



Veiligheidskritische functies in tunnels

Bepaling van de vereiste betrouwbaarheid en overige prestatie-eisen van de (geautomatiseerde) veiligheidssystemen

Datum 16 januari 2017
Status Versie 1.2.1 Definitief

RWS ONGECLASSIFICEERD

Veiligheidskritische functies in tunnels

Bepaling van de vereiste betrouwbaarheid en overige prestatie-eisen van de (geautomatiseerde) veiligheidssystemen

Datum 16 januari 2016
Status Versie 1.2.1 Definitief

RWS ONGECLASSIFICEERD

Colofon

Uitgegeven door	Rijkswaterstaat Grote Projecten en Onderhoud, afdeling Installaties en Bediening, Steunpunt Tunnelveiligheid
Informatie	
Telefoon	
Fax	
Uitgevoerd door	Ronald Mante
Gecontroleerd door	Versie 1: Tineke Wiersma, Jelle Hoeksma, Wim Janssen, Ronald Gram, Josephine L'Ortye, Jan van Wijgerden, Sipke van Manen Versie 1.1: Tineke Wiersma, Jelle Hoeksma en Ben Pronk Versie 1.2: Tineke Wiersma, Jelle Hoeksma, Ben Pronk, Kees Thijssen, Alex Vrijssen, Rob Regensburg en LTR-overleg
Geautoriseerd door	LTR-overleg
Vrijgegeven door	Ronald Mante
Datum	5 februari 2016
Documentnummer	4818-2015-0003
Versienummer	1.2.1
Status	Definitief

Documentgeschiedenis		
Versie	Datum	Toelichting
Concept 1	13 april 2011	Eerste werkversie.
Concept 2	18 april 2011	Nadere invulling prestatie-eisen.
Concept 3	6 juni 2011	Nadere inbedding gebruik TOPAAS, nadere formulering betrouwbaarheidseisen en conclusies en aanbevelingen. Tevens aanvullende berekeningen toegevoegd.
Definitief 1	20 juni 2011	Intern door werkgroep goedgekeurde versie.
Definitief 1.1 , Concept 1	28 november 2011	Resultaten externe toetsing verwerkt, o.a. commentaar van Advisory Board Landelijk Tunnelregisseur (Helsloot, Vrijling en Leegwater).
Versie 1.1, Eindconcept	20 december 2011	Opmerkingen toetsing concept 1 verwerkt.
Versie 1.1. Definitief	27 december 2011	Definitief gemaakt na instemming Change Advisory Board Landelijk Tunnelregisseur.
Versie 1.2, Concept 1	16 februari 2015	Vluchtconcepten anders dan MTK met kopdeur toegevoegd. Tevens enkele andere aanvullingen/verduidelijkingen.
Versie 1.2, Concept 2	3 juni 2015	Commentaar op concept 1 verwerkt.
Versie 1.2, Concept 3	29 oktober 2015	o.a. tijdbalken/swimming lanes toegevoegd, falen VKF's duidelijker gedefinieerd en tijdsduur stoppen verkeer bij afsluiten tunnel geharmoniseerd met beweegbare bruggen.
Versie 1.2, Definitief	5 februari 2016	Enkele tekstuele aanpassingen naar aanleiding van beoordeling in LTR-overleg d.d. 19-01-16

Documentgeschiedenis		
Versie	Datum	Toelichting
Versie 1.2.1, Definitief	16 januari 2017	<p>Geactualiseerde versie, naar aanleiding van verwerking versie 1.2 Definitief in de LTS versie 1.2 SP2 (gepubliceerd 9 december 2016): errata, verduidelijkingen en aanvullingen. Betreffende teksten blauw aangegeven, m.n.:</p> <ul style="list-style-type: none"> - J32-borden: zie paragrafen 5.3 en 5.4; - Correctie Bijlage G, vluchtdeuren in middenwand, afsluiten incidentbuis en ondersteunende buis: vaste tijd na zetten snelheidsmaatregelen MTM en inschakelen J-32-borden is 3 seconden (i.p.v. 10 seconden in versie 1.2); totale doorlooptijd wordt daarmee 35 + X seconden (i.p.v. 42 + X seconden in versie 1.2); - Eisen opstarttijd ventilatie ondersteunende buis toegevoegd: zie paragraaf 5.2, bijlage E (onderdelen b2 en c2) en bijlage G - Eisen emissie- en rookmaatregelen buiten tunnel verder uitgewerkt, inclusief correcties: zie bijlage C en toegevoegde bijlage I - Bericht bij ontgrendeling vluchtdeur naar ondersteunende buis wordt 2x afgespeeld in plaats van 3x; gecorrigeerd in bijlage C, bij MTK met uitgangsvluchtdeuren naar ondersteunende buis (in paragraaf 5.6 en bijlage H was dit al correct weergegeven). - Paragraaf 5.3, tabel 5.3.2, rij III-1: "X" geschrapt, omdat leegrijden verkeersbuis niet hoort bij afsluiten verkeersbuis; dus, maximale tijd is nu bijvoorbeeld 96 sec. (i.p.v. 96 + X sec in versie 1.2). - Paragraaf 5.3, tabel 5.3.2, rij III-4: expliciet gemaakt wanneer dynamische bordjes ("Exit" e.d.) nodig zijn in verkeersbuizen bij vluchtconcept MTK met uitgangsdeuren naar ondersteunende buis. - Paragraaf 5.6, tabel 5.6.2, rijen II-2, II-3 en II-4: verduidelijkt dat pictogram, contourverlichting en geluidsbaken in MTK met uitgangsdeuren alleen hoeft te worden ingeschakeld bij uitgangsdeur preferabele vluchtrichting. - Timing VKF3 verduidelijkt / nader gespecificeerd: zie paragraaf 5.4, tabel 5.4.1.

Inhoud

1	Inleiding 8
1.1	Aanleiding 8
1.2	Doel 10
1.3	Opbouw rapport 10
2	Nadere beschrijving IEC-61508 en TOPAAS 11
2.1	IEC-61508 11
2.2	TOPAAS 13
3	Aanpak 15
3.1	Inleiding 15
3.2	Layers of Protection 16
3.3	Berekening Risk Reduction Factoren met QRA-tunnels 18
4	Resultaten 21
4.1	Geautomatiseerde veiligheidssystemen conform de VRC 21
4.2	Aanvullingen op basis van gevarenanalyse 23
4.3	Risk Reduction Factoren van veiligheidsmaatregelen 25
5	Specificatie veiligheidskritische functies 28
5.1	Inleiding 28
5.2	Tunnelventilatie (VKF1) 31
5.3	Veilige vluchtroute (VKF2) 39
5.4	Voorkomen onbeheerst afsluiten tunnelbuis (VKF3) 47
5.5	Filevermijding 48
5.6	Calamiteitenknop en evacuatieknop 49
6	Conclusies en aanbevelingen 58
6.1	Conclusies 58
6.2	Aanbevelingen 59
	Lijst van aangehaalde literatuur 61
	Bijlage A Gevarenanalyse 63
	Bijlage B Berekening Risk Reduction Factoren 69
	Bijlage C Overzicht vluchtroute-voorzieningen per vluchtconcept 80
	Bijlage D Onderbouwing benodigde tijd veilig afsluiten tunnel 97
	Bijlage E Tijdbalken / Swimming Lanes VKF1 (ventilatie) 99
	Bijlage F Tijdbalken / swimming lanes VKF2 (veilige vluchtweg) 105
	Bijlage G Tijdbalken / swimming lanes acties calamiteitenknop 113
	Bijlage H Tijdbalken / swimming lanes acties evacuatieknop 117
	Bijlage I Emissie- en rookmaatregelen buiten tunnel 121

Toelichting op de positie van dit rapport

Dit rapport dient te worden beschouwd als een achtergronddocument ten aanzien van de eisen in de Landelijke Tunnelstandaard (LTS) met betrekking tot functionele veiligheid, de veiligheidskritische functies (VKF's) en de calamiteitenknop (CK) en de evacuatieknop (EK).

Het rapport is in eerste instantie opgesteld in 2011, om vast te stellen hoe met het aspect functionele veiligheid moet worden omgegaan bij tunnels, wat de veiligheidskritische functies zijn en welke eisen aan die functies moeten worden gesteld. Als zodanig is het rapport een weergave van de risicobeschouwingen die in dat kader zijn uitgevoerd en de keuzes die op basis daarvan zijn gemaakt. Deze keuzes betreffen de eisen die in onderlinge samenhang worden gesteld aan de VKF's en de CK en de EK en de wijze waarop wordt geborgd (en aangetoond) dat aan deze eisen wordt voldaan. Als basis voor de analyses is in 2011 onder andere gebruik gemaakt de Veiligheidsrichtlijnen deel C (VRC) van het Steunpunt Tunnelveiligheid. Inmiddels is de VRC volledig opgenomen in de LTS en is de VRC vervallen voor tunnels waarop de Wet aanvullende regels veiligheid wegtunnels (Warvw) en de LTS van toepassing zijn. Bovendien zijn de eisen die zijn afgeleid in versie 1.1 van het rapport dit document volledig verwerkt in de LTS (in 2011).

In 2015 is de onderhavige versie (1.2) van het rapport opgesteld omdat de eisen die ten aanzien van de VKF's die in 2011 zijn afgeleid onvolledig bleken te zijn (of niet geheel passend) voor tunnels met een vluchtconcept anders dan een middentunnelkanaal met kopdeuren. Dit is aan het licht gekomen bij een aantal projecten, zoals de aanleg van de Salland-Twentetunnel en de renovatie van de Velsertunnel. De LTS moet op dit punt dus worden aangepast c.q. uitgebreid. De onderhavige versie 1.2 van dit rapport moet derhalve worden gezien als de onderbouwing van de wijzigingen die in de LTS moeten worden aangebracht. Tot het moment dat de LTS is aangepast kunnen projecten, waarbij wordt gekozen voor een "niet-preferabel" vluchtconcept, gebruik maken van de onderhavige versie 1.2 van dit rapport als "richtinggevend" en de afwijkingen van de vigerende versie van de LTS op basis hiervan voorleggen aan de LTR, door middel van het formele issue-proces. Overigens moet er uiteraard sprake zijn van gegronde redenen om af te wijken van het preferabele vluchtconcept.

Op het moment dat de onderhavige versie 1.2 van het rapport in de LTS is verwerkt, geldt dat de inhoud van dit rapport ook voor tunnels met een niet-preferabel vluchtconcept alleen informatief is met betrekking tot de achtergrond van de gemaakte keuzes ([achtergronddocument](#)). Voor de toe te passen eisen is de LTS dan te allen tijde maatgevend.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In Rijkstunnels worden diverse veiligheidsmaatregelen getroffen om aan de wettelijke eisen en de veiligheidsrichtlijnen van Rijkswaterstaat te voldoen. Dit betreffen zowel technische als organisatorische maatregelen.

Binnen de verzameling technische maatregelen vragen de geautomatiseerde veiligheidssystemen nadere aandacht in het kader van functionele veiligheid. Functionele veiligheid betreft het deel van de tunnelveiligheidsmaatregelen, dat afhankelijk is van het correct functioneren van een of meer technische, software intensieve systemen, die automatisch bepaalde preventieve of mitigerende maatregelen nemen, op basis van een (potentieel) gevaarlijke situatie die wordt gedetecteerd.

Bij deze systemen is het van belang dat er sprake is van "veilige software". Dit is software die:

- Doet wat gedaan moet worden om het veiligheidssysteem correct te laten functioneren (zodat de gewenste prestaties worden geleverd);
- Dat doet met de vereiste betrouwbaarheid;
- Fail safe gedrag vertoont indien de energievoorziening of de besturing uitvalt.

Probleem daarbij is onder andere, dat het borgen en kwantificeren van de betrouwbaarheid van software lastig is. Het is daardoor eveneens lastig om vast te stellen of de functionele veiligheid voldoende is geborgd.

De internationale norm om de functionele veiligheid (waaronder de betrouwbaarheid) van geautomatiseerde systemen te borgen is de IEC 61508: "Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-related Systems".

Rijkswaterstaat heeft daarnaast het instrument TOPAAS¹ laten ontwikkelen en valideren, waarmee de betrouwbaarheid van software kan worden gekwantificeerd. Dit instrument wordt onder andere gebruikt om de betrouwbaarheid van de besturingssystemen van de beweegbare waterkeringen vast te stellen, te kunnen aantonen dat de keringen voldoen aan de wettelijke vastgestelde faalkanseisen.

Beide methoden (IEC-61508 als TOPAAS) hebben een andere scope en invalshoek, maar vertonen ook raakvlakken. De IEC-norm stelt eisen en randvoorwaarden aan de totstandkoming en de instandhouding van de software-intensieve systemen, om op die wijze de functionele veiligheid (waaronder de betrouwbaarheid) te borgen. Indien aantoonbaar aan bepaalde eisen en randvoorwaarden is voldaan, dan kan het bijbehorende niveau van functionele veiligheid ("Safety Integrity Level, SIL-niveau) worden "geclaimd". De betrouwbaarheid wordt hierbij dus niet rechtstreeks aangetoond, maar aannemelijk gemaakt door het gevolgde proces en de genomen ontwerpmaatregelen.

¹ TOPAAS = Task Oriented Probability of Abnormalities Analysis for Software.

Bij TOPAAS ligt echter de nadruk op het kwantificeren van de betrouwbaarheid van het resultaat, dus de software zelf, zodat door middel van een foutenboomanalyse kan worden aangetoond dat aan de betrouwbaarheidseisen wordt voldaan. Het kwantificeren van de softwarebetrouwbaarheid gebeurt met TOPAAS op basis van kenmerken van zowel het product als het gevolgde proces. Overeenkomst is dus dat zowel de IEC-norm als TOPAAS belang hechten aan een gestructureerd totstandkomingsproces. Dit betekent dat het totstandkomingsproces van de software "aan de voorkant" zodanig kan worden ingericht, dat dit leidt tot een resultaat dat qua betrouwbaarheid hoog scoort in TOPAAS. Zo leidt bijvoorbeeld ook de toepassing van de IEC-61508 tot hoge scores. Beide methoden kunnen dus los van elkaar, maar ook complementair aan elkaar worden toegepast.

Bij veel tunnelprojecten bij Rijkswaterstaat is men tegen de vraag aangelopen hoe moet worden omgegaan met functionele veiligheid, hoe de norm IEC-61508 en/of TOPAAS moeten worden toegepast in samenhang met de wettelijke eisen, en, meer specifiek, aan welke geautomatiseerde veiligheidssystemen hoge betrouwbaarheidseisen moeten worden gesteld omdat ze een grote rol spelen in het reduceren van de risico's voor de weggebruikers: de "veiligheidskritische functies".

Omdat het in het kader van uniformiteit en efficiency ongewenst is dat er per tunnelproject een eigen invulling wordt gegeven aan deze problematiek, is er in 2011 in opdracht van de Landelijk Tunnelregisseur van Rijkswaterstaat een werkgroep gevormd, die de veiligheidskritische functies nader heeft gedefinieerd.

In deze werkgroep hadden vertegenwoordigers zitting van het Steunpunt Tunnelveiligheid (STV), Bureau Veiligheidsbeambte (BVB) en de Landelijk Tunnelregisseur (LTR):

- Ronald Gram (LTR, voorzitter);
- Jan van Wijgerden (LTR);
- Jelle Hoeksma (BVB);
- Wim Janssen (BVB);
- Tineke Wiersma (STV);
- Josephine L'Ortye (STV);
- Ronald Mante (STV).

Dit rapport is een weergave van de aanpak, bevindingen, conclusies en aanbevelingen van de werkgroep. Het betreft echter geen statisch document, omdat het na de initiële vrijgave in 2011 op peil wordt gehouden op basis van praktijkervaringen en nieuwe inzichten. Zo is versie 1.2 van het rapport opgesteld om de eisen ten aanzien van tunnels met vluchtconcepten anders dan een middentunnelkanaal met kopdeuren nader in te vullen.

1.2 Doel

Dit rapport heeft tot doel om te definiëren wat de veiligheidskritische functies in een Rijkstunnel zijn, en welke prestatie- en betrouwbaarheidseisen bij deze functies horen.

Als zodanig dient het rapport als een achtergronddocument c.q. een basis voor de eisen die in de Landelijke Tunnelstandaard (LTS) van RWS worden gesteld ten aanzien van de veiligheidskritische functies.

1.3 Opbouw rapport

Na deze inleiding is het rapport als volgt opgebouwd. **Hoofdstuk 2** geeft allereerst een nadere beschrijving van zowel de IEC-61508 als TOPAAS. Vervolgens beschrijft **hoofdstuk 3** de gevolgde aanpak van de werkgroep om te komen tot een vaststelling van de veiligheidskritische functies met de bijbehorende betrouwbaarheidseisen. De resultaten van deze aanpak komen in **hoofdstuk 4** aan bod. In **hoofdstuk 5** worden vervolgens de veiligheidskritische functies nader beschreven. In **hoofdstuk 6** worden tenslotte nog enkele conclusies en aanbevelingen gegeven.

2 Nadere beschrijving IEC-61508 en TOPAAS

2.1 IEC-61508

De norm IEC-61508 [1] gaat uit van een life-cycle benadering, waarbij eisen worden gesteld aan de (beheers)maatregelen die moeten worden genomen bij het ontwerp, de realisatie en de instandhouding (beheer en onderhoud) van de geautomatiseerde veiligheidssystemen. De omvang, aard en diepgang van deze maatregelen is afhankelijk van de prestatie-eisen die aan het veiligheidssysteem worden gesteld. Deze prestatie-eisen zijn op hun beurt afhankelijk van de aard en omvang van de veiligheidsrisico's die met het systeem moeten worden beheerst. Anders geformuleerd: hoe groter de bijdrage van het systeem aan de reductie van de veiligheidsrisico's van (in dit geval) de weggebruikers in de tunnel, hoe hoger de prestatie-eisen die aan het systeem worden gesteld. De maat die de IEC-norm definieert voor het vereiste prestatieniveau is het zogenaamde SIL-niveau: Safety Integrity Level. De norm onderscheidt 4 SIL-niveaus, waarbij SIL 1 de laagste en SIL 4 de hoogste eisen stelt. Het SIL-niveau van een veiligheidssysteem moet worden vastgesteld op basis van een risicoanalyse. Als het SIL-niveau is vastgesteld, dan is op basis van de IEC-norm duidelijk welke (beheers)maatregelen gedurende de levenscyclus van het systeem moeten worden genomen om de vereiste prestaties (blijvend) te borgen.

Het stappenplan (life cycle phases) voor functionele veiligheid volgens de IEC-61508 is afgebeeld in de figuur 2.1.1 op de volgende pagina.

De stappen zijn onder te verdelen in 3 hoofdfasen:

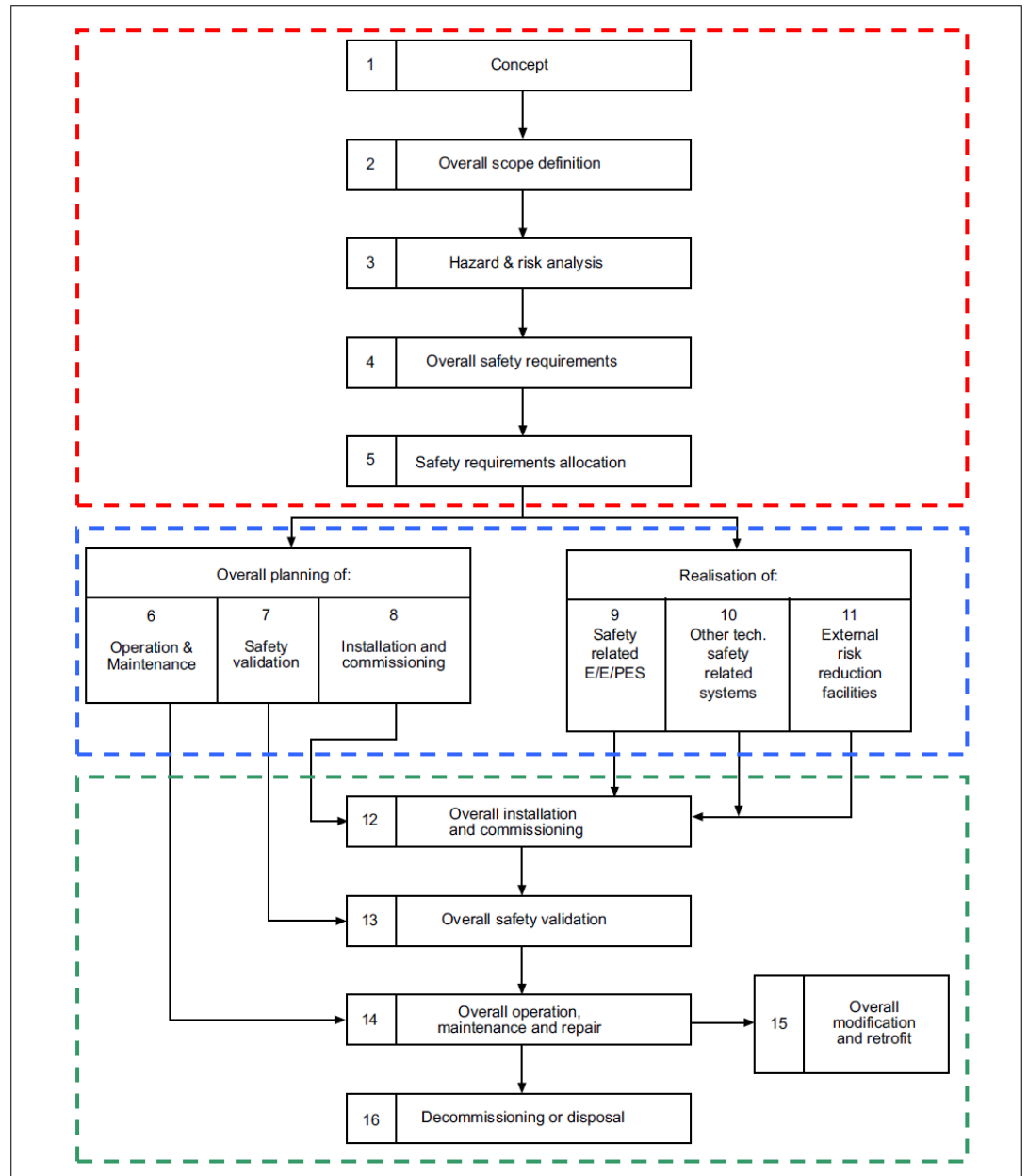
- Analyse (stap 1 t/m 5)
- Realisatie (stap 6 t/m 11)
- Gebruik (stap 12 t/m 16)

Dit rapport heeft in feite betrekking op de fase Analyse (stap 1 t/m 5).

Stap 1 en 2 hebben betrekking op het definiëren en afbakenen van het systeem en het proces waarvan de veiligheid moet worden geborgd. Het systeem is in dit geval een tunnel. Het proces is een veilige doorstroming van het verkeer door de tunnel: het voorkomen van ongevallen en (indien er onverhoopt toch ongevallen optreden) het beperken van letselschade.

Stap 3 t/m 5 hebben betrekking op het analyseren van de veiligheidsrisico's die moeten worden beheerst en het bepalen en vastleggen van de eisen waaraan moet worden voldaan om dit te bereiken:

- Identificeren en inschatten potentiële gevaren en risico's;
- Toetsen of de risico's voldoen aan de geldende normen;
- Nagaan of voldoende veiligheidsmaatregelen zijn genomen op de verschillende beschermingsniveaus (Layers of Protection);
- Bepalen welke geautomatiseerde veiligheidssystemen nodig zijn om te borgen dat er aan de veiligheidsnormen wordt voldaan;
- Bepalen SIL-niveau van de geautomatiseerde veiligheidssystemen en de verdere eisen die aan de systemen worden gesteld;
- Documenteren van de resultaten.



Figuur 2.1.1: Stappenplan functionele veiligheid conform IEC-61508 (Bron: IEC-61508)

N.B.:

De overige stappen (6 t/m 16) maken zoals gezegd geen deel uit van deze rapportage, maar zouden moeten worden doorlopen bij het verdere ontwerp, de realisatie en het beheer en onderhoud van de geautomatiseerde veiligheidssystemen, op basis van de (beheers)maatregelen die volgens de IEC-61508 moeten worden toegepast bij het gekozen SIL-niveau.

2.2

TOPAAS

TOPAAS [2] is in opdracht van Rijkswaterstaat ontwikkeld en gevalideerd door een consortium van Det Norske Veritas, Movares, Technische Universiteit Eindhoven, Logica, Refis en Intermedion. Het betreft een methode die zowel richtlijnen geeft voor het modelleren van software-falen in foutenbomen als het schatten van de faalkans van een taakuitvoering door een softwaremodule. Op basis van TOPAAS is het derhalve mogelijk om de faalkans van software te kwantificeren, zodat de betrouwbaarheid van een systeem als geheel (hardware + software) kan worden aangetoond door middel van een foutenboomanalyse. Wereldwijd is momenteel geen beter instrument beschikbaar om de betrouwbaarheid van software te kwantificeren. De methode en de toepassing daarvan zijn beschreven in [2] respectievelijk [3].

Kern van TOPAAS is dat software in modules kan worden opgedeeld en dat het (mogelijk) falen van deze modules in een foutenboom als basisgebeurtenissen kunnen worden opgenomen². Falen van een software-module kan vervolgens opgedeeld worden in falen ten gevolge van de onverwachtetheit van invoer en het falen van de beslislogica van de software-module zelf.

Falen ten gevolge van de onverwachtetheit van invoer heeft te maken met het gebruik van de softwaremodule buiten de ontwerptoleranties, wat per definitie ongedefinieerde taakuitvoering van de softwaremodule tot gevolg heeft. Er is hierbij dus sprake van een mismatch tussen de invoer waar de softwaremodule voor is ontworpen en de werkelijke invoer die de omgeving genereert. Dit speelt in de regel alleen bij softwaremodules met een externe interface. Bij systemen met louter interfaces binnen het systeem zou onvoorziene invoer alleen het gevolg kunnen zijn van falen van een voorliggende component in de keten, waardoor deze component ongespecificeerde output/gedrag gaat vertonen, waardoor dus eigenlijk het falen op het conto van de voorliggende component moet worden gerekend.

De bepaling van een faalkans van de beslislogica van een softwaremodule gebeurt in TOPAAS op basis van expert opinion, waarbij het Bayesiaanse gedachtegoed wordt gevolgd. Deze expert opinion is vervat in een parametermodel, waarbij de factoren die in ogenschouw worden genomen voortkomen uit een expertgroep en internationaal onderzoek. De invloed van de factoren is ingeschat door experts en vervolgens gekalibreerd met een twintigtal referentieprojecten. Daarbij is vastgesteld dat de uitkomsten van het parametermodel een zeer sterke correlatie vertonen met de inschatting van de experts.

De parameters, op basis waarvan de faalkans van de softwaremodule wordt bepaald, zijn:

- Totstandkomingsproces
- Producteigenschappen
- Requirements traceability/verifieerbaarheid
- Testen
- Executieomgeving/gebruik

² Naast softwarematig falen dient in een foutenboomanalyse uiteraard ook rekening te worden gehouden met menselijk falen en hardwarematig falen.

De faalkans van de (beslislogica van de) softwaremodule bedraagt 10^x , waarbij de waarde van "x" afhankelijk is van de scores op bovengenoemde parameters.

Normaal gesproken is de resulterende waarde van "x" een negatief (rationeel) getal. De maximale faalkans van een module bedraagt uiteraard 1.

De bepaling van de faalkans van de softwaremodule gebeurt bij voorkeur door een onafhankelijk ICT-deskundige, in overleg met de softwarebouwer, in de vorm van een audit, waarbij de scores zoveel mogelijk worden onderbouwd met feitenmateriaal.

Om TOPAAS te kunnen toepassen, moeten er uiteraard eerst faalkanseisen worden vastgesteld voor de software, of beter gezegd, voor het systeem c.q. de veiligheidsfunctie waar de software deel van uit maakt. Deze eisen moeten worden uitgedrukt in concrete getallen, en niet zoals bij de IEC-61508 in een SIL-niveau. Omdat TOPAAS echter geen methode geeft voor het afleiden van deze faalkanseisen, zal in dit rapport gebruik worden gemaakt van een stappenplan in de geest van de IEC-61508, waarbij voor de afgeleide SIL-niveaus ook een corresponderende faalkans zal worden vastgesteld, zodat TOPAAS desgewenst kan worden toegepast bij de vervolgstappen.

3 Aanpak

3.1 Inleiding

De aanpak voor het vaststellen van de veiligheidskritische functies en de bijbehorende eisen (vergelijkbaar met de analysefase conform IEC-61508) is op een pragmatische wijze ingevuld, vanwege het feit dat er in het verleden op basis van een ruime ervaring reeds is vastgesteld welke gevaren in een tunnel kunnen optreden, welke risico's daaraan gekoppeld zijn, welke veiligheidsmaatregelen moeten worden genomen om deze risico's te beheersen en op welke punten geautomatiseerde veiligheidssystemen nodig zijn of toegevoegde waarde hebben om aan de veiligheidsnormen te voldoen. De voor dit doel relevante kennis en ervaring is met name vastgelegd in:

- De Veiligheidsrichtlijnen deel C (VRC) [4], waarin de veiligheidsvoorzieningen zijn vastgelegd die in nieuw te bouwen Rijkstunnels moeten worden aangebracht. Bestaande tunnels moeten zoveel mogelijk aan de VRC worden aangepast, voor zover dit technisch mogelijk en zinvol (kosteneffectief) is.
- Het rekenprogramma QRA-tunnels [5], [6], waarmee door middel van een kwantitatieve risicoanalyse moet worden getoetst of aan de wettelijke veiligheidsnorm voor het groepsrisico wordt voldaan, met de geplande veiligheidsvoorzieningen. QRA-tunnels rekent op basis van een zeer uitgebreide gebeurtenissenboom, waarin de diverse ongevalsscenario's die in een tunnel kunnen optreden zijn verwerkt. Deze gebeurtenissenboom is mede gebaseerd op diverse gevarenanalyses die in het verleden zijn uitgevoerd. QRA-tunnels biedt tevens de mogelijkheid om de vereiste betrouwbaarheid van de diverse veiligheidsmaatregelen af te leiden vanuit de veiligheidsnormen waaraan moet worden voldaan. Deze mogelijkheid is benut om het benodigde SIL-niveau van de geautomatiseerde veiligheidssystemen vast te stellen (zie hierna).

Concreet is de Analysefase als volgt ingevuld.

Als eerste stap is nagegaan welke geautomatiseerde veiligheidssystemen (in de zin van IEC 61508) volgens de VRC in een tunnel moeten worden aangebracht. Hierbij is als hulpmiddel gebruik gemaakt van het "Layers of Protection" model (zie paragraaf 3.2).

Daarna is ter controle een globale gevarenanalyse uitgevoerd, om na te gaan of er sprake is van nadere aandachtspunten die niet (expliciet) in de VRC of QRA-tunnels zijn meegenomen. Ook hierbij is gebruik gemaakt van het Layers of Protection model³.

Vervolgens is het belang van de verschillende veiligheidsmaatregelen, waaronder de geautomatiseerde veiligheidssystemen, gekwantificeerd door vaststelling van de Risk Reduction Factor (RRF) van de betreffende maatregel. De RRF is een factor die wordt gedefinieerd in de IEC-61511 [7], een aan de IEC-61508 gerelateerde norm.

³ Een globale aanvullende analyse volstond hier, omdat er zoals gezegd al uitgebreide gevarenanalyses hebben plaatsgevonden in het kader van de ontwikkeling van QRA-tunnels. De globale aanvullende analyse diende daarom vooral om inzicht te krijgen in hoe de verschillende veiligheidsmaatregelen in Rijkstunnels verdeeld zijn over de verschillende beschermingslagen c.q. protection layers. Dit om na te gaan in welke mate de verschillende beschermingslagen bijdragen aan het beheersen van de gevaren.

Kort gezegd drukt de RRF uit in welke mate een bepaalde maatregel bijdraagt aan de reductie van het veiligheidsrisico. Aangezien er een relatie bestaat tussen de RRF en het SIL-niveau, kan het vereiste SIL-niveau worden vastgesteld op basis van een berekening van de RRF. Voor de berekening van de RRF's van de verschillende veiligheidsmaatregelen is gebruik gemaakt van QRA-tunnels (zie paragraaf 3.3).

Op basis van de berekening van de RRF's is bepaald of een geautomatiseerd veiligheidssysteem "veiligheidskritisch" is (SIL 1 of hoger) of dat de vereiste betrouwbaarheid lager is, zodat de in de IEC-61508 voorgeschreven beheersmaatregelen niet hoeven te worden toegepast ("SIL 0"). In het laatste geval zijn uiteraard nog wel de eisen van "good engineering practice" van toepassing.

Tenslotte zijn de nadere eisen aan de veiligheidskritische functies gedefinieerd en vastgelegd in deze rapportage (zie hoofdstuk 5).

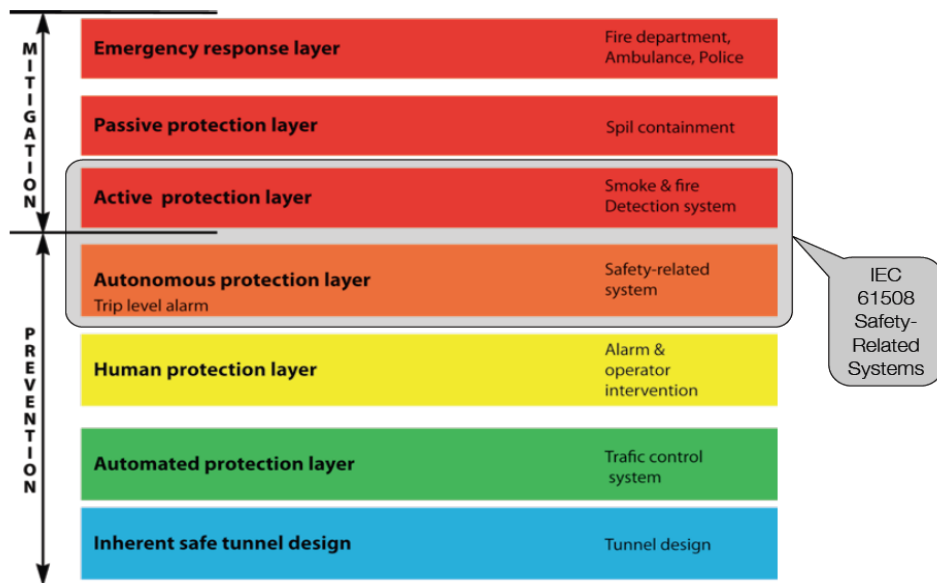
Deze aanpak is niet volledig conform het stappenplan van de IEC-61508, maar sluit daarentegen wel aan bij de wettelijk voorgeschreven QRA en de gebruikelijke veiligheidseisen voor tunnels. Dit heeft als groot voordeel dat een brug wordt geslagen tussen de wet- en regelgeving en de (internationale) normen en richtlijnen op het gebied van functionele veiligheid.

3.2 Layers of Protection

De veiligheidsmaatregelen in een tunnel (of een ander systeem) kunnen worden ingedeeld naar de "beschermingslaag" waarin ze functioneren. De beschermingslagen bieden bescherming tegen de gevolgen van een eventueel ongeval. Het zijn in feite achter elkaar geplaatste "vangnetten", waarbij iedere laag een deel van de optredende risico's beheerst c.q. reduceert. In het ideale geval zouden de beschermingslagen een volledige bescherming moeten bieden tegen alle risico's. Dit is in de praktijk uiteraard onmogelijk. De van toepassing zijnde beschermingslagen zijn, in volgorde van "ingrijpen" (zie ook figuur 3.2.1 op volgende pagina):

1. Inherent veilig ontwerp: bijvoorbeeld veilig wegontwerp, 1 rijrichting per tunnelbuis, verbod gevaarlijke stoffen, enz.;
2. Automatische beschermingslaag: bijvoorbeeld het MTM-systeem, waarmee snelheidsverschillen worden genivelleerd, waardoor de kans op kop-staartbotsingen afneemt;
3. Menselijke beschermingslaag: dit is de wegverkeersleider, die door allerlei acties het verkeersmanagement en het incidentmanagement ondersteunt, bijvoorbeeld door het indrukken van de calamiteitenknop;
4. Autonome beschermingslaag: dit zijn de systemen die automatisch ingrijpen om een ongeval of gevaar te voorkomen; als voorbeeld zou kunnen worden gedacht aan het automatisch stoppen van het verkeer voor de ingang van de tunnel op basis van een hoogtedetectie;
5. Actieve beschermingslaag: dit zijn de systemen die automatisch ingrijpen om de gevolgen van een ongeval of gevaar te beperken, bijvoorbeeld het automatisch afsluiten van de tunnel, het automatisch opstarten van de ventilatie, enz.;
6. Passieve beschermingslaag: dit is bijvoorbeeld het rioleringsstelsel, waarmee gevaarlijke vloeistoffen, die bij een ongeval vrijkomen, worden afgevoerd;
7. Hulpverleningslaag: dit is de repressie door de hulpverleningsdiensten (brandweer, GHOR, politie e.d.).

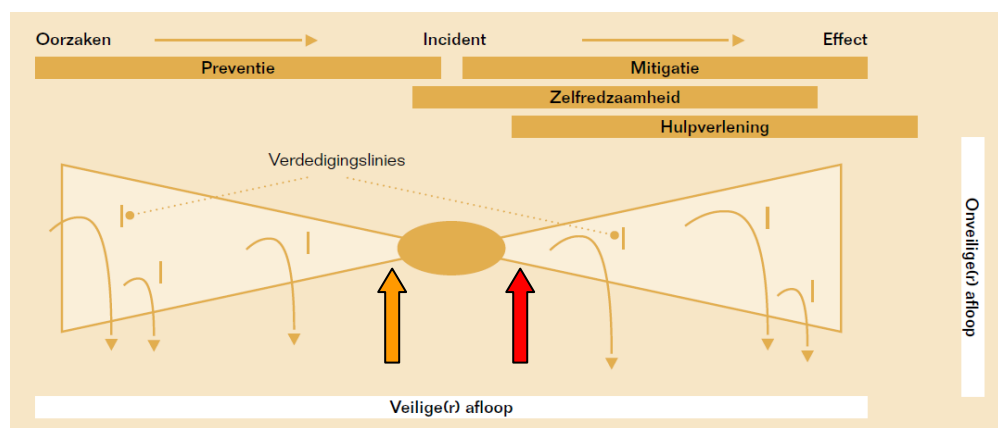
Layers of protection philosophy



Figuur 3.2.1: Beschermingslagen (Bron: Risknowlogy)

De eerste beschermingslaag (inherent veilig ontwerp) vormt dus het eerste “vangnet” tegen de gevolgen van een ongeval (bijvoorbeeld door de kans op een ongeval te verlagen). De zevende beschermingslaag (hulpverlening) is de laag die als laatste optreedt, meestal geruime tijd na het optreden van het ongeval. De effectiviteit van deze laag is dus beperkt, aangezien de eerste minuten na het ongeval cruciaal zijn bij het voorkomen van slachtoffers. Dit illustreert het belang van de effectiviteit van de onderliggende (eerdere) beschermingslagen.

Zoals uit het voorgaande blijkt, bevinden de geautomatiseerde veiligheidssystemen (functionele veiligheidssystemen) zoals bedoeld door IEC-61508 zich dus in de autonome beschermingslaag en de actieve beschermingslaag. In termen van het vlinderdasmodel bevinden deze systemen zich dus net links van de knoop (het incident) en net rechts van de knoop, zie figuur 3.2.2.



Figuur 3.2.2: Vlinderdasmodel

Het geschetste Protection Layer model is gebruikt als hulpmiddel om vast te stellen welke veiligheidsmaatregelen uit de VRC behoren tot de geautomatiseerde veiligheidssystemen en dus een bijdrage leveren aan de functionele veiligheid.

Het model is eveneens gebruikt bij de in paragraaf 3.1 genoemde aanvullende gevarenanalyse, om na te gaan in welke mate de verschillende beschermingslagen bijdragen aan het beheersen van de gevaren.

3.3 Berekening Risk Reduction Factoren met QRA-tunnels

Het rekenprogramma QRA-tunnels biedt de mogelijkheid om te selecteren welke veiligheidsmaatregelen aanwezig zijn in een tunnel, en dus om de risico's voor de weggebruikers te berekenen met of zonder een bepaalde maatregel.

De Risk Reduction Factor (RRF) van een bepaalde maatregel kan dus worden bepaald door eerst de risico's te berekenen voor de situatie dat alle veiligheidsmaatregelen in de tunnel aanwezig zijn, en vervolgens te bekijken in welke mate deze risico's toenemen indien de beschouwde maatregel niet aanwezig is.

In formule:

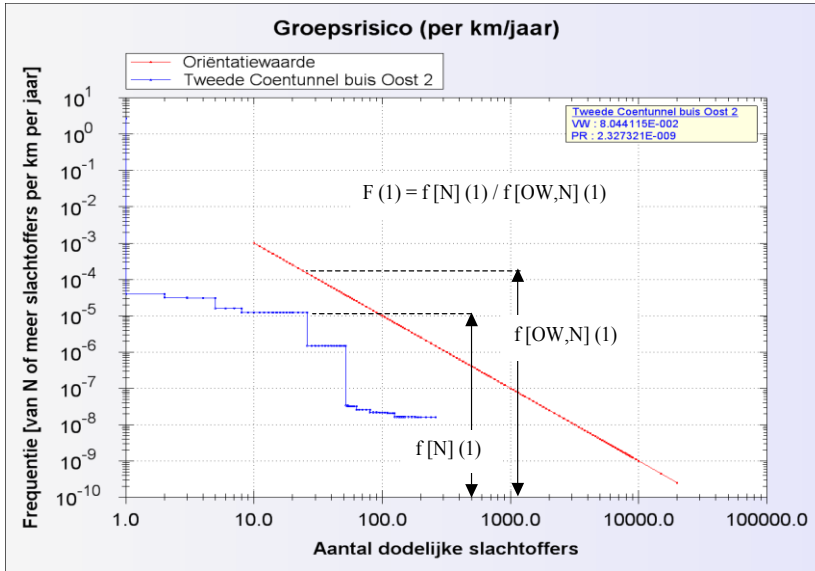
$$\text{RRF maatregel "x"} = \frac{\text{Risico zonder maatregel "x" (maar met overige maatregelen)}}{\text{Risico alle maatregelen aanwezig (incl. maatregel "x")}}$$

De RRF zou in principe kunnen worden berekend op basis van het persoonlijk risico of op basis van het groepsrisico. Het groepsrisico is hiervoor echter veel geschikter, omdat de specifieke tunnelrisico's (de extra risico's van een tunnel ten opzichte van de open weg) beter tot uitdrukking komen in het groepsrisico, terwijl de waarde van het persoonlijk risico vooral wordt gedomineerd door de "normale" verkeersongevallen, die ook op de open weg plaatsvinden. Dit betekent dat het effect van een veiligheidsmaatregel, die bedoeld is om de specifieke tunnelrisico's te beheersen, ook beter zichtbaar is in het groepsrisico dan in het persoonlijk risico. Er is derhalve gekozen voor het groepsrisico als basis voor de berekening van de RRF's.

Om de groepsrisico's met en zonder maatregel onderling te kunnen vergelijken, is er voor gekozen de verhouding van de fN-curve ten opzichte van de norm (0,1/N² per kilometer tunnelbuis per jaar) te beschouwen. Deze methode wordt ook vaak gehanteerd in het domein van de externe veiligheid, bijvoorbeeld bij het karakteriseren of vergelijken van de groepsrisico's van transportroutes.

