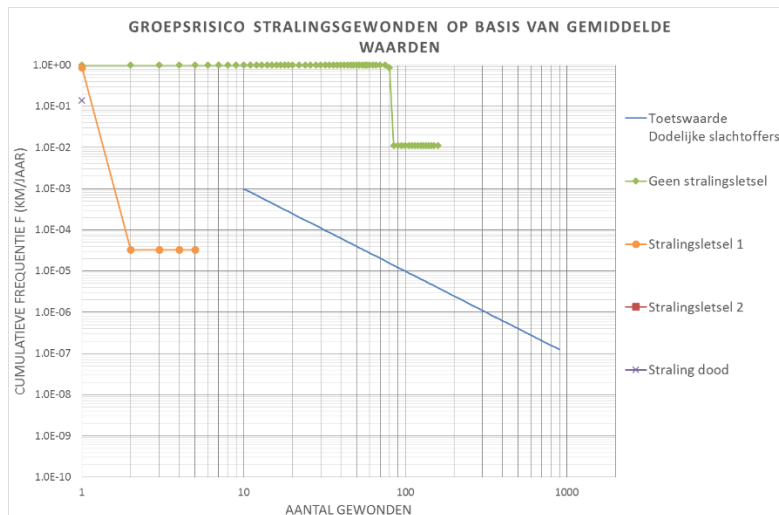
vluchten. Oorspronkelijk was een tweede tunnelbuis gepland, maar deze was tot aan de tunnelbrand in 1999 nog niet geboord.

Op 29 mei 1999 breekt er op 800 m van de noordelijke ingang van de tunnel een grote brand uit. De oorzaak was een kettingbotsing tussen 60 voertuigen. De kettingbotsing ontstond doordat een vrachtwagen inreed op een stilstaande file. Deze file was ontstaan doordat een verkeerslicht op ongeveer 600 m van de noordingang op rood stond t.g.v. werkzaamheden. De vrachtwagen die de botsing veroorzaakte raakte vier personenauto's en daarna een vrachtwagen. Deze vrachtwagen bevatte lading met brandbare verfspuitbussen. Hierdoor volgde er een eerste explosie, waarna een grote brand ontstond. De temperaturen kwamen boven de 1000 graden Celcius. Daarnaast was er grote rookontwikkeling. Door directe signalering en handelen van het tunnelpersoneel werd de ventilatie aangepast naar de situatie brand. 80 personen konden voor deze brand vluchten. Vervolgens ontstond er een tweede explosie waarbij meer hitte en rook vrij kwam. Hierdoor is het ventilatiesysteem uitgevallen. In totaal zijn 12 mensen bij de brand omgekomen daarnaast raakte 40 personen gewond (PIARC, 2013).

Volgens PIARC (2006) waren tijdens het ongeluk ongeveer 140 voertuigen in de tunnel. Na het ontstaan van de brand reden ongeveer nog 70 voertuigen de tunnel binnen, maar deze stopte vroegtijdig waardoor deze niet dicht bij de brandzone zijn gekomen. 170 voertuigen hebben de tunnel tijdig kunnen verlaten. De brand start met twee vrachtauto's en vier auto's en breidde zich uit naar in totaal 24 personenauto's en 16 vrachtauto's die in brand vlogen. Het maximaal brandvermogen van deze brand is geschat op 120 MW. Naast de voertuigen is ook het gedrag van de betrokken personen beschreven in het rapport van PIARC (2006). In totaal hebben 80 personen, te voet of aan boord in een voertuig, de tunnel kunnen verlaten. Drie personen vluchtten naar een nis 700 meter van de brand af. Door de dichte rook in de tunnel konden ze deze nis niet meer verlaten. Brandweerlieden hebben deze drie personen gered. Door onderzoek is vastgesteld dat acht mensen door de kracht van de aanrijding zijn omgekomen. Vier personen zijn door de brand om het leven gekomen. Drie van deze vier personen zijn gevonden in een voertuig 100 meter van de brand. Uit onderzoek is gebleken dat het voertuig toebehoorde aan twee van de personen. Ondanks dat vele andere personen om hen heen wel vluchtten zijn zij om wat voor reden niet gevlucht voor de brand. Een derde persoon is blijkbaar gevlucht van zijn eigen voertuig en probeerde vervolgens terug te keren naar zijn voertuig om naar een aantal documenten te zoeken. Daarna vluchtte deze persoon naar de auto met de andere twee personen erin en stief later met hen in de auto. Het laatste slachtoffer is gevonden in de tunnelbuis 800 meter van de brand. Wellicht is deze persoon gestikt door de rook in de tunnel toen hij probeerde te vluchten uit een veiligheidsnis (PIARC, 2006).

4.3.2 Resultaten

De invoerparameters van de Tauerntunnel staan in bijlage J.2, *paragraaf input*. De kansen die voortkomen uit de 'gebeurtenissenboom' en gevolgen in termen van de vooraf gestelde letselcategorieën staan gesommeerd een in een tabel, zie bijlage J.2, *paragraaf output*. In deze paragraaf staan ook de overige FN-Curves. Het totaal aantal blootgestelde personen tijdens een benedenstroomse file is berekend op 178 personen. Zodra geen benedenstroomse file staat wordt aangenomen dat 88 personen worden blootgesteld. In het onderstaande figuur wordt een voorbeeld gegeven van de geplote FN-Curve voor de straling op basis van gemiddelde waarden. Overige FN-curves zijn terug te vinden in bijlage J.2, *paragraaf output*.



figuur 24: FN-curve straling gemiddeld Tauerntunnel

Het scenario dat in de Tauerntunnel afspeelde kan worden omschreven als een situatie waarbij ‘file benedenstrooms’ staat, een vrachtwagen die in brand vloog (100MW) en geen ventilatie. In de kansentabel komt dit scenario overeen met G11. Als specifiek naar dit scenario van de Tauerntunnel wordt gekeken, valt op dat wederom meer personen in de tunnel zijn dan dat het model inschat. PIARC (2006) stelt dat totaal 83 personen probeerde te vluchten en vier personen zijn gedood door de brand. Het specifieke scenario van de Tauerntunnel wordt weergegeven in tabel 14 en tabel 15. Daaruit blijkt dat als gekeken wordt naar maximale dosis van straling van de 178 blootgestelde personen: 170 personen geen ‘stralingsletsel’, twee personen ‘stralingsletsel 1’ en twee personen ‘Stralingsletsel 2’ ondervinden. Daarnaast zijn er volgens het model vier dodelijke slachtoffers. Als gekeken wordt naar het aantal personen dat wordt blootgesteld geeft het voorgesteld model een overschatting. De vier dodelijke slachtoffers schat het model, als gekeken wordt naar maximale waarden, goed in.

tabel 14: Tauerntunnel scenario gewonden voor verschillende en gemiddelde dosis

			Waarden op basis van gemiddelde dosis											
			Gewonden ten aanzien van CO-letsel				Gewonden ten aanzien van stralingsletsel				Gewonden ten aanzien van temperatuursletsel			
Scenario	Kansen	Totaal aantal blootgestelden	Geen CO-letsel	CO-letsel 1	CO-letsel 2	CO dood	Geen stralingsletsel	Stralingsletsel 1	Stralingsletsel 2	Straling dood	Geen temperatuursletsel	Temperatuursletsel 1	Temperatuursletsel 2	Temperatuur dood
G11	0.0003014	178	178	0	0	0	178	0	0	0	167	11	0	0

tabel 15: Tauerntunnel scenario gewonden voor verschillende en maximale dosis

Scenario	Kansen	Totaal aantal blootgesteld	Waarden op basis van maximale dosis											
			Gewonden ten aanzien van CO-letsel				Gewonden ten aanzien van stralingsletsel				Gewonden ten aanzien van temperatuursletsel			
			Geen CO-letsel	CO-letsel 1	CO-letsel 2	CO dood	Geen stralingsletsel	Stralingsletsel 1	Stralingsletsel 2	Straling dood	Geen temperatuursletsel	Temperatuursletsel 1	Temperatuursletsel 2	Temperatuur dood
G11	0.0003013	178	171	7	0	0	170	2	2	4	167	2	9	0

4.4 Viamalatunnel (2006)

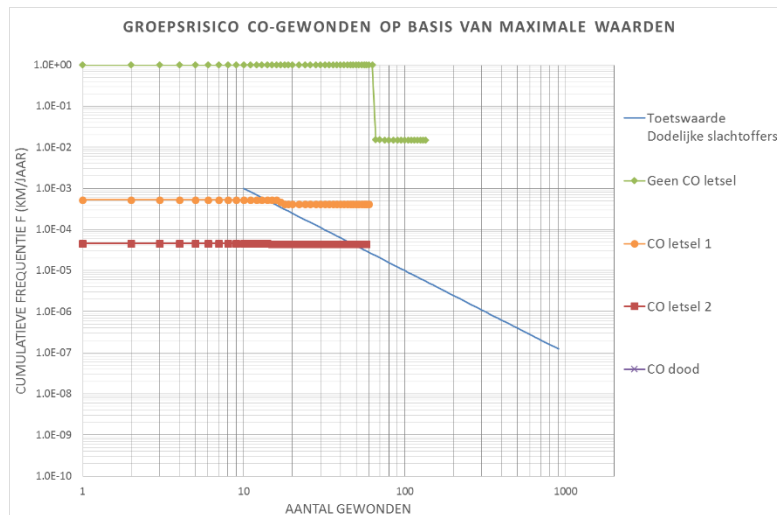
4.4.1 Achtergrond

Van de Viamalatunnel brand is relatief weinig informatie beschikbaar, enkel een korte beschrijving wordt gegeven (European Tunnel Assessment Programme, 2013), (PIARC, 2013) en (Zumsteg, Steinemann, & Berner, 2012). In december 1967 wordt de Viamalatunnel in gebruik genomen. Deze tunnel is 742 meter lang en bevindt zich door de rotsen van het noordelijke – naar het zuidelijke gedeelte van de kloof. Door de tunnel loopt de A13. Gemiddeld rijden er 8000 voertuigen per dag door de tunnel. De toegestane snelheid is 80 km/uur. Er is sprake van een langsventilatiesysteem. De tunnel bevat geen vluchtdeuren of nooduitgang. Er is sprake van verkeerslichten als waarschuwingssignalering.

Op 16 september 2006 vindt er een ernstig ongeval plaats in de Viamalatunnel. Rond 13.00 uur rijdt een touringcar met 24 leden van het ijshockeyteam in noordelijke richting frontaal op een personenauto uit tegengestelde richting. Waarschijnlijk verloor deze personenauto een autoband. Beide voertuigen vliegen nagenoeg direct in brand. Het incident deed zich 100-150 m voor de noordelijke ingang voor. De inzittenden zijn zelf uit de auto gekomen en hebben zichzelf via de noordelijke tunnelopening in veiligheid gebracht. Waarschijnlijk zijn er 4 à 5 explosies geweest. Hulpdiensten arriveerden 11 minuten nadat het alarm is afgegaan. In totaal zijn 9 dodelijke slachtoffers te betreuren en zes gewonden. Drie van de zes doden zijn buiten hun voertuigen op het wegdek gevonden. Twee andere doden zijn waarschijnlijk omgekomen, doordat ze anderen hielpen. Eén dodelijke slachtoffer overleed op weg naar de zuidelijke tunnelpoort. Door de hevige rookontwikkeling zijn de bergingswerkzaamheden belemmerd. Aan welk letsel deze personen gewond c.q. overleden zijn valt niet duidelijk op te maken uit de geraadpleegde literatuur.

4.4.1 Resultaten

In bijlage J.3, *paragraaf input* worden de inputparameters die gebruikt zijn voor de Viamala tunnel weergegeven. In bijlage J.3, *paragraaf output* worden de kansentabel en drie FN-curves op basis van gemiddelde waarden en die FN-curves op basis van maximale waarden weergegeven. Uit de kansentabel blijkt dat tijdens een benedenstroomse file totaal 140 personen kunnen worden blootgesteld. Voor situaties waarbij geen benedenstroomse file voordoet berekent het model totaal 69 blootgestelde personen. In het onderstaande figuur is de FN-curve van concentratie-CO op basis van maximale waarde weergegeven. Overige FN-curves zijn terug te vinden in bijlage J.3, *paragraaf output*.



figuur 25: FN-curve CO maximaal Viamalatunnel

Het specifieke scenario van de Viamalatunnel is een bus en een personen auto die in brand staan. Uitgaande dat dit een brand is van 50 MW, waarbij geen benedenstroomse file staat en wel 'langsventilatie' aanwezig is komt dit overeen met scenario G29 uit de kansentabel van het model. Doordat deze tunnel geen vluchtdeuren heeft worden personen langer blootgesteld aan de gevolgen van brand, zoals rook. De onderstaande tabellen geven een gedetailleerd beeld hoe de slachtoffers worden verdeeld van scenario G29.

tabel 16: Viamalatunnel scenario gewonden voor verschillende en gemiddelde dosis

Scenario	Kansen	Totaal aantal blootgestelden	Waarden op basis van gemiddelde dosis											
			Gewonden ten aanzien van CO-letsel				Gewonden ten aanzien van stralingsletsel				Gewonden ten aanzien van temperatuursletsel			
			Geen CO-letsel	CO-letsel 1	CO-letsel 2	CO dood	Geen stralingsletsel	Stralingsletsel 1	Stralingsletsel 2	Straling dood	Geen temperatuursletsel	Temperatuursletsel 1	Temperatuursletsel 2	Temperatuur dood
G29	0.03126	69	69	0	0	0	67	0	0	2	69	0	0	0

tabel 17: Viamalatunnel scenario gewonden voor verschillende en maximale dosis

			Waarden op basis van maximale dosis											
			Gewonden ten aanzien van CO-letsel				Gewonden ten aanzien van stralingsletsel				Gewonden ten aanzien van temperatuursletsel			
			Geen CO-letsel	CO-letsel 1	CO-letsel 2	CO dood	Geen stralingsletsel	Stralingsletsel 1	Stralingsletsel 2	Straling dood	Geen temperatuursletsel	Temperatuursletsel 1	Temperatuursletsel 2	Temperatuur dood
Scenario	Kansen	Totaal aantal blootgestelden	69	0	0	0	64	2	0	3	67	2	0	0

Er is weinig informatie te vinden hoeveel personen op het moment van het incident in de tunnel zijn. Het voorgesteld model gaat uit van 69 wat wellicht een overschatting is van de werkelijkheid. Uit tabel 17 blijkt dat drie personen komen te overlijden aan straling. Of de personen in de bus ook werkelijk aan straling zijn overleden valt niet op de maken. Wel is duidelijk dat er hevige rookontwikkeling in de tunnel was waardoor men kan verwachten dat er meer 'CO-letsel gewonden' zijn.

4.5 Conclusie

Brand in tunnels zijn zeldzame gebeurtenissen. Desalniettemin valt uit de drie beschreven casestudies op te maken dat de gevolgen in termen van gewonden en dodelijke slachtoffers enorm kunnen zijn. In de bovenstaande paragrafen zijn de gevolgen van de tunnelbranden Mont Blanc tunnel (1999), Tauerntunnel (1999) en Viamalatunnel (2006) bestudeerd en uitgewerkt in het voorgestelde model. Door het uitvoeren van deze casestudies wordt een verificatie slag gemaakt voor het voorgestelde model. In dit hoofdstuk staat de volgende onderzoeksvraag centraal:

2.2 Welke eventuele knelpunten bevinden zich in het voorgesteld model die resulteren uit de casestudies.

Vanuit de gegeven data uit de casestudies valt niet altijd duidelijk op te maken welk letsel de slachtoffers opliepen. Het werkelijk gedrag tijdens een tunnelbrand is immers lastig in te schatten. Dit wordt bevestigd uit de literatuur van o.a. Kobes (2010) die stelde al dat verder onderzoek naar het menselijk gedrag bij brand nodig is. Uit de resultaten van de casestudies blijkt in alle gevallen een 'lichte' overschatting wordt gemaakt van het aantal personen die op dat moment in de tunnel aanwezig zijn. Deze overschatting kan als aanvaardbaar worden gezien aangezien in deze situatie de hulpverlening beter is voorbereidt.

Verder blijkt dat het voorgestelde model op een aantal punten knelpunten vertoont: een onderschatting van het aantal dodelijke slachtoffers en bij alle drie de casestudies een te lage schatting van het aantal CO-letsel. Enerzijds kan dit komen doordat de data uit de casestudies niet afdoende is en dat dit incidentele gebeurtenissen zijn. Hierdoor kunnen aannames die gesteld zijn in de praktijk anders uitkomen. Een voorbeeld hiervan zijn de schuilmogelijkheden in de tunnel tijdens de casestudie van de Mont Blanc, waarbij twee personen overleden in de schuilkelder. Dat betekent dat deze "veilige" plek niet als veilig mocht worden beschouwd. Anderzijds is het mogelijk dat de aangenomen factoren c.q. formules in het model niet goed overeenkomen met de werkelijkheid uit de drie casestudies. Hieronder worden drie van deze factoren toegelicht die dit kunnen veroorzaken.

4.5.1 Locatie blootgestelde personen

Het is mogelijk dat de personen in het voorgestelde model wellicht niet goed uniform over de tunnel worden verspreidt als functie van tijd. In het model worden twee verschillende parameters gebruikt van de QRA om het aantal personen per meter in te schatten. Deze parameters zijn voor Nederlandse begrippen gevalideerd en worden in het model toegepast.

vergelijking 21: gemiddelde dichtheid bij rijdend verkeer

$$D_{rij} = \frac{(N_{vtg.s} \times I_{spitsuur})}{60 \times V_{vtg.s}}$$

vergelijking 22: gemiddelde dichtheid bij file

$$D_{file.s} = \frac{(N_{vtg.s} \times N_{filerij})}{L_{vtg.s}}$$

Waarin

Drij.s	Gemiddelde dichtheid, aantal personen per strekkende meter bij rijdend verkeer tijdens spits
Dfile.s	Gemiddelde dichtheid, aantal personen per strekkende meter bij file tijdens spits
Nvtg.s	Gemiddeld aantal personen in een voertuig tijdens spits
Ispitsuur	Verkeersintensiteit tijdens de spits
Vvtg.s	Gemiddelde snelheid van een voertuig in meters per minuut
Nfilerij	aantal rijstroken waarover een benedenstroomse file zich kan opbouwen in de tunnelbuis
Lvtg.s	Gemiddelde ruimtebeslag van een voertuig tijdens spits

In het voorgesteld model wordt gekeken waar het incident zich in de tunnel bevindt. Door een eerder gestelde aanname is dit altijd in het midden van de tunnel. Afhankelijk of achter het incident file staat in de tunnel wordt gerekend met de gemiddelde dichtheid bij file of bij rijdend verkeer. Op basis van deze waarden wordt het startpunt bepaald waar de blootgestelde personen zich bevinden. Vervolgens wordt per seconde bijgehouden en per interval (in aantal meters) waar deze personen zich bevinden en hoeveel 'dosis' de personen te verduren krijgen. Door deze benadering wordt het startpunt van de aanwezigen bepaald door zogenoemde ijkmomenten uit de QRA-tunnels. Deze ijkmomenten zijn statisch. Beter is het om de startpunt van de aanwezigen dynamisch als functie van tijd te laten verlopen.

4.5.2 Lage concentratie CO

Uit het voorgesteld model blijkt dat tijdens de brand in de Viamalatunnel er geen gewonden vallen ten gevolge van CO. Dit is opmerkelijk omdat er hevige rookontwikkeling plaatsvindt. Uit de afgeleide formule van het CFD-model, uitgevoerd voor de QRA-tunnels in bijlage E.2, komt naar voren dat de maximale concentratie CO met ventilatie bij een 50 MW brand (aangenomen brand bij de Viamalatunnel), gelijk is aan 663 ppm. Uit de extrapolatie van de AEGL-2 waarden, bijlage I, blijkt dat minimaal 703 ppm concentratie CO nodig is om in aanmerking te komen voor 'letselcategorie 1'. Dat betekent dat in dit geval nimmer gewonden en dodelijke slachtoffers vallen. Zelfs als een waarde van 100MW wordt aangenomen kan de maximale concentratie CO in de tunnel volgens de afgeleide CFD-resultaten nooit hoger kan oplopen dan 1817 ppm. Dit betekent dat de personen maximaal in 'letselcategorie 1' vallen. Door het uitvoeren van nieuwe casestudies, waarbij CFD-modellen worden gebruikt gericht op het inschatten van gewonden, is het mogelijk om vervolgens formules af te leiden. Deze kunnen zich, in tegenstelling tot de QRA-tunnels gericht zijn op dodelijke slachtoffers, richten op gewonden.

Daarnaast wordt de 'dosis' bepaald aan de hand van een maximale vlucht afstand van 250 meter. Tijdens de casestudies van Mont Blanc en Viamalatunnel zijn deze vluchtafstanden veel groter. Dat heeft als gevolg dat de personen die zich op dat moment in de tunnel bevinden langer worden blootgesteld aan de drie verschillen soorten effecten. Langere blootstellingsduur resulteert indirect in een hogere 'dosis' met als gevolg dat het letsel zwaarder kan uitvallen. Bovendien wordt momenteel een vaste, variabele, uitstaptijd gerekend. Deze uitstaptijd is gebaseerd op een gemiddelde uitstaptijd van een personen auto of vrachtauto. In het geval van de Viamalatunnel waren de personen genooddaakt uit een bus te stappen. Deze uitstaptijd is langer waardoor men wederom een langere blootstellingsduur ondervindt. Daarom wordt aanbevolen om onderzoek te doen naar de verschillende uitstaptijden van voertuigen, waarbij ook uitstaptijden van bussen wordt meegenomen.

4.5.3 Letsel door andere toxische stoffen

In het voorgestelde model zijn alleen de effecten van temperatuur, straling en concentratie CO meegenomen. Het is mogelijk dat de personen zijn omgekomen of letsel ondervinden aan andere toxische stoffen of een combinatie daarvan. Daarom wordt aangeraden om ook andere toxische stoffen, dan CO, in het model te integreren.

5. Conclusie en aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden de conclusie en aanbevelingen behandeld die voortkomen uit het onderzoek. Hierbij worden respectievelijk deelvragen 3.1 en 3.2 beantwoord. Deze deelvragen en hoofdvragen uit de voorgaande hoofdstukken hebben gezorgd voor een gestructureerd onderzoek. Tezamen geven deze vragen antwoord op de hoofdvraag die in dit hoofdstuk centraal staat.

Hoe kunnen aantallen gewonden worden gekwantificeerd die ontstaan ten gevolge van een tunnelbrand vallen?

5.1 Conclusie

Het doel van het onderzoek is het ontwerpen van een model dat het aantal gewonden kwantificeert ten gevolge van een tunnelbrand. Hiervoor is met behulp van literatuur en gesprekken met experts informatie ingewonnen over de werkwijze en gevolgen door brand, huidige risicomodellen en onderverdeling van verschillende gradaties wat betreft letsel. Daarnaast is de huidige QRA-tunnels uitvoerig onderzocht om input te geven aan het voorgesteld model.

Het kwantificeren van gewonden tijdens een tunnelbrand is gecompliceerd. Afhankelijk van de 'dosis', grootte en het verloop van de brand, mogelijkheid tot vluchten en wel of niet gehinderd worden door rook, kan de totale blootstellingsduur oplopen. Hierdoor neemt de kans op letsel en ernst van het letsel toe. Daarnaast kunnen cognitieve processen worden aangetast waardoor het menselijk gedrag lastig is in te schatten.

Het voorgesteld model is een model opgezet in Microsoft Excel die facetten van het standaard QRA-raamwerk bevat. In het model worden de kansen van de verschillende scenario's berekend door middel van een 'gebeurtenissenboom'. Vervolgens worden voor elk scenario de gevolgen geschat welke drie elementen bevat: (1) beoordeling van de effecten aan te hoge temperaturen, straling en concentratie CO; (2) het bepalen van het aantal getroffen personen t.g.v. het effect, rekening houdend met het vluchtproces en eventuele hinder dat optreedt door rook; en (3) een berekening van de gewonden en sterfte onder deze personen op basis van de 'dosis', blootstellingsduur en afstand van de brand. Om de ernst van het letsel te beoordelen zijn voor elk type effect verschillende letselcategorieën voorgesteld. Voor elk effect worden de letselcategorieën geplot in een FN-curve, waarmee het groepsrisico kan worden geëvalueerd. Het is de taak van de beoordelende partij of deze het veiligheidsniveau op basis van de ingevoerde parameters accepteren of verwerpen.

Het voorgestelde model is door middel van drie verschillende casestudies getoetst. Vanuit de casestudies blijkt dat tijdens een tunnelbrand onverwachte gebeurtenissen kunnen afspelen. Uit de resultaten van de casestudies zijn knelpunten naar voren gekomen. Een 'lichte' overschatting van het aantal aanwezige personen en een onderschatting van het aantal 'CO-letsel'. Mede hierdoor wordt ook een onderschatting gemaakt van het aantal dodelijke slachtoffers

5.2 Aanbevelingen

Doordat het model op verschillende factoren afwijkt van de werkelijkheid, gegeven de casestudies, is meer onderzoek nodig naar onder andere de knelpunten uit het model. De volgende aanbevelingen zijn gegeven:

1. De locatie en met name startpunt van het vluchtproces van de blootgestelde personen dynamisch inschatten.
2. Nieuwe CFD-studie doen gericht op het ontwikkelen van afgeleide formules voor gewonden.
3. Nieuw onderzoek naar verschillende uitstaptijden uit voertuigen, waarbij ook uitstaptijden van bussen wordt meegenomen.
4. De gevolgen van andere toxische stoffen of combinaties daarvan onderzoeken waaraan personen gewond raken.

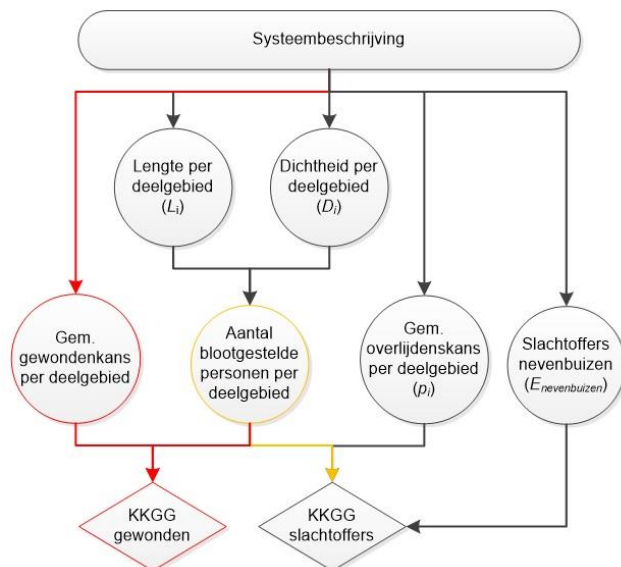
Gedurende het onderzoek zijn diverse vragen ontstaan die interessant zijn voor vervolg onderzoek, maar die buiten de scope van dit onderzoek vallen.

- De reactietijd en vluchtsnelheid kan volgens Vrom (2003) per subgroep verschillen. Daarom is het interessant om onderscheid te maken in de bevolkingspopulatie, bijvoorbeeld ouderen, mindervaliden of jongeren.
- Daarnaast kan men onderzoeken hoeveel van deze subgroepen vervolgens door de tunnel rijden. Daarbij kan men bijvoorbeeld ook rekening houden met de vergrijzing van Nederland. Zijn bijvoorbeeld de eerder gestelde gemiddelde reactietijden en vluchtsnelheden in de nabije toekomst dan nog wel correct?
- Naast de reactietijd en vluchtsnelheid is er een verband tussen leeftijd, percentage verbrand oppervlak en letaliteit (VROM, 2003). Er zou literatuurstudie kunnen worden verricht om te kijken of dergelijke verbanden ook voor andere letseltypen gelden.

