

Bijlagen

**Leidraad Scenarioanalyse Ongevallen in Tunnels
Deel 1: Wegtunnels
Mei 2004**

**COB
Bouwdienst Rijkswaterstaat**

Inhoud

1	Inleiding	3
1.1	Wet ART	3
1.2	Huidige regelgeving	4
1.3	Veiligheidsfilosofie Steunpunt Tunnelveiligheid	4
2	Begrippen	7
3	Aanpak scenarioanalyse	10
3.1	Afbakening: projectfasering	10
4	Scenarioanalyseteam	12
4.1	Actorenanalyse	12
4.2	Verdeling van taken, verantwoordelijkheden en bevoegdheden	14
5	Toetscriteria (stap 0)	17
5.1	Veiligheidsdoelen	17
5.2	Toetscriteria	20
6	Beschrijving tunnelsysteem (stap 1)	21
6.1	Systeembeschrijving	21
6.2	Systeemvariabelen	22
7	Selectie relevante scenario's (stap 2)	26
7.1	Voorbeelden van scenario's	26
7.2	Escalatie	29
8	Uitwerking scenario's (stap 3)	30
8.1	Tijdstappen	30
8.2	Drie voorbeelden van een fotoalbum	32
8.3	Aanpak kwantitatieve modellering	46
8.4	Invoergegevens	47
8.5	Modellering van fysische effecten	48
8.6	Fysische effectenmodellering van brand	49
8.7	Fysische effectenmodellering van verdamping	57
8.8	Fysische effectenmodellering van dispersie	61
8.9	Fysische effectenmodellering van een explosie	65
8.10	Fysische effectenmodellering van een BLEVE	68
8.11	Analyse van het vluchtproces	70
8.12	Vuistregelmodellen voor zelfredzaamheid	72
8.13	Letselmodellering	74
9	Toets en beoordeling (stap 4)	87
10	Referenties	88

1 Inleiding

1.1 Wet ART

Om het besluitvormingsproces inzake tunnelveiligheid te ondersteunen hebben de ministers van Verkeer en Waterstaat, Binnenlandse Zaken en VROM opdracht gegeven tot het voorbereiden van een Wet Aanvullende Regels Tunnelveiligheid (Wet ART) [1]. Hiermee wordt invulling gegeven aan de in april 2004 van kracht geworden EU-richtlijn inzake minimumveiligheidseisen voor tunnels in het Trans-Europese wegennet.

In het voorbereidingstraject van de Wet ART wordt momenteel een Beleidsnota opgesteld. Deze bestaat uit twee delen.

Deel A van de Beleidsnota doet een voorstel voor een aantal proceseisen en beschrijft hoe de verantwoordelijkheden verdeeld zouden moeten zijn bij de besluitvorming over tunnels. De ministerraad heeft op 7 november 2003 ingestemd met dit deel van de Beleidsnota, dat daarmee bindend is voor rijkspartijen. Tegelijk nodigt de Ministerraad andere partijen uit volgens de spelregels van dit eerste deel te werken.

In deel B van de Beleidsnota zullen veiligheidsdoelen met daaraan gekoppeld veiligheidseisen en bijbehorende maatregelen worden vastgesteld. Dit onderdeel komt naar verwachting in de tweede helft van 2004 gereed. De bedoeling is om in 2006 de eisen uit de hele nota te hebben vastgelegd in wet- en regelgeving.

In deel A van de Beleidsnota wordt een viertal probleemvelden onderkend, waarvoor tevens oplossingen worden aangedragen:

Het borgen van veiligheid in alle fasen van het besluitvormingsproces

Hierbij gaat het onder andere om rollen en verantwoordelijkheden, om een tijdige betrokkenheid van de openbare hulpverleningsdiensten, maar ook om de vaststelling dat veiligheid in alle fasen van de besluitvorming op een evenwichtige manier aan de orde moeten komen.

Het vaststellen van algemene veiligheidseisen voor tunnels en overkappingen

Er moet een algemeen kader komen, waaraan alle tunnels getoetst kunnen worden. Om een gedegen oordeel te kunnen vormen over de vraag of een object voldoende veilig is, zullen betrokkenen moeten kunnen beschikken over

- Een richtlijn of normering: hoe hoog ligt de lat (welke veiligheidseisen worden aan het object gesteld)?
- Een instrument om vast te stellen of de constructie voldoet aan die veiligheidseisen.

Het behoud van het veiligheidsniveau in de gebruiksfase

Hierbij moet gedacht worden aan onder andere veiligheidszorgsystemen en toezicht en handhaving, maar ook aan de afstemming van de plannen van de gemeentelijke rampenbestrijdingsorganisatie en de plannen van de tunnelbeheerder voor de beheersing van ongevallen.

Het bevorderen van veilig gedrag in de gebruiksfase.

Hierbij gaat het onder andere om maatregelen die het gedrag van tunnelgebruikers gunstig kunnen beïnvloeden.

Meer informatie over de wet in voorbereiding is te vinden op de website www.tunnelveiligheid.nl.

1.2 Huidige regelgeving

Momenteel worden vanuit de formele regelgeving de volgende eisen gesteld inzake infrastructurele projecten:

- Grote infrastructurele projecten zijn in Nederland m.e.r.¹-plichtig. Het aspect veiligheid (zowel intern als extern) vormt een onderdeel van de MER.
- In het streven naar beperking van de inspanningen op m.e.r.-gebied kan voorafgaand aan de MER een "Verkenning" worden uitgevoerd (voorheen "MIT-verkenning").
- De burgemeester moet zorgdragen voor een Gemeentelijk Rampenplan voor zijn gemeente. Daarnaast dient hij voor bepaalde risicovolle activiteiten rampenbestrijdingsplannen op te stellen. Op tunnels is dit in de regel van toepassing. Afzonderlijke hulpverlenende diensten in een gemeente kunnen, waar zij dat nodig achten, nog eigen plannen hebben.
- De beheerder van de tunnel is verantwoordelijk voor het (laten) opstellen van een calamiteitenbestrijdingsplan. Alhoewel dit nog niet verplicht is, is het wel een standaard werkwijze van de tunnelbeheerders in Nederland.
- Bouwbesluit: een tunnel valt onder de categorie "bouwwerken, geen gebouw zijnde" en dient daarom aan de betreffende eisen uit het Bouwbesluit te voldoen.

De gemeentelijke plannen en de plannen van de tunnelbeheerder moeten op elkaar afgestemd zijn. Het komt voor dat een integraal plan wordt opgesteld dat meerdere plannen omvat (zoals bij de Westerscheldetunnel, waar een "Integraal Veiligheidsplan" is opgesteld, met een rampenbestrijdingsplan en een calamiteitenbestrijdingsplan).

1.3 Veiligheidsfilosofie Steunpunt Tunnelveiligheid

Het Steunpunt Tunnelveiligheid van de Bouwdienst Rijkswaterstaat heeft zich ten doel gesteld om een Integrale Veiligheidsfilosofie voor tunnels te ontwikkelen. De Integrale Veiligheidsfilosofie bestaat uit de volgende vijf hoofdonderdelen:

- A. Normen, richtlijnen en uitgangspunten
- B. Veiligheidsbeschouwingen
- C. Basismaatregelen
- D. Aanvullende maatregelen en hun veiligheidseffectiviteit
- E. De veiligheidsorganisatie

¹ M.e.r.: milieu-effectrapportage. De aanduiding "m.e.r." duidt op het proces waarin de milieueffecten worden onderzocht; de afkorting in hoofdletters "MER" heeft betrekking op de Rapportage zelf.

A. Normen, richtlijnen en uitgangspunten

Alvorens met het ontwerp van de ondergrondse/overkapte infrastructuur wordt begonnen, zal vastgelegd moeten worden:

- op welke wijze en op welk moment in het ontwerpproces over welke items met betrekking tot de veiligheidsproblematiek door welke organisaties/personen een besluit genomen wordt (men zou dit een soort procesnormering kunnen noemen);
- welke uitgangspunten en randvoorwaarden daarbij gehanteerd zullen worden;
- aan welke referentiewaarden het ontwerp getoetst zal worden.

B. Veiligheidsbeschouwingen

Het ontwerp zal moeten worden getoetst door middel van veiligheidsbeschouwingen. Op basis hiervan zal duidelijk moeten zijn dat de onder A. geformuleerde randvoorwaarden wordt voldaan en dat de referentiewaarden nergens worden overschreden.

- Een kwantitatieve risicoanalyse (QRA; ook wel probabilistische risicoanalyse genoemd). Bij een kwantitatieve risicoanalyse worden de risico's met behulp van kansen en gevolgen in beeld gebracht: wat is, gegeven een pakket voorziene veiligheidsmaatregelen, alsnog de kans op een bepaald soort ongeval en welke gevolgen zijn daarbij te verwachten. Bij deze aanpak wordt een groot aantal scenario's geanalyseerd. Dit levert uiteindelijk een indicatie van het te verwachten risiconiveau.
De QRA is een zeer gespecialiseerde manier van kijken die voor buitenstaanders vaak lastig te vatten is maar van groot belang is om een beeld van het totale veiligheidsniveau te krijgen.
- Een scenarioanalyse. Deze analyse van een beperkt aantal scenario's dient te zijn gericht op een nadere beschouwing van de mogelijkheden van de spoor- / weggebruiker voor vluchten in geval van een calamiteit (zelfredzaamheid), alsmede de mogelijkheden tot hulpverlening door de openbare hulpverlenende diensten.

Na het uitvoeren van een kwantitatieve risicoanalyse en een scenarioanalyse wordt het ALARA principe gehanteerd.

C. Basismaatregelen

Het ontwerp zal duidelijk inzicht moeten geven in de voorgenomen veiligheidsmaatregelen. De maatregelen dienen aan de hand van richtlijnen te worden vastgesteld. Voor tunnels voor wegverkeer zijn dat de VRC-richtlijnen.

D. Aanvullende maatregelen en hun veiligheidseffectiviteit

Mocht, bij toepassing van de vastgestelde basismaatregelen, blijken dat op grond van de onder B. gehanteerde veiligheidsbeschouwingen *niet* aan de onder A. geformuleerde eisen en referentiewaarden wordt voldaan, dan zijn aanvullende maatregelen nodig. Men moet dan aantonen dat met deze aanvullende maatregelen wel aan de gestelde eisen en referentiewaarden wordt voldaan.

E. De veiligheidsorganisatie

Met de tot hier beschreven aanpak kan op afdoende wijze worden aangetoond dat het *ontwerp* voldoet aan de eisen die er met betrekking tot de gebruiksveiligheid aan worden gesteld.

Maar ook in de *exploitatiefase* moet de veiligheid voldoende worden gewaarborgd. In dit stadium moet eenduidig zijn vastgelegd hoe de beheerder de ondergrondse/overkapte infrastructuur gaat beheren (management van inspectie en onderhoud; verkeersmanagement en management in geval van calamiteiten), en hoe dit beheer is afgestemd op en overeengekomen met de openbare hulpverlenende diensten.

Wanneer aan deze voorwaarden is voldaan is er sprake van een *veilig ontwerp* én een *veilig te exploiteren* tunnel.

2 Begrippen

In deze bijlage worden enkele benaderingen van (tunnel)veiligheid toegelicht.

Causale keten

Ongevallen ontstaan niet zomaar. In de meeste gevallen bestaat er een relatie tussen bepaalde verschijnselen die zich enige tijd voorafgaand aan een incident voordoen en het incident zelf. Na een incident voltrekken zich verscheidene processen die samen de uiteindelijke ernst van het ongeval bepalen. Het incident vormt hierbij als het ware een knooppunt tussen de oorzaken en de effecten.

Alles pleit ervoor om zo vroeg mogelijk in deze keten in te grijpen en de totale veiligheid dus ook in dié volgorde te beschouwen. Ook hier geldt immers: voorkómen is beter dan genezen.

Veiligheidsketen

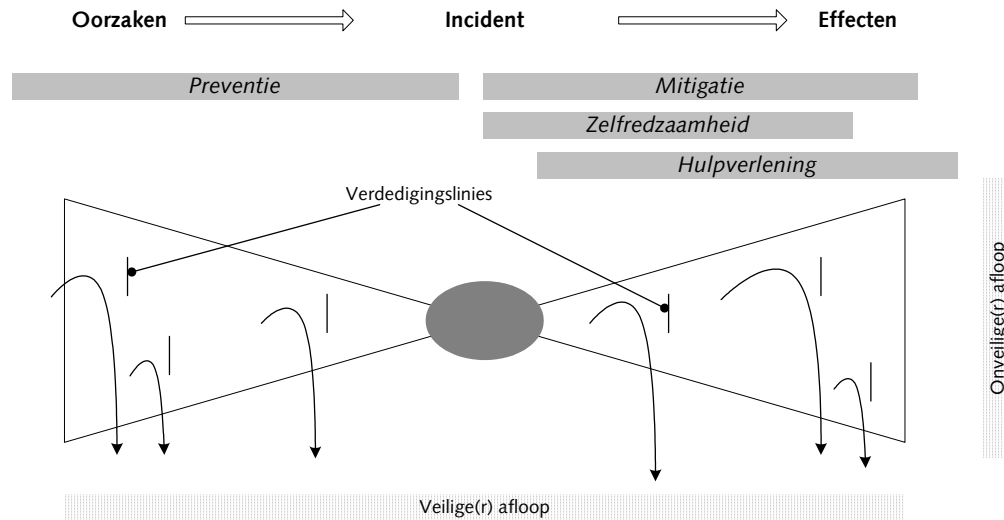
De zogenoemde veiligheidsketen is een afgeleide van de causale keten en bestaat uit vijf elementen:

- pro-actie: voorkom onveiligheid;
- preventie: tracht, waar onveiligheid niet te voorkomen is, de kans op een ongeval te verkleinen en de potentiële gevolgen te beperken;
- mitigatie (ook wel: correctie): mocht er toch wat gebeuren, zorg dan voor maatregelen die escalatie van de ongewenste gebeurtenis tegengaan;
- repressie: zorg ervoor dat de aanwezigen de mogelijkheid hebben om zich in veiligheid te brengen; indien de gevolgen dusdanig zijn dat hulp nodig is, zorg dan dat deze zo adequaat mogelijk plaats vindt;
- nazorg: herstel de oorspronkelijke situatie.

Er bestaan verschillende manieren om de ongevalsprocessen in te delen. In de Leidraad Scenarioanalyse Ongevallen in Tunnels wordt niet gesproken van repressie, maar van zelfredzaamheid (of zelfredding) en hulpverlening. In het kader van zelfredzaamheid moet het tunnelsysteem voorzieningen bieden aan de weggebruikers om zichzelf in veiligheid te brengen. Hulpverlening kan plaatsvinden door de hulpverleningsdiensten, maar soms ook door medewerkers van de tunnelbeheerder of door de weggebruikers zelf (blussen van een kleine brand).

Vlinderdasmodel

De keten oorzaken – incident (of verstoring) – effecten wordt vaak weergegeven in het zogenoemde vlinderdasmodel (zie Figuur B 1).



Figuur B 1 Het vlinderdasmodel

Het vlinderdasmodel wordt gelezen van links naar rechts. Het incident staat centraal. Links ervan staan de ongevalsoorzaken en rechts de effecten. Aan beide zijden bestaan aangrijpingspunten voor het beïnvloeden van het verloop van de causale keten. Enerzijds gaat het om het voorkómen van het incident en anderzijds om na een incident een zo veilig mogelijke afloop te bewerkstelligen.

De onderverdeling in preventie (voorkómen van het incident), mitigatie (voorkómen van escalatie), zelfredding en hulpverlening kan worden beschouwd als een tamelijk ruwe categorisering. Een gedetailleerdere beschouwing van de ongevalsketen brengt de concrete maatregelen in beeld.

De verticale strepen zijn zogenaamde 'verdedigingslijnies'. De pijltjes in deze figuur geven aan, dat een effectieve verdedigingslijn leidt tot een veilige(r) afloop van het incident, met uiteindelijk een terugkeer naar een beheerste en ongestoorde (verkeers)situatie.

Het vlinderdasmodel kan een kader bieden voor de optimale reductie van de risico's. Daarbij gelden de volgende basisprincipes:

- zoek de oplossingen zoveel mogelijk voorin de ongevalsketen (preventie);
- benoem verdedigingslijnies en aangrijpingspunten voor maatregelen.

ALARA

Bij het optimaliseren van de veiligheid wordt verder het ALARA-principe toegepast. "ALARA" staat voor: As Low As Reasonably Achievable. Zeer vrij vertaald betekent dit: "Gebruik in het hele ontwerptraject je verstand en kijk waar er met minimale extra investeringen op praktische wijze nog extra veiligheidswinst te boeken valt, ook wanneer de constructie met een kwantitatieve risicoanalyse en een scenario-analyse is getoetst". Gewoon goed nadenken levert met weinig extra kosten vaak een effectieve veiligheidsverbetering.

3 Aanpak scenarioanalyse

3.1 Afbakening: projectfasering

Deze Leidraad is specifiek gericht op scenarioanalyses die worden uitgevoerd ten tijde van het maken van het definitief ontwerp.

De scenarioanalyse wordt in de praktijk echter voor uiteenlopende beslissingen gebruikt: van een analyse die tijdens een vergelijking van varianten wordt uitgevoerd om de 'scores' van de verschillende varianten in scenario's met elkaar te confronteren, tot analyses die moeten leiden tot optimale afspraken voor calamiteitenbestrijding.

In Tabel B 1 worden per projectfase enkele kenmerken van de scenarioanalyse aangegeven. In algemene zin kan worden gesteld dat de mate van detaillering en kwantificering van effecten en schade toeneemt, naarmate men zich verder in het ontwerpproces bevindt. Dit geldt ook voor de betrouwbaarheid van de resultaten, aangezien deze afhangt van de betrouwbaarheid van de basisgegevens. Hoe groter immers de marges en de onzekerheden in de basisgegevens, des te groter de onzekerheid van de uitkomsten van de scenarioanalyse.

Uiteraard kan de praktijk anders uitpakken. Zo kan het bijvoorbeeld in specifieke gevallen nuttig zijn om al in een eerder stadium een onderdeel gedetailleerd uit te werken en uitgebreid te kwantificeren. Echter, hierbij moet dan rekening worden gehouden met het feit dat de resultaten betrouwbaarder worden naarmate de gegevens over het systeem beter bekend zijn.

De mogelijkheden van een scenarioanalyse variëren per projectfase, en kunnen als volgt worden omschreven:

- **Verkenning- en planstudiefase:** inventariseren van mogelijke scenario's en indicatie van de aard en omvang van de gevolgen, op basis van algemene kengetallen en schattingen. Scenarioanalyse als hulpmiddel bij een eerste (onderlinge) vergelijking van alternatieven: kwalitatieve uitwerking van de scenario's, op sommige punten eventueel aangevuld met berekeningen (afhankelijk van de specifieke eisen vanuit het project). Het technische voorzieningenpakket is dan vaak nog niet uitgewerkt.
- **Realisatiefase, maken definitief ontwerp:** scenarioanalyse voor het verbeteren van de technische en organisatorische maatregelen en voorzieningen op basis van een deels kwalitatieve, deels kwantitatieve risico-evaluatie. Vergelijken met beschikbare normen, eisen en richtlijnen. Uitgangspunt is een tunnelontwerp.
Wanneer het definitief ontwerp gereed is (bouwfase), kan de scenarioanalyse ook gebruikt worden als basis voor en/of onderdeel van rampen- en calamiteitenbestrijdingsplannen. Uitgaande van een uitgewerkt technisch voorzieningenpakket ligt de nadruk sterk op het optimaliseren van de organisatorische maatregelen.
- **Gebruiksfase:** in deze fase kan het gebeuren dat overwogen wordt het gebruik van het tunnelsysteem te wijzigen, doordat bepaalde omgevingsfac-

toren ingrijpend veranderen (toenemende verkeersintensiteit, groter aandeel goederenvervoer, meer en/of andere gevaarlijke stoffen, etc.). In dergelijke gevallen zullen bepaalde stappen van het analyseproces, en eventueel ook van het besluitvormingsproces, herhaald moeten worden.

Tabel B 1 Kenmerken van scenarioanalyses in de loop van een project

Fase Activiteiten	Toepassing scenarioanalyse	Gegevens	Uitwerking	Kwantificering	Betrouwbaarheid
			globaal	globaal	klein
Verkenningfase Voeren nut-en-noodzaak-discussie, aangeven veiligheidsproblematiek <i>Beslismoment: besluit planstudie</i>	Aangeven globale veiligheidsconsequenties van de alternatieven	Kengetallen Schattingen			
Planstudiefase Vastleggen veiligheidsdoelstellingen, opzetten veiligheidsconcept, vaststellen ontwerpuitgangspunten, uitwerken 1 alternatief <i>Beslismoment: Uitvoeringsbesluit</i>	Inventariseren mogelijke scenario's en mogelijke effecten, onderlinge vergelijking van alternatieven, eerste ontwerpoverwegingen inzake ruimtebeslag en veiligheidsmaatregelen	Vigerende afspraken bij hulpdiensten			
Realisatiefase Doorlopen ontwerpproces Maken definitief ontwerp Aanvragen / verlenen bouwvergunning Bouw Opzetten beheersorganisatie Opzetten veiligheidsbeheersysteem <i>Beslismoment: Vrijgave voor gebruik</i>	Concretiseren/optimaliseren technische en organisatorische veiligheidsmaatregelen, vergelijken met veiligheidsdoelstellingen en -eisen, detaillering maatregelen en ontwikkeling calamiteitenbestrijdingsplannen (cbp'en), opstellen cbp'en en vastleggen afspraken met hulpverleningsdiensten	(Voor)ontwerp Verkeerscijfers			
Gebruiksfase Uitvoeren veiligheidsbeheersysteem	Eventuele herhaling van eerdere analyses bij wijzigingen gebruik of constructie, oefenen rampbestrijding	As built gegevens Actuele situatie Geplande wijzigingen			
			gedetailleerd	gedetailleerd	groot

4 Scenarioanalyseteam

In de navolgende paragrafen worden elementen uit de in het hoofdrapport genoemde instructies nader toegelicht:

Paragraaf	Hoofdrapport	Onderwerp
4.1	Instructie 2	Actorenanalyse
4.2	Instructie 3	Verdeling van taken, verantwoordelijkheden en bevoegdheden

4.1 Actorenanalyse

Een actorenanalyse houdt een inventarisatie in van de identiteit en de belangen (op een aantal niveaus) van alle partijen. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen de 'spelers in de arena', de politieke tribune en de publieke tribune.

In de arena bevinden zich de primair betrokkenen:

- de initiatiefnemer: de organisatie met het initiatief om een tunnel te ontwerpen en te bouwen, vaak is dit Rijkswaterstaat, soms een provincie, een gemeente of een andere partij;
- de beslissers: de instantie die het initiatief toetst aan het tunnelveiligheidsbeleid en de regelgeving;
- de uitvoerders: de organisatie die verantwoordelijk is voor de bouw en exploitatie van de tunnel.

Betrokkenen uit de arena kunnen zich laten adviseren door verschillende partijen. De belangrijkste adviserende partijen zijn de verschillende hulpdiensten.

Op de politieke tribune zitten de niet-direct betrokken overheden (provincie, buurgemeenten, beleidsafdelingen van de ministeries van V&W, VROM en BZK). Op de publieke tribune kijken de gebruikers van de infrastructuur, de omwonenden en diverse belangengroepen toe (automobilisten, goederenvervoerders, bewoners, natuur & milieu, veiligheid).

Tabel B 2 is een voorbeeld van een actorenanalyse en geeft een indruk van de partijen die bij een scenarioanalyse betrokken zouden kunnen zijn.