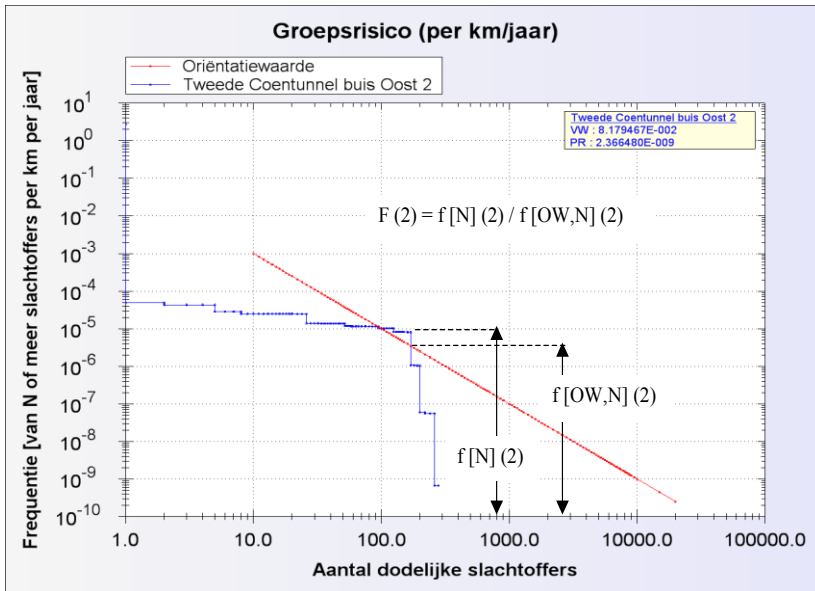
Het groepsrisico is beschouwd per tunnelbuis. Voor de verhouding tussen de fN-curve en de norm is altijd het punt van de fN-curve genomen dat de normwaarde het dichtste benadert of het meeste overstijgt. In figuur 3.3.1 op de volgende pagina is dit geïllustreerd, met als voorbeeld de fN-curve van de buis Oost 2 van de Tweede Coentunnel.

Grafiek alle maatregelen



RRF vluchtdeuren = F (2) / F (1)

Grafiek zonder vluchtdeuren



Figuur 3.3.1: Bepaling Risk Reduction Factor (RRF) van een veiligheidsvoorziening, geïllustreerd met vluchtdeuren als voorbeeld

De bovenste fN-curve geldt voor de situatie dat alle veiligheidsmaatregelen aanwezig zijn, conform de VRC. De onderste fN-curve geldt voor de situatie dat de tunnelbuis geen vluchtdeuren heeft, maar dat verder alle overige veiligheidsmaatregelen wel aanwezig zijn.

Merk op dat een toename van het groepsrisico ten opzichte van de norm, zoals hierboven beschreven, in de regel niet overeenkomt met een zelfde toename van het groepsrisico over de hele lijn. De vergelijking van de maatgevende punten ten opzichte van de normlijn leidt rekenkundig eerder tot een hoge RRF dan een vergelijking van de groepsrisico's als geheel. Aangezien een hogere RRF leidt tot hogere betrouwbaarheidseisen, is de gekozen benadering derhalve conservatief.

Op basis van de aldus met QRA-tunnels berekende RRF's zijn vervolgens de SIL-niveaus van de veiligheidsmaatregelen vastgesteld via de volgende door de IEC-61511 gedefinieerde relatie [7]:

Tabel 3.3.1: Relatie tussen Risk Reduction Factor (RRF), SIL en faalkans per aanvraag (PFD)		
SIL	PFD (faalkans per aanvraag)	RRF
1	0,1 - 0,01	10 - 100
2	0,01 - 0,001	100 - 1.000
3	0,001 - 0,0001	1.000 - 10.000
4	0,0001 - 0,00001	10.000 - 100.000

4 Resultaten

4.1 Geautomatiseerde veiligheidssystemen conform de VRC

Volgens de VRC [4] moeten de volgende geautomatiseerde veiligheidssystemen in Rijkstunnels worden aangebracht:

1. Automatische regeling verlichting ingangzone, op basis van de hoeveelheid daglicht (zie bijlage hoofdstuk 5 VRC).
2. Automatisch afsluiten tunnel bij uitval netvoeding + falen noodstroomvoorziening (zie bijlage hoofdstuk 9 VRC).

N.B.: de actie dat de tunnel in dit geval automatisch wordt afgesloten is niet overgenomen in de LTS.

3. Automatisch afsluiten tunnel bij uitval bediening (zie bijlage hoofdstuk 9 VRC).
4. Automatisch afkruisen rijstrook + instellen snelheidsverlaging op naastliggende rijstroken op basis van (zie bijlage hoofdstuk 9 VRC):
 - o Detectie gebruik noodtelefoon in hulppostkast, of:
 - o Detectie openen hulppostkast in combinatie met detectie gebruik noodtelefoon, of:
 - o SOS-detectie in combinatie met detectie openen hulppostkast, of:
 - o SOS-detectie in combinatie met detectie openen hulppostkast en detectie gebruik noodtelefoon, of:
 - o SOS-detectie in combinatie met zichtmeting, of:
 - o SOS-detectie in combinatie met branddetectie (temperatuurmetering).

N.B.: het automatisch afkruisen van rijstroken op basis van SOS-detectie vergt aanpassing van het gecertificeerde MTM-systeem. Mede hierom voorziet de LTS niet in deze functie. Bij de nadere eisen aan de veiligheidskritische functies (zie hoofdstuk 5) wordt derhalve geen rekening gehouden met deze voorziening.

5. Automatisch inschakelen op calamiteitenstand van de tunnelventilatie in de incidentbuis (stand-by fase na detectie) + alarmsignaal naar tunneloperator (conform hoofdstuk 14 VRC), op basis van (zie bijlage hoofdstuk 9 VRC):
 - o Zichtmeting, of:
 - o Branddetectie/temperatuurmetering (indien aanwezig), of:
 - o Detectie openen hulppost + detectie uitnemen slanghaspel (uit dezelfde hulppostkast), of:
 - o Detectie openen hulppost + detectie uitnemen draagbaar brandblusapparaat (uit dezelfde hulppostkast).

N.B.: in de LTS wordt (in afwijking van de VRC) uitgegaan van ventilatie op 50% van de calamiteitenstand in de stand-by fase na detectie (calamiteitenstand = 100% van het functioneel benodigde vermogen) om het energieverbruik bij "valse meldingen" te beperken. De ventilatie wordt pas op volledige calamiteitenstand geschakeld bij de overgang van stand-by fase na detectie naar calamiteitenbedrijf. Bij de nadere eisen aan de veiligheidskritische functies (zie hoofdstuk 5) wordt hier derhalve ook van uit gegaan.

Omdat de calamiteitenstand is uitgelegd op het beheersen van grote branden, en deze branden enige tijd nodig hebben om zich tot hun maximale vermogen te ontwikkelen, is deze gefaseerde schakeling van de ventilatie geen bezwaar. Uitzondering wordt gevormd door de plasbranden. Deze zullen zich wel zeer snel ontwikkelen. Er mag echter worden aangenomen dat deze branden relatief snel worden opgemerkt door de operator, door het alarmsignaal dat wordt afgegeven als de incidentbuis naar stand-by fase na detectie gaat.

6. Automatisch in gereedheid brengen van de veilige vluchtroute:
 - a. Zo nodig vergrendelde vluchtdeuren ontgrendelen;
 - b. Zo nodig deuren in de vluchtroute die toegang geven tot ruimten anders dan de vluchtroute vergrendelen;
 - c. Mechanische overdrukventilatie in veilige ruimte (midentunnelkanaal of dwarsverbindingen) starten;
 - d. Vluchtrouteverlichting (lees: verlichting veilige ruimte) op het juiste niveau zetten.

N.B.: volgens de LTS worden (in aanvulling op de VRC) bij tunnels met een midentunnelkanaal (MTK) ook nog de bordjes met de dynamische aanduiding van de vluchtrichting in het MTK ingeschakeld (waarbij de juiste vluchtrichting wordt aangegeven). Bij de nadere eisen aan de veiligheidskritische functies (zie hoofdstuk 5) wordt hier derhalve ook van uit gegaan.

Het automatisch in gereedheid brengen van de veilige vluchtroute gebeurt als de incidentbuis in stand-by fase na detectie gaat, dus op basis van de volgende detecties (zie bijlage hoofdstuk 9 VRC):

- o Zichtmeting, of:
 - o Branddetectie/temperatuurmetering (indien aanwezig), of:
 - o Detectie openen hulppost + detectie uitnemen slanghaspel (uit dezelfde hulppostkast), of:
 - o Detectie openen hulppost + detectie uitnemen draagbaar brandblusapparaat (uit dezelfde hulppostkast).
7. Automatisch inschakelen van de verlichting in de incidentbuis op optimaal niveau. Dit gebeurt indien de incidentbuis in stand-by fase na detectie gaat (zie bijlage hoofdstuk 9 VRC), dus op basis van dezelfde detecties als genoemd bij 6 (automatisch in gereedheid brengen van de veilige vluchtroute). "Optimaal niveau" wil zeggen dat het 100% lichtniveau van de centrale zone over de hele lengte van het gesloten deel van de tunnel wordt ingeschakeld. Eventueel al ingeschakelde extra verlichting in de ingangszone wordt daarbij niet uitgeschakeld.
 8. Automatisch afsluiten van de tunnelbuizen die nodig zijn voor de afhandeling van een calamiteit. Dit gebeurt als de tunnel in calamiteitenbedrijf gaat, dus op basis van de volgende detecties (zie bijlage hoofdstuk 9 VRC):
 - o SOS-detectie in combinatie met zichtmeting en combinatie van 2 of meer van de volgende detecties: openen hulppost, branddetectie/temperatuurmetering (indien aanwezig), slanghaspel uitnemen (uit de geopende hulppost), draagbaar brandblusapparaat uitnemen (uit de geopende hulppost).
 9. Automatisch in calamiteitenstand (ondersteunende ventilatiestand) schakelen van de ventilatie van de tunnelbuizen naast de incidentbuis. Dit gebeurt indien de tunnel in calamiteitenbedrijf gaat (zie bijlage hoofdstuk 9 VRC), dus op basis van

dezelfde detecties als genoemd bij 8 (automatisch afsluiten tunnelbuizen die nodig zijn voor afhandelen calamiteit).

10. Automatisch inschakelen van de pompen van de brandblusinstallatie en het onder druk brengen van het brandblussysteem. Dit gebeurt indien de tunnel in calamiteitenbedrijf gaat (zie bijlage hoofdstuk 9 VRC), dus op basis van dezelfde detecties als genoemd bij 8 (automatisch afsluiten tunnelbuizen die nodig zijn voor afhandelen calamiteit).
11. Automatisch stoppen van alle vuilwaterpompen en het in calamiteitenstand zetten van het inschakelregime. Dit gebeurt indien de tunnel in calamiteitenbedrijf gaat (zie bijlage hoofdstuk 9 VRC), dus op basis van dezelfde detecties als genoemd bij 8 (automatisch afsluiten tunnelbuizen die nodig zijn voor afhandelen calamiteit).
12. Automatisch activeren van de voorzieningen voor de hulpverleningsdiensten. Dit gebeurt indien de tunnel in calamiteitenbedrijf gaat (zie bijlage hoofdstuk 9 VRC), dus op basis van dezelfde detecties als genoemd bij 8 (automatisch afsluiten tunnelbuizen die nodig zijn voor afhandelen calamiteit).

N.B. (bij 5 t/m 12): de LTS voorziet niet in een branddetectie door middel van temperatuurmeting, omdat een dergelijke voorziening te weinig toegevoegde waarde heeft ten opzichte van de overige detectiemiddelen, zoals SOS-detectie met camerabeelden en zichtmeting. Bij de nadere eisen aan de veiligheidskritische functies (zie hoofdstuk 5) wordt derhalve ook niet uitgegaan van de aanwezigheid van een temperatuurmeting.

4.2 **Aanvullingen op basis van gevarenanalyse**

De resultaten van de gevarenanalyse zijn opgenomen in bijlage A. Het blijkt dat verreweg de meeste risico's (voor zover er in een tunnel sprake is van een verhoogd risico ten opzichte van de open weg) worden beheerst door een of meer beschermingslagen van het Protection Layer model (zie paragraaf 3.2). Het zwaartepunt van de bescherming ligt in een combinatie van een inherent veilig ontwerp en beheersmaatregelen die door de operator (wegverkeersleider) worden genomen. De geautomatiseerde veiligheidssystemen ondersteunen de operator in feite bij de belangrijke functies, door acties te nemen indien de operator om wat voor reden dan ook niet reageert. Met de berekening van de RRF's (zie paragraaf 4.3) wordt het belang van de verschillende functies nader onderbouwd.

Ten aanzien van de in te VRC genoemde geautomatiseerde veiligheidssystemen is uit de gevarenanalyse nog een aandachtspunt naar voren gekomen ten aanzien van het automatisch afsluiten van de tunnel, voor de afhandeling van een calamiteit. Dit moet op een beheerste wijze gebeuren, waarbij eerst een snelheidsverlaging moet worden ingesteld met het MTM-systeem. Vervolgens moet de VRI voor de tunnelbuizen op "rood" schakelen. Pas daarna mag de afsluitboom naar beneden gaan. Uiteraard is het van belang dat de tunnelbuizen bij een (sterk vermoeden van) brand worden afgesloten, om de toestroom van verkeer de incidentbuis in te stoppen, en de naastgelegen buis vrij te maken voor de hulpverlening.

Indien dit echter onbeheerst gebeurt, kunnen er (aanvullende) ongevallen plaatsvinden, doordat voertuigen tegen de afsluitboom rijden, en/of omdat achterop komende voertuigen botsen tegen een voertuig dat wel tijdig remt. Bij het automatisch afsluiten van de tunnelbuizen hoort dus nog een tweede functie, namelijk:

- Het voorkomen dat de tunnelbuizen onbeheerst worden afgesloten bij een automatische afsluiting. De functie valt uiteen in 2 subfuncties:
 - o Het voorkomen dat de afsluitboom naar beneden gaat, zonder dat eerst de VRI op "rood" is gegaan;
 - o Het voorkomen van de VRI op "rood" gaat, zonder dat eerst een snelheidsverlaging is ingesteld met het MTM-systeem.

Een functie die verder aanvullend op de VRC zou kunnen worden aangebracht om kopstaart botsingen, alsmede blootstelling aan rook en gassen en dampen bij brand e.d. te voorkomen, is:

- Het voorkomen dat de staart van een file (nagenoeg stilstaand verkeer) die benedenstrooms van de tunnel ontstaat de tunnel ingroeit (filevermijding).

Het risico van blootstelling aan rook, gassen en dampen bij een file in de tunnel heeft er mee te maken dat in geval van brand de (langs)ventilatie wordt ingeschakeld, waardoor de hitte en rook richting de voertuigen benedenstrooms van de brand wordt geblazen. De omstandigheden voor de aanwezigen aldaar om de vluchtdeuren veilig te bereiken kunnen daardoor snel slechter worden, hetgeen leidt tot een toename van het risico om te overlijden.

Een filevermijdingssysteem bestaat in de meest simpele vorm uit een filedetectie benedenstrooms van de tunnel, gevolgd door een ingreep van de operator (wegverkeersleider) waardoor ofwel de toestroom van verkeer de tunnel in wordt verminderd (bijvoorbeeld door snelheidsverlaging, het afkruisen van rijstroken, of het afsluiten van de tunnelbuis), ofwel de doorstroming voorbij de tunnel wordt verbeterd. De LTS voorziet in een dergelijk systeem, dat wil zeggen, de hiertoe benodigde voorzieningen in combinatie met de procedure om deze voorzieningen in onderlinge samenhang in te zetten:

- Filedetectie: SOS tot 600m voorbij de tunnelbuizen [8];
- Beperken toestroom verkeer: MTM, VRI en afsluitboom voor de tunnelbuizen [8];
- Procedure (procesbeschrijving) voor operator: N01 Sturen & geleiden van files bij tunnels [10].

Zie verder paragraaf 5.5 voor een nadere beschrijving van de omstandigheden waaronder een filevermijdingssysteem conform de LTS wordt toegepast en de eisen die daar dan aan worden gesteld.

Verder is, los van de geautomatiseerde veiligheidssystemen, nog een ander aanvullend aandachtspunt naar voren gekomen uit de gevarenanalyse:

- Het aanbrengen van een of meer veiligheidskabels aan de tunneltechnische installaties die aan het plafond van de tunnelbuis hangen, om te voorkomen dat deze op het wegdek vallen na bijvoorbeeld een aanrijding door een te hoog voertuig, of, in geval van de ventilatoren, lostrillen door dynamisch gebruik.

4.3 Risk Reduction Factoren van veiligheidsmaatregelen

De RRF van de verschillende veiligheidsmaatregelen is conform paragraaf 3.3 berekend voor een groot aantal tunnelsituaties, waarbij er is gevarieerd met de invoerparameters tunnallengte, filekans, aantal rijstroken per tunnelbuis, verkeersintensiteit en transportaantallen gevaarlijke stoffen. In bijlage B is een aantal voorbeelden opgenomen van deze berekeningen. Het blijkt dat de orde van grootte van RRF van een aantal veiligheidsmaatregelen (zoals bijvoorbeeld de tunnelventilatie) redelijk onafhankelijk is van de specifieke tunnelsituatie. Bij andere veiligheidsmaatregelen (zoals bijvoorbeeld de vluchtdeuren) is de orde van grootte van de RRF met name afhankelijk van de tunnallengte in combinatie met de kans op een file benedenstrooms van de tunnel. Andere variabelen, zoals bijvoorbeeld het aantal rijstroken per tunnelbuis, of het al dan niet toelaten van LPG-transporten, blijken veel minder van invloed te zijn op de RRF van de veiligheidsmaatregelen. Er is daarom voor gekozen om de toekomstige verkeerssituatie (2020) van de Tweede Coentunnel (buis Oost 2) als uitgangspunt te nemen voor de berekeningen, omdat deze situatie zich kenmerkt door een hoge verkeersintensiteit in combinatie met een relatief hoog aantal transporten van brandbare vloeistoffen. Vervolgens is bij deze verkeerssituatie gevarieerd met tunnallengte, aantal rijstroken per tunnelbuis en kans op een file benedenstrooms van de tunnel. Tenslotte zijn de aldus afgeleide RRF's voor de veiligheidsmaatregelen nog getoetst aan de situatie van een aantal andere maatgevende tunnels, zoals de A2 Leidsche Rijn tunnel en de Keizer Karel tunnel (A9)⁴. Daarbij is gebleken dat de uitkomsten in lijn waren met elkaar.

De berekening van het vereiste betrouwbaarheidsniveau van het "voorkomen dat de tunnelbuizen onbeheerst worden afgesloten" (zie paragraaf 4.2) is overigens niet berekend met behulp van QRA-tunnels, omdat een ongeval met de afsluitboom buiten de tunnel plaatsvindt, op de open weg. QRA-tunnels is niet geschikt om de hiermee samenhangende risico's te bepalen.

Er is bij de berekening van het vereiste betrouwbaarheidsniveau echter wel aansluiting gezocht bij de verwachtingswaarde voor het aantal doden per jaar, die met QRA-tunnels wordt berekend.

Er is daarbij gesteld dat het aantal doden dat per jaar mag vallen ten gevolge van het onbeheerst afsluiten van een tunnelbuis ten hoogste 1% mag bedragen van de verwachtingswaarde van het aantal doden per jaar in die tunnelbuis. Zie bijlage B voor de verdere berekening.

Uit de berekeningen volgt, dat de volgende geautomatiseerde veiligheidsfuncties in algemene zin "veiligheidskritisch" zijn in tunnels, omdat ze (met een RRF van 5 of hoger) in aanmerking komen voor een SIL-niveau 1 of hoger⁵:

1. Automatisch inschakelen van de tunnelventilatie ;
2. Automatisch in gereedheid brengen van de veilige vluchtroute;
3. Voorkomen dat automatische afsluiting van de tunnelbuizen onbeheerst gebeurt.

Bij tunnels van categorie A blijkt aanvullend ook "veiligheidskritisch":

4. Aanwezigheid van een (bekwame) tunneloperator.

⁴ Deze tunnel is inmiddels uit de planvorming geschrapt en zal dus niet in werkelijkheid worden gerealiseerd.

⁵ Een RRF van 5 of hoger is hierbij conservatief naar boven afgerond, c.q. afgerond naar 10.

De tunneloperator is bij deze tunnels veiligheidskritisch, omdat bij het scenario "warme BLEVE" het geven van een tijdige vluchtinstructie belangrijk is om het aantal slachtoffers te beperken. Bij dit scenario zijn de mensen na het verlaten van de incidentbuis immers nog niet veilig. Ook in een middentunnelkanaal, een dwarsverbinding of een ondersteunende buis naast de incidentbuis kunnen slachtoffers vallen door de explosie. Tijdige vluchtinstructies bevorderen dus dat de mensen de tunnel hebben verlaten voordat de explosie plaatsvindt. Het geven van vluchtinstructies is niet geautomatiseerd, dus de tunneloperator is op dit punt de enige "protection layer". Het geven van een vluchtinstructie is bij dit scenario extra van belang voor de aanwezigen bovenstrooms van de brand (die de oorzaak vormt van een warme BLEVE) omdat deze vanwege de ingeschakelde tunnelventilatie niet worden geprikkeld om te vluchten. Bij een "normale" brand (zonder explosiegevaar) is dit niet direct een risico, omdat men in principe veilig is, maar als de tunnel moet worden ontruimd voordat de BLEVE plaatsvindt, ligt dit kritischer.

De tunneloperator is uiteraard geen geautomatiseerd systeem, dus er is geen sprake van een vereist SIL-niveau zoals bij technische voorzieningen. Echter, de operator dient wel voldoende te zijn opgeleid, getraind en geoefend om de vereiste betrouwbaarheid en effectiviteit van de vluchtinstructies te garanderen. Conform de VRC dient bij voorkeur gebruik te worden gemaakt van vooraf ingesproken standaardomroepberichten, die door de operator worden geactiveerd via het groepscommando "evacuatie" (evacuatieknop).

Bij lange tunnels, met een hoge kans op files, kan aanvullend de volgende functie "veiligheidskritisch" zijn:

5. Het voorkomen dat de staart van een file (nagenoeg stilstaand verkeer) die benedenstrooms van de tunnel ontstaat de tunnel ingroeit (filevermijding, zie ook paragraaf 4.2).

Verder blijkt uit de berekeningen, dat de overige veiligheidsmaatregelen veelal een RRF van net iets meer dan 1 hebben. Dit betekent dat deze maatregelen ieder afzonderlijk weinig effect hebben op het (verlagen van het) groepsrisico. Dit komt omdat veel veiligheidsmaatregelen in de tunnel in feite "functioneel redundant" zijn. Voorbeeld: het niet ingrijpen door de operator kan worden opgevangen door het automatisch inschakelen van de ventilatie op basis van zichtmeting. Een RRF van ongeveer 1 betekent echter niet dat de betreffende maatregel overbodig is. Het is wel een bevestiging dat redundantie een gunstige invloed heeft op de betrouwbaarheidseisen van de afzonderlijke maatregelen.

Binnen de groep van "niet-veiligheidskritische" functies is er een aantal veiligheidsmaatregelen die (onder sommige omstandigheden) een RRF hebben die groter is dan 1 maar kleiner dan 5. Dit zijn:

- Automatische regeling verlichting ingangszone, op basis van de hoeveelheid daglicht;
- Riolering.

Indien de regeling van de ingangsverlichting faalt, heeft dit een verhogend effect op de ongevalskans in de ingangszone van de tunnel ("zwart gat effect"). De effecten van een ongeval in de ingangszone kunnen zich vervolgens manifesteren in de hele tunnel, in geval van brand en het vrijkomen van gevaarlijke stoffen. Van een verhoogde kans op een ongeval is echter alleen overdag sprake, op heldere zonnige dagen. Bovendien

is er bij een ongeval in de ingangszone met name sprake van risico's voor de weggebruikers in de tunnel indien er sprake is van een benedenstroomse file. Door deze 2 factoren wordt het effect van de regeling van de ingangsverlichting op het groepsrisico zodanig beperkt, dat de RRF onder de "veiligheidskritische" drempel blijft. Echter, omdat bij falen de ongevalskans in bepaalde situaties significant kan worden verhoogd, vereist de functie wel nadere aandacht. Zo moet het falen van de functie (zie het Systemontwerp van de LTS [9] voor faaldefinities) automatisch aan de operator worden gemeld, zodat deze zo nodig kan ingrijpen (snelheidsverlaging instellen, handmatig bijregelen, enz.).

De riolering (vloeistofafvoer) speelt een belangrijke rol bij het afvoeren van brandbare of toxische vloeistoffen, die bij een ongeval vrij kunnen komen. Als zodanig heeft de riolering een relatief groot veiligheidseffect in tunnels met veel bulktransporten van bijvoorbeeld benzine. Het is in feite de enige "protection layer" die kan voorkomen dat er een grote plas van een brandbare of toxische vloeistof op het wegdek ontstaat bij een ongeval waarbij gevaarlijke stoffen vrijkomen. Aangezien riolering geen geautomatiseerd systeem is, heeft het relatief grote veiligheidseffect geen consequenties voor de eisen aan bijvoorbeeld detectie of besturing. Het betekent wel dat het beheer en onderhoud van de riolering nadere aandacht vraagt.

5 Specificatie veiligheidskritische functies

5.1 Inleiding

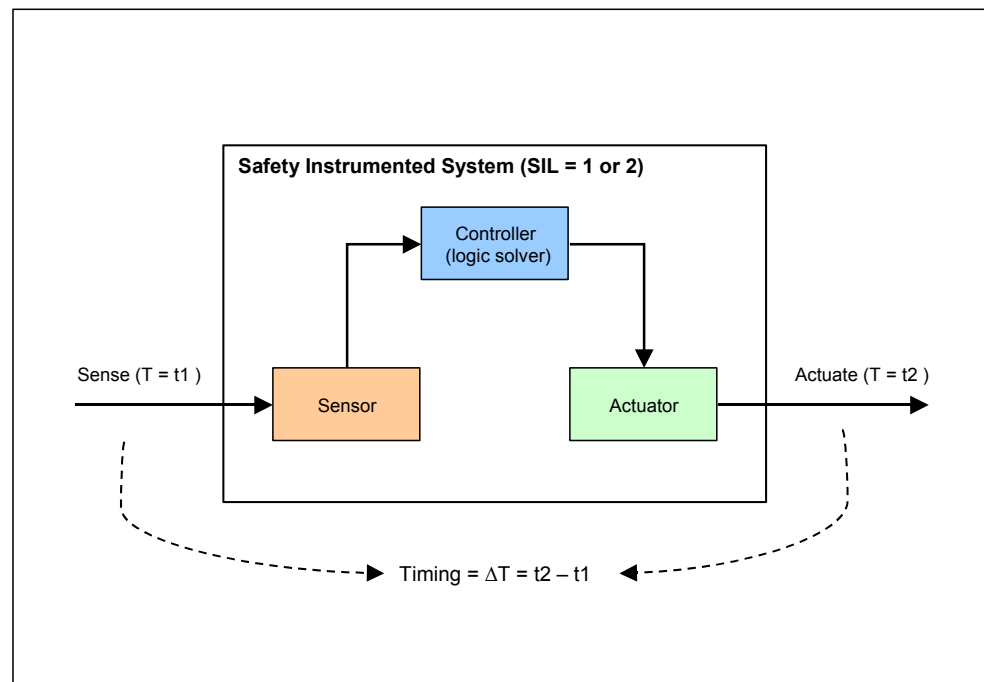
Zoals vermeld in paragraaf 4.3 zijn de volgende geautomatiseerde veiligheidsfuncties in algemene zin "veiligheidskritisch" in tunnels:

1. Automatisch inschakelen van de tunnelventilatie (VKF1);
2. Automatisch in gereedheid brengen van de veilige vluchtroute (VKF2);
3. Voorkomen dat automatische afsluiting van de tunnelbuizen onbeheerst gebeurt (VKF3).

Bij lange tunnels, met een hoge kans op files, kan aanvullend de volgende functie "veiligheidskritisch" zijn:

4. Het voorkomen dat de staart van een file (nagenoeg stilstaand verkeer) die benedenstrooms van de tunnel ontstaat de tunnel ingroeit (filevermijding) ("VKF4"⁶).

In de navolgende paragrafen worden de veiligheidskritische functies nader gespecificeerd op basis van het SLATS-model (zie figuur 5.1.1):



Figuur 5.1.1: SLATS-model [Risknowlogy]

⁶ De LTS voorziet niet in een geautomatiseerd systeem voor filevermijding; er is als zodanig geen sprake van een veiligheidskritische functie zoals bedoeld in dit rapport.

- Sense: wat wordt gemeten?
- Logic: bij welke meetwaarden moet worden ingegrepen?
- Actuate: welke acties worden genomen bij ingreep?
- Time: hoe snel moeten de acties worden genomen na detectie?
- Safety integrity: welk SIL-niveau moet de functie hebben (bij toepassing IEC-61508)?
- Faalkans: welke faalkans is toegestaan (bij toepassing TOPAAS)?

Het SIL-niveau en de toegestane faalkans worden beiden gespecificeerd, omdat zowel de IEC-61508 als TOPAAS kunnen worden toegepast om te borgen dat het ontwerp van de veiligheidskritische functies aan de eisen voldoet (zie paragraaf 1.1 en paragraaf 6.2).

Er is sprake van falen van de veiligheidskritische functie als:

- Het systeem niet reageert of niet de vereiste prestaties levert (voorbeeld: ventilatie gaat bij aanspraak niet aan of levert onvoldoende vermogen);
- Het systeem de verkeerde dingen doet (voorbeeld: ventilatie blaast tegen de rijrichting in, in plaats van met de rijrichting mee);
- Het systeem te laat reageert (voorbeeld: ventilatiecapaciteit is te laag op vol vermogen).

De toegestane faalkans per aanvraag geeft derhalve het totale faalbudget weer voor al deze faalwijzen.

Vanwege de samenhang met de geautomatiseerde veiligheidsfuncties wordt in paragraaf 5.6 tevens ingegaan op de vereiste betrouwbaarheid van de calamiteitenknop en de evacuatieknop.

Voor de volledige specificaties van installaties die zorg dragen voor de vervulling van de veiligheidskritische functies, de calamiteitenknop en de evacuatieknop wordt verwezen naar de Basisspecificatie TTI van de RWS-tunnelstandaard [8].

Voor een overzicht van de vluchtroutevoorzieningen en de relatie van deze voorzieningen tot de veiligheidskritische functies en de groepscommando's onder de calamiteitenknop en evacuatieknop wordt bovendien verwezen naar bijlage C. Dit overzicht is toegevoegd omdat bij een aantal tunnelprojecten (Salland-Twente Tunnel, renovatie 1^e Coentunnel en Velsertunnel, Gaasperdammertunnel) is gebleken dat met name de voor een veilige vluchtroute benodigde voorzieningen, sterk afhangen van het gekozen vluchtconcept:

- a. Middentunnelkanaal met kopdeuren (het preferabele vluchtconcept);
- b. Middentunnelkanaal met uitgangsvluchtdeuren naar ondersteunende buis (in plaats van kopdeuren) (voorbeeld: 1^e Coentunnel);
- c. Vluchtdeuren in middenwand (voorbeeld: 1^e Heinenoordtunnel en Salland-Twente Tunnel);
- d. Dwarsverbindingen (voorbeeld: Velsertunnel na renovatie in 2016).

Daarbij is tevens gebleken dat in feite alleen het preferabele vluchtconcept met middentunnelkanaal (MTK) en kopdeuren volledig was uitgewerkt in de VRC [4] en derhalve ook de LTS (tot en met versie 1.2 SP1B2).

Voor de overige vluchtconcepten, zoals dwarsverbindingen, waren de eisen in de LTS echter niet altijd compleet en/of waren de basisvoorzieningen om de volledige vluchtroute te ondersteunen (vluchtdeurindicaties, bordjes e.d., zoals ook opgenomen in de wet- en regelgeving) niet volledig uitgewerkt. De betreffende basisvoorzieningen zijn expliciet aangegeven in bijlage C. Het is de bedoeling de verdere uitwerking van deze voorzieningen alsnog in een volgende versie van de LTS op te nemen. Totdat dit is gebeurd kunnen projecten, waarbij wordt gekozen voor een "niet-preferabel" vluchtconcept, gebruik maken van dit rapport en afwijkingen van de LTS op basis hiervan voorleggen aan de LTR, door middel van het formele issueproces. Overigens moet er uiteraard sprake zijn van gegronde redenen om af te wijken van het preferabele vluchtconcept.

5.2 Tunnelventilatie (VKF1)

Tabel 5.2.1: Overzicht eisen VKF1	
Sense	<p><u>Normaal bedrijf → Standby-fase na detectie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Zichtmeting: $k > 0,012/m$, of: ▪ Detectie openen hulppost + detectie uitnemen spuitmond slanghaspel, of: ▪ Detectie openen hulppost + detectie uitnemen draagbaar brandblusapparaat.
Logic	<p><u>Normaal bedrijf of Standby-fase na detectie → Calamiteitenbedrijf + Calamiteitondersteunend:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Zichtmeting: $k > 0,012/m$, en: ▪ SOS-detectie stilstaand verkeer, en: ▪ Detectie openen hulppost + detectie uitnemen slanghaspel of draagbaar brandblusapparaat.
Actuate	<p><u>Normaal bedrijf → Standby-fase na detectie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – Inschakelen tunnelventilatie in de incidentbuis op 50% van het calamiteitenvermogen (met rijrichting mee), en: – Alarmsignaal naar de operator. <p><u>Normaal bedrijf of Standby-fase na detectie → Calamiteitenbedrijf + Calamiteitondersteunend:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – Inschakelen tunnelventilatie in incidentbuis op 100% van het calamiteitenvermogen (met rijrichting mee). – Alarmsignaal naar operator. <p><i>Aanvullend bij vluchtconcepten waarbij vluchtroute door de ondersteunende buis loopt:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – Inschakelen tunnelventilatie in ondersteunende buis op vereiste niveau (resulterende ventilatierichting zelfde als in incidentbuis).
Time (zie ook bijlage E)	<p><u>Normaal bedrijf → Standby-fase na detectie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – Maximaal 85 seconden (vanaf start vaststellen k-waarde tot ventilatie incidentbuis op 50% van het calamiteitenvermogen). <p><u>Normaal bedrijf → Calamiteitenbedrijf + Calamiteitondersteunend:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – Maximaal 130 seconden (vanaf start vaststellen k-waarde tot ventilatie incidentbuis op 100% van het calamiteitenvermogen en inclusief 30 seconden hersteltijd voor WWL).

<p>Time (vervolg; zie ook bijlage E)</p>	<p><i>Aanvullend bij MTK met uitgangseuren naar ondersteunende buis:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Ventilatie ondersteunende buis op vereiste niveau uiterlijk 90 seconden na het moment de ventilatie in de incidentbuis op het maximale niveau moet zijn; in de situatie dat de ventilatie in de ondersteunende buis is ingeschakeld om de luchtkwaliteit te beheersen, en de ventilatierichting moet worden omgedraaid voor bedrijf calamiteit ondersteunend, mag het 30 seconden langer duren voordat de ventilatie in de ondersteunende buis op het vereiste niveau is (dus uiterlijk 120 seconden nadat de ventilatie in de incidentbuis het maximale niveau moet hebben bereikt). <p><i>Aanvullend bij dwarsverbindingen en vluchtdeuren in middenwand:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Ventilatie ondersteunende buis op vereiste niveau uiterlijk op het moment dat de vluchtdeuren naar de ondersteunende buis ontgrendeld moeten worden. <p><u>Standby-fase na detectie → Calamiteitenbedrijf + Calamiteitondersteunend:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Maximaal 95 seconden (vanaf start aanvullende detecties tot ventilatie <i>incidentbuis</i> van 50% naar 100% van het calamiteitenvermogen en inclusief 30 seconden hersteltijd voor WV). <p><i>Aanvullend bij MTK met uitgangseuren naar ondersteunende buis:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Ventilatie ondersteunende buis op vereiste niveau uiterlijk 90 seconden na het moment de ventilatie in de incidentbuis op het maximale niveau moet zijn; in de situatie dat de ventilatie in de ondersteunende buis is ingeschakeld om de luchtkwaliteit te beheersen, en de ventilatierichting moet worden omgedraaid voor bedrijf calamiteit ondersteunend, mag het 30 seconden langer duren voordat de ventilatie in de ondersteunende buis op het vereiste niveau is (dus uiterlijk 120 seconden nadat de ventilatie in de incidentbuis het maximale niveau moet hebben bereikt). <p><i>Aanvullend bij dwarsverbindingen en vluchtdeuren in middenwand:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Ventilatie ondersteunende buis op vereiste niveau uiterlijk op het moment dat de vluchtdeuren naar de ondersteunende buis ontgrendeld moeten worden.
<p>SIL</p>	<p>1</p>

<p>Toegestane faalkans</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Faalkans (keten van detecties t/m automatische acties bij overgang van normaal bedrijf naar standby-fase na detectie) + faalkans (keten van detecties t/m automatische acties bij overgang van standby-fase na detectie naar calamiteitenbedrijf en calamiteit ondersteunend) < 0,02 per aanvraag c.q. missie (missieduur = 2 uur). – Faalkans (keten van detecties t/m automatische acties bij overgang van normaal bedrijf naar calamiteitenbedrijf en calamiteit ondersteunend) < 0,02 per aanvraag c.q. missie (missieduur = 2 uur). <p>Anvullende eisen bij vluchtconcepten, waarbij de vluchtroute door de ondersteunende buis loopt:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Faalkans (keten van detecties t/m automatische acties in ondersteunende buis bij overgang van normaal bedrijf naar calamiteitenbedrijf en calamiteit ondersteunend) < 0,01 per aanvraag c.q. missie (missieduur = 2 uur). – Faalkans (keten van detecties t/m automatische acties in ondersteunende buis bij overgang van standby-fase na detectie naar calamiteitenbedrijf en calamiteit ondersteunend) < 0,01 per aanvraag c.q. missie (missieduur = 2 uur).
----------------------------	--

Toelichting:

- VKF1 faalt indien in een situatie, waarin de ventilatie op basis van detecties automatisch zou moeten worden ingeschakeld, het gevraagde ventilatieniveau [in de incidentbuis en \(indien de vluchtroute door de ondersteunende buis loopt\) in de ondersteunende buis](#) niet of te laat wordt geleverd⁷. Daarbij geldt dat het calamiteitenvermogen het benodigde vermogen is om backlayering te voorkomen met een systeembetrouwbaarheid conform eis BSTTI#9423 [8]. Indien het aantal geïnstalleerde ventilatoren in een tunnelbuis precies voldoende is om het benodigde calamiteitenvermogen te leveren, dan kan 100% van het calamiteitenvermogen al niet meer worden bereikt bij de uitval van 1 ventilator (terwijl 50% of tenminste 33% van het calamiteitenvermogen dan waarschijnlijk nog wel tot de mogelijkheden behoort, uiteraard afhankelijk van het ontwerp van de ventilatie).
- Het inschakelen van de ventilatie in de ondersteunende buis vindt uiteraard altijd plaats bij overgang naar calamiteitenbedrijf, maar bij vluchtconcepten anders dan met een MTK met kopdeuren behoort dit tot de scope van VKF1. Dit omdat de mensen dan niet alleen verblijven in de incidentbuis, maar ook in de ondersteunende buis (omdat de vluchtroute daar doorheen voert). De ventilatie in

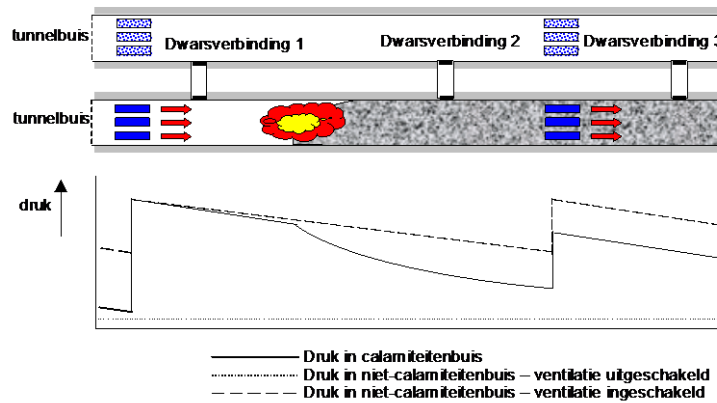
⁷ Merk op dat deze omschrijving van falen verschilt van de faaldefinities, zoals die zijn opgenomen in het Systeemontwerp van de LTS [9]. Dit komt omdat falen van een VKF betrekking heeft op falen van bij aanspraak, terwijl de faaldefinitie aangeeft bij welke mate van falen van een LFV versneld tot herstel moet worden overgegaan omdat de veiligheid van de tunnel dan niet meer voldoende wordt gewaarborgd (zonder dat compenserende of risico-reducerende maatregelen worden getroffen). Er is uiteraard wel een relatie, in de zin dat in een situatie waarin de faaldefinitie is overschreden, de VKF ook zal falen bij aanspraak.

de ondersteunende buis moet voorkomen dat rook vanuit de incidentbuis in de ondersteunende buis terecht komt (voorkomen rookkortsluiting via het tunnelportaal). VKF1 faalt bij vluchtconcepten waarbij (gedeeltelijk) door de ondersteunende buis moet worden gevlucht derhalve ook als de benodigde ontwerpcapaciteit om rookkortsluiting naar de ondersteunende buis te voorkomen niet wordt geleverd⁸. Het zou in dit kader wellicht correcter zijn om het automatisch inschakelen van de ventilatie in de ondersteunende buis tot de scope van VKF2 te laten behoren, maar omdat de scope van VKF2 bij de betreffende vluchtconcepten al is uitgebreid met het afsluiten van de ondersteunende buis voor het verkeer, zal het technisch niet altijd haalbaar zijn om met een nog meer uitgebreide scope aan de gestelde faalkanseis te voldoen. Omdat er ook een functionele relatie is met VKF1, is het inschakelen van de ventilatie in de ondersteunende buis hier ondergebracht. Om tegemoet te komen aan het feit dat de betrouwbaarheidseisen voor VKF2 strenger zijn dan voor VKF1, is bij vluchtconcepten waarbij door de ondersteunende buis wordt gevlucht de betrouwbaarheidseis voor VKF1 strenger dan bij een vluchtconcept met MTK en kopdeuren.

- Naast het voorkomen van rookkortsluiting via de tunnelmonden is ook het voorkomen van rookkortsluiting via de geopende vluchtdeuren van belang, met name bij dwarsverbindingen: in een situatie dat beide deuren van de dwarsverbinding zijn geopend moet worden voorkomen dat de veilige ruimte vol rook stroomt, door het drukverschil tussen de incidentbuis en de ondersteunende buis. De ventilatie dient zodanig te worden ontworpen dat dit wordt voorkomen, zie ook pagina 60 en 61 van de "Aanbevelingen ventilatie van verkeerstunnels" [17], die in de LTS worden voorgeschreven als ontwerprichtlijn (zie eis BSTTI#1058). Onderstaande figuur is ontleend aan [17]. Volgens [17] blijkt uit ervaring dat in de dwarsverbindingen onvoldoende overdruk kan worden opgebouwd om de rook bij 2 geopende deuren buiten de dwarsverbinding te houden, gegeven de kracht van de tunnelventilatie. Rookkortsluiting moet derhalve worden voorkomen door de drukverhoudingen tussen de verkeersbuizen⁹.