5.3 Integratie QRA-tunnels

De variabelen die in dit onderzoek worden voorgesteld kunnen derhalve geïmplementeerd worden in de QRA-tunnels. In de huidige QRA-tunnels kan de systeembeschrijving van de tunnel worden aangegeven. Daaruit wordt de lengte en dichtheid per deelgebied bepaald. Door de lengte en dichtheid te vermenigvuldigen wordt het aantal blootgesteld personen per deelgebied bepaald. Door deze vervolgens te vermenigvuldigen met de gemiddelde overlijdenskans per deelgebied en eventuele slachtoffers van nevenbuizen ten tijde van een explosie er bij op te tellen worden de dodelijke slachtoffers bepaald.

Om de gewonden te kwantificeren zullen nieuwe parameters in de QRA-tunnels moeten worden geïntroduceerd. Omdat het dosis per seconde kan is er met deze voorgestelde methode een noodzaak om per seconde de berekeningen uit te voeren i.p.v. ijkmomenten. Hierdoor kan nauwkeurig worden bepaald of er gewonden vallen. Wel zijn ijkmomenten voor letselcategorieën te gebruiken, omdat daarbij voor drempelwaarden is gekozen. In de QRA-tunnels worden de aantal blootgestelde personen per deelgebied bepaald. Voor gewonden is het noodzakelijk deze dynamisch in te schatten, zoals voorgesteld in paragraaf 4.5.1. Door gevolgberoekekeningen te maken zoals in het voorgesteld model uit dit onderzoek kan een gemiddelde gewondenkans worden berekend. Vervolgens kunnen de blootgestelde personen worden vermenigvuldigt met de gemiddelde gewonden kans. Dit resulteert in de Kleine Kans Grote Gevolgen (KKGG) voor gewonden. De bovenstaande beschrijving is samengevat in figuur 26.



figuur 26: Integratie QRA-tunnels

6. Bronnen

- Bettelini, M., & Seifert, N. (2010). On the Safety of Short Road Tunnels. *5th International Convergence "Tunnel Safety and Ventilation"*. Graz: Amberg Engineering Ltd.
- Bouwdienst Rijkswaterstaat. (2002). *Safety Proef: Rapportage brandproeven*. Utrecht: Bouwdienst Rijkswaterstaat.
- Bryan, J. L. (1986). Damageability of buildings, contents and Personnel from Exposure to Fire. *Fire Safety Journal*(11), 15-31.
- COB en Bouwdienst Rijkswaterstaat. (Mei 2004). *Leidraad Scenarioanalyse Ongevallen in Tunnels: Deel 1: Wegtunnels*. Gouda: Stichting COB.
- Codex Medicus. (2013)^a. *Rampengeneeskunde > Letseltypen*. Opgeroepen op April 8, 2013, van <http://www.codexmedicus.nl/sectie/45/Chap45disp5200/Letseltypen.html>
- Codex Medicus. (2013)^b. *Rampengeneeskunde > Letseltypen*. Opgeroepen op April 8, 2013, van <http://www.codexmedicus.nl/sectie/45/Chap45disp9500/Triage.html>
- Committee on Acute Exposure Guideline Levels; Committee on Toxicology; National Research Council. (2010). *Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals* (Volume 8 ed.). Washington D.C.: The National Academies Press.
- Covello, V., & Merkhoffer, M. (1993). *Risk assessment methods, approaches for assessing health and environmental risks*. New York: Plenum Press.
- Drysdale, D. (1998). *An introduction to Fire Dynamics*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Duffé, P., & Marec, M. (1999). *Task force for technical investigation of the 24 march 1999 fire in the Mont Blanc vehicular tunnel*. Minister of the Interior - Ministry of Equipment, Transportation and Housing.
- Eisenberg, N. A., Lynch, C. J., & Breeding, R. J. (1975). *Vulnerability Model: Simulation System for Assessing Damage Resulting from Marine Spills*. Springfield : US Coast Guard.
- European Tunnel Assessment Programme. (2013, 09 15). *A road of tunnels: the "A 13" in Switzerland*. Opgehaald van EuroTAP : www.eurotestmobility.net/eurotap.php?itemno=161&lang=EN
- Finney, D. J. (1952). *Probit Analysis*. New York: Cambridge University Press.
- Hardee, H. C., & Lee, A. (1977). A Simple Conduction Model for Skin Burns Resulting from Exposure to Chemical Fireballs. *Fire Research*, 199-205.
- Helsloot, I., Groenendaal, J., & Warners, E. (2011). *Zelfredzaamheid bij brand in spoortunnels*. Rotterdam: Platform Transportveiligheid.
- Jin, T. (2002). Visibility and Human Behavior in Fire Smoke . In P. J. DiNenno, D. Drysdale, W. Douglas Walton, R. L. Custer, J. R. Hall, & J. M. Watts, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (pp. 2-42 - 2-53). Quincy: National Fire Protection Association.
- Jonkman, S. N. (2007). *Loss of life estimation in flood risk assessment; Theory and applications*. Delft University of Technology, Civil Engineering and Geosciences. Delft: Sieca Repro.
- Jonkman, S. N., Lentz, A., & Vrijling, J. K. (2010). A general approach for estimation of loss of life due to natural and technological disasters. *Reliability Engineering and Systems Safety*, 1123-1133.
- Jonkman, S., van Gelder, P., & Vrijling, J. (2003). An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage. *Journal of Hazardous Materials*, 1-30.

- Knoflachner, H., Pfaffenbichler, P., & Nussbaumer, H. (2002). Quantitative Risk Assessment of Heavy Goods Vehicle Transport through Tunnels - the Tauern Tunnel Case Study. *1st International Conference Tunnel Safety and Ventilation*, (p. 8). Graz.
- Kobes, M. (2010). *Understanding human behaviour in fire. Validation of the Use of Serious Gaming for Research into Fire Safety Psychonomics*. Amsterdam: VU University Amsterdam.
- Leedy, P. D., & Ormrod, J. E. (2010). *Practical Research: Planning and Design*. New Jersey: Pearson Education International.
- Lemaire, A., Leur, P. v., & Kenyon, Y. (2002). *Safety Proef: TNO Metingen rook- en warmtegedrag in de Beneluxtunnel*. Rijswijk: TNO Centrum voor Brandveiligheid.
- Lemaire, T., & Kenyon, Y. (2006). Large Scale Fire Tests in the Second Benelux Tunnel. *Fire Technology*(42), 329-350.
- Lie, T. (2002). Fire Temperature- Time Relations. In P. J. DiNenno, D. Drysdale, W. Douglas Walton, R. L. Custer, J. R. Hall, & J. M. Watts, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (pp. 4-201 - 4-208). Quincy: National Fire Protection Association.
- Meng, Q., Qu, X., Wang, X., Yuanita, V., & Chee Wong, S. (2011). Quantitative Risk Assessment Modeling for Nonhomogeneous Urban Road Tunnels. *Risk Analysis*, 31(3), 382-403. doi:10.1111/j.1539-6924.2010.01503.x
- NASA. (2011). *Probabilistic Risk Assessment Procedures Guide for NASA Managers and Practitioners*. Washington, DC: NASA.
- Nolan, D. P. (2011). *Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles: for Oil, Gas, Chemical and Related Facilities* (2e ed.). Oxford: Elsevier.
- NVBR, VNG en IPO. (2010). *Handreiking Verantwoorde brandweeradviesing externe veiligheid*. Schiedam: TDS printmaildata.
- Persson, M. (2002). *Quantitative Risk Analysis Procedure for the Fire Evacuation of a Road Tunnel -An Illustrative Example*. Department of Fire Safety Engineering. Sweden: Lund University.
- PIARC. (1999). *Fire and Smoke Control in Road Tunnels*. World Road Association.
- PIARC. (2006). *Lessons Learned From Recent Tunnel Fires*.
- PIARC. (2013, 08 30). *Experience from past tunnel incidents*. Opgehaald van Road Tunnels Manual: <http://tunnels.piarc.org/en/safety/experience.htm>
- Projectbureau Tunnelveiligheid. (2006). *Handreiking Risicoanalyse Tunnelveiligheid: Methodieken, modellen en veiligheidscriteria voor kwantitatieve risicoanalyse en scenarioanalyse*. Den Haag: Tunnelfacts.
- Promat. (2013, 02 05). *Fire Curves*. Opgehaald van Promat Tunnels: <http://www.promat-tunnel.com/en/hydrocarbon-hcm-hc-rabt-rws.aspx>
- Pryor, A. J. (1968). *Full-Scale Evaluation of the Fire Hazard of Interior Wall Finishes*. San Antonio: Southwest Research Institute.
- Purser, D. A. (2002). Toxicity Assessment of Combustion Products. In D. Drysdale, W. Douglas Walton, R. L. Custer, J. R. Hall, & J. M. Watts, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (pp. 2-83 - 2-171). Quincy: National Fire Protection Association.

- Purser, D. A., & Buckley, P. (1983). Lung irritation and inflammation during and after exposures to thermal decomposition products from polymeric materials. *Medicine, Science, and the law*, 23(2), 142-150.
- Qu, X., Meng, Q., Yuanita, V., & Wong, Y. H. (2011). Design and implementation of a quantitative risk assessment software tool for singapore road tunnels. *Experts Systems with Applications*(38), 13827-13834.
- Rew, P., Hulbert, W., & Deaves, D. (1997). Modelling of Thermal Radiation From External Hydrocarbon Pool Fires. *Process Safety and Environmental Protection*, 81-89.
- Rijkswaterstaat. (2012). *QRA-tunnels 2.0: Achtergronddocument*. Utrecht: RWS Steunpunt Tunnelveiligheid. Opgehaald van http://www.rws.nl/zakelijk/veiligheid/steunpunt_tunnelveiligheid/veiligheidsbeschouwingen/
- RIVM. (2009). *Een werkwijze voor slachtofferberekeningen voor incidenten met toxische stoffen*. Bilthoven: RIVM.
- Stichting Werkgemeenschap tussen Techniek en Zorg, Landelijk Bureau Toegankelijkheid en Steunpunt Tunnelveiligheid. (2005). *Uitgangelijkheid van wegtunnels voor mensen met een functiebeperking*. Utrecht: Rijkswaterstaat.
- TNO. (2010). *Kwantificering van gewonden ten gevolge van transportongevallen met gevaarlijke stoffen*. Delft: TNO.
- Torn, v. d., Pasman, H., Zwaard, A., Jongejan, R., Helsloot, I., Könemann, W., . . . Smit, C. (2007, april 25-26). Subleetaal letsel bij zware ongevallen en rampen met gevaarlijke stoffen; Afstemmingsbehoefte tussen hulpverlening en externe veiligheid. *paper NVVK-congres*, 1-8.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission. (1975). *Reactor Safety Study, an Assessment of Accident Risks in U.s. Nuclear Power Plants*. Washington, DC.
- Veeraswamy, M., Galea, E., & Lawrence, P. (2011). Wayfinding Behavior within Buildings - An International Survey. *Fire Safety Science. Proceedings of the Tenth International Symposium* (pp. 735-748). London: Interscience Communications Ltd.
- Verschuren, P., & Doorewaard, H. (2007). *Het ontwerpen van een onderzoek*. Den Haag: Uitgeverij LEMMA.
- VROM. (1997). *PGS 4: Methods for determining and processing probabilities*. Den Haag.
- VROM. (2003). *PGS Deel 1A: Effecten van brand op personen*. Den Haag.
- VROM. (2005)^a. *PGS 2: Methodes for the calculation of physical effects*. Den Haag.
- VROM. (2005)^b. *PGS 3: Guidelines for quantitative risk assessment*. Den Haag.
- Vrouwenvelder, T., Lovegrove, R., Holicky, M., Tanner, P., & Canisius, G. (2001). Risk assessment and risk communication in civil engineering. *Safety, risk and reliability - trends in engineering*.
- Winch, G. M. (2010). *Managing Construction Projects An Information Processing Approach* (Second Edition ed.). West Sussex: Wiley-Blackwell.
- Zumsteg, F., Steinemann, U., & Berner, M. (2012). Ventilation and distance of emergency exits in steep bi-directional tunnels. *6th International Conference "Tunnel Safety and Ventilation"* (pp. 273-280). Graz: US+FZ Consulting Engineers and Swiss Federal Road Office (FEDRO).

7. Bijlagen

A. Convectie vanuit de brand

Het moment van diffusie wordt berekend door relatief eenvoudige zonemodellen en complexe Computational Fluid Dynamics modellen; afgekort CFD-modellen. In een zonemodel wordt de tunnel in verschillende secties verdeeld, zie figuur 5. De eerste sectie bestaat uit het produceren van de hete rook, waarbij de verbrandingsproducten worden vermengt met de toegestroomde lucht. In de volgende secties wordt de stratificatie weergegeven. Uiteindelijk is sprake van totale vermenging van de rooklaag met de tunnelatmosfeer, sectie n in figuur 5

In het rapport van (TNO Milieu, 2003) wordt het Richardson getal gebruikt om een indicatie te geven van de stabiliteit van de rooklaag en toegestroomde koude lucht. Deze genoemde mengfactor wordt uitgezet tegen een indicatie van de stabiliteit van de rooklaag in een bepaalde tunnelsectie (Q/C). Als het Richardson getal een bepaalde kritische waarde behaalt wordt de stratificatie opgeheven. Dit betekent dat de rooklaag op dat moment omlaag gaat en zich gaat mengen met de tunnelatmosfeer. Het rapport stelt daarom een globale schatting voor om op deze wijze het moment te berekenen waarop het kritische Richardson getal wordt behaald. Dan kan de functie van de verplaatsing c.q. afstand van de rooklaag worden bepaald.

Het rapport concludeert dat het zonemodel slechts voor een beperkt aantal waarden, zones, de lengte van stratificatie kan bepalen. CFD-modellen zijn gebaseerd op de veldmodellen. Hierbij wordt de tunnel verdeeld in een driedimensionaal grid. Met CFD-modellen kunnen stromingen en warmte transport in complexe geometrieën door meerdere iteraties worden berekend.

Het warmteverlies door de wanden en plafond van de tunnel over het verloop in afstand van de brand kan volgens het rapport benaderd worden met:

vergelijking 23

$$Q_{c,x} = p_0 \times v_0 \times C_p \times A_x \times (T_{gem,x} - T_0)$$

Waarin

- p_0 = Soortelijke massa van lucht/rook bij instroom [kg/m^3];
- v_0 = Lucht-/rooksnelheid bij instroom (≈ 1 [m/s] bij natuurlijke ventilatie);
- C_p = Soortelijke warmte van lucht/rook (≈ 1 [J/kgK]);
- A_x = Doorsnede van de tunnel op positie x [m^2];
- $T_{gem,x}$ = Gemiddelde lucht-rooktemperatuur over doorsnede A_x [K];
- T_0 = Instroomtemperatuur [K].

B. Conversietabel LC waarde naar Probit (Finney, 1952)**Table 3.2 Transformation of percentages to probits**

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	—	2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66
10	3.72	3.77	3.82	3.87	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
30	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72
40	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97
50	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50
70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33
—	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
99	7.33	7.37	7.41	7.46	7.51	7.58	7.65	7.75	7.88	8.09

C. Huidige werkwijze

Om een gedegen inzicht te krijgen in de veiligheid van het gehele tunnelsysteem is het wettelijk verplicht om een QRA uit te voeren. Deze analyse berekent o.a. het groepsrisico in aantal dodelijke slachtoffers. Daarnaast is het mogelijk om een SA uit te voeren die voor een specifiek scenario het veiligheidsproces visualiseert. De QRA analyse en SA analyse worden hieronder toegelicht.

C.1 QRA analyse

De QRA-tunnels, nader te noemen QRA-tunnels, is een kwantitatieve risicoanalyse die de veiligheidsrisico's in de tunnel systematisch analyseert. Hiermee wordt een algemeen veiligheidsniveau berekend. De QRA kan in verschillende fases van de levenscyclus van een tunnel gebruikt worden en dient als ondersteuning bij besluitvorming. De QRA-tunnels heeft drie doelstellingen. Het eerste doel is het toetsen van de veiligheid aan de normen en criteria van het persoonlijk- en groepsrisico tijdens zowel de planvorming-, ontwerp- als exploitatiefase. Het tweede doel vergelijkt de veiligheid, in termen van het persoonlijk- en groepsrisico, van de verschillende alternatieven onderling. Het derde doel weegt de veiligheidseffectiviteit van veiligheidsbevorderende maatregelen af.

Eerst wordt een korte geschiedenis van de QRA-tunnels besproken daarna wordt ingegaan op de vraag wat nou eigenlijk de QRA is. Vervolgens wordt de werking ervan besproken en volgt een conclusie.

C.2 Wetgeving

Na diverse tunnelbranden in de Alpenlanden heeft het Europees Parlement en de Raad in 2004 een richtlijn ontworpen die minimumveiligheidseisen stelt aan tunnels in het Europese wegennet. Voor Nederland heeft dit geleid tot het implementeren van de Wet aanvullende regels veiligheid Wegtunnels (Warvw) en de onderliggende ministeriele regeling (Rarvw). In deze regelingen verplicht men tot het uitvoeren en gebruik maken van QRA-tunnels voor wegtunnels. Dit is een kwantitatieve risicoanalyse. De eerste versie van de deze QRA stamt uit 2006. In 2011 is de nieuwe versie 2.0 geïntroduceerd. Deze versie is in 2012 opgenomen in de nieuwe tunnelwetgeving, waardoor het verplicht is deze te gebruiken.

Voor 2012 moesten de uitkomsten van de QRA-tunnels moeten voldoen aan de norm voor zowel het persoonlijk – als het groepsrisico. In 2012 is de nieuwe tunnelwet in werking getreden waardoor het groepsrisico in aantal dodelijke slachtoffers als wettelijke maatstaf geldt.

- Persoonlijk risico: 1×10^{-7} per reizigerskilometer;
- Groepsrisico: $0,1 / N^2$ per kilometer per jaar, waarbij N het aantal dodelijke slachtoffers is.

C.3 Wat is de QRA?

Om een tunnelontwerp te controleren op de veiligheid van gebruikers wordt gebruik gemaakt van een kwantitatieve risicoanalyse (QRA). Deze beschrijft op een systematische wijze de veiligheidsrisico's voor weggebruikers die door een tunnel rijden in termen van individuele personen en groepen. Met behulp van de QRA kan zo gekeken worden of het gehele tunnelsysteem aan het wettelijke groepsrisico voldoet.

De beschrijvingen van de QRA-tunnels worden uitgedrukt in kansen en gevolgen. De risico's worden gedefinieerd als vermenigvuldiging van kans en gevolgen waarbij de gevolgen worden uitgedrukt in het aantal dodelijke slachtoffers. De QRA-tunnels richt zich hierbij voornamelijk op scenario's die veel dodelijke slachtoffers veroorzaken denk hierbij aan brand in een tunnel, de uitstoot van toxische stoffen of een explosie. Gezien de kleine kans van voordoen maar toch de grote impact die deze scenario's of gebeurtenissen kunnen veroorzaken, wegen deze scenario's zwaar in de QRA-tunnels.

Het uiteindelijke veiligheidsniveau wordt bepaald door een groot aantal scenario's in te schatten en deze bij elkaar op te tellen. Aan de hand van deze scenario's kunnen effecten van maatregelen c.q. voorzieningen in de tunnel worden bepaald. Een aantal scenario's worden uitgesloten vanwege de onwaarschijnlijk kleine kans dat deze zich voordoen of ten gevolge externe invloeden, te weten: meervoudig ruimtegebruik, vandalisme en terrorisme, overstroming, scheepsankers en aanvaring en natuurrampen.

C.4 Werking QRA-tunnels

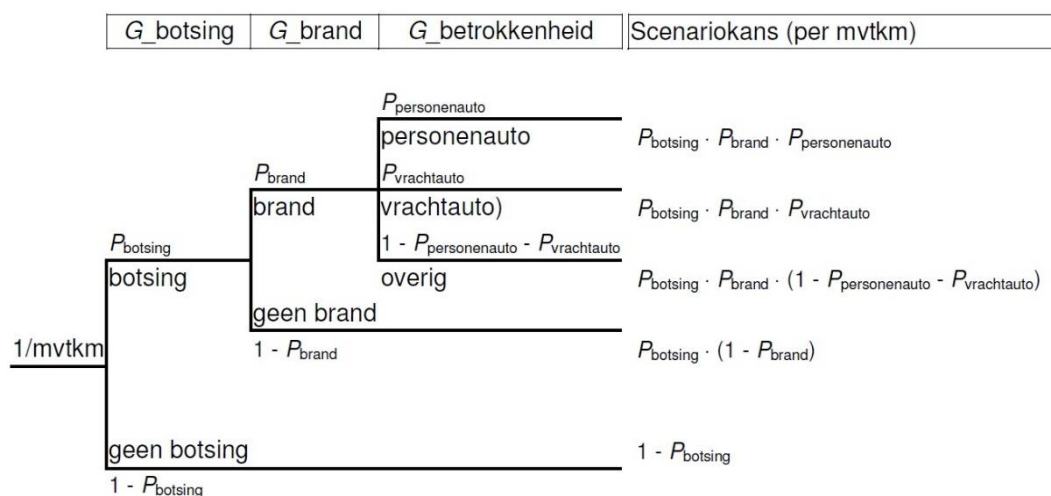
De QRA bestaat uit drie verschillende modellen:

- Kansenmodel, die de kans op het optreden van elk ongeval scenario berekent;
- Gevolgenmodel, die de effecten per ongeval scenario berekent; en een
- Risicomodel, die het risico per tunnelbuis berekent.

Deze drie afzonderlijke modellen worden hieronder besproken.

Kansenmodel

In de QRA-tunnels wordt gebruik gemaakt van fault tree analyse en event tree analysis beschreven in paragraaf 3.2.2. Een voorbeeld van een vereenvoudigde 'gebeurtenissenboom' is weergegeven in figuur 27. De 'gebeurtenissenboom' bevat enerzijds het oorspronkelijk normaal functioneren van het systeem, geen botsing. Anderzijds bevat de 'gebeurtenissenboom' elke verstoring en mogelijke gevolgen in de tunnel.



figuur 27: Voorbeeld van een vereenvoudigd gebeurtenissenboom (Rijkswaterstaat, 2012)

Aan elke tak van de 'gebeurtenissenboom' worden de kans en het gevolg toebedeeld. Door de voorgaande gebeurtenissen met elkaar te vermenigvuldigen wordt de kans op een ongevalsscenario berekend. In de QRA-tunnels worden in totaal 20 verschillende gebeurtenissen beschouwd, zie tabel 18.

tabel 18: Gebeurtenissen in de QRA-tunnels

No	Gebeurtenis	Onderverdeling naar:
1	G_{incident}	type incident: • pech, • ongeval met uitsluitend materiële schade, • letselongeval, • geen incident.
2	G_{periode}	periode van een etmaal: • spits, • dag, • nacht.
3	G_{fileben}	file (nagenoeg stilstaand verkeer) benedenstrooms van het incident: • wel een benedenstroomse file, • geen benedenstroomse file.

4	G_plaats	de plaats van het incident: • 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_sneldet	snelheidsdetectie: • wel snelheidsdetectie, • geen snelheidsdetectie.
6	G_voertuig	het incident veroorzakende voertuig: • 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: • 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 gassen: • 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. of, grootte van de uitstroming voor vloeistoffen: • 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): • brand, • geblust, • geen brand.
10	G_tankbrand	incidenten met uitstroming van gevaarlijke stoffen uit tankauto's die wel of niet resulteren in ontsteking van de uitgestroomde stof: • directe ontsteking, • vertraagde ontsteking, • geen ontsteking.

11	G_brandgrootte	brandgrootte: • 5 MW, • 10 MW, • 25 MW, • 50 MW, • 100 MW, • 200 MW.
12	G_melding	melding van een incident door een weggebruiker: • wel melding, • geen melding.
13	G_branddet	branddetectie: • wel branddetectie, • geen branddetectie.
14	G_vertrdet	wel of geen vertraagde detectie van een in eerste instantie niet opgemerkt ernstig incident: • wel vertraagde detectie, • geen vertraagde detectie.
15	G_ventilatie	wel of geen beschikbaarheid van de ventilatie: • wel ventilatie, • geen ventilatie.
16	G_ontgrendelen	wel of niet kunnen ontgrendelen (of het ontgrendeld zijn) van de vluchtdeuren: • wel ontgrendeld, • geen ontgrendeld.
17	G_afsluiten	wel of geen beschikbaarheid afsluiten: • wel afsluiten, • geen afsluiten.
18	G_autostart	wel of geen automatisch opstartsignaal: • 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): • 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: • wel blokkade, • geen blokkade.

Elke voorwaardelijke kans op een gebeurtenis wordt ingevoerd dan wel uitgerekend met een formule. De invoerparameters van de tunnel zijn gecategoriseerd in de thema's: geometrie, voorzieningen, motorvoertuigen, perioden en verkeersintensiteiten, verkeerssamenstelling, gevaarlijke stoffen, 'file benedenstreams' en incidentkansen. Deze tunnel specifieke parameters worden in de formules gecombineerd met generieke variabelen. Vervolgens kunnen eventuele defaultwaarden, die voor de open weg, worden aangepast.

Gevolgenmodel

Voor elk scenario in het kansenmodel wordt het aantal weggebruikers dat overlijdt, ten gevolge van een kritische gebeurtenis, berekend. Het aantal weggebruikers dat komt te overlijden wordt in de QRA-

tunnels in drie 'typen' slachtoffers onderverdeeld. Ten eerste de '*directe*' *slachtoffers*. Dit type slachtoffers worden bepaald met het gemiddelde aantal doden per letselongeval. In de handleiding van de QRA-tunnels worden deze slachtoffers omschreven als de normale verkeersdoden. Daarnaast vallen ook '*extra*' *slachtoffers*, het tweede type slachtoffers. Dit zijn slachtoffers die beknelde of zwaar gewond zijn in de direct bij een brand betrokken voertuig die niet tijdig kunnen worden bevrijd en daardoor omkomen. De 'extra' slachtoffers worden bepaald door de volgende vergelijking:

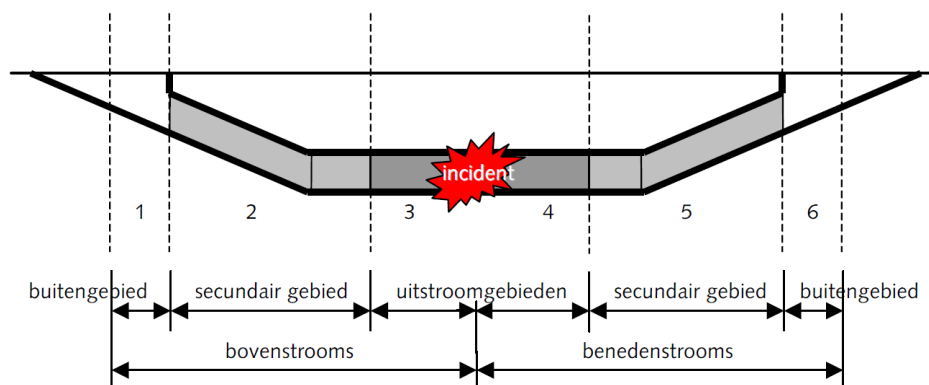
vergelijking 24

$$E_{extra} = N_{gew} \times P_{bekneld} \times P_{extra}$$

Waarin

E_{extra}	Aantal 'extra' slachtoffers die komen te overlijden, omdat ze beknelde en/of zwaar gewond zijn in de direct bij een brand betrokken voertuig en niet tijdig kunnen worden bevrijd;
N_{gew}	Gemiddeld aantal gewonden per letselongeval;
$P_{bekneld}$	Kans om beknelde of zwaar gewond te raken;
P_{extra}	Extra kans voor een beknelde of zwaar gewonde om te overlijden in een brandend voertuig.