Tabel B 2 Voorbeeld van een actorenanalyse

Partij, actor	Doel lange termijn	Doel korte termijn	(Potentiële) Bijdrage aan scenarioanalyse / rol in project
<i>Initiatiefnemer:</i>			
Rijk, bijvoorbeeld een Regionale Directie RWS; Ontwerper:	Optimalisatie van verkeersstromen.	Realiseren of verbeteren van een transportroute.	Beslist over voortzetting/realisatie tunnelbouwproject; Bouw van een tunnel; Leverancier gegevens.
<i>Beslissers:</i>			
Vergunningverlener:	Handhaven van landelijk vastgestelde normen (milieu, veiligheid, waterbeheer en dergelijke).	Erop toezien dat tunnel voldoet aan eisen.	Beslist over vergunningaanvraag; Toetsen van ontwerp, bestekken etc.; Inbreng kennis vergunningverlening.
Lokaal bestuur (bevoegd gezag):	Handhaving/verbetering woon-/werkklimaat gemeente. Verbetering lokale veiligheid en/of milieu.	Verbetering verkeersafwikkeling. Handhaving openbare orde.	Beslist over bouw- en gebruiksvergunning. Inbreng bestuurlijke randvoorwaarden.
<i>Adviseurs:</i>			
Hulpverleningsdiensten:	Uitvoering van het veiligheidsbeleid en de hulpverleningstaken.	Adviseren van Bevoegd Gezag over de toereikendheid van het voorzieningenniveau in de tunnel.	Advies uitbrengen aan Bevoegd Gezag; Deelname aan overleg, gevraagd en ongevraagd leveren van technisch-inhoudelijk en organisatorisch advies; Inbreng kennis hulpverlening
Overige adviseurs:	Afhankelijk van rol Commercieel belang.	Adviseren van hun opdrachtgevers.	Opstellen van inhoudelijke rapporten / adviezen.
<i>Uitvoerders:</i>			
Bouwer / uitvoerder (directievoerder):	Het bouwen van infrastructuurle werken volgens van tevoren vastgestelde specificaties; Commercieel belang	Bouwen van een tunnel volgens afspraken (tijd, budget, kwaliteit).	Aanleveren randvoorwaarden bouw tunnel; Toezicht op de bouw en handhaving van gemaakte afspraken.
Tunnelexploitant:	Exploitatie van een of meer tunnels en/of andere infrastructuur.	Uitbreiding van de exploitatiemiddelen (investering).	In exploitatie nemen van de tunnel Aanleveren randvoorwaarden exploitatie (beheer / bediening).
Bergers:	Commerciële dienstverlening bij verkeersongevallen.	Communicatie rond ongevallen zodanig inrichten dat (zo vroeg mogelijk) inschakelen bergers is gewaarborgd.	Aanleveren randvoorwaarden bergingsactiviteiten.

Partij, actor	Doel lange termijn	Doel korte termijn	(Potentiële) Bijdrage aan scenarioanalyse / rol in project
<i>Politieke tribune:</i>			
Provincie:	Handhaving/verbetering woon-/werkklimaat provincie; Verbetering van regionale veiligheid en/of milieu.	Verbetering verkeersafwikkeling op regionaal niveau.	Inbreng provinciaal-bestuurlijke randvoorwaarden.
Buurgemeenten:	Handhaving/verbetering woon-/werkklimaat buurgemeenten; Verbetering van regionale veiligheid en/of milieu.	Verbetering in de eigen gemeente.	Inbreng provinciaal-bestuurlijke randvoorwaarden.
Ministeries (V&W, VROM, BZK):	Uitvoering beleid.	Uitvoering project binnen beleidsdoelen.	Toets aan beleidsvoorwaarden, wettelijke eisen.
<i>Publieke tribune:</i>			
Gebruikers infrastructuur:	Kwalitatief hoogwaardig transport.	Snellere route van A naar B.	Inspraak.
Omwonenden:	Realisatie/onderhouden van prettige leefomgeving.	Vermindering overlast.	Inspraak.
Belangengroepen:	Belangenbehartiging.	Belangenbehartiging.	Inspraak; Druk op politiek.

4.2 Verdeling van taken, verantwoordelijkheden en bevoegdheden

Voor het uitvoeren van een scenarioanalyse moeten analyseactiviteiten worden uitgevoerd en keuzes worden gemaakt. Wie daarbij wat doet, is mede afhankelijk van de omstandigheden binnen en in de omgeving van een projectteam van een bouwproject.

Het belangrijkste is dat binnen het project de taken, verantwoordelijkheden en bevoegdheden (TVB'en) inzake de scenarioanalyse op een rij worden gezet en dat wordt beslist, aan wie deze worden toegewezen.

De opdracht aan het team hangt hiermee samen. Behoren bijvoorbeeld de volgende taken tot de opdracht:

- Formuleren van veiligheidsdoelen (stap 0, instructie 1 uit de Leidraad)?
- Bedenken van aanvullende maatregelen (stap 4, instructie 4 uit de Leidraad)?
- Opnieuw uitvoeren van de scenarioanalyse met de aanvullende maatregelen, om de effectiviteit hiervan te toetsen (idem)?

Hieronder is de taakverdeling aangegeven die als uitgangspunt heeft gediend voor de Leidraad Scenarioanalyse (Tabel B 3). Deze kan tevens worden gezien als een illustratie van het bovenstaande.

Binnen de Leidraad worden de volgende rollen onderkend:

Projectteam	Projectteam van het tunnelbouwproject; opdrachtgever van de scenarioanalyse.	Een eventueel bestaand veiligheidsoverleg wordt gezien als onderdeel van het PT.
Scenarioanalyseteam	Uitvoerder van de scenarioanalyse.	Een klein en slagvaardig team, waarin de belangrijkste expertises zijn vertegenwoordigd.
Begeleidingscommissie	Toetsers van de scenarioanalyse.	Commissie van wijze mannen en vrouwen" die de belangrijkste keuzes van het team toetst. In de BC zijn indien mogelijk alle expertises vertegenwoordigd, en in ieder geval vertegenwoordigers van de initiatiefnemer en alle beslis-sers binnen het project.
Adviseurs		Daar, waar tijdens de analyse de behoefte ontstaat aan een expertise die niet is vertegenwoordigd in scenarioanalyseteam of begeleidingscommissie, kunnen externe adviseurs worden ingeschakeld.

In deel A van de Beleidsnota Tunnelveiligheid (zie ook 1.1 in dit bijlagenrapport) is sprake van een expertgroep. De expertgroep wordt in de loop van het project een aantal keren ingeschakeld om een zwaarwegend advies te geven over veiligheidsaspecten binnen het project. Met de Begeleidingscommissie wordt NIET deze expertgroep bedoeld.

De expertgroep zal een advies uitbrengen op basis van alle op dat moment relevante veiligheidsstudies die in het kader van het onderhavige project zijn opgesteld, waaronder een afgeronde scenarioanalyse. Vervolgens neemt het bevoegd gezag een beslissing op basis van de stukken inclusief het advies van de expertgroep. In Tabel B 3 zijn deze rollen niet opgenomen, aangezien zij pas in beeld komen na afronding van de scenarioanalyse.

Tabel B 3 Taakverdeling Scenarioanalyse (voorbeeld)

Taken in scenarioanalyse	Scenarioanalyseteam	Begeleidingscommissie	Projectteam
.....			
Taken voor de verschillende teams opstellen			Uitvoeren
Scenarioanalyseteam en eventueel begeleidingscommissie formeren en opdracht geven			Uitvoeren
Formuleren van veiligheidsdoelen	Vorbereiden	Toetsen aan Beleidsnota (deel A en B)	Informatie aanleveren
Formuleren van toetscriteria	Uitvoeren	Toetsen aan veiligheidsdoelen	
Beschrijving tunnelsysteem	Uitvoeren		Informatie aanleveren
Aannames in tunnelsysteem	Overleg met projectteam waar nodig		Op afroep assisteren
Selecteren van scenario's	Uitvoeren	Toets aan selectiecriteria	

Taken in scenarioanalyse	Scenarioanalyseteam	Begeleidingscommissie	Projectteam
Uitwerking van scenario's	Uitvoeren, waar nodig met hulp van begeleidingscommissie, projectteam en externe deskundigen	Op afroep assisteren	Op afroep assisteren
Toets van de resultaten aan de toetscriteria	Uitvoeren		
Beoordeling of veiligheidsdoelen worden bereikt	← ← Gezamenlijk uitvoeren → →		
Bedenken van aanvullende maatregelen (indien onderdeel van opdracht)	Uitvoeren		
Scenarioanalyse op basis van aangepaste systeembeschrijving als toets van effectiviteit aanvullende maatregelen (indien onderdeel van opdracht)	Uitvoeren		
Rapportage	Opstellen	Toetsen	
Scenarioanalyse gereed conform opdracht?			Beslissen

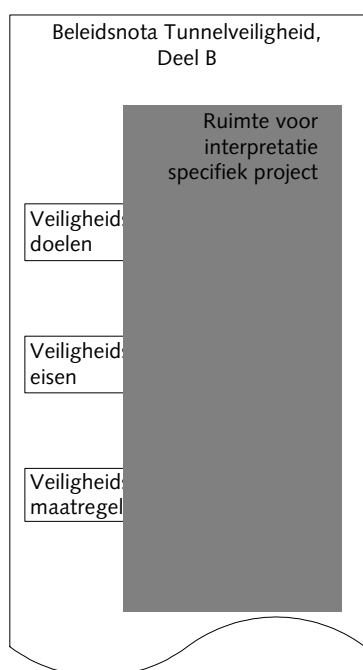
5 Toetscriteria (stap 0)

In de navolgende paragrafen worden elementen uit de in het hoofdrapport genoemde instructies nader toegelicht:

Paragraaf	Hoofdrapport	Onderwerp
5.1	Instructie 1	Veiligheidsdoelen
5.2	Instructies 2 en 3	Toetscriteria

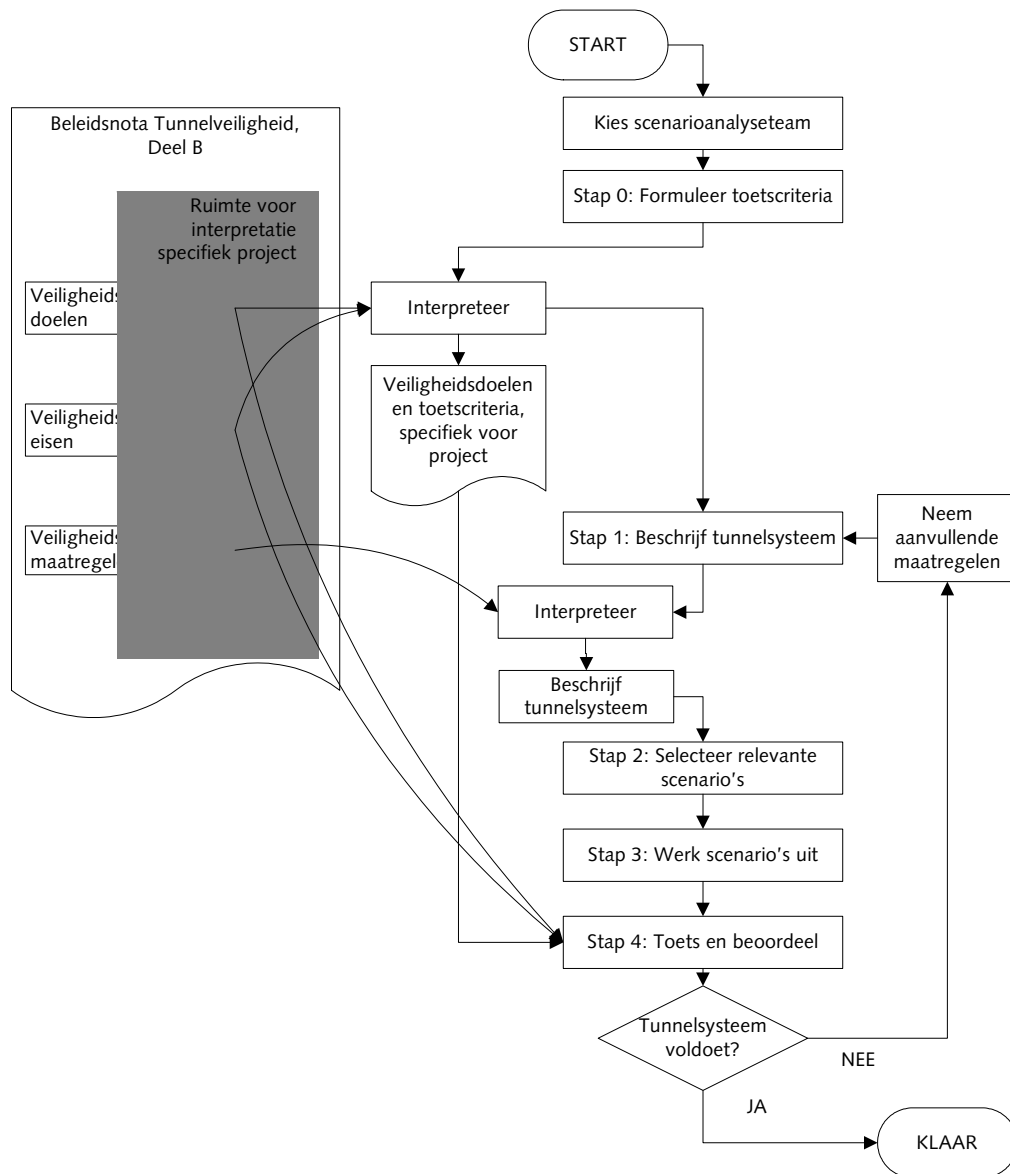
5.1 Veiligheidsdoelen

Deel B van de Beleidsnota Tunnelveiligheid bevat veiligheidsdoelen, veiligheidseisen en veiligheidsmaatregelen. De veiligheidseisen zijn afgeleid uit de veiligheidsdoelen en hieruit zijn weer de maatregelen afgeleid (Zie Figuur B 2). Binnen deel B van de Beleidsnota bestaat nog ruimte voor interpretatie door het projectteam, onder meer omdat niet alle eisen en maatregelen in alle situaties van toepassing zijn.



Figuur B 2 Samenhang van veiligheidsdoelen, veiligheidseisen en veiligheidsmaatregelen in de Beleidsnota, deel B.

In Figuur B 3 is de plaats van de Beleidsnota (deel B) weergegeven in het proces van scenarioanalyse. De scenarioanalyse, zoals die in hoofdstuk 3 van de Leidraad zelf is gepresenteerd, is hiertoe gecombineerd met Figuur B 2.



Figuur B 3 Plaats van veiligheidsdoelen, -eisen en -maatregelen uit de Beleidsnota (deel B) in de scenarioanalyse.

Allereerst formuleert het scenarioanalyseteam de toetscriteria (stap 0) op basis van de veiligheidsdoelen. De (geïnterpreteerde) veiligheidsmaatregelen worden opgenomen in de beschrijving van het tunnelsysteem (stap 1 van de scenarioanalyse). Na de selectie van de scenario's (stap 2) en de uitwerking ervan (stap 3) wordt ten slotte beoordeeld of het tunnelsysteem voldoet aan de toetscriteria, en of daarmee tevens wordt voldaan aan de veiligheidsdoelen en de veiligheidsdoelen (stap 4).

Ten tijde van het verschijnen van deze Leidraad is deel B van de Beleidsnota nog niet afgerond. Wanneer dat wel het geval is, kan volgens de hiervoor beschreven methode worden gewerkt. Een volgende versie van de Leidraad zal hieraan worden aangepast. Tot die tijd moet binnen het project invulling worden gegeven aan veiligheidsdoelen, -criteria en -maatregelen.

Gezien het belang van veiligheidsdoelen voor de waarde van de scenarioanalyse, wordt aanbevolen om

- de veiligheidsdoelen in overleg met het projectteam op te stellen. Indien reeds conform de Beleidsnota (deel A) wordt gewerkt, zijn veiligheidsdoelen al in een eerder stadium vastgelegd. In dat geval moeten hieruit die doelen worden geselecteerd, die getoetst moeten worden door middel van de scenarioanalyse;
- zowel de doelen als de ervan afgeleide toetscriteria voor te leggen aan de begeleidingscommissie (indien deze er is) om deze te toetsen.

!!! WAARSCHUWING !!!

De hierna volgende tekst is uitsluitend bedoeld als een **hulpmiddel** bij het formuleren van veiligheidsdoelen en toetscriteria, zolang de Wet ART nog niet van kracht is.

Elk afzonderlijk scenarioanalyseteam zal tot die tijd met grote zorg zelf veiligheidsdoelen en toetscriteria moeten formuleren, eventueel met behulp van de suggesties in deze bijlage.

Uitgangspunt van de veiligheidsdoelen voor de scenarioanalyse is het algemene veiligheidsdoel van het project dat getoetst dient te worden door middel van een scenarioanalyse. Het accent van de scenarioanalyse ligt op zelfredzaamheid en hulpverlening. Hierbij is het optreden van een incident een gegeven.

Het algemene doel kan dan bijvoorbeeld zijn: Het tunnelsysteem is erop gericht dat

- zo mogelijk alle tunnelgebruikers ongedeerd de tunnel kunnen verlaten, al dan niet met hulp;
- de materiële schade beperkt blijft.

Allereerst dient dit weinig concrete algemene doel bruikbaar gemaakt te worden voor de scenarioanalyse. Leid hiervoor meer specifieke veiligheidsdoelen af van het algemene veiligheidsdoel. Dit kan bijvoorbeeld door het opsplitsen van het doel naar de ongevalsprocessen.

Voorbeelden van veiligheidsdoelen, afgeleid van het algemene doel:

Het tunnelsysteem (constructie, inrichting en organisatie) is gericht op

1. snelle en correcte detectie van bedreigingen door de operator
2. snelle alarmering van de operator door de weggebruiker
3. het – door de operator – snel de juiste maatregelen nemen die een eventuele escalatie voorkómen of beperken
4. snelle en correcte alarmering en instructie van de weggebruikers door de operator
5. een adequate responstijd van de weggebruikers (vanaf start bedreiging tot start vluchten)
6. de juiste en voldoende middelen voor de weggebruikers om te voet een veilige plaats te bereiken
7. snel ter plaatse van het incident zijn van de hulpdiensten
8. de juiste en voldoende middelen om niet of verminderd zelfredzaam naar een veilige plaats te brengen (door de hulpdiensten)
9. de juiste en voldoende middelen voor de hulpdiensten om de effecten (bijvoorbeeld brand) van het incident te bestrijden.

De invulling van termen als 'snel', 'adequaat' en 'voldoende' moet bij een dergelijke lijst plaatsvinden bij het formuleren van de toetscriteria. Meer voorbeelden van veiligheidsdoelen zijn te vinden in de concept-Beleidsnota deel B (www.tunnelveiligheid.nl).

5.2 Toetscriteria

Na het formuleren van de veiligheidsdoelen moeten deze worden verfijnd tot toetscriteria.

Hiertoe wordt elk van de veiligheidsdoelen voorzien van één of meerdere toetsvariabelen. De hamvraag is: *Hoe* kunnen we bepalen of dit doel wordt bereikt? De toetscriteria, die één op één aan de toetsvariabelen worden gekoppeld, moeten namelijk, in tegenstelling tot de veiligheidsdoelen, meetbaar zijn met behulp van de uitgewerkte scenario's. Toetscriteria moeten voldoen aan het SMART-principe: Specifiek – Meetbaar – Acceptabel – Realistisch – Tijdgebonden.

Hieronder staan enkele voorbeelden. Een toetscriterium heeft per definitie betrekking op de te analyseren incidentscenario's, die in stap 2 van de scenarioanalyse worden geselecteerd en beschreven.

N.B.: Deze voorbeelden kunnen niet zomaar op elke tunnel toegepast worden en zijn uitsluitend bedoeld als illustratie van wat met een toetscriterium wordt bedoeld!

1. De tunnel operator drukt de calamiteitenknop in maximaal n minuten na het ontstaan van de bedreiging.
Hier is de toetsvariabele: De tijdsduur vanaf het ontstaan van de bedreiging tot het indrukken van de calamiteitenknop door de operator.
Het toetscriterium is: maximaal n minuten.
2. Na alarmering zijn brandweer, ambulance en politie binnen de voor de hulpdiensten geldende normtijden ter plaatse aanwezig. (Specifiek maken voor de tunnel)
3. De hulpdiensten kunnen vanaf de toegang tot de tunnel binnen tien minuten veilig bij de plek van het incident komen, met de voor de bestrijding van het incident noodzakelijke mensen en middelen (zoals in andere criteria gespecificeerd). (Specifiek maken voor de tunnel)

6 Beschrijving tunnelsysteem (stap 1)

In de navolgende paragrafen worden elementen uit hoofdstuk 6 van het hoofdrapport nader toegelicht:

Paragraaf	Hoofdrapport	Onderwerp
6.1	Inleiding	Systeembeschrijving
6.2	Instructies	Systeemvariabelen

6.1 Systeembeschrijving

Bouwwijze

De kosteneffectiviteit van de veiligheidsmaatregelen hangt af van de *bouwwijze* van tunnels. Bij zinktunnels kan de afstand tussen vluchtdeuren relatief goedkoop worden verkleind. Bij boortunnels is dit echter veel kostbaarder (dwarsverbindingen naar een andere tunnelbuis of schachten naar het maaiveld zijn erg duur).

Geometrie en inrichting

Bij *geometrie* en *inrichting* van de tunnel gaat het om de afmetingen van de tunnel, de (rijstroom)indeling, de vluchtwegen en de aanwezigheid van voorzieningen en installaties (ventilatie, riolering, verlichting, hulpposten, signaleringssystemen, et cetera).

Omgeving

De tunnel is geen geïsoleerd systeem en heeft een plaats in zijn *omgeving*. Deze omgeving kan bijvoorbeeld zware industrie bevatten, wat een aanwijzing kan zijn dat bepaalde stoffen met hogere waarschijnlijkheid dan gemiddeld door een wegtunnel vervoerd worden. De aanwezigheid van een pretpark in de buurt zegt iets over de waarschijnlijkheid van een ongeval waarbij diverse bussen met schoolkinderen betrokken zijn. Een complexe verkeerssituatie vlak na of in een wegtunnel (verkeersplein, in- en uitvoegstroken) vormt een verstoring van het normale verkeerspatroon. Bij meervoudig ruimtegebruik moet rekening worden gehouden met de doorwerking van een tunnelincident naar de bovenbouw. In de scenarioanalyse dient hier aandacht aan besteed te worden.

Veiligheidsorganisatie

Ook de *veiligheidsorganisatie* dient beschreven te worden. Aangegeven moet worden hoe toezicht gehouden wordt op de tunnel, waar de operator zich bevindt, welke informatie hij krijgt en welke interventiemogelijkheden hij heeft. Verder vallen onder dit punt onder meer de communicatie met de hulpverleningsdiensten, de aanrijroutes en -tijden en de hulpverlening op zich (instructies, procedures, etc.).

<i>Algemeen</i>		
Systeemvariabele	Mogelijke waarden, toelichting	
17	gevaarlijke stoffen (vtg/jaar) <i>evt. per stofcategorie: LF1-2; LT1-6; GF1-3; GT1-7; explosieven</i>	<i>vtg/jaar</i>
18	bestemmingen nabij tunnel	<i>beschrijven (bijvoorbeeld woonwijk, kantoren, industrie, sportpark)</i>
19	verkeersknooppunten nabij tunnel	<i>beschrijven</i>
20	evenementen nabij tunnel	<i>beschrijven (bijvoorbeeld popconcert)</i>
21	

<i>22 Detectie en signalering</i>		
Systeemvariabele	Mogelijke waarden	Output
▪ snelheidsdetectie	<i>ja / nee</i>	<i>signaal / AOC²; reactietijd ... s</i>
▪ temperatuurdetectie	<i>ja / nee</i>	<i>signaal / AOC; reactietijd ... s</i>
▪ rookdetectie	<i>ja; hoe? / nee</i>	<i>signaal / AOC; reactietijd ... s</i>
▪ CO-detectie	<i>ja / nee</i>	<i>signaal / AOC; reactietijd ... s</i>
▪ hoogtedetectie	<i>ja / nee</i>	<i>signaal / AOC; reactietijd ... s</i>
▪ detectie gevaarlijke stoffen	<i>ja; hoe? (voertuig-detectie / gasdetectie) / nee</i>	<i>signaal; reactietijd ... s</i>
▪ ladingvolgsysteem	<i>ja / nee</i>	<i>signaal; reactietijd ... s</i>
▪ camerabewaking (CCTV)	<i>ja / nee</i>	<i>signaal; reactietijd ... s</i>
▪ intercom hulppost	<i>ja / nee</i>	<i>signaal; reactietijd ... s</i>
▪ anders, nl.....	<i>ja / nee</i>	<i>signaal / AOC; reactietijd ... s</i>

<i>Verkeersgeleiding</i>		
Systeemvariabele	Mogelijke waarden	Bediening
23	signalering (borden)	<i>ja / nee</i> <i>handmatig / CK³ / AOC; reactietijd ... s</i>
24	attendering weggebruiker	<i>ja (hoe?) / nee</i> <i>standaard / operator; reactietijd ... s</i>
25	afkruisen rijstroken	<i>ja / nee</i> <i>handmatig / CK / AOC; reactietijd ... s</i>
26	afsluiten tunnelbuizen	<i>VRI / VRI + slagbo- men</i> <i>handmatig / CK; reactietijd ... s</i>
27	

<i>Mitigatie</i>		
Systeemvariabele	Mogelijke waarden	Bediening
28	ventilatie	<i>ja / nee</i> <i>handmatig / CK / AOC</i>
29	blusmiddelen in hulppost voor weggebruiker	<i>ja / nee</i>

² Automatisch OpstartCommando

³ Calamiteitenknop

<i>Mitigatie</i>		
Systeemvariabele	Mogelijke waarden	Bediening
30	blusmiddelen in hulppost voor brandweer	<i>ja / nee</i>
31	tunnelcompartimentering	<i>ja / nee</i> <i>handmatig / CK⁴; reactietijd ... s</i>
32	automatische brandbestrijding	<i>ja / nee</i> <i>handmatig / CK; reactietijd ... s</i>
33	hittewerende bekleding	<i>ja / nee</i>
34	afvoer en opvang van vloeistoffen	<i>capaciteit:</i>
35	

<i>Zelfredding</i>		
Systeemvariabele	Mogelijke waarden	Bediening
36	attendering weggebruiker	<i>ja / nee</i> <i>standaard / operator; reactietijd ... s</i>
	zo ja, hoe:	<i>luidspreker inbreken op radiofrequentie voorgeprogrammeerde omroepberichten</i>
37	evacuatie	
	▪ vluchtweg	<i>middenkanaal / niet incidentbuis / anders, nl</i> <i>reactietijd ... s</i>
	▪ breedte vluchtweg	<i>m</i>
	▪ h.o.h.-afstand vluchtdeuren in buis	<i>m</i>
	▪ hart-op-hart afstand tussen vluchtdeuren	<i>m</i>
	▪ aanduiding vluchtdeuren	<i>visueel / audio</i>
	▪ breedte vluchtdeuren (m)	<i>m</i>
	▪ vluchtdeuren vergrendeld	<i>ja / nee</i> <i>handmatig / CK / AOC⁵; reactietijd ... s</i>
38	verlichting vluchtweg	<i>ja / nee</i> <i>handmatig / CK / AOC; reactietijd ... s</i>
39	...	