⁸ Om deze ontwerpcapaciteit te bepalen moet ook aan de ventilatie in de ondersteunende buis een systeembetrouwbaarheidseis worden gesteld. Bij het project SAA (Gaasperdammertunnel) is het volgende voorstel voor een dergelijke eis geformuleerd (issue #742): de systeemfaalkans bij een luchtsnelheid van 0,2m/s (in dezelfde richting als de ventilatie in de incidentbuis) is kleiner dan 5E-4. Met deze toegestane faalkans levert het systeem geen significante bijdrage aan de faalkans van een veilige vluchtweg. Bovendien wordt de eis technisch haalbaar geacht.

⁹ Om de ventilatiedruk in de ondersteunende buis hoger te krijgen dan in de incidentbuis, kan bijvoorbeeld worden gekozen voor een ventilatieregime in de ondersteunende buis waarbij ventilatoren bij het ingangsportaal en het uitgangsportaal tegen elkaar in ventileren om overdruk te creëren. Deze oplossing is bijvoorbeeld toegepast bij de renovatie van de Velsertunnel (2016-2017). De resulterende ventilatierichting in de ondersteunende buis moet echter wel gelijk zijn aan de ventilatierichting in de incidentbuis, om rookkortsluiting via de tunnelportalen te voorkomen (bij de Velsertunnel was dit overigens niet per se nodig vanwege de zeer lange rookmuur, met een lengte van 60m).



Figuur 5.2.1 Drukverhoudingen tussen twee verkeersbuizen met dwarsverbindingen [17]

Ook bij vluchtdeuren in de middenwand moet worden voorkomen dat rook via de geopende vluchtdeuren van de incidentbuis naar de ondersteunende buis stroomt. Naast het ontwerp van de ventilatie speelt het zelfsluitend zijn van de vluchtdeuren hierbij een rol: eventuele rookkortsluiting zal hierdoor relatief kort duren, terwijl de rook vervolgens in de ondersteunende buis wordt verdund door de ventilatie.

- De missieduur van VKF1 bedraagt 2 uur. Dit is overeenkomstig de in de LTS vereiste minimale tijdsduur dat een veilige ruimte adequaat beschermd is tegen brand.
- De vereiste reactietijd van het systeem (Time), voor de ventilatie in de incidentbuis, bij de overgang van normaal bedrijf naar standby-fase na detectie kan als volgt worden onderbouwd, uitgaande van de detectie met de zichtmeter (luchtkwaliteitsmeter)¹⁰:
 - Vaststellen waarde $k > 0,012/m$ door zichtmeter (signaal naar besturing): 30 seconden;
 - Reactietijd besturing (PLC's): 5 tot 10 seconden;
 - Benodigde tijd voor ventilatie in de incidentbuis om na inschakelen op 50% van het calamiteitenvermogen te komen: 45 seconden;
 - Totaal: 85 seconden.

Uiteraard is er ook nog sprake van de benodigde tijd voor de rook om vanaf de locatie van de brand de zichtmeter te bereiken. Deze tijd is buiten de vereiste reactietijd van de veiligheidskritische functie gehouden, maar wordt beperkt doordat de RWS-tunnelstandaard vereist dat de zichtmeters met een onderlinge afstand van maximaal 250m in de tunnelbuis worden aangebracht. Uitgaande van een conservatieve situatie met fileverkeer en een luchtsnelheid van 2m/s in de tunnelbuis, zou dit betekenen dat het maximaal 125 seconden duurt eer de rook de zichtmeter bereikt. Bij normaal rijdend verkeer (snelheid 100-120 km/u) treedt

¹⁰ Detectie door het uitnemen van een blusmiddel uit een hulppostkast kan sneller gaan, zie hierna. Detectie met de zichtmeter is dus "worst case" als het gaat om reactiesnelheid. De genoemde onderbouwing is niet bedoeld als budgettering van de vereiste reactiesnelheid per onderdeel van de VKF-keten, maar als illustratie van de haalbaarheid van de eis voor de reactiesnelheid van de totale VKF-keten.

een luchtstroming van 4-6 m/s op en zal de rook veel sneller worden gedetecteerd, namelijk binnen 42-63 seconden.

Nadat de eerste rook de zichtmeter heeft bereikt, kost het opmerken van $k > 0,012/m$ nog maximaal 30 seconden, omdat de zichtmeting wordt bepaald als gemiddelde van de afgelopen 30 seconden (default-waarde) op basis van een bemonstering per seconde.

Voor wat betreft de besturing: een reactietijd van 5 tot 10 seconden is technisch ruim haalbaar. Sneller zou dus kunnen. Er is echter gekozen voor deze timing, zodat het systeem de "duurzaamheid" van de detecties nog kan verifiëren, om de kans op valse meldingen te verkleinen.

Het opstarten van de ventilatie kost enige tijd, omdat dit veel energie vergt en er dus trapsgewijs groepen moeten worden bijgeschakeld om overbelasting van de energievoorziening te voorkomen. Het kost daarom ongeveer 90 seconden om vanaf 0 op 100% van het calamiteitenvermogen te komen. Het zal dus ongeveer 45 seconden kosten om 50% van het vermogen te bereiken.

- Bij een detectie door het openen van een hulppost in combinatie met het uitnemen van een slanghaspel of een draagbaar brandblusapparaat moeten deze signaleringen plaatsvinden binnen een bepaalde tijdspanne om als combinatie te worden gedetecteerd. Te denken valt aan een tijdspanne van 10 tot 15 seconden (in de LTS is deze tijdspanne parametreerbaar).

Uitgaande van 10 seconden kan de vereiste reactietijd (Time) [voor de ventilatie in de incidentbuis](#) bij de overgang van standby-fase na detectie naar calamiteitenbedrijf + calamiteitondersteunend als volgt worden onderbouwd:

- Detecteren openen hulppost en uitnemen blusmiddel: 10 seconden;
 - Reactietijd besturing (PLC's): 5 tot 10 seconden;
 - Reactietijd voor wegverkeersleider (tijd voor WV om in te grijpen voordat automatisch in calamiteitenbedrijf): 30 seconden (in de LTS is deze tijd parametreerbaar);
 - Benodigde tijd voor ventilatie [in de incidentbuis](#) om van 50% op 100% van het calamiteitenvermogen te komen: 45 seconden;
 - Totaal: 95 seconden.
- Bij de rechtstreekse overgang van normaal bedrijf naar calamiteitenbedrijf is het tegelijkertijd optreden alle detecties noodzakelijk. Bij de in de tabel aangegeven timing van 130 seconden [voor de ventilatie in de incidentbuis](#) is er derhalve van uitgegaan dat de SOS-detectie en de detectie van het openen van een hulppostkast en het uitnemen van een blusmiddel plaatsvinden binnen de tijdspanne die nodig is om een k -waarde $> 0,012/m$ vast te stellen (maximaal 30 seconden). Indien dit niet het geval is, zal eerst standby-fase na detectie optreden voordat de tunnel in calamiteitenbedrijf gaat. Bovendien is er van uitgegaan dat de ventilatie in de incidentbuis op basis van de detecties die nodig zijn voor de standby-fase na detectie alvast naar 50% van het calamiteitenvermogen schakelt, voordat de hersteltijd voor de WV (default 30 seconden) is verstreken. Als de hersteltijd is verstreken en de WV heeft het proces niet afgebroken, dan schakelt de ventilatie door van 50% naar 100% van het calamiteitenvermogen (zie ook bijlage E). Hiermee wordt voorkomen dat de ventilatie 30 seconden later wordt

ingeschakeld dan bij de overgang van normaal bedrijf naar standby-fase na detectie, terwijl er nota bene meer aanwijzingen zijn dat inschakeling van de ventilatie noodzakelijk is.

- De reactietijd voor het inschakelen op het vereiste niveau van de ventilatie in de ondersteunende (bij vluchtconcepten waarbij de vluchtroute door de ondersteunende buis voert) kan als volgt worden onderbouwd:
 - Bij MTK met uitgangsheuren naar de ondersteunende buis: dit vluchtconcept is hetzelfde als bij een MTK met kopdeuren, met het verschil dat de vluchtende mensen niet door een kopdeur naar buiten gaan, maar via een einddeur in de ondersteunende buis terecht komen en dan via het tunnelportaal naar buiten lopen. Deze einddeur bevindt zich in principe vlakbij het rookvrije tunnelportaal. De kans dat men last heeft van de rook die eventueel via het andere portaal de ondersteunende buis in komt is dus gering, zeker als er sprake is van rookmuren, zoals voorgesteld in dit rapport (zie bijlage I). De eisen aan de opstartsnelheid kunnen daarom in principe hetzelfde worden genomen als bij een MTK met kopdeuren, waarbij de ventilatie in de ondersteunende buis geen rol speelt bij het rookvrij houden van de vluchtroute. Om energetische redenen (beperking benodigde capaciteit energievoorziening) wordt dan in de praktijk bij calamiteitenbedrijf gekozen voor het inschakelen van de ventilatie in de ondersteunende buis NADAT de ventilatie in de incidentbuis op het calamiteitenvermogen is ingeschakeld. Concreet wordt vaak gekozen voor een opstarttijd van 90 seconden nadat de ventilatoren in de incidentbuis het volledige calamiteitenvermogen hebben bereikt. Dit geldt voor een situatie waarin de ventilatie niet hoeft te worden omgedraaid. In een situatie dat de ventilatie wel moet worden omgedraaid (omdat er in de ondersteunende buis op het moment van de calamiteit toevallig net in de rijrichting wordt geventileerd om de luchtkwaliteit te beheersen en deze richting is tegengesteld aan de richting bij calamiteit ondersteunend) worden er nog 30 seconden extra genomen voor het omdraaien van de ventilatierichting.
 - Bij dwarsverbindingen moeten strengere eisen worden gesteld aan de opstartsnelheid van de ventilatie in de ondersteunende buis, omdat moet worden voorkomen dat de dwarsverbindingen met rook worden gevuld door rookkortsluiting tussen de incidentbuis en de ondersteunende buis (in de situatie dat beide vluchtdeuren van de dwarsverbinding zijn geopend). Om dit te bereiken moet de ventilatie in de ondersteunende buis het vereiste niveau hebben bereikt op het moment dat de vluchtdeuren naar de ondersteunende buis ontgrendeld moeten worden (en dus de kans bestaat dat beide vluchtdeuren van de dwarsverbinding inderdaad tegelijkertijd worden geopend). Deze eis geldt in alle gevallen, ook als de ventilatie in de ondersteunende buis is ingeschakeld om de luchtkwaliteit te beheersen en de ventilatierichting moet worden omgedraaid ten behoeve van de beheersing van de calamiteit. Als de ventilatie op het vereiste niveau is ingeschakeld wil dat overigens niet zeggen dat de luchtstromen en druklijnen hun stabiele eindsituatie hebben bereikt, maar aangezien dit voor beide buizen geldt en in de ondersteunende buis sprake is van minder weerstand dan in de incidentbuis kan worden gesteld dat rookkortsluiting wordt voorkomen als de ventilatie in beide buizen op het gewenste vermogen is ingeschakeld.
 - Bij vluchtdeuren in de middenwand wordt aangesloten bij de eisen voor de situatie met dwarsverbindingen, al is rookkortsluiting tussen de incidentbuis en

de ondersteunende iets minder kritisch is, omdat er geen sprake is van een veilige ruimte die dan met rook wordt gevuld. Rook in de ondersteunende buis moet echter ook worden voorkomen.

- De RRF van de ventilatie is redelijk onafhankelijk van lengte van de tunnel en de kans op een benedenstroomse file, en heeft veelal een waarde tussen 5 en 8 (bij een vluchtdeurafstand van 100m). Omdat het belang van de ventilatie toeneemt bij een grotere vluchtdeurafstand (bij dwarsverbindingen zijn vluchtdeurafstanden tot 250m mogelijk, zie bijlage B voor de invloed op de RRF) is er conservatief uitgegaan van een RRF van 10, op basis waarvan is gekozen voor SIL 1. Bij een verhoogde kans op een benedenstroomse file (nagenoeg stilstaand verkeer) neemt het veiligheidseffect van de ventilatie in feite af. Dit is logisch, omdat in een situatie met bijvoorbeeld brand in combinatie met een file alle weggebruikers benedenstrooms van de brand door de langventilatie in de rook worden gezet, zodat de kans op slachtoffers toeneemt. Dit leidt in de praktijk echter niet tot lagere betrouwbaarheidseisen voor de ventilatie.
- De gekozen faalkans ($< 0,02$ per aanvraag) komt overeen met de faalkanseis met betrekking tot technisch falen van de ventilatie conform de VRC. Er is hier voor gekozen deze eis betrekking te laten hebben op de hele keten sensor --> controller --> actuator (zie paragraaf 5.1). De eis sluit aan bij het betrouwbaarheidsniveau dat bij SIL 1 zou moeten worden bereikt (faalkans per aanvraag 0,1 – 0,01, zie paragraaf 3.3) en is bovendien technisch haalbaar.
- In lijn met de vorige opmerking heeft de vermelde faalkans ($< 0,02$ per aanvraag) alleen betrekking op het technisch falen van de veiligheidskritische functie. De kans op systeemfalen (het optreden van backlayering van de rook, ondanks dat de ventilatie en de overige techniek correct werken, zie hoofdstuk 12 van de VRC, respectievelijk eis BSTTI#9423 in de LTS [8]) moet dus niet worden meegenomen in de foutenboomanalyse met betrekking tot het technisch falen van de veiligheidskritische functie, maar separaat worden getoetst, bijvoorbeeld met het softwarepakket ProTuVeM 2.0.
- Ook ten behoeve van de beheersing van de luchtkwaliteit in de tunnelbuis wordt de tunnelventilatie automatisch ingeschakeld (en uitgeschakeld) op basis van zichtmeting (zie hoofdstuk 14 van de VRC). Deze functie maakt echter geen deel uit van de hier beschreven veiligheidskritische functie.
- Er is een relatie tussen de tunnelventilatie en het in gereedheid brengen van de veilige vluchtroute, zie paragraaf 5.3. De ventilatie moet dus in samenhang met de vluchtdeuren en de overdrukventilatie in de veilige ruimte worden beschouwd.
- Voor de eisen met betrekking tot het veilig faalgedrag van de zichtmeting en de ventilatie (bij uitval van de energievoorziening of de besturing) wordt verwezen naar de Basisspecificatie TTI van de LTS [8].
- Voor de te nemen maatregelen bij het falen van de zichtmeting, de ventilatie, de besturing of de energievoorziening wordt verwezen naar het Systeemontwerp van de LTS [9].

5.3 Veilige vluchtroute (VKF2)

Tabel 5.3.2: Overzicht eisen VKF2	
Sense	Normaal bedrijf → Standby-fase na detectie:
Logic	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zichtmeting ($k > 0,012/m$) of: ▪ Detectie openen hulppost + detectie uitnemen spuitmond slanghaspel, of: ▪ Detectie openen hulppost + detectie uitnemen draagbaar brandblusapparaat. <p>Normaal bedrijf of Standby-fase na detectie → Calamiteitenbedrijf + Calamiteitondersteunend:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Zichtmeting: $k > 0,012/m$, en: ▪ SOS-detectie stilstaand verkeer, en: <p>Detectie openen hulppost + detectie uitnemen slanghaspel of draagbaar brandblusapparaat.</p>
Actuate	Zie tabel 5.3.2 voor de acties per bedrijfstoestand en per vluchtconcept.
Time	Zie tabel 5.3.2 en bijlage F voor de timing per actie.
SIL	Zie tabel 5.3.3 (acties I-5, I-6, I-7, III-3 en III-4, zoals genoemd in tabel 5.3.2, horen niet tot de scope van het in tabel 5.3.3 genoemde SIL-niveau).
Toegestane faalkans	<ul style="list-style-type: none"> - Faalkans (keten van detecties t/m automatische acties bij overgang van normaal bedrijf naar standby-fase na detectie) + faalkans (keten van detecties t/m automatische acties bij overgang van standby-fase na detectie naar calamiteitenbedrijf en calamiteit ondersteunend) < (waarde aangegeven in tabel 5.3.3) per aanvraag c.q. missie (missieduur = 2 uur). - Faalkans (keten van detecties t/m automatische acties bij overgang van normaal bedrijf naar calamiteitenbedrijf en calamiteit ondersteunend) < (waarde aangegeven in tabel 5.3.3) per aanvraag c.q. missie (missieduur = 2 uur). <p>N.B.: de acties I-5, I-6, I-7, III-3 en III-4, zoals genoemd in tabel 5.3.2, vallen bij alle bovengenoemde eisen buiten het faalkansbudget; de betreffende systemen en installaties dienen te voldoen aan de gebruikelijke COTS-betrouwbaarheid (Commercial Off The Shelf).</p>

Voor een nadere toelichting op de detecties, acties, reactietijden en betrouwbaarheidseisen in het kader van VKF2: zie pagina 40 e.v.

Tabel 5.3.2: Acties bij VKF2: Automatisch in gereedheid brengen veilige vluchtroute					
Nr.	Acties (automatisch te nemen op basis van detecties)	Vluchtconcept			
		a- MTK met kopdeuren	b- MTK met uitgangsvluchtdeuren naar ondersteunende buis	c- Vluchtdeuren in middenwand	d- Dwarsverbanden
I	Bij overgang incidentbuis van normaal bedrijf naar standby-fase na detectie				
I-0	Alarmsignaal naar de operator	Ja (max. 40 sec. na start vaststellen k-waarde)	Ja (max. 40 sec. na start vaststellen k-waarde)	Ja (max. 40 sec. na start vaststellen k-waarde)	Ja (max. 40 sec. na start vaststellen k-waarde)
I-1	Ontgrendelen vluchtdeuren van incidentbuis naar veilige ruimte of ondersteunende buis	N.v.t. (deuren zijn nooit vergrendeld)	Nee (deuren zijn in normaal bedrijf niet vergrendeld)	Nee (deuren blijven nog vergrendeld)	Nee (deuren zijn in normaal bedrijf niet vergrendeld)
I-2	Vergrendelen uitgangsvluchtdeur(en) van veilige ruimte naar ondersteunende buis	N.v.t.	Ja (max. 45 sec. na start vaststellen k-waarde)	N.v.t.	Ja (max. 45 sec. na start vaststellen k-waarde)
I-3	Zo nodig vergrendelen deuren in vluchtroute die toegang geven tot ruimten anders dan vluchtroute	Ja (max. 45 sec. na start vaststellen k-waarde)	Ja (max. 45 sec. na start vaststellen k-waarde)	Ja (max. 45 sec. na start vaststellen k-waarde)	Ja (max. 45 sec. na start vaststellen k-waarde)
I-4	Op vereiste niveau brengen mechanische overdrukventilatie in veilige ruimte(n)	Ja (max. 100 sec. na start vaststellen k-waarde)	Ja (max. 100 sec. na start vaststellen k-waarde)	N.v.t.	Ja (max. 100 sec. na start vaststellen k-waarde)
I-5	Schakelen verlichting incidentbuis op 100%	Ja (max. 70 sec. na start vaststellen k-waarde)	Ja (max. 70 sec. na start vaststellen k-waarde)	Ja (max. 70 sec. na start vaststellen k-waarde)	Ja (max. 70 sec. na start vaststellen k-waarde)
I-6	Schakelen verlichting veilige ruimte(n) op 100%	Ja (max. 45 sec. na start vaststellen k-waarde)	Ja (max. 45 sec. na start vaststellen k-waarde)	N.v.t.	Ja (max. 45 sec. na start vaststellen k-waarde)

Tabel 5.3.2: Acties bij VKF2: Automatisch in gereedheid brengen veilige vluchtroute					
Nr.	Acties (automatisch te nemen op basis van detecties)	Vluchtconcept			
		a- MTK met kopdeuren	b- MTK met uitgangsvluchtdeuren naar ondersteunende buis	c- Vluchtdeuren in middenwand	d- Dwarsverbanden
I-7	Inschakelen bordjes met dynamische vluchtroute-aanduiding in veilige ruimte(n) (waarbij de juiste vluchtrichting wordt aangegeven). ¹¹	Ja (max. 45 sec. na start vaststellen k-waarde)	Ja (max. 45 sec. na start vaststellen k-waarde)	N.v.t.	Ja (max. 45 sec. na start vaststellen k-waarde)
II	Bij overgang incidentbuis van normaal bedrijf naar calamiteitenbedrijf (ondersteunende buis naar calamiteitondersteunend)				
II-0	Zelfde acties als genoemd bij I, met aanvullend ook nog de acties genoemd onder III. Voor de reactietijden geldt dan: <ul style="list-style-type: none"> Acties genoemd onder I: maximale reactietijd is gelijk aan de waarde die bij de betreffende acties wordt genoemd; Acties genoemd onder III: maximale reactietijd na start vaststellen k-waarde is gelijk aan de waarde die bij de betreffende acties wordt genoemd + 20 seconden; deze tijd wordt dan gemeten vanaf de start van het vaststellen van de k-waarde door de zichtmeter (gegeven het feit dat alle detecties in dit geval tegelijkertijd moeten optreden, dus binnen de benodigde detectietijd door de zichtmeting). 				
III	Bij overgang incidentbuis van standby-fase na detectie naar calamiteitenbedrijf (ondersteunende buis naar calamiteitondersteunend) (*)				
III-0	Alarmsignaal naar de operator	Ja (max. 40 sec. na start vaststellen k-waarde)	Ja (max. 40 sec. na start vaststellen k-waarde)	Ja (max. 40 sec. na start vaststellen k-waarde)	Ja (max. 40 sec. na start vaststellen k-waarde)
III-1	Afsluiten ondersteunende tunnelbuis voor verkeer (MTM, J32, VRI, afsluitboom)	Nee (gebeurt wel, maar hoort niet tot scope VKF2)	Ja (max. 96 sec. na start aanvullende detecties)	Ja (max. 70 sec. na start aanvullende detecties)	Ja (max. 96 sec. na start aanvullende detecties)
III-2	Ontgrendelen met vertraging van vluchtdeuren van incidentbuis naar ondersteunende buis, dan wel uitgangsvluchtdeur(en) van veilige ruimte naar ondersteunende buis	N.v.t.	Ja (max. 96 + X sec. na start aanvullende detecties) (**)	Ja (max. 70 + X sec. na start aanvullende detecties) (**)	Ja (max. 96 + X sec. na start aanvullende detecties) (**)

¹¹ Indien van toepassing; als er sprake is van één vaste vluchtrichting in het MTK, dan worden statische bordjes aangebracht, die niet in- of uitgeschakeld hoeven te worden

Tabel 5.3.2: Acties bij VKF2: Automatisch in gereedheid brengen veilige vluchtroute					
Nr.	Acties (automatisch te nemen op basis van detecties)	Vluchtconcept			
		a- MTK met kopdeuren	b- MTK met uitgangsvluchtdeuren naar ondersteunende buis	c- Vluchtdeuren in middenwand	d- Dwarsverbanden
III-3	Schakelen verlichting ondersteunende buis op 100%	Nee (gebeurt wel conform LTS, maar maakt in dit geval geen deel uit van VKF2)	Ja (max. 96 + X sec. na start aanvullende detecties)	Ja (max. 70 + X sec. na start aanvullende detecties)	Ja (max. 96 + X sec. na start aanvullende detecties)
III-4	Uitschakelen met vertraging van dynamische bordjes "Exit overzijde" en tegelijkertijd inschakelen van bordjes met dynamische vluchtroute-aanduiding in ondersteunende buis (waarbij de juiste vluchtrichting wordt aangegeven)	N.v.t.	N.v.t., mits uitgangsvluchtdeuren zich niet meer dan 250m van in- of uitgang ondersteunen de buis bevinden; anders: Ja (alleen bij uitgangsvluchtdeuren preferabele vluchtrichting)	Ja (max. 70 + X sec. na start aanvullende detecties)	Ja (max. 96 + X sec. na start aanvullende detecties)

Opmerkingen:

(*) Bij de overgang van standby-fase na detectie naar calamiteitenbedrijf + calamiteitondersteunend is er van uitgegaan dat de acties die moeten worden uitgevoerd bij de overgang van normaal bedrijf naar standby reeds volledig zijn uitgevoerd. Indien dit niet het geval is, dan valt de uitvoering van het resterende deel van de acties, bijvoorbeeld het op het vereiste niveau brengen mechanische overdrukventilatie in veilige ruimte(n), nog binnen de overgang naar calamiteitenbedrijf + calamiteitondersteunend. Dit zou er toe kunnen leiden dat de overgang van standby naar calamiteitenbedrijf + calamiteitondersteunend langer duurt dan op basis van de reactietijden in de tabel zou worden verwacht. De reactietijden van de acties behorend bij de overgang van standby-fase na detectie naar calamiteitenbedrijf + calamiteitondersteunend zijn overigens inclusief de hersteltijd voor de WV (de tijd om in te grijpen voordat automatisch naar calamiteitenbedrijf wordt gegaan). Deze hersteltijd is parametreerbaar in de LTS. Er is hier uitgegaan van de default-waarde van 30 seconden; (**) "X" is de benodigde tijdsduur om de ondersteunende buis verkeersvrij te maken na afsluiting voor het verkeer.

**Tabel 5.3.3: Vereiste SIL-niveau (en vereiste faalkans per aanvraag / missie)
VKF2: Automatisch in gereedheid brengen veilige vluchtroute**

Filekans Tunnellengte	Hoog (5x / week)	Normaal (1x / week)	Laag (1x / 2 weken)	Systeem filevermijding
< 500m	1 (< 0,01)	1 (< 0,01)	1 (< 0,01)	1 (< 0,01)
500m -1.000m	2 (< 0,01)	1 (< 0,01)	1 (< 0,01)	1 (< 0,01)
1.000m - 1.250m	2 (< 0,01)	2 (< 0,01)	1 (< 0,01)	1 (< 0,01)
1.250m - 2.500m	2 (< 0,01)	2 (< 0,01)	2 (< 0,01)	1 (< 0,01)
2.500m - 5.000m	2 (< 0,005)	2 (< 0,005)	2 (< 0,01)	2 (< 0,01)
> 5.000m	2 (< 0,005)	2 (< 0,005)	2 (< 0,005)	2 (< 0,01)

Legenda

	RRF < 100
	100 < RRF < 500
	RRF > 500

Toelichting:

- VKF2 faalt indien in een situatie, waarin de gevraagde acties om een veilige vluchtweg te borgen op basis van detecties automatisch zouden moeten worden geïnitieerd, niet of onvoldoende adequaat plaatsvinden of te laat plaatsvinden¹². "Adequaat" houdt in dat aan de prestatie-eisen van de LTS [8] wordt voldaan. Als zodanig faalt de overdruk van de veilige ruimte dus bijvoorbeeld als er (onder de condities dat dit volgens de LTS niet mag gebeuren) rook in de veilige ruimte komt (door geopende vluchtdeuren dan wel via de aanzuiging van buiten de tunnel) of als de luchtsnelheden in de veilige ruimte of door de geopende vluchtdeuren groter worden dan toegestaan of als de overdruk zodanig hoog wordt dat een vluchtdeur niet meer kan worden geopend met de toegestane openingskracht.
- De missieduur van VKF2 bedraagt 2 uur. Dit is overeenkomstig de in de LTS vereiste minimale tijdsduur dat een veilige ruimte adequaat beschermd is tegen brand.

¹² Merk op dat deze omschrijving van falen verschilt van de faaldefinities, zoals die zijn opgenomen in het Systeemontwerp van de LTS [9]. Dit komt omdat falen van een VKF betrekking heeft op falen van bij aanspraak, terwijl de faaldefinitie aangeeft bij welke mate van falen van LFV versneld tot herstel moet worden overgegaan omdat de veiligheid van de tunnel dan niet meer voldoende wordt gewaarborgd (zonder dat compenserende of risico-reducerende maatregelen worden getroffen). Er is uiteraard wel een relatie, in de zin dat in een situatie waarin de faaldefinitie is overschreden, de VKF ook zal falen bij aanspraak.

- De vereiste reactietijd van het systeem (Time) bij de overgang van normaal bedrijf naar standby-fase na detectie kan als volgt worden onderbouwd, uitgaande van de detectie met de zichtmeter (zie ook opmerkingen bij tunnelventilatie, paragraaf 5.2):
 - Vaststellen waarde $k > 0,012/m$ door zichtmeter (signaal naar besturing): 30 seconden;
 - Reactietijd besturing (PLC's): 5 tot 10 seconden;
 - Benodigde tijd voor overdrukventilatie om na inschakelen vereiste overdruk in veilige ruimte te realiseren: 60 seconden;
 - Totaal: 100 seconden.

- De overige acties (naast het op het vereiste niveau brengen van de overdruk in de veilige ruimte) verlopen sneller:
 - Vergrendelen deuren: 30 (zichtmeter) + 10 (besturing) + 5 (vergrendeling) = 45 seconden;
 - Verlichting incidentbuis op 100%: 30 (zichtmeter) + 10 (besturing) + 30 (verlichting) = 70 seconden (rekening houdend met hogedruk-natriumlampen, LED-verlichting kan veel sneller);
 - Verlichting veilige ruimte op 100% en dynamische bordjes vluchtrouteaanduiding ingeschakeld: 30 (zichtmeter) + 10 (besturing) + 5 (inschakelen bordjes) = 45 seconden.

- Bij een detectie door het openen van een hulppost in combinatie met het uitnemen van een slanghaspel of een draagbaar brandblusapparaat moeten deze signaleringen plaatsvinden binnen een bepaalde tijdspanne om als combinatie te worden gedetecteerd. Te denken valt aan een tijdspanne van 10 tot 15 seconden (in de LTS is deze tijdspanne parametreerbaar).

Uitgaande van 10 seconden kan de vereiste reactietijd (Time) bij de overgang van standby-fase na detectie naar calamiteitenbedrijf + calamiteitondersteunend als volgt worden onderbouwd:

- Detecteren openen hulppost en uitnemen blusmiddel: 10 seconden;
- Reactietijd besturing (PLC's): 5 tot 10 seconden;
- Reactietijd voor wegverkeersleider (tijd voor WVl om in te grijpen voordat automatisch in calamiteitenbedrijf): 30 seconden (in de LTS is deze tijd parametreerbaar);

- Benodigde tijd om ondersteunende buis af te sluiten voor verkeer en (uitgangs)vluchtdeuren te ontgrendelen (bij vluchtconcepten b, c en d):
 - Tonen MTM-beelden en inschakelen J32-borden: 2 tot 5 seconden:
 - In tunnel (op portalen voorbij VRI): geen beelden;
 - Op portalen voor VRI, in rijrichting gezien, naar VRI toe, achtereenvolgens:
 - "90" boven alle rijstroken¹³ + J32 ingeschakeld¹⁴;
 - "70" met flashers boven alle rijstroken + J32 ingeschakeld;
 - "50" met flashers boven alle rijstroken + J32 ingeschakeld;
 - VRI op rood (via geel-knipperen en vast-geel): 15 tot 22 seconden na instellen MTM-beelden¹⁵;
 - Afsluitbomen neer: 19 seconden (start 4 seconden na VRI op rood, duur neergaan 15 seconden)¹⁶;
 - MTM: in tunnel (op portalen voorbij VRI): rood kruis boven alle rijstroken: X seconden na afsluitbomen neer; hierbij is X de benodigde tijdsduur om de ondersteunende buis verkeersvrij te maken nadat de afsluitboom neer is gegaan (er van uit gaande dat vanaf dat moment geen verkeer meer rijdt); uitzondering: bij vluchtconcept c (vluchtdeuren in middenwand): X seconden na VRI op rood;
 - Ontgrendelen (uitgangs)vluchtdeuren: X seconden na afsluitbomen neer; uitzondering: bij vluchtconcept c (vluchtdeuren in middenwand): X seconden na VRI op rood¹⁷;
- Totale maximale reactietijd overgang standby-fase na detectie naar calamiteitenbedrijf + calamiteitondersteunend:
 - Bij vluchtconcept a: $10 + 10 + 30 = 50$ seconden.
 - Bij vluchtconcept b en d: $10 + 10 + 30 + 5 + 22 + 19 + X = (96 + X)$ seconden.
 - Bij vluchtconcept c: $10 + 10 + 30 + 5 + 15 + X = (70 + X)$ seconden (er van uit gaande dat vluchtconcept c alleen in bediende tunnels wordt toegepast (> 500m) en dus geldt dat $X > 21$ seconden).

De J32-borden worden ingeschakeld als extra maatregel om de snelheid van het verkeer te verlagen, voor het geval dat de MTM faalt bij aanspraak (zodat geen snelheidsmaatregel kan worden getoond).

¹³ Snelheidsmaatregelen worden altijd ingeleid met "90", ook als de maximum snelheid 100km/u bedraagt c.q. lager is dan 120 of 130km/u (afgestemd met WV en VWM d.d. 2 december 2015, [16]).

¹⁴ De J32-borden bevinden zich tussen de rijstroken in; bij een rijbaan met 3 rijstroken is er dus sprake van 1 J32-bord, bij een rijbaan met 3 rijstroken is er sprake van 2 J32-borden, enz.

¹⁵ Deze reactietijd is feitelijk afhankelijk van de afstand (L_s) van de laatste portaal (met "50", flashers en J32) voor de stopstreep voor de VRI. Deze afstand is volgens de VRAI [14] tenminste 150m en ten hoogste 300m. Er geldt: hoe groter de afstand L_s hoe meer tijd nodig is voordat de roodfase van de VRI kan worden gestart. Bij vluchtconcept c (vluchtdeuren in middenwand) moet de minimale afstand worden gekozen ($L_s = 150m$) in verband met de noodzakelijke snelle afsluiting van de ondersteunende buis. Bij vluchtconcepten b en d wordt in principe gekozen voor $L_s = 300m$. Zie bijlage D voor een nadere onderbouwing en specificatie.

¹⁶ Bij de bepaling van deze tijdsduur is uitgegaan van een afstand van de stopstreep tot de VRI van 8m en een afstand van de VRI tot de afsluitboom van 20m. Deze afstanden zullen in de nieuwe versie van de VRAI standaard worden gehanteerd voor zowel bruggen als tunnels (afgestemd met WV en VWM d.d. 2 december 2015, [16]). Zie bijlage D voor een nadere onderbouwing en specificatie.

¹⁷ Bij vluchtconcept c wordt het moment van ontgrendelen gekoppeld aan het moment dat de VRI op rood staat in plaats van het moment dat de afsluitboom neer is, omdat het risico van overlijden door rook te groot wordt bij een te lange ontgrendeltijd. De mensen staan bij dit vluchtconcept immers niet te wachten in een veilige ruimte, maar in de incidentbuis. Eerder ontgrendelen betekent echter wel dat het risico van aanrijding in de ondersteunende buis wordt verhoogd. Hiermee wordt nog eens onderstreept dat vluchtconcept c het minst preferabele vluchtconcept is.

De rode kruizen op de portalen voorbij de VRI worden getoond als extra maatregel om het verkeer te stoppen, dus als extra waarborg voor een verkeersvrije vluchtroute voor het geval de afsluitboom faalt bij aanspraak. De kruizen worden pas getoond als de ondersteunende buis verkeersvrij is, omdat de kruizen anders verwarrend zouden zijn voor de bestuurders die de VRI zijn gepasseerd voordat deze op rood ging maar de tunnel nog niet hebben verlaten.

De volgende acties worden bij de vluchtconcepten b, c en d gekoppeld aan het moment dat de ondersteunende buis verkeersvrij is om te voorkomen dat er schrikreacties ontstaan bij voertuigbestuurders:

- Verlichting ondersteunende buis op 100%;
 - Uitschakelen dynamische bordjes "Exit overzijde" en inschakelen dynamische bordjes "Exit <-- / -->" in ondersteunende buis.
- Het SIL-niveau van het ontgrendelen/vergrendelen van (vlucht)deuren en het inschakelen van de overdrukventilatie wordt vooral bepaald door de lengte van de tunnel, in combinatie met de kans op een benedenstroomse file. Dit komt omdat het belang van het correct functioneren van de vluchtvoorzieningen uiteraard toeneemt naarmate het risico dat zich veel mensen benedenstrooms van de brand bevinden toeneemt.
- De SIL-niveaus en de faalkansen in de tabel zijn gebaseerd op de RRF van de vluchtdeuren, die voor een groot aantal verschillende situaties zijn berekend met QRA-tunnels. Omdat QRA-tunnels er impliciet van uit gaat dat men veilig is als men een vluchtdeur heeft bereikt, wordt ook de betrouwbaarheid van de overige voorzieningen die essentieel zijn bij het borgen van een veilige vluchtroute tot de scope van de betrouwbaarheidseis voor VKF2 gerekend, namelijk: de overdruk van de veilige ruimte (bij de vluchtconcepten a, b en d) en de voorzieningen om de ondersteunende buis verkeersvrij te maken (bij de vluchtconcepten b, c en d). Voor de overige voorzieningen ten behoeve van een veilige vluchtweg (verlichting, dynamische bordjes e.d.) wordt de normale COTS-betrouwbaarheid gevraagd ("Commercial Off The Shelf"). Dit betekent dat de betreffende voorzieningen niet hoeven te worden meegenomen in de foutenboomanalyse voor VKF2 (waarmee wordt aangetoond dat VKF2 aan de betrouwbaarheidseis voldoet), maar dat voor deze voorzieningen moet worden onderbouwd dat ze voldoen aan de betrouwbaarheid die gebruikelijk is in Rijkstunnels.
- De toegestane faalkans bij SIL 1 ($< 0,01$ per aanvraag) is strenger gekozen dan bij de ventilatie (zie paragraaf 5.2) omdat de RRF van de vluchtdeuren hoger is dan die van de ventilatie. Bij SIL 2 is eveneens gekozen voor een toegestane faalkans $< 0,01$ per aanvraag, indien de RRF < 500 . Bij een RRF > 500 is de toegestane faalkans gesteld op $< 0,005$ per aanvraag. Met deze keuzes wordt een balans beoogd tussen gewenste betrouwbaarheid en technische haalbaarheid.
- Voor de eisen met betrekking tot het veilig faalgedrag van de zichtmeting, de vluchtdeurvergrendeling, de overdrukventilatie, de VRI's, de afsluitbomen e.d. (bij uitval van de energievoorziening of de besturing) wordt verwezen naar de Basisspecificatie TTI van de LTS [8].

- Voor de te nemen maatregelen bij het falen van de zichtmeting, de vluchtdeurvergrendeling, de overdrukventilatie, de VRI's, de afsluitbomen, de besturing of de energievoorziening e.d. wordt verwezen naar de faaldefinities van de TTI, opgenomen in het Systeemontwerp van de LTS [9].

5.4 Voorkomen onbeheerst afsluiten tunnelbuis (VKF3)

Tabel 5.4.1: Overzicht eisen VKF3	
Sense	<ul style="list-style-type: none"> - Afsluitboom: bij besturingscommando "neer" nagaan: <ul style="list-style-type: none"> o Status VRI ("rood" of "uit") - VRI: bij besturingscommando "rood" nagaan: <ul style="list-style-type: none"> o Status MTM (snelheidsverlaging "70" / "50" ingesteld of niet). o Status J32-borden ("aan" of "uit")
Logic	
Actuate	<ul style="list-style-type: none"> - Afsluitboom: <ul style="list-style-type: none"> o Indien VRI niet "rood" boven alle rijstroken (*), dan besturingscommando "rood" naar VRI; o Indien VRI na besturingscommando nog steeds niet "rood" boven alle rijstroken (*), dan afsluitboom <u>niet</u> neer. o Indien VRI na besturingscommando wel "rood" boven alle rijstroken (*), dan afsluitboom neer. - VRI: <ul style="list-style-type: none"> o Indien MTM geen snelheidsverlaging, dan besturingscommando "snelheidsverlaging" naar MTM; indien J32-borden niet ingeschakeld, dan besturingscommando "inschakelen" naar J32-borden o Indien MTM na besturingscommando nog steeds geen snelheidsverlaging en J32-borden na besturingscommando nog steeds niet ingeschakeld, dan VRI niet op "rood"; o Indien MTM na besturingscommando wel snelheidsverlaging, en/of J32-bord na besturingscommando wel ingeschakeld, dan VRI op "rood" (via geel-knipperen en vast-geel). <p>N.B.: dit betekent dus dat als bij een portaal boven een rijstrook geen snelheidsmaatregel wordt getoond, en ook geen J32-bord naast de rijstrook is ingeschakeld, dat dan de VRI niet naar rood mag gaan (lees: er mogen geen rode lichten worden getoond boven de rijstroken). De afsluitboom mag dan ook niet neergaan.</p>
Time	<p>Beslistijd VRI op rood Ja/Nee: 5 seconden</p> <p>Beslistijd afsluitboom neer Ja/Nee: 4 seconden (= rood-tijd voor afsluiting. Zie toelichting VKF2, paragraaf 5.3)</p> <p>Tijden dat maatregelen MTM, J32 en VRI (geel-knipper, geel en rood) moeten worden getoond: zie bijlage D.</p>
SIL	<p>Afsluitboom: 2</p> <p>VRI: 1</p>
Toegestane faalkans	<p>Afsluitboom: < 0,00385 per aanvraag</p> <p>VRI: < 0,0154 per aanvraag</p>

(*) Indien boven een bepaalde rijstrook al een rood kruis staat (MTM), bijvoorbeeld vanwege een pechgeval, dan kan de VRI boven de betreffende rijstrook niet op rood gaan (VRI "rood" wordt dan onderdrukt). In dat geval wordt het rode kruis beschouwd als equivalent van rood op de VRI en kan de tunnel toch automatisch worden afgesloten.

Toelichting:

- De veiligheidskritische functie heeft betrekking op de bewaken van het onbeheerst automatisch afsluiten van de tunnel. VKF3 faalt, als de afsluitboom automatisch neer gaat zonder dat de VRI rood geeft, of als de VRI automatisch op rood gaat zonder dat de MTM een snelheidsmaatregel aangeeft en zonder dat de J32-borden zijn ingeschakeld. De “omgekeerde” functie, het zorgen dat de tunnel automatisch wordt afgesloten bij sterk vermoeden van brand, blijkt volgens de berekening van de RRF niet veiligheidskritisch te zijn voor de aanwezigen in de incidentbuis. Dit komt door de werking van de tunnelventilatie, die er bij brand voor zorgt dat de tunnelbuis bovenstrooms van de brand rookvrij blijft. Hierdoor lopen de mensen die toch de incidentbuis inrijden geen direct gevaar. Pas als de ventilatie ook zou falen, dan levert het niet afsluiten van de incidentbuis gevaarlijke situaties op. Indien een vluchtconcept is gekozen waarbij de vluchtroute door de ondersteunende buis voert, dan maakt het afsluiten van de ondersteunende buis wel deel uit van VKF2 (zie paragraaf 5.3).
- De toegestane faalkansen en SIL-niveaus zijn in dit geval niet afgeleid op basis van de RRF's, omdat dit niet mogelijk is met QRA-tunnels. Een ongeval als gevolg van het onbeheerst sluiten van de afsluitboom vindt immers buiten de tunnel plaats, terwijl QRA-tunnels alleen de risico's als gevolg van een ongeval in de tunnel kan berekenen. Er is derhalve gebruik gemaakt van een alternatieve rekenmethode, namelijk door uit te gaan van een maximaal aantal doden dat door het onbeheerst afsluiten van de tunnelbuis mag vallen. Dit aantal is conservatief gesteld op 1% van de (met QRA-tunnels te bepalen) verwachtingswaarde voor het aantal doden per jaar in de tunnelbuis. Hieruit zijn de faalkansen per aanvraag afgeleid en vervolgens zijn de corresponderende SIL-niveaus bepaald. Zie bijlage B voor de uitwerking van deze berekening.
- Voor de eisen met betrekking tot het veilig faalgedrag van de afsluitboom, VRI en MTM (bij uitval van de energievoorziening of de besturing) wordt verwezen naar de Basisspecificatie TTI van de LTS [8].
- Voor de te nemen maatregelen bij het falen van de afsluitboom, VRI, MTM, de besturing of de energievoorziening wordt verwezen naar de faaldefinities van de TTI, opgenomen in het Systeemontwerp van de LTS [9].