In de QRA-tunnels is een grote aandacht voor het berekenen van de kans van optreden van initiële gebeurtenissen, '*kleine-kans-grote-gevolgen*' (KKGG) risico's. De risico's van deze laatste type slachtoffers, richten zich voornamelijk op brand of het vrijkomen van gevaarlijke stoffen. Door de gesloten constructie van een tunnel kunnen potentieel veel meer slachtoffers vallen, dan bij een soortgelijk ongeval op de open weg. Ten behoeve van de effectmodellering wordt voor het inschatten van het aantal KKGG slachtoffers de tunnel in zes stukken verdeeld, zoals is afgebeeld in figuur 28.



figuur 28: Deelgebieden in de tunnelbuis (Rijkswaterstaat, 2012)

De KKGG slachtoffers worden vervolgens in de QRA-tunnels met de volgende vergelijking bepaald:

vergelijking 25

$$E_{kkgg} = L_i \times D_i \times p_i + E_{nevenbuizen}$$

Waarin

E_{kkgg}	Aantal 'kleine-kans-grote-gevolgen' slachtoffers;
L_i	Lengte van deelgebied (voor i is 1 t/m 6);
D_i	Gemiddelde personendichtheid per deelgebied (voor i is 1 t/m 6);
p_i	gemiddelde overlijdenskans per deelgebied (voor i is 1 t/m 6);
$E_{nevenbuizen}$	Eventueel aantal slachtoffers in nevenbuizen.

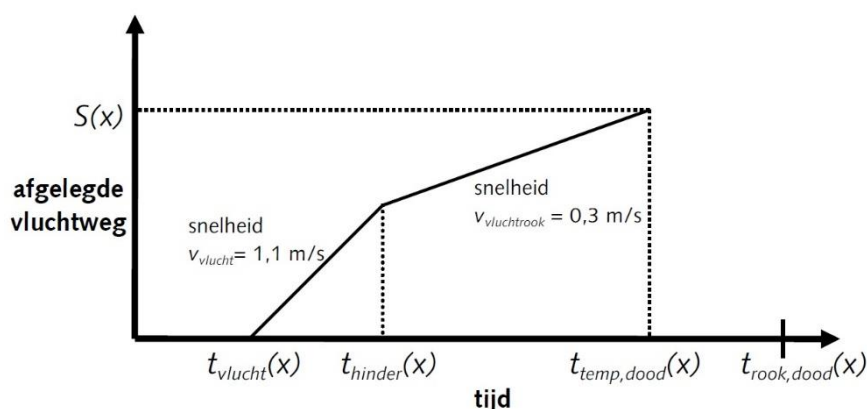
De lengte van het deelgebied (L_i) volgt uit het kansmodel uit § 0. Voor het berekenen van de personendichtheid (D_i) worden de inzittenden per voertuig bepaald. Hierbij wordt rekening gehouden met eventueel stilstaand verkeer in een file, dat zich voor (bovenstrooms) of achter (benedenstrooms)

het incident bevindt. Door het opgelopen 'dosis' van het incident per scenario te bepalen wordt de gemiddelde overlijdenskans per deelgebied (p_i) berekend. Voor brand wordt geen gebruik gemaakt van gemiddelde overlijdenskans, maar wordt gerekend met FID modellen. De grenswaarde van FID = 1 of temperatuur 'dosis' = 1 komt overeen met het overlijden van een slachtoffer. Deze 'dosis' kan worden uitgedrukt in temperatuurseffecten, rook of toxische gassen. Daarnaast is het mogelijk dat slachtoffers vallen in de eventuele nevenbuizen ($E_{\text{nevenbuizen}}$). In de QRA-tunnels is aangenomen dat deze slachtoffers zich alleen voordoen bij scenario's met explosies. Deze scenario's vallen buiten de scope van het onderzoek.

Om het aantal slachtoffers ten gevolge van brand te berekenen is het nodig om de effecten in tijd te kennen. In de QRA-tunnels wordt dat gedaan door middel van ijkmomenten. Ijkmomenten zijn afgeleid van CFD-berekeningen. Deze ijkmomenten zijn voor verschillende brandgroottes uitgevoerd. In de QRA-tunnels zijn de volgende ijkmomenten opgenomen:

- Tijdstip waarop men de brand waarneemt op afstand x vanaf de brand;
- Tijdstip start met vluchten;
- Tijdstip waarop men hinder ondervindt van rook en hierdoor langzamer zal vluchten op afstand x;
- Gebied vanaf de brand waarbinnen hinder bestaat door straling;
- Beschikbare tijd op afstand x vanaf de brand tot men bezwijkt door te hoge rookgasconcentratie;
- Beschikbare tijd op afstand x vanaf de brand tot men bezwijkt door te hoge temperaturen.

De ijkmomenten worden vergeleken met benodigde tijd op locatie x om een vluchtdoor te bereiken. De ijkmomenten zijn in de QRA-tunnels handleiding als volgt gevisualiseerd:



figuur 29: Verloop van 'zelfredzaamheid' in de tijd (Rijkswaterstaat, 2012)

Waarin

$S(x)$	Maximaal mogelijke vluchtafstand;
$t_{\text{vlucht}}(x)$	Tijdstip waarop een persoon op plaats x begint met vluchten;
$t_{\text{hinder}}(x)$	Tijdstip waarop de vluchtsnelheid van een persoon op plaats x wordt verlaagd;
$t_{\text{temp,dood}}(x)$	Tijdstip waarop een persoon bezwijkt aan hoge temperaturen op plaats x;
$t_{\text{rook,dood}}(x)$	Tijdstip waarop een persoon bezwijkt aan rookgassen op plaats x;
V_{vlucht}	Gemiddelde vluchtsnelheid in m/s in een rookvrije omgeving;
$V_{\text{vluchtrook}}$	Gemiddelde vluchtsnelheid in m/s in rook.

In de QRA wordt voor een deel van de populatie uitgegaan dat deze niet zelfstandig kunnen vluchten en gered moeten worden. De QRA-tunnels gaat ervan uit dat dit pas na een uur gebeurt. Dit betekent dat bij situaties waarbij de beschikbare tijd korter is dan een uur, deze personen te komen overlijden.

Risico

In de QRA-tunnels wordt het risico berekend door gebruik te maken van drie risicokentallen.

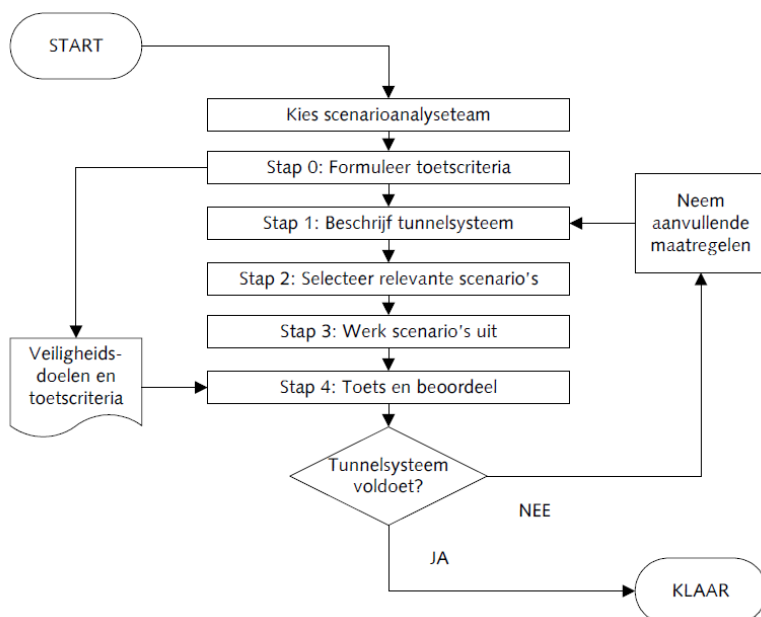
- De *verwachtingswaarde* in aantal slachtoffers per jaar en per tunnelbuis. Deze wordt berekend door elk scenario kans en gevolg met elkaar te vermenigvuldigen en vervolgens al deze producten bij elkaar op te tellen.
- Het *persoonlijk risico* geeft de kans per kilometer voor een weggebruiker om in de tunnel te komen te overlijden als gevolg van een incident in de tunnel.
- Het *groepsrisico* is de kans dat per jaar een groep mensen in één keer komt te overlijden bij een ongeval in de tunnel. Het groepsrisico wordt weergegeven met een f-N curve. Op de Y-as van deze grafiek bevindt zich de overschrijdingsfrequentie $f(N)$ en op de X-as het aantal dodelijke slachtoffers. De ongelukken met het aantal N of meer doden worden op een dubbel logaritmische schaal weergegeven. Uit § 2.2.4 blijkt dat de huidige norm voor het groepsrisico ligt op: $0,1 / N^2$ per kilometer per jaar, waarbij N het aantal dodelijke slachtoffers is.

C.5 SA analyse

Tijdens het ontwerpen en het aanleggen van tunnels wordt veiligheid steeds belangrijker. De veiligheid van tunnelgebruikers omvat de interne veiligheid van een tunnel en wordt berekend aan de hand van de kwantitatieve risicoanalyse (QRA). Een QRA geeft inzicht in de totale veiligheid van een tunnel, maar niet in de wijze waarop een tunnel, inclusief de organisatie eromheen, ongevallen met specifieke kenmerken kan hanteren. Om risicoanalyse van specifieke ongevalssituaties uit te voeren kan gebruik worden gemaakt van een scenario analyse (SA). Hierbij ligt het accent met name op de gevolgen van een ongeval, en in mindere mate op de kans op het ontstaan van een dergelijke situatie. Belangrijk hierin mee te nemen zijn de processen die zich tijdens een ongeval voordoen zoals alarmering, 'zelfredzaamheid' en hulpverlening. Aan de hand van het verwachte aantal slachtoffers en de schade in relatie tot de processen die zich tijdens een ongeval voordoen, wordt inzicht verkregen in de (wan)prestatie van het tunnelsysteem op het gebied van veiligheid en kunnen verbetermogelijkheden voor het tunnelontwerp in kaart worden gebracht.

C.6 Werking SA

De SA beschrijft één of meer ongevalsscenario's en de gevolgen, inclusief de reacties van de verschillende actoren die hierbij zijn betrokken. Deze actoren betreffen onder meer de tunneloperator, de tunnelgebruiker en – beheerder en de hulpdiensten. De ongevalsscenario's die in de SA worden besproken zijn: brand, explosie en/of het vrijkomen van toxische stoffen. Daarbij wordt ook rekening gehouden met de gevolgen hiervan voor de blootgestelden in de tunnel. De SA bestaat uit een aantal fases welke doorlopen moeten worden om een scenarioanalyse te kunnen voltooien. Zie figuur 30.



figuur 30: Fases Scenarioanalyse (COB en Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2004)

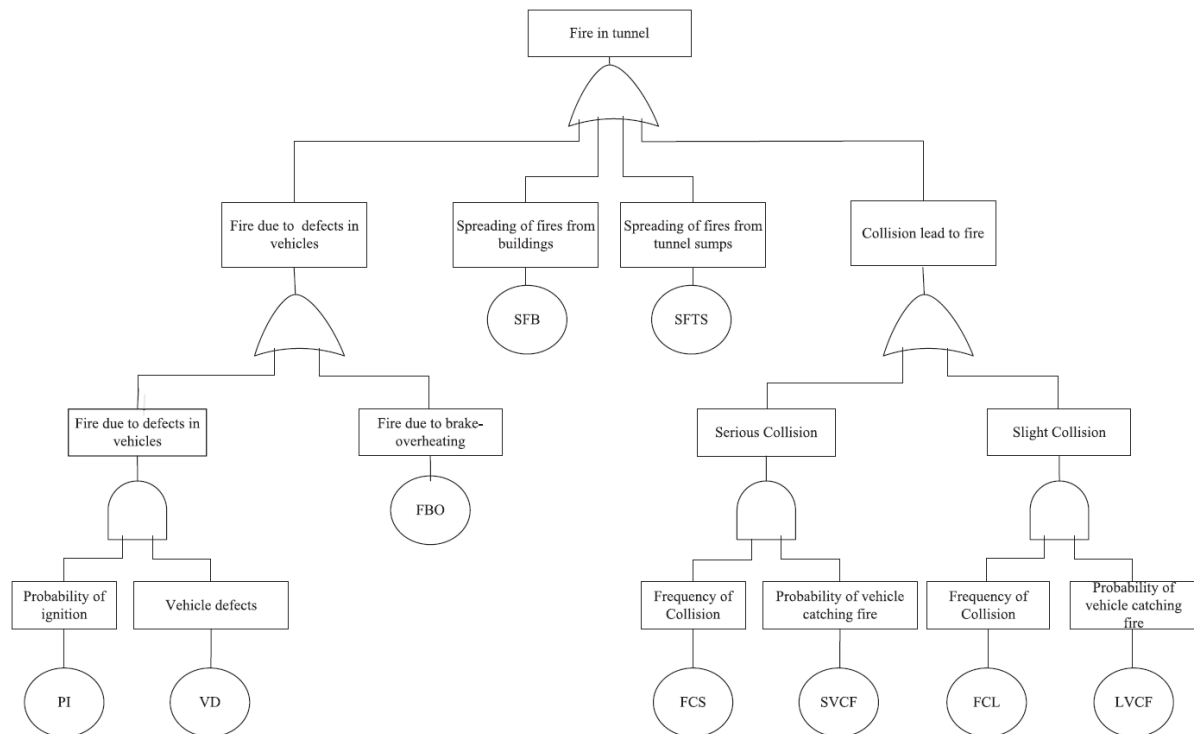
De fases zijn:

- Stap 1: Beschrijving huidig tunnelsysteem;
- Stap 2: selectie van relevante scenario's;
- Stap 3: uitwerking van de scenario's
- Stap 4: toetsing en beoordeling van het tunnelsysteem aan de toetscriteria.

Het proces van de SA wordt aangevangen met het samenstellen van een analyseteam. Dit team stelt vervolgens toetscriteria op (stap 0) welke zijn afgeleid van de algemene veiligheidsdoelen van het betreffende tunnelproject. Vervolgens wordt een beschrijving gegeven van het huidige tunnelsysteem (stap 1). Daarna worden een aantal scenario's geselecteerd die zich in de tunnel kunnen voordoen (stap 2). Deze scenario's worden beschreven en uitgewerkt (stap 3). Het uitwerken van deze scenario's heeft als doel om het tunnelsysteem te toetsen aan de toetscriteria (stap 4). Ten slotte wordt een oordeel gevormd over het al dan niet bereiken van de veiligheidsdoelen die in de eerst stap zijn geformuleerd. Zo nodig worden aanvullende maatregelen besproken welke aanpassingen in de tunnel betekenen. Om het effect van deze aanpassingen te kunnen beoordelen worden vervolgens stap 1 tot en met 4 opnieuw doorlopen.

Uiteindelijk geeft de scenarioanalyse inzicht in:

- De mate waarin het tunnelsysteem voldoet aan de gestelde veiligheidsdoelen en;
- De maatregelen die zo nodig getroffen moeten worden om alsnog de gestelde veiligheidsdoelen te bereiken.

D. Voorbeeld foutenboom voor het 'top gebeurtenis' brand in een tunnel**figuur 31: Foutenboom met 'top gebeurtenis' kans op brand (Qu, Meng, Yuanita, & Wong, 2011)**

E. CFD-berekeningen uitgevoerd voor de QRA-tunnels

Met behulp van CFD-berekeningen van zicht, temperatuur, concentraties CO, CO₂ en O₂ voor verschillende tunnelconfiguraties zijn functies afgeleid van de resultaten. Deze functies zijn vervolgens opgenomen in de QRA-tunnels. De CFD-berekeningen zijn uitgevoerd met het CFD-model, Fire Dynamics Simulator (FDS). Dit is een veldmodel die gebruik maakt van de Navier- Stokes-vergelijkingen. Het CFD-model kan onder andere de tijd en afstand relaties berekenen van temperatuur, rookdichtheid, zichtlengte, aanwezige concentratie zuurstof en straling. Om de o.a. de temperatuur en CO effecten in tijd en afstand te berekenen zijn twee verschillende casestudies uitgevoerd. Deze worden hieronder verder toegelicht. Vervolgens worden de functies besproken die voortkomen uit de resultaten. Meer informatie over de CFD-berekeningen is te vinden in (Rijkswaterstaat, 2012).

E.1 Casestudies

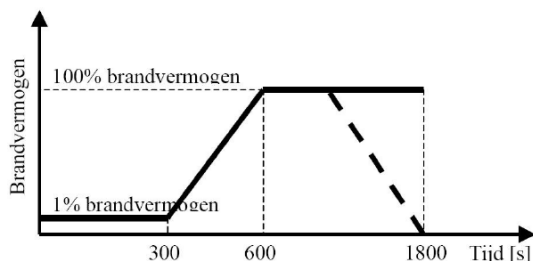
Er zijn twee horizontale tunnels uitgewerkt in het model met verschillende lengtes. In de eerste simulatie is een tunnel met een lengte van 400 meter aangenomen en de tweede simulatie een tunnallengte van 2000 meter. Voor beide tunnels is verder uitgegaan van een tunnel met:

- 3 rijstroken
- 13.5 meter breed
- 5 meter hoog

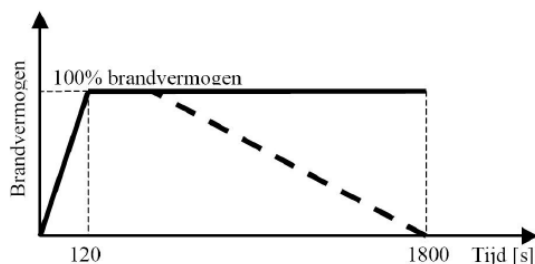
tabel 19: Obstakels in de tunnel

Tunnellengte van 400 meter	Tunnellengte van 2000 meter
Over de gehele rechterrijbaan allemaal vrachtauto's met een afmeting van 16.5 x 2.5 x 4 m.	Over de rechterrijbaan een beperkt aantal vrachtauto's gezien de limitaties van FDS.
Overige twee banen allemaal personenauto's met een afmeting van 4.5 x 2 x 1.5 m.	Over de overige twee rijbanen een beperkt aantal personenauto's.
Brand gesimuleerd in het midden van de tunnel	Brand gesimuleerd op een afstand van 500 meter van de ingang van de tunnel.

De effecten zijn berekend voor voertuigbranden van 5, 10, 25, 50, 100 en 200 MW branden en 3 verschillende plasbranden. Al deze branden zijn vervolgens berekend met een brandcurve voor een langzame en een snelle brand voor een maximale tijdsduur van 30 minuten, zie figuur 32 en figuur 33. Hierbij duidt de neergaande stippellijn de 5 en 10 MW branden aan, omdat bij deze relatief kleine branden de brandstof binnen 1800 seconden opdraakt.



figuur 32: Gemodelleerde brandcurve van langzame branden

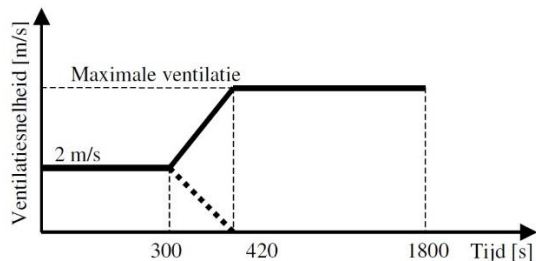


figuur 33: Gemodelleerde brandcurve van snelle branden

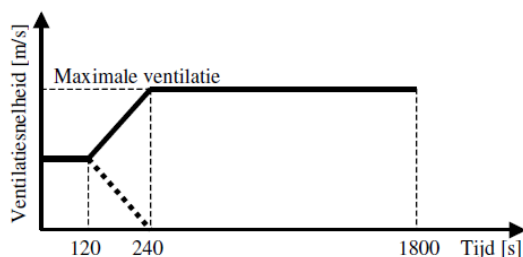
Door de grote onzekerheid van de aanwezige voertuigen, materialen en ladingen is het moeilijk om hoeveelheden rookgassen te bepalen. Vanwege deze onzekerheid is heptaan als enige

verbrandingsproduct aangenomen. Vervolgens is de rookproductie van heptaan met een factor 4 vermenigvuldigd om de rookproductie van dieselolie te evenaren.

De berekeningen zijn gemaakt voor situaties met en zonder mechanische 'langsventilatie'. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen ventilatie bij een langzame en snelle brand, zie onderstaande figuren. Zoals te zien is in de onderstaande figuren wordt aangenomen dat bij een snelle brand de ventilatie sneller wordt gestart.



figuur 34: Ventilatie bij 'langzame brand'



figuur 35: Ventilatie bij 'snelle brand'

De door het verkeer opgewekte rijwind van 2 m/s is als uitgangspunt genomen. Tevens wordt afhankelijk van het wel of niet falen van het ventilatiesysteem de maximale ventilatiesnelheid bereikt na 2 minuten of neemt de rijwind in 2 minuten af naar 0. Afhankelijk van de brandgrootte ontstaat een weerstand die invloed heeft op de ventilatie. Daarom zijn de maximale ventilatiesnelheden aangepast op de brandgrootte: bij branden van 5, 10 en 25 MW 5 m/s, brandt van 50 MW 4 m/s, brand van 100 MW 3 m/s en bij branden van 200 MW een maximale ventilatiesnelheid van 2.5 m/s.

E.2 Resultaten

De resultaten van de CFD-berekeningen zijn gebruikt voor het opstellen van de volgende functies. De functies die worden behandeld zijn:

- Tijdstip waarop de aanwezigen hinder ondervinden bij het vluchten;
- Tijdstip waarop de aanwezigen zelf het gevaar bespeuren;
- Modelling CO-concentratieverloop; en
- Modelling temperatuursverloop.

Tijdstip waarop aanwezigen hinder ondervinden bij het vluchten

Uit de literatuur blijkt dat naarmate de rookdichtheid toeneemt de loopsnelheid wordt beïnvloed. Het tijdstip waarop aanwezigen hinder ondervinden wordt aangenomen dat dit gebeurt bij een extinctiefactor van 0.4/m. Uit de curve van figuur 10 blijkt dat de rond deze extinctiefactor een omslagpunt bereikt is dat voor irriterende rook een lagere loopsnelheid geldt. Afhankelijk of de aanwezigen wel of geen hinder ondervinden is de loopsnelheid verschillend. De loopsnelheid in en zonder rook kan door de gebruiker handmatig worden aangepast in de parameters, bijlage G. De volgende formules weerd in (Rijkswaterstaat, 2012) gegeven:

vergelijking 26: hinder bepalen benedenstrooms

$$T_{hinderL5}(x) = para_{hinderL5} \times x + parab_{hinderL5}$$

vergelijking 27: hinder bepalen bovenstrooms

$$T_{hinderL2}(x) = para_{hinderL2} \times x + parab_{hinderL2}$$

Waarin

$T_{hinderL5}(x)$	Tijdstip waarop aanwezigen benedenstrooms hinder ondervinden [min]
$T_{hinderL2}(x)$	Tijdstip waarop aanwezigen bovenstrooms hinder ondervinden [min]
$para_{hinderL5}$	Ontleend aan tabel 20
$parab_{hinderL5}$	Ontleend aan tabel 20
$para_{hinderL2}$	Ontleend aan tabel 20
$parab_{hinderL2}$	Ontleend aan tabel 20
x	Afstand van de brand

tabel 20: Afgeleide CFD-resultaten $T_{hinder}(x)$

Brandscenario	Met ventilatie		Zonder ventilatie			
	Benedenstrooms		Benedenstrooms		Bovenstrooms	
	$Para_{hinderL5}$ [min/m]	$Parb_{hinderL5}$ [min/m]	$Para_{hinderL5}$ [min/m]	$Parb_{hinderL5}$ [min/m]	$Para_{hinderL2}$ [min/m]	$Parb_{hinderL2}$ [min/m]
200 MW , snel	0.0046	0.24	0.0059	0.32	0.0183	0.6
100 MW, snel	0.0038	0.59	0.0041	0.88	0.0182	1.24
50 MW, snel	0.0036	0.94	0.0031	1.3	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	10.1	0.0804	8.66

Tijdstip waarop de aanwezigen zelf het gevaar bespeuren

Het tijdstip waarop de aanwezigen het gevaar bespeuren kan volgens (Rijkswaterstaat, 2012) worden bepaald aan de hand van de volgende vergelijkingen

vergelijking 28: 'zelfredzaamheid' bepalen benedenstrooms

$$T_{zelfL5}(x) = para_{zichtL5} \times x + parab_{zichtL5}$$

vergelijking 29: 'zelfredzaamheid' bepalen bovenstrooms

$$T_{zelfL2}(x) = para_{zichtL2} \times x + parab_{zichtL2}$$

Waarin

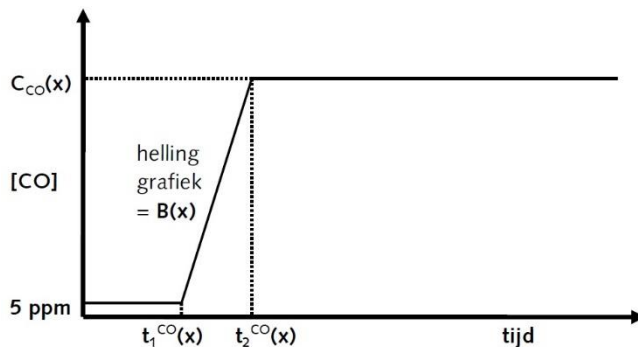
$T_{zelfL5}(x)$	Tijdstip waarop aanwezigen benedenstrooms zelf gevaar bespeuren [min]
$T_{zelfL2}(x)$	Tijdstip waarop aanwezigen bovenstrooms zelf gevaar bespeuren [min]
$para_{zichtL5}$	Ontleend aan tabel 21
$parab_{zichtL5}$	Ontleend aan tabel 21
$para_{zichtL2}$	Ontleend aan tabel 21
$parab_{zichtL2}$	Ontleend aan tabel 21
x	Afstand van de brand

tabel 21: Afgeleide CFD-resultaten $T_{zelf}(x)$

Brandscenario	Met ventilatie		Zonder ventilatie			
	Benedenstrooms		Benedenstrooms		Bovenstrooms	
	$Para_{zichtL5}$ [min/m]	$Parb_{zichtL5}$ [min/m]	$Para_{zichtL5}$ [min/m]	$Parb_{zichtL5}$ [min/m]	$Para_{zichtL2}$ [min/m]	$Parb_{zichtL2}$ [min/m]
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	0.02	0.67
25 MW, snel	0.006	0.28	0.007	0.26	0.02	1.36
10 MW, snel	0.007	0.38	0.009	0.28	0.027	1.43
5 MW, snel	0.072	0	0.0012	0.33	0.03	2

Modelering CO-concentratieverloop

Het verloop van de CO-concentratie op elke plaats in de tunnel wordt schematisch weergegeven in figuur 36.



figuur 36: Gemodelleerde CO-concentratieverloop

Om het CO-concentratieverloop te modelleren moeten drie variabelen worden bepaald. In (Rijkswaterstaat, 2012) worden de volgende formules afgeleid van CFD-berekeningen.