<i>Hulpverlening</i>		
Systeemvariabele	Mogelijke waarden	Toelichting
40	alarmering meldkamers OHD	<i>ja / nee</i> <i>signaal / operator; reactietijd ... s</i>
41	aanrijroute en -tijd	<i>incidentbuis / niet incidentbuis</i>
42	calamiteitenplan	<i>ja / nee</i>
43	rampenbestrijdingsplan	<i>ja / nee</i>

⁴ Calamiteitenknop

⁵ Automatisch OpstartCommando

<i>Hulpverlening</i>		
	Systeemvariabele	Mogelijke waarden Toelichting
44	procedures hulpverlening	<i>calamiteitenplan beschrijven</i>
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ communicatie ▪ regie ▪ verkenning ▪ slachtofferhulp ▪ brandbestrijding ▪ afvoer gewonden ▪ opvang evacués ▪ instrueren tunnelgebruikers ▪ oefenplan ▪ anders, nl. 	<i>ja / nee</i>
45	...	

<i>Herstel doorstroming</i>		
	Systeemvariabele	Mogelijke waarden Toelichting
46	procedures berging voertuigen	<i>ja / nee</i>
47	procedures herstel tunnel	<i>ja / nee</i>
48	

7 Selectie relevante scenario's (stap 2)

In de navolgende paragrafen worden elementen uit de in het hoofdrapport genoemde instructies nader toegelicht:

Paragraaf	Hoofdrapport	Onderwerp
7.1	Instructie 1	Voorbeelden van scenario's
7.2	Instructie 2	Escalatie

7.1 Voorbeelden van scenario's

Voor mogelijke scenario's is hier geput uit een drietal eerdere studies die samen een redelijk uitputtend beeld geven van de mogelijkheden:

- MAVIT scenario's tunnelincidenten (DHV) [2].
- Scenarioanalyse van de overkappingsvarianten voor de A2 Leidsche Rijn (TNO-MEP) [3].
- Deterministische analyse voor de tunnels in de A73-Zuid te Swalmen en Roermond (Bockholts) [4].

In Tabel B 5 staan van elke studie de gecodeerde scenario's zodanig gerangschikt, dat vergelijkbare scenario's makkelijk kunnen worden herkend.

N.B.: De coderingen komen overeen met de nummering zoals deze in de betreffende studies zijn toegepast, niet met de in deze Leidraad gehanteerde scenariocategorieën.

Tabel B 5 Overzicht van scenario's uit een drietal studies [3, 4, 5]

[2] MAVIT (DHV)		[3] A2 Leidsche Rijn (TNO-MEP)		[4] A73-Zuid Swalmen en Roermond (Bockholts)	
1	filevorming achter stilstaand voertuig (éénrichting)			A.0.1	pech
2	filevorming achter brandende personenauto (éénrichtingsverkeer)	4	personenautobrand	C.1.14	brand in een personenauto waarachter zich een file vormt
3	filevorming achter brandende vrachtauto (éénrichtingsverkeer)	5	bus/vrachtauto (i.c. vrachtauto)	C.1.15	brand in een vrachtauto waarachter zich een file vormt
3	filevorming achter brandende vrachtauto (éénrichtingsverkeer)	5	bus/vrachtauto (i.c. vrachtauto)	C.1.16	brand in een vrachtauto met lading waarachter zich een file vormt
4	filevorming achter botsing (éénrichtingsverkeer)	2	ongeval met uitsluitend materiële schade (UMS)	A.0.5	lichte aanrijding (UMS)

[2] MAVIT (DHV)	[3] A2 Leidsche Rijn (TNO-MEP)	[4] A73-Zuid Swalmen en Roermond (Bockholts)
5		D.3.1 lekken van brandbare vloeistof uit tankauto
6		D.4.4 lekken van onder druk tot vloeistof verdichte toxische gas
7	3	letseloneval B.0.8 kettingbotsing
7	3	letseloneval B.0.9 aanrijding in de file
8	4	personenautobrand C.2.14 brand in een personenauto als er al een file staat
9	5	bus/vrachtautobrand (i.c. vrachtautobrand) C.2.15 brand in een vrachtauto als er al een file staat
9	5	bus/vrachtautobrand (i.c. vrachtautobrand) C.2.16 brand in een vrachtauto met lading als er al een file staat
10		D.3.1 lekken van brandbare vloeistof uit tankauto
11	10	ongeval met vrijkomen toxisch gas D.4.4 lekken van onder druk tot vloeistof verdichte toxische gas
12		C.1.14 brand in een personenauto waarachter zich een file vormt
13		C.1.15 brand in een vrachtauto waarachter zich een file vormt
13		C.1.16 brand in een vrachtauto met lading waarachter zich een file vormt
14		B.0.7 ernstige aanrijding met mogelijk beknelden
14		B.0.8 kettingbotsing
14		B.0.10 aanrijding frontaal (tweerichtingsverkeer) (in casu 2 vrachtauto's)
15		A.0.5 lichte aanrijding (UMS)
15		B.0.9 aanrijding in de file
16		D.3.1 lekken van brandbare vloeistof uit tankauto
16		D.3.2 explosie damppluchtmengsel na lekken van brandbare vloeistof uit tankauto

[2] MAVIT (DHV)	[3] A2 Leidsche Rijn (TNO-MEP)	[4] A73-Zuid Swalmen en Roermond (Bockholts)
16	vrijkomen brandbare stof na botsing in wegtunnel met tweerichtingsverkeer	D.3.3 brand vloeistofplas na lekken brandbare vloeistof uit tankauto
17	vrijkomen toxische stof (i.c. vloeistof) na botsing (tweerichtingsverkeer)	
31	filevorming door wateroverlast (éénrichtingsverkeer)	E.3 volstromen van de tunnel
	1 verkeersverstoring zonder schade (bijvoorbeeld te hoge lading)	A.0.4 schaderijding (te hoog)
	5 bus/vrachtautobrand (i.c. busbrand)	C.1.17 brand in een autobus waarachter zich een file vormt
	5 bus/vrachtautobrand (i.c. busbrand)	C.2.17 brand in een autobus als er al een file staat
	7 LPG BLEVE	D.4.1 koude BLEVE van onder druk tot vloeistof verdichte brandbare gas
	7 LPG BLEVE	D.4.2 warme BLEVE van onder druk tot vloeistof verdichte brandbare gas
	8 LPG gaswolk	D.4.3 gaswolkexplosie als gevolg van lekken van onder druk tot vloeistof verdichte brandbare gas
		A.0.2 verlies van lading
		A.0.3 object op rijbaan
		A.0.6 verkeersincident voorbij de tunnel waardoor files in de tunnel ontstaan
		B.0.11 onwel wording van een inzittende
		B.0.12 fietsers/voetgangers/loslopende dieren
		B.0.13 spookrijder
		C.1.18 brand in meerdere voertuigen door brandoverslag waarachter zich een file vormt
		C.2.18 brand in meerdere voertuigen door brandoverslag als er al een file staat
		D.1.1 uitstroming van gevaarlijke stoffen bij vrachtauto met samengestelde lading (stukgoed)
		D.2.1 bleve als gevolg van brand bij vrachtauto met gasflessen (drukhouders)
		D.2.2 gaswolkexplosie als gevolg van lekken van gasflessen

[2] MAVIT (DHV)	[3] A2 Leidsche Rijn (TNO-MEP)	[4] A73-Zuid Swalmen en Roermond (Bockholts)
		D.5.1 lekken tankauto met tot vloeistof verdichte cryogene gas
		D.6.1 massa-explosie lading van vrachtauto met massaexplosieve stoffen
		D.6.2 explosie lading van vrachtauto met snel ontploffende stoffen (brisante werking)
		E.1 terroristische aanslag
		E.2 aardbeving

7.2 Escalatie

Escalatie van een scenario is mede afhankelijk van het tunnelsysteem. Aanwezige technische en organisatorische voorzieningen en maatregelen kunnen immers al dan niet escalatie voorkómen.

Een incident kan worden ingeleid door een voorafgaande verstoring in het verkeersbeeld. Voorbeelden van verstoringen: spookrijder, incident voorbij tunnel, onwelwording inzittende, wateroverlast, object op rijbaan, fietsers / voetgangers / dieren op rijbaan, pechgeval, verloren lading.

Zulke verstoringen *kunnen* leiden tot een incident. Bijvoorbeeld: een spookrijder kan leiden tot een frontale aanrijding. In een tunnel zonder tweerichtingsverkeer zal dit de enige mogelijke oorzaak zijn van het incident 'frontale aanrijding'.

Van escalatie is sprake als na pech of een botsing brand ontstaat.

De eventuele aanwezigheid van gevaarlijke stoffen in een bij het incident betrokken voertuig speelt een belangrijke rol bij de mogelijke vervolgebeurtenissen.

Voorbeelden waarbij gevaarlijke stoffen extra gevaar opleveren in combinatie met brand: vrijkomen toxische gas- of dampwolk (bijvoorbeeld door schade aan een tankauto), lekken cryogeen gas, brandbare gaswolk, brandbare vloeistofplas.

Een volgende escalatiestap kan zijn brandoverslag. Ook in dit stadium is het van belang om te weten of er gevaarlijke stoffen aanwezig zijn.

Voorbeeld brandoverslag zonder gevaarlijke stoffen: grote brand van meerdere voertuigen en eventueel lading.

Voorbeelden brandoverslag mét gevaarlijke stoffen: warme BLEVE, massa-explosie, vrijkomen gevaarlijke stoffen.

Het is niet gezegd dat de bovengenoemde volgorde altijd de volgorde in een scenario is. De gegeven voorbeelden en factoren die een rol spelen bij escalatie, kunnen wel in overleg binnen het team gebruikt worden om na te gaan wat een mogelijke uitwerking van een bepaald scenario is.

8 Uitwerking scenario's (stap 3)

In de navolgende paragrafen worden elementen uit de in het hoofdrapport genoemde instructies nader toegelicht:

Paragraaf	Hoofdrapport	Onderwerp
8.1	Instructie 2	Tijdstappen
8.2	Instructie 3	Drie voorbeelden van een fotoalbum
8.3	Instructie 4	Aanpak kwantitatieve modellering
8.4	Instructie 4	Invoergegevens
8.11	Instructie 4	Analyse van het vluchtproces
8.12	Instructie 4	Vuistregelmodellen voor zelfredzaamheid
8.5	Instructie 4	Modellering van fysische effecten
8.6	Instructie 4	▪ Fysische effectenmodellering van brand
8.7	Instructie 4	▪ Fysische effectenmodellering van verdamping
8.8	Instructie 4	▪ Fysische effectenmodellering van dispersie
8.9	Instructie 4	▪ Fysische effectenmodellering van een explosie
8.10	Instructie 4	▪ Fysische effectenmodellering van een BLEVE
8.13	Instructie 4	Letselmodellering

8.1 Tijdstappen

Tabel B 6 *Tijdstappen bij de uitwerking van een ongevalsscenario*

Tijdstappen met toelichting	
0	aanloop en / of verstoring Mogelijk is geen sprake van een aanloop of verstoring voorafgaand aan het incident zelf; in dat geval wordt deze tijdstap niet uitgewerkt.
10	incident Hier start de detectiefase: de tijdsduur benodigd voor het detecteren van het incident door de operator en / of de weggebruiker.
20	detectie en/of melding en/of start zelfredding Zodra het incident is gedetecteerd of gemeld start de alarmfase. In deze fase worden de weggebruikers en zonodig de hulpverleningsdiensten gealarmeerd. De vluchtfase start op het moment dat weggebruikers feitelijk actie ondernemen om zichzelf in veiligheid te brengen. De zogenaamde gewaarwordingstijd (ook wel wake-up time genoemd) is hierbij een belangrijk begrip: dit is de tijdsduur tussen het tijdstip waarop de bedreiging merkbaar is en het moment waarop de weggebruiker actie neemt.
30	start interne hulpverlening Interne hulpverlening vindt plaats door medewerkers van de tunnelbeheerder of door de weggebruikers zelf.
40	start externe hulpverlening De externe hulpverlening start zodra de hulpverleningsdiensten ter plaatse zijn.
50	einde Het scenario eindigt zodra de tunnel weer in normaal bedrijf is en de rijbaan is vrijgegeven voor verkeer.

Met de in Tabel B 6 aangegeven tijdstappen kan flexibel worden omgegaan, afhankelijk van het scenario en het benodigde uitwerkingsniveau.

Bijvoorbeeld: de detectie en/of melding en/of start zelfredding in stap 20 kan op verschillende manieren worden ingevuld. Zo kan zelfredding al starten wanneer de detectie nog niet heeft geleid tot een reactie, of wanneer er nog geen "officiële" melding heeft plaatsgevonden.

Daarbij is het goed om de activiteiten helder af te bakenen, bijvoorbeeld detectie of melding. Detectie door de operator vindt in het algemeen plaats met behulp van technische hulpmiddelen. De weggebruiker neemt een incident waar met zijn zintuigen, en informeert dan wellicht de tunneloperator, een hulpdienst of het centrale alarmnummer 112. In het laatste geval is sprake van een melding.

In Tabel B 7 is een voorbeeld gegeven van mogelijke tijdstappen bij de uitwerking van een ongevalsscenario.

Tabel B 7 Voorbeeld van flexibel gebruik van tijdstappen

Stap nr.	Omschrijving	Toelichting
0	Aanloop	
1	Verstoring	(Technisch) Mankement aan voertuig
10	Incident	Voertuig stopt als gevolg van pech
20	Start zelfredding	Bestuurder stapt uit om pechgeval te melden
21	Detectie	Closed Circuit TV systeem springt aan bij registratie stilstaand voertuig
22	Melding	Bestuurder stilstaande auto heeft even tijd nodig om hulppost te bereiken, melding vindt plaats na de stappen 20 en 21
30	Start interne hulpverlening	Bijvoorbeeld een andere weggebruiker die stopt om hulp te verlenen
31		Afkruisen rijstrook door tunneloperator
32		Hulpteam tunnel ter plaatse
40	Start externe hulpverlening	Verkenning door gealarmeerde politie
41		Verkeer regelen buiten de tunnel door politie
42		Bergingsbedrijf arriveert om auto af te voeren
50	Einde scenario	Vrijgeven rijstrook

8.2 Drie voorbeelden van een fotoalbum

8.2.1 Aannames en legenda

Alle voorbeelden zijn fictief en berusten op niet bestaande gebeurtenissen. Daarbij zijn voor de voorbeelden de volgende aannames gedaan (het zijn geen default-waarden):




- Op een aantal plaatsen is gebruik gemaakt van vuistregels, bijvoorbeeld voor het aantal auto's op de weg en het aantal inzittenden. Voor het pech-scenario is bijvoorbeeld grofweg aangenomen dat de gemiddelde auto-dichtheid 2 auto's / 25 m bedraagt (op twee rijstroken, dus per rijstrook 1 auto / 25 m). Deze aanname is puur op gevoel bepaald.
- Voor het aantal inzittenden is in een spitsituatie gemiddeld 1,1 inzittenden per auto aangehouden. Dit getal zal in andere verkeerssituaties anders zijn (vakantieverkeer etc.).
- Voor de snelheid waarmee een file ontstaat is gebruik gemaakt van eenvoudige berekeningen. Op basis van de tussenafstand en snelheid van de auto's en de reactiesnelheid van de bestuurder kan worden berekend hoe groot de minimale remvertraging moet zijn, zodat de auto's op een bepaalde fileafstand van elkaar tot stilstand komen. Vervolgens kan hieruit de lengte van de file op een bepaald tijdstip worden bepaald. De praktijk wijst uit dat files in spitsverkeer zich zeer snel ontwikkelen. Vandaar dat in één van de scenario's is aangenomen dat de hele tunnel tot aan het incident in circa 3 minuten vol staat.

Legenda bij de fotoalbums

In tabel:

HV	hulpverlening
rechts: 50 links: X	aanduiding signalering

In de foto's:

B	berger
H	hulppost
K	kantonnier
	geneeskundige hulp
	hulpverlener
	brandweer (TAS)
	signalering
arcering licht	hinderlijke situatie door rook en temperatuur
arcering donker	letale situatie door rook en temperatuur

8.2.2 Scenario 1: Fotoalbum van een pechgeval

stap 0: aanloop/verstoring

Aan het begin van de avondspits begint de verkeersintensiteit in de westelijke buis (noord→zuid) al aardig toe te nemen (aanname 1: ca. 2 auto's/25 m). Een Oost-Europees busje rijdt de tunnel in. Halverwege de tunnel valt de oververhitte motor na wat haperingen uit .

stap 10: incident

De bus (die nog zo'n 80 km/u reed) rolt nog enige tijd door en komt op de opgaande helling tot stilstand. De bestuurder zet de bus 150 m vóór het einde van het gesloten deel aan de kant ($t = 0$ s). De bus blokkeert een deel van de rechterrijstrook, zodat slechts één volledige rijstrook overblijft. Er ontstaat direct een file (in 2-3 minuten staat de hele tunnel bovenstreams van het incident vol). De bestuurder ziet in eerste instantie geen kans de bus te verlaten en besluit te blijven zitten.

stap 20: detectie/melding

De operator ontvangt een melding uit het snelheidsonderschrijdingssysteem t.g.v. de ontstane file ($t=20$ s). Op de camerabeelden, die automatisch opkomen, is wel het busje zichtbaar, maar niet de bestuurder.

stap 30: start interne hulpverlening

De operator kruist de rechterrijstrook af en stelt een snelheidsbeperking in op de linkerrijstrook. De operator waarschuwt de sleepdienst en de wegbeheerder. De operator spreekt daarna de gestrande automobilist toe door de luidspreker en verzoekt hem om naar een hulppost te lopen en daar de intercom te gebruiken (taal/standaardteksten?). De automobilist stapt uit en loopt naar een hulppost en neemt de hoorn op. Hij krijgt direct contact met de operator die hem gerust stelt en instructies geeft.

stap 40: start externe hulpverlening

De dienstdoende kantonnier arriveert via de vluchtstrook na 9 minuten (aanname 2) bij de tunnelingang ($t = 10$ min), en rijdt naar de plaats van het incident. De berger (die na 15 min. arriveert (aanname 3) meldt zijn komst aan de operator (hoe?) en krijgt toestemming om naar binnen te rijden. Bij de plaats van het incident wordt hij opgevangen door de kantonnier. De kantonnier legt het verkeer stil op de linkerrijstrook opdat de berger het voertuig kan passeren. Het voertuig wordt aangekoppeld en weggesleept. De kantonnier schouwt het wegdek en zorgt dat eventuele achtergebleven materialen worden verwijderd.

stap 50: einde scenario

Ca. 20 minuten na het ontstaan van pech wordt de afgekruste rijbaan door de kantonnier weer vrijgegeven (middels melding aan operator). De operator heft de afkruising en snelheidsbeperking op.

Aannames:

- Verkeersdichtheid
- Aanrijtijd kantonnier en berger
- Vluchtdeuren standaard vergrendeld (in plaats van ontgrendeld) vanwege socialeveiligheidsaspecten.

Check

- Beschikbaarheid standaardteksten in vreemde talen
- Communicatie kantonnier/berger met operator

Scenario 1: Pechgeval

stap	naam	tijd-stip (s)	overzicht
0	aanloop / verstoring	< 0	
10	incident	0	
20	detectie / melding	20 s	
30	start interne hulpverl.	60 s	
40	start externe hulpverl.	10 min	
41	aankomst berger	16 min	
50	einde scenario	25 min	

populatie						atmosfeer	voorzieningen									operator	hulpverlening
voertuigen in incidentbuis	voertuigen in niet-incidentbuis	personen in incidentbuis	personen in vluchtbuis	overleden	gewond		Ventilatie incidentbuis	Ventilatie middenkanaal	Licht	Vluchtdouren naar mtk	Hulppost	Rijbaan incidentbuis	Rijbaan niet-incidentbuis	Droge blusleiding	Snelheidsonderschr.syst.		
50	-	55	0	0	0	normaal	uit	uit	normaal	vergr.	-	open	open	-	-	-	-
120	-	132	0	0	0	normaal	uit	uit	normaal	vergr.	-	open	open	-	-	-	-
122	-	134	0	0	0	normaal	uit	uit	normaal	vergr.	-	open	open	-	melding	Ontvangt melding stilstand	-
119	-	130	0	0	0	normaal	uit	uit	normaal	vergr.	Comm. Automob/operator	Rechts X Links 50	open	-	meldingen	waarschuwt wegbeh. en berger, communicatie met automob.	Wegbeh. stuurt kantonnier, berger stuurt wagen.
70	-	80	0	0	0	normaal	uit	uit	normaal	vergr.	-	Rechts X Links 50	open	-	meldingen	Comm. met kantonnier en berger	Kantonnier zet verkeer stil.
71	-	75	0	0	0	normaal	uit	uit	normaal	vergr.	-	Rechts X Links 50	open	-	meldingen		-
71	-	75	0	0	0	normaal	uit	uit	normaal	vergr.	-	opgeheven	open	-	-	Comm. met kantonnier, heft beperkingen op	-

8.2.3 Scenario 2: Fotoalbum van een kettingbotsing

stap 0: aanloop/verstoring

In de ochtendspits rijdt een vrachtwagen de tunnel in. Aan het einde van de neergaande helling valt een deel van de lading op de rechterrijstrook.

stap 10: incident

De auto achter de vrachtwagen probeert het voorwerp te omzeilen en wijkt plotseling uit naar de linkerrijstrook, waar op dat moment hard wordt gereden met korte tussenafstanden. Op de linkerrijstrook botst de uitwijkende auto op een passerende auto, die op zijn beurt weer wordt aangereden door zijn achterligger. In totaal zijn bij deze kettingbotsing 12 auto's betrokken, met in totaal 15 inzittenden. Eén van de chauffeurs is op slag dood, 3 inzittenden zijn ernstig gewond (waarvan 2 bekneld), 6 inzittenden zijn licht gewond (waarvan 3 bekneld). De rest is (vrijwel) ongedeerd. Het verkeer op de rechterrijstrook heeft tijdig kunnen stoppen. De vrachtwagen heeft niets in de gaten en rijdt de tunnel uit.

stap 20: detectie/melding

De operator ontvangt een melding van de verkeersdetectie (snelheidsonderschrijdingssysteem) en beoordeelt de automatisch opkomende camera-beelden. Omdat hij uit de beelden kan opmaken dat het een incident betreft met mogelijk zwaar gewonden/beknelden drukt hij op de calamiteitknop. Hierdoor worden o.a. beide tunnelbuizen afgesloten (verkeerslichten en slagbomen) en wordt de ventilatie gestart. Op dat moment heeft de file een lengte van 200 m bereikt. De operator meldt een ernstige kettingbotsing bij de meldkamer. Omdat geen brand is ontstaan acht de operator ontruiming van de tunnel niet noodzakelijk - hij geeft daarom geen vlucht-instructies. Wel verzoekt hij door de luidsprekers de aanwezige automobilisten hun motor uit te zetten en in hun voertuigen te blijven.

stap 30: start interne hulpverlening

Een paar bestuurders van de achter het voorwerp tot stilstand gekomen auto's proberen eerste hulp te verlenen aan de niet-beknelde slachtoffers.

stap 40: start externe hulpverlening

Na 10 minuten arriveren politie en geneeskundige hulp via de ingang van de andere tunnelbuis bij het opgegeven deurnummer en wachten daar op de brandweer, die met twee tankautospuiten (TAS) en één hulpverleningsvoertuig (HV) arriveert, één TAS en het HV in de andere buis bij de betreffende deur, de andere TAS voor de ingang van de incidentbuis (t=15 min). De bemanning van de eerstgenoemde TAS voert, via het middenkanaal, de verkenning uit. Bij een ongeval zonder brand zal de verkenning enkele minuten duren. Hier is aangenomen: 3 minuten. Er blijkt inderdaad geen brand te zijn, zodat de overige voertuigen de incidentbuis kunnen inrijden. De betreffende brandweer meldt dit aan zijn collega's bij de tunnelingang. De officier van dienst verzoekt de operator de ventilatie uit te schakelen. De rechterrijstrook ter plaatse van het ongeval wordt vrijgemaakt, zodat de beknelde slachtoffers uitgezaagd kunnen worden (t=25 min). 55 minuten na het ongeval zijn de beknelde slachtoffers bevrijd. De OvDG van de GHOR regelt na overleg met de officier van dienst drie ambulances. De ernstig gewonden worden ter plaatse gestabiliseerd, waarna de transportvolgorde

wordt vastgesteld. In deze volgorde worden ze met inmiddels gearriveerde ambulances vervoerd naar ziekenhuizen in de omgeving.