5.5 Filevermijding

Een filevermijdingssysteem is in feite alleen noodzakelijk in de gevallen dat andere maatregelen om de files te vermijden (zoals een grotere wegcapaciteit of het anderszins verbeteren van de doorstroming) niet haalbaar zijn, en:

- de frequentie van files in de tunnel zonder een filevermijdingssysteem zodanig hoog zou worden dat er niet meer aan de wettelijke veiligheidsnorm zou worden voldaan, of:
- zonder een filevermijdingssysteem niet zou kunnen worden voldaan aan de vereiste betrouwbaarheid van de veilige vluchtroute (zie paragraaf 5.2).

Indien een filevermijdingssysteem moet worden toegepast, bestaat dit in de meest simpele vorm uit een procedurele maatregel (zie paragraaf 4.2). Deze oplossing wordt ook als effectiever beschouwd dan een geautomatiseerd systeem, omdat de files kunnen ontstaan door verschillende oorzaken, en het meest adequate regelscenario afhangt van tal van factoren. Bij het automatiseren van de regelscenario's neemt de kans derhalve toe dat de maatregelen niet optimaal zijn, en/ofodeloze hinder veroorzaken voor het verkeer.

De LTS voorziet daarom nadrukkelijk niet in een geautomatiseerd systeem, maar in een procedurele maatregel (UPP-procedure N01, zie [10]) die alleen wordt ingezet als dit noodzakelijk is conform bovengenoemde criteria.

5.6 Calamiteitenknop en evacuatieknop

Naast de in de voorgaande hoofdstukken en paragrafen gespecificeerde geautomatiseerde systemen beschikt de tunneloperator (wegverkeersleider) conform de VRC in de bedieningcentrale op zijn desk over gemakkelijk bedienbare calamiteitenknoppen, die hij kan indrukken in geval van een calamiteit. Door het indrukken van deze knop (= menselijke beschermingslaag) worden de tunnelinstallaties van de geselecteerde tunnelbuis en de ondersteunende nevenbuis via één handeling in calamiteitenbedrijf respectievelijk calamiteitondersteunend geschakeld.

De calamiteitenknoppen zijn beschikbaar via 2 wegen:

1. Via het touch panel (MAP) van de AMX (deze oplossing is voorgeschreven LTS (na versie 1.2 SP1B2) in plaats van de eerder geprefereerde "fysieke" knop); er is sprake van 1 knop per tunnelbuis; de knop moet tenminste 3 seconden worden ingedrukt/aangeraakt om activering door toevallige aanraking te voorkomen; daarna heeft de wegverkeersleider nog 10 seconden¹⁸ te tijd om het ingaan van het calamiteitenbedrijf te herroepen (via de GUI, zie hierna); deze hersteltijd wordt aangeboden voor het geval dat de wegverkeersleider de knop van de verkeerde tunnelbuis heeft gekozen;
2. Via een muisklik op de GUI (Graphical User Interface) van de MMI (Man-Machine Interface); ook hier is sprake van 1 knop per tunnelbuis en 10 seconden hersteltijd na het aanklikken van de knop.

Naast de calamiteitenknoppen beschikt de wegverkeersleider op de GUI nog over evacuatieknoppen (1 per tunnelbuis) die hij kan aanklikken om (na het instellen van calamiteitenbedrijf + calamiteitondersteunend) alle acties die bijdragen aan het stimuleren van de evacuatie van de incidentbuis te activeren via een groepscommando. Na het aanklikken van de evacuatieknop wordt het evacuatiebedrijf ingesteld. Omdat de evacuatieknop in de LTS een state-keuze is, kan de WVJ desgewenst op ieder moment terug kan schakelen naar calamiteitenbedrijf zonder evacuatie. Er is daarom geen sprake van een hersteltijd bij het indrukken van de evacuatieknop.

De reactietijd van de calamiteitenknop en de evacuatieknop wordt overigens mede bepaald door de tijd die het bedieningscommando nodig heeft om van de verkeerscentrale via het VIC-net de tunnel te bereiken. Deze tijd bedraagt (rekening houdend met zeer ongunstige situaties waarbij een deel van het VIC-net in storing ligt en het signaal via een andere weg in de ring zijn weg moet zoeken) niet meer dan 2 seconden¹⁹.

In de navolgende tabellen 5.6.1 en 5.6.2 is per vluchtconcept aangegeven welke acties worden uitgevoerd bij het indrukken van de calamiteitenknop respectievelijk evacuatieknop.

¹⁸ Is parametreerbaar in LTS; 10 seconden is default-waarde.

¹⁹ Bij de geautomatiseerde veiligheidssystemen speelt een dergelijk tijdverlies niet, aangezien de automatische ingreep via de PLC's en de besturing loopt, die zich bij de tunnel bevinden. De automatische ingreep gaat dus buiten de verkeerscentrale om.

Tabel 5.6.1: Acties bij indrukken calamiteitenknop (CK)					
Nr.	Acties	Vluchtconcept			
		a- MTK met kopdeuren	b- MTK met uitgangsvluchtdeuren naar ondersteunende buis	c- Vluchtdeuren in middenwand	d- Dwarsverbanden
I	Algemeen				
I-1	Zo nodig vergrendelen deuren in vluchtroute die toegang geven tot ruimten anders dan vluchtroute	Ja	Ja	Ja	Ja
I-2	Vloeistofpompen middenkelder in regime "bergen" zetten.	Ja	Ja	Ja	Ja
I-3	Vuilvloeistofpompen in hoofdkelders uitschakelen.	Ja	Ja	Ja	Ja
I-4	Schoonvloeistofpompen in hoofdkelders in regime "bergen" zetten.	Ja	Ja	Ja	Ja
I-5	Schakelen drukverhogingsinstallatie van blusvoorziening (natte blusleiding) in toestand "blussen" (voldoende druk om te blussen)	Ja	Ja	Ja	Ja
II	Incidentbuis				
II-1	Inschakelen tunnelventilatie in incidentbuis op 100% van het calamiteitenvermogen (met rijrichting mee).	Ja	Ja	Ja	Ja
II-2	Schakelen verlichting incidentbuis op 100%	Ja	Ja	Ja	Ja
II-3	Afsluiten incidentbuis voor verkeer (MTM, J32-bord, VRI, afsluitboom)	Ja	Ja	Ja	Ja

Tabel 5.6.1: Acties bij indrukken calamiteitenknop (CK)					
Nr.	Acties	Vluchtconcept			
		a- MTK met kopdeuren	b- MTK met uitgangsvluchtdeuren naar ondersteunende buis	c- Vluchtdeuren in middenwand	d- Dwarsverbanden
III	Vluchtdeuren en veilige ruimte(n)				
III-1	Op vereiste niveau brengen mechanische overdrukventilatie in veilige ruimte(n)	Ja	Ja	N.v.t.	Ja
III-2	Vergrendelen uitgangsvluchtdeur(en) van veilige ruimte naar ondersteunende buis	N.v.t.	Ja	N.v.t.	Ja
III-3	Ontgrendelen met vertraging van vluchtdeuren van incidentbuis naar ondersteunende buis, dan wel uitgangsvluchtdeur(en) van veilige ruimte naar ondersteunende buis	N.v.t.	Ja	Ja	Ja
III-4	Schakelen verlichting veilige ruimte(n) op 100%	Ja	Ja	N.v.t.	Ja
III-5	Inschakelen bordjes met dynamische vluchtroute-aanduiding in veilige ruimte(n) (waarbij de juiste vluchtrichting wordt aangegeven).	Ja	Ja	N.v.t.	Ja
IV	Ondersteunende buis				
IV-1	Inschakelen tunnelventilatie in ondersteunende buis op vereiste niveau (resulterende ventilatierichting zelfde als ventilatie in incidentbuis).	Ja	Ja	Ja	Ja
IV-2	Schakelen verlichting ondersteunende buis op 100%	Ja	Ja	Ja	Ja

Tabel 5.6.1: Acties bij indrukken calamiteitenknop (CK)					
Nr.	Acties	Vluchtconcept			
		a- MTK met kopdeuren	b- MTK met uitgangsvluchtdeuren naar ondersteunende buis	c- Vluchtdeuren in middenwand	d- Dwarsverbanden
IV-3	Afsluiten ondersteunende buis voor verkeer (MTM, J32-bord, VRI, afsluitboom)	Ja	Ja	Ja	Ja
IV-4	Uitschakelen met vertraging van dynamische bordjes "Exit overzijde" en tegelijkertijd inschakelen van bordjes met dynamische vluchtrouteaanduiding in ondersteunende buis (waarbij de juiste vluchtrichting wordt aangegeven)	N.v.t.	N.v.t. (mits uitgangsvluchtdeuren zich dicht bij in- of uitgang ondersteunen de buis bevinden; anders: Ja)	Ja	Ja

N.B.: naast het schakelen van normaal bedrijf naar calamiteitenbedrijf (+ calamiteitondersteunend) door het indrukken van een calamiteitenknop door de wegverkeersleider kan het tunnelsysteem ook automatisch in calamiteitenbedrijf schakelen op basis van bepaalde detecties (al dan niet via standby-fase na detectie). In feite vinden dan dezelfde acties plaats als bij het indrukken van de calamiteitenknop. Een aantal van deze automatische acties behoort tot de scope van de veiligheidskritische functies (VKF1, VKF2 en VKF3), zie de paragrafen 5.2 t/m 5.4.

Tabel 5.6.2: Acties bij indrukken evacuatieknop (EK)					
Nr.	Acties	Vluchtconcept			
		a- MTK met kopdeuren	b- MTK met uitgangsvluchtdeuren naar ondersteunende buis	c- Vluchtdeuren in middenwand	d- Dwarsverbindingen
I Incidentbuis					
I-1	Inschakelen contourverlichting en geluidsbakens vluchtdeurindicatie incidentbuis	Ja (standaardbericht) (*)	Ja (standaardbericht) (*)	Ja (achtereenvolgens: bericht ontruiming_bij_vergrendelde_vluchtdeur, bericht ontruiming_bij_ontgrendelde_vluchtdeur en standaardbericht) (*)	Ja (standaardbericht) (*)
I-2	Afspelen vooraf opgenomen vluchtinstructies via omroep verkeersbuis (luidsprekerinstallatie)	Ja (omroepbericht ontruiming verkeersbuis) (*)	Ja (omroepbericht ontruiming verkeersbuis) (*)	Ja (omroepbericht ontruiming verkeersbuis) (*)	Ja (omroepbericht ontruiming verkeersbuis) (*)
I-3	Onderdrukken radio signaal via HF-systeem tijdens afspelen omroepbericht via luidsprekers + tonen tekstbericht op RDS-display autoradio.	Ja (tekstbericht) (*)	Ja (tekstbericht) (*)	Ja (tekstbericht) (*)	Ja (tekstbericht) (*)
II Veilige ruimte(n)					
II-1	Afspelen vooraf opgenomen vluchtinstructies via omroep veilige ruimte (luidsprekerinstallatie)	Ja (bericht ontruiming_veilige_ruimte) (*)	Ja (bericht ontruiming_veilige_ruimte) (*)	N.v.t.	Nee
II-2	Inschakelen verlicht pictogram boven uitgangsvluchtdeur veilige ruimte	N.v.t.	Ja (alleen bij uitgangsvluchtdeur van preferabele vluchtrichting)	N.v.t.	Ja

Tabel 5.6.2: Acties bij indrukken evacuatieknop (EK)					
Nr.	Acties	Vluchtconcept			
		a- MTK met kopdeuren	b- MTK met uitgangsvluchtdeuren naar ondersteunende buis	c- Vluchtdeuren in middenwand	d- Dwarsverbandingen
II-3	Inschakelen contourverlichting rondom uitgangsvluchtdeur veilige ruimte	N.v.t.	Ja (alleen bij uitgangsvluchtdeur van preferabele vluchtrichting)	N.v.t.	N.v.t.
II-4	Inschakelen geluidsbaken boven uitgangsvluchtdeur veilige ruimte	N.v.t.	Ja (alleen bij uitgangsvluchtdeur van preferabele vluchtrichting; achtereenvolgens: bericht ontruiming_bij_vergrendelde_vluchtdeuren en bericht ontruiming_bij_ontgrendelde_vluchtdeuren) (*)	N.v.t.	Ja (achtereenvolgens: bericht ontruiming_bij_vergrendelde_vluchtdeuren en bericht ontruiming_bij_ontgrendelde_vluchtdeuren) (*)
III	Ondersteunende buis				
III-1	Afspelen (met vertraging) van vooraf opgenomen vluchtinstructies via omroep verkeersbuis (luidsprekerinstallatie)	N.v.t.	Nee (tenzij dynamisch bord "Exit overzijde" / vluchtrouteaanduiding is aangebracht bij uitgangsvluchtdeur, zie par. 5.3; in dat geval bericht ontruiming_tunnel) (*)	Ja (bericht ontruiming_tunnel) (*)	Ja (bericht ontruiming_tunnel) (*)

(*) Specificatie berichten:

- Standaard-bericht geluidsbaken (duur circa 10 seconden): zie LTS 1.2 SP1 B2, BSTTI#9721; circa 1x per minuut afspelen.
- Bericht geluidsbaken ontruiming_bij_vergrendelde_vluchtdeur (duur circa 17 seconden): zie LTS 1.2 SP1 B2, BSTTI#9721; periodiek afspelen tot moment vluchtdeur ontgrendeld.

- Bericht geluidsbaken ontruiming_bij_ontgrendelde_vluchtdeur (duur circa 15 seconden): zie LTS 1.2 SP1 B2, BSTTI#9721; 2x afspelen na moment vluchtdeur ontgrendeld.
- Omroepbericht ontruiming_verkeersbuis (duur circa 40 seconden): zie LTS 1.2 SP1 B2, BSTTI#2886; circa 1x per minuut afspelen.
- Omroepbericht ontruiming_veilige_ruimte (duur circa 34 seconden): zie LTS 1.2 SP1 B2, BSTTI#8881; circa 1x per minuut afspelen.
- Omroepbericht ontruiming_tunnel (duur circa 30 seconden): "<ding dong> Attention, Attention. Verlaat de tunnel door de pijlen te volgen en loop door naar de verzamelplaats. <ding dong> Attention, Attention. Leave the tunnel by following the signs. Continue towards the assembly point."; circa 1x per minuut afspelen. Dit bericht moet nog worden opgenomen in de LTS.
- Tekstbericht RDS-display: zie LTS 1.2 SP1 B2, BSTTI#9970.

Gegeven het feit dat het in calamiteitenbedrijf schakelen van de installaties ook wordt ondersteund door geautomatiseerde veiligheidssystemen, waaronder de veiligheidskritische functies, kan de betrouwbaarheid van de calamiteitenknoppen (MAP/AMX en GUI) en de evacuatieknop (GUI) liggen in de orde van grootte van de door de VRC vereiste technische betrouwbaarheid van de ventilatie: 98% per aanspraak. Het ligt daarbij voor de hand om deze betrouwbaarheidseis te hanteren voor elke maatregel onder de knop afzonderlijk, waarbij een maatregel bestaat uit functioneel samenhangende acties.

Concreet moet elk van de onderstaande maatregelen worden uitgevoerd met een betrouwbaarheid van 98% per aanvraag/missie, waarbij voor de betreffende acties die deel uit maken van de maatregel wordt verwezen naar de voorgaande tabellen²⁰.

Calamiteitenknop:

- Vluchtweg in gereedheid brengen (acties I-1, II-2, III-1 t/m III-5, IV-2 en IV-4: bij vluchtconcepten anders dan MTK met kopdeuren tevens actie IV-3);
- Inschakelen ventilatie (actie II-2 en bij vluchtconcepten anders dan MTK met kopdeuren tevens actie IV-1);
- Afsluiten voor het verkeer van de tunnelbuizen die nodig zijn voor de afhandeling van het incident²¹ (acties II-3 en IV-3);
- In gereedheid brengen brandblusinstallatie (actie I-5);
- Schakelen vloeistofpompen (acties I-2 t/m I-4).

Evacuatieknop:

- Visueel en auditief accentueren vluchtroute (acties I-1, II-2, II-3 en II-4);
- Geven omroepberichten (vluchtinstructies) (acties I-2, I-3, II-1 en III-1).

Het vereiste betrouwbaarheidsniveau zoals hiervoor gespecificeerd sluit ook aan bij het feit dat we bij de tunneloperator ook nog te maken hebben met het aspect menselijk falen. Het heeft immers geen zin bovenmatig strenge betrouwbaarheidseisen te stellen aan de techniek als deze niet door de operator wordt gebruikt²².

²⁰ Als een actie bij een bepaald vluchtconcept niet van toepassing is ("n.v.t.") of niet wordt uitgevoerd ("Nee"), dan maakt de betreffende actie voor het betreffende vluchtconcept (uiteraard) geen deel uit van de maatregel en komt de actie ook niet ten laste van het betrouwbaarheidsbudget voor de maatregel.

²¹ Bij vluchtconcepten anders dan een MTK met kopdeuren zal de betrouwbaarheidseis voor het afsluiten van de tunnel die voortvloeit het in gereedheid brengen van de vluchtweg maatgevend zijn.

²² Voor de techniek geldt uiteraard wel dat voor de afzonderlijke installaties en componenten de maatgevende betrouwbaarheidseis moet worden aangehouden die volgt uit de betrouwbaarheidseisen die zijn gesteld aan de veiligheidskritische functies en de calamiteitenknop en de evacuatieknop.

Veel belangrijker is het om aan de operator zichtbaar te maken of het indrukken van de calamiteiten- of evacuatieknop het gewenste effect heeft, c.q. of alle maatregelen succesvol zijn geactiveerd. De operator moet derhalve na het indrukken van de calamiteitenknop (MAP/AMX of GUI) of evacuatieknop (GUI) op zijn beeldscherm (GUI) direct een overzicht krijgen van de status van de installaties "onder de knop":

- Geactiveerd, of:
- bezig met activeren, of:
- Niet geactiveerd (binnen de daarvoor gestelde tijd).

De operator moet vervolgens de mogelijkheid hebben om via een button in hetzelfde scherm (in de statuslijst) de maatregel c.q. installatie alsnog met een muisklik te activeren²³. Op deze wijze heeft de tunneloperator overzicht over de gang van zaken, bevindt de betrokkenheid van de operator zich op een adequaat niveau en is de betrouwbaarheid van het schakelen naar calamiteitenbedrijf (met of zonder evacuatie) eveneens op een adequaat niveau geborgd. Consequentie van deze filosofie is wel dat er zeer strenge eisen worden gesteld aan de betrouwbaarheid van de informatievoorziening aan de operator, over de status van de maatregelen/installaties. Omdat het hier alleen gaat om signalering en melding wordt een betrouwbaarheid van 99,5% haalbaar geacht (het VIC-net, een belangrijke schakel in de signalering en melding, heeft een betrouwbaarheid van 99,9%).

Samenvattend gelden de volgende eisen voor de calamiteiten- en evacuatieknop:

Tabel 5.6.3: Overzicht eisen Calamiteitenknop	
Sense	"Indrukken" knop (aanraken of aanklikken) door wegverkeersleider (WVL), via MAP/AMX of GUI.
Logic	
Actuate	<ul style="list-style-type: none"> - Uitvoeren acties conform tabel 5.6.1. - Terugkoppeling status uitvoering acties op GUI.
Time (zie ook bijlage G)	<p><u>Via MAP/AMX:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Benodigde aanraaktijd knop: 3 seconden; - Hersteltijd: 10 seconden (default-waarde; is parametreerbaar in LTS); - Transmissie via netwerken, inclusief VIC-net: 2 seconden; - Uitvoeren actie: afhankelijk van actie; - Totaal: 15 seconden + benodigde tijd uitvoeren actie. <p><u>Via GUI:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Hersteltijd: 10 seconden (default-waarde; is parametreerbaar in LTS); - Transmissie via netwerken, inclusief VIC-net: 2 seconden; - Uitvoeren actie: afhankelijk van actie/installatie; - Totaal: 12 seconden + benodigde tijd uitvoeren actie. <p><u>Terugkoppeling status op GUI (op enig moment):</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Vaststelling status door besturing tunnel: 5 seconden; - Transmissie statusmelding via netwerken, inclusief VIC-net: 2 seconden; - Totaal: 7 seconden.

²³ In de MMI volgens de LTS is hier in voorzien.

SIL	Uitvoeren acties: 1 Terugkoppeling status op GUI: 2
Toegestane faalkans	<ul style="list-style-type: none"> - Uitvoering acties: < 0,02 per actie per aanvraag / missie (missieduur = 2 uur), ook bij het separaat activeren van de maatregel indien activering via calamiteitenknop niet tot het gewenste resultaat heeft geleid); - Terugkoppeling status uitvoering acties op GUI: < 0,005 per actie per aanvraag / missie (missieduur = 2 uur).

Tabel 5.6.4: Overzicht eisen Evacuatieknop

Sense	"Indrukken" knop (aanklikken) door wegverkeersleider (WVL), via GUI.
Logic	
Actuate	<ul style="list-style-type: none"> - Uitvoeren acties conform tabel 5.6.2. - <u>Terugkoppeling status uitvoering acties op GUI.</u>
Time (zie ook bijlage H)	<ul style="list-style-type: none"> - Transmissie via netwerken, inclusief VIC-net: 2 seconden; - Uitvoeren actie: afhankelijk van actie/installatie; - Totaal: 2 seconden + benodigde tijd uitvoeren actie. <p><u>Terugkoppeling status op GUI (op enig moment):</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Vaststelling status door besturing tunnel: 5 seconden; - Transmissie statusmelding via netwerken, inclusief VIC-net: 2 seconden; - Totaal: 7 seconden.
SIL	Uitvoeren acties: 1 Terugkoppeling status op GUI: 2
Toegestane faalkans	<ul style="list-style-type: none"> - Uitvoering acties: < 0,02 per actie per aanvraag / missie (missieduur = 2 uur), ook bij het separaat activeren van de maatregel indien activering via evacuatieknop niet tot het gewenste resultaat heeft geleid); - Terugkoppeling status uitvoering acties op GUI: < 0,005 per actie per aanvraag / missie (missieduur = 2 uur).

Opmerkingen:

- Bovengenoemde betrouwbaarheidseisen met betrekking tot de calamiteitenknop en de evacuatieknop hebben alleen betrekking op de techniek, c.q. de keten vanaf de knop tot en met de functievervullers/installaties in de tunnel om de acties uit te voeren (en de status daarvan terug te koppelen naar de GUI). Dus exclusief de betrouwbaarheid van de wegverkeersleider (WVL). De betrouwbaarheid van de WVL moet worden geborgd door duidelijke procedures en een adequate opleiding, training en oefening.
- De benodigde tijd om een actie uit te voeren met een installatie/functievervuller kan grotendeels al worden ontleend aan de in paragraaf 5.2 t/m 5.4 gepresenteerde informatie met betrekking tot de veiligheidskritische functies. Aanvullend gelden de volgende eisen:
 - Schakelen pompen, contourverlichting, geluidsbakens en omroep: maximaal 5 seconden (na besturingscommando).

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Op basis van een analyse van de VRC, een gevarenanalyse en een kwantificering van de veiligheidseffecten met QRA-tunnels (berekening RRF's), zijn de volgende geautomatiseerde veiligheidsfuncties in tunnels in algemene zin te beschouwen als "veiligheidskritisch", omdat ze een SIL-niveau van 1 of hoger moeten hebben:

1. Automatisch inschakelen van de tunnelventilatie;
2. Automatisch in gereedheid brengen van de veilige vluchtroute;
3. Voorkomen dat automatische afsluiting van de tunnelbuizen onbeheerst gebeurt.

Bij lange tunnels, met een hoge kans op files, kan aanvullend de volgende functie "veiligheidskritisch" zijn²⁴:

4. Het voorkomen dat de staart van een file (nagenoeg stilstaand verkeer) die benedenstrooms van de tunnel ontstaat de tunnel ingroeit (filevermijding).

Verder kan, los van de vraag of een veiligheidsmaatregel een geautomatiseerd systeem is dat onder de scope van de IEC-61508 valt, worden geconcludeerd dat de volgende veiligheidsmaatregelen een significante invloed hebben op de reductie van het groepsrisico in de tunnel, omdat de RRF (onder sommige omstandigheden) duidelijk hoger is dan de RRF van de overige veiligheidsmaatregelen:

- Vluchtdeuren
- Overdrukventilatie vluchtgang
- Tunnelventilatie
- Tunneloperator (bij categorie A tunnels)
- Filevermijding (bij lange tunnels)
- Riolering
- (Regeling) ingangsverlichting

De overige veiligheidsmaatregelen hebben een lagere RRF, c.q. deze maatregelen hebben ieder afzonderlijk weinig effect op het (verlagen van het) groepsrisico. Dit komt omdat er bij veel veiligheidsmaatregelen in de tunnel in feite sprake is van een zekere "functionele redundantie": bij falen van een bepaalde maatregel is er vaak nog een andere maatregel die ook voorziet in de functie van de falende maatregel.

Zo is er bijvoorbeeld sprake van verschillende detectiemiddelen die brand kunnen detecteren en zijn er verschillende "protection layers" die in kunnen grijpen indien een brand wordt gedetecteerd. Deze functionele redundantie betekent niet noodzakelijkerwijs dat bepaalde veiligheidsmaatregelen overbodig zijn (de onderhavige analyse is er niet op gericht om na te gaan welke veiligheidsvoorzieningen kunnen vervallen). Wel is aangetoond dat de functionele redundantie leidt tot minder strenge betrouwbaarheidseisen voor elke maatregel afzonderlijk.

²⁴ De RWS-tunnelstandaard voorziet niet in een geautomatiseerd filevermijdingssysteem, maar in een procedurele maatregel. In verreweg de meeste gevallen zal dit voldoende zijn (zie paragraaf 5.5). Indien een geautomatiseerd systeem is een aanvullende maatregel, die alleen moet worden overwogen indien dit noodzakelijk is om aan de wettelijke veiligheidseisen te voldoen of de betrouwbaarheidseisen voor de veilige vluchtroute (zie paragraaf 5.3).

6.2 Aanbevelingen

Pas de in hoofdstuk 5 genoemde SIL-niveaus of betrouwbaarheidseisen toe bij de geautomatiseerde veiligheidsfuncties (veiligheidskritische functies).

Zorg dat de vereiste betrouwbaarheid wordt bereikt c.q. aangetoond door toepassing van een gevalideerde methode, dus de IEC-61508 of een foutenboom-analyse waarbij de betrouwbaarheid van de softwarecomponenten in de foutenboom worden gekwantificeerd met TOPAAS (en waarbij het totstandkomingsproces van de software "aan de voorkant" zodanig wordt ingericht, dat dit leidt tot een resultaat dat qua betrouwbaarheid hoog scoort in TOPAAS).

Toepassing van TOPAAS moet in dit kader worden gezien in samenhang met de toepassing van de LTS. Toepassing van de LTS draagt namelijk bij aan de borging van de kwaliteit van de software enerzijds en het proces van totstandkoming anderzijds. De LTS specificeert immers de architectuur van de besturing en het gewenste besturingsgedrag van de diverse systemen in detail [8], [9]. Bovendien stelt de LTS eisen aan het totstandkomingsproces (ontwerp en realisatie) van de besturingssoftware, via de Werkwijze Aanleg Tunnels (WWAT) [11] en de Generieke Proceseisen (GPE) [12]. Dit betekent dat de LTS een goede basis vormt voor een goede invulling van de aspecten die in TOPAAS worden beoordeeld.

Anderzijds kleeft er een aantal praktische bezwaren aan de toepassing van de IEC-61508, die ook bij een benchmark met de Engelse Highways Agency, het Vlaams Agentschap Wegen en Verkeer en het Franse CETU zijn bevestigd [13]:

- Beperkte keuze uit leveranciers die het volledige certificatie-traject van (deel)systemen en componenten conform IEC-61508 kunnen en willen aangaan;
- Samenhangend hier mee: problemen om voor de hele keten aan de eisen te voldoen;
- Hoge life cycle kosten en onderhoudskosten (complexiteit onderhoud neemt toe doordat de IEC-61508 ook hier eisen aan stelt).
- Niet voor alle systemen zijn betrouwbaarheidsgegevens voorhanden (ook een probleem bij een foutenboom-analyse met TOPAAS).

Al met al bestaat er een voorkeur voor de toepassing van TOPAAS in combinatie met de LTS, en de IEC-61508 niet dwingend voor te schrijven (toepassing van de IEC-61508 is desgewenst wel mogelijk binnen de kaders van de LTS en TOPAAS).

Besteed naast de geautomatiseerde veiligheidssystemen nog nadere aandacht aan de betrouwbaarheid van de calamiteitenknop en de evacuatieknop (zie paragraaf 5.6) Toon ook de betrouwbaarheid van deze voorzieningen aan met een foutenboom-analyse.

Pas bij de overige veiligheidsvoorzieningen een betrouwbaarheid toe die in de praktijk eenvoudig haalbaar is met COTS, en/of stem de betrouwbaarheid af op de beschikbaarheidseisen aan de tunnel. Deze betrouwbaarheid hoeft in principe niet te worden aangetoond met een foutenboom-analyse, maar moet in de ontwerpdocumentatie wel aannemelijk worden gemaakt.

Ten slotte:

- Zorg dat het falen van de installaties / maatregelen die deel uit maken van de keten van de veiligheidskritische functies of de calamiteitenknop en de evacuatieknop automatisch worden gemeld aan de tunneloperator (voor zover deze direct impact hebben op de beschikbaarheid van de tunnel) en de technisch beheerder, zodat compenserende maatregelen en herstelmaatregelen kunnen worden genomen.
- Zorg dat ook het falen van de regeling van de ingangsverlichting automatisch aan de operator wordt gemeld (en de technisch beheerder).
- Zorg voor een goede opleiding, training en oefening voor de tunneloperator;
- Pas een onderhoudsregime op de riolering van de tunnel toe die aansluit bij het (relatief hoge) veiligheidseffect van deze maatregel.

Lijst van aangehaalde literatuur

1. NEN-EN-IEC-61508 (2010), Functionele veiligheid van elektrische/ elektronische/ programmeerbare elektronische systemen verband houdend met veiligheid:
 - Deel 1: Algemene eisen;
 - Deel 2: Richtlijnen voor elektrische/ elektronische/ programmeerbare elektronische systemen verband houdend met veiligheid;
 - Deel 3: Eisen voor programmatuur
 - Deel 4: Definities en afkortingen
 - Deel 5: Voorbeelden van methoden voor het vaststellen van veiligheidsniveaus
 - Deel 6: Richtlijnen voor de toepassing van IEC-61508-2 en IEC-61508-3.
 - Deel 7: Overzicht van technieken en voorzieningen.
2. TOPAAS, Een structurele aanpak voor faalkansanalyse van software intensieve systemen, Rijkswaterstaat Dienst Infrastructuur, versie Definitief 2.0, 1 april 2011
3. Handleiding TOPAAS, Een structurele aanpak voor faalkansanalyse van software intensieve systemen, Rijkswaterstaat Dienst Infrastructuur, versie Definitief 0.7, 10 januari 2013
4. Veiligheidsrichtlijnen deel C (VRC), inclusief bijlagen, Steunpunt Tunnelveiligheid, 15 juni 2009.
5. Gebruikershandleiding QRA-tunnels 2.0, Steunpunt Tunnelveiligheid, doc.nr. 4818-2012-0004, versie Definitief 4, 2 februari 2012.
6. QRA-tunnels 2.0 Achtergronddocument, Steunpunt Tunnelveiligheid, doc.nr. 4818-2012-0005, versie Definitief 1, 2 februari 2012.
7. NEN-EN-IEC-61511 (2005), Functionele veiligheid, Veiligheidssystemen voor de procesindustrie:
 - Deel 1: Raamwerk, definities, systeem, hardware- en software-eisen;
 - Deel 2: Richtlijnen voor de toepassing van IEC-61508-1;
 - Deel 3: Richtlijnen voor de bepaling van de vereiste veiligheidsintegriteitsniveaus.
8. Basisspecificatie TTI RWS Tunnelsysteem, Rijkswaterstaat Landelijk Tunnelregisseur, versie Definitief 1.2 SP1, 1 20 september 2013, doc.nr. RWS-1264869. *(Noot: dit document wordt regelmatig geactualiseerd; zie website RWS voor meest actuele versie).*
9. Systeemontwerp RWS Tunnelsysteem, Rijkswaterstaat Landelijk Tunnelregisseur, versie Definitief 1.2 SP1, 20 september 2013, doc.nr. RWS-1266157. *(Noot: dit document wordt regelmatig geactualiseerd; zie website RWS voor meest actuele versie).*
10. Bedrijfsprocessen (UPP) RWS Tunnelsysteem, Rijkswaterstaat Landelijk Tunnelregisseur, versie Definitief 1.2.1, 20 september 2013, doc.nr. RWS-1462429. *(Noot: dit document wordt regelmatig geactualiseerd; zie website RWS voor meest actuele versie).*

11. Werkwijze aanleg tunnels, Rijkswaterstaat Landelijk Tunnelregisseur, versie Definitief 1.2 SP1, d.d. 20 september 2013, doc.nr. RWS-1615243 (*Noot: dit document wordt regelmatig geactualiseerd; zie website RWS voor meest actuele versie*).
12. Generieke Proceseisen realisatie TTI, Rijkswaterstaat Landelijk Tunnelregisseur, versie Definitief 1.2 SP1B2, 1 juli 2014, doc.nr. RWS-1435484 (*Noot: dit document wordt regelmatig geactualiseerd; zie website RWS voor meest actuele versie*).
13. Functional Safety of Tunnel Systems, A benchmark of the practices of the Highways England (United Kingdom), Agentschap Wegen en Verkeer (Flanders), Centre d'Études des Tunnel (France) and Rijkswaterstaat (The Netherlands), doc.nr. 4818-2014-0003, October 5 2015.
14. Verkeerskundige richtlijnen autosnelweginstrumentatie (VRAI), Rijkswaterstaat, 23 maart 2000.
15. Veilig onderbreken Landverkeer bij Brugopeningen" (VOLB), Onderdeel Landelijke Brug- en Sluisstandaard, RWS-VWM, versie 2.2, 31 maart 2015 (vrijgegeven, niet vastgesteld).
16. Verslag van het overleg veilig onderbreken verkeer bij tunnelafsluiting d.d. 2 december 2015, tussen Sjoerd Beumer (VWM); Hans Bokma (WVL); Ronald Mante (GPO); Marco Schreuder (WVL).
17. Aanbevelingen ventilatie van verkeerstunnels, Rijkswaterstaat, Steunpunt Tunnelveiligheid, december 2005, ISBN 90-369-0001-8.

Bijlage A Gevarenanalyse

In het kader van de vaststelling van de functionele veiligheidssystemen (geautomatiseerde veiligheidssystemen) is een gevarenanalyse uitgevoerd, om na te gaan in welke mate de verschillende beschermingslagen uit het Protection Layer model (zie paragraaf 2.3) bijdragen aan het beheersen van de gevaren. De resultaten van deze analyse zijn weergegeven in de onderstaande tabel.

Nr.	Gevaren (hazards)	Protection Layers + toelichting 1 = Inherent veilig ontwerp 2 = Automatische beschermingslaag 3 = Menselijke beschermingslaag 4 = Autonome beschermingslaag 5 = Actieve beschermingslaag 6 = Passieve beschermingslaag 7 = Hulpverleningslaag	Functionele veiligheidssystemen (in betekenis IEC-61508)
A.	Verkeer		
A.1	Frontale botsing (spookrijder)	1, 3, 7 Het risico wordt met name beheerst door een inherent veilig ontwerp (1 rijrichting per tunnelbuis) in combinatie met het ingrijpen door de operator (afkruisen rijstroken, afsluiten tunnel e.d.) indien er een spookrijder wordt gesignaleerd. Noch de VRC, noch de tunnelstandaard van de LTR voorziet in een aanvullend geautomatiseerd veiligheidssysteem ter bescherming tegen spookrijders (bijvoorbeeld afkruisen rijstrook spookrijder op basis van detectie tegengestelde rijrichting). De vraag is ook of een dergelijk systeem wenselijk is gegeven het feit dat het middel bij disfunctioneren erger kan zijn dan de kwaal.	N.v.t.
A.2	Frontale botsing (tegenverkeer bij onderhoud)	1, 2, 3, 7 Preventieve maatregelen door snelheidsverlaging, evt. scheiding tussen rijrichtingen, enz. Er is geen aanvullende automatische functie om bij een desondanks dreigende botsing in te grijpen.	N.v.t.
A.3	Kop-staart botsing	1, 2, 3, (4), 7 Risico wordt met name beheerst door combinatie inherent veilig tunnelontwerp en het verkeerssysteem (MTM) dat snelheidsverlaging instelt bij detectie langzaam rijdend of stilstaand verkeer. Er zou kunnen worden voorzien in een geautomatiseerd systeem (beschermingslaag 4) om nagenoeg stilstaand verkeer in de tunnel te voorkomen, en daarmee de kans op botsingen op de staart van een file in de tunnel (met mogelijk nog brand als gevolg) te verkleinen. Dit heeft met name zin bij tunnels waarbij de kans op een file benedenstrooms van de tunnel relatief hoog is.	Eventueel voorkomen van nagenoeg stilstaand verkeer in de tunnels, als gevolg van een file benedenstrooms van de tunnel: – SOS-detectie – Beperken toestroom verkeer tunnel in bij detectie (MTM, tunneldosering e.d.), of: – Stimuleren doorstroming verkeer benedenstrooms van de tunnel (b.v. openstellen spitsstrook).

Nr.	Gevaren (hazards)	Protection Layers + toelichting 1 = Inherent veilig ontwerp 2 = Automatische beschermingslaag 3 = Menselijke beschermingslaag 4 = Autonome beschermingslaag 5 = Actieve beschermingslaag 6 = Passieve beschermingslaag 7 = Hulpverleningslaag	Functionele veiligheidssystemen (in betekenis IEC-61508)
A.4	Botsing tegen obstakel op weg (incl. bijvoorbeeld voertuigen die reeds zijn gebotst)	1, 2, 3, 7 Automatische afkruising van een rijstrook bij detectie van een blokkade, conform hoofdstuk 9 van de VRC, vindt niet plaats, omdat deze functie vooralsnog buiten de scope van het gecertificeerde MTM-systeem valt en ook niet is opgenomen in de tunnel-standaard van de Landelijk tunnelregisseur.	N.v.t.
A.5	Zijdelingse botsing	1, 3, 7 Risico kan desgewenst worden beheerst door maatregelen als inhaalverbod, "keep your lane" of scheiding door barrier (inherent veilig ontwerp). Geen verdere geautomatiseerde veiligheidssystemen om in te grijpen bij dreigende botsing (is op de open weg ook geen sprake van).	N.v.t.
A.6	Botsing tegen tunnelwand	1, 3, 7 Risico wordt met name beheerst door overzichtelijk wegontwerp en barriers (inherent veilig ontwerp).	N.v.t.
B.	Meteo		
B.1	Verblinding door zonlicht	1, 2 Zonodig maatregelen om zonlicht af te schermen bij oost-west oriëntatie tunnel (inherent veilig ontwerp).	N.v.t.
B.2	Zwart gat (ongelijkmatige overgang van licht naar donker bij binnen rijden tunnel)	1, 2, 3, 4 Risico's worden met name beheerst door eventuele snelheidsverlaging (MTM + evt. operator) in combinatie met automatische regeling verlichting tunnelingang (overgangszone) op basis van meting daglicht (beschermingslaag 4). Is overdag van belang, met name op zonnige dagen.	Automatisch regelen verlichting overgangszone tot juiste niveau, afhankelijk van lichtniveau buiten
B.3	Slecht zicht (neerslag, mist, beslagen voorruit e.d.)	2 Risico wordt beheerst door voertuigtechniek en door MTM-systeem, dat automatisch snelheidsbeperking instelt bij detectie langzaam rijdend of stilstaand verkeer.	N.v.t.
B.4	Water op wegdek	3 Beheersing van dit risico vindt plaats door de operator (afsluiten tunnel), op basis van camerabeelden en/of meldingen van het niveau in de waterkelders. Er is verder geen aanvullend geautomatiseerd veiligheidssysteem dat ingrijpt bij (dreigend) water op wegdek.	N.v.t.