vergelijking 30: tijdstip CO-concentratie >5 ppm

$$t_{CO1}(x) = parT1_{COa} \times x + parT1_{CO}b$$

vergelijking 31: helling grafiek CO-concentratieverloop

$$B_{helingCO}(x) = \frac{13.5}{B_{buis}} \times parhel_{COa} \times x + parhel_{CO}b \text{ anders } B_{helingCO}L5(150)$$

vergelijking 32: maximale CO-concentratieverloop

$$C_{CO}(x) = \frac{13.5}{B_{buis}} \times parC_{COa} \times x + parC_{CO}b \text{ anders } C_{CO}L5(150)$$

vergelijking 33: tijdstip maximale CO-concentratie

$$t_{CO2}(x) = t_{CO1} + \frac{(C_{CO}(x) - 5)}{B_{helingCO}(x)}$$

Waarin

$t_{CO1}(x)$	Tijdstip waarop CO-concentratie op plaats x voor het eerst hoger wordt dan 5 ppm
$B_{helingCO}(x)$	De helling van het stijgende stuk van de grafiek op afstand x
$C_{CO}(x)$	Maximum CO-concentratie op afstand x
$t_{CO2}(x)$	Tijdstip waarop de maximale CO-concentratie is bereikt op afstand x
$parT1_{COa}$	Ontleend aan tabel 22, tabel 23 en tabel 24
$parT1_{CO}b$	Ontleend aan tabel 22, tabel 23 en tabel 24
B_{buis}	Breedte van de tunnelbuis
$C_{CO}L5(150)$	Maximum/peikconcentratie op 150 meter ontleend aan tabel 22
$parC_{COa}(x)$	Ontleend aan tabel 23 en tabel 24
$parC_{CO}b(x)$	Ontleend aan tabel 23 en tabel 24
$B_{helingCO}L5(150)$	Helling van het stijgende stuk van de grafiek op 150 meter ontleend aan tabel 22
$parhel_{COa}(x)$	Ontleend aan tabel 23 en tabel 24
$parhel_{CO}b(x)$	Ontleend aan tabel 23 en tabel 24
x	Afstand van de brand

tabel 22: Afgeleide CFD-resultaten modellering CO met ventilatie

Brandscenario	parT1 _{coa} L5	parT1 _{cob} L5	C _{co} L5(150)	B _{hellingCO} L5(150)
	min / m	min	ppm	ppm / min
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

tabel 23: Afgeleide CFD-resultaten modellering CO zonder ventilatie benedenstrooms

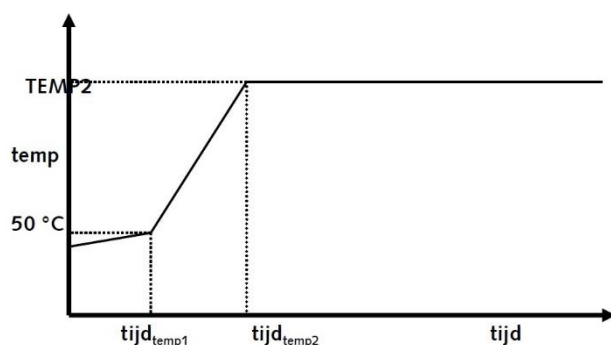
Brandscenario	parT1 _{coa} L5	parT1 _{cob} L5	parC _{coa} L5	parC _{cob} L5	parhel _{coa} L5	parhel _{cob} L5
	min / m	min				
200 MW, snel	0.0053	0.1637	-61	12430	-34.76	5557
100 MW, snel	0.0054	0.2605	-17.12	4116	-2.62	482
50 MW, snel	0.0065	0.2938	-11.46	2525	-1.65	291
25 MW, snel	0.0071	0.3402	-6.5	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

tabel 24: Afgeleide CFD-resultaten modellering CO zonder ventilatie bovenstrooms

Brandscenario	parT1 _{coa} L2	parT1 _{cob} L2	parC _{coa} L2	parC _{cob} L2	parhel _{coa} L2	parhel _{cob} L2
	min / m	min				
200 MW, snel	0.0179	0.3141	-70.37	12713	-6.31	1745
100 MW, snel	0.0213	0.536	-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	-2.4	600	-0.29	74
5 MW, snel	0.0338	2.8722	-1.09	290	-0.11	31

Modelering temperatuursverloop

Het temperatuursverloop wordt in (Rijkswaterstaat, 2012) als volgt gemodelleerd:



figuur 37: Gemodelleerde temperatuursverloop

Hierbij zijn de parameters $t_{\text{tijdtemp1}}$, $t_{\text{tijdtemp2}}$ en de temperatuur TEMP2 plaat afhankelijk in relatie tot de brand. Daarnaast moet de parameter C_{heltemp} worden bepaald. Deze parameters worden bepaald met de volgende vergelijkingen.

vergelijking 34: tijdstip waarop temperatuur hoger wordt dan 50 °C

$$t_{\text{tijdtemp1}}(x) = \text{para}_{t_{\text{tijd1}}} \times x + \text{parb}_{t_{\text{tijd1}}}$$

vergelijking 35: helling grafiek temperatuursverloop

$$C_{heltemp}(x) = C_{heltemp}13.5(x) + parbreedtebrandi \times (13.5 - B_{buis})$$

vergelijking 36: maximale temperatuur

$$TEMP2(x) = para_{temp2} \times x + parb_{temp2}$$

vergelijking 37: tijdstip maximale temperatuur bereikt

$$tijd_{temp2}(x) = \frac{(TEMP2(x) - 50)}{C_{heltemp}(x)} + tijd_{temp1}(x)$$

Waarin

$tijd_{tijd1}(x)$	Tijdstip waarop de temperatuur hoger wordt dan 50 °C
$C_{heltemp}(x)$	De helling van het stijgende stuk van de grafiek op afstand x
$TEMP2(x)$	Maximum temperatuur op afstand x
$tijd_{temp2}(x)$	Tijdstip waarop de maximale temperatuur is bereikt op afstand x
$para_{tijd1}$	Ontleend aan tabel 25, tabel 26 en tabel 27
$parb_{tijd1}$	Ontleend aan tabel 25, tabel 26 en tabel 27
B_{buis}	Breedte van de tunnelbuis
$C_{heltemp}(13.5)$	Ontleend aan tabel 25, tabel 26 en tabel 27
$para_{temp2}$	Ontleend aan tabel 25, tabel 26 en tabel 27
$parb_{temp2}$	Ontleend aan tabel 25, tabel 26 en tabel 27
$parbreedtebrandi$	Constante ontleend aan tabel 25, tabel 26 en tabel 27
x	Afstand van de brand

tabel 25: Afgeleide CFD-resultaten modellering temperatuur met ventilatie

Brandscenario	$para_{tijd1}L5$	$parb_{tijd1}L5$	$para_{temp2}L5$	$parb_{temp2}L5$	$C_{heltemp}L5$ (13.5)	$parbreedtebrandi$
	min / m	min	°C / m	°C	°C / min	
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

tabel 26: Afgeleide CFD-resultaten modellering temperatuur zonder ventilatie benedenstrooms

Brandscenario	$para_{tijd1}L5$	$parb_{tijd1}L5$	$para_{temp2}L5$	$parb_{temp2}L5$	$C_{heltemp}L5$ (13.5)	$parbreedtebrandi$
	min / m	min	°C / m	°C	°C / min	
200 MW, snel	0.0066	0.2588	-4.73	781	330	20
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

tabel 27: Afgeleide CFD-resultaten modellering temperatuur zonder ventilatie bovenstrooms

Brandscenario	para _{tijd1} L2	parb _{tijd1} L2	para _{temp2} L2	parb _{temp2} L2	C _{heltemp} L2 (13.5)	parbreedtebrandi
	min / m	min	°C / m	°C	°C / min	
200 MW, snel	0.047	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

F. Beoordelingsmodel toxische en lichamelijke gevaren

Purser (2002) heeft een beoordelingsmodel voorgesteld om toxische en lichamelijke gevaren bij een brand te bepalen. Het doel van dit model is om het tijdsmoment te bepalen wanneer bij de geschatte potentiële slachtoffers een dermate letsel optreedt dat zij niet meer kunnen ontsnappen of hun vermogen om te kunnen ontsnappen ernstig in gevaar wordt gebracht tijdens de blootstelling aan een brand.

Het model bestaat uit verschillende stappen. Als eerst moet gekeken worden naar de narcotische verschijnselen van de verstikkingsstoffen (CO, HCN O₂ en CO₂). Om te bepalen wanneer personen niet meer in staat zijn tot vluchten ten gevolge van het inademen van giftige stoffen, wordt gebruik gemaakt van Fractional Incapacitating Dose (FID). Hierbij betekent een waarde van 0 dat er geen belemmering is voor het vluchten. Bij een waarde groter of gelijk aan 1 zijn de personen niet meer in staat om te vluchten. Volgens Purser (2002) is het nodig voor elk van de verstikkingsstoffen de FID te berekenen. Voor de meest voorkomende verstikkingsstoffen bij een brand is een formule voorgesteld:

vergelijking 38: FID koolmonoxide

$$F_{I_{CO}} = \frac{K(ppm\ CO^{1.036})(t)}{D}$$

Waarin

$F_{I_{CO}}$ = FID CO
 t = blootstellingsduur (min)
 K = 8.2925×10^{-4} voor 25 L/min RMV (lichte activiteit)
 D = COHb concentratie bij verlamming (30% voor lichte activiteit)

vergelijking 39: FID Waterstofcyanide

$$F'_{I_{CN}} = \frac{t}{\exp(5.396 - 0.023 \times ppm\ HCN)}$$

Waarin

t = blootstellingsduur (min)
 $F'_{I_{CN}}$ = FID HCN
 HCN = Waterstofcyanide in ppm

vergelijking 40: FID laag zuurstofgebrek

$$F'_{I_{O_2}} = \frac{t}{\exp[8.13 - 0.54(20.9 - \%O_2)]}$$

Waarin

t = blootstellingsduur (min)
 $F'_{I_{O_2}}$ = FID O₂
 O_2 = Percentage zuurstof

vergelijking 41: FID Kooldioxide

$$F'_{I_{CO_2}} = \frac{t}{\exp(6.1623 - 0.5189 \times \%CO_2)}$$

Waarin

t = blootstellingsduur (min)
 $F'_{I_{CO_2}}$ = FID CO₂
 CO_2 = Percentage kooldioxide

Daarnaast zijn interacties met verschillende verstikkingsstoffen mogelijk. Purser (2002) stelt daarvoor de volgende formule voor:

vergelijking 42: FID alle belangrijke verstikkingsstoffen bij een brand

$$F_{in} = [(F_{ICO} + F_{ICN} + FLD_{irr}) \times VCO_2 + FED_{Io}] \text{ of } F_{ICO_2}$$

Waarin

- F_{in} = FID van alle belangrijke verstikkingstoffen die bij een brand vrijkomen
 F_{ICO} = FID CO
 F_{ICN} = FID HCN
 FLD_{irr} = Fractie irritatie zuurstofgebrek
 VCO_2 = Vermenigvuldigingsfactor door CO₂ veroorzaakte hyperventilatie
 FED_{Io} = FID laag zuurstofgehalte
 F_{ICO_2} = FID CO₂

In de tweede stap worden de lichamelijke effecten van warmte straling, convectie rook en irritatie aan de zintuigen en longen beoordeeld. Hiervoor stelt Purser (2002) eenzelfde soort FID model voor, waarbij uiteindelijk de straling en convectie fracties bij elkaar worden opgeteld. Voor blootstelling aan de warmte straling van een rooklaag van 200 graden Celsius concludeert Purser (2002) dat een intensiteit kleiner dan 2,5 kW / m² voor meerdere minuten kan worden getolereerd. Een intensiteit van gelijk aan en groter dan 2,5 kW / m² kan slechts voor enkele seconden worden getolereerd. De tijdsduur tot het niet meer kunnen ontsnappen bij een hogere rooklaag temperatuur stelt purser de volgende formule voor:

vergelijking 43: FID stralingswarmte

$$t_{Irad} = \frac{80}{q^{1.33}}$$

Waarin

- t_{Irad} = tijd (s) om niet meer te kunnen ontsnappen
 q = warmte stralingsflux in kW / m²

Bij een blootstellingsduur tot één uur aan convectie warmte van lucht die minder dan 10% waterdamp bevat wordt de volgende formule voorgesteld:

vergelijking 44: FID Convectie warmte

$$t_{Iconv} = 5 \times 10^7 T^{-3.4}$$

Waarin

- t_{Iconv} = tijd (min) om niet meer te kunnen ontsnappen
 T = temperatuur in °C

De FID van warmte die door de brand vrijkomt kan worden berekent met de volgende formule:

vergelijking 45: FID warmte zowel straling als convectie

$$FED = \sum_{t1}^{t2} \left(\frac{1}{t_{Irad}} + \frac{1}{t_{Iconv}} \right) \Delta t$$

FED staat voor fractional effective dose. Deze aanduiding kan worden vergeleken met FID.

G. Invoerparameters model

De volgende invoerparameters en tussenvariabelen zijn in het model opgenomen:

tabel 28: Letselgrensen stellen voor berekenen van gewonden t.a.v. straling

Symbool	Omschrijving	Domein of functie v(X)	Default-waarden	Invoer-waarde	Eenheid	Opmerking
LC	Het percentage van de populatie dat minimaal moet reageren op de hoeveelheid dosis straling (Mediaan van de "Lethal Concentration")	-	50	50%	-	
Stralingéén	Ondergrens 1egraads brandwonden volgens stralingsdosis ($t * Q^{4/3}$) en probit bij LC%	Afhankelijk van de LC waarde	-	2.817	s.(W/m ²)	O.p.v. probit uit de literatuur: 1 ^e brandwonden: Probit = -39,83 + 3,0186 * ln (t * q ^{4/3})
Stralingtwee	Ondergrens 2egraads brandwonden volgens stralingsdosis ($t * Q^{4/3}$) en probit bij LC%	Afhankelijk van de LC waarde	-	8.434	s.(W/m ²)	O.p.v. probit uit de literatuur: 2 ^e brandwonden: Probit = -43.14 + 3,0186 * ln (t * q ^{4/3})
Stralingdrie	Ondergrens dood volgens stralingsdosis ($t * Q^{4/3}$) en probit bij LC%	Afhankelijk van de LC waarde	-	10.470	s.(W/m ²)	O.p.v. probit uit de literatuur: Lethaal letsel: Probit = -36.38 + 2.56 * ln (t * q ^{4/3})

tabel 29: Letselgrensen stellen voor berekenen van gewonden t.a.v. CO

Symbool	Omschrijving	Domein of functie v(X)	Default-waarden	Invoer-waarde	Eenheid	Opmerking
COéén	CO waarop mensen CO-letsel 1 oplopen	<COTwee	703	703	ppm	
COTwee	CO waarop mensen CO-letsel 2 oplopen	>COéén en <CODrie	2862	2862	ppm	
CODrie	CO waarop mensen CO dood gaan	>COTwee	9463	9463	ppm	

tabel 30: Letselgrensen stellen voor berekenen van gewonden t.a.v. temperatuur

Symbool	Omschrijving	Domein of functie v(X)	Default-waarden	Invoer-waarde	Eenheid	Opmerking
Tempéén	Temperatuur waarop mensen temperatuur letsel 1 oplopen	<Temptwee	-	60	°C	
Temptwee	Temperatuur waarop mensen temperatuur letsel 2 oplopen	>Tempéén en <Tempdrie	-	120	°C	
Tempdrie	Temperatuur waarop mensen overlijden	>Temptwee	179	179	°C	

tabel 31: Interval

Symbol	Omschrijving	Domein of functie $v(X)$	Default-waarden	Invoer-waarde	Eenheid	Opmerking
Factor	Het interval waarin gewonden moeten worden berekend.	Even getal tussen 2 - 10. Des te groter het interval hoe grotere onzekerheid	10	10	m	Formules in Excel zijn voor 100 kolommen ingevoerd. Dat betekent als Factor = 10 m de maximale lente van de tunnel 100 x 10 meter = 1000 meter; 8 m de maximale lente van de tunnel 100 x 8 meter = 800 meter; 6 m de maximale lente van de tunnel 100 x 6 meter = 600 meter; 4 m de maximale lente van de tunnel 100 x 4 meter = 400 meter; 2 m de maximale lente van de tunnel 100 x 2 meter = 200 meter;

tabel 32: Geometrie

Symbol	Omschrijving	Domein of functie $v(X)$	Default-waarden	Invoer-waarde	Eenheid	Opmerking
L_{buis}	Lengte (gesloten deel) van de tunnel	[80; 1000]	-	1000	m	Lente van de tunnel is afhankelijk van het interval waarin gewonden moeten worden berekend. Om het bestand kleiner te maken zijn de formules in dit model voor 100 kolommen uitgetrokken.
B_{buis}	Breedte van de tunnelbuis	[3; 30]	-	8.6	m	Het tijdstip waarop het zicht hangt volgens de gevoeligheidsanalyses van de QRA niet sterkt af van de breedte van de tunnel. Tijdstip dat mensen zelf gevaar bespeuren wordt daarom berekend met 13.5 meter brede tunnel. De dosis CO en temperatuur worden beïnvloed door de breedte van de tunnel.
L_{hart}	Hart-op-hart afstand van de vluchtdeuren	[30; $L_{buis}/2$]	-	200	m	Voor het berekenen van een tunnel zonder vluchtdeuren moet $L_{buis}/2$ worden ingevoerd. Het model berekent een brand precies in het midden van de tunnel. Als een vluchtdeur eveneens in het midden van de tunnel wordt gedimensioneerd blokkeert de brand deze vluchtdeur. Het model houdt hier rekening mee voor de berekening van gewonden.
N_{rij}	Aantal rijstroken in de tunnelbuis	[1; 6]	-	1	-	

tabel 33: Voorzieningen

Symbol	Omschrijving	Domein of functie $v(X)$	Default-waarden	Invoer-waarde	Eenheid	Opmerking
Avent	Is een langsventilatiesysteem aanwezig?	[Ja; Nee]	-	Ja	-	
$L_{afsluit}$	Afstand tussen de plaats waar de tunnelbuis wordt afgesloten en de ingang van de tunnelbuis	[0; 10^4]	-	50	m	

tabel 34: Motorvoertuigen

Symbol	Omschrijving	Domein of functie v(X)	Default-waarden	Invoer-waarde	Eenheid	Opmerking
V _{auto}	Gemiddelde snelheid van personenauto's	[30; 120]	-	80	km/uur	
V _{bus}	Gemiddelde snelheid van bussen	[20; 100]	-	80	km/uur	
V _{vracht}	Gemiddelde snelheid van vrachtauto's	[20; 100]	-	80	km/uur	
N _{auto}	Gemiddeld aantal inzittenden in een personenauto	[1; 3]	1.5	1.5	pers/mvt	
N _{bus}	Gemiddeld aantal inzittenden in een bus	[1; 50]	22	22.0	pers/mvt	
N _{vracht}	Gemiddeld aantal inzittenden in een vrachtauto en tankauto	[1; 3]	1	1.0	pers/mvt	
L _{auto}	Gemiddeld ruimte beslag personenauto in een file	[4; 100]	6.73	6.73	m/mvt	
L _{vracht}	Gemiddeld ruimte beslag vrachtauto of bus in een file	[10; 100]	15.62	15.62	m/mvt	

tabel 35: Periode en verkeersintensiteiten

Symbol	Omschrijving	Domein of functie v(X)	Default-waarden	Invoer-waarde	Eenheid	Opmerking
T _{spits}	Gemiddeld aantal uren 'spits' per etmaal in de tunnelbuis	(0; 12)	-	4.29	uur	Conservatief aangenomen dat door de weeks 6 uur 'spits' (3 uur 's morgens en 3 uur 's avonds) op treedt en geen 'spits' is in het weekend. Dat maakt: (6 uur * 5 dagen) / 7 dagen = 4,29 uur
I _{max}	Maximale verkeerscapaciteit in de buis per spitsuur	(0; 3000)	<= 2300	2300	mtv/jaar	
I _{spitsuur}	gemiddelde verkeersintensiteit in de buis per spitsuur	(0; I _{max} .N _{rij}]	-	3000	mtv/uur	
I _{spits}	verkeersintensiteit tijdens de 'spits' per jaar	= I _{spitsuur} . T _{spits} . 365	-	4697550	mtv/jaar	

tabel 36: Verkeerssamenstelling

Symbol	Omschrijving	Domein of functie v(X)	Default-waarden	Invoer-waarde	Eenheid	Opmerking
A _{auto.s}	fractie personenauto's (of motor) tijdens de 'spits'	[0;1]	-	0.80	-	

$A_{bus.s}$	fractie bussen tijdens de 'spits'	[0;1]	0.01	0.01	-	Het over een week gemiddelde percentage zwaar verkeer in Nederland is 15% [13]. 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%.
$A_{vracht.s}$	fractie vrachtauto's tijdens de 'spits'	[0;1]	0.15	0.14	-	
$A_{tank.s}$	fractie tankauto's tijdens de 'spits'	[0;1]	-	0.05	-	Aangepaste parameter uit vergelijking 4.2

tabel 37: Benedenstroomse file

Symbol	Omschrijving	Domein of functie v(x)	Default-waarden	Invoer-waarde	Eenheid	Opmerking
N_{spits}	het aantal keren (per etmaal dat tijdens de periode 'spits' (nagenoeg) stilstaand verkeer in de buis komt te staan	[0; 10]	-	2.143	1/etmaal	Er dient een grotere waarde dan 0 te worden ingevoerd, gezien altijd een kans is dat zich benedenstrooms van de tunnel een ongeval voordoet waarbij een stilstaande file ontstaat. VB. Mits 1x file ontstaat dan: 5 (werkdagen per week) / 7 (dagen per week) = 0,714 of 260 (werkdagen per jaar) / 365 (dagen per jaar) = 0,712. Indien 2x file ontstaat (om 8:00 en 8:30) dan $2 \times 5/7 = 1,428$.
$T_{filemax}$	maximale tijdsduur voor de opbouw van een benedenstroomse file in de tunnelbuis	(0; 60]	-	10	min	in het geval dat maatregelen zijn getroffen om het groeien van een benedenstroomse file tot in de tunnel te beperken
$N_{filerij}$	aantal rijstroken waarover een benedenstroomse file zich kan opbouwen in de tunnelbuis	[1; N_{rij}]	-	2	-	

tabel 38: Incidentkans

Symbol	Omschrijving	Domein of functie v(x)	Default-waarden	Invoer-waarde	Eenheid	Opmerking
F_{brand}	kans op brand van een voertuig	$[10^{-9}; 10^{-6}]$	0.00000002	0.00000002	$(mvtkm)^{-1}$	Uit de literatuur [13] blijkt dat op basis van 145 branden in vracht - of tankauto's in 1984 een kans op brand van een vrachtauto afgeleid in de orde van $2,3 \times 10^{-8}$. In onderzoek in het buitenland (onder andere de Alpenlanden) [19] laat zien dat de kans op een brand in zwaar verkeer groter is dan de kans op een brand in het overige verkeer. Dit wordt veelal veroorzaakt door oververhitten van de motor bij het klimmen of het oververhitten van de remmen bij het dalen op lange en/of steile hellingen. Dergelijk lange en/of steile hellingen komen in Nederland niet voor. Aanbevolen om voor kans op brand 2×10^{-8} per mvtkm aan te houden

tabel 39: Overige defaultwaarden: uitstroming

Symbol	Omschrijving	Domein of functie v(X)	Default-waarden	Invoer-waarde	Eenheid	Opmerking
P _{beperkt.uit}	kans op beperkte uitstroming bij een tankauto	[0;1]	-	0.67	-	Volgens literatuur (Persson 2002)
P _{uit.middel}	Vervolgkans op middelgrote uitstroming bij een tankauto	[0;1]	-	0.67	-	
P _{uit.groot}	Vervolgkans op grote uitstroming bij een tankauto	[0;1]	-	0.33	-	

tabel 40: Overige defaultwaarden: ontsteking

Symbol	Omschrijving	Domein of functie v(X)	Default-waarden	Invoer-waarde	Eenheid	Opmerking
P _{ont.dir.pers}	kans op directe ontsteking bij personenauto	[0;1]	-	0.90	-	Aangepaste parameters uit Tabel 3.10 van de QRA-tunnels versie 2.0
P _{ont.dir.vracht}	kans op directe ontsteking bij vrachtauto	[0;1]	-	0.90	-	
P _{ont.dir.tank}	kans op directe ontsteking bij tankauto	[0;1]	-	0.90	-	

tabel 41: Overige defaultwaarden: brandgrootte

Symbol	Omschrijving	Domein of functie v(X)	Default-waarden	Invoer-waarde	Eenheid	Opmerking
P _{vijf}	Fractie personenauto brand van 5 MW	[0;1]	-	0.67	-	Volgens literatuur (Persson 2002)
P _{tien}	Fractie op personenauto brand van 10 MW	[0;1]	-	0.33	-	
P _{viijfentwintig}	Fractie op vrachtauto brand van 25 MW	[0;1]	-	0.67	-	
P _{vijftig}	Fractie op vrachtauto brand van 50MW	[0;1]	-	0.20	-	
P _{honderd}	Fractie op vrachtauto brand van 100 MW	[0;1]	-	0.13	-	

tabel 42: Overige defaultwaarden: faalkansen voorzieningen

Symbol	Omschrijving	Domein of functie v(X)	Default-waarden	Invoer-waarde	Eenheid	Opmerking
P _{f.vent}	faalkans van het ventielatiesysteem	[0; 1]	0.02	0.02	-	-