Na overleg met de politie wordt een berger ingeschakeld. Wanneer alle slachtoffers de tunnel hebben verlaten ($t=70$ min), wordt het verkeer via de rechterrijstrook langs het ongeval geleid, terwijl bergingsvoertuigen de wrakken wegslepen. De niet-incidentbuis wordt zodra dat kan vrijgegeven. De politie maakt rapport op. De brandweer is nog geruime tijd bezig de weg schoon en berijdbaar te maken.

stap 50: einde scenario

2.5 uur na het ongeval worden beide rijstroken weer volledig opengesteld.

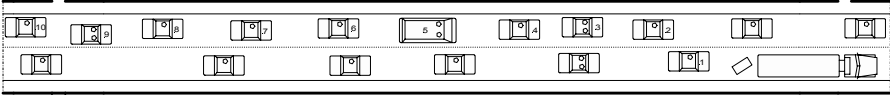
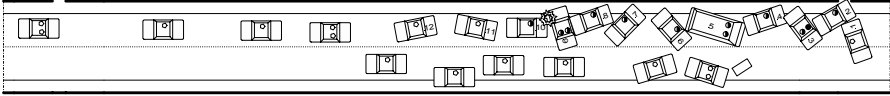
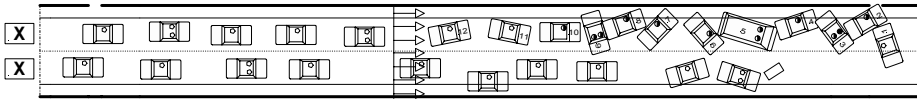
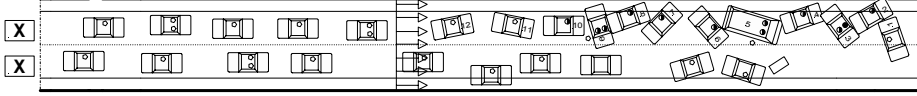
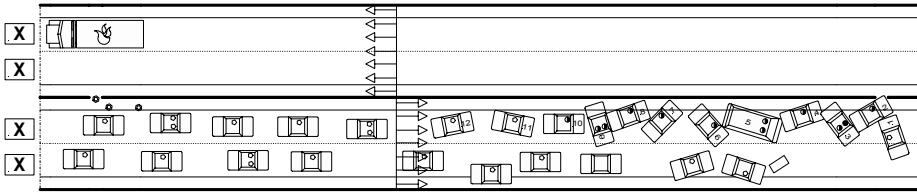
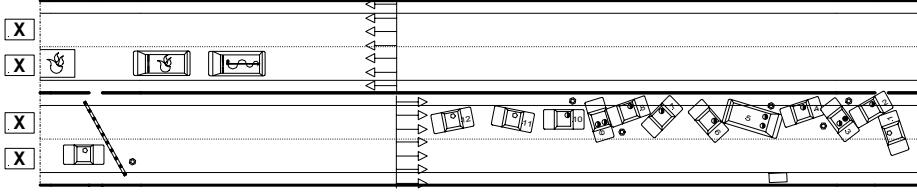
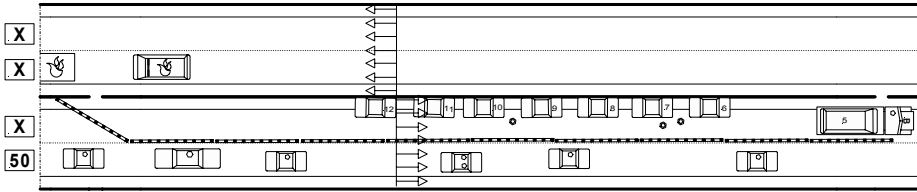
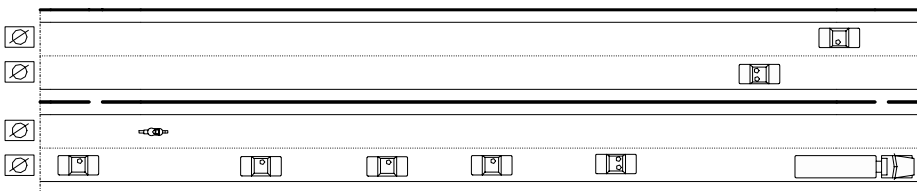
Aannames

- aanrijtijden
- aantal slachtoffers

Check

- Hoe communiceren de hulpverlenende partijen onderling en met de meldkamer en de operator?
- Wat is afgesproken over het bevelvoerderschap en de commandostructuur? Weet iedereen dit?

Scenario 2: Kettingbotsing

stap	naam	tijdstip (s)	overzicht
0	aanloop / verstoring	<0	
10	incident	0	
20	detectie / melding	30 s	
30	start interne hulpverl.	2 min	
40	externe hulpverl.: verkenning	15 min	
41	externe hulpverl.: bevrijden en strabiliseren slachtoffers	25 min	
42	externe hulpverl.: berging wrakken	70 min	
50	einde scenario	150 min	

populatie						atmosfeer	voorzieningen									operator	hulpverlening
voertuigen in incidentbuis	voertuigen in niet-incidentbuis	personen in incidentbuis	personen in vluchtbuis	overleden	gewond		Ventilatie incidentbuis	Ventilatie middenkanaal	Licht	Vluchtdeuren naar mtk	Hulppost	Rijbaan incidentbuis	Rijbaan niet-incidentbuis	Droge blusleiding	snelheidsonderschrijdings-systeem		
64	35	71	-	0	0	normaal	uit	uit	normaal	vergr.	-	open	open	-	-	-	-
110	35	122	-	1	9	normaal	uit	uit	normaal	vergr.	-	open	open	-	-	-	-
45	20	50	-	1	9	normaal	aan	aan	100%	vergr.	-	afgesloten	afgesloten	-	melding	calam.knop contact meldkamer instructie automob.	ontvangen melding calamiteit, rijden aan
45	-	50	-	1	9	normaal	aan	aan	100%	ontgr.	-	afgesloten	afgesloten	-	-		-
45	1	53	-	1	9	normaal	aan	aan	100%	ontgr.	-	afgesloten	afgesloten	-	-	communicatie hulpverleners	uitvoeren verkenning
afnemend 45 → 31	3	40	-	1	9	normaal	uit	uit	100%	ontgr	comm. met operator	afgesloten	afgesloten	-	-	communicatie hulpverl., inschakelen berger, opent rechterrijstrook (50), schakelt op verzoek OvD ventilatie uit	uitzagen en stabiliseren slachtoffers, transport naar ziekenhuizen. Maken één rijstrook vrij.
40	2	50	-	1	9	normaal	uit	uit	100%	ontgr	comm. met operator	rechts: 50 links: X	afgesloten, gaat spoedig open	-	-	communicatie hulpverleners	bergen wrakken, schoonmaken rijbaan, vrijgeven rijbaan niet-incidentbuis
62	60	70	-	1	9	normaal	uit	uit	normaal	vergr.	dicht	gaat open	open	-	-	opent rijbaan	-

8.2.4 Scenario 3: Fotoalbum van een brand

Stap 0 aanloop / verstoring ($t < 0s$)

Door zeer druk verkeer (bijvoorbeeld tijdens spits) ontstaat een langzaam rijdende file in de tunnel. De operator van de tunnel ontvangt continu meldingen van het snelheidsonderschrijdingssysteem. Eén van de voertuigen is een vrachtwagen waarvan één van de remmen oververhit is geraakt.

Stap 10 incident ($t=0s$)

Midden in de tunnel ontstaat er brand onder de laadruimte van de vrachtwagen. De chauffeur stopt de vrachtwagen op de rechter rijstrook ter hoogte van de vluchtdeur. Achter de brandende vrachtwagen komen de voertuigen tot stilstand en er ontstaat een file. De voertuigen voorbij het ongeval rijden door, maar komen door de file langzaam vooruit.

Stap 20 detectie / melding ($t=20s$)

Pas na zo'n 20 seconden bemerkt de operator via de camera's dat er een vrachtwagen stilstaat, en dat er een brand ontstaat in de lading. Achter de vrachtwagen zijn inmiddels enige voertuigen tot stilstand gekomen. De voertuigen voorbij het ongeval bewegen in de file langzaam vooruit. Alle personen bevinden zich nog in hun voertuig. Op zeer korte afstand van het ongeval ontstaan hinderlijke omstandigheden door warmte en rook. Ongeveer 30 seconden na het incident komt nabij de brandhaard een spontane vlucht op gang.

Stap 30 start interne hulpverlening ($t=30s$)

Na detectie besluit de operator om de calamiteitenknop te gebruiken, waardoor de vluchtdeuren worden ontgrendeld, de tunnel wordt afgesloten voor verkeer (slagbomen) en de ventilatie wordt gestart. De voertuigen benedenstrooms van het ongeval rijden de tunnel uit. De operator neemt dit echter niet waar, omdat de camera's zich in de rook bevinden.

Daarnaast worden hulpdiensten gewaarschuwd. Inmiddels zijn voor het ongeval (stroomopwaarts) in totaal 23 voertuigen (8 vrachtwagens, 2 autobussen, 12 auto's) tot stilstand gekomen. De operator instrueert de aanwezigen door middel van een bandje met vluchtinstructies om direct te vluchten. De meeste aanwezigen reageren vrij snel door hun auto te verlaten en door weg te lopen van het ongeval. Op enige meters van het ongeval zijn door de hitte hinderlijke en letale omstandigheden ontstaan door rook en warmtestraling.

Stap 31: brandontwikkeling en zelfredding

In de periode daarna ontwikkelt de brand in de tunnel zich snel. Bovenstrooms van het ongeval is door de warmtestraling een hinderlijke atmosfeer ontstaan. Benedenstrooms ontstaat door rook en temperatuur eerst een hinderlijke atmosfeer, die binnen enkele minuten letaal wordt. De bovenstrooms aanwezige personen zullen van het ongeval af vluchten en proberen de vluchtdeuren te bereiken. In totaal zijn in de incidentbuis zo'n 60 personen aanwezig, waaronder 3 minder-zelfredzamen. Als gevolg van de ventilatie zijn alle aanwezigen in staat tijdig een vluchtdeur te bereiken.

Stap 40 externe hulpverlening (t=900s)

Inmiddels is de andere tunnelbuis afgesloten. Na zo'n 15 minuten arriveren de hulpdiensten bij de andere tunnelbuis. Vanuit de bovenstroomse vluchtdoer wordt een verkenning uitgevoerd, waarna de brandweer de incidentbuis betreedt om brandoverslag te voorkomen en de brand onder controle te krijgen. Twee uur na het ontstaan van de brand is de brandweer er in geslaagd de brand meester te worden. Ondertussen ontfermt de geneeskundige hulp zich over de gevluchte personen.

stap 50: einde scenario

Omdat niet duidelijk is hoe groot de schade aan de constructie is, blijven beide tunnelbuizen afgesloten voor verkeer. Na inspectie blijkt dat de niet-incidentbuis bruikbaar is, zodat deze de volgende dag weer in gebruik genomen wordt voor verkeer in beide richtingen. De incidentbuis blijft enkele weken buiten gebruik vanwege herstelwerkzaamheden.

Check:

Hoe om te gaan met ventilatie in een situatie met verkeer benedenstrooms? Door het automatisch inschakelen van de ventilatie gaat de stratificatie van de rook verloren, terwijl niet duidelijk is of alle benedenstrooms aanwezige voertuigen de tunnel hebben kunnen verlaten. In dit geval zijn benedenstrooms geen slachtoffers gevallen, omdat de tunnelbuis leeg was. Wanneer de ventilatie niet zou zijn ingeschakeld, zou de atmosfeer bovenstrooms nog enkele minuten goed blijven, waarna spoedig hinderlijke en letale omstandigheden zouden ontstaan. In dat geval zouden sterfgevallen niet uit te sluiten zijn geweest.

Scenario 3: Brand

stap	naam	tijdstip (s)	overzicht
0	aanloop / verstoring	<0	
10	incident	0	
20	detectie / melding	20 s	
30	start interne hulpverl.	30 s	
31	brandontw. en zelfredding	150 s	
40	start externe hulpverl.	15 min	
50	einde scenario	-	

populatie							atmosfeer	voorzieningen								operator	hulpverlening
voertuigen in incidentbuis	voertuigen in niet-incidentbuis	personen in incidentbuis	personen in vluchtbuis	overleden	gewond		Ventilatie incidentbuis	Ventilatie middenkanaal	Licht	Vluchtdeuren naar mtk	Hulppost	Rijbaan incidentbuis	Rijbaan niet-incidentbuis	Droge blusleiding	Stilstanddetectiesysteem		
50	20	120	0	0	0	normaal	uit	uit	normaal	vergr.	dicht	open	open	-	melding	-	-
50	20	120	0	0	0	normaal	uit	uit	normaal	vergr.	dicht	open	open	-	melding	-	-
50	20	120	0	0	0	hinderlijk nabij brandhaard	uit	uit	normaal	vergr.	dicht	open	open	-	melding	detectie ongeval	-
23	0	60	0	0	0	bovenstr. hinderlijk tot 5 m, benedenstr. hinderlijk	max	max	100%, uitval nabij brandhaard	ontgr.	dicht	afgesloten	afgesloten	-	melding	calamiteitenknop, waarschuwt hulpdiensten, waarschuwt aanwezigen in tunnel	voorbereiding optreden
23	0	48	12	0	0	bovenstr. hinderlijk tot 5 m, benedenstr. letaal	max	max	100%, uitval nabij brandhaard	ontgr.	dicht	afgesloten	afgesloten	-	melding		hulpdiensten rijden aan
23	0	0	60	0	5-10	bovenstr. hinderlijk tot 5 m, benedenstr. letaal	max	max	100%, uitval nabij brandhaard	ontgr.	dicht (kort hierna open voor blussen)	afgesloten	afgesloten	in gebruik	melding		hulpverlening gewonden, onderzoek mogelijkheden blussen
-	-	-	-	-	-	-	uit	uit	niet-incidentbuis: normaal	vergr.	dicht	afgesloten	open voor tweerichtingverkeer	-	-	-	-

8.3 Aanpak kwantitatieve modellering

Indien wordt besloten tot gedetailleerde kwantificering, kan gebruik worden gemaakt van kwantitatieve modellering. Alvorens hiermee wordt gestart, zal het scenarioanalyseteam goed in kaart moeten brengen voor welke scenario's, en voor welke uitwerkingsvariabelen deze kwantitatieve modellering nodig is. In de navolgende tekst wordt ingegaan op kwantitatieve modellering van een scenario. Kwantitatieve modellering is specialistenwerk. Aanbevolen wordt dan ook om een deskundige op dit gebied of een gespecialiseerd bureau in te schakelen.

Tabel B 8 bevat het stappenplan voor kwantitatieve modellering van een scenario. De afzonderlijke stappen worden in de hierna volgende paragrafen verder toegelicht.

In de toelichtingen wordt ervan uitgegaan dat alle stappen uit het stappenplan worden doorlopen. Afhankelijk van de behoefte aan kwantitatieve modellering kan er echter toe worden besloten om slechts één, of een deel van de stappen uit te voeren.

In dat geval zullen wellicht meer aannames moeten worden gedaan voor de invoergegevens van de toe te passen modellen. Immers, indien een scenario volledig wordt gemodelleerd, dient een deel van de uitvoergegevens van een bepaald model als invoergegevens voor andere modellen.

Tabel B 8 Stappenplan voor kwantitatieve modellering

Stap nr.	Omschrijving
1	Bepaal de benodigde invoergegevens → Paragraaf 8.4
2	Modelleer de fysische effecten → Paragraaf 8.5 t/m 8.10
3	Analyseer het vluchtproces NB de in stap 2 berekende fysische effecten dienen als invoergegevens voor de modellering van het vluchtproces. → Paragraaf 8.11
4	Maak gebruik van vuistregelmodellen voor het modelleren van zelfredzaamheid. → Paragraaf 8.12
5	Modelleer letsel → Paragraaf 8.13

8.4 Invoergegevens

Invoergegevens vormen de basis van de berekening van fysische effecten, vluchtgedrag van mensen, letsel en schade. Zij variëren per scenario. De systeembeschrijving bevat al een aantal invoergegevens, zoals de verkeersintensiteit en de onderlinge afstand van de vluchtdeuren. Invoergegevens zijn verder af te leiden uit beschikbare literatuur en statistieken en uit eerder uitgevoerde analyses, zoals een kwantitatieve risicoanalyse.

Meer voorbeelden van invoergegevens:

- het aantal personen en hun locatie in de tunnel tijdens het ongeval,
- de samenstelling van de aanwezige populatie (leeftijd, geslacht, ziekte, handicap),
- de lengte van de eventuele file in de tunnel,
- de aanwezige hoeveelheid brandbaar materiaal in de tunnel,
- de aanwezige hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de tunnel,
- de hoeveelheden vrijkomende stoffen (per tijdseenheid) na uitstroming in de tunnel,
- de duur van de periode waarin deze vrijkomen,
- de ventilatiesnelheid.

Bij een kwantitatieve uitwerking van de fysische effecten van een scenario waarbij gevaarlijke stoffen vrijkomen, verdient het aanbeveling om aan te sluiten bij de voorbeeldstoffen zoals die in de VeVoWeg [12] voor elke stofcategorie worden voorgesteld (zie Tabel B 9). Voor het bepalen van de juiste stofcategorie en voorbeeldstof wordt verwezen naar de systematiek voor indeling van stoffen ten behoeve van risicoberekeningen bij het vervoer van gevaarlijke stoffen [5].

Bijvoorbeeld: één van de scenario's betreft het lekken van benzine uit een tankwagen. Volgens de systematiek voor de indeling van stoffen behoort benzine (VN-nr. 1203) tot de stofcategorie LF2. Uit Tabel B 9 kan nu afgeleid worden dat de fysische effecten van het scenario berekend kunnen worden met behulp van gegevens van de voorbeeldstof pentaan (VN-nr. 1265).

Tabel B 9 Stofcategorisering gevaarlijke stoffen

Klasse	Subklasse	VN-nr.	Voorbeeldstof
A. Brandbare gassen	GF0	1971	methaan
	GF1	1040	ethyleenoxide
	GF2	1011	butaan
	GF3	1978	propaan
B. Toxische gassen	GT1	1016	koolmonoxide
	GT2	1064	methylmercaptaan
	GT3	1005	ammoniak
	GT4	2197	waterstofjodide
	GT5	1017	chloor

	GT6	2199	fosfine
	GT7	1076	fosgeen
C. Brandbare vloeistoffen	LF1	1206	heptaan
	LF2	1265	pentaan
D. Toxische vloeistoffen	LT1	1093	acrylnitril
	LT2	2032	propylamine
	LT3	1092	acroleïne
	LT4	2480	methylocyanaat
	LT5		(vervoersverbod)
	LT6		(vervoersverbod)

Andere invoergegevens zullen vanwege het ontbreken van literatuur en statistieken vastgesteld moeten worden met behulp van expertmeningen.

8.5 Modelling van fysische effecten

De mogelijkheden voor zelfredding en het optredende letsel worden in de eerste plaats bepaald door de fysische effecten. De bijzondere fysische effecten, die zich bij een ongeval in een wegtunnel kunnen voordoen, zijn:

- brand: warmtestraling en rookverspreiding;
- verdamping;
- dispersie;
- explosie (BLEVE of gaswolkexplosie).

TNO-MEP heeft in het kader van de ontwikkeling van deze Leidraad onderzocht hoe de bestaande fysische effectmodellen toepasbaar zijn in tunnels [11]. Daarbij is uitgegaan van de effectmodellen uit de CPR14E, het zogenaamde 'Gele Boek' voor fysische effectmodellering [6]. Daarnaast is, indien modellen niet zonder meer toepasbaar zijn, aangegeven hoe ze aangepast kunnen worden om tot een geschikte modellering van fysische effecten in tunnels te komen. Dit rapport is te vinden op www.tunnelsafety.nl.

In de paragrafen 8.6 tot en met 8.10 worden de fysische effecten afzonderlijk beschreven en wordt per fysisch effect aangegeven hoe dit is te modelleren voor situaties in tunnels. Daarbij kan veelal gebruik worden gemaakt van diverse softwarepakketten.

8.6 Fysische effectenmodellering van brand

Een brand is het gevolg van één of meer van de volgende gebeurtenissen:

- directe ontsteking van voertuig en/of lading (stukgoed);
- uitstroming en ontsteking brandbare vloeistof (plasbrand);
- uitstroming brandbaar gas (vorming gaswolk);
- directe ontsteking: er ontstaat een fakkel;
- vertraagde ontsteking: gaswolkontbranding/-explosie.

Het in brand raken (directe ontsteking) van een voertuig of van de lading die wordt vervoerd, kan worden veroorzaakt door motorische problemen, oververhitting van draaiende delen, wegvallen van de koeling of, wanneer bepaalde chemische stoffen met elkaar in contact komen, het optreden van een warmteproducerende (exotherme) chemische reactie.

Bij het vrijkomen van vloeistoffen in de tunnel zal zich een plas vormen, waaruit door verdamping een dampwolk zal ontstaan. Wanneer deze in contact komt met een vonk of een heet oppervlak (altijd aanwezig in passerende voertuigmotoren) kan de dampwolk vlam vatten (gas/dampwolkontbranding). Ook de eventueel nog aanwezige vloeistof kan daardoor in brand raken.

Bij de uitstroming van brandbaar gas zijn er twee mogelijkheden. Wanneer er een ontstekingsbron dicht in de buurt is, kan het uitstromende gas direct worden ontstoken. Doordat het gas onder hoge druk naar buiten wordt geperst, ontstaat hierbij een fakkel. Anderzijds is het mogelijk dat het vrijkomende gas (analoog aan de vloeistofdamp) pas na enige tijd – vertraagd – wordt ontstoken (gaswolkontbranding). Voorafgaand aan de warmtestralingsberekening dient de omvang van de gaswolk te worden berekend. Hiervoor is een dispersiemodel nodig.

Bij uitstroming van onder druk opgeslagen (tot vloeistof verdicht) gas wordt vóór de dispersieberekening met behulp van een spray-releasemodel de verdamping berekend van de vrijkomende druppeltjeswolk.

Bij al deze gebeurtenissen treedt warmtestraling op, in veel gevallen in combinatie met rookvorming en/of een drukgolf (zie Tabel B 10). Voorwaarde voor het ontstaan van rook is de vorming van roet- en stofdeeltjes. Dit treedt alleen op bij onvolledige verbranding van vloeistoffen en vaste stoffen; bij gasbranden is de rookvorming beperkt.

Tabel B 10 Mogelijke verschijnselen bij verschillende typen branden

	Warmtestraling	Rookvorming	Druk golf
Voertuigbrand, ladingbrand	Ja	Ja	Nee
Plasbrand (directe ontsteking van uitgestroomde vloeistof)	Ja	Ja	Nee
Fakkel (directe ontsteking brandbaar gas)	Ja	Nee	Nee / beperkt
Gaswolkontbranding – vertraagde ontsteking van dampwolk (verdampte vloeistof) of brandbaar gas	Ja	Nee	Ja

8.6.1 Warmtestraling

Aanpak en beschikbare modellen

De warmtestraling van een voertuigbrand is op dezelfde manier te modelleren als die van een plasbrand. Zowel een brandende plas als een brandend voertuig zorgen voor een brand met een bepaald grondoppervlak en vlammen die een bepaalde hoogte bereiken. In een tunnel zullen de vlammen al snel het plafond raken. Ten gevolge van de tunnelgeometrie en de wind in de tunnel zullen de vlammen vaak worden afgebogen.

De modellen voor warmtestraling door plasbrand zijn te vinden in het Gele Boek; de meeste softwarepakketten voor risicoanalyse bevatten een module "Effectberekeningen" die op het Gele Boek of analoge modellen is gebaseerd.