Nr.	Gevaren (hazards)	Protection Layers + toelichting 1 = Inherent veilig ontwerp 2 = Automatische beschermingslaag 3 = Menselijke beschermingslaag 4 = Autonome beschermingslaag 5 = Actieve beschermingslaag 6 = Passieve beschermingslaag 7 = Hulpverleningslaag	Functionele veiligheidssystemen (in betekenis IEC-61508)
B.5	Gladheid (sneeuw, ijzel e.d.)	2 Gladheid zal met name optreden buiten de tunnel. Risico wordt beheerst door voertuigtechniek en door MTM-systeem, dat automatisch snelheidsbeperking instelt bij detectie langzaam rijdend of stilstaand verkeer.	N.v.t.
B.6	Wind	1 Risico eventueel te beheersen met windschermen o.l.d.	N.v.t.
B.7	Blikseminslag	1 Invloed van bliksem op ongevalskans is verwaarloosbaar. TTI zijn beschermd tegen blikseminslag (inherent veilig ontwerp). Kans dat blikseminslag juist optreedt op moment dat er een ongeval in de tunnel plaatsvindt is eveneens verwaarloosbaar.	N.v.t.
C. Waterhuishouding en geofysica			
C.1	Inundatie tunnel	1 Als de polder waarin de tunnel zich bevindt onderloopt (inclusief tunnel) is tunnelveiligheid niet relevant meer.	N.v.t.
C.2	Aardbeving	1 Wordt beheerst door inherent veilig ontwerp. Constructie moet volgens normen (eurocode e.d.) bestand zijn tegen aardbeving. Indien netstroom en/of besturing uitvallen wordt de tunnel gecontroleerd afgesloten. Kans dat aardbeving juist optreedt op moment dat er een ongeval in de tunnel plaatsvindt is eveneens verwaarloosbaar.	N.v.t.
D. Disfunctioneren tunnelsysteem			
D.1	Uitval energievoorziening	1, 3, 4 Kans op algehele stroomuitval wordt beperkt door toepassing noodstroomvoorziening naast netstroomvoorziening (inherent veilig ontwerp). Indien de netstroomvoorziening en de noodstroomvoorziening beiden falen, wordt de tunnel automatisch beheerst afgesloten, met behulp van de energie van de no-break (beschermingslaag 4). Als de no-break ook faalt moet de tunnel "handmatig" door het wegpersoneel worden afgesloten.	Automatisch beheerst afsluiten tunnel bij uitval netstroom + noodstroomvoorziening

Nr.	Gevaren (hazards)	Protection Layers + toelichting 1 = Inherent veilig ontwerp 2 = Automatische beschermingslaag 3 = Menselijke beschermingslaag 4 = Autonome beschermingslaag 5 = Actieve beschermingslaag 6 = Passieve beschermingslaag 7 = Hulpverleningslaag	Functionele veiligheidssystemen (in betekenis IEC-61508)
D.2	Uitval centrale bediening	1, 4 Bij uitval centrale bediening wordt de tunnel automatisch gecontroleerd afgesloten (beschermingslaag 4), door de "heartbeat" of "watchdog", die continu controleert of de centrale bediening nog functioneert .	Automatisch afsluiten tunnel bij falen centrale bediening
D.3	Uitval besturing	1, 3 Tunnel kan in dat geval gecontroleerd worden afgesloten (door de operator) via de noodbediening.	N.v.t.
D.4	Onbedoeld functioneren VeVa	1, 3 Moet bij voorkeur worden beheerst door inherent veilig ontwerp (fysieke vergrendeling o.l.d.). Aangezien VeVa in het dagelijks proces niet wordt gebruikt, (alleen in onderhoudssituatie e.d.) is dit in principe mogelijk (voor gebruik ter plekke ontgrendelen).	N.v.t.
D.5	Onbeheerst neergaan afsluitboom	1, 3, 4 Indien de tunnel (automatisch) wordt afgesloten bij een (vermoeden van) calamiteit, dient dit beheerst te gebeuren: eerst snelheidsverlaging met MTM, daarna VRI op "rood" en daarna afsluitboom neer. De kans op een ongeval bij het onbeheerst neergaan van een afsluitboom is vrij groot: een voertuig botst tegen de afsluitboom en/of een achterop komend voertuigen botst tegen een voertuig dat remt voor de afsluitboom. De kans op doden bij een dergelijk ongeval is relatief groot. Er kan hier dus niet worden volstaan met een inherent veilig ontwerp, zoals bijvoorbeeld een lichte afsluitboom die afbreekt bij aanrijding. Er moeten maatregelen worden getroffen om het onbeheerst neergaan van de afsluitboom tegen te gaan (beschermingslaag 4).	Bewaking onbeheerst neergaan afsluitboom
D.6	Onbedoeld functioneren VRI	1, 3, 4 Betreft het onbeheerst op "rood" gaan van de VRI, dat wil zeggen voordat eerst een snelheidsverlaging is ingesteld (MTM) met het bijbehorende risico van kop-staart botsingen. Net als bij de afsluitboom (D.5) moeten maatregelen worden genomen om dit te voorkomen (beschermingslaag 4).	Bewaking onbeheerst op "rood" gaan VRI

Nr.	Gevaren (hazards)	Protection Layers + toelichting 1 = Inherent veilig ontwerp 2 = Automatische beschermingslaag 3 = Menselijke beschermingslaag 4 = Autonome beschermingslaag 5 = Actieve beschermingslaag 6 = Passieve beschermingslaag 7 = Hulpverleningslaag	Functionele veiligheidssystemen (in betekenis IEC-61508)
D.7	Vallende objecten (TTI e.d.)	1 Risico wordt beheerst door inherent veilig ontwerp: deugdelijke bevestiging aan het plafond, al dan niet met een extra veiligheidskabel om te voorkomen dat installaties naar beneden vallen bij losraken van plafond. De ventilatoren vormen het grootste risico, deze kunnen losraken door bijvoorbeeld trillingen bij het in- en uitschakelen. Daarnaast kunnen installaties, bijvoorbeeld signaalgevers, los raken door bijvoorbeeld aanrijding.	N.v.t.
E.	Brand en gevaarlijke stoffen		
E.1	Vlammen, warmtestraling	6, 7 Beheersing brand in voertuigen (en daarmee bescherming direct betrokken slachtoffers) valt buiten de scope van tunnelsysteem. Omvang plasbrand wordt beperkt door het rioleringsstelsel (beschermingslaag 6). tunnel).	N.v.t.
E.2	Rook (hitte, toxiciteit)	1, 3, 5, 7 Voor de mensen voor het brandongeval is de langsventilatie van belang. Voor de mensen voorbij het brandongeval zijn de vluchtvoorzieningen van belang. Het starten van de ventilatie en het in gereedheid brengen van de veilige vluchtroute kan door de operator worden geïnitieerd. Daarnaast wordt volgens de VRC de ventilatie automatisch opgestart en wordt de veilige vluchtroute automatisch in gereedheid gebracht (beschermingslaag 5). Tevens wordt de tunnelbuis automatisch afgesloten (beschermingslaag 4).	Automatische opstart ventilatie incidentbuis (al dan niet als onderdeel van stand-by fase na detectie of calamiteitenbedrijf) op basis van zichtmeting, of branddetectie, of spuitmond slanghaspel uitnemen, of draagbaar brandblusapparaat uitnemen. Automatisch inschakelen ventilatie nevenbuis (om kortsluiting rook te voorkomen) Automatisch in gereedheid brengen vluchtroute Automatisch afsluiten tunnel
E.3	Explosie instantaan	1, 7 Risico kan alleen worden beheerst door categoriekeuze tunnel (A, B, C, D of E conform ADR), dus inherent veilige maatregelen. Overige maatregelen vallen buiten scope tunnelsysteem.	N.v.t.

Nr.	Gevaren (hazards)	Protection Layers + toelichting 1 = Inherent veilig ontwerp 2 = Automatische beschermingslaag 3 = Menselijke beschermingslaag 4 = Autonome beschermingslaag 5 = Actieve beschermingslaag 6 = Passieve beschermingslaag 7 = Hulpverleningslaag	Functionele veiligheidssystemen (in betekenis IEC-61508)
E.4	Explosie met vertraging	1, 3, 7 In tegenstelling tot instantane explosie kan bij een met vertraging optredende explosie (of een risico daartoe) nog worden ingegrepen door de operator.	N.v.t.
E.5	Toxische gassen en dampen	1, 3, 7 Voor de mensen voor het ongeval is de langsventilatie van belang. Voor de mensen voorbij het ongeval zijn de vluchtvoorzieningen van belang. Het starten van de ventilatie en het in gereedheid brengen van de veilige vluchtroute moet door de operator worden geïnitieerd. Aangezien er geen detectiemiddelen in de tunnel zijn voor toxische dampen is er hierbij geen sprake van ondersteuning door een geautomatiseerd veiligheidssysteem, zoals dat bij brand wel het geval is (zie bij E.2).	N.v.t.
F.	Terrorisme	Bij terroristische actie worden een of meer van de bovengenoemde gevaren/hazards manifest. Kans op terroristische acties is dermate klein dat het risicoprofiel van de gevaren hier niet wezenlijk door wordt gewijzigd.	N.v.t.

Bijlage B Berekening Risk Reduction Factoren

Algemene uitgangspunten

Voor de berekening van de RRF's is gebruik gemaakt van QRA-tunnels. Daarbij is als referentie uitgegaan van een tunnelbuis met de configuratie en verkeerssituatie conform buis Oost 2 van de Tweede Coentunnel:

Geometrie				
Naam	Waarde	Eenheid	Domein	Omschrijving
L_buis	765	m	[80; 20000]	Lengte (gesloten deel) van de tunnelbuis
L_neer	382.5	m	[0; L_buis]	Lengte neergaand deel van de tunnelbuis
L_hor	0	m	[0; L_buis - L_neer]	Lengte horizontale deel van de tunnelbuis
L_op	382.5	m	[0; L_buis]	Lengte opgaand deel van de tunnelbuis
B_buis	15	m	[3; 30]	Breedte van het wegdek (tussen opstaande randen)
L_hart	100	m	[30; L_buis]	Hart-op-hart afstand van de vluchtdeuren
N_rij	3	-	[1; 6]	Aantal rijstroken in de tunnelbuis
N_tot_rijstroken	5	-	[N_rij; 30]	Totaal aantal rijstroken in de tunnelbuizen voor verkeer van de tunnel
N_vlucht	1	-	[0; 2]	Aantal vluchtstroken in de tunnelbuis

Periode en verkeersintensiteiten				
Naam	Waarde	Eenheid	Domein	Omschrijving
T_spits	11	uur	(0; 12)	Gemiddeld aantal uren 'spits' per etmaal in de tunnelbuis
T_nacht	6	uur	(0; 12)	Gemiddeld aantal uren 'nacht' per etmaal in de tunnelbuis
T_dag	7	uur	(0; 24)	Aantal uren per etmaal dat het 'dag' (niet spits of nacht) is
I_buis	27300000	mvt/jaar	[1E3; 1E9]	Verkeersintensiteit per jaar in de tunnelbuis
I_max	2000	mvt/uur	[1; 3000]	Maximale verkeerscapaciteit per rijstrook
I_spitsuur	4487.67	mvt/uur	(0; I_max . N_rij]	Gemiddelde verkeersintensiteit in de buis per spitsuur
I_spits	18017995.05	mvt/jaar	(0; 1E9]	Verkeersintensiteit tijdens de 'spits' per jaar
I_nachtuur	747.945	mvt/uur	(0; I_max . N_rij]	Gemiddelde verkeersintensiteit in de buis per nachtuur
I_nacht	1637999.55	mvt/jaar	(0; 1E9]	Verkeersintensiteit tijdens de 'nacht' per jaar
I_dag	7644005.4	mvt/jaar	(0; 1E9]	Verkeersintensiteit tijdens de 'dag' per jaar
I_daguur	2991.782935	mvt/uur	[0; 1E9]	Gemiddelde verkeersintensiteit per 'daguur'

Verkeerssamenstelling				
Naam	Waarde	Eenheid	Domein	Omschrijving
A_auto_s	0.89	-	[0; 1]	Fractie personenauto's (of motor) tijdens de 'spits'
A_auto_d	0.89	-	[0; 1]	Fractie personenauto's (of motor) tijdens de 'dag'
A_auto_n	0.89	-	[0; 1]	Fractie personenauto's (of motor) tijdens de 'nacht'
A_bus_s	0.01	-	[0; 1]	Fractie bussen tijdens de 'spits'
A_bus_d	0.01	-	[0; 1]	Fractie bussen tijdens de 'dag'
A_bus_n	0.01	-	[0; 1]	Fractie bussen tijdens de 'nacht'
A_vracht_s	0.1	-	[0; 1]	Fractie vrachtauto's tijdens de 'spits'
A_vracht_d	0.1	-	[0; 1]	Fractie vrachtauto's tijdens de 'dag'
A_vracht_n	0.1	-	[0; 1]	Fractie vrachtauto's tijdens de 'nacht'
I_vracht	2730000	mvt/jaar	[0; 1E9]	Totaal aantal vrachtauto's per jaar in de tunnelbuis

Gevaarlijke stoffen				
Naam	Waarde	Eenheid	Domein	Omschrijving
I_expl	0	mvt/jaar	[0; 0,1 . I_vracht]	Aantal vrachtwagens geladen met explosieven (E) per jaar in de tunnelbuis
I_LF1	5585	mvt/jaar	[0; 0,3 . I_vracht]	Aantal (volle) tankwagens met stofcategorie LF1 (brandbare vloeistof gevaarsklasse 1) per jaar in de tunnelbuis
I_LF2	18768	mvt/jaar	[0; 0,3 . I_vracht]	Aantal (volle) tankwagens met stofcategorie LF2 (brandbare vloeistof gevaarsklasse 2) per jaar in de tunnelbuis
I_LT	60	mvt/jaar	[0; 0,1 . I_vracht]	Aantal (volle) tankwagens met toxische vloeistof (LT) per jaar in de tunnelbuis
I_GF	0	mvt/jaar	[0; 0,1 . I_vracht]	Aantal (volle) druktankwagens met brandbaar tot vloeistof verdicht gas (GF) per jaar in de tunnelbuis
I_GT	0	mvt/jaar	[0; 0,1 . I_vracht]	Aantal (volle) druktankwagens met toxisch tot vloeistof verdicht gas (GT) per jaar in de tunnelbuis

Voorzieningen			
Naam	Waarde	Eenheid	Omschrijving
A_oper	Ja	-	Houdt een operator (in controlekamer) toezicht op de tunnel?
A_vent	Ja	-	Is een langsventilatiesysteem aanwezig?
A_luid	Ja	-	Is een HF en/of luidsprekersysteem aanwezig?
A_bekl	Ja	-	Is hittewerende bekleding aanwezig?
A_blus	Ja	-	Zijn brandblusmiddelen aanwezig?
A_comm	Ja	-	Is alarmering door weggebruiker mogelijk (noodtelefoon in hulppost aanwezig en/of mobiele telefonie mogelijk)?
A_snel	Ja	-	Is een snelheidsdetectiesysteem aanwezig?
A_brand temp	Ja	-	Is branddetectie met temperatuurmeting aanwezig?
A_brand CO	Nee	-	Is branddetectie met CO-meting aanwezig?
A_brand zicht	Ja	-	Is branddetectie met zichtmeting aanwezig?
H_zicht	370 ²⁵	m	Hart-op-hart afstand van zichtmeting
A_calam	Ja	-	Beschikt de operator over een calamiteitenknop?
A_sluit	Verkeerslicht en slagboom	-	Is het afsluiten van de tunnelbuis mogelijk?
L_afsluit	285	m	De afstand tussen de plaats waar de tunnelbuis wordt afgesloten en de ingang van de tunnelbuis
A_deur	Altijd ontgrendeld	-	Zijn er vluchtdeuren in de verkeersbuis, en zo ja, welk type?
T_vertontgr	0	min	Tijdsvertraging bij het ontgrendelen van de vluchtdeuren
K_vlucht	middenwand	-	Wand waarin de vluchtdeuren zijn aangebracht
C_autventsnel	Nee	-	Wordt ventilatiesysteem aangestuurd door snelheidsdetectie?
C_autventbrand	Ja	-	Wordt ventilatiesysteem aangestuurd door branddetectie?
C_autdeursnel	Nee	-	Worden vluchtdeuren ontgrendeld bij snelheidsdetectie?
C_autdeurbrand	Nee	-	Worden vluchtdeuren ontgrendeld bij branddetectie?
C_calvent	Ja	-	Start ventilatie bij gebruik calamiteitenknop?
C_calsluit	Ja	-	Wordt de verkeersbuis afgesloten bij gebruik calamiteitenknop?
C_caldeur	Nee	-	Worden vluchtdeuren ontgrendeld bij gebruik calamiteitenknop?
C_riool	4	m ³ /min	Capaciteit van de riolering
T_snelaut	0	min	Tijdsduur tussen snelheidsdetectie en automatisch opstarten

²⁵ In de LTS geldt een maximale afstand van 250m

Overige basisuitgangspunten

- Bij de berekening van de RRF van een bepaalde voorziening is de faalkans van de betreffende voorziening op "0" gezet (default waarde is veranderd in ""0"), om de RRF zuiverder te kunnen berekenen. De default-faalkansen van de overige voorzieningen zijn daarbij gehandhaafd.
- Frequentie file in spits benedenstrooms van de tunnel: 0,2 x per etmaal
- Systeem vermijding nagenoeg stilstaand verkeer in tunnel als gevolg van file benedenstrooms: ingreep na 5 minuten (dus file kan zich 5 minuten lang opbouwen voordat ingreep plaatsvindt)
- Bij falen of ontbreken systeem vermijding nagenoeg stilstaand verkeer in tunnel kan de file zich 60 minuten lang opbouwen (lees: er vindt geen belemmering van de fileopbouw plaats).
- Bij falen of ontbreken riolering worden de plasgroottes bij uitstroming brandbare en toxische stoffen 2x zo groot ten opzichte van situatie met riolering.
- Bij falen of ontbreken regeling ingangsverlichting wordt de letselonevals kans over de eerste 210m van het gesloten deel van de tunnel op jaarbasis een factor 25 hoger (210m is de afgelegde afstand bij 120 km/u, gedurende de tijd die de ogen nodig hebben om te accommoderen bij het binnen rijden van de tunnel (dit is zeer conservatief gerekend, aangezien de ongevalskans alleen overdag zal toenemen, met name als er sprake is van een heldere zonnige dag).
- Overige default-waarden zijn altijd gehandhaafd.

RRF's veiligheidsmaatregelen Tweede Coentunnel, buis Oost 2

Voorzieningen	Punt dichtste bij normlijn		Normwaarde f[Or.,N]	Factor met f[N]/ f[Or.,N]	Factor zonder f[N]/ f[Or.,N]	RRF	SIL
	N	f[N]					
Compleet	26	1.2100E-05	1.4793E-04	12.23	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Geen operator	26	1.2167E-05	1.4793E-04	12.23	12.16	1.01	0
Geen ventilatie	80	7.8173E-06	1.5625E-05	12.23	2.00	6.12	0 of 1
Geen luidspreker/HF	26	1.2100E-05	1.4793E-04	12.23	12.23	1.00	0
Geen hittew. bekl.	26	1.2100E-05	1.4793E-04	12.23	12.23	1.00	0
Geen blusvoorz.	26	1.2100E-05	1.4793E-04	12.23	12.23	1.00	0
Geen alarmering weggebruiker	26	1.2116E-05	1.4793E-04	12.23	12.21	1.00	0
Geen snelheidsdetectie	26	1.2134E-05	1.4793E-04	12.23	12.19	1.00	0
Geen temp.meting	26	1.2227E-05	1.4793E-04	12.23	12.10	1.01	0
Geen zichtmeting	26	1.2233E-05	1.4793E-04	12.23	12.09	1.01	0
Geen calamiteitenknop	26	1.2101E-05	1.4793E-04	12.23	12.22	1.00	0
Geen afsluiting tunnel	26	1.2100E-05	1.4793E-04	12.23	12.23	1.00	0
Geen vent. Branddetect.	26	1.2735E-05	1.4793E-04	12.23	11.62	1.05	0
Geen vent. door CK	26	1.2101E-05	1.4793E-04	12.23	12.22	1.00	0
Geen afsluiting door CK	26	1.2100E-05	1.4793E-04	12.23	12.23	1.00	0
Geen vluchtdeuren	160	8.2471E-06	3.9063E-06	12.23	0.47	25.81	1
Geen vermijding file benedenstrooms	26	1.23E-05	1.4793E-04	12.23	12.06	1.01	0
Geen riolering	52	1.21E-05	3.70E-05	12.23	3.06	4.00	0
Geen regeling ingangsverlichting	26	1.24E-05	1.4793E-04	12.23	11.90	1.03	0

Betrouwbaarheidseisen beheerst afsluiten tunnel (MTM, VRI en afsluitboom)

In het voorgaande is onderzocht wat het effect is op het risico als de tunnel niet wordt afgesloten in geval van calamiteit. Voor het afsluiten van de tunnel wordt gebruik gemaakt van de MTM, een VRI en de afsluitboom. De afsluitboom en de VRI kunnen echter ook falen in de zin dat de afsluitboom onbeheerst neer gaat (zonder eerst de snelheid te verlagen met de MTM en daarna de VRI op "rood" te zetten, dus in een situatie met op normale snelheid rijdend verkeer) of de VRI onbeheerst op "rood" gaat, zonder snelheidsverlaging door de MTM. In beide gevallen is er sprake van gevaarlijk falen.

De betrouwbaarheidseisen die aan deze wijzen van falen worden gesteld kunnen echter niet worden afgeleid met Risk Reduction Factoren met QRA-tunnels, omdat dit falen effect heeft op de letselongevalsfrequentie (een invoerparameter in QRA-tunnels) en QRA-tunnels bovendien rekening houdt met tunneleffecten, die bij een ongeval buiten de tunnel niet optreden. De betrouwbaarheidseisen die worden gesteld aan het onbeheerst neergaan van de afsluitboom en het onbeheerst op "rood" gaan van de VRI worden daarom op een andere wijze afgeleid, door het vaststellen van het maximaal aantal doden dat mag optreden als gevolg van deze faalwijzen. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de verwachtingswaarde voor het aantal doden per jaar in de buis Oost 2 van de Tweede Coentunnel. Met QRA-tunnels is berekend dat deze verwachtingswaarde 0,08044115 per jaar bedraagt.

Als nu wordt aangenomen dat het aantal doden dat valt door het disfunctioneren van de afsluitboom of de VRI maximaal 1% hiervan mag bedragen, dan mag het aantal doden door het ongevraagd neergaan van de afsluitboom of het ongevraagd op "rood" gaan van de VRI maximaal $0,8044E-03$ per jaar bedragen. De betrouwbaarheidseisen kunnen dan als volgt worden afgeleid.

Afsluitboom:

Er wordt aangenomen dat er iedere keer dat de afsluitboom onbeheerst naar beneden gaat een letselongeval plaatsvindt, ofwel omdat een voertuig tegen de afsluitboom botst, ofwel omdat achteropkomende voertuigen opbotsen tegen een voertuig dat tijdig remt. Als daarbij tevens conservatief wordt aangenomen dat de kans op een dodelijk ongeval bij een dergelijk letselongeval 25% bedraagt, dan is het maximale aantal keren dat een afsluitboom ongevraagd naar beneden mag gaan: $4 * 0,8044E-03 = 0,0032176$ per jaar (ongeveer 3x per 1000 jaar).

Automatische afsluiting van de tunnel vindt plaats op basis van diverse detecties, die wijzen op een grote waarschijnlijkheid dat er sprake is van brand (zie hoofdstuk 9 VRC). De kans op brand is gelijk aan $2,0E-08$ / mvtkm.

De verkeersintensiteit in de tunnelbuis bedraagt 27.300.000 mvt per jaar. De kans op brand is derhalve: $27.300.000 * 0,765 * 2,0E-08 = 0,41769$ per jaar.

De toegestane faalkans (met betrekking tot onbeheerst afsluiten) bedraagt derhalve: $0,0032176 / 0,41769 = 0,0077$ per aanvraag.

Als nog rekening wordt gehouden met valse meldingen, en wordt aangenomen dat er sprake is van evenveel valse meldingen als terechte meldingen, dan is de toegestane faalkans $0,0077 / 2 = 0,00385$ per aanvraag.

Deze faalkanseis vraagt om beheersmaatregelen die zich bevinden op het niveau **SIL 2**.

N.B.: ook in geval van een ernstige technische storing (uitval netstroom + noodstroom, of uitval bediening of besturing) moet de tunnelbuis automatisch en beheerst worden afgesloten. De kans

op een ernstige technische storing wordt echter vooralsnog verwaarloosbaar geacht ten opzichte van de kans op detectie van een mogelijke brand.

VRI:

De kans dat er een letselongeval plaatsvindt als de VRI onbeheerst op "rood" gaat (zonder snelheidsverlaging door de MTM) zal lager zijn dan bij het onbeheerst neergaan van de afsluitboom, omdat er geen sprake is van een fysiek obstakel en omdat er in algemene zin sprake is van een "rood-negatie" door de weggebruikers. Omdat er geen sprake is van een fysiek obstakel zal de kans dat er sprake is van een dodelijk ongeval bij een letselongeval lager dan bij het onbeheerst sluiten van de afsluitboom. Er wordt hier conservatief aangenomen dat het onbeheerst op "rood" gaan van de VRI in 50% van de gevallen leidt tot een letselongeval en dat een letselongeval in 12,5% van de gevallen leidt tot een dodelijk slachtoffer. Dit betekent dat de toegestane faalkansen factor 4 hoger is dan bij de afsluitboom: $4 \times 0,00385 = 0,0154$ per aanvraag. Dit komt overeen met beheersmaatregelen conform niveau **SIL 1**.

RRF's veiligheidsmaatregelen Tweede Coentunnel, buis Oost 2 bij lengte 2500m

(Lengte tunnelbuis 2500m in plaats van 765m, verder alle parameters hetzelfde)

Voorzieningen	Punt dichtste bij normlijn		Normwaarde f[Or.,N]	Factor met f[N]/ f[Or.,N]	Factor zonder f[N]/ f[Or.,N]	RRF	SIL
	N	f[N]					
Compleet	26	1.2105E-05	1.4793E-04	12.22	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Geen operator	26	1.2177E-05	1.4793E-04	12.22	12.15	1.01	0
Geen ventilatie	80	9.6574E-06	1.5625E-05	12.22	1.62	7.55	0 of 1
Geen luidspreker/HF	26	1.2105E-05	1.4793E-04	12.22	12.22	1.00	0
Geen hittew. bekl.	26	1.2105E-05	1.4793E-04	12.22	12.22	1.00	0
Geen blusvoorz.	26	1.2105E-05	1.4793E-04	12.22	12.22	1.00	0
Geen alarmering weggebruiker	26	1.2125E-05	1.4793E-04	12.22	12.20	1.00	0
Geen snelheidsdetectie	26	1.2138E-05	1.4793E-04	12.22	12.19	1.00	0
Geen temp.meting	26	1.2247E-05	1.4793E-04	12.22	12.08	1.01	0
Geen zichtmeting	26	1.2254E-05	1.4793E-04	12.22	12.07	1.01	0
Geen calamiteitenknop	26	1.2106E-05	1.4793E-04	12.22	12.22	1.00	0
Geen afsluiting tunnel	26	1.2105E-05	1.4793E-04	12.22	12.22	1.00	0
Geen vent. Branddetect.	26	1.2865E-05	1.4793E-04	12.22	11.50	1.06	0
Geen vent. door CK	26	1.2106E-05	1.4793E-04	12.22	12.22	1.00	0
Geen afsluiting door CK	26	1.2100E-05	1.4793E-04	12.22	12.23	1.00	0
Geen vluchtdeuren	220	1.4164E-05	2.0661E-06	12.22	0.15	83.78	1
Geen vermijding file benedenstrooms	850	5.22E-07	1.3841E-07	12.22	0.27	46.11	1
Geen riolering	52	1.21E-05	3.70E-05	12.22	3.06	4.00	0
Geen regeling ingangsverlichting	320	6.12E-08	9.7656E-07	12.22	15.95	1	0

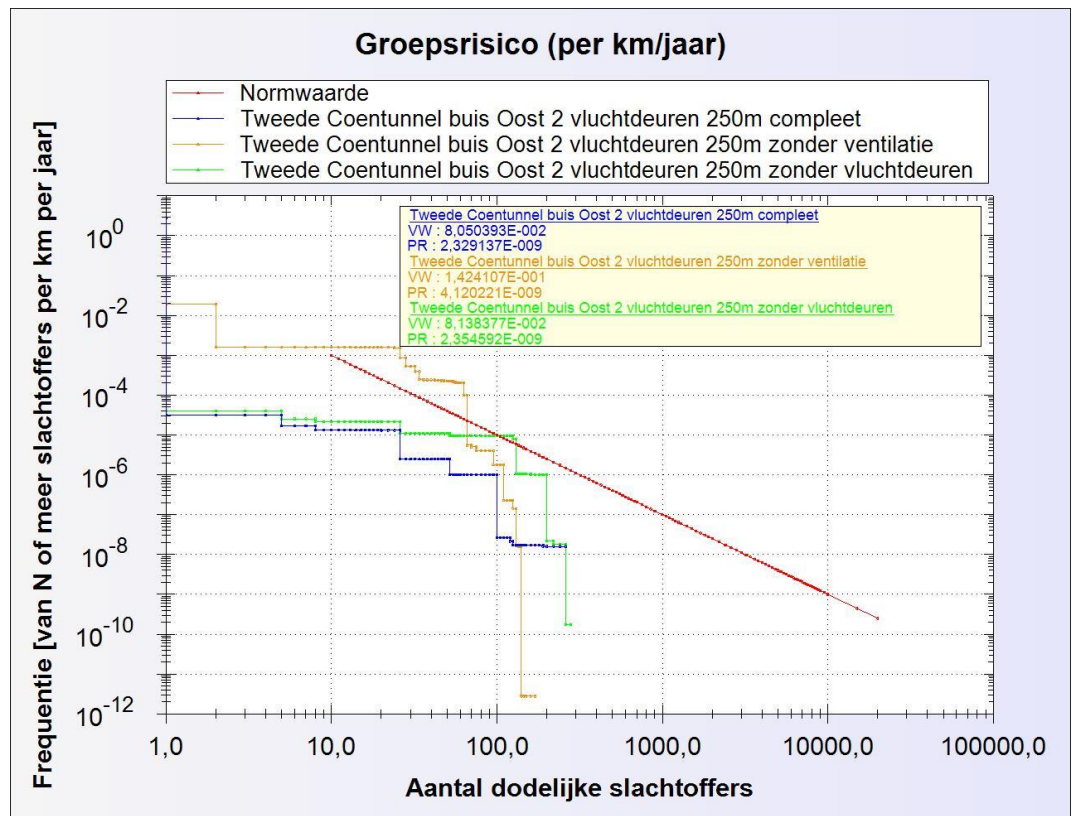
RRF's veiligheidsmaatregelen Tweede Coentunnel, buis Oost 2 bij lengte 2500m, hoge kans file benedenstrooms en GEEN systeem vermijding nagenoeg stilstaand verkeer in tunnel

(Lengte tunnelbuis 2500m in plaats van 765m, filekans 1x per etmaal in plaats van 0,2 x per etmaal, en geen vermijding stilstaand verkeer in tunnel; verder alle parameters hetzelfde)

Voorzieningen	Punt dichtste bij normlijn		Normwaarde f[Or.,N]	Factor met f[N]/ f[Or.,N]	Factor zonder f[N]/ f[Or.,N]	RRF	SIL
	N	f[N]					
Compleet	850	2.6110E-07	1.3841E-07	0.53	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Geen ventilatie	80	1.1551E-04	1.5625E-05	0.53	0.14	3.92	0
Geen vluchtdeuren	675	1.3410E-04	2.1948E-07	0.53	0.00	323.89	2
Geen vermijding file benedenstrooms	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Geen regeling ingangsverlichting	850	7.88E-07	1.3841E-07	0.53	0.18	3.02	0

RRF's veiligheidsmaatregelen Coentunnel Oostbuis 2, bij lengte 765m en vluchtdeurafstand 250m

Zelfde uitgangspunten als eerder gepresenteerde berekeningen Tweede Coentunnel Oostbuis 2, alleen dan met een vluchtdeurafstand van 250m in plaats van 100m, om te bekijken wat de invloed is op de RRF van de ventilatie en de vluchtdeuren als de vluchtdeurafstand groter wordt.



Voorzieningen	Factor met	Factor zonder	RRF	SIL
	$f[N]/f[Or.,N]$	$f[N]/f[Or.,N]$		
Compleet	9,87	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Geen ventilatie	9,87	0,13	78,87	1
Geen vluchtdeuren	9,87	0,68	14,61	1

Het blijkt dat het relatieve belang van de vluchtdeuren afneemt als de vluchtdeurafstand toeneemt en dat in ruil daarvoor het relatieve belang van de ventilatie toeneemt. Dit betekent dat de RRF van de vluchtdeuren afneemt en de RRF van de ventilatie toeneemt.

RRF's veiligheidsmaatregelen Keizer Karel tunnel

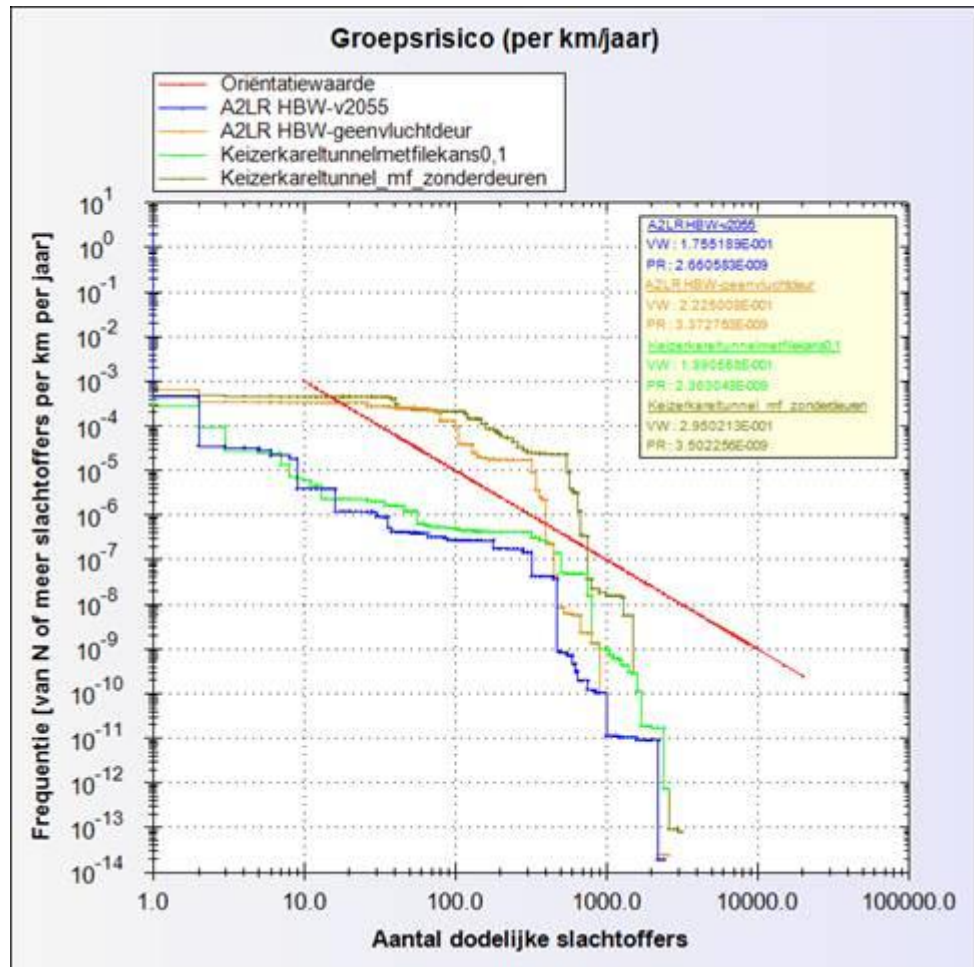
Geometrie				
Naam	Waarde	Eenheid	Domein	Omschrijving
L_buis	1827	m	[80; 20000]	Lengte (gesloten deel) van de tunnelbuis
L_neer	344	m	[0; L_buis]	Lengte neergaand deel van de tunnelbuis
L_hor	1139	m	[0; L_buis - L_neer]	Lengte horizontale deel van de tunnelbuis
L_op	344	m	[0; L_buis]	Lengte opgaand deel van de tunnelbuis
B_buis	18,5	m	[3; 30]	Breedte van het wegdek (tussen opstaande randen)
L_hart	100	m	[30; L_buis]	Hart-op-hart afstand van de vluchtdeuren
N_rij	4	-	[1; 6]	Aantal rijstroken in de tunnelbuis
N_tot_rijstroken	8	-	[N_rij; 30]	Totaal aantal rijstroken in de tunnelbuizen voor verkeer van de tunnel
N_vlucht	1	-	[0; 2]	Aantal vluchtstroken in de tunnelbuis

Periode en verkeersintensiteiten				
Naam	Waarde	Eenheid	Domein	Omschrijving
T_spits	4	uur	(0; 12)	Gemiddeld aantal uren 'spits' per etmaal in de tunnelbuis
T_nacht	8	uur	(0; 12]	Gemiddeld aantal uren 'nacht' per etmaal in de tunnelbuis
T_dag	12	uur	(0; 24)	Aantal uren per etmaal dat het 'dag' (niet spits of nacht) is
I_buis	28200000	mvt/jaar	[1E3; 1E9]	Verkeersintensiteit per jaar in de tunnelbuis
I_max	2300	mvt/uur	[1; 3000]	Maximale verkeerscapaciteit per rijstrook
I_spitsuur	6180	mvt/uur	(0; I_max . N_rij]	Gemiddelde verkeersintensiteit in de buis per spitsuur
I_spits	9022800	mvt/jaar	(0; 1E9]	Verkeersintensiteit tijdens de 'spits' per jaar
I_nachtuur	772	mvt/uur	(0; I_max . N_rij]	Gemiddelde verkeersintensiteit in de buis per nachtuur
I_nacht	2254240	mvt/jaar	(0; 1E9]	Verkeersintensiteit tijdens de 'nacht' per jaar
I_dag	16922960	mvt/jaar	(0; 1E9]	Verkeersintensiteit tijdens de 'dag' per jaar
I_daguur	3863.689498	mvt/uur	[0; 1E9]	Gemiddelde verkeersintensiteit per 'daguur'

Verkeerssamenstelling				
Naam	Waarde	Eenheid	Domein	Omschrijving
A_auto_s	0.85	-	[0; 1]	Fractie personenauto's (of motor) tijdens de 'spits'
A_auto_d	0.85	-	[0; 1]	Fractie personenauto's (of motor) tijdens de 'dag'
A_auto_n	0.85	-	[0; 1]	Fractie personenauto's (of motor) tijdens de 'nacht'
A_bus_s	0.01	-	[0; 1]	Fractie bussen tijdens de 'spits'
A_bus_d	0.01	-	[0; 1]	Fractie bussen tijdens de 'dag'
A_bus_n	0.01	-	[0; 1]	Fractie bussen tijdens de 'nacht'
A_vracht_s	0.14	-	[0; 1]	Fractie vrachtauto's tijdens de 'spits'
A_vracht_d	0.14	-	[0; 1]	Fractie vrachtauto's tijdens de 'dag'
A_vracht_n	0.14	-	[0; 1]	Fractie vrachtauto's tijdens de 'nacht'
I_vracht	3948000	mvt/jaar	[0; 1E9]	Totaal aantal vrachtauto's per jaar in de tunnelbuis

Gevaarlijke stoffen				
Naam	Waarde	Eenheid	Domein	Omschrijving
I_expl	0	mvt/jaar	[0; 0,1 . I_vracht]	Aantal vrachtwagens geladen met explosieven (E) per jaar in de tunnelbuis
I_LF1	1878	mvt/jaar	[0; 0,3 . I_vracht]	Aantal (volle) tankwagens met stofcategorie LF1 (brandbare vloeistof gevaarsklasse 1) per jaar in de tunnelbuis
I_LF2	2017	mvt/jaar	[0; 0,3 . I_vracht]	Aantal (volle) tankwagens met stofcategorie LF2 (brandbare vloeistof gevaarsklasse 2) per jaar in de tunnelbuis
I_LT	11	mvt/jaar	[0; 0,1 . I_vracht]	Aantal (volle) tankwagens met toxische vloeistof (LT) per jaar in de tunnelbuis
I_GF	1453	mvt/jaar	[0; 0,1 . I_vracht]	Aantal (volle) druktankwagens met brandbaar tot vloeistof verdicht gas (GF) per jaar in de tunnelbuis
I_GT	0	mvt/jaar	[0; 0,1 . I_vracht]	Aantal (volle) druktankwagens met toxisch tot vloeistof verdicht gas (GT) per jaar in de tunnelbuis

Voorzieningen: conform Coentunnel.



Voorzieningen	Punt dichtste bij normlijn		Normwaarde f[Or.,N]	Factor met f[N]/f[Or.,N]	Factor zonder f[N]/f[Or.,N]	RRF	SIL
	N	f[N]					
Compleet	425	2,29E-07	4,94E-07	0,46	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Geen operator	1000	3,02E-07	9,07E-08	0,46	3,33	7,17	1
Geen ventilatie	280	6,42E-07	1,11E-06	0,46	0,58	1,24	0
Geen snelheidsdetectie	400	2,85E-07	5,54E-07	0,46	0,51	1,11	0
Geen zicht- en temperatuurmeting	425	2,58E-07	4,94E-07	0,46	0,52	1,13	0
Geen calamiteitenknop	400	2,80E-07	5,54E-07	0,46	0,50	1,09	0
Geen slagbomen	425	2,79E-07	4,94E-07	0,46	0,57	1,22	0
Geen vluchtdeuren	525	2,26E-05	3,31E-07	0,46	68,24	146,97	2

RRF's veiligheidsmaatregelen tunnel A2 Leidsche Rijn (Hoofdbuis West)

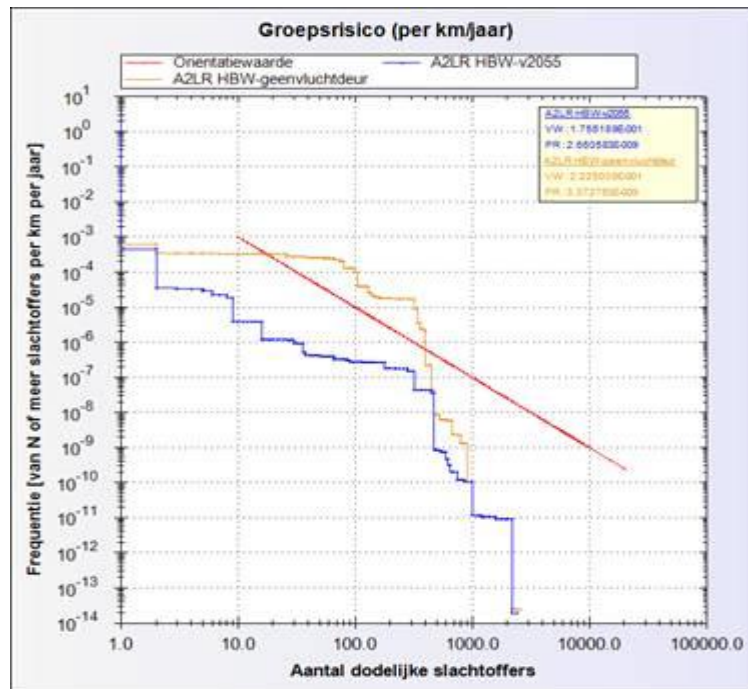
Geometrie				
Naam	Waarde	Eenheid	Domein	Omschrijving
L_buis	1650	m	[80; 20000]	Lengte (gesloten deel) van de tunnelbuis
L_neer	0	m	[0; L_buis]	Lengte neergaand deel van de tunnelbuis
L_hor	1650	m	[0; L_buis - L_neer]	Lengte horizontale deel van de tunnelbuis
L_op	0	m	[0; L_buis]	Lengte opgaand deel van de tunnelbuis
B_buis	13,5	m	[3; 30]	Breedte van het wegdek (tussen opstaande randen)
L_hart	100	m	[30; L_buis]	Hart-op-hart afstand van de vluchtdeuren
N_rij	3	-	[1; 6]	Aantal rijstroken in de tunnelbuis
N_tot_rijstroken	6	-	[N_rij; 30]	Totaal aantal rijstroken in de tunnelbuizen voor verkeer van de tunnel
N_vlucht	1	-	[0; 2]	Aantal vluchtstroken in de tunnelbuis

Periode en verkeersintensiteiten				
Naam	Waarde	Eenheid	Domein	Omschrijving
T_spits	4	uur	(0; 12]	Gemiddeld aantal uren 'spits' per etmaal in de tunnelbuis
T_nacht	8	uur	(0; 12]	Gemiddeld aantal uren 'nacht' per etmaal in de tunnelbuis
T_dag	-1	uur	(0; 24]	Aantal uren per etmaal dat het 'dag' (niet spits of nacht) is
I_buis	27411500	mvt/jaar	[1E3; 1E9]	Verkeersintensiteit per jaar in de tunnelbuis
I_max	2300	mvt/uur	[1; 3000]	Maximale verkeerscapaciteit per rijstrook
I_spitsuur	5632	mvt/uur	(0; I_max . N_rij]	Gemiddelde verkeersintensiteit in de buis per spitsuur
I_spits	-1	mvt/jaar	(0; 1E9]	Verkeersintensiteit tijdens de 'spits' per jaar
I_nachtuur	1036	mvt/uur	(0; I_max . N_rij]	Gemiddelde verkeersintensiteit in de buis per nachtuur
I_nacht	-1	mvt/jaar	(0; 1E9]	Verkeersintensiteit tijdens de 'nacht' per jaar
I_dag	-1	mvt/jaar	(0; 1E9]	Verkeersintensiteit tijdens de 'dag' per jaar
I_daguur	-1	mvt/uur	[0; 1E9]	Gemiddelde verkeersintensiteit per 'daguur'

Verkeerssamenstelling				
Naam	Waarde	Eenheid	Domein	Omschrijving
A_auto_s	0.8286	-	[0; 1]	Fractie personenauto's (of motor) tijdens de 'spits'
A_auto_d	0.8286	-	[0; 1]	Fractie personenauto's (of motor) tijdens de 'dag'
A_auto_n	0.8286	-	[0; 1]	Fractie personenauto's (of motor) tijdens de 'nacht'
A_bus_s	0.01	-	[0; 1]	Fractie bussen tijdens de 'spits'
A_bus_d	0.01	-	[0; 1]	Fractie bussen tijdens de 'dag'
A_bus_n	0.01	-	[0; 1]	Fractie bussen tijdens de 'nacht'
A_vracht_s	0.1614	-	[0; 1]	Fractie vrachtauto's tijdens de 'spits'
A_vracht_d	0.1614	-	[0; 1]	Fractie vrachtauto's tijdens de 'dag'
A_vracht_n	0.1614	-	[0; 1]	Fractie vrachtauto's tijdens de 'nacht'
I_vracht	4424216	mvt/jaar	[0; 1E9]	Totaal aantal vrachtauto's per jaar in de tunnelbuis

Gevaarlijke stoffen				
Naam	Waarde	Eenheid	Domein	Omschrijving
I_expl	0	mvt/jaar	[0; 0,1 . I_vracht]	Aantal vrachtwagens geladen met explosieven (E) per jaar in de tunnelbuis
I_LF1	4550	mvt/jaar	[0; 0,3 . I_vracht]	Aantal (volle) tankwagens met stofcategorie LF1 (brandbare vloeistof gevaarsklasse 1) per jaar in de tunnelbuis
I_LF2	5621	mvt/jaar	[0; 0,3 . I_vracht]	Aantal (volle) tankwagens met stofcategorie LF2 (brandbare vloeistof gevaarsklasse 2) per jaar in de tunnelbuis
I_LT	65	mvt/jaar	[0; 0,1 . I_vracht]	Aantal (volle) tankwagens met toxische vloeistof (LT) per jaar in de tunnelbuis
I_GF	1055	mvt/jaar	[0; 0,1 . I_vracht]	Aantal (volle) druktankwagens met brandbaar tot vloeistof verdicht gas (GF) per jaar in de tunnelbuis
I_GT	0	mvt/jaar	[0; 0,1 . I_vracht]	Aantal (volle) druktankwagens met toxisch tot vloeistof verdicht gas (GT) per jaar in de tunnelbuis

Voorzieningen: conform Coentunnel.