T_{afsluit}	tijdsduur tot het daadwerkelijk afsluiten van de tunnelbuis na opstartsignaal	$= T_{\text{sluit,matrix}} \text{ dan } T_{\text{afsluit}} = 5 \text{ min}$ $= T_{\text{sluit,vrklicht}} \text{ dan } T_{\text{afsluit}} = 3 \text{ min}$ $= T_{\text{sluit,slagboom}} \text{ dan } T_{\text{afsluit}} = 1 \text{ min}$ $= T_{\text{sluit,nee}} \text{ dan } T_{\text{afsluit}} = 60 \text{ min}$	-	Afsluiten door matrixborden	min	aanname o.b.v. een tunnel met matrixborden
----------------------	---	--	---	-----------------------------	-----	--

tabel 43: Overige defaultwaarden: vluchtsnelheid

Symbool	Omschrijving	Domein of functie v(X)	Default-waarden	Invoer-waarde	Eenheid	Opmerking
T_{uitstap}	Gemiddelde uitstaptijd van inzittenden uit een voertuig		0.2	0.2	min	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 kost tijd. Hiermee wordt impliciet aangenomen dat een vluchtinstructie wordt opgevolgd en het zelf onderkennen van het gevaar snel tot actie leidt. Hiermee is 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.
V_{vlucht}	Gemiddelde vluchtsnelheid		1.1	1.1	m/s	Aangepast naar meter per seconden
$V_{\text{vluchtrook}}$	Gemiddelde vluchtsnelheid door rook		0.3	0.3	m/s	

tabel 44: Tussenvariabel: filevorming

Symbol	Omschrijving	Domein of functie v(X)	Default-waarden	Invoer-waarde	Eenheid	Opmerking
$L_{vtg,s}$	Gemiddelde ruimtebeslag van een voertuig tijdens spits	$= (L_{auto} * A_{auto,s}) + (L_{vracht} * (A_{bus,s} + A_{vracht,s} + A_{tank,s}))$	-	8.5080	m/mvt	
$T_{vulduur,s}$	Tijdsduur voor het vullen van de gehele tunnelbuis bij filevorming tijdens de spits	$= (L_{buis} * N_{filerij}) / (L_{vtg,s} * I_{spitsuur})$	-	0.0157	uur	
$T_{file,s}$	Tijdsduur voor het vormen van een benedenstroomse file in de tunnelbuis tijdens de spits	$= \min (T_{filemax}/60, T_{vulduur,s})$	-	0.0157	uur	
$P_{file,ben,s}$	Kans op benedenstroomse file tijdens spits	$= 0$ als $T_{spits} = 0$ $= N_{spits}$ als $T_{spits} > 0$ en $N_{spits} \leq 1$ en $T_{file,s} > T_{spits}$ $= (T_{file,s}/T_{spits}) * N_{spits}$ als $T_{spits} > 0$ en $N_{spits} \leq 1$ en $T_{file,s} \leq T_{spits}$ $= 1$ als $T_{spits} > 0$ en $N_{spits} > 1$ en $T_{file,s} * N_{spits} > T_{spits}$ $= (T_{file,s}/T_{spits}) * N_{spits}$ als $T_{spits} > 0$ en $N_{spits} > 1$ en $T_{file,s} * N_{spits} \leq T_{spits}$	-	0.0078	-	

tabel 45: Tussenvariabel: lengte benedenstroomse file

Symbol	Omschrijving	Domein of functie v(X)	Default-waarden	Invoer-waarde	Eenheid	Opmerking
$L_{fileben,s}$	Lengte file benedenstrooms tijdens spits	$= 0.5 * T_{file,s} * I_{spitsuur} * (L_{vtg,s} / N_{filerij})$		100	m	
L_{bov}	Lengte file bovenstrooms van het incident	$= L_{buis} / 2$	-	100	m	Aanname

tabel 46: Tussenvariabel: lengte bovenstroomse file

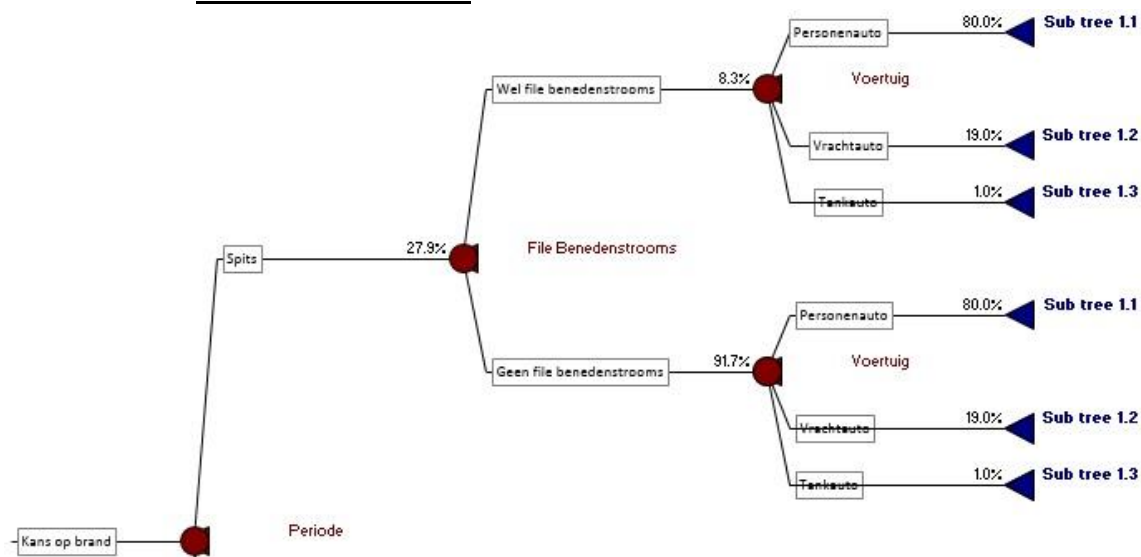
Symbol	Omschrijving	Domein of functie v(X)	Default-waarden	Invoer-waarde	Eenheid	Opmerking
$L_{filebov,s}$	Lengte file bovenstrooms tijdens spits	$= (T_{filebov,s} * I_{spitsuur} * L_{vtg,s}) / (60 * N_{filerij})$		18.12	m	
$T_{filebov,s}$	Tijdsduur voor het vormen van een bovenstroomse file in de tunnelbuis tijdens de spits	$= \min (((L_{bov} + L_{afsluit}) / V_{vtg,s}) + T_{afsluit}; ((L_{bov} + L_{één}) / V_{vtg,s}) + T_{expl})$	-	5.11	min	
T_{expl}	Tijdsduur tot explosie			60.00	min	Aanname dat geen explosie plaatsvindt
$V_{vtg,s}$	Gemiddelde snelheid van een voertuig in meters per minuut	$= ((V_{auto} * A_{auto,s}) + (V_{bus} * A_{bus,s}) + (V_{vracht} * A_{vracht,s} + A_{vracht,s})) * (1000 / 60)$	-	1333.33	m/minuut	Aangepaste parameters uit Vergelijking 6.12

tabel 47: Tussenvariabel: dichtheden in de verschillende gebieden

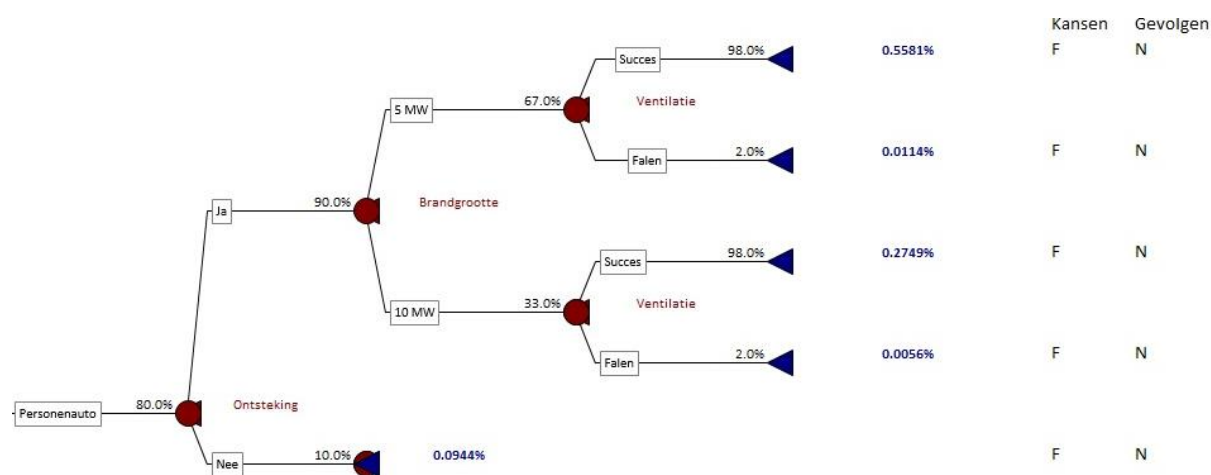
Symbool	Omschrijving	Domein of functie v(X)	Default-waarden	Invoer-waarde	Eenheid	Opmerking
$N_{\text{totaal.vtg}}$	Totaal aantal voertuigen in de tunnel	$= (I_{\text{spitsuur}} / 60) * T_{\text{filebov.s}}$	-	65	-	
$D_{\text{rij,s}}$	Gemiddelde dichtheid, aantal personen per strekkende meter bij rijdend verkeer tijdens spits	$= ((N_{\text{totaal.vtg}} * N_{\text{vtg.s}}) - (D_{\text{file.s}} * L_{\text{filebov.s}})) / (L_{\text{bov}} - L_{\text{filebov.s}})$	-	0.104	pers/m	Aangepaste parameters uit Vergelijking 6.13
$D_{\text{file,s}}$	Gemiddelde dichtheid, aantal personen per strekkende meter bij file tijdens spits	$= (N_{\text{vtg.s}} * N_{\text{filerij}}) / L_{\text{vtg.s}}$	-	0.3785	pers/m	
$N_{\text{vtg.s}}$	Gemiddeld aantal personen in een voertuig tijdens spits	$= (N_{\text{auto}} * A_{\text{auto.s}}) + (N_{\text{bus}} * A_{\text{bus.s}}) + (N_{\text{vracht}} * (A_{\text{vracht.s}} + A_{\text{tank.x}}))$	-	1.6100	pers/mvt	Aangepaste parameters uit Vergelijking 6.14

tabel 48: Tussenvariabel: scenario's met explosieven

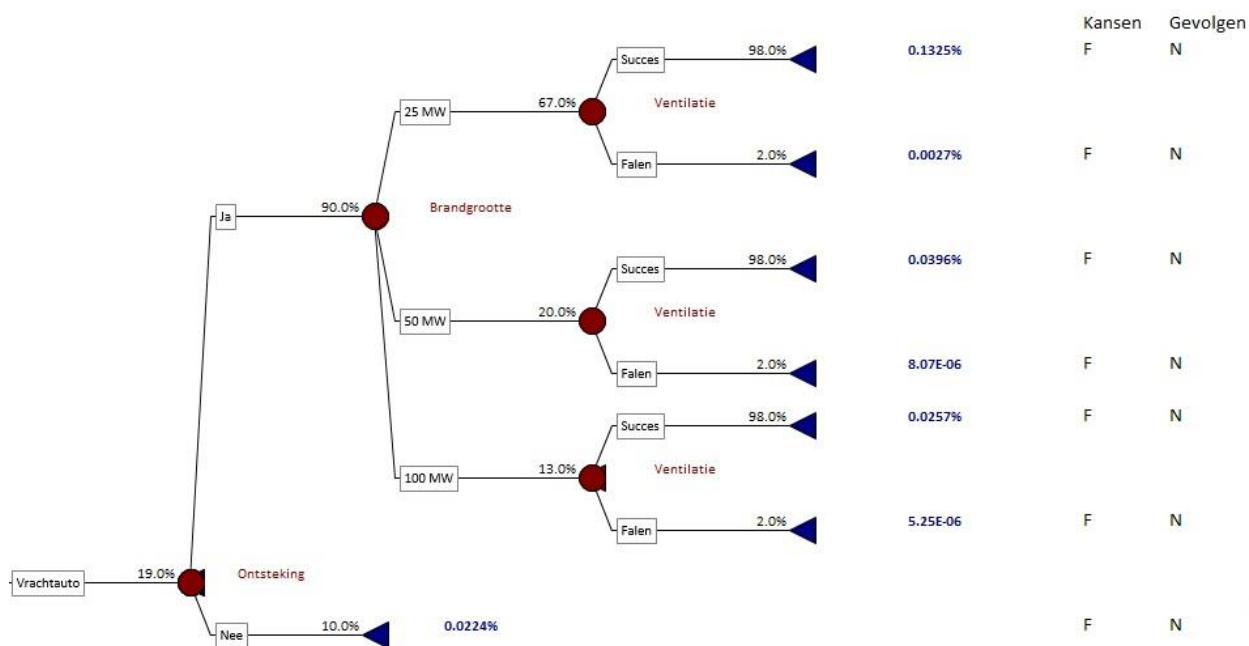
Symbool	Omschrijving	Domein of functie v(X)	Default-waarden	Invoer-waarde	Eenheid	Opmerking
$L_{\text{één}}$	Lengte buiten de tunnel waarin mensen schade kunnen ondervinden			0	m	Aanname dat geen explosie plaatsvindt

H. Gebeurtenissenboom

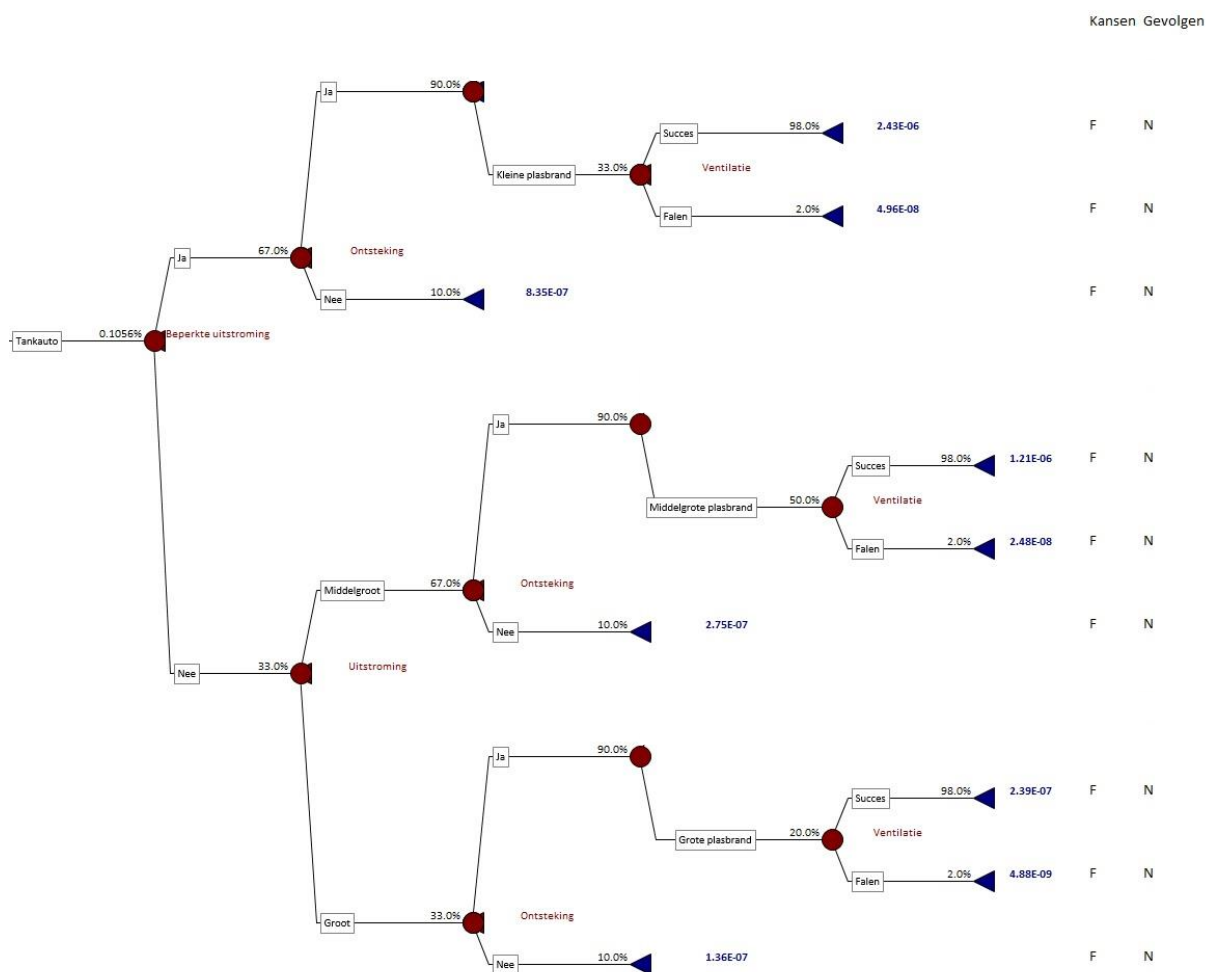
figuur 38: Gebeurtenissenboom 1.0



figuur 39: Sub-boom 1.1



figuur 40: Sub-boom 1.2



figuur 41: Sub-boom 1.3

I. Extrapolatie grenswaarden lineaire en exponentiële

I.1 Temperatuur

Op basis van de onderstaande uit de literatuur van (Purser D. A., 2002) wordt een vergelijking gemaakt van een lineair en exponentieel extrapolatie van de gegevens voor temperatuur. Alleen voor temperatuur is de functie van (Lemaire, Leur, & Kenyon, 2002) ook in de grafiek toegevoegd.

tabel 49: Maximale toelaatbare blootstellingsduur temperatuur en straling (Purser D. A., 2002)

Mode of Heat Transfer	Intensity	Tolerance Time
Radiation	<2.5 kW·m ⁻²	>5 min
	2.5 kW·m ⁻²	30 s
	10 kW·m ⁻²	4 s
Convection	<60°C 100% saturated	>30 min
	100°C <10% H ₂ O ^a	12 min
	120°C <10% H ₂ O	7 min
	140°C <10% H ₂ O	4 min
	160°C <10% H ₂ O	2 min
	180°C <10% H ₂ O	1 min

vergelijking 46: Exponentieel vergelijking temperatuur

$$y = a \times e^{(b \times x)}$$

Waarin

a	179 °C
b	-0.00086
x	Tijdsduur in seconden
Voor deze formule geldt een R ² van 0.9962	

vergelijking 47: Lineair vergelijking temperatuur

$$y = a + (b \times x)$$

Waarin

a	175.6 °C
b	-0.11421
x	Tijdsduur in seconden
Voor deze formule geldt een R ² van 0.9251	

Volgens (Lemaire, Leur, & Kenyon, 2002) is er een verband tussen de blootstellingsduur en temperatuur. Onder de 70 graden Celsius kan men oncomfortabel, maar wel veilig een langere tijd verblijven. Tussen de 70 en 150 graden Celsius wordt de onderstaande formule voorgesteld. Boven de 150 graden Celsius gaat gepaard met veel pijn en binnen vijf minuten huidbrandwonden.

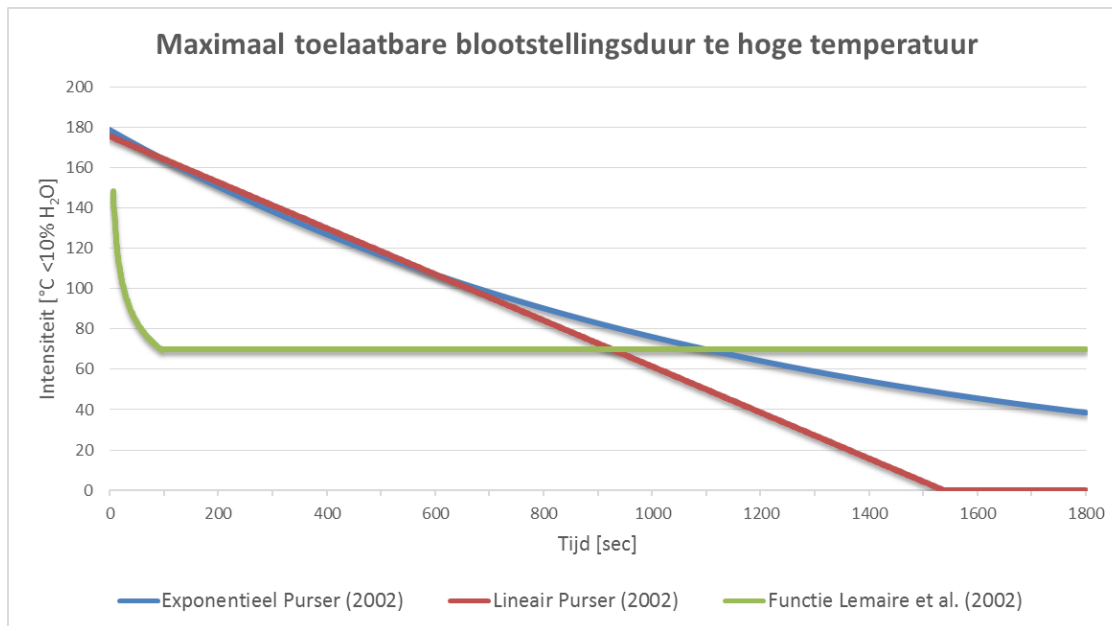
vergelijking 48: maximale blootstellingsduur in functie van tijd en temperatuur

$$t = 5.33 \times 10^8 \times \left(\frac{1}{T^{3.66}}\right)$$

Waarin

t	Blootstellingsduur in seconden
T	Temperatuur in °C

Deze drie functies worden in de volgende grafiek weergegeven.



figuur 42: Vergelijking lineair en exponentieel vergelijking te hoge temperaturen

I.2 Straling

Voor straling worden grenswaarden gebaseerd op de bovenstaande tabel, tabel 51, uit de literatuur van (Purser D. A., 2002). Net als bij temperatuur wordt een vergelijking gemaakt van een lineair en exponentieel extrapolatie alleen nu van de gegevens voor straling.

vergelijking 49: Exponentieel vergelijking straling

$$y = a \times e^{(b \times x)}$$

Waarin

a	12.4 °C
b	-0.05332
x	Tijdsduur in seconden
Voor deze formule geldt een R ² van 1.0	

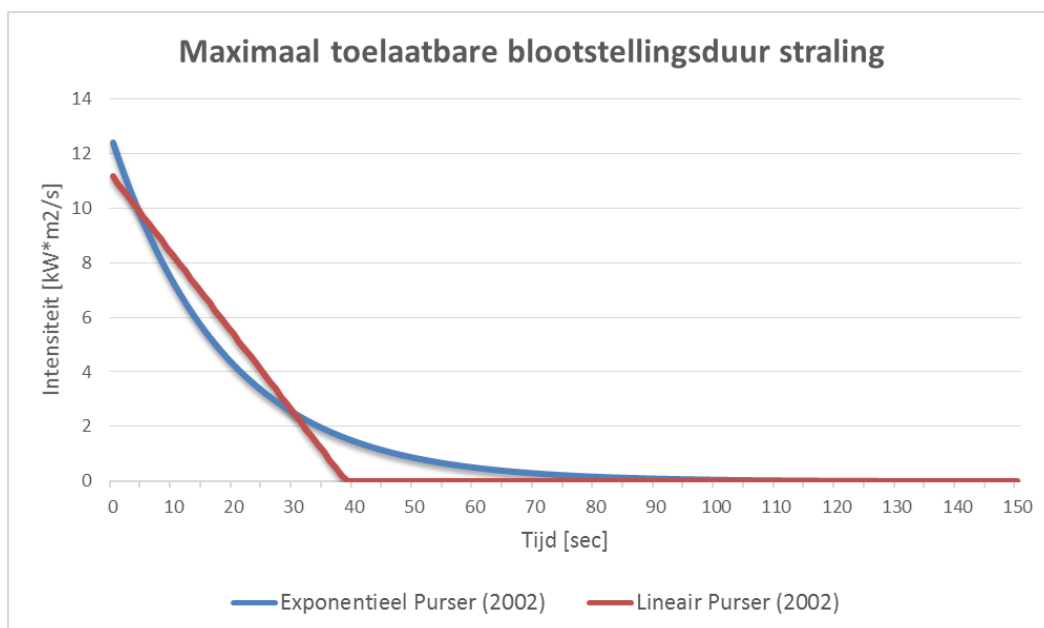
vergelijking 50: Lineair vergelijking straling

$$y = a + (b \times x)$$

Waarin

a	11.2 °C
b	-0.28846
x	Tijdsduur in seconden
Voor deze formule geldt een R ² van 1.0	

Deze twee functies worden in de volgende grafiek weergegeven.



figuur 43: Vergelijking lineair en exponentieel vergelijking straling

I.3 CO

Voor CO zijn minimale en maximale blootstellingsduur gevonden. De minimale, zogenoemde ondergrenzen worden bepaald door middel van AEGL-2 en AEGL-3. Voor AEGL-1 is voor CO onvoldoende data beschikbaar (Committee on Acute Exposure Guideline Levels; Committee on Toxicology; National Research Council, 2010). Op basis van de onderstaande tabel wordt een vergelijking gemaakt van een lineair en exponentieel extrapolatie van de minimale blootstellingsduur voor de AEGL-2 en AEGL-3 van CO.

tabel 50: Beschermingswaarde CO in rook

CO AEGL's	Blootstellingsduur 10 min. (ppm)	Blootstellingsduur 30 min. (ppm)
AEGL-1	-	-
AEGL-2	420	150
AEGL-3	1700	600

vergelijking 51: Exponentieel vergelijking AEGL-2

$$y = a \times e^{(b \times x)}$$

Waarin

a 703 ppm
 b -0.00086
 x Tijdsduur in seconden
 Voor deze formule geldt een R² van 1.0

vergelijking 52: Lineair vergelijking AEGL-2

$$y = a + (b \times x)$$

Waarin

a 555 ppm
 b -0.22500

x Tijdsduur in seconden
Voor deze formule geldt een R^2 van 1.0

vergelijking 53: Exponentieel vergelijking AEGL-3

$$y = a \times e^{(b \times x)}$$

Waarin

a 2862 ppm
b -0.00087
x Tijdsduur in seconden
Voor deze formule geldt een R^2 van 1.0

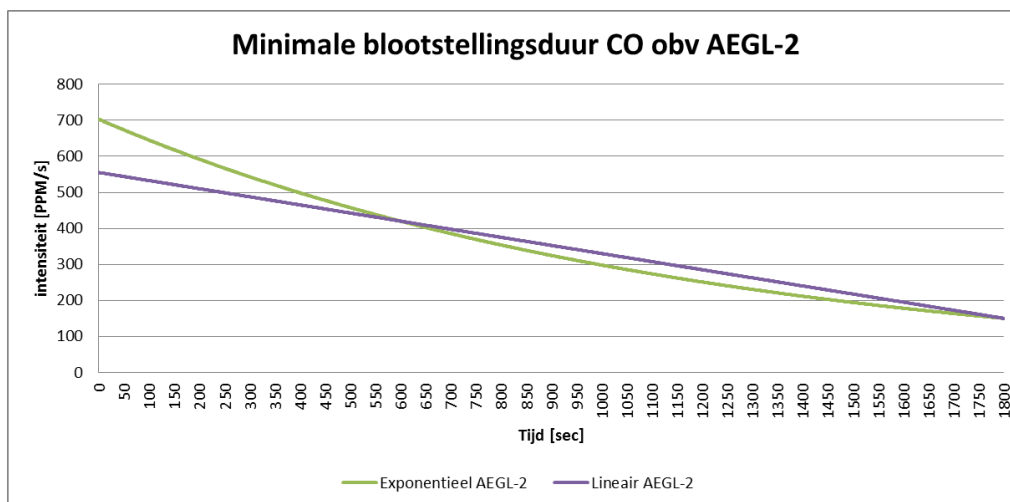
vergelijking 54: Lineair vergelijking AEGL-3

$$y = a + (b \times x)$$

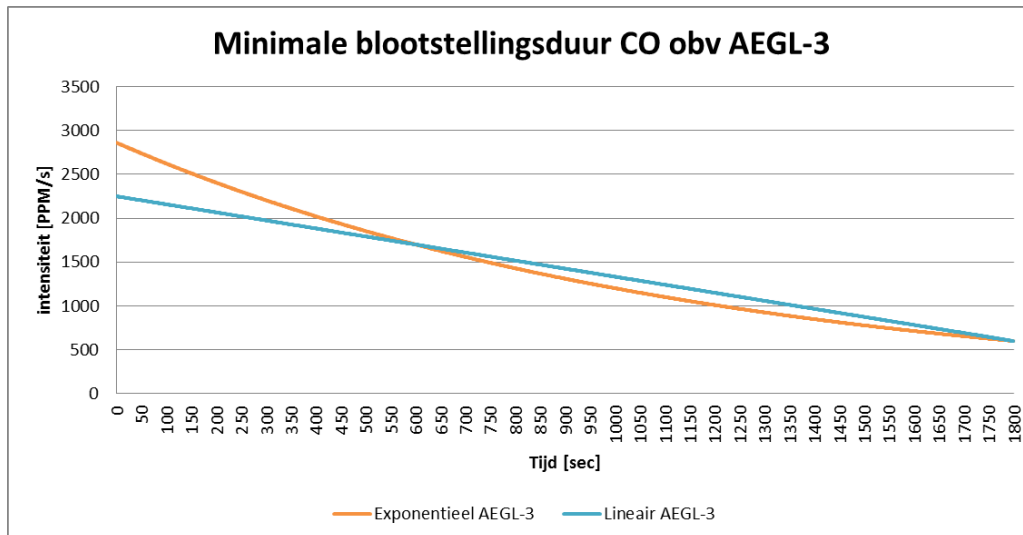
Waarin

a 2250 ppm
b -0.91667
x Tijdsduur in seconden
Voor deze formule geldt een R^2 van 1.0

De exponentiele en lineaire functie voor AEGL-2 en AEGL-3 worden in de grafieken hieronder weergegeven.



figuur 44: Grafiek minimale blootstellingsduur CO obv AEGL-2



figuur 45: Grafiek minimale blootstellingsduur CO obv AEGL-3

Op basis van de onderstaande tabel uit de literatuur van (Purser D. A., 2002) wordt een vergelijking gemaakt van een lineair en exponentieel extrapolatie van de maximale blootstellingsduur voor CO.

tabel 51: Maximale blootstellingsduur toxische stoffen (Purser D. A., 2002)

	5 min		30 min	
	Incapacitation	Death	Incapacitation	Death
CO	6000–8000 ppm	12,000–16,000 ppm	1400–1700 ppm	2500–4000 ppm ^{44,45}
HCN	150–200 ppm	250–400 ppm	90–120 ppm	170–230 ppm ^{45,59}
Low O ₂	10–13%	<5%	<12%	6–7% ^{21,25,45}
CO ₂	7–8%	>10%	6–7%	>9% ^{21,25,45}

vergelijking 55: Exponentieel vergelijking

$$y = a \times e^{(b \times x)}$$

Waarin

a 9463 ppm
b -0.00101
x Tijdsduur in seconden
Voor deze formule geldt een R² van 1.0

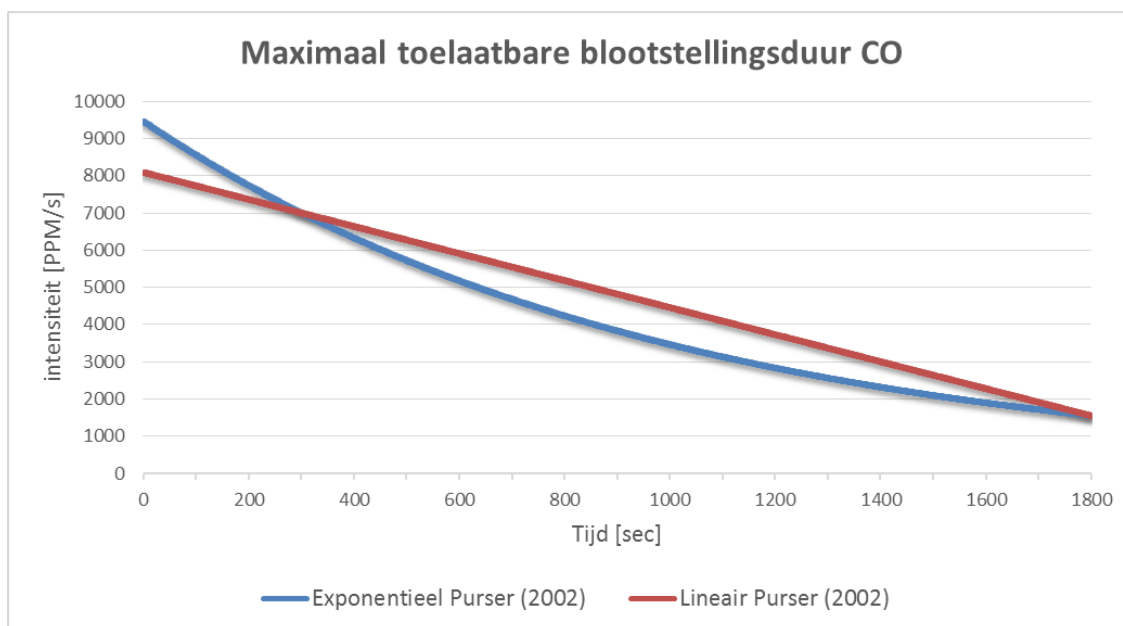
vergelijking 56: Lineair vergelijking

$$y = a + (b \times x)$$

Waarin

a 8090 ppm
b -3.63333
x Tijdsduur in seconden
Voor deze formule geldt een R² van 1.0

Deze twee functies worden in de volgende grafiek weergegeven.



figuur 46: Vergelijking lineair en exponentieel vergelijking CO

J. Casestudies

In het onderzoek zijn drie casestudies behandeld de gegevens van de betreffende casestudies worden in de onderstaande paragrafen behandeld.