Voor het berekenen van warmtestraling ten gevolge van een fakkel (vrijkomen brandbaar gas) wordt gebruik gemaakt van het Chamberlainmodel (ook wel Thorntonmodel) [7] dat in het Gele Boek is opgenomen en dus als standaard voorgescreven in Nederland. Ook hierbij wordt rekening gehouden met afbuiging en met de oriëntatie van de fakkel ten opzichte van het aangestraalde object. Het genoemde model is ook beschreven in het Gele Boek en opgenomen in de meeste softwarepakketten.

De modellen voor vertraagde ontsteking (spray-release, dispersie, gaswolkontbranding) zijn beschreven in het Gele Boek.

Invoervariabelen

De belangrijkste parameters in de warmtestralingsmodellen zijn:

- het stralingsvermogen van de brand (actual Surface Emissive Power, SEP_{act} ; afhankelijk van de temperatuur van de brand, de hoogte en breedte van de vlammen);
- de 'view factor', maatgevend voor het netto-oppervlak waarmee de brand het blootgestelde object "aankijkt";
- de 'atmospheric transmittivity', ofwel de doorlaatbaarheid van de lucht tussen de brand en het blootgestelde object; de beperkende factor hiervoor is de mate van warmte-absorptie door materiaal in de atmosfeer.

Deze parameters worden berekend aan de hand van eigenschappen van de tunnel, het ongeval en de bij de brand betrokken materialen.

Berekeningswijze en uitvoer

Uitgaande van de geschatte of berekende hoeveelheid brandbaar materiaal en de bijbehorende materiaaleigenschappen (zoals brandbaarheid) wordt de verbrandingssnelheid berekend. Uit de totale hoeveelheid bij de brand betrokken materiaal en de verbrandingssnelheid wordt de duur van de brand afgeleid.

De warmtestraling wordt berekend als functie van afstand en tijd (q'').

Maatgevend voor het letsel is de opgenomen warmte ($q'' \cdot 4/3 \cdot t$), waarbij de warmtestraling q'' is en de blootstellingsduur t . Hieruit worden afgeleid de percentages eerste-, tweede- en derdegraads brandwonden, opgelopen door de blootgestelden.

8.6.2 Voorbeeld warmtestraling: Gaswolkontbranding/explosie vs. fakkel

Bij de continue uitstroming van het brandbare gas propaan kunnen zich twee scenario's voordoen: directe ontsteking waarbij meteen een fakkel ontstaat, en vertraagde ontsteking waarbij eerst een explosief mengsel van verdampte propaan en lucht wordt gevormd dat na enige tijd wordt ontstoken (gaswolkontbranding). Om de fysische effecten te berekenen die bij deze deelscenario's optreden, worden verschillende modellen toegepast (zie Tabel B 11).

Tabel B 11 Benodigde effectmodellen voor het doorrekenen van een gaswolkontbranding en een fakkel

Scenario	Ontsteking	Benodigde effectmodellen
1. fakkel	Direct	Vloeistofuitstroming → Chamberlain
2. gaswolkontbranding	Vertraagd	Vloeistofuitstroming of gasuitstroming en/of tweefasenuitstroming en/of zwaargasdispersie

Scenario # 1:

De eerste stap is de berekening van de maximale uitstroomsnelheid van het (tot vloeistof verdichte) brandbare gas. De uitgangspunten hiervoor kunnen worden ontleend aan het Paarse Boek (1999):

- vrijkomende stof: propaan;
- kenmerken cilinder: inhoud 100 m³, lengte 20 m, vullingsgraad 80%, horizontaal gepositioneerd;
- overdruk van 10 bar;
- gatdiameter 76,2 mm op een hoogte van 1 m boven grondniveau;
- initiële temperatuur in de cilinder: 20°C.

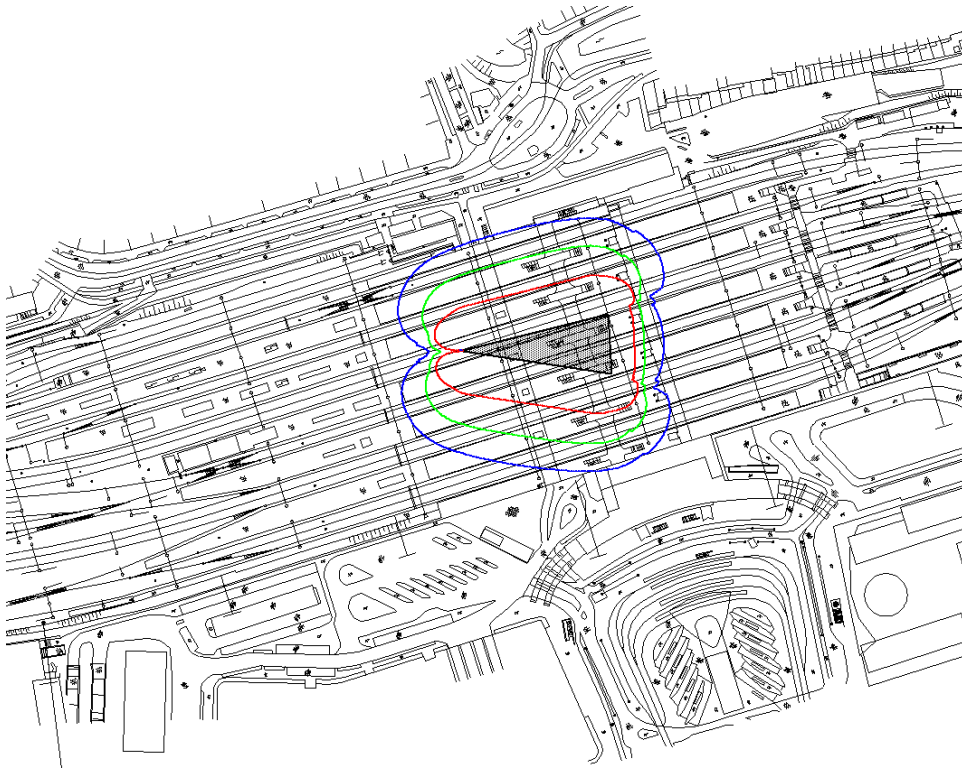
Uitgaande van een zogenaamde 'discharge coefficient' (afhankelijk van de vorm van het gat in de cilinder) van 0,62 is de maximale uitstroomsnelheid van het propaan gelijk aan 89 kg/s.

Als tweede stap wordt met behulp van het Chamberlain- of Thorntonmodel de grootte van de fakkel berekend alsmede de afstanden vanaf en rondom de fakkel voor de verschillende percentages van letaliteit. Uitgangspunten voor dit voorbeeld:

- uitstroming 'unchoked' (vrij vertaald: 'onbelemmerd'), met een snelheid van 89 kg/s (zoals berekend met het liquid release model);
- druk en temperatuur bij vrijkomen zijn respectievelijk 10 Bar en 293 K;
- Pasquill stabiliteitsklasse D, windsnelheid 5 m/s, omgevingstemperatuur 282 K, luchtvochtigheid 83%;
- uitstroomrichting 15° (dit is conservatief ofwel relatief ongunstig: 0° = horizontale uitstroming en 90° = verticale uitstroming).

De berekeningen zijn uitgevoerd met behulp van het TNO-softwarepakket EFFECTS-GIS. Het resultaat is een fakkel met een lengte van 80 meter die aan de top 32 meter in doorsnee is. In Figuur B 4 zijn de contouren aangegeven van de

warmtestralingniveaus rond de fakkel voor 100% (zwart), 50% (groen) en 1% (blauw) letaliteit (in de afbeelding hierna parallel aan de as van een hypothetische tunnel afgebeeld, op schaal op de achtergrond van station Rotterdam Centraal).



Figuur B 4 Warmtestralingsniveaus tengevolge van een fakkelbrand in een hypothetische tunnel onder een railcomplex.

Scenario # 2:

Ook scenario 2 begint met het toepassen van een vloeistofuitstromingsmodel. Ook bij vertraagde ontsteking is de maximale uitstroomsnelheid van het vrijkomende propaan gelijk aan 89 kg/s.

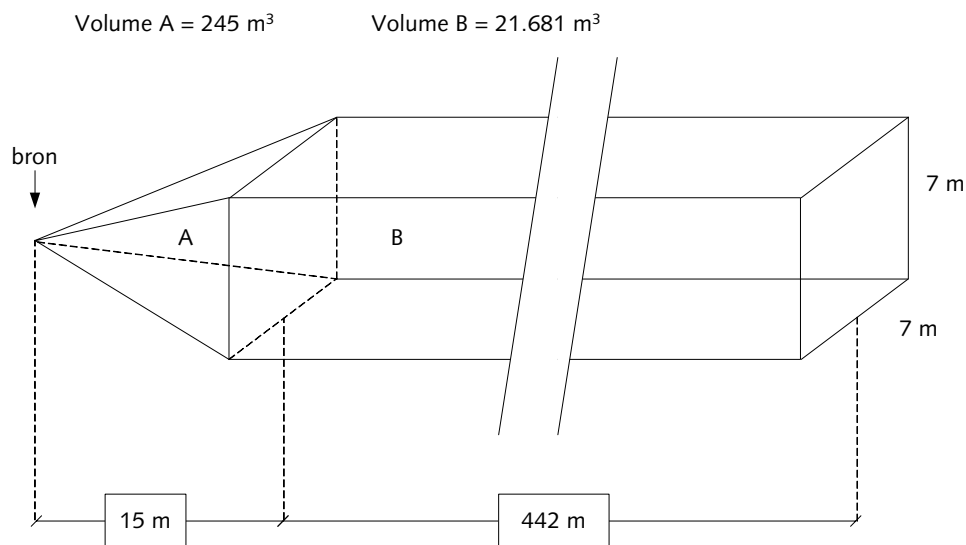
Vervolgens worden met een spray-releasemodel de condities in de propaan-jet (het naar buiten spuitende, nog niet ontstoken gas) berekend na verdamping van alle druppels die zich aanvankelijk in de propaan-jet bevonden. Uitgangspunten voor de berekening zijn:

- overdruk van 10 bar;
- gatdiameter 76,2 mm op een hoogte van 1 m boven grondniveau;
- uitstroming 'unchoked', met een snelheid van 89 kg/s (zoals berekend met het liquid release model);
- druk en temperatuur bij vrijkomen zijn respectievelijk 10 Bar en 293 K;
- omgevingstemperatuur 282 K, luchtvochtigheid 83%;

Dit resulteert in een propaan-jet met een dichtheid van $4,47 \text{ kg/m}^3$, een snelheid van 21,34 m/s en een oppervlak van $0,95 \text{ m}^2$. Omdat de dichtheid van de jet veel groter is dan die van lucht, gedraagt de jet zich als een zwaar gas. Met een van de diverse zwaar gas-dispersiemodellen worden vervolgens de afmetingen berekend

van de propaanwolk waarin de propaanconcentraties groter zijn dan de lower explosion limit (de "LEL"; dit is de ondergrens voor een explosief gas-luchtmengsel). Het hier beschreven scenario blijkt te resulteren in een gaswolk van 125 meter lang en maximaal 44 meter breed (oppervlak 3.847 m²) met een explosieve massa van 721 kg.

Deze afmetingen gelden voor ongehinderde uitstroming; in een tunnel zitten echter de wanden en het plafond in de weg. Verder wordt de omvang van een jet in een tunnel beïnvloed door de beperkte zuurstoftoevoer en speelt ook de uitstroomrichting een rol. Uitgaande van uitstroming langs de as van de tunnel, een gaswolkvolume van 21.926 m³ en een tunnel met een hoogte en breedte van 7 bij 7 m kan de resulterende lengte van de fakkel eenvoudig worden berekend (zie Figuur B 5).



Figuur B 5 Afmetingen van een fakkel in een tunnel met een doorsnede van 7 x 7 meter.

De tunnel zal over een afstand van 442 m totaal met gas gevuld zijn. Hierbij wordt opgemerkt dat er in veel gevallen sprake zal zijn van een beperkte toevoer van zuurstof en dus beperkte brandbaarheid, waardoor de omvang van de wolkbrand klein zal zijn.

Toepasbaarheid

De vloeistofuitstroming in een tunnel kan zonder problemen worden berekend met de beschikbare uitstromingsmodellen voor het open veld.

Gasuitstroming in een tunnel kan ook met de gebruikelijke modellen worden doorerekend.

Ten aanzien van de afmetingen van fakkels dient bij directe ontsteking in het scenario een keuze te worden gemaakt voor de uitstroomrichting van de fakkel. Uitstroming langs de tunnelas is het meest conservatief, omdat dit leidt tot de langste fakkel. Bij uitstroming loodrecht op de tunnelas (tegen de tunnelwand) zal een fakkel

ontstaan met een lengte van ten hoogste de tunnelbreedte of –hoogte; van de breedte van een dergelijke fakkel zijn geen concrete gegevens bekend.

Verdamping van de vrijkomende vloeistofdruppeltjes (spray-release) verschilt in een tunnel niet fundamenteel van de situatie in het open veld.

Wat betreft de zwaar gas-dispersie is er voor tunnels behoefte aan een model dat rekening houdt met de verticale dispersie in een tunnel en met de begrenzings van de omvang van de gaswolk door de tunneldimensies.

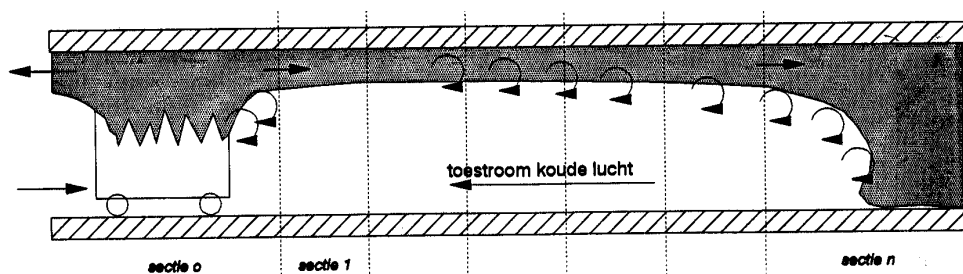
8.6.3 Rook

Fenomeen, aanpak en beschikbare modellen

Bij de meeste branden ontstaat er direct na het begin van de brand rook. Door de hoge temperatuur stijgt de rook op en vormt een laag tegen het plafond van de tunnel; dit proces wordt stratificatie genoemd. Zolang de rooklaag bovenin de tunnel blijft, is er geen hinder of ernstige gezondheidsschade te verwachten bij de aanwezigheid in de tunnel. De rook wordt een probleem zodra de rooklaag zich gaat mengen met de rest van de tunnelatmosfeer, omdat dan de personen in de tunnel aan de rook worden blootgesteld. Zelfs in het deel van de tunnel waar de rook eerst tegen het plafond bleef hangen, kan gevaar ontstaan. De onderste laag van de tunnelatmosfeer wordt naar de brand toe gezogen ("trek") en voert de afgekoelde rook in de onderste laag van de tunnelatmosfeer mee. Personen dichtbij de brand kunnen dus als het ware "in de rug worden aangevallen". Vanwege de concentraties aan giftige stoffen kan kortdurende blootstelling aan rook al dodelijk zijn. Blootstelling aan rook is dan ook een belangrijke oorzaak van slachtoffers.

Het moment en de locatie waar menging optreedt, worden berekend met behulp van zonemodellen of CFD-modellen. Tevens berekenen deze modellen de rookconcentratie en de rooktemperatuur.

De zonemodellen scheiden de tunnel in een aantal zones (zie Figuur B 6): (i) sectie 0, waarin de verbrandingsproducten worden gemengd met toestromende lucht zodat hete rook wordt gevormd, (ii) een aantal secties waarin sprake is van stratificatie (bovenin een rooklaag en daaronder een laag met relatief zuivere lucht), en (iii) een sectie n, waarin totale menging optreedt van de twee lagen en van waaruit de verontreinigde lucht naar de brand terugstroomt.



Figuur B 6 *Onderverdeling van een tunnel in secties, bij de toepassing van een zonemodel.*

Voor zoneberekeningen zijn eenvoudige modellen beschikbaar [SAVE 1995/1998]. Daarnaast bestaat er een uitgebreider zonemodel genaamd FASIT, waarin nog een derde zogenaamde 'mixing layer' is toegevoegd [8].

De CFD-modellen (vloeistofdynamica modellen) zijn gebaseerd op de Navier-Stokes-differentiaalvergelijkingen, die het transport van massa, impuls, warmte in een samendrukbaar medium beschrijven. De tunnel wordt verdeeld in een driedimensionaal netwerk (grid). Op elke cel worden de behoudswetten voor massa, impuls en energie toegepast. De computerprogramma's die nodig zijn voor dit proces vergen zelfs op moderne computers met snelle processoren vele uren tot dagen rekentijd.

Door de Bouwdienst van Rijkswaterstaat zijn in 2001 / 2002 enkele CFD-pakketten met elkaar vergeleken [9]. De bekendste CFD-modellen voor modellering van brand op dat moment waren VESTA (TNO Centrum voor Brandveiligheid), PHOENICS (Peutz) en het programma Fire Dynamics Simulator (National Institute of Standards and Technology) [10]. Voor de in dat kader beschouwde scenario's bleken de uitkomsten van de drie pakketten in dezelfde orde van grootte liggen.

Kwalitatief worden de verschijnselen van brand redelijk gesimuleerd door de verschillende programma's. In absolute waarden kunnen de verschillen tussen de programma's relatief groot zijn.

Aangezien de ontwikkelingen in CFD-modellering erg snel gaan verdient het, indien CFD-modellering wordt overwogen, aanbeveling om een deskundige te raadplegen.

Invoergegevens

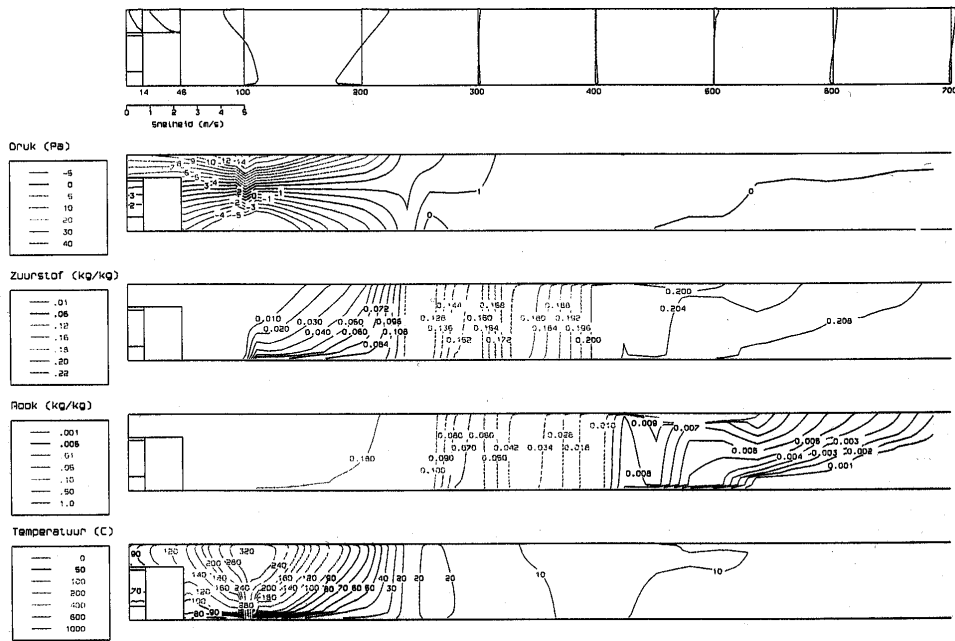
De invoergegevens voor de zonemodellen zijn:

- de rooktemperatuur;
- de luchttemperatuur;
- het vermogen van de brand;
- de hoogte en breedte van de tunnel.

De belangrijkste invoer voor CFD-modellen bestaat uit de hoekpunten van de grid-elementen. Daarnaast wordt de begintoestand beschreven aan de hand van de rooktemperatuur, de luchttemperatuur en het vermogen van de brand.

Berekeningswijze, uitvoer en voorbeeld

In het door TNO voor deze Leidraad opgestelde rapport over de toepasbaarheid van fysische effectmodellen wordt gedetailleerd ingegaan op de uitgangspunten, werkwijze en de resultaten van een CFD-berekening [11]. Globaal gesproken wordt een concreet geval gekenmerkt door het brandscenario en het ventilatieregime in de tunnel. De resultaten kunnen grafisch worden gerepresenteerd als verticale langsdoorsneden in het midden van de tunnel en ook de nodige representatieve verticale dwarsdoorsneden van de tunnel. Voor de langsdoorsnede kan per tijdstip het snelheidsprofiel in de lengterichting, de drukverdeling, de massafractie zuurstof, de massafractie rook en de temperatuursverdeling worden getoond (Figuur B 7).



Figuur B 7 Voorbeeld van de output van een CFD-model. Langsdoorsnede over de as van de tunnelbuis op tijdstip t .

Toepasbaarheid

De zonemodellen zijn weliswaar een vereenvoudiging maar leveren een redelijke benadering van de werkelijkheid.

De uitkomsten van de CFD-modellen zijn nauwkeuriger, maar het invoeren van de gegevens is arbeidsintensief en de huidige generatie CFD-computerprogramma's heeft nog veel rekentijd nodig.

Voor de meeste scenarioanalyses is een berekening met een eenvoudig zonemodel voldoende. Als er sprake is van structurele obstakels is het de moeite waard om een CFD-berekening te overwegen.

Er is een behoorlijke kans op stratificatie bij een combinatie van brandvermogens tussen de 10 en 30 MW en brandtemperaturen tussen de 400 en 800 °C.

8.7 Fysische effectenmodellering van verdamping

8.7.1 Omschrijving fenomeen

Wanneer bij een ongeval in een tunnel een vloeistof vrijkomt, zal deze zich verspreiden over de bodem van de tunnel. Afhankelijk van de vloeistofeigenschappen en de condities in de tunnel zal de ontstane vloeistofplas snel of langzaam verdampen. Het volume van een vloeistofplas is afhankelijk van:

- de vrijgekomen hoeveelheid vloeistof;
- de afgevoerde hoeveelheid vloeistof als gevolg van drainage en riolering;
- de hoeveelheid verdampte vloeistof;
- de ondergrond.

Een maat voor de hoeveelheid verdampte vloeistof is de verdampingsflux. Dit is de hoeveelheid verdampte vloeistof per oppervlaktemaat per tijdseenheid; $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. De verdampingsflux is daarmee afhankelijk van de oppervlakte van een vloeistofplas op een bepaald moment [11].

8.7.2 Aanpak en beschikbare modellen

Met verdampingsmodellen wordt een schatting gegeven van de verdampingssnelheid, de verdampingsduur en de maximale hoeveelheid die uit een vloeistofplas kan verdampen. De output van deze modellen is input voor dispersiemodellen bij toxische vloeistoffen. In [11] worden de achtergronden van verdampingsmodellen beschreven. Hier wordt ook ingegaan op de beschikbare computerprogramma's voor het modelleren van verdamping, die alle gebaseerd zijn op de verdampingsmodellering uit het Gele Boek (CPR14E) [6].

8.7.3 Invoervariabelen

Verdampingsmodellen vereisen een aantal invoerparameters, zoals de uitstroomsnelheid, de omvang en vorm van de vloeistofplas, de windsnelheid en de temperatuur van de vloeistofplas, het grondoppervlak en de buitenlucht. De precieze reeks invoerparameters hangt af van het te gebruiken computerprogramma. De meeste verdampingsmodellen zijn ontwikkeld voor situaties in het open veld. Bij verdamping in tunnels verdient een drietal parameters bijzondere aandacht, namelijk de *windsnelheid*, het *plasoppervlak* en de *drainage* in de tunnel. Hiervoor kunnen niet de gangbare defaultwaarden voor het open veld worden gehanteerd. Verder kan de temperatuur van de lucht en de grond in de tunnel t.g.v. de warmte van de voertuigen en hun uitlaatgassen erg verschillen van de atmosferische temperatuur buiten het kunstwerk (zeker in de winter). De overige invoerparameters, zoals bepaalde stoffeigenschappen, zijn algemeen van aard en wijken voor een situatie in een tunnel niet af van een situatie in het open veld [11].

Windsnelheid in de tunnel

Bij toepassing van het verdampingsmodel moet voor de *windsnelheid* rekening worden gehouden met de heersende windsnelheid in de tunnel. Deze kan zijn opgelegd door de rijrichting (en snelheid) van het verkeer, de ventilatierichting (en snelheid) van het werkende ventilatiesysteem of de windrichting en –snelheid buiten de tunnel (luchtstroming als gevolg van overdruk bij de ingang en onderdruk bij de uitgang van de tunnel).

Plasoppervlakte in de tunnel

Voor het *plasoppervlak* moet in het verdampingsmodel rekening worden gehouden met rechthoekige plasoppervlakken. De breedte is hierbij afhankelijk van de breedte van de tunnel, en de lengte is afhankelijk van de plaatsing van het drainagesysteem (waar en om de hoeveel meter bevinden zich putten in het wegoppervlak) en het hellingspercentage van het wegdek (dit is van invloed op de snelheid waarmee de plas zich uitbreidt).