Voorzieningen	Factor met	Factor zonder	RRF	SIL
	f[N]/f[Or.,N]	f[N]/f[Or.,N]		
Compleet	0,15	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Geen vluchtdeuren	0,15	17,32	114	2

Bijlage C Overzicht vluchtroute-voorzieningen per vluchtconcept

Vluchtconcepten

De in een tunnel aan te brengen voorzieningen ten behoeve van een veilige vluchtroute worden bepaald door het gekozen vluchtconcept.

De LTS biedt voor het vluchtconcept de volgende keuzes [8]:

- a. Middentunnelkanaal (MTK) met kopdeuren (preferabele vluchtconcept);
- b. Middentunnelkanaal (MTK) met uitgangsvluchtdeuren naar ondersteunende buis (in plaats van kopdeuren);
- c. Vluchtdeuren in middenwand;
- d. Dwarsverbindingen.

De functies van de aan te brengen voorzieningen om het vluchtconcept te ondersteunen zijn:

- Het uitsluiten of reduceren van de gevaren waaraan de mensen worden blootgesteld als zij de route volgen;
- Het duidelijk maken aan de mensen hoe de vluchtroute loopt;
- Het stimuleren van de mensen om gebruik te maken van de vluchtroute als dit noodzakelijk is (tijdens evacuatiebedrijf c.q. calamiteitenbedrijf + evacuatie).

Vluchtroutevoorzieningen per vluchtconcept

In het navolgende wordt per vluchtconcept aangegeven welke voorzieningen nodig zijn. Merk daarbij op dat vluchtconcept a (MTK met kopdeuren) het enige concept is waarbij de vluchtroute niet door de ondersteunende buis loopt. Dit betekent dat de vluchtroute onafhankelijk van de situatie in de ondersteunende buis kan worden gevolgd (verkeersvrij of niet). Bij de overige vluchtconcepten loopt de vluchtroute wel door de ondersteunende buis, wat betekent dat de veiligheid van de vluchtroute sterk afhankelijk is van het correct functioneren van de middelen om de ondersteunende buis af te sluiten voor het verkeer. Dit verklaart waarom een MTK met kopdeuren preferabel is. Van de vluchtconcepten waarbij gebruik wordt gemaakt van de ondersteunende buis voor de vluchtroute is het vluchtconcept met vluchtdeuren in de middenwand het minst preferabel, omdat de weggebruikers in de incidentbuis (dus blootgesteld aan de daar optredende gevaren) moeten wachten totdat de ondersteunende tunnelbuis verkeersvrij is.

De rood gemarkeerde voorzieningen en maatregelen zijn nog niet volledig uitgewerkt in de LTS [versie 1.2 SP1 B3](#) (voor vluchtconcepten anders dan een middentunnelkanaal met kopdeuren) **en moeten dus worden meegenomen in volgende versies (versie 1.2 SP2 e.v.)**.

a- Vluchtroutevoorzieningen bij MTK met kopdeuren				
Nr.	Maatregel/ installatie	Korte omschrijving	Ref. LTS	Speelt rol bij VKF/CK/EK
I	In incidentbuis			
I-1	Verlichting verkeersbuis	Wordt op 100% geschakeld in standby-fase na detectie, dan wel calamiteitenbedrijf	BSTTI, par. 5.3	VKF2; CK
I-2	Bordjes L19, vluchtdeur-aanduidingen	Statische (nalichtende) bordjes op tunnelwanden; geven afstanden aan tot dichtstbijzijnde vluchtdeuren	BSTTI, par. 5.18 (eis BSTTI-#8531)	[-]
I-3	Bordjes "Exit overzijde"	Statische (nalichtende) bordjes op tunnelwand tegenover vluchtdeuren.	BSTTI, par. 5.18 (eis BSTTI-#4669)	[-]
I-4	Pijlen op wegdek	Statische pijlen op wegdek (thermoplast) aan weerszijden kantstrepen rijbaan, ter plaatse van vluchtdeur, wijzend in richting vluchtdeur	BSTTI, par. 5.18 (eis BSTTI-#4666)	[-]
I-5	Vluchtdeur-indicatie	Per vluchtdeur: Aanstraalverlichting (brandt continu); Intern verlichte pictogram (brandt continu); Contourverlichting (wordt ingeschakeld in evacuatiebedrijf); Geluidsbaken (wordt ingeschakeld in evacuatiebedrijf).	BSTTI, par. 5.18	EK
I-6	(Rij van) vluchtdeuren	Niet-vergrendelde vluchtdeuren; geven vanuit tunnelbuizen (dus ook incidentbuis) altijd toegang tot MTK, c.q. kunnen vanaf die zijde altijd met hendel worden geopend; kunnen echter vanuit MTK niet (eenvoudig) worden geopend zonder dat de losse hendel op deur wordt geplaatst.	BSTTI, par. 5.16	[-]
I-7	Omroep verkeersbuis	Speelt in evacuatiebedrijf omroepberichten af om mensen te bewegen om te vluchten, c.q. zich naar de vluchtdeuren te begeven.	BSTTI, par. 5.13	EK

a- Vluchtroutevoorzieningen bij MTK met kopdeuren				
Nr.	Maatregel/ installatie	Korte omschrijving	Ref. LTS	Speelt rol bij VKF/CK/EK
II In MTK (veilige ruimte)				
II-1	Overdruk veilige ruimte	Wordt ingeschakeld in standby-fase na detectie, dan wel calamiteitenbedrijf; zorgt dat MTK rookvrij blijft bij openen vluchtdeuren in rookzone.	BSTTI, par. 7.6	VKF2; CK
II-2	Verlichting veilige ruimte	Wordt op 100% geschakeld in standby-fase na detectie, dan wel calamiteitenbedrijf.	BSTTI, par. 7.5	VKF2; CK
II-3	(Dynamische) vluchtroute-indicatie	Dynamische bordjes, die in MTK de correcte vluchtrichting aangeven, c.q. de richting naar de kopdeur die de mensen aan de rookvrije zijde van de tunnel naar buiten leidt. Worden ingeschakeld in standby-fase na detectie, dan wel calamiteitenbedrijf. N.B.: als er in het MTK één vaste vluchtrichting geldt dan zijn de bordjes niet dynamisch maar statisch (hoeven dan niet te worden in- en uitgeschakeld).	BSTTI, par. 7.4	VKF2; CK
II-4	Omroep veilige ruimte	Speelt in evacuatiebedrijf omroepberichten af om mensen te bewegen MTK te verlaten, door de pijlen te volgen, en door te lopen naar de verzamelplaats.	BSTTI, par. 7.7	EK
II-5	Kopdeuren middentunnelkanaal	Bieden uitgang naar buiten vanuit MTK; zijn naar buiten toe altijd ontgrendeld; kunnen worden geopend met push-bar; van buiten zijn kopdeuren niet te openen, alleen door hulpdiensten met sleutel.	BSTTI, par. 7.3	[-]
III In ondersteunende buis				
	N.v.t. voor wat betreft vluchten; ondersteunende buis wordt wel afgesloten bij calamiteit.			

a- Vluchtroutevoorzieningen bij MTK met kopdeuren				
Nr.	Maatregel/ installatie	Korte omschrijving	Ref. LTS	Speelt rol bij VKF/CK/EK
IV Buiten tunnel				
IV-1	Voorzieningen om te voorkomen dat vluchtenden buiten de tunnel alsnog aan rook worden blootgesteld	Betreft voorzieningen buiten de tunnel ter plaatse van de kopdeur(en) van het MTK die zich bij brand aan de rookzijde van de tunnel kan/kunnen bevinden. De mensen worden met de dynamische vluchtroute-indicatie naar de kopdeur gestuurd die zich aan de rookvrije zijde van de tunnel bevindt (zie II-3). Echter, ook de mensen die desondanks de andere kant op lopen (omdat de vluchtroute in de preferabele richting is geblokkeerd of omdat men zich vergist) mogen buiten de tunnel niet (opnieuw) aan de rook worden blootgesteld. Hiertoe moet het MTK aan beide zijden van de tunnel worden verlengd (zie bijlage I).	N.v.t.; is nog niet uitgewerkt in LTS versie 1.2 SP1 B3	[-]
IV-2	Doorlooprouten naar verzamelplaats	Doorlooprouten [in middenberm, normaal gesproken tussen barriers], beginnend aan buitenzijde van een kopdeur en leidend naar de verzamelplaats aan de betreffende zijde van de tunnel.	BSTTI par. 7.3, eis #4648; par. 8.18 eis #16358	[-]
IV-3	Verzamelplaats	Verzamelplaats op voldoende afstand van de tunnelmond (tenminste 150m). N.B.: er hoeft alleen een verzamelplaats te worden gerealiseerd aan de zijde van de uitgang/kopdeur volgens de preferabele vluchtroute.²⁶.	BSTTI par. 8.19, eis #16356; eis #16357; eis #16359	[-]

²⁶ Dit moet wellicht worden verduidelijkt in de LTS.

b- Vluchtroutevoorzieningen bij MTK met uitgangsvluchtdeuren naar ondersteunende buis (in plaats van kopdeuren)				
Nr.	Maatregel/ installatie	Korte omschrijving	Ref. LTS	Speelt rol bij VKF/CK/EK
I In incidentbuis				
	Zie bij MTK met kopdeuren	Voorzieningen in incidentbuis zijn identiek aan vluchtconcept met MTK met kopdeuren, er van uitgaande dat de uitgangsvluchtdeur naar de ondersteunende buis zich vlakbij de uitgang van de ondersteunende buis bevindt. Anders moeten de "Exit overzijde" borden dynamisch worden uitgevoerd of worden geschrapt, zie bij vluchtdeuren in middenwand en dwarsverbindingen.		
II In MTK (veilige ruimte)				
II-1	Overdruk veilige ruimte	Wordt ingeschakeld in standby-fase na detectie, dan wel calamiteitenbedrijf; zorgt dat MTK rookvrij blijft bij openen vluchtdeuren in rookzone.	BSTTI, par. 7.6	VKF2; CK
II-2	Verlichting veilige ruimte	Wordt op 100% geschakeld in standby-fase na detectie, dan wel calamiteitenbedrijf.	BSTTI, par. 7.5	VKF2; CK
II-3	(Dynamische) vluchtroute-indicatie	Dynamische bordjes, die in MTK de correcte vluchtrichting aangeven, c.q. de richting naar de uitgangsvluchtdeur die de mensen aan de rookvrije zijde van de tunnel naar buiten leidt. Worden ingeschakeld in standby-fase na detectie, dan wel calamiteitenbedrijf. N.B.: als er in het MTK één vaste vluchtrichting geldt dan zijn de bordjes niet dynamisch maar statisch (hoeven dan niet te worden in- en uitgeschakeld).	BSTTI, par. 7.4	VKF2; CK
II-4	Omroep veilige ruimte	Speelt in evacuatiebedrijf omroepberichten af om mensen te bewegen MTK te verlaten, door de pijlen te volgen, en door te lopen naar de verzamelplaats.	BSTTI, par. 7.7	EK

b- Vluhtroutevoorzieningen bij MTK met uitgangsvluchtdeuren naar ondersteunende buis (in plaats van kopdeuren)				
Nr.	Maatregel/ installatie	Korte omschrijving	Ref. LTS	Speelt rol bij VKF/CK/EK
II-5a	Vergrendelbare uitgangsvluchtdeur naar ondersteunende buis	Biedt uitgang vanuit MTK naar ondersteunende buis; deze deur wordt vergrendeld in stand-by fase na detectie, dan wel bij instellen calamiteitenbedrijf; wordt met vertraging weer ontgrendeld na instellen calamiteitenbedrijf.	BSTTI, par. 15.17, eis BSTTI-#10043 en eis BSTTI#15150	VKF2; CK
II-6	Indicatie uitgangsvluchtdeur aan zijde MTK	Per uitgangsvluchtdeur: Intern verlichte pictogram (wordt ingeschakeld in evacuatiebedrijf); Contourverlichting (wordt ingeschakeld in evacuatiebedrijf); Geluidsbaken (*) (wordt ingeschakeld in evacuatiebedrijf).	N.v.t.; nog niet uitgewerkt in de BSTTI par. 5.18	EK
III In/bij ondersteunende buis				
III-1	MTM-koppeling verkeersbuis	Zorgt voor instellen snelheidsbeperkingen voor het verkeer respectievelijk het afkruisen van de rijstroken bij het afsluiten van de tunnelbuis (verkeersvrij maken t.b.v. veilige vluchtroute).	BSTTI, par. 5.9	VKF2; VKF3; CK
III-2	Verkeerslicht verkeersbuis (VRI) + dynamisch J32-borden op portalen voorafgaand aan VRI	Zorgt voor (juridisch) afsluiten van de ondersteunende buis (verkeersvrij maken t.b.v. veilige vluchtroute). N.B.: dynamisch J-32 bord is nog niet in LTS opgenomen, maar wel in de [VRAI], waarnaar in de LTS wordt verwezen.	BSTTI, par. 5.4	VKF2; VKF3; CK
III-3	Afsluitboom verkeersbuis	Zorgt voor (fysiek) afsluiten van de ondersteunende buis (verkeersvrij maken t.b.v. veilige vluchtroute).	BSTTI, Par. 5.5	VKF2; VKF3; CK
III-4	Verlichting verkeersbuis	Wordt op 100% geschakeld in calamiteitenbedrijf (gelijktijdig met ontgrendelen vluchtdeuren), t.b.v. optimale	BSTTI, par. 5.3	VKF2; CK

b- Vluchtroutevoorzieningen bij MTK met uitgangsvluchtdeuren naar ondersteunende buis (in plaats van kopdeuren)				
Nr.	Maatregel/ installatie	Korte omschrijving	Ref. LTS	Speelt rol bij VKF/CK/EK
		verlichting vluchtroute door ondersteunende buis		
III-4	Ventilatie verkeersbuis	Zorgt voor rookvrij blijven ondersteunende buis, die bij dit vluchtconcept in feite deel uit maakt van de veilige ruimte. De functie van de ventilatie in de ondersteunende buis is in dit kader vergelijkbaar met de functie van de overdrukventilatie in het MTK. Om praktische redenen is het inschakelen van de ventilatie in de ondersteunende buis echter ondergebracht bij VKF1 in plaats van VKF2 (zie paragraaf 5.2)	N.v.t.; ventilatie onder- steunen- de buis is nog niet uitge- werkt in scope VKF1 in LTS versie 1.2 SP1 B3.	VKF1; CK
IV Buiten tunnel				
IV-1	Voorzieningen om rookkortsluiting tussen incidentbuis en ondersteunende buis, waardoor vluchtroute loopt, te voorkomen	Omdat de vluchtroute door de ondersteunende buis leidt, is het extra belangrijk dat deze rookvrij blijft. Aan de tunnelzijden, waar rookkortsluiting tussen de incidentbuis en de ondersteunende buis zou kunnen plaatsvinden, moeten derhalve voorzieningen worden getroffen om dit te voorkomen. Hiertoe moet een emissie-/rookmuur worden aangebracht aan beide zijden van de tunnel (zie bijlage I).	N.v.t.; is nog niet uitgewerkt in LTS versie 1.2 SP1 B3.	[-]
IV-2	Doorlooprouten naar verzamelplaats	Doorlooprouten [over de rijbaan], beginnend op het punt waar men de ondersteunende buis verlaat en leidend naar de verzamelplaats aan de betreffende zijde van de tunnel.	N.v.t.; is nog niet uitgewerkt in LTS versie 1.2 SP1 B3.	[-]

b- Vluchtroutevoorzieningen bij MTK met uitgangsvluchtdeuren naar ondersteunende buis (in plaats van kopdeuren)				
Nr.	Maatregel/ installatie	Korte omschrijving	Ref. LTS	Speelt rol bij VKF/CK/EK
IV-3	Verzamelplaats	Verzamelplaats op voldoende afstand van de tunnelmond (tenminste 150m). N.B.: er hoeft alleen een verzamelplaats te worden gerealiseerd aan de zijde van de uitgang/kopdeur volgens de preferabele vluchtroute. ²⁷ .	BSTTI par. 8.19, eis #16356; eis #16357; eis #16359	[=]

(*) Het geluidsbaken bij de uitgangsvluchtdeur in het MTK speelt in evacuatiebedrijf achtereenvolgens de volgende boodschappen af, conform eis BSTTI#9721 in de LTS, versie 1.2 SP1 B2:

- als deuren nog vergrendeld zijn: repeterend omroepbericht
ontruiming_bij_vergrendelde_deur:
"<ding dong> Uitgang hier. De vluchtdeur is over enkele ogenblikken te openen. < ding dong> Exit Here. Emergency door can be opened in a minute."
- Als de deuren zijn ontgrendeld: 2 x omroepbericht ontruiming_bij_ontgrendelde_deur:
"<ding dong> Uitgang hier. U kunt nu de vluchtdeur openen. <ding dong> Exit Here. Emergency door is unlocked."

²⁷ Dit moet wellicht worden verduidelijkt in de LTS.

c- Vluchtroutevoorzieningen bij vluchtdeuren in middenwand				
Nr.	Maatregel/ installatie	Korte omschrijving	Ref. LTS	Speelt rol bij VKF/CK/EK
I	In incidentbuis			
I-1	Verlichting verkeersbuis	Wordt op 100% geschakeld in standby-fase na detectie, dan wel calamiteitenbedrijf	BSTTI, par. 5.3	VKF2; CK
I-2	Bordjes L19, vluchtdeuraanduidingen	Statische (nalichtende) bordjes op tunnelwanden; geven afstanden aan tot dichtstbijzijnde vluchtdeuren	BSTTI, par. 5.18 (eis BSTTI-#8531)	[-]
I-3a	Dynamische bordjes "Exit overzijde"	Dynamische bordjes op tunnelwand tegenover vluchtdeuren: - ingeschakeld in normaal bedrijf, standby-fase na detectie en calamiteitenbedrijf; - uitgeschakeld (met vertraging) in bedrijf calamiteitondersteunend (zie bij III, is echter n.v.t. bij incidentbuis). (**)	N.v.t.; is nog niet uitgewerkt in BSTTI par. 5.18	VKF2, CK
I-4	Pijlen op wegdek	Statische pijlen op wegdek (thermoplast) aan weerszijden kantstrepen rijbaan, ter plaatse van vluchtdeur, wijzend in richting vluchtdeur	BSTTI, par. 5.18 (eis BSTTI-#4666)	[-]
I-5	Vluchtdeurindicatie	Per vluchtdeur: Aanstraalverlichting (brandt continu); Intern verlichte pictogram (brandt continu); Contourverlichting (wordt ingeschakeld in evacuatiebedrijf); Geluidsbaken (wordt ingeschakeld in evacuatiebedrijf). (****)	BSTTI, par. 5.18	EK
I-6	(Rij van) vergrendelbare vluchtdeuren	Vergrendelde vluchtdeuren; geven vanuit incidentbuis toegang tot ondersteunende buis. Worden met vertraging ontgrendeld na instellen calamiteitenbedrijf (als ondersteunende buis geacht wordt verkeersvrij te zijn).	BSTTI, par. 5.17	VKF2; CK

c- Vluchtroutevoorzieningen bij vluchtdeuren in middenwand				
Nr.	Maatregel/ installatie	Korte omschrijving	Ref. LTS	Speelt rol bij VKF/CK/EK
I-7	Omroep verkeersbuis	Speelt in evacuatiebedrijf omroepberichten af om mensen te bewegen om te vluchten, c.q. zich naar de vluchtdeuren te begeven.	BSTTI, par. 5.13	EK
II In veilige ruimte				
N.v.t.; geen sprake van een (aparte) veilige ruimte bij dit vluchtconcept; veilige ruimte wordt gevormd door de ondersteunende buis				
III In/bij ondersteunende buis				
III-1	MTM-koppeling verkeersbuis	Zorgt voor instellen snelheidsbeperkingen voor het verkeer respectievelijk het afkruisen van de rijstroken bij het afsluiten van de tunnelbuis (verkeersvrij maken t.b.v. veilige vluchtroute).	BSTTI, par. 5.9	VKF2; VKF3; CK
III-2	Verkeerslicht verkeersbuis (VRI) + dynamisch J32-borden op portalen voorafgaand aan VRI	Zorgt voor (juridisch) afsluiten van de ondersteunende buis (verkeersvrij maken t.b.v. veilige vluchtroute). N.B.: dynamisch J-32 bord is nog niet in LTS opgenomen, maar wel in de [VRAI], waarnaar in de LTS wordt verwezen.	BSTTI, par. 5.4	VKF2; VKF3; CK
III-3	Afsluitboom verkeersbuis	Zorgt voor (fysiek) afsluiten van de ondersteunende buis (verkeersvrij maken t.b.v. veilige vluchtroute).	BSTTI. Par. 5.5	VKF2; VKF3; CK
III-4a	Dynamische bordjes "Exit overzijde"	Dynamische bordjes op tunnelwand tegenover vluchtdeuren: - ingeschakeld in normaal bedrijf, standby-fase na detectie en calamiteitenbedrijf; - uitgeschakeld (met vertraging, gelijktijdig met ontgrendelen vluchtdeuren) in bedrijf calamiteitondersteunend. (**)	N.v.t.; is nog niet uitgewerkt in BSTTI par. 5.18	VKF2, CK

c- Vluchtroutevoorzieningen bij vluchtdeuren in middenwand				
Nr.	Maatregel/ installatie	Korte omschrijving	Ref. LTS	Speelt rol bij VKF/CK/EK
III-4b	Dynamische bordjes "Exit ← / →"	Dynamische bordjes op tunnelwand tegenover vluchtdeuren. Wijzen de vluchtenden naar de rookvrije uitgang van de ondersteunende buis: - uitgeschakeld in normaal bedrijf, standby-fase na detectie en calamiteitenbedrijf; - ingeschakeld (met vertraging, gelijktijdig met ontgrendelen vluchtdeuren) in bedrijf calamiteitondersteunend. (**)	N.v.t.; is nog niet uitgewerkt in BSTTI par. 5.18	VKF2, CK
III-5	Verlichting verkeersbuis	Wordt op 100% geschakeld in calamiteitenbedrijf (gelijktijdig met ontgrendelen vluchtdeuren), t.b.v. optimale verlichting vluchtroute door ondersteunende buis	BSTTI, par. 5.3	VKF2; CK
III-6	Omroep verkeersbuis	Speelt in evacuatiebedrijf omroepberichten af (vanaf moment ontgrendelen vluchtdeuren) om mensen te bewegen om de tunnelbuis te verlaten door het volgen van de bordjes (die naar de rookvrije uitgang leiden).	BSTTI, par. 5.13 (***)	EK
III-7	Ventilatie verkeersbuis	Zorgt voor rookvrij blijven ondersteunende buis, die bij dit vluchtconcept in feite deel uit maakt van de veilige ruimte. De functie van de ventilatie in de ondersteunende buis is in dit kader vergelijkbaar met de functie van de overdrukventilatie in het MTK. Om praktische redenen is het inschakelen van de ventilatie in de ondersteunende buis echter ondergebracht bij VKF1 in plaats van VKF2 (zie paragraaf 5.2)	N.v.t.; ventilatie ondersteunende buis is nog niet opgenomen in scope VKF1 in LTS versie 1.2 SP1 B3.	VKF1; CK

c- Vluchtroutevoorzieningen bij vluchtdeuren in middenwand				
Nr.	Maatregel/ installatie	Korte omschrijving	Ref. LTS	Speelt rol bij VKF/CK/EK
IV	Buiten tunnel			
	Zie bij MTK met uitgangsvluchtdeuren naar de ondersteunende buis	De voorzieningen buiten de tunnel zijn identiek aan die het vluchtconcept MTK met uitgangsvluchtdeuren naar de ondersteunende buis: er moet een emissie-/rookmuur worden aangebracht aan beide zijden van de tunnel (zie bijlage I).		[-]

(**) De dynamische bordjes "Exit overzijde" en "Exit ← / →" moeten in onderlinge samenhang worden gezien. De bordjes zijn dynamisch vanwege het feit dat de vluchtroute over een lang gedeelte door de ondersteunende buis loopt. De mensen die door de vluchtdeur de ondersteunende buis betreden, moeten weten welke kant men op moet lopen om de ondersteunende buis te verlaten, namelijk naar de rookvrije uitgang van de ondersteunende buis. De bordjes "Exit ← / →" worden gebruikt om de mensen de juiste kant op te sturen. De bordjes hebben alleen betekenis als de buis zich in het bedrijf calamiteitondersteunend bevindt. In dat bedrijf worden de bordjes dus ingeschakeld. Om verwarring met de bordjes "Exit overzijde" te vermijden (die in het bedrijf calamiteitondersteunend juist geen functie hebben en alleen maar verwarrend kunnen werken omdat de mensen zouden kunnen worden gebogen om via een vluchtdeur weer naar de incidentbuis te gaan) worden de bordjes "Exit overzijde" tegelijkertijd uitgeschakeld. In normaal bedrijf, standby-fase na detectie en calamiteitenbedrijf is de situatie omgekeerd: bordjes "Exit overzijde" ingeschakeld en "Exit ← / →" uitgeschakeld. Het in-respectievelijk uitschakelen van de bordjes in de ondersteunende buis gebeurt gelijktijdig met het ontgrendelen van de vluchtdeuren, om verwarring of afleiding te voorkomen bij het verkeer dat zich nog in de ondersteunende buis bevindt.

(***) De LTS voorziet al in een omroep verkeersbuis in de ondersteunende buis, maar nog niet in het omroepbericht dat daar moet worden afgespeeld, namelijk:

"< Ding dong> Attentie, Attentie. Verlaat de tunnel door de pijlen te volgen en loop door naar de verzamelplaats - <Ding dong> Attention, Attention. Leave the tunnel by following the signs. Continue towards the assembly point."

Voorstel is om dit bericht in de LTS te identificeren als "ontruiming_tunnel".

(****) Nadeel van de geluidsbakens bij vluchtdeuren in de middenwand is, dat deze in principe ook kunnen worden gehoord in de ondersteunende buis, door de mensen die langs de vluchtdeuren naar de uitgang van de ondersteunende buis lopen. Hierdoor bestaat in principe het gevaar dat de mensen die het omroepbericht "Uitgang hier, Exit here" horen, door een vluchtdeur weer naar de incidentbuis lopen. Dit risico is in de praktijk echter klein, o.a. omdat men andere mensen door diverse deuren de ondersteunende buis zal zien binnenkomen en omdat men op een gegeven moment de uitgang van de ondersteunende buis zal zien. Omdat de geluidsbakens een essentiële voorziening zijn om de mensen vanuit de incidentbuis naar de vluchtdeur te leiden, weegt het voordeel uiteindelijk veel zwaarder dan het nadeel.

d- Vluchtroutevoorzieningen bij dwarsverbindingen				
Nr.	Maatregel/ installatie	Korte omschrijving	Ref. LTS	Speelt rol bij VKF/CK/EK
I In incidentbuis				
I-1	Verlichting verkeersbuis	Wordt op 100% geschakeld in standby-fase na detectie, dan wel calamiteitenbedrijf	BSTTI, par. 5.3	VKF2; CK
I-2	Bordjes L19, vluchtdeur-aanduidingen	Statische (nalichtende) bordjes op tunnelwanden; geven afstanden aan tot dichtstbijzijnde vluchtdeuren	BSTTI, par. 5.18 (eis BSTTI-#8531)	[-]
I-3a	Dynamische bordjes "Exit overzijde"	Dynamische bordjes op tunnelwand tegenover vluchtdeuren: - ingeschakeld in normaal bedrijf, standby-fase na detectie en calamiteitenbedrijf; - uitgeschakeld (met vertraging) in bedrijf calamiteitondersteunend (zie bij III, is echter n.v.t. bij incidentbuis). (**)	N.v.t.; is nog niet uitgewerkt in BSTTI par. 5.18	VKF2, CK
I-4	Pijlen op wegdek	Statische pijlen op wegdek (thermoplast) aan weerszijden kantstrepen rijbaan, ter plaatse van vluchtdeur, wijzend in richting vluchtdeur	BSTTI, par. 5.18 (eis BSTTI-#4666)	[-]
I-5	Vluchtdeur-indicatie	Per vluchtdeur: Aanstraalverlichting (brandt continu); Intern verlichte pictogram (brandt continu); Contourverlichting (wordt ingeschakeld in evacuatiebedrijf); Geluidsbaken (wordt ingeschakeld in evacuatiebedrijf).	BSTTI, par. 5.18	EK
I-6	(Rij van) vergrendelbare vluchtdeuren	Geven vanuit incidentbuis toegang tot de dwarsverbindingen (veilige ruimten). Zijn in normaal bedrijf, standby-fase na detectie en calamiteitenbedrijf onvergrendeld. Hoeven dus niet te worden ontgrendeld om vluchten mogelijk te maken.	BSTTI, par. 5.17	[-]

d- Vluchtroutevoorzieningen bij dwarsverbindingen				
Nr.	Maatregel/ installatie	Korte omschrijving	Ref. LTS	Speelt rol bij VKF/CK/EK
I-7	Omroep verkeersbuis	Speelt in evacuatiebedrijf omroepberichten af om mensen te bewegen om te vluchten, c.q. zich naar de vluchtdeuren te begeven.	BSTTI, par. 5.13	EK
II In veilige ruimte				
II-1	Overdruk veilige ruimte	Wordt ingeschakeld in standby-fase na detectie, dan wel calamiteitenbedrijf; zorgt dat dwarsverbinding rookvrij blijft bij openen vluchtdeuren in rookzone.	BSTTI, par. 7.6	VKF2; CK
II-2	Verlichting veilige ruimte	Wordt op 100% geschakeld in standby-fase na detectie, dan wel calamiteitenbedrijf.	BSTTI, par. 7.5	VKF2; CK
II-3a	Dynamische vluchtroute-indicatie	Geven in de dwarsverbinding de correcte vluchtrichting aan. De bordjes verschillen van die in een MTK. In ingeschakelde toestand tonen de bordjes een pijl die naar de uitgangsvluchtdeur wijst. De richting van de pijl hangt dus af van welke buis de incidentbuis is. Eén bordje met pijl volstaat (bijvoorbeeld aangebracht tegen de wand) omdat de uitgangsvluchtdeur normaal gesproken al zichtbaar is, en je in een dwarsverbinding eigenlijk maar 1 kant op kan lopen. De bordjes zijn uitgeschakeld in normaal bedrijf en worden ingeschakeld in de standby-fase na detectie, dan wel calamiteitenbedrijf	N.v.t.; is nog niet uitgewerkt in BSTTI par. 7.4	VKF2; CK

d- Vluchtroutevoorzieningen bij dwarsverbindingen				
Nr.	Maatregel/ installatie	Korte omschrijving	Ref. LTS	Speelt rol bij VKF/CK/EK
II-4	Omroep veilige ruimte	Speelt in evacuatiebedrijf zo nodig live berichten af om de mensen te informeren over specifieke zaken (bijvoorbeeld dat het openen van de uitgangsvluchtdeuren langer duurt omdat de ondersteunende buis nog niet verkeersvrij is).	Live bericht i.p.v. vooraf opgenomen boodschap is nog niet uitgewerkt in BSTTI par. 7.7	[-]
II-5a	Vergrendelbare uitgangsvluchtdeur naar ondersteunende buis	Biedt uitgang vanuit dwarsverbinding naar ondersteunende buis; deze deur wordt vergrendeld in stand-by fase na detectie (dan wel bij instellen calamiteitenbedrijf; wordt met vertraging weer ontgrendeld na instellen calamiteitenbedrijf	BSTTI, par. 15.17, eis BSTTI#46 75	VKF2; CK
II-6	Indicatie uitgangsvluchtdeur aan zijde dwarsverbinding	Per uitgangsvluchtdeur: Intern verlichte pictogram (wordt ingeschakeld in evacuatiebedrijf); Geluidsbaken (*) (wordt ingeschakeld in evacuatiebedrijf).	N.v.t.; verlicht pictogram en contourverlichting zijn nog niet uitgewerkt in BSTTI par 5.18	EK
III	In/bij ondersteunende buis			
III-1	MTM-koppeling verkeersbuis	Zorgt voor instellen snelheidsbeperkingen voor het verkeer respectievelijk het afkruisen van de rijstroken bij het afsluiten van de tunnelbuis (verkeersvrij maken t.b.v. veilige vluchtroute).	BSTTI, par. 5.9	VKF2; VKF3; CK

d- Vluchtroutevoorzieningen bij dwarsverbindingen				
Nr.	Maatregel/ installatie	Korte omschrijving	Ref. LTS	Speelt rol bij VKF/CK/EK
III-2	Verkeerslicht verkeersbuis (VRI) + dynamisch J32-borden op portalen voorafgaand aan VRI	Zorgt voor (juridisch) afsluiten van de ondersteunende buis (verkeersvrij maken t.b.v. veilige vluchtroute). N.B.: dynamisch J-32 bord is nog niet in LTS opgenomen, maar wel in de [VRAI], waarnaar in de LTS wordt verwezen.	BSTTI, par. 5.4	VKF2; VKF3; CK
III-3	Afsluitboom verkeersbuis	Zorgt voor (fysiek) afsluiten van de ondersteunende buis (verkeersvrij maken t.b.v. veilige vluchtroute).	BSTTI. Par. 5.5	VKF2; VKF3; CK
III-4a	Dynamische bordjes "Exit overzijde"	Dynamische bordjes op tunnelwand tegenover vluchtdeuren: - ingeschakeld in normaal bedrijf, standby-fase na detectie en calamiteitenbedrijf; - uitgeschakeld (met vertraging, gelijktijdig met ontgrendelen vluchtdeuren) in bedrijf calamiteitondersteunend. (**)	N.v.t.; is nog niet uitgewerkt in BSTTI par. 5.18.	VKF2, CK
III-4b	Dynamische bordjes "Exit ← / →"	Dynamische bordjes op tunnelwand tegenover vluchtdeuren. Wijzen de vluchtenden naar de rookvrije uitgang van de ondersteunende buis: - uitgeschakeld in normaal bedrijf, standby-fase na detectie en calamiteitenbedrijf; - ingeschakeld (met vertraging gelijktijdig met ontgrendelen vluchtdeuren) in bedrijf calamiteitondersteunend. (**)	N.v.t.; is nog niet uitgewerkt in LTS BSTTI par. 5.18	VKF2, CK
III-5	Verlichting verkeersbuis	Wordt op 100% geschakeld in calamiteitenbedrijf (gelijktijdig met ontgrendelen vluchtdeuren), t.b.v. optimale verlichting vluchtroute door ondersteunende buis	BSTTI, par. 5.3	VKF2; CK

d- Vluchtroutevoorzieningen bij dwarsverbindingen				
Nr.	Maatregel/ installatie	Korte omschrijving	Ref. LTS	Speelt rol bij VKF/CK/EK
III-6	Omroep verkeersbuis	Speelt in evacuatiebedrijf omroepberichten af (vanaf moment ontgrendelen vluchtdeuren) om mensen te bewegen om de tunnelbuis te verlaten door het volgen van de bordjes (die naar de rookvrije uitgang leiden).	BSTTI, par. 5.13 (***)	EK
III-7	Ventilatie verkeersbuis	Zorgt voor rookvrij blijven ondersteunende buis, die bij dit vluchtconcept in feite deel uit maakt van de veilige ruimte. De functie van de ventilatie in de ondersteunende buis is in dit kader vergelijkbaar met de functie van de overdrukventilatie in het MTK. Om praktische redenen is het inschakelen van de ventilatie in de ondersteunende buis echter ondergebracht bij VKF1 in plaats van VKF2 (zie paragraaf 5.2)	N.v.t.; ventilatie onder- steunen- de buis is nog niet uitge- werkt in scope VKF1 in LTS versie 1.2 SP1 B3.	VKF1; CK
IV	Buiten tunnel			
	Zie bij MTK met uitgangsvluchtdeuren naar de ondersteunende buis	De voorzieningen buiten de tunnel zijn identiek aan die het vluchtconcept MTK met uitgangsvluchtdeuren naar de ondersteunende buis: er moet een emissie-/rookmuur worden aangebracht aan beide zijden van de tunnel (zie bijlage I).		[-]

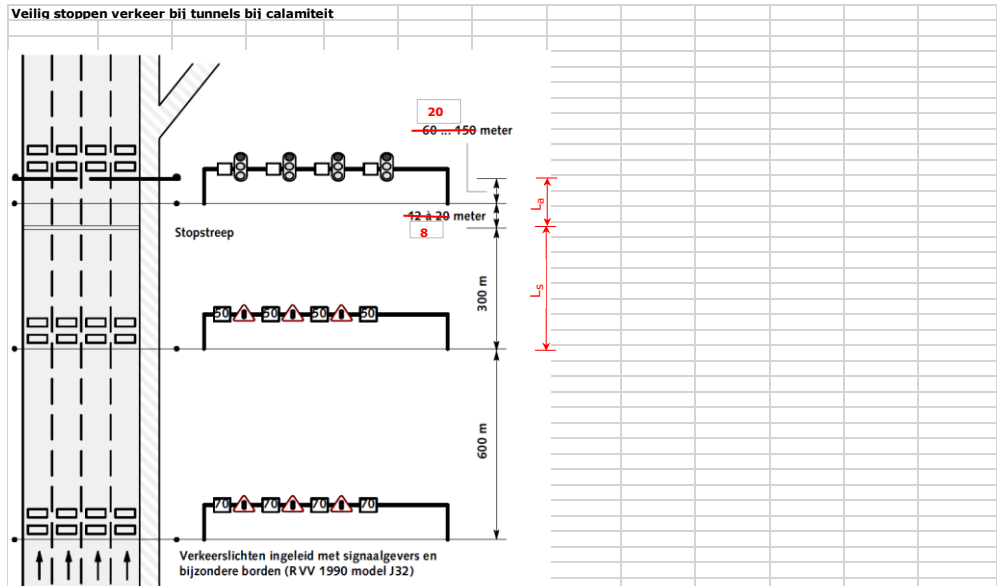
(*) Zie opmerking bij MTK met uitgangsvluchtdeuren in plaats van kopdeuren voor een specificatie van de berichten van het geluidsbaken. Verdere opmerking: bij een dwarsverbinding is (in tegenstelling tot bij een MTK met uitgangsvluchtdeuren) geen contourverlichting rondom de uitgangsvluchtdeur nodig, omdat bij een dwarsverbinding slechts sprake is van 2 deuren: de ingang deur en de uitgang deur. Het verlichte pictogram en het geluidsbaken (in combinatie met de dynamische vluchtroute-indicatie) maken ook zonder contourverlichting voldoende duidelijk welke deur men als uitgang moet gebruiken.

(**) Zie opmerking bij vluchtdeuren in middenwand.

(***) Zie opmerking bij vluchtdeuren in middenwand.

Bijlage D

Onderbouwing benodigde tijd veilig afsluiten tunnel



N.B.: niet afgebeeld in bovenstaande figuur: derde portaal voorafgaand aan de VRI, om het MTM-beeld "90" te kunnen tonen. Snelheidsmaatregelen die worden neergezet buiten de AID om worden namelijk altijd ingeleid met "90", ook als de maximum snelheid 100 km/u is (dit is gebruikelijk op het snelwegennet).
 De afstand van het betreffende portaal tot het portaal met MTM-beelden "70" is bij voorkeur 600m
 Momenteel wordt een nieuwe versie van de [VRAI] opgesteld waarin e.e.a. ook wordt vastgelegd.
 De in de figuur hierboven gecorrigeerde afstanden zijn eveneens in overeenstemming met de nieuwe inzichten die in de nieuwe versie van de [VRAI] worden verwerkt. Belangrijk punt daarbij is, dat de afstand van de VRI tot de afsluitboom voor tunnels wordt teruggebracht naar 20m.
 Er wordt daarmee aangesloten bij de afstanden die bij beweegbare bruggen worden gehanteerd. Hetzelfde geldt voor de afstand van de stopstreep tot de VRI (wordt 8m). De gedachte achter deze kortere afstanden is, dat de stopstreep, VRI en afsluitboom een duidelijke samenhang moeten vormen voor de weggebruikers (o.a. direct zicht op afsluitboom: duidelijkheid waarom men moet stoppen).
 Harmonisatie van de afstanden bij tunnels en bruggen verhoogt bovendien de herkenbaarheid en eenduidigheid voor de weggebruikers.

Algemeen

Er geldt: $T_{afslut} = T_{vws} + T_{va} + T_{neer}$

Hierin is:

- T_{afslut} : Benodigde tijd voor afsluiten tunnel, vanaf het moment dat de snelheidsmaatregel wordt ingezet tot en met het moment dat de afsluitboom geheel neer is [s]
- T_{vws} : Tijdsduur van de voorwaarschuwingfase [s]
- T_{va} : Tijdsduur van de rood-voor-afsluitingsfase [s]
- T_{neer} : Tijdsduur van het neergaan van de afsluitboom [s]

Voorwaarschuwingfase (VWS)

Er geldt:

$T_{vws} = T_{snelmaat} + T_{geel-knipper} = T_{snelmaat} + 6$ [s]
 $T_{vws} = L_s / v + herkenningstijd = L_s / 22,22 + 2$ [s]

Hierin is:

- $T_{snelmaat}$: Tijdsduur tussen het moment dat de snelheidsmaatregel op de MTM wordt getoond (en het J32 bord wordt ingeschakeld) en het tijdstip waarop de geel-knipperfase van de VRI start [s]
- $T_{geel-knipper}$: Tijdsduur van de geel-knipperfase van de VRI, voorafgaand aan de vast-geelfase [s]; $T_{geel-knipper} = 6$ seconden, conform de LTS
- L_s : Afstand tussen het laatste portaal voor de VRI en de stopstreep [m]; volgens de huidige [VRAI] geldt: $150m \leq L_s \leq 300m$; in overeenstemming met het concept van de nieuwe versie van de [VRAI] wordt als voorkeurswaarde gehanteerd: $L_s = 300m$

Toelichting:

De aldus berekende tijdsduur van de VWS-fase zorgt er voor dat een voertuig dat het laatste portaal voor de VRI passeert niet meer wordt geconfronteerd met een vast geel licht op de VRI en dus kan doorrijden (vast geel betekent juridisch dat men moet proberen te stoppen). Hierbij wordt uitgegaan van het meest langzame voertuig. Op de snelweg is dit een vrachtwagen met een snelheid van $80 \text{ km/u} = 22,22 \text{ m/s}$.