J.1 Mont Blanc tunnel

De invoerparameters die zijn gebruikt bij de Mont Blanc tunnel worden behandeld in de onderstaande paragraaf input. Vervolgens worden de FN-curves van de Mont Blanc tunnel weergegeven in de paragraaf Output.

*Input***tabel 52: Inputwaarden Mont Blanc tunnel**

Symbool	Omschrijving	Default-waarden	Invoer-waarde	Eenheid	Opmerking
LC	Het percentage van de populatie dat minimaal moet reageren op de hoeveelheid dosis straling (Mediaan van de "Lethal Concentration")	50	50%	-	Aanname o.b.v. default-waarde
Stralingéén	Ondergrens 1egraads brandwonden volgens stralingsdosis ($t * Q^{4/3}$) en probit bij LC%	-	2.817	s.(W/m ²)	O.b.v. probit uit de literatuur: 1 ^e brandwonden: Probit = $-39,83 + 3,0186 * \ln(t * q^{4/3})$
Stralingtwee	Ondergrens 2egraads brandwonden volgens stralingsdosis ($t * Q^{4/3}$) en probit bij LC%	-	8.434	s.(W/m ²)	O.b.v. probit uit de literatuur: 2 ^e brandwonden: Probit = $-43,14 + 3,0186 * \ln(t * q^{4/3})$
Stralingdrie	Ondergrens dood volgens stralingsdosis ($t * Q^{4/3}$) en probit bij LC%	-	10.470	s.(W/m ²)	O.b.v. probit uit de literatuur: Lethaal letsel: Probit = $-36,38 + 2,56 * \ln(t * q^{4/3})$
COéén	CO waarop mensen CO-letsel 1 oplopen	703	703	ppm	D.m.v extrapolatie van AEGL-2 gegevens is de defaultwaarde bepaald.
COTwee	CO waarop mensen CO-letsel 2 oplopen	2862	2862	ppm	D.m.v extrapolatie van AEGL-3 gegevens is de defaultwaarde bepaald.
CODrie	CO waarop mensen CO dood gaan	9463	9463	ppm	D.m.v extrapolatie van gegevens uit Purser (2002) is de defaultwaarde bepaald.
Tempéén	Temperatuur waarop mensen temperatuur letsel 1 oplopen	-	60	°C	Default waarde op basis van COB en Bouwdienst Rijkswaterstaat (2004)
Temptwee	Temperatuur waarop mensen temperatuur letsel 2 oplopen	-	120	°C	Default waarde op basis van Purser & Buckley (1983) en Bryan (1986)
Tempdrie	Temperatuur waarop mensen overlijden	179	179	°C	D.m.v extrapolatie van gegevens uit Purser (2002) is de defaultwaarde bepaald.
Factor	Het interval van de tunnel waarin gewonden moeten worden berekend.	10	10	m	Formules in Excel zijn voor 100 kolommen ingevoerd. Dat betekent als Factor = 10 m de maximale lente van de tunnel 100 x 10 meter = 1000 meter;
Geometrie					
L _{buis}	Lengte (gesloten deel) van de tunnel	-	1000	m	Maximale lengte dat in dit model kan worden ingevoerd.
B _{buis}	Breedte van de tunnelbuis	-	8.6	m	
L _{hart}	Hart-op-hart afstand van de vluchtdeuren	-	600	m	Schuilplaats met verse lucht en protectie van de tunnel door een muur die twee uur brandwerend is zijn volgens PIARC (2006) bevinden zich om de 600 meter
N _{rij}	Aantal rijstroken in de tunnelbuis	-	2	-	Er zijn 2 rijstroken (tweerichtingsverkeer).
Voorzieningen					
A _{vent}	Is een langsventilatie-systeem aanwezig?	-	Ja	-	In de Mont Blanc tunnel wordt Semi-dwarsventilatie gebruikt. Echter tijdens deze brand wordt verse lucht van de Italiaanse kant aangezogen waardoor er een langsventilatie werd gecreëerd. De CFD-modellen zijn

					gebaseerd op langsventilatie. Daarom wordt conservatief aangenomen dat er geen ventilatie is in de tunnel. Hierbij wordt het effect van de semi-dwarsventilatie volledig genegeerd.
L _{afsluit}	Afstand tussen de plaats waar de tunnelbuis wordt afgesloten en de ingang van de tunnelbuis	-	100	m	Aanname
Motorvoertuigen					
V _{auto}	Gemiddelde snelheid van personenauto's	-	70	km/uur	Snelheidslimiet in de Mont Blanc tunnel is voor elk voertuig 70 km/h
V _{bus}	Gemiddelde snelheid van bussen	-	70	km/uur	Snelheidslimiet in de Mont Blanc tunnel is voor elk voertuig 70 km/h
V _{vracht}	Gemiddelde snelheid van vrachtauto's	-	70	km/uur	Snelheidslimiet in de Mont Blanc tunnel is voor elk voertuig 70 km/h
N _{auto}	Gemiddeld aantal inzittenden in een personenauto	1.5	1.5	pers/mvt	Aanname o.b.v. default-waarde
N _{bus}	Gemiddeld aantal inzittenden in een bus	22	22.0	pers/mvt	Aanname o.b.v. default-waarde
N _{vracht}	Gemiddeld aantal inzittenden in een vrachtauto en tankauto	1	1.0	pers/mvt	Aanname o.b.v. default-waarde
L _{auto}	Gemiddeld ruimte beslag personenauto in een file	6.73	6.73	m/mvt	Aanname o.b.v. default-waarde
L _{vracht}	Gemiddeld ruimte beslag vrachtauto of bus in een file	15.62	15.62	m/mvt	Aanname o.b.v. default-waarde
Periode en verkeersintensiteiten					
T _{spits}	Gemiddeld aantal uren 'spits' per etmaal in de tunnelbuis	-	4.29	uur	Conservatief aangenomen dat door de weeks 6 uur 'spits' (3 uur 's morgens en 3 uur 's avonds) op treedt en geen 'spits' is in het weekend. Dat maakt: (6 uur * 5 dagen) / 7 dagen = 4,29 uur
I _{max}	Maximale verkeerscapaciteit in de buis per spitsuur	<= 2300	2300	mtv/jaar	Aanname o.b.v. default-waarde
I _{spitsuur}	gemiddelde verkeersintensiteit in de buis per spitsuur	-	1276	mtv/uur	Aanname: totaal rijden er volgens PIARC (2006) dagelijks 5473 voertuigen. Deze voertuigen delen door T _{spits} = 5473 / 4.29 = 1276 mtv/uur
I _{spits}	verkeersintensiteit tijdens de 'spits' per jaar	-	1996029	mtv/jaar	Aanname volgens PIARC (2006)
Verkeerssamenstelling					
A _{auto.s}	fractie personenauto's (of motor) tijdens de 'spits'	-	0.60	-	Volgens (PIARC, 2006)
A _{bus.s}	fractie bussen tijdens de 'spits'	0.01	0.01	-	Volgens (PIARC, 2006)
A _{vracht.s}	fractie vrachtauto's tijdens de 'spits'	0.15	0.30	-	Volgens (PIARC, 2006)
A _{tank.s}	fractie tankauto's tijdens de 'spits'	-	0.09	-	Aanname dat 9% tankauto's zijn van het totale vrachtverkeer
Benedenstroomse file					
N _{spits}	het aantal keren (per etmaal dat tijdens de periode 'spits' (nagenoeg) stilstaand verkeer in de buis komt te staan	-	1.429	1/etmaal	Aanname dat elke dag 2x file ontstaat (om 8:00 en 8:30) dan 2 x 5/7 = 1,429.
T _{filemax}	maximale tijdsduur voor de opbouw van een benedenstroomse file in de tunnelbuis	-	10	min	Aanname
N _{filerij}	aantal rijstroken waarover een benedenstroomse file zich kan opbouwen in de tunnelbuis	-	1	-	Door tweerichtingsverkeer kan maar over 1 rijstrook file worden opgebouwd.
Incidentkans					
F _{brand}	kans op brand van een voertuig	0.00000002	0.00000002	(mvtkm) ⁻¹	Aanname o.b.v. default-waarde
Overige defaultwaarden uitstroming					
P _{beperkt.uit}	kans op beperkte uitstroming bij een tankauto	-	0.67	-	Volgens literatuur (Persson 2002)
P _{uit.middel}	Vervolgkans op middelgrote uitstroming bij een tankauto	-	0.67	-	Volgens literatuur (Persson 2002)
P _{uit.groot}	Vervolgkans op grote uitstroming bij een tankauto	-	0.33	-	Volgens literatuur (Persson 2002)
Overige defaultwaarden: ontsteking					
P _{ont.dir.pers}	kans op directe ontsteking bij personenauto	-	0.90	-	Aanname
P _{ont.dir.vracht}	kans op directe ontsteking bij vrachtauto	-	0.90	-	Aanname
P _{ont.dir.tank}	kans op directe ontsteking bij tankauto	-	0.90	-	Aanname
Overige defaultwaarden: brandgrootte					
P _{vijf}	Fractie personenauto brand van 5 MW	-	0.67	-	Volgens literatuur (Persson 2002)

P _{tien}	Fractie op personenauto brand van 10 MW	-	0.33	-	Volgens literatuur (Persson 2002)
P _{viifentwintig}	Fractie op vrachtauto brand van 25 MW	-	0.67	-	Volgens literatuur (Persson 2002)
P _{viiftig}	Fractie op vrachtauto brand van 50MW	-	0.20	-	Volgens literatuur (Persson 2002)
P _{honderd}	Fractie op vrachtauto brand van 100 MW	-	0.13	-	Volgens literatuur (Persson 2002)
Overige defaultwaarden: faalkansen voorzieningen					
P _{f,vent}	faalkans van het ventilatiesysteem	0.02	0.02	-	Aanname o.b.v. default-waarde
T _{afsluit}	tijdsduur tot het daadwerkelijk afsluiten van de tunnelbuis na opstartsignaal	-	Afsluiten door slagboom, verkeerslicht & matrixborden	min	Volgens literatuur (PIARC, 2006)
Overige defaultwaarden: vluchtsnelheid					
T _{uitstap}	Gemiddelde uitstaptijd van inzittenden uit een voertuig	0.2	0.2	min	Aanname o.b.v. default-waarde
V _{vlucht}	Gemiddelde vluchtsnelheid	1.1	1.1	m/s	Aanname o.b.v. default-waarde
V _{vluchtrook}	Gemiddelde vluchtsnelheid door rook	0.3	0.3	m/s	Aanname o.b.v. default-waarde
Tussenvariabel: filevorming					
L _{vtg,s}	Gemiddelde ruimtebeslag van een voertuig tijdens spits	-	10.2860	m/mvt	
T _{vulduur,s}	Tijdsduur voor het vullen van de gehele tunnelbuis bij filevorming tijdens de spits	-	0.0762	uur	
T _{file,s}	Tijdsduur voor het vormen van een benedenstroomse file in de tunnelbuis tijdens de spits	-	0.0762	uur	
P _{file,ben,s}	Kans op benedenstroomse file tijdens spits	-	0.0254	-	
Tussenvariabel: lengte benedenstroomse file					
L _{fileben,s}	Lengte file benedenstrooms tijdens spits		500	m	
L _{pov}	Lengte file bovenstrooms van het incident	-	500	m	Aanname
Tussenvariabel: lengte bovenstroomse file					
L _{filebov,s}	Lengte file bovenstrooms tijdens spits		331.25	m	
T _{filebov,s}	Tijdsduur voor het vormen van een bovenstroomse file in de tunnelbuis tijdens de spits	-	1.51	min	
T _{expl}	Tijdsduur tot explosie		60.00	min	Aanname dat geen explosie plaatsvindt
V _{vtg,s}	Gemiddelde snelheid van een voertuig in meters per minuut	-	1166.67	m/minuut	
Tussenvariabel: dichtheden in de verschillende gebieden					
D _{rij,s}	Gemiddelde dichtheid, aantal personen per strekkende meter bij rijdend verkeer tijdens spits	-	0.0275	pers/m	
D _{file,s}	Gemiddelde dichtheid, aantal personen per strekkende meter bij file tijdens spits	-	0.1468	pers/m	
N _{vtg,s}	Gemiddeld aantal personen in een voertuig tijdens spits	-	1.5100	pers/mvt	
Tussenvariabel: scenario's met explosieven					
L _{één}	Lengte buiten de tunnel waarin mensen schade kunnen ondervinden		0	m	Aanname dat geen explosie plaatsvindt

Output

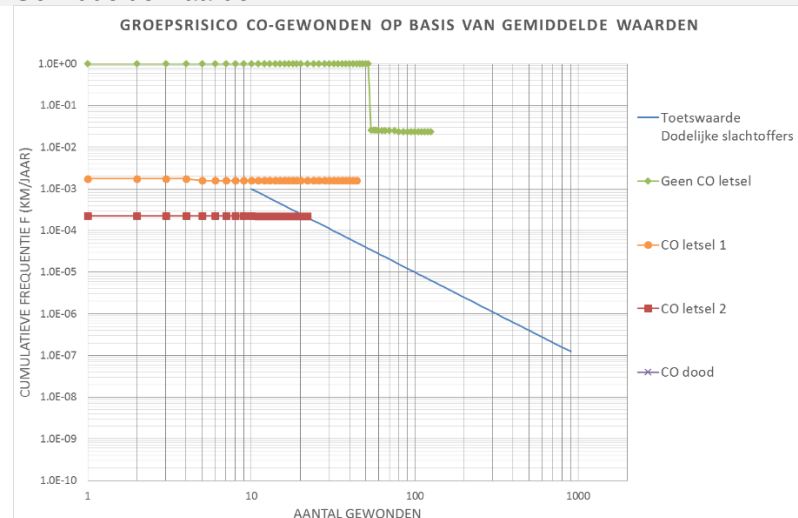
Kansentabel

			Waarden op basis van gemiddelde dosis												Waarden op basis van maximale dosis											
Scenario	Kansen	Totaal aantal blootgestelden	Gewonden ten aanzien van				Gewonden ten aanzien van				Gewonden ten aanzien van				Gewonden ten aanzien van				Gewonden ten aanzien van				Gewonden ten aanzien van			
			Geen CO letsel	CO letsel 1	CO letsel 2	CO dood	Geen stralingsletsel	Stralingsletsel 1	Stralingsletsel 2	Straling dood	Geen temperatuursletsel	Temperatuursletsel 1	Temperatuursletsel 2	Temperatuur dood	Geen CO letsel	CO letsel 1	CO letsel 2	CO dood	Geen stralingsletsel	Stralingsletsel 1	Stralingsletsel 2	Straling dood	Geen temperatuursletsel	Temperatuursletsel 1	Temperatuursletsel 2	Temperatuur dood
G1	0.0090048439	130	130	0	0	0	128	2	0	0	130	0	0	0	130	0	0	0	127	1	0	2	130	0	0	0
G2	0.0001837723	130	130	0	0	0	128	2	0	0	130	0	0	0	130	0	0	0	127	1	0	2	130	0	0	0
G3	0.0044352216	130	130	0	0	0	128	2	0	0	130	0	0	0	130	0	0	0	127	1	0	2	130	0	0	0
G4	0.0000905147	130	130	0	0	0	128	2	0	0	130	0	0	0	130	0	0	0	127	1	0	2	130	0	0	0
G5	0.0015238170	130	130	0	0	0	130	0	0	0	130	0	0	0	130	0	0	0	130	0	0	0	130	0	0	0
G6	0.0046525027	130	130	0	0	0	127	1	0	2	130	0	0	0	130	0	0	0	123	4	0	3	130	0	0	0
G7	0.0000949490	130	130	0	0	0	127	1	0	2	130	0	0	0	130	0	0	0	123	4	0	3	130	0	0	0
G8	0.0013888068	130	130	0	0	0	128	2	0	0	103	27	0	0	130	0	0	0	123	2	0	5	82	48	0	0
G9	0.0000283430	130	130	0	0	0	128	2	0	0	130	0	0	0	130	0	0	0	123	2	0	5	116	14	0	0
G10	0.0009027244	130	84	46	0	0	130	0	0	0	81	40	9	0	61	69	0	0	124	1	1	4	72	30	28	0
G11	0.0000184229	130	130	0	0	0	130	0	0	0	115	15	0	0	115	15	0	0	124	1	1	4	110	9	11	0
G12	0.0007873054	130	130	0	0	0	130	0	0	0	130	0	0	0	130	0	0	0	130	0	0	0	130	0	0	0
G13	0.0013507266	130	130	0	0	0	128	2	0	0	103	27	0	0	130	0	0	0	123	2	0	5	82	48	0	0
G14	0.0000275658	130	130	0	0	0	128	2	0	0	130	0	0	0	130	0	0	0	123	2	0	5	116	14	0	0
G15	0.0001531436	130	130	0	0	0	130	0	0	0	130	0	0	0	130	0	0	0	130	0	0	0	130	0	0	0
G16	0.0004457398	130	84	46	0	0	130	0	0	0	81	40	9	0	61	69	0	0	124	1	1	4	72	30	28	0
G17	0.0000090967	130	130	0	0	0	130	0	0	0	115	15	0	0	115	15	0	0	124	1	1	4	110	9	11	0
G18	0.0000505374	130	130	0	0	0	130	0	0	0	130	0	0	0	130	0	0	0	130	0	0	0	130	0	0	0
G19	0.0002195435	130	60	46	24	0	123	5	0	2	102	4	6	18	49	16	65	0	119	5	1	5	97	5	3	25
G20	0.0000044805	130	102	17	11	0	123	5	0	2	112	3	3	12	86	32	12	0	119	5	0	6	107	3	3	17
G21	0.0000248915	130	130	0	0	0	130	0	0	0	130	0	0	0	130	0	0	0	130	0	0	0	130	0	0	0
G22	0.3455591561	55	55	0	0	0	53	2	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	52	1	0	2	55	0	0	0
G23	0.0070522277	55	55	0	0	0	53	2	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	52	1	0	2	55	0	0	0
G24	0.1702007784	55	55	0	0	0	53	2	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	52	1	0	2	55	0	0	0
G25	0.0034734853	55	55	0	0	0	53	2	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	52	1	0	2	55	0	0	0
G26	0.0584761830	55	55	0	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0
G27	0.1785388973	55	55	0	0	0	52	1	0	2	55	0	0	0	55	0	0	0	50	2	0	3	55	0	0	0
G28	0.0036436510	55	55	0	0	0	52	1	0	2	55	0	0	0	55	0	0	0	50	2	0	3	55	0	0	0
G29	0.0532951932	55	55	0	0	0	53	2	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	50	2	0	3	52	3	0	0
G30	0.0010876570	55	55	0	0	0	53	2	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	50	2	0	3	52	3	0	0
G31	0.0346418756	55	55	0	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	50	2	1	2	55	0	0	0
G32	0.0007069771	55	55	0	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	50	2	1	2	55	0	0	0
G33	0.0302126946	55	55	0	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0
G34	0.0518338734	55	55	0	0	0	53	2	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	50	2	0	3	52	3	0	0
G35	0.0010578342	55	55	0	0	0	53	2	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	50	2	0	3	52	3	0	0
G36	0.0058768564	55	55	0	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0
G37	0.0171051782	55	55	0	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	50	2	1	2	55	0	0	0
G38	0.0003490853	55	55	0	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	50	2	1	2	55	0	0	0
G39	0.0019393626	55	55	0	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0
G40	0.0084249385	55	55	0	0	0	53	2	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	52	1	0	2	55	0	0	0
G41	0.0001719375	55	50	5	0	0	53	2	0	0	55	0	0	0	41	14	0	0	50	2	0	3	55	0	0	0
G42	0.0009552085	55	55	0	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0	55	0	0	0

figuur 47: Kansentabel Mont Blanc tunnel

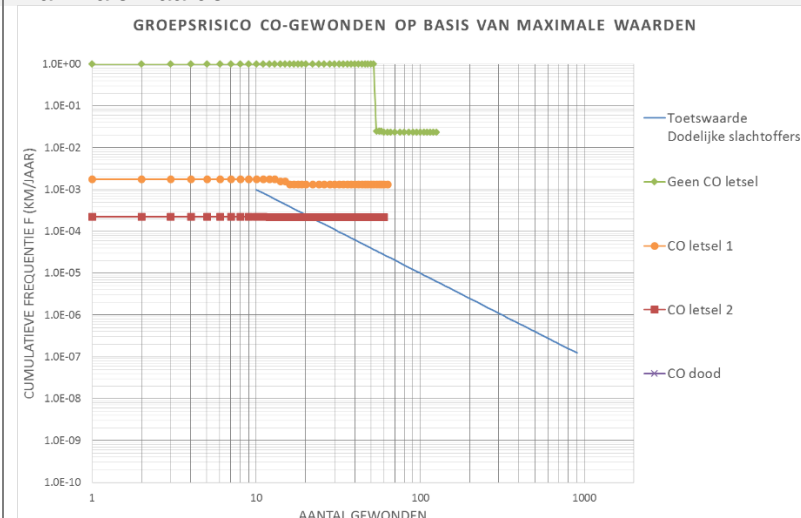
FN-curves

Gemiddelde waarden

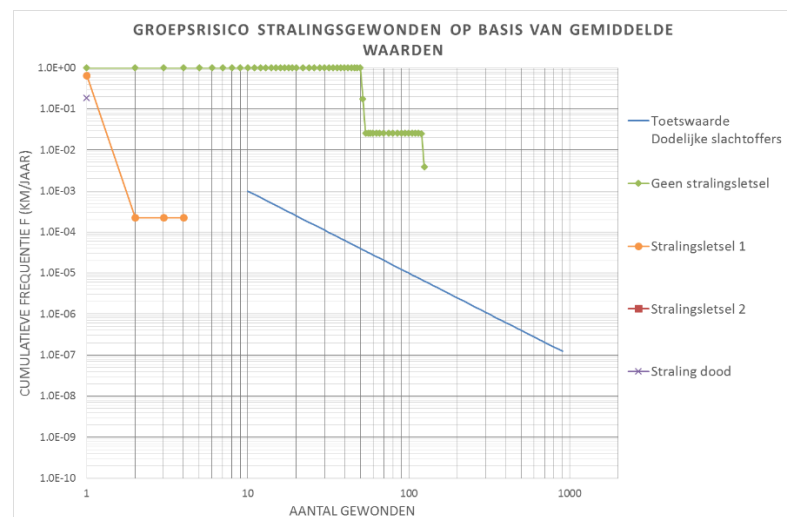


figuur 48: FN-curve Co gemiddeld Mont Blanc tunnel

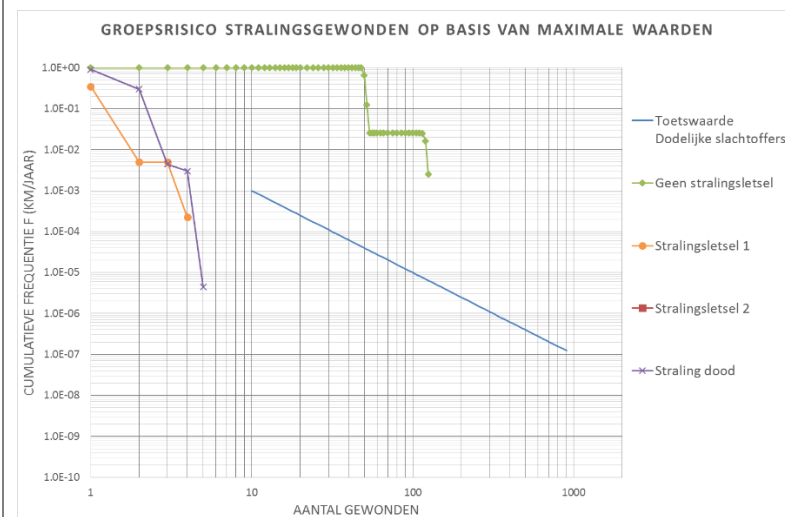
Maximale waarden



figuur 49: FN-curve Co maximaal Mont Blanc tunnel



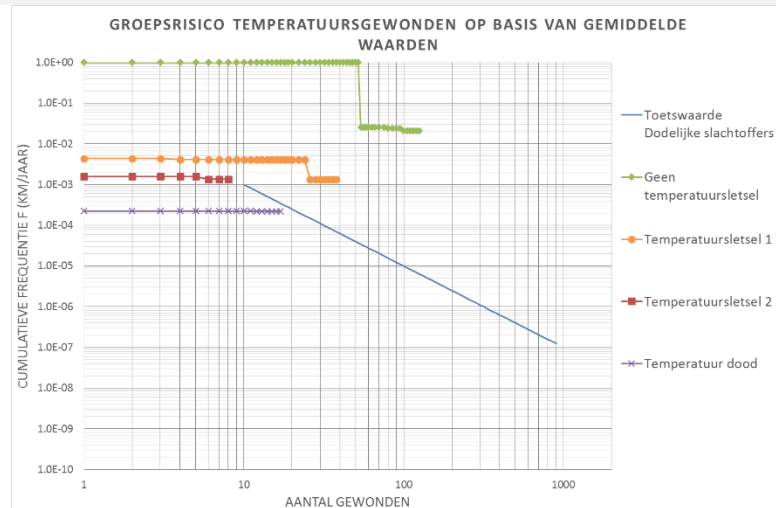
figuur 50: FN-curve straling gemiddeld Mont Blanc tunnel



figuur 51: FN-curve straling maximaal Mont Blanc tunnel

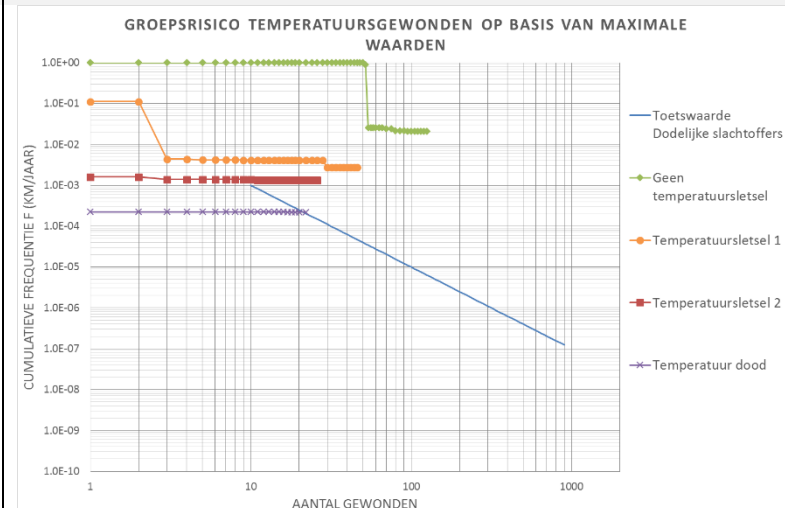
FN-curves

Gemiddelde waarden



figuur 52: FN-curve temperatuur gemiddeld Mont Blanc tunnel

Maximale waarden



figuur 53: FN-curve temperatuur maximaal Mont Blanc tunnel

J.2 Tauerntunnel

De invoerparameters die zijn gebruikt bij de Tauerntunnel worden behandeld in de onderstaande paragraaf input. Vervolgens worden de FN-curves van de Tauerntunnel weergegeven in de paragraaf Output.