Riolering/drainage

Ten gevolge van *riolering/drainage* moet in het verdampingsmodel rekening worden gehouden met aangepaste hoeveelheden (kleinere hoeveelheden) vloeistof in de plas. Hierbij dient een reële inschatting gemaakt te worden van het percentage van de vrijgekomen hoeveelheid vloeistof dat in de riolerings-/drainageputten wordt afgevoerd van de oorspronkelijk vrijgekomen hoeveelheid vloeistof.

Met het modelleren van plassen, en daarmee verdamping, is reeds de nodige ervaring opgedaan bij de ontwikkeling van de kwantitatieve risicoanalyse voor tunnels. Daar is gekozen voor een conservatieve benadering die uitgaat van een tunnel zonder drainage/riolering. Deze benadering leidt, gegeven een bepaalde uitstroming, tot plasoppervlakten die ook, conform de VeVoWeg Handreikingen [12], in het open veld worden gehanteerd, met dien verstande dat plasoppervlakten in een tunnel rechthoekig worden gemodelleerd. Voor een tunnel met riolering/drainage kan het plasoppervlak worden geschat met behulp van vuistregels die rekening houden met de uitgestroomde hoeveelheid en de afvoercapaciteit van het riolerings- of drainagesysteem (zie Tabel B 12).

Tabel B 12 Vuistregels voor plasoppervlakken bij uitstroming gevaarlijke stoffen in tunnels [13]

Uitstroming gevaarlijke stof	Zonder drainage / riolering	Met drainage / riolering
Instantaan	1200 m ²	1200 m ² *
5 m ³ /30 min (groot continu)	300 m ²	150 m ²
0,5 m ³ /30 min (klein continu)	30 m ²	Sterk afhankelijk van plaats uitstroming

* Bij instantane uitstroming helpt riolering in eerste instantie niet.

Voor de invoer in computerprogramma's kan gebruik worden gemaakt van bovenstaande plasoppervlakten of van de lengte en breedte van de plas waarbij de lengte van de plas volgt uit de oppervlakte van de plas gedeeld door de breedte van de tunnelbuis.

8.7.4 Berekeningswijze en uitvoer

Afhankelijk van met name de gewenste uitvoer, maar eventueel ook afhankelijk van de beschikbare invoerparameters, dient gekozen te worden voor het best passende computerprogramma. Het verdient de voorkeur een computerprogramma te kiezen dat ten minste een schatting geeft van de verdampingssnelheid, de verdampingsduur en de maximale hoeveelheid die uit een vloeistofplas kan verdampen.

Voor de invoer in computerprogramma's kan gebruik worden gemaakt van bovenstaande plasoppervlakten of van de lengte en breedte van de plas waarbij de lengte van de plas volgt uit de oppervlakte van de plas gedeeld door de breedte van de tunnelbuis.

8.7.5 Voorbeeld

Met behulp van het computerprogramma EFFECTS is een voorbeeldberekening uitgevoerd van de verdamping van de toxische vloeistoffen acrylonitril, CH_2CHCN en isopropylamine, $(\text{CH}_3)_2\text{CHNH}_2$. Daarbij is verondersteld dat er 5 m^3 vloeistof uitstroomt in 30 minuten, waarbij een plas wordt gevormd van 150 m^2 . Omdat het kookpunt van de voorbeeldstoffen boven omgevingstemperatuur ligt, is er sprake van plasverdamping vanuit een niet-kokende vloeistofplas. De verdamping vindt plaats op een betonnen ondergrond. Voor zowel de initiële plastemperatuur, de temperatuur van de ondergrond als de omgevingstemperatuur is een waarde aangenomen van $8,85 \text{ }^\circ\text{C}$, en de luchtvochtigheid is op 83% gesteld.

Voor windsnelheden in de tunnel variërend van 1 tot 5 m/s zijn nu de volgende parameters bepaald:

- de verdampingsflux [kg/s] op tijdstip $t = 0 \text{ sec}$.
- de verdampte hoeveelheid vloeistof [kg] na 1800 sec. (= 30 min)

De resultaten zijn weergegeven in Tabel B 13 en Tabel B 14.

Tabel B 13 Voorbeeld acrylonitril, CH_2CHCN (plasoppervlak = 150 m^2)

Windsnelheid [m/s]	Verdampingsflux [kg/s] op $t = 0 \text{ sec}$.	Verdampte hoeveelheid (x 1000 kg) na $t = 1800 \text{ sec}$.
1	0,01	0,3
2	0,16	0,5
3	0,22	0,7
4	0,28	0,8
5	0,33	0,9

Tabel B 14 Voorbeeld isopropylamine, $(CH_3)_2CHNH_2$ (plasoppervlak = 150 m²)

Windsnelheid [m/s]	Verdampingsflux [kg/s] op t = 0 sec.	Verdampte hoeveelheid (x 1000 kg) na t = 1800 sec.
1	0,62	1,6
2	1,06	2,2
3	1,5	2,6
4	1,82	2,8
5	2,16	3,0

8.7.6 Toepasbaarheid

Verdampingsmodellen voor het open veld zijn toepasbaar voor het doorrekenen van verdamping in tunnels, met dien verstande, dat bij de invoer van het te gebruiken computerprogramma rekening moet worden gehouden met een aangepaste windsnelheid en plasoppervlakte. De windsnelheid in een tunnel wordt mede bepaald door de capaciteit van het ventilatiesysteem, de snelheid van het verkeer en de windsnelheid buiten de tunnel. Voor de oppervlakte van een vloeistofplas, die in een tunnel altijd rechthoekig wordt gemodelleerd, dient afhankelijk van de uitstroomsnelheid en de aanwezigheid van een riolerings-/drainagesysteem uitgegaan te worden van een gegeven plasoppervlakte.

8.8 Fysische effectenmodellering van dispersie

Bij dispersie gaat het om de menging en verspreiding van gassen in de atmosfeer, hetgeen resulteert in het ontstaan en uitdijen van gaswolken. Daarbij dient ten behoeve van de modellering onderscheid te worden gemaakt in dispersie van neutrale gaswolken en dispersie van zware gaswolken.

8.8.1 Dispersie van een neutrale gaswolk

Het dispersiemodel voor een neutrale gaswolk (ten gevolge van bijvoorbeeld vloeistof verdamping vanuit een plas) in een wegtunnel is hetzelfde als dat voor de situatie in de open lucht. Het is echter zeer gecompliceerd om atmosferische turbulentie in rekening te brengen. Vandaar dat in tunnels een vereenvoudigde benadering wordt gehanteerd om de concentratie te berekenen in de gaswolk op een bepaalde afstand benedenwinds van het emissiepunt (de bron) [14]. In deze benadering wordt de concentratie gelijk verondersteld aan de bronsterkte gedeeld door het product van de windsnelheid en de oppervlakte loodrecht op de windrichting van de gaswolk. Op grote afstand van de bron is de oppervlakte van de gaswolk gelijk aan de tunneldoorsnede. Op korte afstand van de bron is de wolkhoogte kleiner dan de tunnelhoogte (aangenomen wordt 0,1 maal de afstand benedenwinds van de bron) en wordt de oppervlakte van de gaswolk benaderd door de breedte van de tunnel maal de term $0,1 \cdot X$. Dit leidt tot de volgende vergelijkingen:

$$C \approx \frac{Q}{U_w \cdot B \cdot (0,1 \cdot X)} \quad [\text{kg/m}^3] \quad \text{voor } (0,1 \cdot X) \leq H$$

$$\text{en } C \approx \frac{Q}{U_w \cdot A} \quad [\text{kg/m}^3] \quad \text{voor } (0,1 \cdot X) > H$$

waarin:

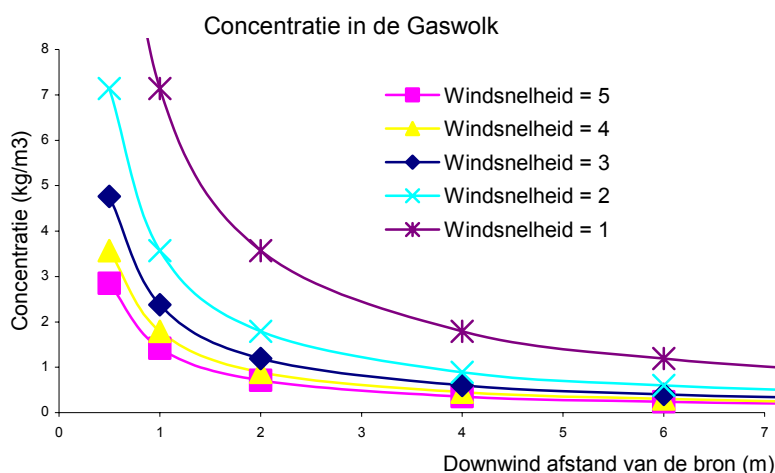
C	=	concentratie in de gaswolk op afstand X	$[\text{kg/m}^3]$
Q	=	bronsterkte	$[\text{kg/s}]$
U_w	=	windsnelheid in de tunnelbuis	$[\text{m/s}]$
B	=	breedte van de tunnelbuis	$[\text{m}]$
H	=	hoogte van de tunnelbuis	$[\text{m}]$
X	=	afstand benedenwinds van de bron	$[\text{m}]$
A	=	doorsnede van de tunnelbuis	$[\text{m}^2]$

8.8.2 Voorbeeld neutrale gaswolk

Om de dispersie van een neutrale gaswolk te illustreren is een voorbeeldberekening uitgevoerd voor een tunnel met een breedte van 7 meter en een hoogte van 5 meter, bij een bronsterkte (uitstroming) van 5 kg/s. Voor windsnelheden variërend van 1 tot 5 m/s is de concentratie berekend als functie van de benedenwindse afstand van de bron (zie Tabel B 15 en Figuur B 8).

Tabel B 15 Concentratie in een tunnel van 7 x 5 meter, als functie van de windsnelheid in de tunnel en de afstand benedenwinds van de bron. Neutraal gasdispersie, homogene opmenging.

Windsnelheid	Afstand benedenwinds van de bron [m]											
	0,5	1	2	4	6	8	10	20	30	40	50	
5 m/s	2,85	1,42	0,71	0,35	0,24	0,18	0,14	0,07	0,05	0,04	0,03	
4 m/s	3,57	1,79	0,89	0,45	0,30	0,22	0,18	0,09	0,06	0,05	0,04	
3 m/s	4,76	2,38	1,19	0,60	0,40	0,30	0,24	0,12	0,08	0,06	0,05	
2 m/s	7,14	3,57	1,79	0,89	0,60	0,45	0,36	0,18	0,12	0,09	0,07	
1 m/s	14,29	7,14	3,57	1,79	1,19	0,89	0,71	0,36	0,24	0,18	0,14	



Figuur B 8 Concentratie versus de benedenwindse afstand vanaf de bron, bij verschillende windsnelheden in een tunnel van 7 x 5 m voor de dispersie van een neutrale gaswolk.

Uit de bovenstaande gegevens blijkt dat vanaf 5 tot 10 meter de concentratie van een neutraal gas nog slechts zeer langzaam afneemt. Bij hogere windsnelheden wordt het gas snel gemengd met lucht, wat door de verdunning leidt tot lagere

concentraties en minder gevaarlijke omstandigheden. In het toegepaste, eenvoudige model is er sprake van een omgekeerd evenredige relatie tussen de concentratie en de windsnelheid: een twee keer zo hoge windsnelheid leidt tot twee keer zo lage concentraties.

Uit Figuur B 8 kan verder worden afgeleid dat bij neutraal gas-dispersie vooral in de eerste seconden het volume van de gaswolk snel toeneemt, wat overeenkomt met een snelle afname van de concentratie. Zo is, bij een windsnelheid van 3 m/s, het volume na 1 seconde 6,3 m³ terwijl dat na 6 seconden al is toegenomen tot 225 m³.

8.8.3 Dispersie van een zware gaswolk

Het dispersiemodel voor een zware gaswolk (ten gevolge van bijvoorbeeld de uitstroming van een tot vloeistof verdicht gas) in een tunnel gaat uit van volledige opmenging met lucht, en er zal dus sprake zijn van 'verdringing'. Indien er sprake is van een kleine uitstroming zal zich een zware gaswolk vormen met een wolkhoogte die kleiner is dan de tunnelhoogte. De concentratie in de gaswolk wordt berekend met de volgende vergelijking, waarbij A (m²) staat voor de dwarsdoorsnede van de gaswolk (en dus niet van de tunnel):

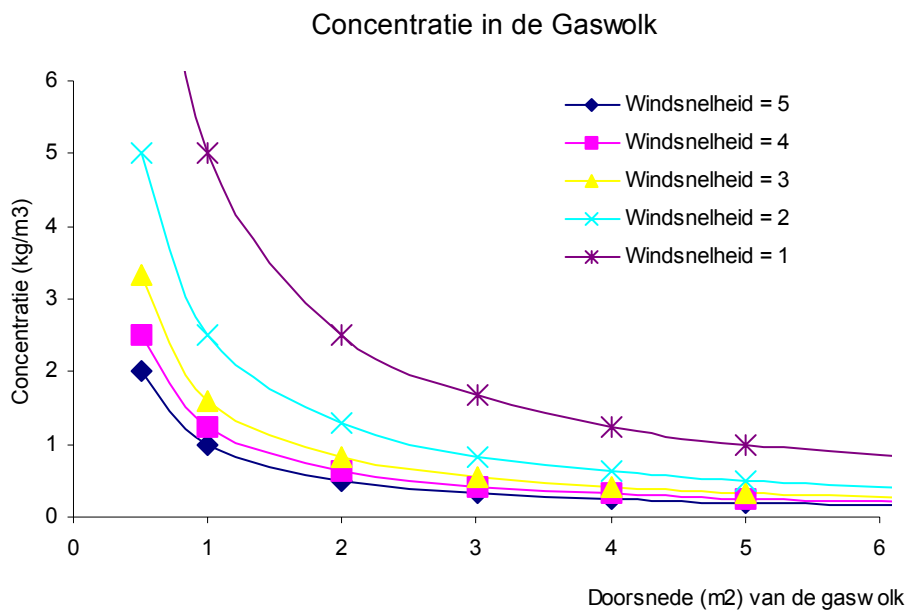
$$C \approx \frac{Q}{U_w \cdot A} \quad [\text{kg/m}^3]$$

8.8.4 Voorbeeld zware gaswolk

Uitgaande van een bronsterkte van 5 kg/s en een tunneldoorsnede van 35 m² is voor verschillende windsnelheden (variërend van 1-5 m/s) de concentratie in de gaswolk berekend als functie van de dwarsdoorsnede van de gaswolk (zie Tabel B 16 en Figuur B 9).

Tabel B 16 Concentratie in de gaswolk, als functie van de windsnelheid in de tunnel en het oppervlak van de gaswolk. Zwaargasdispersie, homogene opmenging.

Windsnelheid	Afstand benedenwinds van de bron [m]										
	0,5	1	2	3	4	5	8	10	20	30	35
5 m/s	2,00	1,00	0,50	0,33	0,25	0,20	0,13	0,10	0,05	0,03	0,03
4 m/s	2,50	1,25	0,62	0,42	0,32	0,25	0,16	0,13	0,06	0,04	0,04
3 m/s	3,33	1,60	0,83	0,55	0,41	0,33	0,20	0,17	0,08	0,06	0,05
2 m/s	5,00	2,50	1,30	0,83	0,63	0,50	0,31	0,25	0,13	0,08	0,07
1 m/s	10,0	5,00	2,50	1,67	1,25	1,00	0,63	0,50	0,25	0,17	0,14



Figuur B 9 Concentratie versus de doorsnede van de gaswolk, bij verschillende windsnelheden in een tunnel van 7 x 5 m voor de dispersie van een zware gaswolk.

8.8.5 Toepasbaarheid

In de dispersiemodellen, die voor zowel neutrale als zware gaswolken in tunnels worden toegepast, wordt op een sterk vereenvoudigde manier rekening gehouden met:

- de *tunnelconfiguratie* (deze bepaalt de maximale omvang van de gaswolk);
- de *windsnelheid* (rijrichting of ventilatierichting) en
- de *bronsterkte* (lagere bronsterkte ten gevolge van de tunneldimensies, concentratie boven de bron en windsnelheid) op het fysische effect van dispersie.

De huidige modellen geven een goede eerste orde benadering. Voor een nauwkeurigere beschrijving van de werkelijkheid is een dispersiemodel nodig dat expliciet rekening houdt met de atmosferische turbulentie in de tunnel en met de concentratieopbouw in verticale richting.

8.9 Fysische effectenmodellering van een explosie

8.9.1 Omschrijving fenomeen

Bij een vertraagde ontsteking van een gaswolk in een tunnel kan een gaswolkexplosie optreden. Een gaswolk kan ontstaan door het direct vrijkomen van een gas uit bijvoorbeeld een tankwagen of door het verdampen van vloeistof uit een plas in de tunnel.

Afhankelijk van de snelheid van ontbranding en de voortplantingssnelheid van het vlamfront, kan een gaswolkontbranding overgaan in een detonatie met de daarbij behorende overdrukeffecten. De voortplantingssnelheid van het vlamfront zal bij verbranding steeds meer toenemen in voor de brand gunstige omstandigheden (ideaal mengsel).

Bij een voortplantingssnelheid van de vlam van meer dan 800 m/s spreekt men van een detonatie, bij een snelheid van minder dan 800 m/s voordat de complete gaswolk is weggebrand spreekt men van een deflagratie.

8.9.2 Aanpak en beschikbare modellen

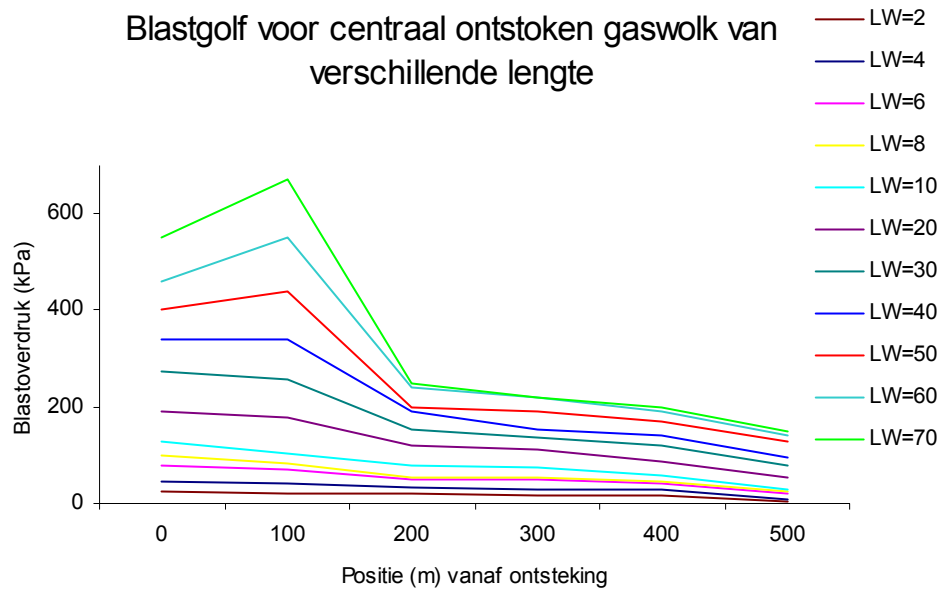
In het rapport "*Vuistregels voor explosiebelasting en respons van verkeerstunnels*" [15] zijn experimentele gegevens met betrekking tot gasexplosies van propaan-luchtmengsels in pijpen en kanalen geëxtrapolleerd naar een aantal reële scenario's van een gasexplosie in een verkeerstunnel op volle schaal. Hierbij is een model afgeleid voor detonaties.

De druk in de tunnel is afhankelijk van een groot aantal parameters, zoals de tunnellenlengte, de wolkengte, de positie van de wolk in de tunnel, de aard van het gasluchtmengsel, de concentratieverdeling in de wolk, de aanwezigheid en opstelling van voertuigen in de tunnel en de locatie van ontsteking van de wolk. Hierdoor is in theorie een zeer groot aantal ontwikkelingsscenario's mogelijk. Als een eerste-orde benadering is het verantwoord om de 2 belangrijkste parameters te variëren, namelijk de wolkengte en de ontstekingsplaats in de wolk. De wolkengte is te bepalen aan de hand van de massa en het volume van de wolk en de verspreiding door de tunnel (zie voorbeeld). De aanwezigheid van een file kan in de wolkengte worden verdisconteerd door aan te nemen dat er een langere gaswolk ontstaat. Aan de andere parameters wordt een constante waarde toegekend, namelijk:

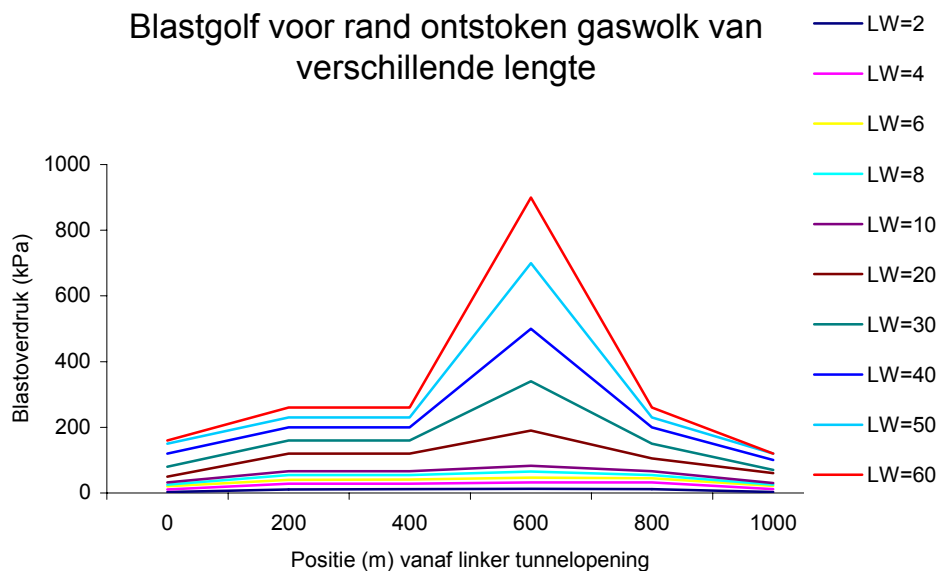
- een tunnellenlengte van 1000 m;
- een centrale positie van de wolk in de tunnel;
- een stoichiometrisch propaan-luchtmengsel; d.w.z. een mengsel met een zodanige verhouding van bestanddelen dat de chemische reactie volledig kan plaatsvinden.

Het vereenvoudigde model maakt onderscheid tussen ontsteking van de gaswolk in het midden en aan de rand van de wolk. Ontsteking op een *centrale positie binnen de wolk* vindt bijvoorbeeld plaats indien een bestuurder in de file zijn voertuig, dat zich in het centrum van de wolk bevindt, opnieuw probeert te starten. Door de ontsteking van de wolk in het midden van de tunnel kunnen de effecten als symmetrisch worden beschouwd. De resulterende blastbelasting op de tunnelwand (in kPa)

is af te lezen uit Figuur B 10. Voor een aan de rand ontstoken wolk is de blastbelasting af te lezen in Figuur B 11. Een verdere beschrijving van het model is opgenomen in 11 en 15.



Figuur B 10 Piekoverdruk (belasting van de tunnelwand) als functie van de afstand vanaf het ontstekingspunt voor gaswolken met een lengte (LW) van 2 tot 70 meter. Ontstekingspunt midden in de wolk.



Figuur B 11 Piekoverdruk (belasting van de tunnelwand) als functie van de afstand vanaf het ontstekingspunt voor gaswolken met een lengte (LW) van 2 tot 60 meter. Ontstekingspunt aan de rand van de wolk.

8.9.3 Voorbeeld: blastbelasting van een gasexplosie

100 kg is een typische inhoud van een LPG-tank van een bus van het openbaar vervoer. De effecten van een gasexplosie van 100 kg LPG zijn als volgt te berekenen.

Bepaling verspreiding gaswolk

Allereerst moet de lengte van een stoichiometrisch gemengde wolk van 100 kg propaan worden berekend. Een stoichiometrisch propaan-lucht-mengsel bevat 4 volume % propaan. Het molecuulgewicht van een stoichiometrisch mengsel

($M_{\text{propaan}} = 44 \text{ g/mol}$ en $M_{\text{lucht}} = 29 \text{ g/mol}$) is daarom

$M_{\text{mengsel}} = 0,04 \cdot 44 + 0,96 \cdot 29 = 29,6 \text{ g/mol}$

De dichtheid van het mengsel wordt berekend bij een omgevingsdruk van 101,325 kPa en een omgevingstemperatuur van 288 K. R is de gasconstante met een waarde van 8314 J/(mol K):

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

De massafractie propaan in een 4% mengsel bedraagt nu:

$(0,04 \cdot 44) / (0,04 \cdot 44 + 0,96 \cdot 29) = 0,0594$ (-).