Tabel (afgeronde waarden):

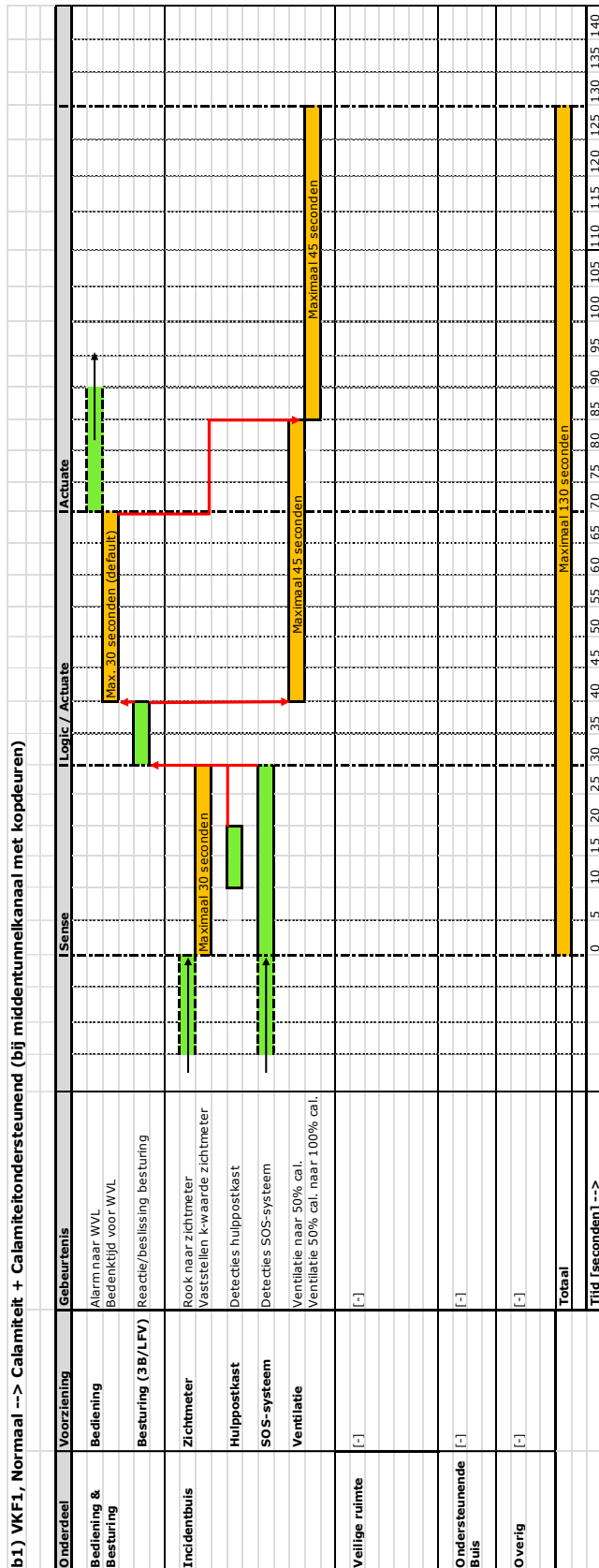
L_s [m]	150	175	200	225	250	275	300
T_{vws} [s]	9	10	11	12	13	14	16
$T_{geel-knipper}$ [s]	6	6	6	6	6	6	6
$T_{snelmaat}$ [s]	3	4	5	6	7	8	10

Beschouwing:	
Als een snelle afsluiting van de tunnel van belang is, met name bij een vluchtconcept met vluchtdeuren in de middenwand (geen veilige ruimte, vluchtroute door de ondersteunende buis) dan is een L_s van 150m geëigend (reductie T_{snelmaat} tot 3 seconden). In andere gevallen is een L_s van 300m acceptabel (T_{snelmaat} 10 seconden).	
Rood-voor-afsluitingsfase (RVA)	
Er geldt:	
$T_{\text{rva}} = T_{\text{geel}} + T_{\text{rood}}$	
$T_{\text{rva}} = T_{\text{reactie}} + T_{\text{pardon}} + T_{\text{ontnuim}}$	
$T_{\text{pardon}} = v / 2a_{\text{rem}} [s]$; $v = 13,89\text{m/s}$ en $a_{\text{rem}} = 2,5\text{m/s}^2 \Rightarrow T_{\text{pardon}} = 13,89/(2*2,5) = 3$ seconden	
$T_{\text{ontnuim}} = (L_{\text{voertuig}} + L_s)/13,89 [s]$	
Hierin is :	
T_{geel} :	Tijdsduur van de vastgeel-fase van de VRI = 6 seconden, conform de LTS
T_{rood} :	Tijdsduur tussen het moment dat de roodfase van de VRI start en het moment dat de afsluitboom neergaat [s]
T_{reactie} :	Reactietijd van de weggebruiker, c.q. de benodigde tijd om het rode licht waar te nemen en te handelen [s]; $T_{\text{reactie}} = 1$ seconde
T_{pardon} :	Deel van de roodfase dat de weggebruiker die de VRI dusdanig dicht is genaderd dat stoppen niet meer mogelijk is de gelegenheid geeft om de VRI te passeren [s]
T_{ontnuim} :	Benodigde tijd om het wegvak tussen de stopstreep en de afsluitboom verkeersvrij te maken [s]
L_{voertuig} :	Wettelijk toegestane lengte van een voertuig = 25,25m
L_s :	Afstand tussen de stopstreep en de afsluitboom = 8 + 20 = 28m
Met een tijdsduur van de vast-geelfase van 6 seconden (conform de LTS) worden T_{reactie} en T_{pardon} (ruim) afgedekt.	
Er geldt dan:	
$T_{\text{rva}} = 6 + T_{\text{ontnuim}}$	
$T_{\text{rood}} = T_{\text{ontnuim}} = (25,25+28)/13,89 = 3,8$ seconden --> afgerond 4 seconden	
Toelichting:	
De aldus berekende tijdsduur van de RVA-fase zorgt er voor dat een voertuig dat op het laatste moment de VRI passeert nog ongehinderd de afsluitboom kan passeren.	
Hierbij wordt conservatief uitgegaan van een voertuig met een snelheid van 50 km/u (=13,89m/s), omdat de matrix-signaalgever op het laatste portaal voor de VRI "50" aan geeft.	
Neer gaan afsluitboom	
Voor het neergaan van de afsluitboom (T_{neer}) wordt uitgegaan van 15 seconden.	
Tegelijkertijd met het moment dat de VRI op rood gaat gaan de rode lampjes van de afsluitboom knipperen.	
Dus: 4 seconden na VRI op rood en start knipperen rode lampjes gaat de afsluitboom naar beneden.	
Totale duur afsluiting tunnel	
De tijdsduur om de tunnel veilig af te sluiten (T_{afsluit}) varieert dus tussen de volgende waarden, afhankelijk van L_s :	
Minimum waarde (bij $L_s = 150\text{m}$):	34 seconden
Maximum waarde (bij $L_s = 300\text{m}$):	41 seconden
Deze waarden zijn exclusief benodigde tijd voorafgaand aan het geven van het commando "afsluiten tunnel" door het tunnelsysteem (benodigde tijd voor detectie noodzaak afsluiting en reactietijd wegverkeersleider en/of tunnelsysteem voorafgaand aan het zetten van de snelheidsmaatregel)	
Advies	
Pas bij een vluchtconcept met vluchtdeuren in de middenwand de minimum-waarde toe voor L_s : 150m.	
Bij de overige vluchtconcepten is de waarde van L_s minder kritisch. Neem in dat geval de voorkeurswaarde: $L_s = 300\text{m}$	

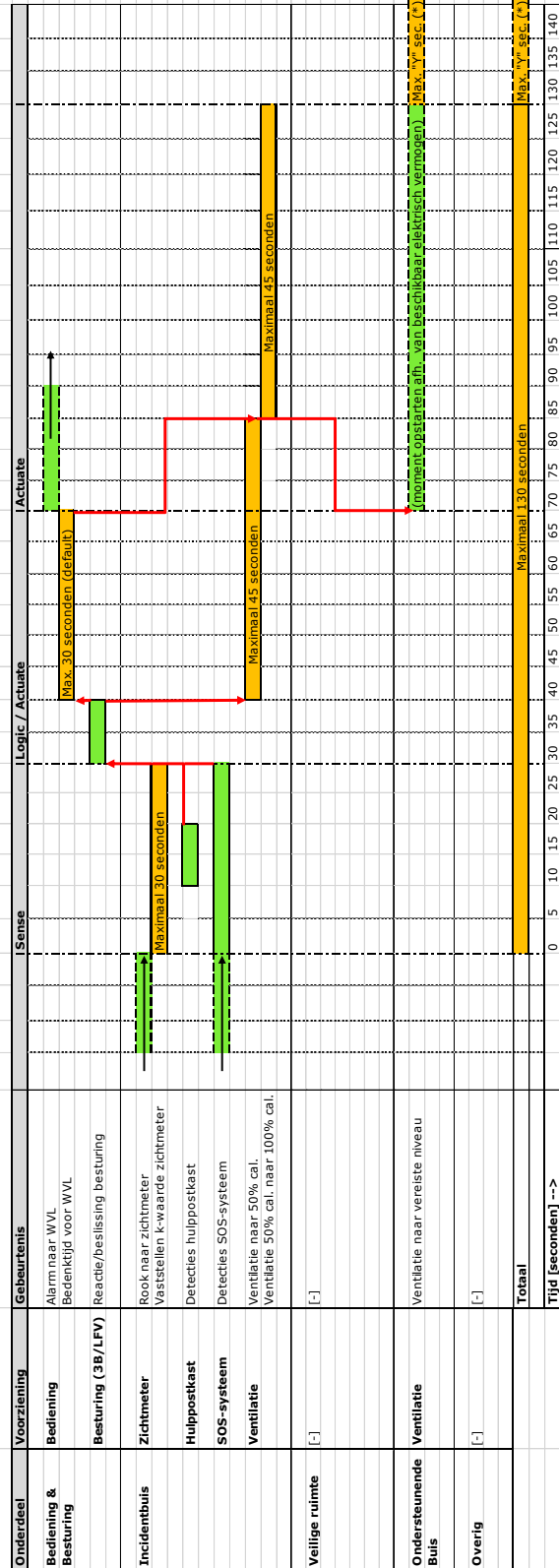
Bijlage E Tijdbalken / Swimming Lanes VKF1 (ventilatie)

N.B.:

In de navolgende schema's is er bij de overgang van standby-fase na detectie naar calamiteitenbedrijf + calamiteitondersteunend van uitgegaan dat de acties die moeten worden uitgevoerd bij de overgang van normaal bedrijf naar standby reeds volledig zijn uitgevoerd. Indien dit niet het geval is, dan valt de uitvoering van het resterende deel van de acties, bijvoorbeeld het inschakelen van de ventilatie in de incidentbuis op 50% van het calamiteitenvermogen, nog binnen de overgang naar calamiteitenbedrijf + calamiteitondersteunend. Dit zou er toe kunnen leiden dat de overgang van standby naar calamiteitenbedrijf + calamiteitondersteunend langer duurt dan op basis van de tijdbalken in schema's zou worden verwacht.



b2) VKF1, Normaal --> Calamiteit + Calamiteitondersteunend (bij vluchtroute deels door ondersteunende buis)



(*) De waarde "y" is als volgt:

- Bij middentunnelkanaal met uitgangsuren naar ondersteunende buis: Y = 90 seconden of 120 seconden;

- De ventilatie in de ondersteunende buis moet op het vereiste niveau zijn uiterlijk 90 seconden na het moment de ventilatie in de incidentbuis op het maximale niveau moet zijn.

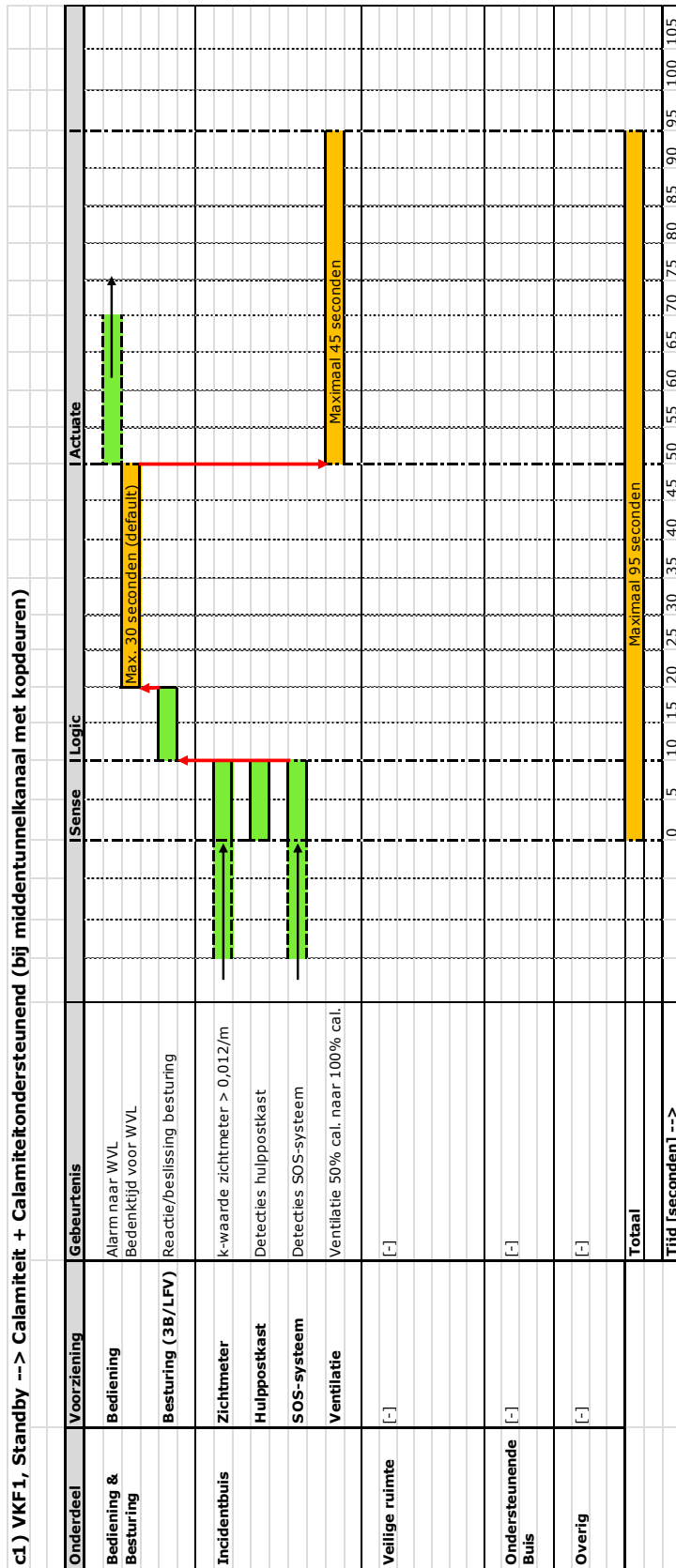
In de situatie dat de ventilatie in de ondersteunende buis is ingeschakeld om de luchtkwaliteit te beheersen, en de ventilatorrichting moet worden omgedraaid voor bedrijf calamiteit ondersteunend,

mag het 30 seconden langer duren voordat de ventilatie in de ondersteunende buis op het vereiste niveau is (dus uiterlijk 120 seconden nadat de ventilatie in de incidentbuis het maximale niveau moet hebben bereikt).

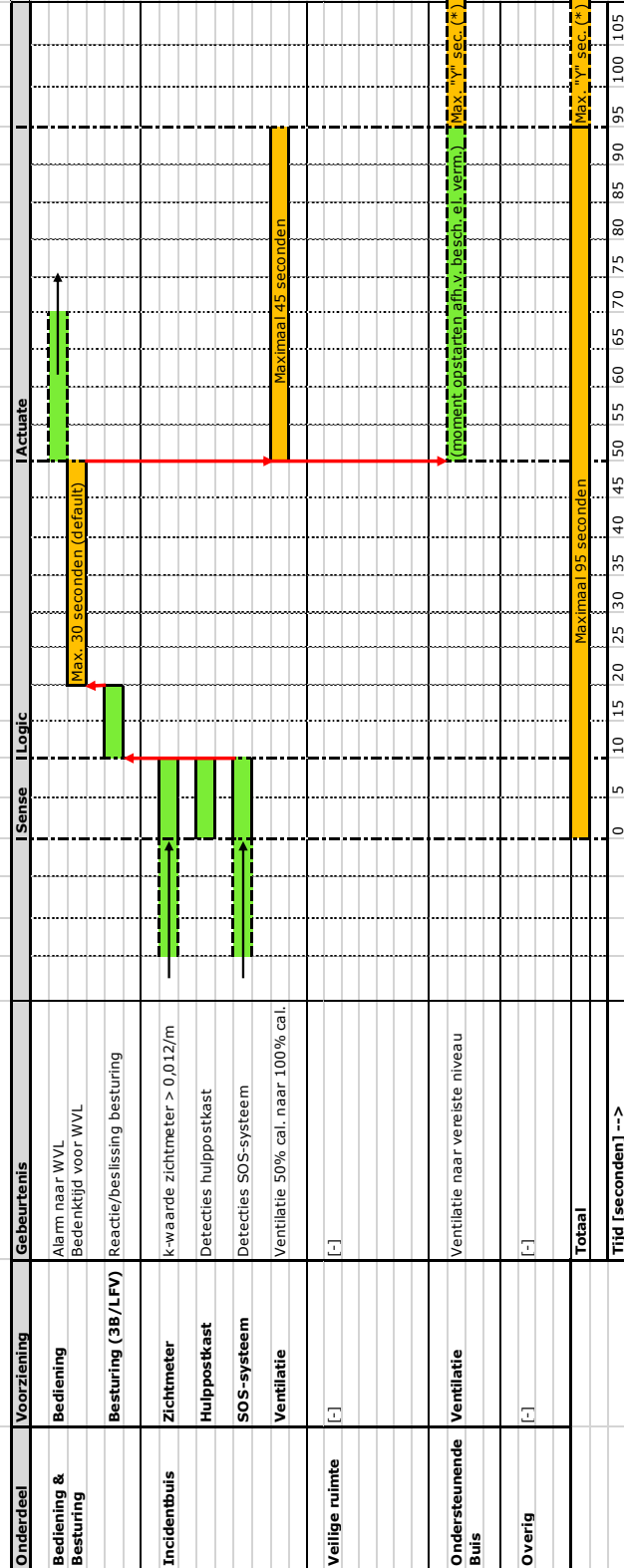
- Bij dwarsverbindingen en vluchturen in de middenwand: Y = resterende tijdsduur [sec.] tot moment dat vluchturen naar ondersteunende buis ontgrendeld moeten worden;

- De ventilatie in de ondersteunende buis is uiterlijk op het vereiste niveau op het moment dat vluchturen naar ondersteunende buis ontgrendeld moeten worden.

c1) VKF1, Standby --> Calamiteit + Calamiteitondersteunend (bij middentunnelkanaal met kopdeuren)



c2) VKF1, Standby --> Calamiteit + Calamiteitondersteunend (bij vluchtroute deels door ondersteunende buis)



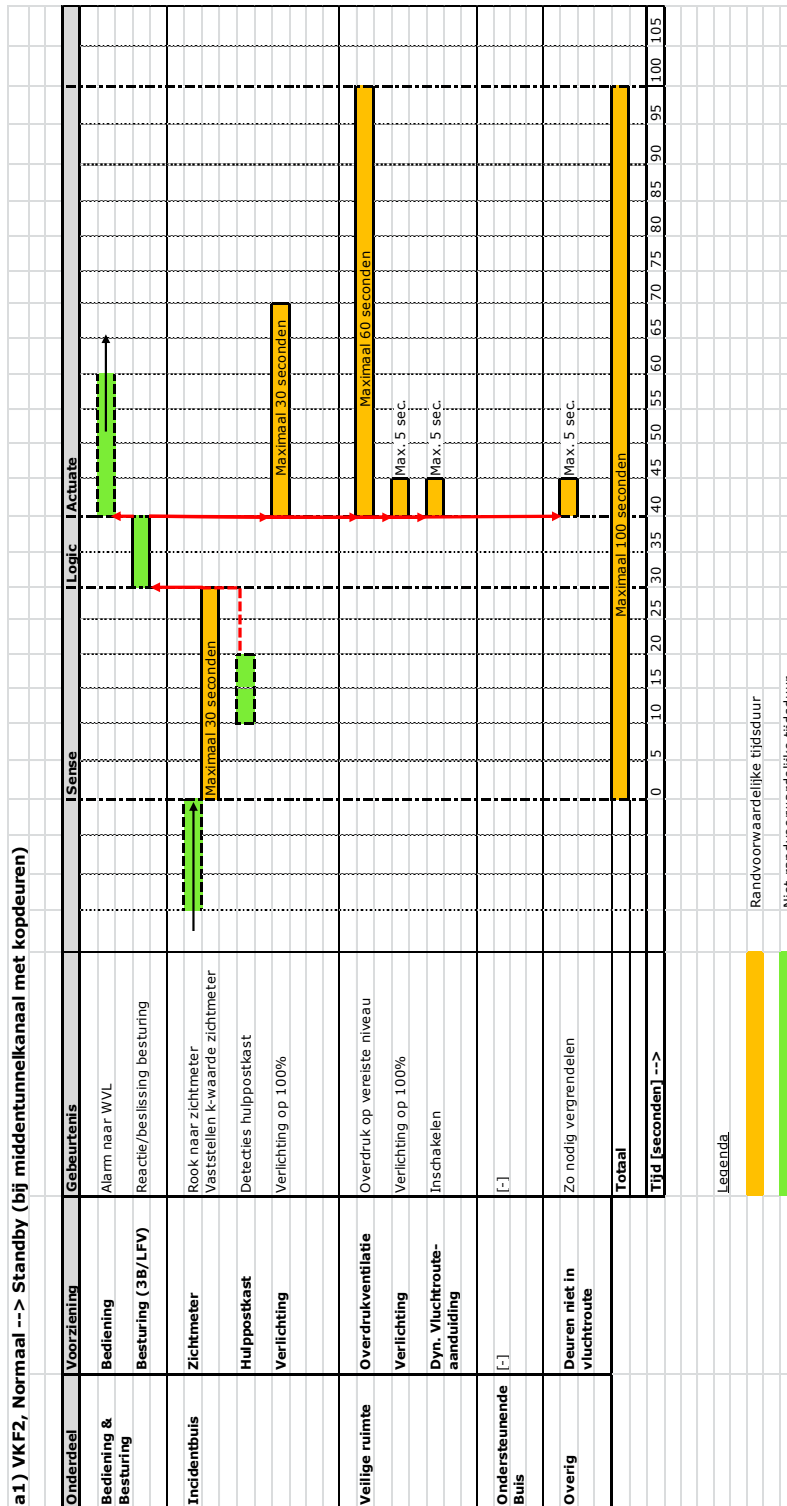
(*) De waarde "Y" is als volgt:
 - Bij middentunnelkanaal met uitgaansdeuren naar ondersteunende buis: Y = 90 seconden of 120 seconden;
 - De ventilatie in de ondersteunende buis moet op het vereiste niveau zijn uiterlijk 90 seconden na het moment de ventilatie in de incidentbuis op het maximale niveau moet zijn.
 In de situatie dat de ventilatie in de ondersteunende buis is ingeschakeld om de luchtkwaliteit te beheersen, en de ventilatorrichting moet worden omgedraaid voor bedrijf calamiteit ondersteunend, mag het 30 seconden langer duren voordat de ventilatie in de ondersteunende buis op het vereiste niveau is (dus uiterlijk 120 seconden nadat de ventilatie in de incidentbuis het maximale niveau moet hebben bereikt).
 - Bij dwarsverbindingen en vluchtroute in de middenwand: Y = resterende tijdsduur [sec.] tot moment dat vluchtroute naar ondersteunende buis ontgrensd moeten worden,
 De ventilatie in de ondersteunende buis is uiterlijk op het moment dat vluchtroute naar ondersteunende buis ontgrensd moeten worden.

Bijlage F Tijdbalken / swimming lanes VKF2 (veilige vluchtweg)

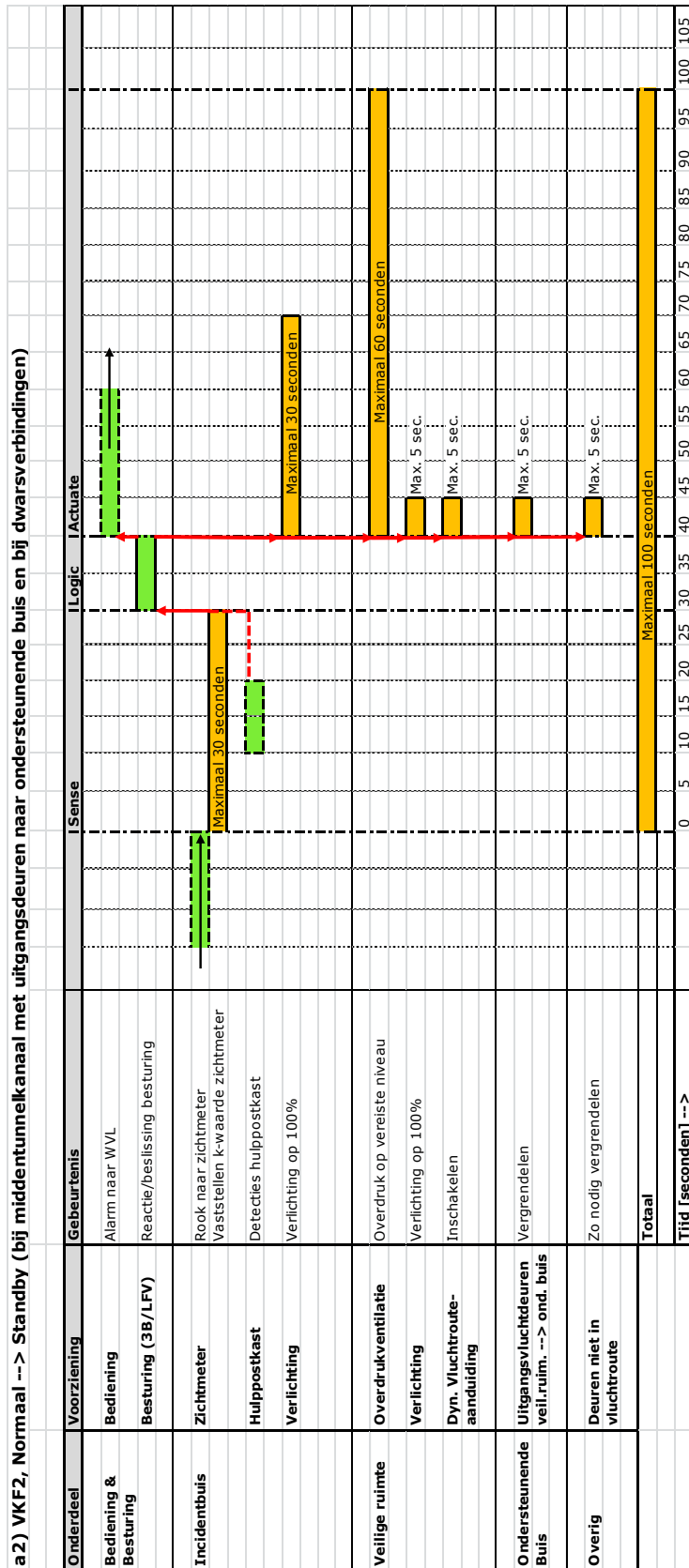
N.B.:

In de navolgende schema's is er bij de overgang van standby-fase na detectie naar calamiteitenbedrijf + calamiteitondersteunend van uitgegaan dat de acties die moeten worden uitgevoerd bij de overgang van normaal bedrijf naar standby reeds volledig zijn uitgevoerd. Indien dit niet het geval is, dan valt de uitvoering van het resterende deel van de acties, bijvoorbeeld het inschakelen van de ventilatie in de incidentbuis op 50% van het calamiteitenvermogen, nog binnen de overgang naar calamiteitenbedrijf + calamiteitondersteunend. Dit zou er toe kunnen leiden dat de overgang van standby naar calamiteitenbedrijf + calamiteitondersteunend langer duurt dan op basis van de tijdbalken in schema's zou worden verwacht.

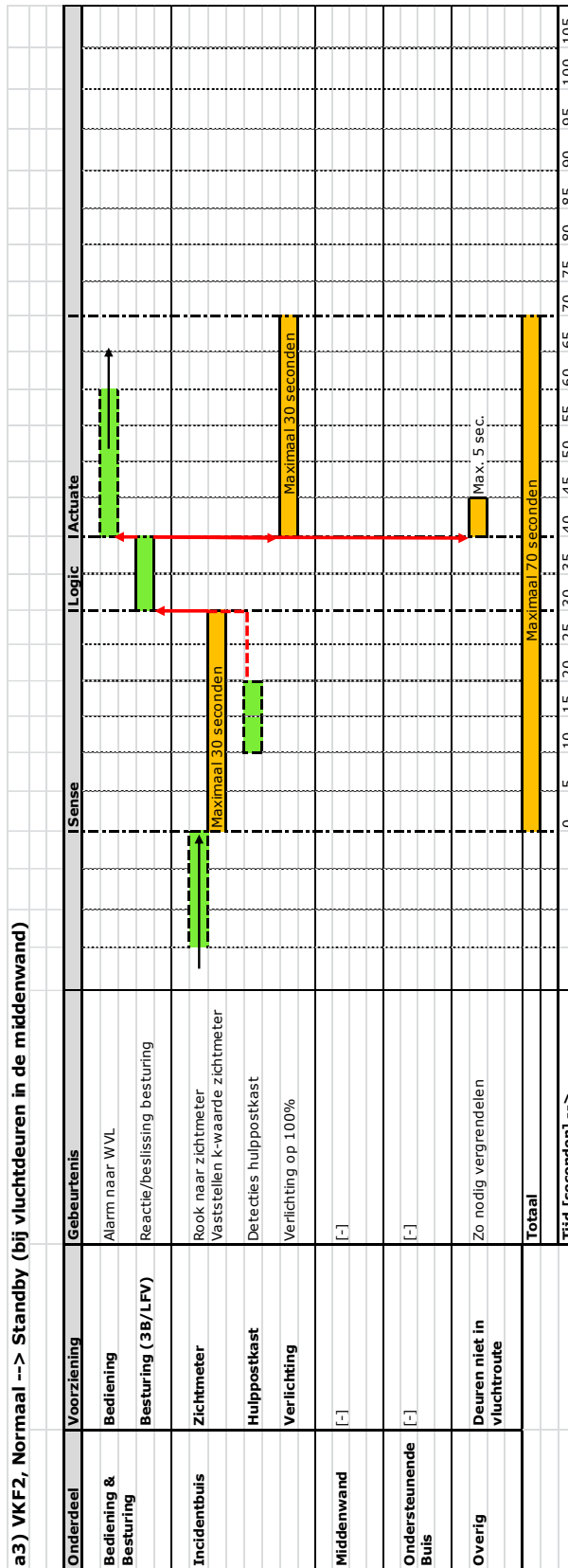
a1) VKF2, Normaal --> Standby (bij middentunnelkanaal met kopdeuren)



a2) VKF2, Normaal --> Standby (bij middentunnelkanaal met uitgangsheure naar ondersteunende buis en bij dwarsverbindingen)



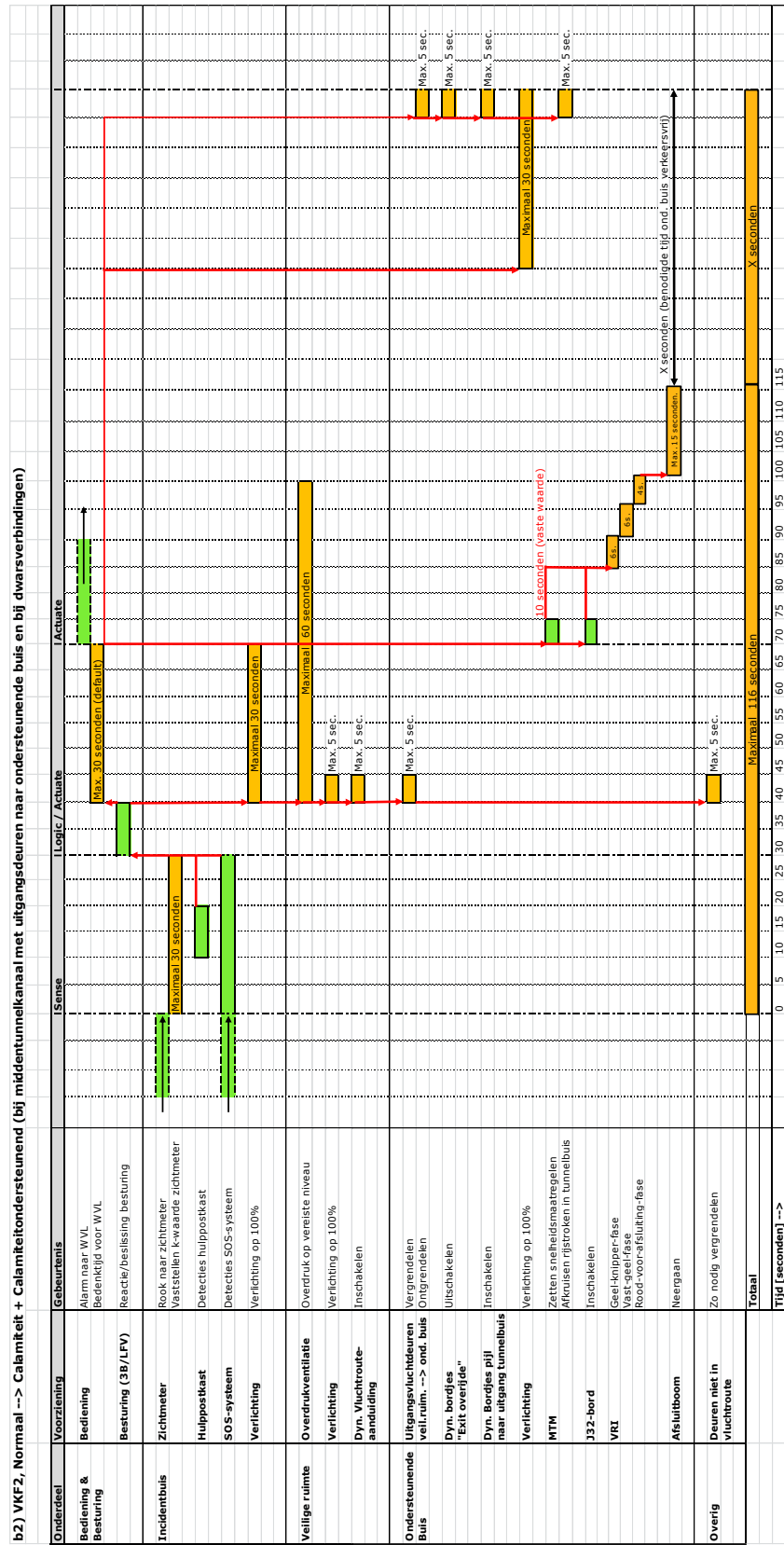
a3) VKF2, Normaal --> Standby (bij vluchtdeuren in de middenwand)



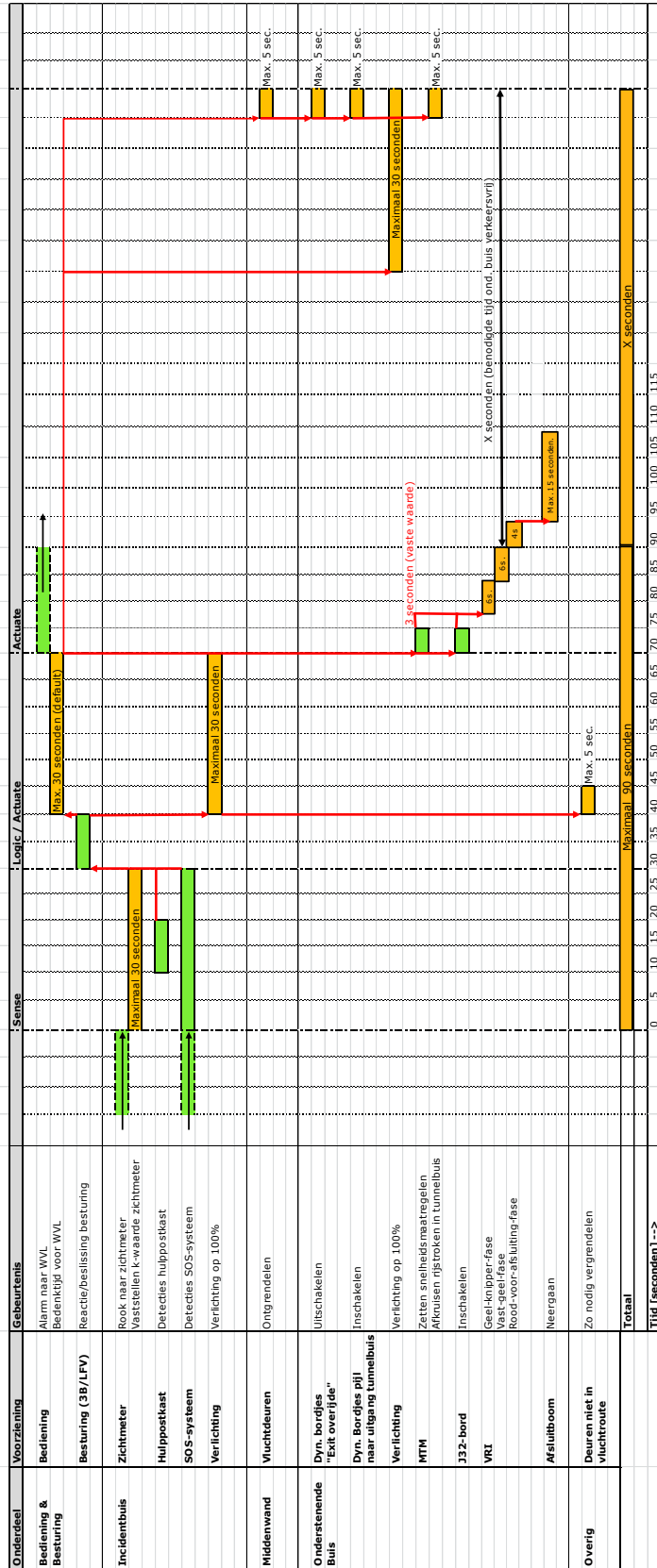
b1) VKF2, Normaal --> Calamiteit + Calamiteitondersteunend (bij middentunnelkanaal met kopdeuren)

Er vinden geen aanvullende acties plaats ten opzichte van de overgang van Normaal --> Standby

b2) VKF2, Normaal --> Calamiteit + Calamiteitondersteunend (bij middentunnelkanaal met uitgangseuren naar ondersteunende buis en bij dwarsverbindingen)



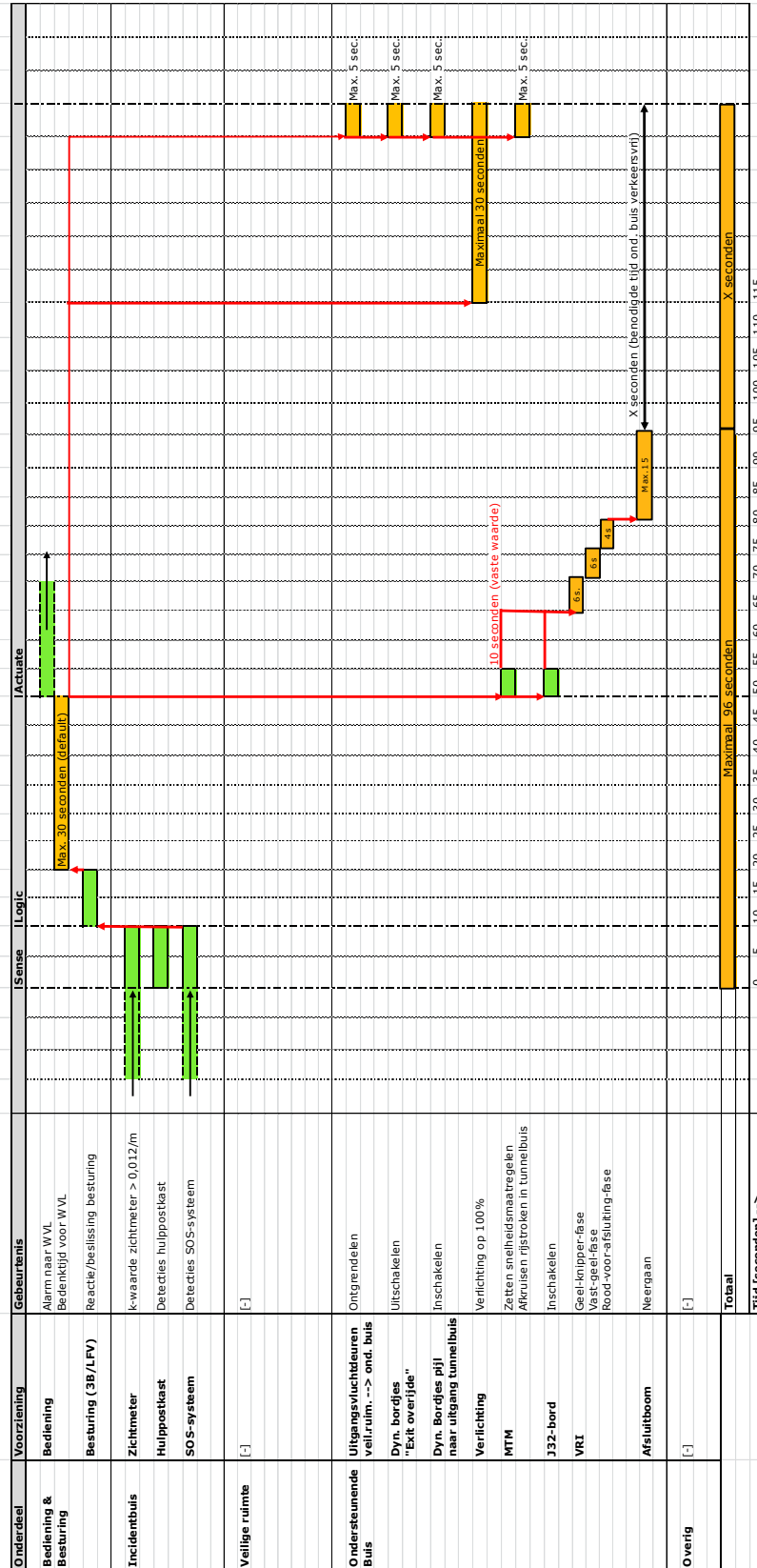
b3) VKF2, Normaal --> Calamiteitondersteunend (bij vluchtdeuren in de middenwand)