Input

tabel 53: Inputwaarden Tauerntunnel

Symbol	Omschrijving	Default-waarden	Invoer-waarde	Eenheid	Opmerking
LC	Het percentage van de populatie dat minimaal moet reageren op de hoeveelheid dosis straling (Mediaan van de "Lethal Concentration")	50	50%	-	Aanname o.b.v. default-waarde
Stralingéén	Ondergrens 1egraads brandwonden volgens stralingsdosis ($t * Q^{4/3}$) en probit bij LC%	-	2.817	s.(W/m ²)	O.b.v. probit uit de literatuur: 1 ^e brandwonden: Probit = $-39,83 + 3,0186 * \ln(t * q^{4/3})$
Stralingtwee	Ondergrens 2egraads brandwonden volgens stralingsdosis ($t * Q^{4/3}$) en probit bij LC%	-	8.434	s.(W/m ²)	O.b.v. probit uit de literatuur: 2 ^e brandwonden: Probit = $-43,14 + 3,0186 * \ln(t * q^{4/3})$
Stralingdrie	Ondergrens dood volgens stralingsdosis ($t * Q^{4/3}$) en probit bij LC%	-	10.470	s.(W/m ²)	O.b.v. probit uit de literatuur: Lethaal letsel: Probit = $-36,38 + 2,56 * \ln(t * q^{4/3})$
COéén	CO waarop mensen CO-letsel 1 oplopen	703	703	ppm	D.m.v extrapolatie van AEGL-2 gegevens is de defaultwaarde bepaald.
COTwee	CO waarop mensen CO-letsel 2 oplopen	2862	2862	ppm	D.m.v extrapolatie van AEGL-3 gegevens is de defaultwaarde bepaald.
CODrie	CO waarop mensen CO dood gaan	9463	9463	ppm	D.m.v extrapolatie van gegevens uit Purser (2002) is de defaultwaarde bepaald.
Tempéén	Temperatuur waarop mensen temperatuur letsel 1 oplopen	-	60	°C	Default waarde op basis van COB en Bouwdienst Rijkswaterstaat (2004)
Temptwee	Temperatuur waarop mensen temperatuur letsel 2 oplopen	-	120	°C	Default waarde op basis van Purser & Buckley (1983) en Bryan (1986)
Tempdrie	Temperatuur waarop mensen overlijden	179	179	°C	D.m.v extrapolatie van gegevens uit Purser (2002) is de defaultwaarde bepaald.
Factor	Het interval waarin gewonden moeten worden berekend.	10	10	m	Formules in Excel zijn voor 100 kolommen ingevoerd. Dat betekent als Factor = 10 m de maximale lente van de tunnel 100 x 10 meter = 1000 meter;
Geometrie					
L _{buis}	Lengte (gesloten deel) van de tunnel	-	1000	m	Maximale lengte dat in dit model kan worden ingevoerd.
B _{buis}	Breedte van de tunnelbuis	-	9.5	m	Volgens literatuur (PIARC, 2006)
L _{hart}	Hart-op-hart afstand van de vluchtdeuren	-	212	m	Volgens (PIARC, 2006) zijn er om de 212 meter veiligheidsnissen
N _{rij}	Aantal rijstroken in de tunnelbuis	-	2	-	Volgens literatuur (PIARC, 2006) (tweerichtingsverkeer)
Voorzieningen					
A _{vent}	Is een langsventilatiesysteem aanwezig?	-	Nee	-	In de Tauerntunnel wordt dwarsventilatie gebruikt. De CFD-modellen zijn gebaseerd op langsventilatie. Daarom wordt conservatief aangenomen dat er geen ventilatie is in de Tauerntunnel. Hierbij wordt het effect van de dwarsventilatie volledig genegeerd.
L _{afsluit}	Afstand tussen de plaats waar de tunnelbuis wordt afgesloten en de ingang van de tunnelbuis	-	100	m	Aanname
Motorvoertuigen					
V _{auto}	Gemiddelde snelheid van personenauto's	-	80	km/uur	Snelheidslimiet in de Tauerntunnel is voor elk voertuig 80 km/h
V _{bus}	Gemiddelde snelheid van bussen	-	80	km/uur	Snelheidslimiet in de Tauerntunnel is voor elk voertuig 80 km/h

V _{vracht}	Gemiddelde snelheid van vrachtauto's	-	80	km/uur	Snelheidslimiet in de Tauerntunnel is voor elk voertuig 80 km/h
N _{auto}	Gemiddeld aantal inzittenden in een personenauto	1.5	1.5	pers/mvt	Aanname o.b.v. default-waarde
N _{bus}	Gemiddeld aantal inzittenden in een bus	22	22.0	pers/mvt	Aanname o.b.v. default-waarde
N _{vracht}	Gemiddeld aantal inzittenden in een vrachtauto en tankauto	1	1.0	pers/mvt	Aanname o.b.v. default-waarde
L _{auto}	Gemiddeld ruimte beslag personenauto in een file	6.73	6.73	m/mvt	Aanname o.b.v. default-waarde
L _{vracht}	Gemiddeld ruimte beslag vrachtauto of bus in een file	15.62	15.62	m/mvt	Aanname o.b.v. default-waarde
Periode en verkeersintensiteiten					
T _{spits}	Gemiddeld aantal uren 'spits' per etmaal in de tunnelbuis	-	5.71	uur	Op basis van Knoeflacher, Pfaffenbichler, & Nussbaumer (2002) is er doordeweeks 8 uur 'spits' (11:00-19:00). Daarnaast wordt aangenomen dat er geen 'spits' is in het weekend. Dat maakt: (8 uur * 5 dagen) / 7 dagen = 5,71 uur
I _{max}	Maximale verkeerscapaciteit in de buis per spitsuur	<= 2300	2500	mtv/jaar	Aanname
I _{spitsuur}	gemiddelde verkeersintensiteit in de buis per spitsuur	-	2469	mtv/uur	Volgens het rapport van PIARC (2006) rijden er in totaal 14100 voertuigen per dag in de tauerntunnel = 14100 / 5.71 = 2469 mtv/uur
I _{spits}	verkeersintensiteit tijdens de 'spits' per jaar	-	5149629	mtv/jaar	
Verkeerssamenstelling					
A _{auto.s}	fractie personenauto's (of motor) tijdens de 'spits'	-	0.74	-	Volgens (PIARC, 2006)
A _{bus.s}	fractie bussen tijdens de 'spits'	0.01	0.01	-	Volgens (PIARC, 2006)
A _{vracht.s}	fractie vrachtauto's tijdens de 'spits'	0.15	0.22	-	Volgens (PIARC, 2006)
A _{tank.s}	fractie tankauto's tijdens de 'spits'	-	0.03	-	Aanname dat 3% tankauto's zijn van het totale vrachtverkeer
Benedenstroomse file					
N _{spits}	het aantal keren (per etmaal dat tijdens de periode 'spits' (nagenoeg) stilstaand verkeer in de buis komt te staan	-	1.429	1/etmaal	Aanname dat elke dag 2x file ontstaat dan $2 \times 5/7 = 1,429$.
T _{filemax}	maximale tijdsduur voor de opbouw van een benedenstroomse file in de tunnelbuis	-	10	min	Aanname
N _{filerij}	aantal rijstroken waarover een benedenstroomse file zich kan opbouwen in de tunnelbuis	-	1	-	Door tweerichtingsverkeer kan maar over 1 rijstrook file worden opgebouwd.
Incidentkans					
F _{brand}	kans op brand van een voertuig	0.00000002	0.00000002	(mvtkm) ⁻¹	Aanname o.b.v. default-waarde
Overige defaultwaarden uitstroming					
P _{beperkt.uit}	kans op beperkte uitstroming bij een tankauto	-	0.67	-	Volgens literatuur (Persson 2002)
P _{uit.middel}	Vervolgkans op middelgrote uitstroming bij een tankauto	-	0.67	-	Volgens literatuur (Persson 2002)
P _{uit.groot}	Vervolgkans op grote uitstroming bij een tankauto	-	0.33	-	Volgens literatuur (Persson 2002)
Overige defaultwaarden: ontsteking					
P _{ont.dir.pers}	kans op directe ontsteking bij personenauto	-	0.90	-	Aanname
P _{ont.dir.vracht}	kans op directe ontsteking bij vrachtauto	-	0.90	-	Aanname
P _{ont.dir.tank}	kans op directe ontsteking bij tankauto	-	0.90	-	Aanname
Overige defaultwaarden: brandgrootte					
P _{vijf}	Fractie personenauto brand van 5 MW	-	0.67	-	Volgens literatuur (Persson 2002)
P _{tien}	Fractie op personenauto brand van 10 MW	-	0.33	-	Volgens literatuur (Persson 2002)
P _{vijfentwintig}	Fractie op vrachtauto brand van 25 MW	-	0.67	-	Volgens literatuur (Persson 2002)
P _{vijftig}	Fractie op vrachtauto brand van 50MW	-	0.20	-	Volgens literatuur (Persson 2002)
P _{honderd}	Fractie op vrachtauto brand van 100 MW	-	0.13	-	Volgens literatuur (Persson 2002)
Overige defaultwaarden: faalkansen voorzieningen					
P _{f.vent}	faalkans van het ventilatiesysteem	0.02	0.02	-	Aanname o.b.v. default-waarde
T _{afsluit}	tijdsduur tot het daadwerkelijk afsluiten van de tunnelbuis na opstartsignaal	-	Afsluiten door slagboom,	min	Volgens literatuur (PIARC, 2006)

			verkeerslicht & matrixborden		
Overige defaultwaarden: vluchtsnelheid					
T _{uitstap}	Gemiddelde uitstaptijd van inzittenden uit een voertuig	0.2	0.2	min	Aanname o.b.v. default-waarde
V _{vlucht}	Gemiddelde vluchtsnelheid	1.1	1.1	m/s	Aanname o.b.v. default-waarde
V _{vluchtrook}	Gemiddelde vluchtsnelheid door rook	0.3	0.3	m/s	Aanname o.b.v. default-waarde
Tussenvariabel: filevorming					
L _{vtg.s}	Gemiddelde ruimtebeslag van een voertuig tijdens spits	-	9.0414	m/mvt	
T _{vulduur.s}	Tijdsduur voor het vullen van de gehele tunnelbuis bij filevorming tijdens de spits	-	0.0448	uur	
T _{file.s}	Tijdsduur voor het vormen van een benedenstroomse file in de tunnelbuis tijdens de spits	-	0.0448	uur	
P _{file.ben.s}	Kans op benedenstroomse file tijdens spits	-	0.0112	-	
Tussenvariabel: lengte benedenstroomse file					
L _{fileben.s}	Lengte file benedenstrooms tijdens spits		500	m	
L _{bov}	Lengte file bovenstrooms van het incident	-	500	m	Aanname
Tussenvariabel: lengte bovenstroomse file					
L _{filebov.s}	Lengte file bovenstrooms tijdens spits		539.48	m	
T _{filebov.s}	Tijdsduur voor het vormen van een bovenstroomse file in de tunnelbuis tijdens de spits	-	1.45	min	
T _{expl}	Tijdsduur tot explosie		60.00	min	Aanname dat geen explosie plaatsvindt
V _{vtg.s}	Gemiddelde snelheid van een voertuig in meters per minuut	-	1333.33	m/minuut	
Tussenvariabel: dichtheden in de verschillende gebieden					
D _{rij.s}	Gemiddelde dichtheid, aantal personen per strekkende meter bij rijdend verkeer tijdens spits	-	0.0488	pers/m	
D _{file.s}	Gemiddelde dichtheid, aantal personen per strekkende meter bij file tijdens spits	-	0.1748	pers/m	
N _{vtg.s}	Gemiddeld aantal personen in een voertuig tijdens spits	-	1.5800	pers/mvt	
Tussenvariabel: scenario's met explosieven					
L _{één}	Lengte buiten de tunnel waarin mensen schade kunnen ondervinden		0	m	Aanname dat geen explosie plaatsvindt

Output

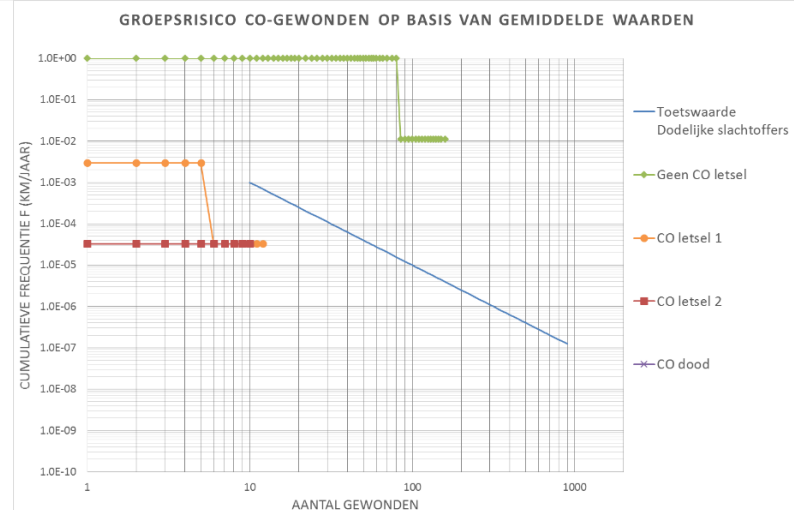
Kansentabel

Scenario	Kansen	Totaal aantal blootgestelde n	Waarden op basis van gemiddelde dosis												Waarden op basis van maximale dosis											
			Gewonden ten aanzien van				Gewonden ten aanzien van				Gewonden ten aanzien van				Gewonden ten aanzien van				Gewonden ten aanzien van				Gewonden ten aanzien van			
			Geen CO letsel	CO letsel 1	CO letsel 2	CO dood	Geen stralingsletsel	Stralingsletsel 1	Stralingsletsel 2	Straling dood	Geen temperatuursletsel	Temperatuursletsel 1	Temperatuursletsel 2	Temperatuur dood	Geen CO letsel	CO letsel 1	CO letsel 2	CO dood	Geen stralingsletsel	Stralingsletsel 1	Stralingsletsel 2	Straling dood	Geen temperatuursletsel	Temperatuursletsel 1	Temperatuursletsel 2	Temperatuur dood
G1	0.0000000000	178	178	0	0	0	176	2	0	0	178	0	0	0	178	0	0	0	174	2	0	2	178	0	0	0
G2	0.0049972637	178	178	0	0	0	176	2	0	0	178	0	0	0	178	0	0	0	174	2	0	2	178	0	0	0
G3	0.0000000000	178	178	0	0	0	176	2	0	0	178	0	0	0	178	0	0	0	174	2	0	2	178	0	0	0
G4	0.0024613388	178	178	0	0	0	176	2	0	0	178	0	0	0	178	0	0	0	174	2	0	2	178	0	0	0
G5	0.0008287336	178	178	0	0	0	178	0	0	0	178	0	0	0	178	0	0	0	178	0	0	0	178	0	0	0
G6	0.0000000000	178	178	0	0	0	174	2	0	2	178	0	0	0	178	0	0	0	170	4	0	4	178	0	0	0
G7	0.0015532036	178	178	0	0	0	174	2	0	2	178	0	0	0	178	0	0	0	170	4	0	4	178	0	0	0
G8	0.0000000000	178	178	0	0	0	176	2	0	0	167	11	0	0	178	0	0	0	170	2	0	6	139	39	0	0
G9	0.0004636429	178	178	0	0	0	176	2	0	0	178	0	0	0	178	0	0	0	170	2	0	6	172	6	0	0
G10	0.0000000000	178	148	30	0	0	178	0	0	0	142	29	7	0	116	62	0	0	170	2	2	4	125	31	22	0
G11	0.0003013679	178	178	0	0	0	178	0	0	0	167	11	0	0	171	7	0	0	170	2	2	4	167	2	9	0
G12	0.0002575794	178	178	0	0	0	178	0	0	0	178	0	0	0	178	0	0	0	178	0	0	0	178	0	0	0
G13	0.0000000000	178	178	0	0	0	176	2	0	0	167	11	0	0	178	0	0	0	170	2	0	6	139	39	0	0
G14	0.0002025918	178	178	0	0	0	176	2	0	0	178	0	0	0	178	0	0	0	170	2	0	6	172	6	0	0
G15	0.0000225102	178	178	0	0	0	178	0	0	0	178	0	0	0	178	0	0	0	178	0	0	0	178	0	0	0
G16	0.0000000000	178	148	30	0	0	178	0	0	0	142	29	7	0	116	62	0	0	170	2	2	4	125	31	22	0
G17	0.0000668553	178	178	0	0	0	178	0	0	0	167	11	0	0	171	7	0	0	170	2	2	4	167	2	9	0
G18	0.0000074284	178	178	0	0	0	178	0	0	0	178	0	0	0	178	0	0	0	178	0	0	0	178	0	0	0
G19	0.0000000000	178	119	48	11	0	170	6	0	2	149	10	5	14	103	22	53	0	165	5	2	6	141	8	6	23
G20	0.0000329287	178	154	13	11	0	170	6	0	2	162	2	0	14	138	26	14	0	165	5	0	8	151	9	2	16
G21	0.0000036587	178	178	0	0	0	178	0	0	0	178	0	0	0	178	0	0	0	178	0	0	0	178	0	0	0
G22	0.0000000000	88	88	0	0	0	86	2	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	84	2	0	2	88	0	0	0
G23	0.4412227363	88	88	0	0	0	86	2	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	84	2	0	2	88	0	0	0
G24	0.0000000000	88	88	0	0	0	86	2	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	84	2	0	2	88	0	0	0
G25	0.2173186612	88	88	0	0	0	86	2	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	84	2	0	2	88	0	0	0
G26	0.0731712664	88	88	0	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0
G27	0.0000000000	88	88	0	0	0	84	2	0	2	88	0	0	0	88	0	0	0	82	2	0	4	88	0	0	0
G28	0.1371367964	88	88	0	0	0	84	2	0	2	88	0	0	0	88	0	0	0	82	2	0	4	88	0	0	0
G29	0.0000000000	88	88	0	0	0	86	2	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	82	2	0	4	84	4	0	0
G30	0.0409363571	88	88	0	0	0	86	2	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	82	2	0	4	84	4	0	0
G31	0.0000000000	88	88	0	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	84	0	2	2	88	0	0	0
G32	0.0266086321	88	88	0	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	84	0	2	2	88	0	0	0
G33	0.0227424206	88	88	0	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0
G34	0.0000000000	88	88	0	0	0	86	2	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	82	2	0	4	84	4	0	0
G35	0.0178874082	88	88	0	0	0	86	2	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	82	2	0	4	84	4	0	0
G36	0.0019874898	88	88	0	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0
G37	0.0000000000	88	88	0	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	84	0	2	2	88	0	0	0
G38	0.0059028447	88	88	0	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	84	0	2	2	88	0	0	0
G39	0.0006558716	88	88	0	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0
G40	0.0000000000	88	88	0	0	0	86	2	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	84	2	0	2	88	0	0	0
G41	0.0029073713	88	82	6	0	0	86	2	0	0	88	0	0	0	79	9	0	0	82	2	0	4	88	0	0	0
G42	0.0003230413	88	88	0	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0	88	0	0	0

figuur 54: Kansentabel Tauerntunnel

FN-curves

Gemiddelde waarden

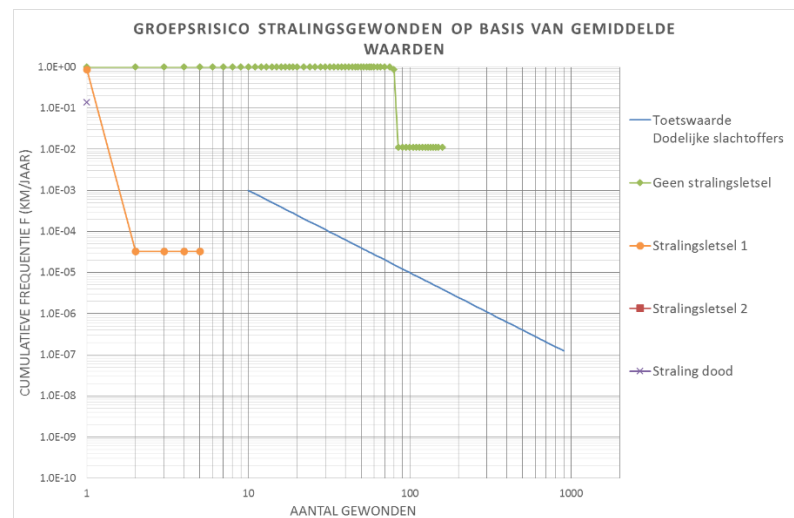


figuur 55: FN-curve Co gemiddeld Tauerntunnel

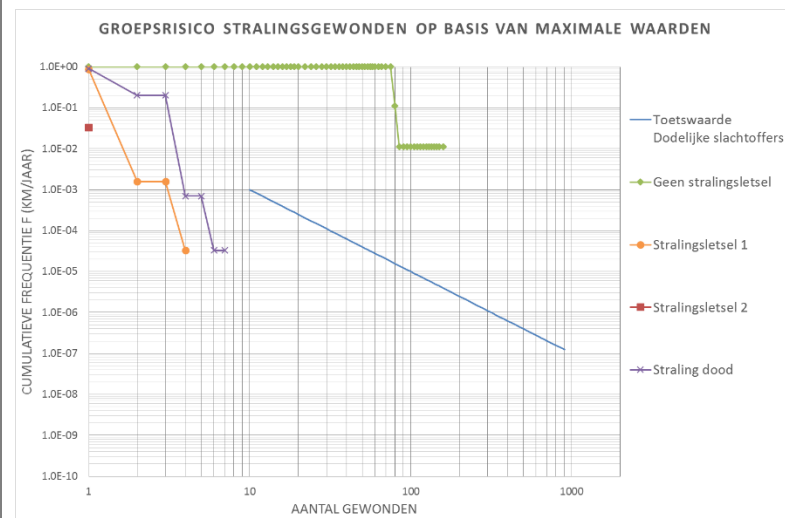
Maximale waarden



figuur 56: FN-curve Co maximaal Tauerntunnel



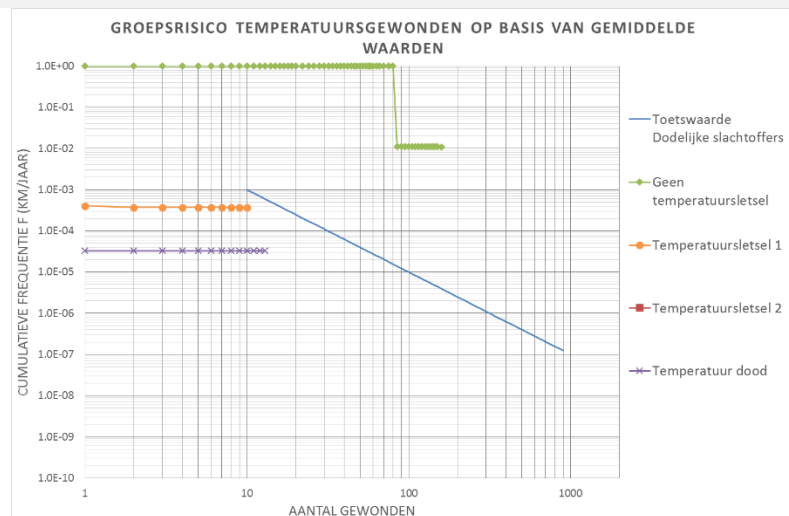
figuur 57: FN-curve straling gemiddeld Tauerntunnel



figuur 58: FN-curve straling maximaal Tauerntunnel

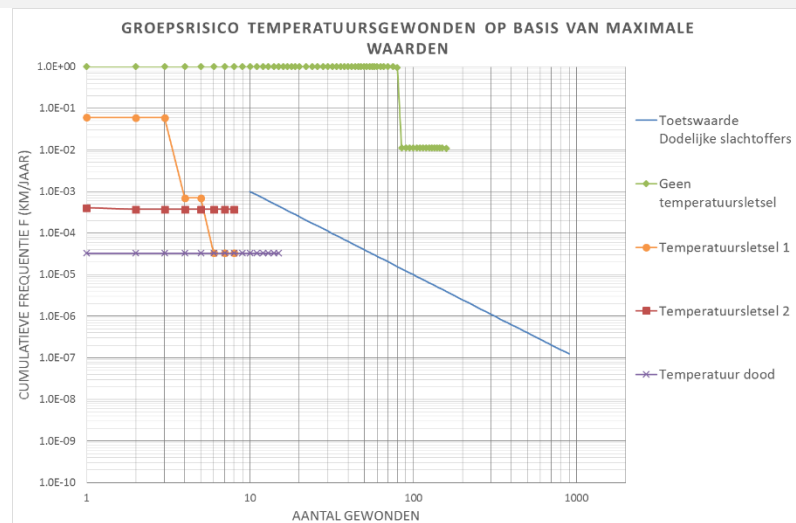
FN-curves

Gemiddelde waarden



figuur 59: FN-curve temperatuur gemiddeld Tauerntunnel

Maximale waarden



figuur 60: FN-curve temperatuur maximaal Tauerntunnel

J.3 Viamala tunnel

De invoerparameters die zijn gebruikt bij de Viamala tunnel in Zwitersland worden behandeld in de onderstaande paragraaf input. Vervolgens worden de FN-curves van de Viamala tunnel weergegeven in de paragraaf Output.