De massa van een stoichiometrische wolk die 100 kg propaan bevat is

$100 / 0,0594 = 1684 \text{ kg}$. Het volume van stoichiometrische wolk van 1684 kg bij een dichtheid van 1,25 kg/m³ bedraagt $1684 / 1,25 = 1350 \text{ m}^3$.

De lengte wolk in een lege tunnel van $9 \cdot 5 \text{ m}^2$ doorsnede = 30 m. De lengte van de wolk in een tunnel met daarin voertuigen wordt dan geschat op zo'n 40 m.

Bepaling blastbelasting

Uit de figuren is af te lezen dat de blastbelasting bij een centraal ontstoken wolk ter plaatse van het ontstekingspunt 340 kPa bedraagt en 100 m van de tunnelopening zo'n 140 kPa. Bij een aan de randontstoken ontstoken wolk bedraagt de belasting ter plaatse van het punt van ontsteking 500 kPa en 200 m van de tunnelopening 200 kPa.

8.9.4 Toepasbaarheid

Het hier besproken model is tot stand gekomen door experimentele resultaten te extrapoleren naar de schaal van een verkeerstunnel. Bepaalde parameters die in het model constant zijn verondersteld, zullen in werkelijkheid variëren. Hierbij gaat het om de tunnellengete, de positie van de gaswolk, de verhoudingen van het mengsel, de concentratie verdeling van het mengsel, en de eventuele aanwezigheid van een file. De gebruiker van het model dient zich dan ook te realiseren dat het model een conservatieve benadering van de werkelijkheid is. Desondanks geldt dat dit model het momenteel best beschikbare instrument is voor de analyse van de effecten van explosies in tunnels. Wil een gebruiker meer nauwkeurigheid, dan dient hij een specifiek model voor de betreffende situatie te (laten) ontwikkelen.

8.10 Fysische effectenmodellering van een BLEVE

8.10.1 Omschrijving fenomeen

Een BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) is een explosieve verdamping door het instantaan vrijkomen van een tot vloeistof verdicht gas. Om een onder atmosferische condities gasvormige stof tot een vloeistof te verdichten wordt het onder hoge druk gebracht, afhankelijk van de dampdruk en de temperatuur van het gas. Indien deze overdruk wegvalt, zal de vloeistof explosief verdampen wat een drukgolf veroorzaakt. Bij vrijkomen van een brandbaar gas in aanwezigheid van een ontstekingsbron zal hierbij tevens een vuurbal ontstaan.

Twee typen BLEVE's worden onderscheiden, die verschillen in de toedracht van het bezwijken van het vat. Bij een koude BLEVE komt het tot vloeistof verdichte gas vrij door het bezwijken van de drukketel. In het geval van een warme BLEVE wordt de drukketel verhit, waardoor door toename van de druk in de ketel, deze uiteindelijk zal bezwijken. Dit is meestal het gevolg van een vloeistofbrand onder/nabij de druktankwagen die na enige tijd (ca. 15 minuten) leidt tot het instantaan falen van de druktankwagen.

8.10.2 Aanpak en beschikbare modellen

Een BLEVE resulteert in de volgende effecten:

- drukgolf;
- vuurbal, bij brandbare gassen die direct worden ontstoken;
- rondvliegende fragmenten.

Deze drie effecten zijn algemeen beschreven in [11].

Druk golf

De bepaling van de drukgolf is gebaseerd op experimenten in het open veld. Daarom valt te verwachten dat er in een tunnel als gevolg van de gesloten constructie hogere waarden voor de piekoverdruk zullen optreden [15].

Vuurbal

Een bepalingwijze voor de effecten van de vuurbal is beschreven in [11]. Om de bestaande modellen voor een BLEVE op maaiveld te kunnen toepassen op BLEVE's in weg- en railtunnels zijn enkele modelaanpassingen gepleegd. Verder is de toepasbaarheid aannemelijk gemaakt aan de hand van enkele stochiometrische en fysische overwegingen.

Rondvliegende fragmenten

De risico's van rondvliegende fragmenten zijn verwaarloosbaar ten opzichte van de risico's ten gevolge van de effecten van drukgolf en de vuurbal [11].

8.10.3 Toepasbaarheid

Op grond van fysische overwegingen kan als vuistregel worden aangenomen dat, gezien de lengte van de weg- en/of raitunnels in Nederland, bij een BLEVE in een tunnel alle aanwezige personen zullen omkomen ten gevolge van de vuurzee en/of door verstikking.

Het externe risico (het risico voor aanwezigen in de onmiddellijke omgeving van de tunnel) als gevolg van een BLEVE is afhankelijk van het (gedeeltelijk) bezwijken van de tunnelconstructie. Indien de tunnelconstructie niet bezwijkt als gevolg van druk-effecten wordt het externe risico met name bepaald door de vuurbal aan de uiteinden van de tunnel.

8.11 Analyse van het vluchtproces

In essentie is zelfredzaamheid hetzelfde als het vluchten voor een bedreigende situatie. Vluchten is in Van Dale gedefinieerd als: zich verwijderen om zich te onttrekken aan een dreigend gevaar.

Bij zelfredzaamheid gaat het om vluchten op eigen kracht, in tegenstelling tot een evacuatie waarbij de vlucht georganiseerd verloopt onder leiding van hulpverleners. Bij het vluchtproces kan ook een ander onderscheid worden gemaakt, namelijk tussen ontruiming en ontvluchting: ontruiming kan plaatsvinden zónder tijdsdruk en ontvluchting vindt plaats ónder tijdsdruk. Op dit onderscheid wordt in deze Leidraad verder niet ingegaan.

Het vluchtgedrag wordt beïnvloed door:

- de configuratie van het tunnelsysteem, bijvoorbeeld uitgangen en vluchtwegen;
- eventuele rook en toxische gassen in de omgeving;
- de organisatie van de hulpverlening bij een calamiteit; en
- de toestand, kennis en ervaring van de betrokken personen.

Voor de analyse van het vluchtproces is het van belang te beschikken over informatie over de tunnelpopulatie. Bij gebrek aan specifieke informatie kan de scenario-analist ervoor kiezen om uit te gaan van een tunnelpopulatie die overeenkomt met de gemiddelde snelwegpopulatie. Het verdient echter aanbeveling om dit beeld voor een specifieke tunnel te verfijnen. Hierbij spelen twee zaken een rol:

(1) De bevolkingsopbouw van de tunnelpopulatie

De *samenstelling van de tunnelpopulatie* zegt iets over het aandeel kwetsbare bevolkingsgroepen. Naarmate dit aandeel groter is, zal de zelfredzaamheid van de tunnelpopulatie afnemen. Er worden drie vormen van kwetsbaarheid onderscheiden:

- *Persoonsgebonden functiebeperking*: Het gaat om beperkingen die het functioneren in vrijwel alle situaties beperken als gevolg van een handicap⁶, chronische ziekte e.d. Deze beperkingen spelen altijd een rol (dus zowel bij spontaan vluchten als bij een georganiseerde ontruiming).
- *Situatiegebonden functiebeperkingen*: Het gaat vooral om kleine kinderen en bejaarden met beperkingen qua taakgerichtheid en tempo en voor wat betreft bejaarden ook het zichtvermogen, gehoor en stressbestendigheid. Het zelfstandig functioneren van deze bevolkingsgroepen wordt alleen in specifieke situaties beperkt. Bij tunnelincidenten is er sprake van functiebeperkingen bij een geforceerde ontvluchting.
- *Specifieke gevoeligheid voor een schadelijk agens*: Specifieke gevoeligheden zijn alleen van belang bij specifieke blootstellingen, zoals angina pectoris patiënten verhoogd gevoelig zijn voor koolmonoxide, een bestanddeel van rook.

⁶ Doorgaans worden drie soorten van handicaps onderscheiden: lichamelijk, zintuiglijk, verstandelijk.

(2) Het aandeel groepsvervoer (autobussen) in de gemiddelde tunnelpopulatie.

Het gebruik van de tunnel voor groepsvervoer is vooral afhankelijk van:

- de aanwezigheid van gevoelige bestemmingen in het achterland van de tunnel, zoals scholen en dagverblijven, attractieparken en evenementlocaties. Dit heeft invloed op het aandeel van bijvoorbeeld vervoer op maat, school- en pendelbussen in het tunnelverkeer,
- het gebruik van de tunnel voor recreatieve doeleinden, w.o. groepsreizen.

Kengetallen voor de relevantie van groepsvervoer zijn vooralsnog niet beschikbaar. Inventarisaties en afwegingen moeten voor iedere tunnel afzonderlijk worden gemaakt.

8.12 Vuistregelmodellen voor zelfredzaamheid

In de technische benadering van vluchtgedrag zijn drie benaderingen te onderscheiden:

- Vuistregelmodellen: gericht op ontwerp van voorzieningen, analyse van benodigde vluchttijd op basis van afstand, loopsnelheid en capaciteit;
- Fysische modellen: vluchtende mensen worden gemodelleerd als stromende vloeistoffen, gassen of deeltjes;
- Computersimulaties: vluchtproces en vluchtgedrag worden gesimuleerd met computermodellen.

Voor een overzicht van literatuur op het gebied van zelfredzaamheid en vluchtgedrag én de daarbij gehanteerde modellen wordt verwezen naar "*Vluchtgedrag: een overzicht van methoden en modellen*" [16]. Op basis van deze analyse wordt voorgesteld om gebruik te maken van vuistregels voor het uitwerken van zelfredzaamheid. Hierin wordt met relatief eenvoudige relaties het vluchtproces geanalyseerd. Basis voor dergelijke berekeningen zijn relaties die de verplaatsingssnelheid van personen en de vluchtcapaciteit als functie van personendichtheid en configuratie van de voorzieningen beschrijven. Met dergelijke relaties kan voor een gegeven systeem de benodigde vluchttijd bepaald worden.

In een vuistregelmodel worden de volgende stappen doorlopen:

- bepalen gewaarwordingstijd: tijd vanaf de start van de bedreiging tot het moment waarop betrokkene actie onderneemt;
- tijd om uit te stappen: afhankelijk van soort voertuig;
- tijd die men nodig heeft om vluchtdeur of uitgang te bereiken
- = *vluchtafstand / vluchtsnelheid*;
- vertraging bij vluchtdeur: bij een te groot aanbod van vluchtters kan de capaciteit van de deur tekortschieten;
- tijd om door vluchtdeur heen te stappen

Op grond van observaties wordt verwacht dat bij een evacuatie van een groep mensen iedereen gebruik maakt van de vluchtdeuren. In geval van individuele evacuatie zal een deel van de personen over de rijbaan evacueren.

Daarnaast kunnen de mogelijkheden voor zelfredding worden beïnvloed door de verschijnselen die zich in de tunnel voordoen ten gevolge van het ongeval. Op dit punt is alleen informatie beschikbaar over de beperking van het zicht door rook.

In 2002 is in het nieuwe gedeelte van de Beneluxtunnel een aantal evacuatieproeven uitgevoerd waarbij het gedrag van individuele weggebruikers en van groepen weggebruikers in verschillende ongevalsituaties werd bestudeerd [17].

Ten behoeve van de Leidraad zijn uit de observaties van de vluchtproeven en uit de beschikbare literatuur op dit gebied richtwaarden afgeleid voor de kwantitatieve modellering van vluchtgedrag [18]. Tabel B 17 bevat een voorstel voor een getalmatige invulling van de invoervariabelen van de gedragsmodellen voor wegtunnels. Bij het vaststellen van de kengetallen dient altijd rekening te worden gehouden met de specifieke kenmerken van de tunnel, het ongeval en de tunnelpopulatie. Gedragsaspecten als passiviteit, trage reacties en dergelijk zijn meegenomen in de richtwaarden voor zover de observaties en de literatuur daarover inzicht verschaffen.

Opgemerkt moet worden dat de voorstellen gebaseerd zijn op de situatie bij de proeven; de validatie is vooralsnog beperkt. Belangrijke vraag blijft hoe onverwacht en ongewenst gedrag, bijvoorbeeld het teruggaan naar de auto, te modelleren is in een kwantitatieve uitwerking. Voorlopig wordt voorgesteld dat dergelijke geobserveerde gedragingen in een kwantitatieve analyse van zelfredzaamheid mee te nemen zijn door voor grootheden als vluchtsnelheid en gewaarwordingstijd conservatieve waarden aan te nemen. Op www.tunnelsafety.nl zijn diverse studies te downloaden waarin een nadere onderbouwing wordt gegeven van de hier gepresenteerde getallen.

Tabel B 17 *Kwantificering van de invoergegevens voor het modelleren van vluchtgedrag*

Fase	Omstandigheden	Waarde	Bron, opmerkingen
Gewaarwordingstijd	Geen waarschuwing, langzaam escalerende ramp	> 5 minuten	
	Wel waarschuwing en / of snel escalerende ramp	tientallen seconden tot 1 minuut	
Klaarmaken/uitstappen	Algemeen	Ca. 6 s enkele tientallen seconden	Observatie [17] Bovengrens
Vluchtsnelheid	Algemeen	1 m/s	Schatting op basis van literatuur
	Geen belemmerende omstandigheden	0,5 m/s	[17]
	In dichte rook	0,3 – 0,5 m/s	
	Ouderen, personen met functiebeperking, minder zelfredzamen	0,2 – 0,5 m/s	
Deurcapaciteit	Deurbreedte 1 m, met opstap	3 – 4 s per persoon	Als deur geopend moet worden
		< 2 s p.p.	Achter elkaar aanlopen
		Ca 1,5 s p.p.	Ononderbroken stroom

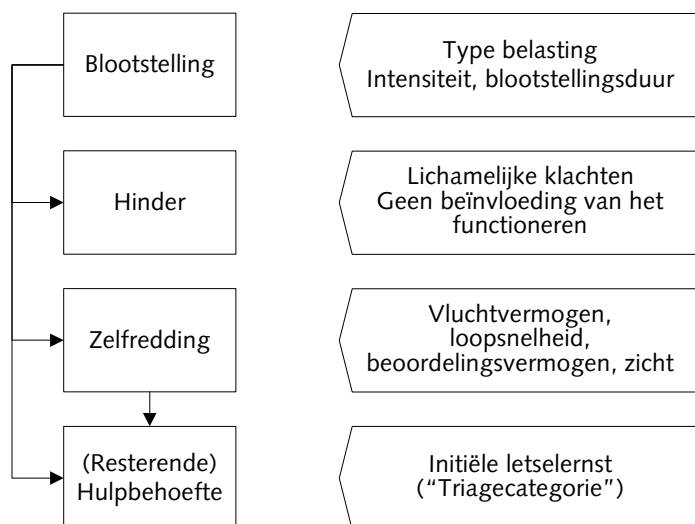
Een andere mogelijkheid voor het modelleren van zelfredzaamheid is het toepassen van een beschikbaar computermodel voor simulatie van het vluchtgedrag. Kies een computermodel dat rekening houdt met de reactietijd die de gebruiker nodig heeft, de tijd besteed aan het verzorgd achterlaten van de auto, en de aarzeling en fouten die gemaakt worden bij de keuze van de vluchtroute, en bij voorkeur ook met aspecten zoals passiviteit en groepsgedrag.

8.13 Letselmodellering

Letsel is gedefinieerd als gezondheidsschade door uitwendige factoren. Letselmodellering heeft betrekking op de gevolgen van blootstelling aan een fysisch effect. Deze gevolgen kunnen de zelfredzaamheid beïnvloeden of hulpverlening noodzakelijk maken:

- De inwerking van een botsing of een explosie op het lichaam is vrijwel instantaan. Modellering van de zelfredding is als gevolg weinig zinvol. De hulpverlening kan globaal worden getypeerd voor de kritische hulpverleningsstap aan de hand van de percentageverdeling over de triageklassen.
- De ontwikkeling van een brand en de concentratie-opbouw bij ontsnapping van een giftige stof verloopt over enkele minuten of meer, hetgeen de mogelijkheid biedt om te vluchten. Modellering van de zelfredding is als gevolg wél zinvol (zie hierna). Modellering van de hulpverlening is bij gebrek aan gegevens over de triageverdeling niet goed mogelijk.

Bovenstaande is schematisch weergegeven in Figuur B 12.



Figuur B 12 Structuur letselmodellering voor scenarioanalyse

Het ontstaan van letsel is een gevolg van *blootstelling* aan mechanische impact, hitte, explosies, toxische stoffen of een combinatie hiervan. Zolang duur en intensiteit van de blootstelling beperkt blijven, zullen de betrokkenen zich zo snel mogelijk in veiligheid proberen te brengen (zelfredding).

Het is mogelijk dat de blootgestelden hinder ondervinden tijdens het vluchten. In geval van hinder is er, wanneer de persoon in kwestie een veilige omgeving heeft bereikt, geen hulpverlening noodzakelijk. Wanneer de blootstelling ernstiger vormen aanneemt, zal ook de gezondheidsschade toenemen en kan hierdoor de zelfredding worden beïnvloed, of hulpverlening nodig zijn.

Hinder kan een effect hebben op het vermogen tot zelfredding. Aanwezigen hebben een verminderd vluchtvermogen, doordat het denkvermogen, het gezichtsvermogen of het loopvermogen wordt beïnvloed. Dit leidt tot een lagere loopsnelheid, een verkeerde looprichting of een verhoogde drempel om te vluchten.

Degenen die er desondanks in slagen een veilige plek te bereiken, hebben niet noodzakelijkerwijs geneeskundige hulpverlening nodig. Voor diverse lichtere vormen van letsel is beëindiging van de blootstelling voldoende. Hulpverlening is vooral noodzakelijk bij verbrandingen van huid of luchtwegen, alsmede voor stressgerelateerde klachten, zoals pijn op de borst.

Letselmodellering levert aldus de benodigde informatie voor het inschatten van de noodzakelijke capaciteit van de hulpverleningsdiensten.

8.13.1 Letseltypen en ongevalstypen

Afhankelijk van het ongevalsscenario wordt aan het begin van het modelleren van letsel vastgesteld wat de relevante letseltypen zijn. In Tabel B 18 is een overzicht gegeven van de belangrijkste kenmerken van de letseltypen.

Tabel B 18 Kenmerken van de diverse letseltypen

	Mechanisch letsel	Vermindering zichtvermogen	Thermisch letsel (hitte)	Toxisch letsel
Botsing	• botsenergie			
Explosie	• drukgolf		• stralingswarmte	
Brand		• rookdichtheid	• stralingswarmte en convectiewarmte	•
Giftige stoffen		• oogprikkeling		•
Blootstelling	Kort, instantaan	Variabel	Variabel	Variabel
Hinder, letsel	Letsel ontstaat direct	Ernst van de hinder neemt toe met de blootstellingsintensiteit	Letsel door straling ontstaat vrijwel direct. Letsel door convectiewarmte ontstaat ook vrij snel. Beide nemen toe met de blootstellingduur en -intensiteit	Ernst van het letsel neemt toe met de blootstellingduur en -intensiteit

Voor een *botsing* met mechanisch letsel is een globale beschrijving van de hulpverlening voldoende. Bij mechanisch letsel is ontruimen (geen tijdsdruk) van belang, maar is ontvluchten (zelfredding onder tijdsdruk) niet relevant. Eisen ten aanzien van de hulpverleningscapaciteit kunnen worden afgeleid uit de aantallen slachtoffers die kunnen vallen bij een maximaal voorstelbaar incident, waarbij rekening kan

worden gehouden met het optreden van situaties met veel aanwezigen in de tunnel, bijvoorbeeld bij een hoog percentage groepsvervoer.

Ook voor *explosies*, met kans op zowel mechanisch als thermisch letsel, is een kwalitatieve beschrijving voldoende. Uitgangspunt van de scenarioanalyse is dat explosies in een tunnel fataal zijn voor alle aanwezigen.

Bij een *brand* dienen de gevolgen te worden beoordeeld aan de hand van de in de voorgaande paragrafen beschreven criteria voor thermisch letsel (hittestraling) en blootstelling aan toxische verbrandingsgassen, in combinatie met de gevolgen van convectiewarmte en zichtvermindering in termen van verlengde blootstelling.

Ook voor blootstelling aan toxische stoffen (gassen en dampen) zijn in het voorgaande voldoende aanknopingspunten gegeven voor de letselbeoordeling. Hierbij zijn alleen de toxiciteitscriteria relevant.

Eén en ander is samengevat in Tabel B 19.

Tabel B 19 De voor de verschillende ongevalstypen toe te passen letselmodellen

Ongeval	Letselvorm	Letselmodel
Botsing	Mechanisch	Typering hulpverlening Schatting kans van optreden van letsels
Explosie	Mechanisch en/of thermisch	Kwalitatieve beschrijving NB: Optreden is veelal fataal voor alle aanwezigen
Brand	Thermisch	Stralingswarmte: Probits voor eerstegraads brandwonden conform het Groene Boek zijn (omwille van de consistentie) omgewerkt naar beschermingswaarden ⁷ . Convectiewarmte: beschermingswaarden.
	Zichtvermindering	Rookdichtheid: Vermindering loopsnelheid = f (extinctiecoëfficiënt) Oogprikkeling: Is onderdeel van <i>toxisch</i>
	Toxisch	Interventiewaarden: AEGL-2 (10 min.) AGW (60 min.)
Toxische stoffen	Toxisch	Interventiewaarden: AEGL-2 (10 min.) AGW (60 min.)

⁷ Vergelijk paragraaf 8.6.1: Berekeningswijze en uitvoer

8.13.2 Aard van het letsel

In de rampeneeskunde worden de volgende globale letseltypen onderscheiden:

- *mechanisch letsel*: scherp en stomp letsel van de ledematen, romp en hoofd/aangezicht. Dit bepaalt het type ziekenhuis waarin het letselslachtoffer wordt opgenomen;
- *thermisch letsel*: dit type letsel betreft onder meer brandwonden en onderkoeling, bijvoorbeeld door uitblijven van hulpverlening. Letselslachtoffers worden veelal pas in tweede instantie (na 24u) geselecteerd voor opname in een brandwondencentrum;
- *RNBC-letsel*: met RNBC-letsel⁸ wordt vergiftiging (toxisch letsel) bedoeld, alsmede letsel door straling en door micro-organismen. In relatie tot tunnels is vooral 'vergiftiging' van belang. Bij ongevallen met giftige stoffen kan er ook een besmettingsgevaar zijn, hetgeen de hulpverlening (danig) vertraagt;
- *geestelijk letsel*: incidenten veroorzaken niet alleen lichamelijk letsel, maar kunnen ook psychotrauma's tot gevolg hebben bij de letselslachtoffers, hun verwanten, omstanders en hulpverleners. Psychotrauma kan bij elk incidenttype, zij het in wisselende mate, voorkomen. De mate van voorkomen is mede afhankelijk van zaken als het dodental, betrokkenheid van kinderen, eigen beïnvloedingsmogelijkheden e.d.

In de meeste gevallen is de relatie tussen het ongevalsscenario en de daarbij optredende letseltypen tamelijk eenduidig:

- *Botsing* – mechanisch letsel;
- *Explosie* – mechanisch en thermisch letsel;
- *Brand* – zichtvermindering, thermisch letsel, toxisch letsel;
- *Vrijkomen van giftige stoffen* – toxisch letsel.

Ook kan er sprake zijn van gecombineerde incidenten en dito letsels, bijvoorbeeld brand na botsing.

⁸ RNBC staat voor: Radiologisch, Nucleair, Biologisch, Chemisch

Tabel B 20 *Belangrijkste kenmerken van zelfredding en hulpverlening in relatie tot de vier onderscheiden letselvormen*

	Zelfredding	Hulpverlening
Mechanisch letsel	Sterk afhankelijk van de aard en de ernst van het letsel.	Redden (uitzagen door de brandweer) heeft absolute prioriteit.
Thermisch letsel (hitte)	Zelfs slachtoffers met ernstige brandwonden kunnen gebruik maken van vluchtvoorzieningen. Tot 60°C weinig afname zelfreddend vermogen. Toenemend letsel bij hogere rookgas / luchttemperaturen. Boven de 200°C direct overlijden.	Inzet geneeskundige hulpverlening direct nodig.
Vermindering zichtvermogen	Oriëntatievermogen en beoordelingsvermogen neemt af bij hoge rookdichtheid en naarmate de tijd verstrijkt	Behoeftte aan hulpverlening neemt toe met de tijd
Toxisch letsel	Zelfreddend vermogen sterk afhankelijk van de toxische werking van de stof	Hulpverlening noodzakelijk bij ernstiger letselvormen

De bovengenoemde letseltypen ontstaan door een instantane dan wel meer geleidelijke blootstelling en/of inwerking.

Bij instantane inwerkingen ontstaat het letsel onmiddellijk (bijna letterlijk "in één klap"). Instantane inwerkingen worden veroorzaakt door incidenten waarbij in een korte tijd veel energie wordt overgedragen, zoals botsingen, ontsparingen en explosies. Een instantane inwerking betekent enerzijds dat er niets meer aan te doen is, en anderzijds dat er geen geforceerde ontvluchting nodig is. Een eventuele ontruiming kan gepland en begeleid verlopen, tenzij er gevaar voor secundaire effecten bestaat of er sprake is van afsluiting en beklemming van tunnelgebruikers. Het grootste risico op vervolgongevallen wordt gevormd door het vrijkomen van brandbare stoffen. De reddingscapaciteit is de kritische factor voor de hulpverlening. Deze wordt vooral bepaald door de noodzaak en mogelijkheden om letselslachtoffers te bevrijden (uit te zagen). Daarnaast kan het nodig zijn meerdere medisch mobiele teams (MMT's) uit de ziekenhuizen op te roepen, waarvan er vooralsnog slechts enkele operationeel beschikbaar zijn in Nederland.

Bij brand en ontsnapping van giftige stoffen ontstaat het letsel meer geleidelijk over enkele minuten. De schade kan worden beperkt door de ontwikkeling van het ongeval te beperken of in zijn geheel te stoppen, en door de duur van de inwerking te beperken door het bevorderen van zelfredzaamheid. Dit kan worden bereikt door een snelle en adequate ongevalsbestrijding, bijvoorbeeld met behulp van geautomatiseerde (brand)bestrijdingssystemen, en door een juiste dimensionering en goede toegankelijkheid van vluchtvoorzieningen in combinatie met adequate informatievoorziening en instructies.

8.13.3 Ernst van het letsel

Uitgangspunt voor de beoordeling van de letselernst is

1. de impact van het letsel op het proces zelfredding;
2. het beroep dat op de hulpverlening wordt gedaan (hulpbehoefte).

Voor zelfredding is vooral relevant in hoeverre het letsel leidt tot een verminderd vluchtvermogen. De hulpbehoefte wordt bepaald door de mate waarin sprake is van levensbedreigend letsel.

Zelfredding

Vluchten is aan de orde bij brand en ontsnappingen van toxische stoffen. De ernst van de gezondheidsschade wordt bepaald door de combinatie van de (intrinsieke) schadelijkheid van het agens (bijvoorbeeld de giftigheid van de vrijgekomen stof), de gevoeligheid van de tunnelgebruikersgroep voor het agens (denk aan kwetsbare bevolkingsgroepen zoals kinderen, zwangere vrouwen, gehandicapten en ouderen), en de blootstellingsintensiteit (tijdsduur, concentratie, warmtestralingsintensiteit, etc.).

De voor toxische stoffen gebruikelijke categorisering is de volgende:

1. detectability – de schadelijke stoffen zijn te zien of te ruiken maar veroorzaken geen hinder;
2. discomfort – de verschijnselen zijn onaangenaam en hinderlijk, bijvoorbeeld door prikkeling (irritatie) van ogen en luchtwegen, eventueel in combinatie met lichte gezondheidseffecten die echter snel verdwijnen na beëindiging van de blootstelling;
3. disability – er treedt onomkeerbare of anderszins ernstige gezondheidsschade op, met hulpbehoefte of vermindering van het vluchtvermogen;
4. death – levensbedreigende gezondheidsschade, die zonder adequate behandeling binnen enkele dagen de dood tot gevolg kan hebben.

Deze vier categorieën worden wel aangeduid als D1, D2, D3 respectievelijk D4. Het disability-niveau (D3) wordt zowel voor thermisch letsel als voor blootstelling aan toxische stoffen gebruikt als criterium voor de beïnvloeding van het vluchtvermogen.

Hulpverlening

Voor het voorspellen van de benodigde vorm en omvang van de hulpverlening is inzicht nodig in de (initiële) letselernsten in de soort(en) van letsels. Voor het categoriseren van de initiële letselernst wordt veelal gebruik gemaakt van triageklassen. Triage betekent prioriteitsstelling voor geneeskundige hulpverlening in situaties dat er (nog) weinig hulpverleners aanwezig zijn. De ernstig gewonden voor wie levens- en ledemaatreddende handelingen moeten worden verricht krijgen prioriteit toegewezen.

Voor hulpverlening zijn drie triagecategorieën van toepassing (zie Tabel B 21). De bij een bepaald ongevalscenario gevallen slachtoffers kunnen worden ingedeeld in

één van deze drie triagecategoríeën. Zo ontstaat voor het betreffende scenario een indruk van de benodigde hulpbehoefte.

Tabel B 21 Triageklassen

Triageklasse	Definitie
T1	Letselslachtoffers van wie het leven direct wordt bedreigd door instabiliteit van één of meer van de drie vitale functies (ABC ⁹ -instabiel).
T2	Letselslachtoffers van wie het leven op een termijn van enkele uren wordt bedreigd door instabiliteit van één of meer van de vitale functies of met letsels die binnen 6 uur behandeld moeten worden om infectieuze complicaties danwel blijvende invaliditeit te voorkomen.
T3	Letselslachtoffers die niet dringend hulp behoeven (ABC-stabiel).

8.13.4 Omvang van het letsel

De omvang van het letsel wordt in de praktijk afgemeten aan de verdeling van de eerder genoemde letseltypen (de categorieën D1 t/m D4 of de triagecategoríeën T1, T2, T3) over de slachtoffers. Voor het vaststellen van de beïnvloeding van zelfredding (dat wil zeggen de vermindering van het vluchtvermogen) worden in de onderstaande tekst handreikingen gedaan voor de letselmodellen die kunnen worden toegepast bij de diverse ongevalstypen. Voor het vaststellen van de benodigde hulpbehoefte zijn dergelijke modellen niet voorhanden en moet worden volstaan met globale kentallen die zijn afgeleid uit de ervaringen met wegongevallen.

Hulpbehoefte

De kentallen voor de verdeling van de slachtoffers over de drie triageklassen zijn alleen beschikbaar voor botsingen in tunnels (zie Tabel B 22).

Tabel B 22 Verdeling slachtoffers over triageklassen ten behoeve van vaststellen hulpbehoefte

Type ongeval	Triageklasse		
	T1	T2	T3
Botsingen in tunnel	15	30	55
Overige ongevallen	Niet beschikbaar		

Modellen voor het berekenen van vermindering van vluchtvermogen ten gevolge van letsel

Het uitgangspunt van de letselberekeningen is het blootstellingsprofiel voor een bepaald deel van de tunnel, dat wil zeggen een beschrijving van de ontwikkeling in de tijd van de hitte en/of de concentratie aan toxische stoffen. Een bepaald percen-

⁹ ABC staat voor Ademhaling, Bloeddruk en -Circulatie

tage van de personen die in dat deel van de tunnel aanwezig zijn, zal gezondheidsschade oplopen die correspondeert met een van de categorieën D1, D2, D3 of D4.

De nauwkeurigheid van de berekeningen varieert afhankelijk van de beschouwde deelpopulatie van de tunnelgebruikers en van de tijdsintervallen waarin het totale scenario wordt onderverdeeld.

In de eerste plaats kunnen de schattingen of berekeningen worden uitgevoerd op het niveau van de individuele tunnelgebruiker (dus "per persoon"), voor een aantal groepen tunnelgebruikers met specifieke kenmerken, of voor één representatief samengestelde groep tunnelgebruikers. Bij de keuze voor een bepaalde onderverdeling zal rekening worden gehouden met omstandigheden zoals het al dan niet voorkomen van groepsvervoer, het percentage tunnelgebruikers met een functiebeperking ("gehandicapten"), en de mate waarin de tunnelgebruikers gevoelig zijn voor bepaalde agentia.

De waarden van de parameters van het te gebruiken letselmodel dienen van toepassing te zijn op de betreffende deelpopulatie. Naarmate de groep groter of minder specifiek wordt, worden meer generieke parameterwaarden gebruikt.

In de tweede plaats kunnen de tijdsintervallen, waarvoor de letselberekeningen worden uitgevoerd, variëren van zeer klein (bijvoorbeeld < 1 minuut) tot zeer groot (gelijk aan de scenarioduur). Voor een nauwkeurige berekening dienen de tijdsintervallen klein te zijn. Hoe kleiner het gekozen tijdsinterval, hoe groter het aantal berekeningen dat nodig is om een heel scenario door te rekenen; daarmee neemt ook de benodigde inspanning toe (arbeidsintensieve methode). In aansluiting op de fasering bij de kwalitatieve uitwerking ligt een onderverdeling in 3 tot 6 karakteristieke intervallen voor de hand.

Tabel B 23 *Nauwkeurigheid (van grof naar fijn) van letselberekeningen als functie van groeps grootte en berekeningsinterval*

Groeps grootte	Berekeningsinterval (tijd)		
	Groot (gelijk aan de gehele scenarioduur)	Middelgroot (scenario onderverdeeld)	Klein (minuut)
Groot (variabelen gemiddeld over de gehele tunnelpopulatie)	grof		
Middelgroot (tunnelpopulatie verdeeld in een aantal subgroepen)			
Klein (individuele tunnelgebruiker)			fijn

De derde dimensie waarop de nauwkeurigheid van de letselberekeningen kan variëren is het letselmodel zelf. De in mathematisch opzicht meest geavanceerde modellen zijn de blootstellings-responsrelaties. Dit zijn formules die de relatie geven tussen concentratie, blootstellingsduur en responspercentage. In een scenarioanalyse gaat het om de evaluatie van veiligheidsmaatregelen, waarbij niet alleen wordt gekeken naar sterfte maar ook naar diverse gradaties van subletaal letsel ("gewond"). Be-

trouwbare blootstellings-responsrelaties (onder andere in de vorm van probitfuncties) zijn tot op heden slechts voor een beperkt aantal stoffen beschikbaar en dan nog bijna uitsluitend voor sterfte ("letaliteit"). Voor subleetaal letsel zijn tot op heden nog geen blootstellings-responsrelaties van voldoende kwaliteit ontwikkeld.

Een eenvoudiger letselmodel is de puntschatting (één punt van de grafiek die kan worden getekend van een blootstellings-responsrelatie). Puntschattingen worden afgeleid voor een gemiddelde (standaard)mens of voor de gevoelige groepen die als eerste een bepaald gezondheidseffect ondervinden. In de internationale literatuur wordt veelal uitgegaan van puntschattingen voor het gemiddelde, afgeleid uit dierproeven. In aansluiting op de ontwikkelingen op het gebied van de rampenbestrijding is in het kader van de Leidraad gekozen voor grenswaarden (interventiewaarden) die zijn afgestemd op gevoelige groepen, maar niet op overgevoelige personen¹⁰.

Voor de hier toegepaste grenswaarden is een schalingsmethode beschikbaar waarmee waarden naar verschillende blootstellingduren kunnen worden omgerekend. Het progressief doorrekenen van toenemende/variabele blootstelling is met de huidige modellen niet mogelijk. Het letsel(percentage) moet dus worden bepaald op basis van de gemiddelde blootstelling over één of hooguit enkele (2-3) tijdsintervallen.

8.13.5 Toxische stoffen

Een praktische grenswaarde voor vermindering van het vluchtvermogen is de alarmeringsgrenswaarde (AGW) die in de rampenbestrijding wordt gebruikt als criterium om de sirene te laten gaan. Alarmeringsgrenswaarden komen overeen met het D2-niveau en zijn beschikbaar voor ruim 350 gevaarlijke, merendeels giftige, stoffen. Een nadeel van de alarmeringsgrenswaarden is dat ze betrekking hebben op een blootstellingsduur van 1 uur, wat een relatief lange periode is ten opzichte van de zelfreddingsfase die meestal 10 tot 15 minuten duurt. Ten behoeve van de eerste versie van de Leidraad Scenarioanalyse is daarom als grenswaarde voor blootstelling aan toxische stoffen gekozen voor de 'Acute Exposure Guideline Levels' (AEGLs), ontwikkeld door de US-EPA. Een AEGL geeft de concentratie die bij blootstelling gedurende 10 minuten nog juist geen gezondheidsschade veroorzaakt. Momenteel worden de overeenkomstige Nederlandse AGW's geactualiseerd aan de hand van de AEGL's. Voor de AEGL's zijn tevens empirische schaalfactoren voor extrapolatie naar andere blootstellingduren beschikbaar.

Tabel B 24 Beschermingswaarden toxische stoffen in rook

Toxische stof	AEGL-2 (ppm)		
	Blootstellingsduur		
		10 minuten	30 minuten
Waterstofcyanide (HCN)	17	10	
Koolmonoxide (CO)	420	150	
Waterstofchloride (HCl)	100	43	

¹⁰ De achtergrond van deze keuze is dat overgevoeligheid niet gerelateerd is aan een dosis en dat er dus geen grens valt te trekken.

Toxische stof	AEGL-2 (ppm)		
	Blootstellingsduur	10 minuten	30 minuten
Stikstofdioxide (NO ₂)	20	15	
Formaldehyde	14	14	
Acroleïne	0,44	0,18	
Ammoniak (NH ₃)	270	160	
Waterstoffluoride (HF)	95	34	
Waterstofbromide (HBr)	100	43	
Zwavedioxide (SO ₂)	1	1	
Benzeen (C ₆ H ₆)	2000	1100	

8.13.6 Hitte

Voor hittedetelsel is de grenswaarde (interventiewaarde) gedefiniëerd als de waarde waarboven eerstegraads brandwonden van de huid bij (kleine) kinderen optreden bij een blootstellingsduur van 10 minuten. Deze bedraagt 0,75 kW/m². Dit komt overeen met een zonnebad aan het strand en is derhalve – net als de waarden voor toxische stoffen – aan de conservatieve kant.

Voor het ontstaan van eerstegraads brandwonden bij volwassenen wordt onderscheid gemaakt tussen de schade ten gevolge van stralingswarmte, en het letsel dat ontstaat door blootstelling aan hete lucht. Uit Tabel B 25 en Tabel B 26 kan worden afgelezen welk percentage van de bevolking eerstegraads brandwonden zal oplopen bij een aantal combinaties van blootstellingsduur en warmtebelasting of luchttemperatuur in de tunnel.

Tabel B 25 Responspercentage eerstegraads brandwonden bij volwassenen ten gevolge van warmtestraling (hitteflux, in kW/m²) bij variërende blootstellingsduur

Hitteflux [kW/m ²]	Populatierepons [%]			
	Blootstellingsduur 10 s	30 s	60 s	100 s
1			< 1	< 1
2		< 1	5	30
3		1	40	90
4		10	80	100
5	< 1	40	97	
7	1	80	100	
10	30	100		
15	80			
22	100			

Tabel B 26 Responspercentage eerstegraads brandwonden bij volwassenen ten gevolge van convectiewarmte (hete lucht) variërende blootstellingsduur

Hitteflux [kW/m ²]	Populatierepons [%]				
	Blootstellingsduur				
	10 s	30 s	60 s	120 s	1200 s
70	< 1	2	4	8	75
80	< 1	2,5	5	10	100
100	1,5	4	9	17	100
150	5	17	33	67	100
190	15	50	100	100	100

8.13.7 Zichtbeperking

Zichtvermindering leidt in directe zin alleen tot hinder¹¹, die zich manifesteert doordat men het zicht verliest op de oriëntatiepunten op de vluchtroute. Oriëntatiepunten worden gevormd door het vluchttraject, de vluchtdeur, de bewegwijzering, de tunnelwand, en in algemene zin het vluchtpad en de ondergrond.

Zichtvermindering is van invloed op de loopsnelheid wanneer de zichtlengte kleiner is dan 10 meter. Wanneer de personendichtheid in de tunnel groter is dan 1 persoon per vierkante meter, wordt de loopsnelheid door de interactie tussen de aanwezigen belemmerd¹². Dit compliceert de bepaling van de invloed van zichtvermindering.

Slechtzienden zijn de belangrijkste gevoelige groep. Bij een hoge personendichtheid in de tunnel is de extra hinder voor slechtzienden beperkt, omdat zij zich op de andere tunnelgebruikers kunnen oriënteren en dezen desgevraagd ook assistentie kunnen verlenen. Omdat voor de scenarioanalyse vooral incidenten met grotere aantallen personen in de tunnel interessant zijn, is de interventiewaarde voor zichtvermindering gedefinieerd als *de waarde waarboven mensen met normaal gezichtsvermogen in toenemende mate voor het eerst het zicht op een oriëntatiepunt verliezen*. Voor niet-irriterende rook neemt de loopsnelheid bij toename van de rookdichtheid geleidelijk af van > 1 m/s tot ca. 0,3 m/s. Deze laatste waarde is de minimale loopsnelheid door geleiding langs de wand¹³.

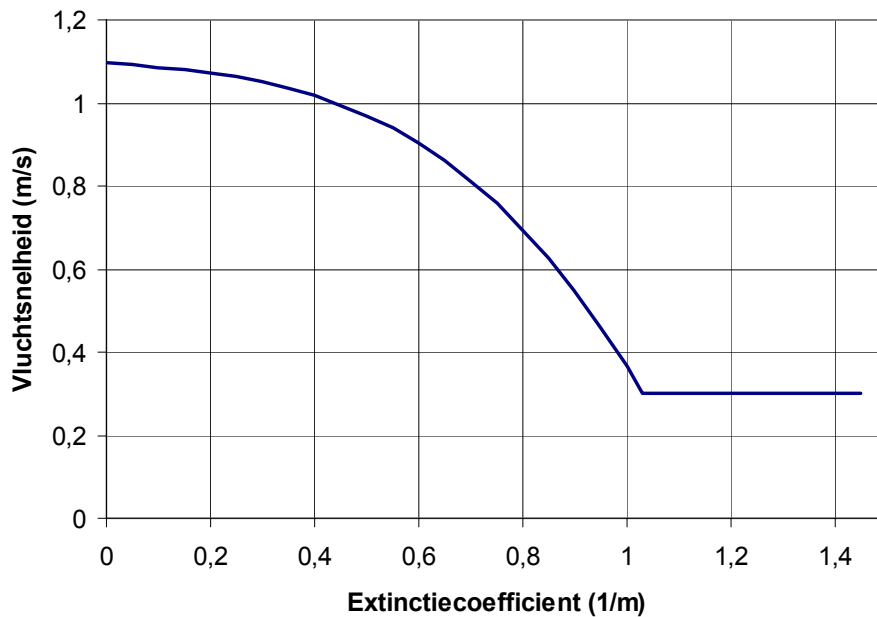
Voor prikkelende ("irriterende") rook is de invloed van zichtvermindering ondergeschikt aan de prikkelingseffecten (het 'tranen') die al zijn verdisconteerd in de waarden voor toxisch letsel.

¹¹ Ook al kan dit indirect wel tot (letaal) letsel leiden.

¹² Zie bijvoorbeeld het Brandbeveiligingsconcept voor gebouwen van BZK voor een tabel met loopsnelheden afhankelijk van de dichtheid.

¹³ Dat er een minimale loopsnelheid mag worden aangenomen, betekent echter nog niet dat men in de goede richting loopt en gebruik weet te maken van de vluchtdeur.

Vluchtsnelheid bij niet-irriterende rook [Jin]



Figuur B 13 Vluchtsnelheid als functie van de rookdichtheid (de extinctiecoëfficiënt is een maat voor de zichtvermindering)

8.13.8 Hulpverlening

De geneeskundige hulpverlening is een keten die uit een aantal stappen bestaat. Voor capaciteitsberekeningen worden veelal vier globale onderdelen onderscheiden: (1) de reddingscapaciteit (RC) van de brandweer, (2) de eerste hulp capaciteit (EHC) van (para)medische teams ter plaatse, (3) de vervoerscapaciteit (VC) van ambulances en (4) de medische behandelcapaciteit (MBC) in de ziekenhuizen. Welk onderdeel capaciteitsbepalend (kritisch) is verschilt per ongevaltype en daarmee ook per letseltype. De kritische onderdelen zijn aangegeven in Tabel 26. De benodigde hulpverleningstijden kunnen worden berekend met behulp van de Leidraad Operationele Prestaties (BZK 2001). Het laatste onderdeel - de MBC - valt buiten het bestek van deze leidraad en blijft hier buiten beschouwing.

Tabel B 27 De voor de verschillende ongevaltypen kritische hulpverleningsonderdelen

Ongeval	Kritische hulpverleningsonderdelen
Botsing	Reddingscapaciteit. Zo mogelijk integrale hulpverlening met een Medisch Mobiel Team.
Brand	Reddingscapaciteit en mogelijk Eerste Hulpcapaciteit.
Toxische stoffen	Reddingscapaciteit in onveilig gebied (gaspakkenteams), zonodig aangevuld met ontsmetting.

Bij een botsing neemt het bevrijden (uitzagen) van letselslachtoffers uit hun voertuig relatief veel tijd in beslag. Zo mogelijk vindt de stabilisatie door een ambulanceteam of medisch mobiele teams reeds plaats voordat het slachtoffer wordt bevrijd.

Bij een brand staat de brandweer voor de afweging waarmee de meeste levens worden gered: door te blussen of door te redden. Ook kan het onverantwoord zijn om de incidentbuis te betreden. Naarmate de brandweer meer succes heeft, is er ook meer Eerste Hulpcapaciteit nodig.

Bij een ontsnapping van een giftige stof is er veelal sprake van een onveilig effectgebied, waarin alleen gaspakkenteams kunnen optreden. Bij poederwolken en vluchtige vloeistoffen kunnen de slachtoffers besmet raken en eerst ontsmet moeten worden, alvorens zij kunnen worden overgedragen aan de geneeskundige hulpverlening.

9 Toets en beoordeling (stap 4)

Er is geen bijlage bij dit hoofdstuk.

10 Referenties

- [1] *Beleidsnota Tunnelveiligheid, Deel A Proceseisen*; Ministeries van Verkeer en Waterstaat, Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties, en Volkshuisvesting Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Den Haag, 22 oktober 2003.
- [2] *MAVIT scenario's tunnelincidenten*; DHV Milieu en Infrastructuur BV, R2435-01-0012.
- [3] *Scenarioanalyse van de overkappingsvarianten voor de A2 Leidsche Rijn*; TNO-MEP; 2001 R 2001/470
- [4] Bockholts, P., *Deterministische analyse voor de tunnels in de A73-Zuid te Swalmen en Roermond*; pb (2001), ref.nr.01A73rmnd024
- [5] *Systematiek voor indeling van stoffen ten behoeve van risicoberekeningen bij het vervoer van gevaarlijke stoffen*; AVIV; Enschede, 1999 (2e editie)
- [6] *Methods for the calculation of physical effects – due to releases of hazardous materials (liquids and gases) – ‘Yellow Book’ (CPR 14E)*; Committee for the Prevention of Disasters; Sdu Uitgevers; The Hague; 1997 (Third edition)
- [7] Chamberlain, G.A., *Development in design methods for predicting thermal radiation from flares*, Chem. Eng. Res. 65 (1987) 299-309.
- [8] Rylands, S. et al., *Predicting fire and smoke movement in tunnels using zone modeling*
- [9] *Safety Proef, Rapportage Brandproeven*; Bouwdienst Rijkswaterstaat; Utrecht; 2002
- [10] McGrattan, K.B. et al.; *Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, Technical Report NISTIR 6783*; National Institute of Standards and Technology; Gaithersburg, Maryland; 2001 (Version 2)
- [11] Kootstra, F., M. Molag; *Toepasbaarheid fysische effectmodellen t.b.v. ongevalsscenario's in tunnels*; TNO Milieu, Energie en Procesinnovatie; Apeldoorn; 2003.
Document is beschikbaar op www.tunnelsafety.nl.
- [12] *VeVoWeg Handreikingen: Handreikingen voor de bepaling van interne- en externeveiligheidsrisico's bij zwaar verkeer, inclusief het transport van gevaarlijke stoffen / Handreiking voor het afwegen van maatregelen / Analyse ongevallen en maatregelen zwaar verkeer inclusief het transport van gevaarlijke stoffen*; Ministerie van Verkeer & Waterstaat, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer en Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties; Utrecht; VVWA-R-99.004; 1999
- [13] Molag, M., et al.; *Conceptueel risicoanalyse model voor transport door wegtunnels*; TNO Milieu, Energie en Procesinnovatie; Apeldoorn; 1998.

-
- [14] SAVE 1995/1998 (ABIETO-rapporten)
- [15] *Vuistregels voor explosiebelasting en respons van verkeerstunnels*; TNO; Apeldoorn; 2001
- [16] Jonkman, S.N.; *Vluchtgedrag: een overzicht van methoden en modellen*; Steunpunt Tunnelveiligheid, Bouwdienst Rijkswaterstaat; Utrecht; 2002
- [17] Boer, L.C., *Gedrag van automobilisten bij evacuatie van een tunnel*, TNO rapport: TM-02-C034, 24 mei 2002
Document is beschikbaar op www.tunnelsafety.nl.
- [18] Jonkman, S.N., *Afleiding richtwaarden voor kwantitatieve uitwerking uit de gedragsproeven in de Beneluxtunnel*; Bouwdienst Rijkswaterstaat; Utrecht; 2002.
Document is beschikbaar op www.tunnelsafety.nl.