Input

tabel 54: Inputwaarden Viamala tunnel

Symbol	Omschrijving	Default-waarden	Invoer-waarde	Eenheid	Opmerking
LC	Het percentage van de populatie dat minimaal moet reageren op de hoeveelheid dosis straling (Mediaan van de "Lethal Concentration")	50	50%	-	Aanname o.b.v. default-waarde
Stralingéén	Ondergrens 1egraads brandwonden volgens stralingsdosis ($t * Q^{4/3}$) en probit bij LC%	-	2.817	s.(W/m ²)	O.b.v. probit uit de literatuur: 1 ^e brandwonden: Probit = $-39,83 + 3,0186 * \ln(t * q^{4/3})$
Stralingtwee	Ondergrens 2egraads brandwonden volgens stralingsdosis ($t * Q^{4/3}$) en probit bij LC%	-	8.434	s.(W/m ²)	O.b.v. probit uit de literatuur: 2 ^e brandwonden: Probit = $-43,14 + 3,0186 * \ln(t * q^{4/3})$
Stralingdrie	Ondergrens dood volgens stralingsdosis ($t * Q^{4/3}$) en probit bij LC%	-	10.470	s.(W/m ²)	O.b.v. probit uit de literatuur: Lethaal letsel: Probit = $-36,38 + 2,56 * \ln(t * q^{4/3})$
COéén	CO waarop mensen CO-letsel 1 oplopen	703	703	ppm	D.m.v extrapolatie van AEGL-2 gegevens is de defaultwaarde bepaald.
COTwee	CO waarop mensen CO-letsel 2 oplopen	2862	2862	ppm	D.m.v extrapolatie van AEGL-3 gegevens is de defaultwaarde bepaald.
CODrie	CO waarop mensen CO dood gaan	9463	9463	ppm	D.m.v extrapolatie van gegevens uit Purser (2002) is de defaultwaarde bepaald.
Tempéén	Temperatuur waarop mensen temperatuur letsel 1 oplopen	-	60	°C	Default waarde op basis van COB en Bouwdienst Rijkswaterstaat (2004)
Temptwee	Temperatuur waarop mensen temperatuur letsel 2 oplopen	-	120	°C	Default waarde op basis van Purser & Buckley (1983) en Bryan (1986)
Tempdrie	Temperatuur waarop mensen overlijden	179	179	°C	D.m.v extrapolatie van gegevens uit Purser (2002) is de defaultwaarde bepaald.
Factor	Het interval waarin gewonden moeten worden berekend.	10	8	m	Formules in Excel zijn voor 100 kolommen ingevoerd. Dat betekent als Factor = 8 m de maximale lente van de tunnel 100 x 10 meter = 800 meter;
Geometrie					
L _{buis}	Lengte (gesloten deel) van de tunnel	-	742	m	
B _{buis}	Breedte van de tunnelbuis	-	8.5	m	Aanname o.b.v. 2x 3.5 rijbaan + 2 * 0.75 opstaande rand
L _{hart}	Hart-op-hart afstand van de vluchtdeuren	-	742	m	Volgens (Bettelini & Seifert, 2010) zijn er geen vluchtdeuren
N _{rij}	Aantal rijstroken in de tunnelbuis	-	2	-	Volgens literatuur (Bettelini & Seifert, 2010) (tweerichtingsverkeer)
Voorzieningen					
A _{vent}	Is een langsventilatiesysteem aanwezig?	-	Ja	-	In de Viamala tunnel is langsventilatie aanwezig (Zumsteg, Steinemann, & Berner, 2012).
L _{afsluit}	Afstand tussen de plaats waar de tunnelbuis wordt afgesloten en de ingang van de tunnelbuis	-	0	m	Aanname
Motorvoertuigen					
V _{auto}	Gemiddelde snelheid van personenauto's	-	80	km/uur	Snelheidslimiet in de Viamala tunnel is voor elk voertuig 80 km/h (Zumsteg, Steinemann, & Berner, 2012)
V _{bus}	Gemiddelde snelheid van bussen	-	80	km/uur	Snelheidslimiet in de Viamala tunnel is voor elk voertuig 80 km/h (Zumsteg, Steinemann, & Berner, 2012)

V _{vracht}	Gemiddelde snelheid van vrachtauto's	-	80	km/uur	Snelheidslimiet in de Viamala tunnel is voor elk voertuig 80 km/h (Zumsteg, Steinemann, & Berner, 2012)
N _{auto}	Gemiddeld aantal inzittenden in een personenauto	1.5	1.5	pers/mvt	Aanname o.b.v. default-waarde
N _{bus}	Gemiddeld aantal inzittenden in een bus	22	22.0	pers/mvt	Aanname o.b.v. default-waarde
N _{vracht}	Gemiddeld aantal inzittenden in een vrachtauto en tankauto	1	1.0	pers/mvt	Aanname o.b.v. default-waarde
L _{auto}	Gemiddeld ruimte beslag personenauto in een file	6.73	6.73	m/mvt	Aanname o.b.v. default-waarde
L _{vracht}	Gemiddeld ruimte beslag vrachtauto of bus in een file	15.62	15.62	m/mvt	Aanname o.b.v. default-waarde
Periode en verkeersintensiteiten					
T _{spits}	Gemiddeld aantal uren 'spits' per etmaal in de tunnelbuis	-	4.29	uur	Conservatief aangenomen dat door de weeks 6 uur 'spits' (3 uur 's morgens en 3 uur 's avonds) op treedt en geen 'spits' is in het weekend. Dat maakt: (6 uur * 5 dagen) / 7 dagen = 4,29 uur
I _{max}	Maximale verkeerscapaciteit in de buis per spitsuur	<= 2300	2300	mtv/jaar	Aanname o.b.v. default-waarde
I _{spitsuur}	gemiddelde verkeersintensiteit in de buis per spitsuur	-	1865	mtv/uur	Volgens het rapport van Bettelini & Seifert, (2010) rijden in 2006 in totaal 8000 voertuigen per dag in de tunnel = 8000 / 4.29 = 1865 mtv/uur
I _{spits}	verkeersintensiteit tijdens de 'spits' per jaar	-	2917393	mtv/jaar	
Verkeerssamenstelling					
A _{auto.s}	fractie personenauto's (of motor) tijdens de 'spits'	-	0.79	-	Aanname geen data voor handen
A _{bus.s}	fractie bussen tijdens de 'spits'	0.01	0.01	-	Aanname geen data voor handen
A _{vracht.s}	fractie vrachtauto's tijdens de 'spits'	0.15	0.17	-	Aanname geen data voor handen
A _{tank.s}	fractie tankauto's tijdens de 'spits'	-	0.03	-	Aanname geen data voor handen
Benedenstroomse file					
N _{spits}	het aantal keren (per etmaal dat tijdens de periode 'spits' (nagenoeg) stilstaand verkeer in de buis komt te staan	-	1.429	1/etmaal	Aanname dat elke dag 2x file ontstaat dan 2 x 5/7 = 1,428.
T _{filemax}	maximale tijdsduur voor de opbouw van een benedenstroomse file in de tunnelbuis	-	10	min	Aanname
N _{filerij}	aantal rijstroken waarover een benedenstroomse file zich kan opbouwen in de tunnelbuis	-	1	-	Door tweerichtingsverkeer kan maar over 1 rijstrook file worden opgebouwd.
Incidentkans					
F _{brand}	kans op brand van een voertuig	0.00000002	0.00000002	(mvtkm) ⁻¹	Aanname o.b.v. default-waarde
Overige defaultwaarden uitstroming					
P _{beperkt.uit}	kans op beperkte uitstroming bij een tankauto	-	0.67	-	Volgens literatuur (Persson 2002)
P _{uit.middel}	Vervolgkans op middelgrote uitstroming bij een tankauto	-	0.67	-	Volgens literatuur (Persson 2002)
P _{uit.groot}	Vervolgkans op grote uitstroming bij een tankauto	-	0.33	-	Volgens literatuur (Persson 2002)
Overige defaultwaarden: ontsteking					
P _{ont.dir.pers}	kans op directe ontsteking bij personenauto	-	0.90	-	Aanname
P _{ont.dir.vracht}	kans op directe ontsteking bij vrachtauto	-	0.90	-	Aanname
P _{ont.dir.tank}	kans op directe ontsteking bij tankauto	-	0.90	-	Aanname
Overige defaultwaarden: brandgrootte					
P _{vijf}	Fractie personenauto brand van 5 MW	-	0.67	-	Volgens literatuur (Persson 2002)
P _{tien}	Fractie op personenauto brand van 10 MW	-	0.33	-	Volgens literatuur (Persson 2002)
P _{vijfentwintig}	Fractie op vrachtauto brand van 25 MW	-	0.67	-	Volgens literatuur (Persson 2002)
P _{vijftig}	Fractie op vrachtauto brand van 50MW	-	0.20	-	Volgens literatuur (Persson 2002)
P _{honderd}	Fractie op vrachtauto brand van 100 MW	-	0.13	-	Volgens literatuur (Persson 2002)
Overige defaultwaarden: faalkansen voorzieningen					
P _{f.vent}	faalkans van het ventilatiesysteem	0.02	0.02	-	Aanname o.b.v. default-waarde

T _{afsluit}	tijdsduur tot het daadwerkelijk afsluiten van de tunnelbuis na opstartsignaal	-	Afsluiten door verkeerslicht & matrixborden	min	Aanname
Overige defaultwaarden: vluchtsnelheid					
T _{uitstap}	Gemiddelde uitstaptijd van inzittenden uit een voertuig	0.2	0.2	min	Aanname o.b.v. default-waarde
V _{vlucht}	Gemiddelde vluchtsnelheid	1.1	1.1	m/s	Aanname o.b.v. default-waarde
V _{vluchtrook}	Gemiddelde vluchtsnelheid door rook	0.3	0.3	m/s	Aanname o.b.v. default-waarde
Tussenvariabel: filevorming					
L _{vtg.s}	Gemiddelde ruimtebeslag van een voertuig tijdens spits	-	8.5969	m/mvt	
T _{vulduur.s}	Tijdsduur voor het vullen van de gehele tunnelbuis bij filevorming tijdens de spits	-	0.0463	uur	
T _{file.s}	Tijdsduur voor het vormen van een benedenstroomse file in de tunnelbuis tijdens de spits	-	0.0463	uur	
P _{file.ben.s}	Kans op benedenstroomse file tijdens spits	-	0.0154	-	
Tussenvariabel: lengte benedenstroomse file					
L _{fileben.s}	Lengte file benedenstrooms tijdens spits		371	m	
L _{bov}	Lengte file bovenstrooms van het incident	-	371	m	Aanname
Tussenvariabel: lengte bovenstroomse file					
L _{filebov.s}	Lengte file bovenstrooms tijdens spits		876.01	m	
T _{filebov.s}	Tijdsduur voor het vormen van een bovenstroomse file in de tunnelbuis tijdens de spits	-	3.28	min	
T _{expl}	Tijdsduur tot explosie		60.00	min	Aanname dat geen explosie plaatsvindt
V _{vtg.s}	Gemiddelde snelheid van een voertuig in meters per minuut	-	1333.33	m/minuut	
Tussenvariabel: dichtheden in de verschillende gebieden					
D _{rij.s}	Gemiddelde dichtheid, aantal personen per strekkende meter bij rijdend verkeer tijdens spits	-	0.0374	pers/m	
D _{file.s}	Gemiddelde dichtheid, aantal personen per strekkende meter bij file tijdens spits	-	0.1867	pers/m	
N _{vtg.s}	Gemiddeld aantal personen in een voertuig tijdens spits	-	1.6050	pers/mvt	
Tussenvariabel: scenario's met explosieven					
L _{één}	Lengte buiten de tunnel waarin mensen schade kunnen ondervinden		0	m	Aanname dat geen explosie plaatsvindt

Output

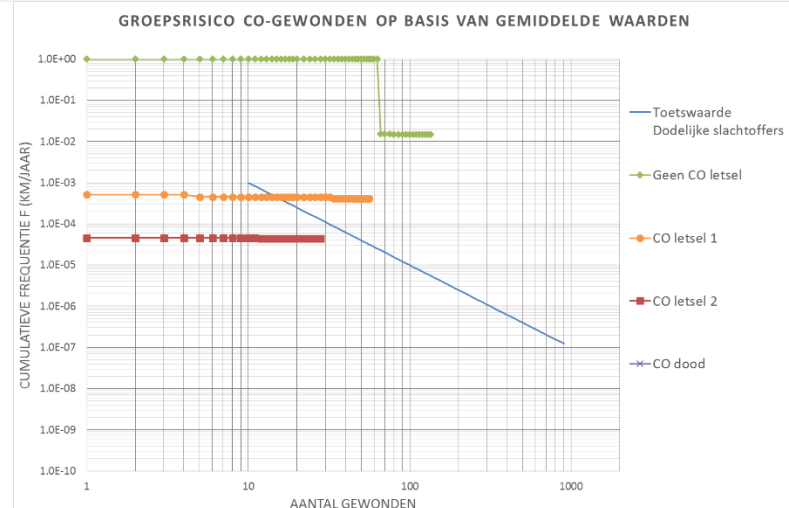
Kansentabel

Scenario	Kansen	Totaal aantal blootgestelde n	Waarden op basis van gemiddelde dosis												Waarden op basis van maximale dosis											
			Gewonden ten aanzien van				Gewonden ten aanzien van				Gewonden ten aanzien van				Gewonden ten aanzien van				Gewonden ten aanzien van				Gewonden ten aanzien van			
			Geen CO letsel	CO letsel 1	CO letsel 2	CO dood	Geen stralingsletsel	Stralingsletsel 1	Stralingsletsel 2	Stralings dood	Geen temperatuursletsel	Temperatuursletsel 1	Temperatuursletsel 2	Temperatuur dood	Geen CO letsel	CO letsel 1	CO letsel 2	CO dood	Geen stralingsletsel	Stralingsletsel 1	Stralingsletsel 2	Stralings dood	Geen temperatuursletsel	Temperatuursletsel 1	Temperatuursletsel 2	Temperatuur dood
G1	0.0072016568	140	140	0	0	0	138	0	2	0	140	0	0	0	140	0	0	0	137	1	0	2	140	0	0	0
G2	0.0001469726	140	140	0	0	0	138	0	2	0	140	0	0	0	140	0	0	0	137	1	0	2	140	0	0	0
G3	0.0035470847	140	140	0	0	0	138	0	2	0	140	0	0	0	140	0	0	0	135	3	0	2	140	0	0	0
G4	0.0000723895	140	140	0	0	0	138	0	2	0	140	0	0	0	140	0	0	0	135	3	0	2	140	0	0	0
G5	0.0012186782	140	140	0	0	0	140	0	0	0	140	0	0	0	140	0	0	0	140	0	0	0	140	0	0	0
G6	0.0016408838	140	140	0	0	0	138	0	0	2	140	0	0	0	140	0	0	0	132	3	0	5	140	0	0	0
G7	0.0000334874	140	140	0	0	0	138	0	0	2	140	0	0	0	140	0	0	0	132	3	0	5	140	0	0	0
G8	0.0004898161	140	140	0	0	0	138	0	0	2	105	35	0	0	140	0	0	0	132	2	0	6	81	59	0	0
G9	0.0000099962	140	140	0	0	0	138	0	0	2	140	0	0	0	140	0	0	0	132	2	0	6	123	17	0	0
G10	0.0003183804	140	81	59	0	0	138	2	0	0	78	50	12	0	75	65	0	0	132	3	0	5	75	29	36	0
G11	0.0000064976	140	140	0	0	0	136	4	0	0	122	18	0	0	118	22	0	0	130	5	0	5	114	12	14	0
G12	0.0002776735	140	140	0	0	0	140	0	0	0	140	0	0	0	140	0	0	0	140	0	0	0	140	0	0	0
G13	0.0002734806	140	140	0	0	0	138	0	0	2	105	35	0	0	140	0	0	0	132	2	0	6	81	59	0	0
G14	0.0000055812	140	140	0	0	0	138	0	0	2	140	0	0	0	140	0	0	0	132	2	0	6	123	17	0	0
G15	0.0000310069	140	140	0	0	0	140	0	0	0	140	0	0	0	140	0	0	0	140	0	0	0	140	0	0	0
G16	0.0000902486	140	81	59	0	0	138	2	0	0	78	50	12	0	75	65	0	0	132	3	0	5	75	29	36	0
G17	0.0000018418	140	140	0	0	0	136	4	0	0	122	18	0	0	118	22	0	0	130	5	0	5	114	12	14	0
G18	0.0000102323	140	140	0	0	0	140	0	0	0	140	0	0	0	140	0	0	0	140	0	0	0	140	0	0	0
G19	0.0000444508	140	75	35	30	0	132	5	0	3	104	6	6	24	60	18	62	0	127	7	1	5	99	5	4	32
G20	0.0000009072	140	106	22	12	0	132	5	0	3	117	5	3	15	85	40	15	0	127	7	1	5	113	3	3	21
G21	0.0000050398	140	140	0	0	0	140	0	0	0	140	0	0	0	140	0	0	0	140	0	0	0	140	0	0	0
G22	0.4596409432	69	69	0	0	0	67	0	2	0	69	0	0	0	69	0	0	0	66	1	0	2	69	0	0	0
G23	0.0093804274	69	69	0	0	0	67	0	2	0	69	0	0	0	69	0	0	0	66	1	0	2	69	0	0	0
G24	0.2263903153	69	69	0	0	0	67	0	2	0	69	0	0	0	69	0	0	0	66	1	0	2	69	0	0	0
G25	0.0046202105	69	69	0	0	0	67	0	2	0	69	0	0	0	69	0	0	0	66	1	0	2	69	0	0	0
G26	0.0777813218	69	69	0	0	0	69	0	0	0	69	0	0	0	69	0	0	0	69	0	0	0	69	0	0	0
G27	0.1047283162	69	69	0	0	0	67	0	0	2	69	0	0	0	69	0	0	0	64	2	0	3	69	0	0	0
G28	0.0021373126	69	69	0	0	0	67	0	0	2	69	0	0	0	69	0	0	0	64	2	0	3	69	0	0	0
G29	0.0312621839	69	69	0	0	0	67	0	0	2	69	0	0	0	69	0	0	0	64	2	0	3	67	2	0	0
G30	0.0006380038	69	69	0	0	0	67	0	0	2	69	0	0	0	69	0	0	0	64	2	0	3	67	2	0	0
G31	0.0203204196	69	69	0	0	0	67	2	0	0	69	0	0	0	69	0	0	0	64	3	0	2	69	0	0	0
G32	0.0004147024	69	69	0	0	0	67	2	0	0	69	0	0	0	69	0	0	0	64	3	0	2	69	0	0	0
G33	0.0177223265	69	69	0	0	0	69	0	0	0	69	0	0	0	69	0	0	0	69	0	0	0	69	0	0	0
G34	0.0174547194	69	69	0	0	0	67	0	0	2	69	0	0	0	69	0	0	0	64	2	0	3	67	2	0	0
G35	0.0003562188	69	69	0	0	0	67	0	0	2	69	0	0	0	69	0	0	0	64	2	0	3	67	2	0	0
G36	0.0019789931	69	69	0	0	0	69	0	0	0	69	0	0	0	69	0	0	0	69	0	0	0	69	0	0	0
G37	0.0057600574	69	69	0	0	0	67	2	0	0	69	0	0	0	69	0	0	0	64	3	0	2	69	0	0	0
G38	0.0001175522	69	69	0	0	0	67	2	0	0	69	0	0	0	69	0	0	0	64	3	0	2	69	0	0	0
G39	0.0006530677	69	69	0	0	0	69	0	0	0	69	0	0	0	69	0	0	0	69	0	0	0	69	0	0	0
G40	0.0028370432	69	69	0	0	0	67	0	2	0	69	0	0	0	69	0	0	0	66	1	0	2	69	0	0	0
G41	0.0000578988	69	64	5	0	0	67	2	0	0	69	0	0	0	52	17	0	0	64	2	1	2	69	0	0	0
G42	0.0003216602	69	69	0	0	0	69	0	0	0	69	0	0	0	69	0	0	0	69	0	0	0	69	0	0	0

figuur 61: Kansentabel Viamala tunnel

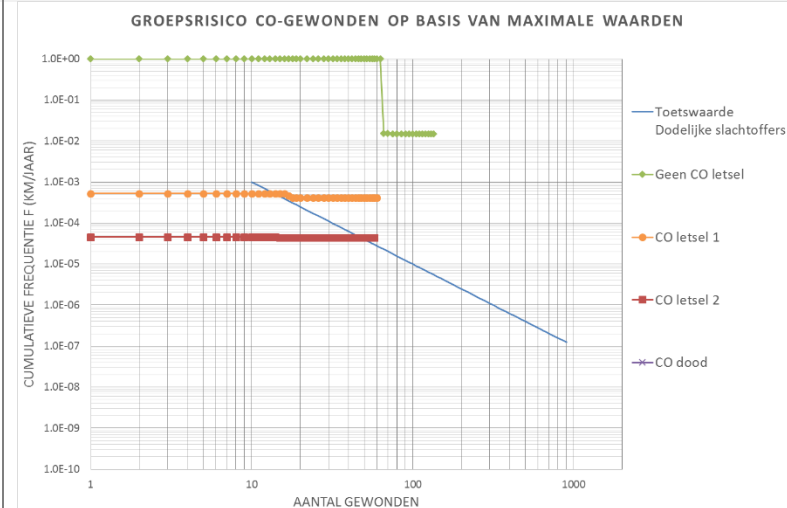
FN-curves

Gemiddelde waarden

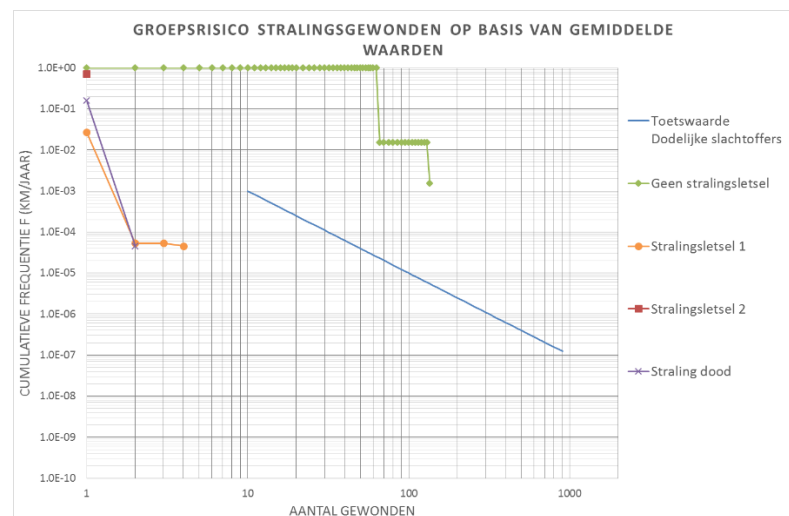


figuur 62: FN-curve Co gemiddeld Viamala tunnel

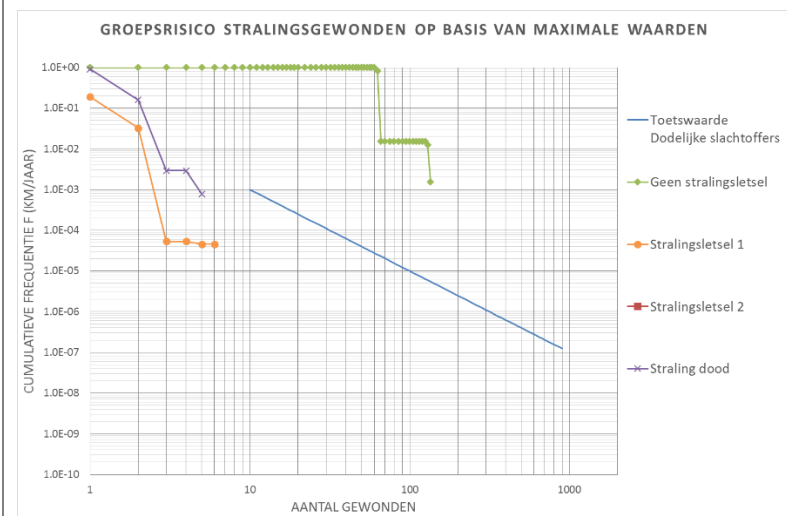
Maximale waarden



figuur 63: FN-curve Co maximaal Viamala tunnel



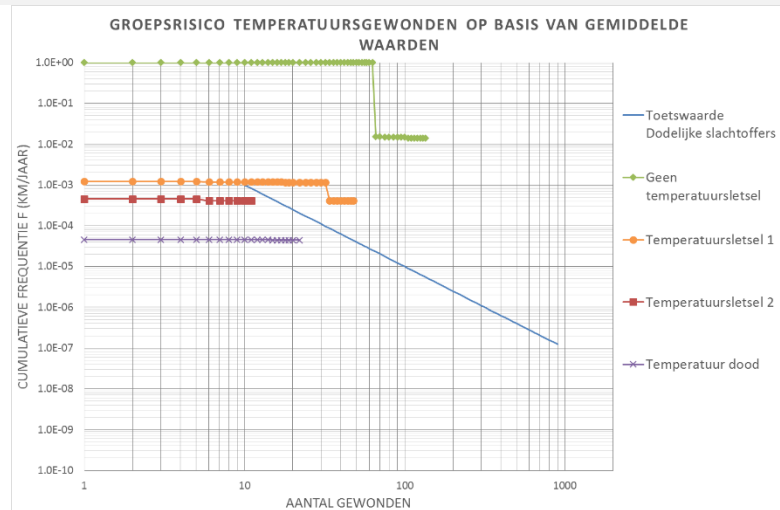
figuur 64: FN-curve straling gemiddeld Viamala tunnel



figuur 65: FN-curve straling maximaal Viamala tunnel

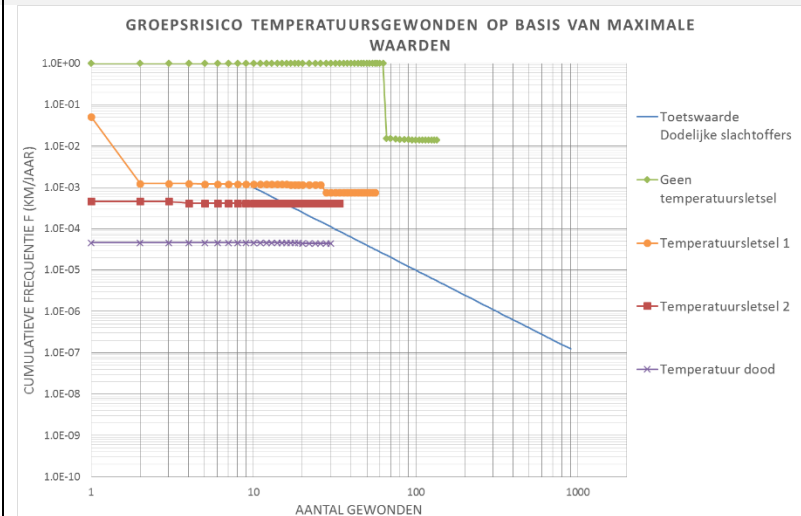
FN-curves

Gemiddelde waarden



figuur 66: FN-curve temperatuur gemiddeld Viamala tunnel

Maximale waarden



figuur 67: FN-curve temperatuur maximaal Viamala tunnel