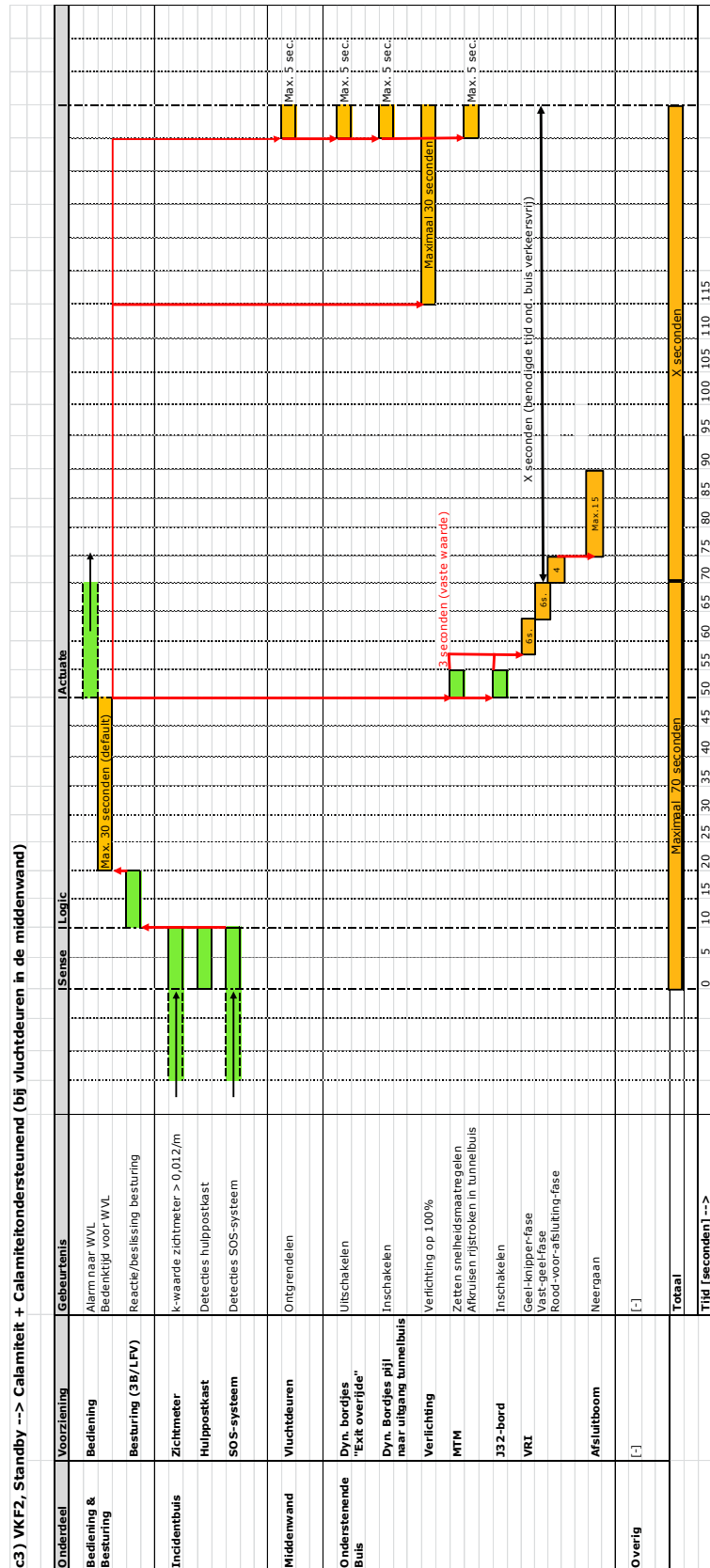
c1) VKF2, Standby --> Calamiteitondersteunend (bij middentunnelkanaal met kopdeuren)

Er vinden geen aanvullende acties plaats ten opzichte van de overgang van Normaal --> Standby

c2) VKF2, Standby --> Calamiteit + Calamiteitondersteunend (bij middentunnelkanaal met uitgangsteunende buis en bij dwarsverbindingen)

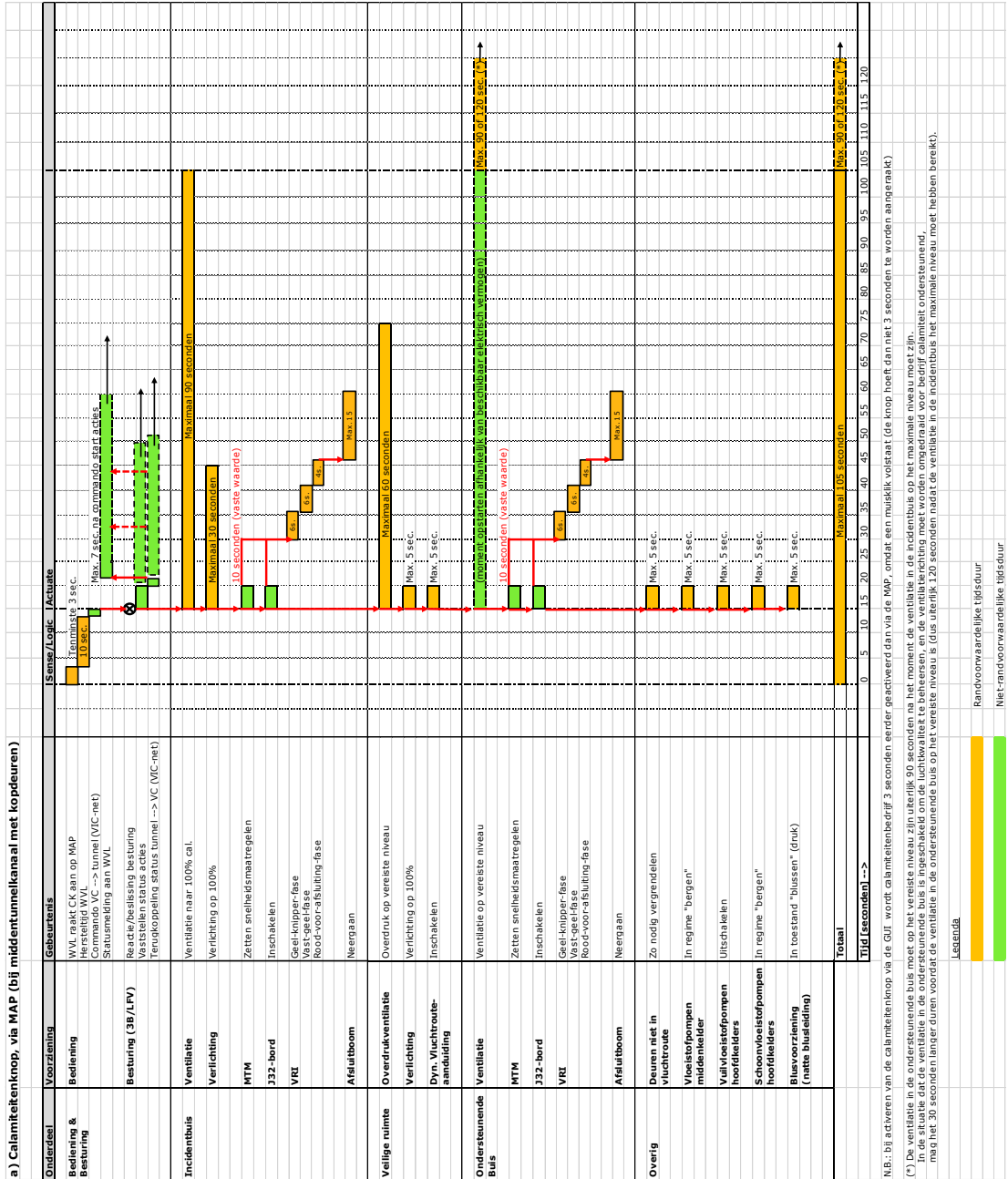


c3) VKF2, Standby --> Calamiteitondersteunend (bij vluchtdeuren in de middenwand)

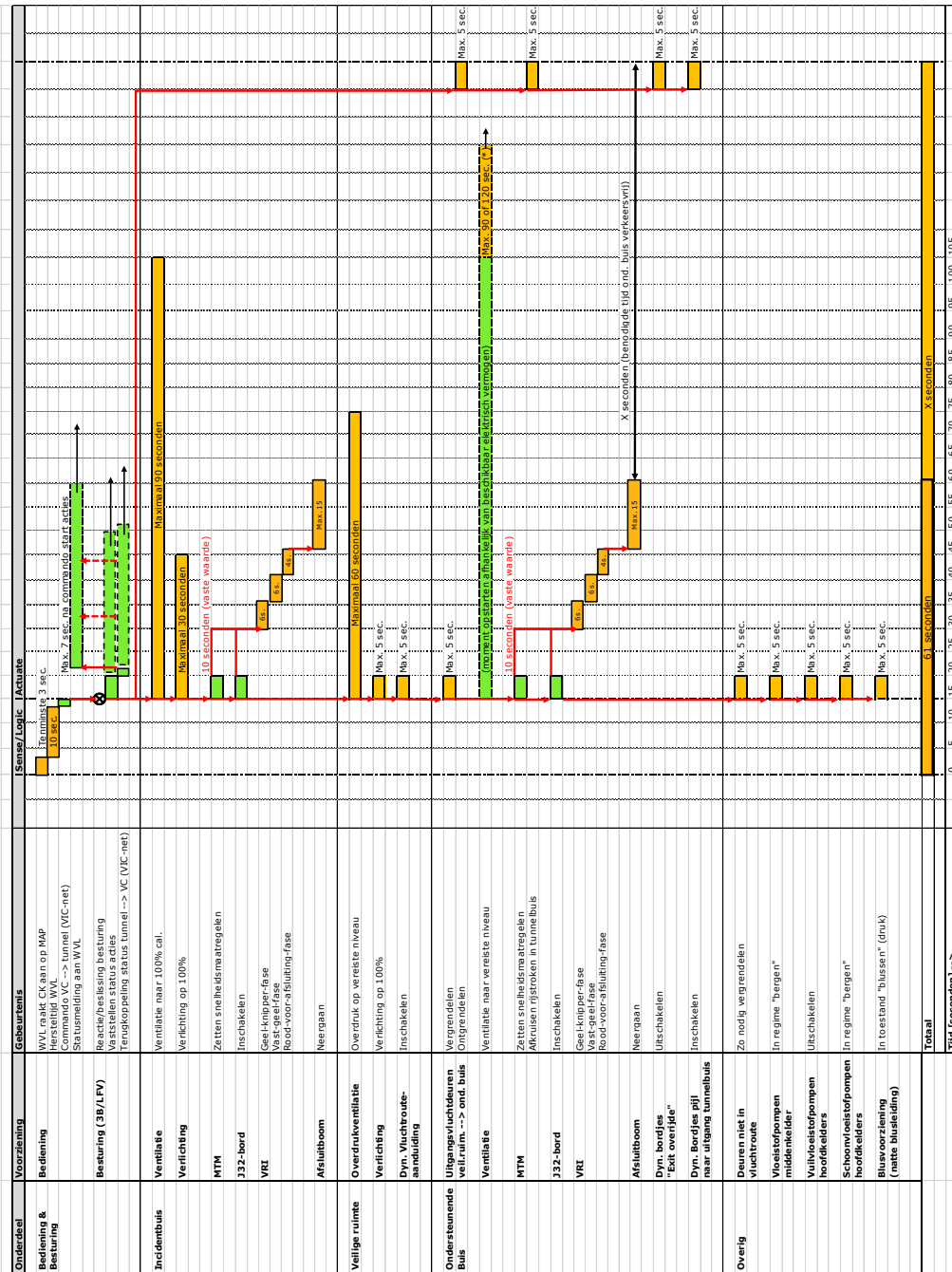


Bijlage G

Tijdbalken / swimming lanes acties calamiteitenknop

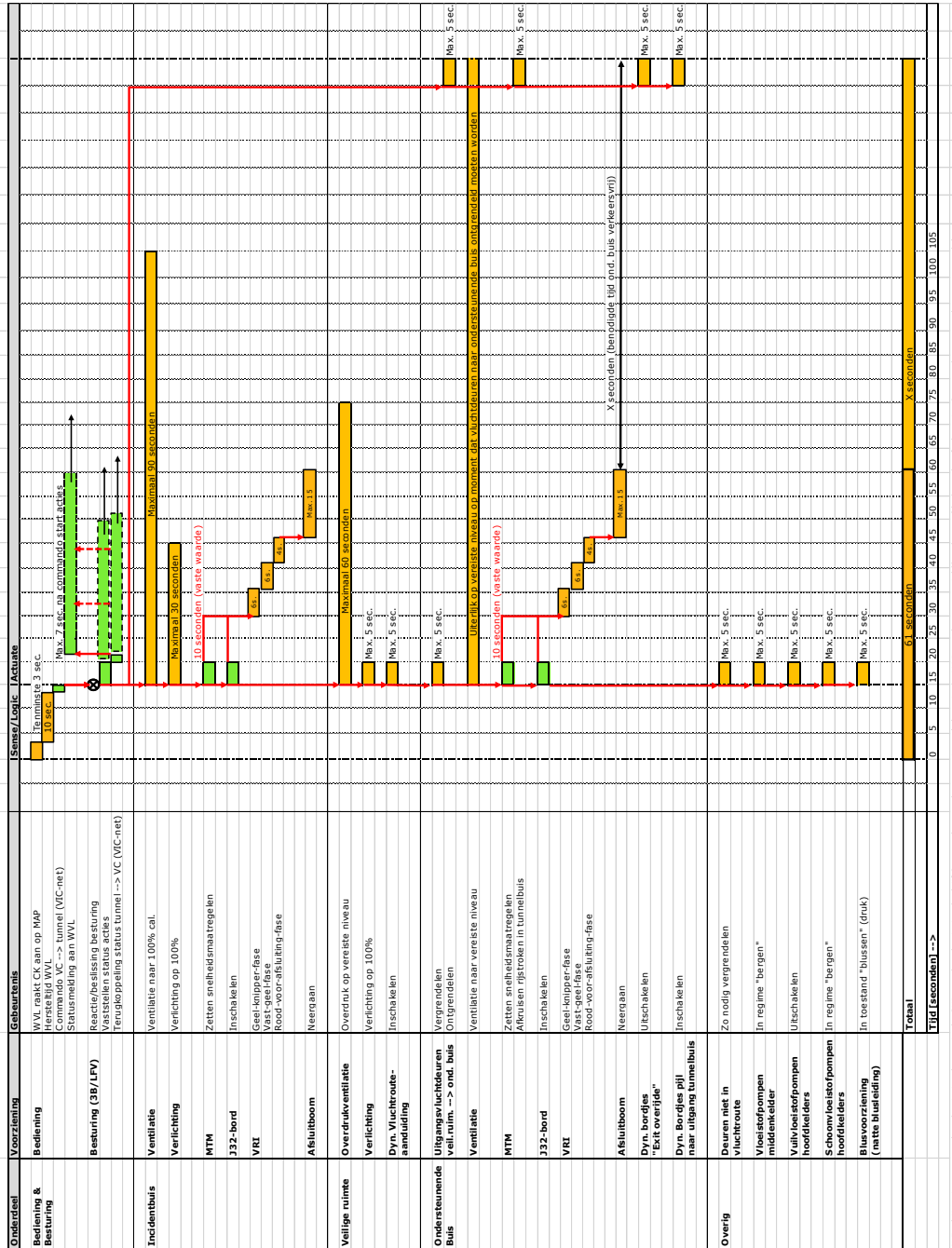


b) Calamiteitenknoop, via MAP (bij middentunnelkanaal met uitgangsuren naar ondersteunende buis)

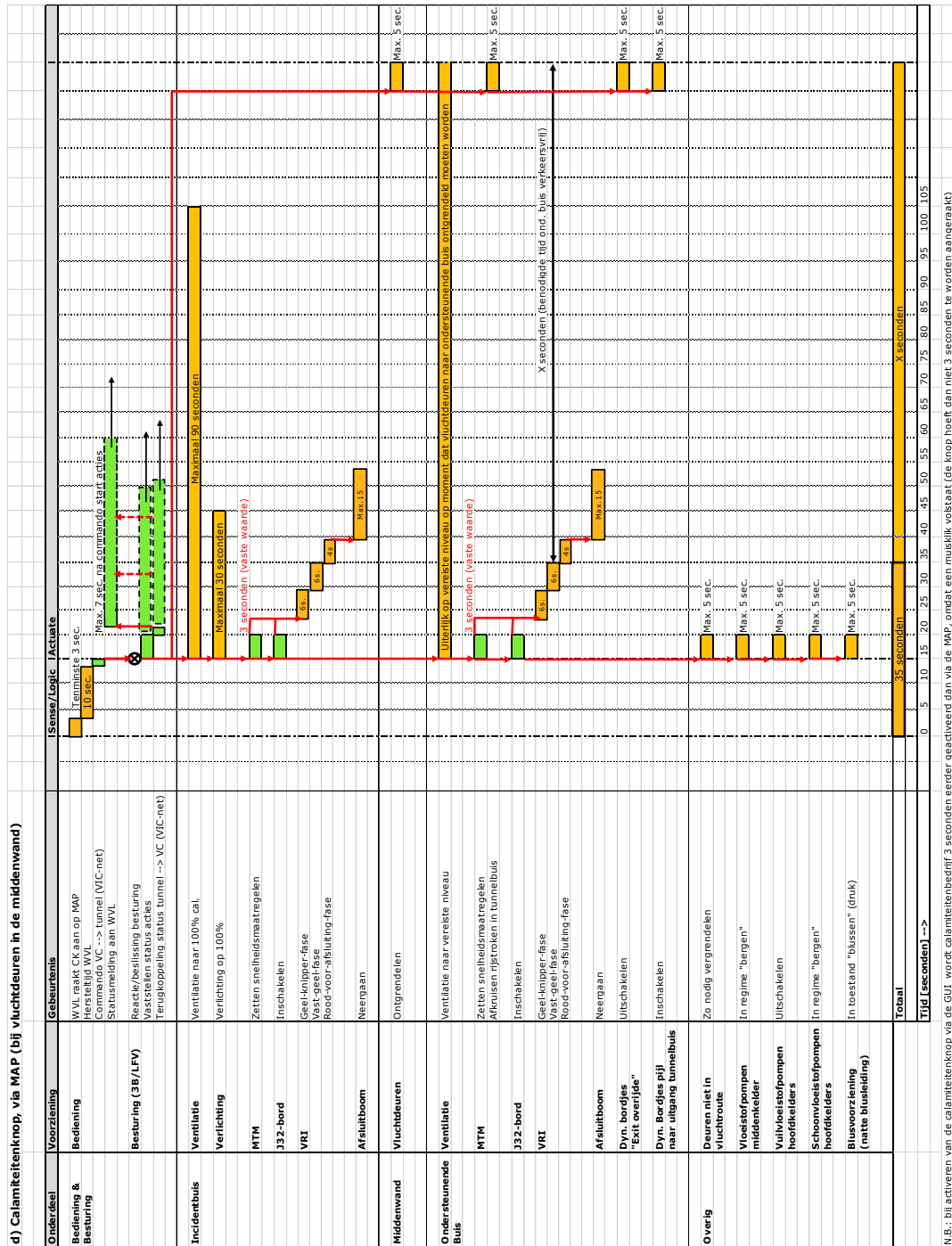


N.B.: bij activeren van de calamiteenknoop via de GUI wordt calamiteenbedrijf 3 seconden eerder reactiever dan via de MAP, omdat een muisknop maximaal 3 seconden te worden aangeraakt.
 De ventilatie in de ondersteunende buis moet op het verreste niveau zijn (afhankelijk van de situatie) in de incidentbus op het maximale niveau maximaal 30 seconden.
 In de situatie dat de ventilatie in de ondersteunende buis is ingeschakeld om de luchtkwaliteit te verbeteren, de ventilator moet worden opgevoerd voor bedrijfscalmiteit ondersteunend.
 mag het 30 seconden langer voordat de ventilatie in de ondersteunende buis op het verreste niveau is (dus uiterlijk 120 seconden nadat de ventilatie in de incidentbus het maximale niveau moet hebben bereikt).

o) Calamiteitknop, via MAP (bij dwarsverbindingen)

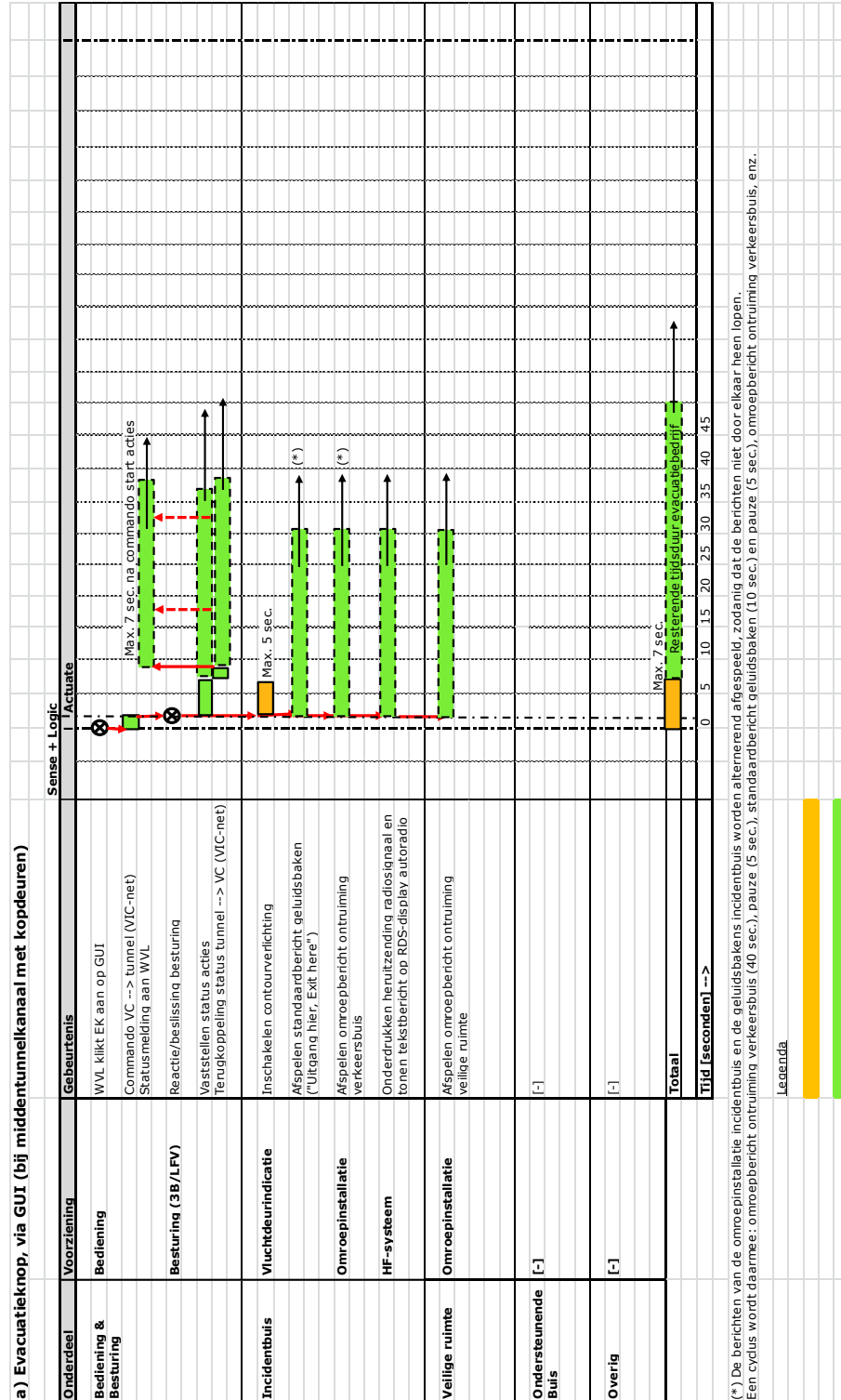


N.B.: bij activeren van de calamiteitknop via de GUI wordt calamiteitbedrijf 3 seconden eerder geactiveerd dan via de MAP, omdat een muisklik voelbaar is (de knop heeft dan niet 3 seconden te worden aangeraakt)

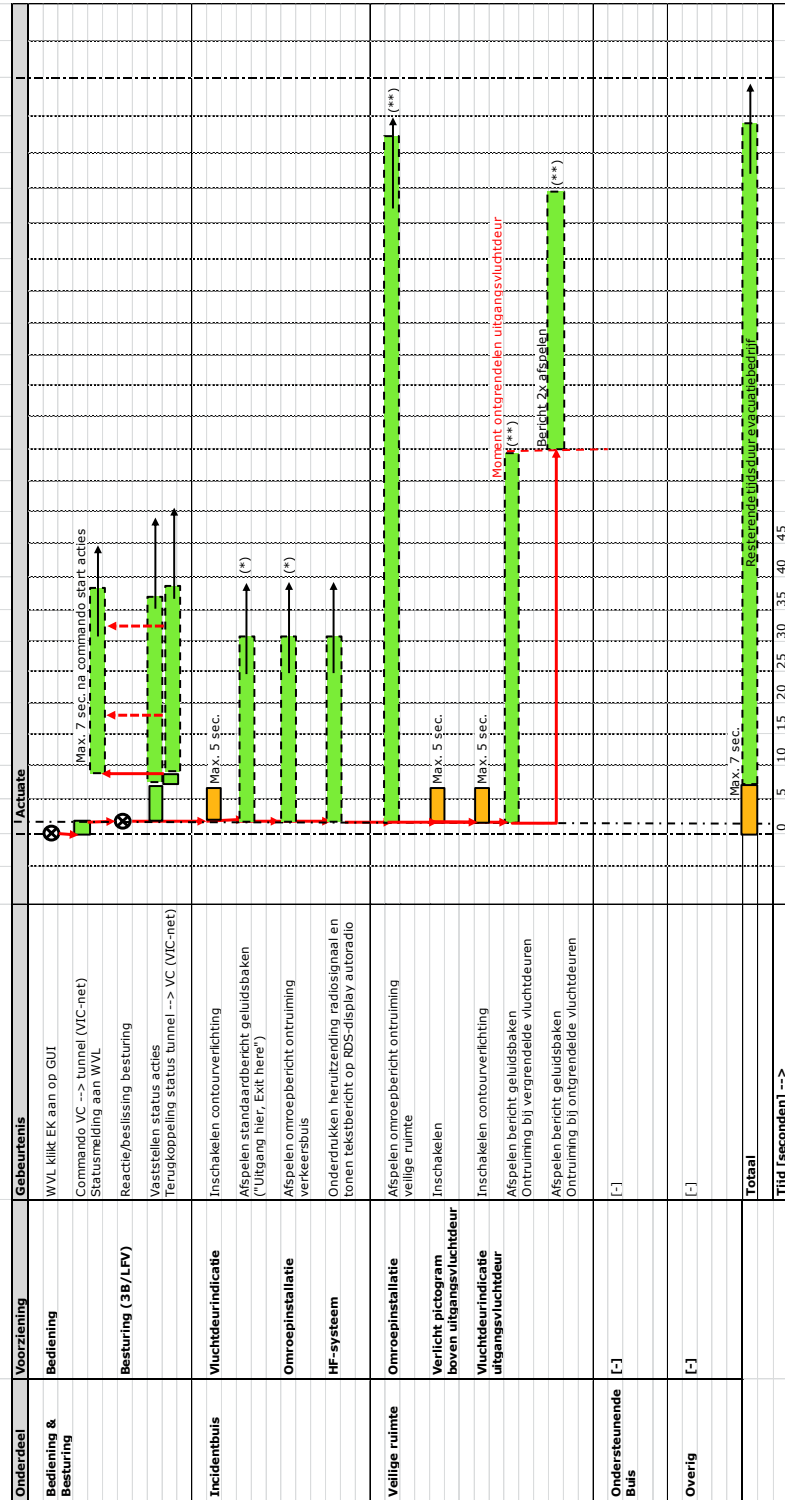


Bijlage H

Tijdbalken / swimming lanes acties evacuatieknop



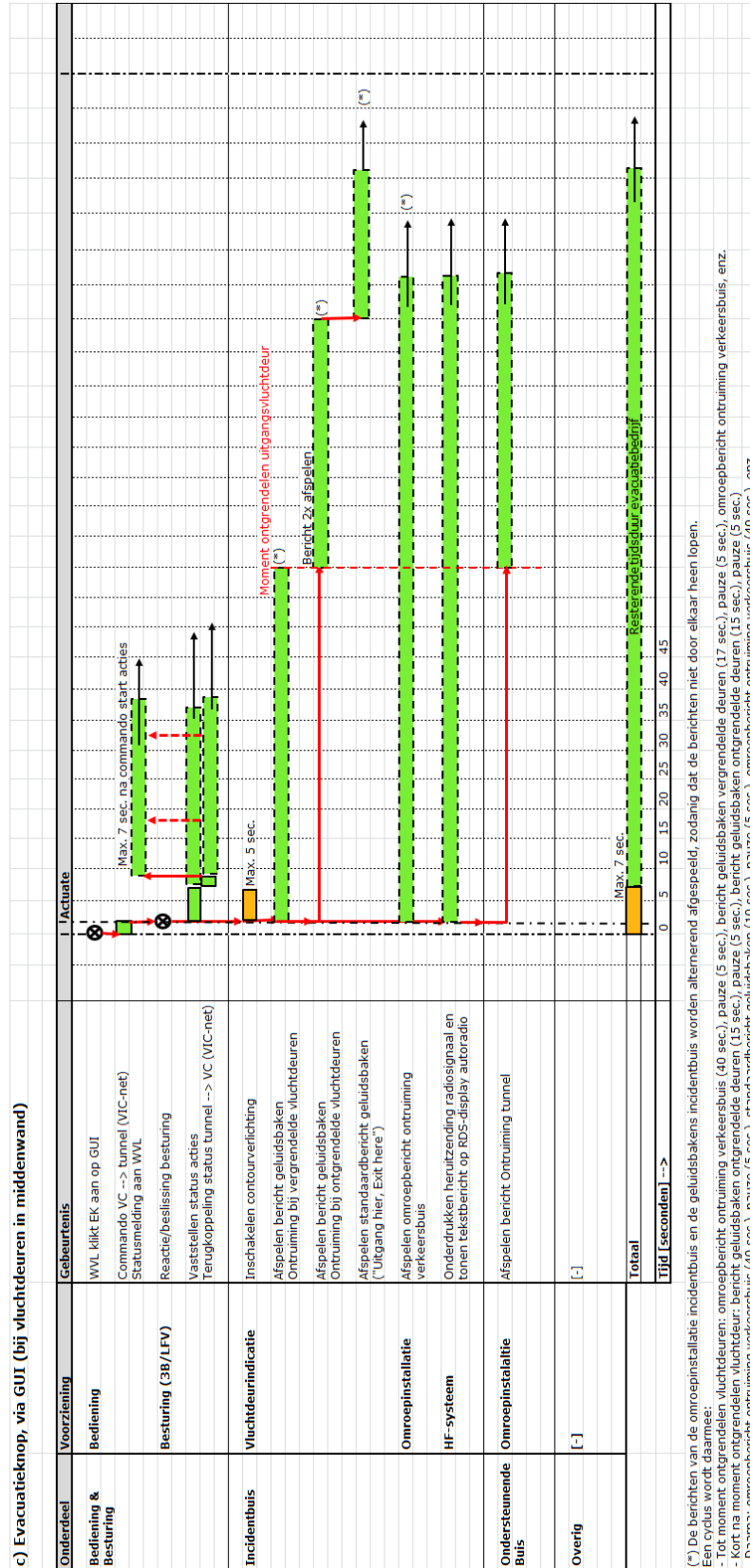
b) Evacuatieknop, via GUI (bij middentunnelkanaal met uitgangseurenen naar ondersteunende buis)



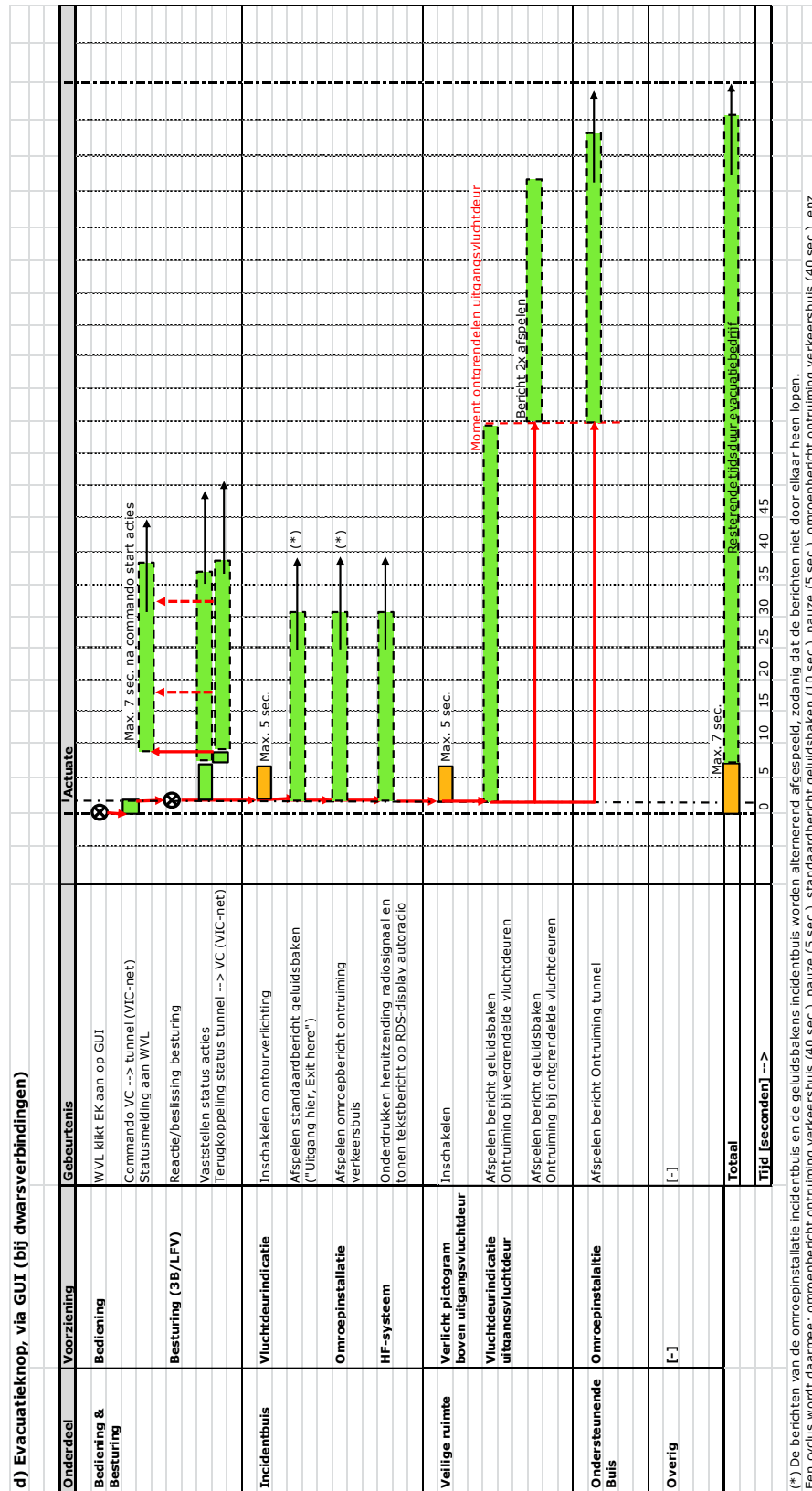
(*) De berichten van de omroepinstallatie incidentbuis en de geluidsbakken incidentbuis worden alternerend afgespeeld, zodanig dat de berichten niet door elkaar heen lopen. Een cyclus wordt daarmee: omroepbericht ontruiming verkeersbuis (40 sec.), pauze (5 sec.), standaardbericht geluidsbakken (10 sec.), pauze (5 sec.), omroepbericht ontruiming verkeersbuis (40 sec.), enz.

(**) De berichten van de omroepinstallatie veilige ruimte en het geluidsbakken van de uitgangsvluchtdeur worden alternerend afgespeeld, zodanig dat de berichten niet door elkaar lopen. Een cyclus wordt daarmee:
 - Omroepbericht ontruiming veilige ruimte (34 sec.), pauze (5 sec.), bericht geluidsbakken vergrendelde deuren (17 sec.), pauze (5 sec.), omroepbericht ontruiming veilige ruimte, enz.
 - Tot moment ontgrendelen vluchtdeur: bericht geluidsbakken ontgrendelde deuren (15 sec.), pauze (5 sec.), bericht geluidsbakken ontgrendelde deuren (15 sec.), pauze (5 sec.)
 - Daarna: omroepbericht ontruiming veilige ruimte (34 sec.), pauze (5 sec.), omroepbericht ontruiming veilige ruimte (34 sec.), pauze (5 sec.), enz.

c) Evacuatieknop, via GUI (bij vluchtdeuren in middenwand)



(*) De berichten van de omroepinstallatie incidentbuis en de geluidsbakens incidentbuis worden alternerend afgespeeld, zodanig dat de berichten niet door elkaar heen lopen.
 Een cyclus wordt daarmee:
 - Tot moment ontgrendelen vluchtdeuren: omroepbericht ontruiming verkeersbuis (40 sec.), pauze (5 sec.), bericht geluidsbaken vergrendelde deuren (17 sec.), pauze (5 sec.), omroepbericht ontruiming verkeersbuis, enz.
 - Kort na moment ontgrendelen vluchtdeur: bericht geluidsbaken ontgrendelde deuren (15 sec.), pauze (5 sec.), bericht geluidsbaken ontgrendelde deuren (15 sec.), pauze (5 sec.)
 - Daarna: omroepbericht ontruiming verkeersbuis (40 sec.), pauze (5 sec.), standaardbericht geluidsbaken (10 sec.), pauze (5 sec.), omroepbericht ontruiming verkeersbuis (40 sec.), enz.



Bijlage I Emissie- en rookmaatregelen buiten tunnel

Bij emissie-/rookmaatregelen buiten de tunnel zijn er 3 functies die moeten worden vervuld:

1. In normale verkeerssituatie: het voorkomen van hoge concentraties emissies in verkeersbuizen door aerodynamische kortsluiting tussen het uitgangsportaal van de ene buis en het ingangsportaal van de andere buis;
2. In situatie met brand: het voorkomen van rook in de ondersteunende buis door aerodynamische kortsluiting tussen het uitgangsportaal van de incidentbuis en het ingangsportaal van de ondersteunende buis;
3. In situatie met brand, bij een MTK met kopdeuren: het voorkomen dat iemand die de veilige ruimte verlaat buiten de tunnel alsnog in de rook terecht komt.

Ad 1

Aanbevelingen hiervoor zijn opgenomen in 'Aanbevelingen ventilatie van verkeerstunnels' (AVV) [17].

Ad 2

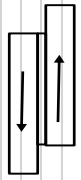
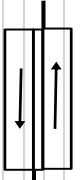
Bij het adequaat werken van de ventilatie in de incidentbuis en de ondersteunende buis wordt rook in de ondersteunende buis voorkomen door het in beide buizen ventileren in de rijrichting van de incidentbuis. Dit is van belang voor het rookvrij vluchten en/of de hulpverlening. Aanvullende maatregelen (naast ventilatie) zijn in lijn met dit rapport alleen nodig bij vluchtconcepten waarbij door de ondersteunende buis wordt gevlucht (om het rookvrij vluchten te borgen).

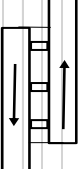
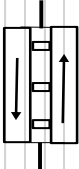
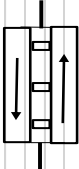
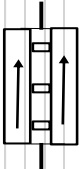
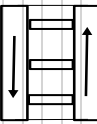
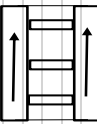
Ad 3

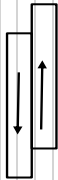

Er zijn hier 4 situaties te onderscheiden:

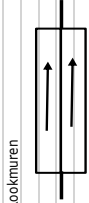
- A. Ventilatie werkt goed, vluchters gaan de goede kant op (dit is de naar verwachting meest voorkomende situatie) → gaat altijd goed;
- B. Ventilatie werkt goed, maar (enkele) vluchters lopen de verkeerde kant op → deze vluchters worden potentieel aan rook blootgesteld;
- C. Ventilatie faalt zodanig dat de rook tegen de rijrichting in gaat, vluchters gaan de 'goede' kant op → vluchters worden potentieel aan rook blootgesteld, ook al lopen ze de goede kant op;
- D. Ventilatie faalt zodanig dat de rook tegen de rijrichting in gaat, maar de vluchters gaan de 'verkeerde' kant op (zeer geringe kans) → gaat goed.

In de tabel op de volgende pagina's wordt nader geanalyseerd welke oplossingen adequaat zijn om aan de 3 functies te voldoen. De schematische figuren geven een bovenaanzicht weer.

Vluchtconcept	Situatie rijrichting in ondersteunende buis is tegengesteld aan rijrichting incidentbuis			Situatie rijrichting in ondersteunende buis is gelijk aan rijrichting incidentbuis		
	Mogelijke maatregelen Ad 1	Mogelijke maatregelen Ad 2	Mogelijke maatregelen Ad 3	Mogelijke maatregelen Ad 1	Mogelijke maatregelen Ad 2	Mogelijke maatregelen Ad 3
MTK met kopdeuren	<p>Versprongen tunnelmonden</p>  <p>Of: emissiemuren</p> 	Versprongen tunnelmonden (is in situatie A niet ideaal; biedt geen bescherming in situatie C)		-		
	Of: rookmuren	Of: rookmuren (is in situatie A niet ideaal; aangezien er in bepaalde situaties rook over de muur kan slaan; biedt geen bescherming in situatie C).		-	Rookmuren	
	Of: verlengd MTK	Of: verlengd MTK		-	Of: verlengd MTK	Verlengd MTK (aan beide zijden, zie hiernaast; een zijde voor situatie B en een zijde voor situatie C)
	<p>Noot:</p> <p>Bi versprongen tunnelmonden wordt de uitgang van de ene buis voorbij de ingang van de andere buis geprojecteerd. Omgekeerd (uitgang ene buis voor ingang andere buis) is veel minder effectief (zie AW).</p>					
	<p>Noot:</p> <p>Maatregelen zijn alleen nodig ter bescherming van de mensen die om wat reden dan ook in het MTK niet de preferabele vluchtrichting volgen en dus door de kopdeur aan de rookzijde van de tunnel naar buiten komen. De maatregelen helpen ook in de situatie dat de ventilatie in de incidentbuis faalt en de rook aan de ingangzijde naar buiten komt.</p>					
	<p>Noot:</p> <p>Maatregelen worden nodig (omdat beide buizen dezelfde rijrichting hebben is er geen sprake van aerodynamische kortsluiting).</p>					
	<p>Noot:</p> <p>Normaal gesproken wordt rook-kortsluiting voorkomen doordat in eerste instantie de rijwind in beide buizen dezelfde richting heeft en in tweede instantie omdat de ventilatie in de buizen dezelfde richting heeft. Bij falen van de ventilatie in de incidentbuis of ondersteunende buis zou rook-kortsluiting kunnen plaatsvinden bij de ingang resp. uitgang van de ondersteunende buis, maar voor de vluchte is dit niet erg (vluchtroute loopt niet door deze buis). Is wel nadelig voor de hulpverleners. Om dit te voorkomen moet aan beide zijden een rookmuur of verlengd MTK worden aangebracht.</p>					

Vluchtconcept	Situatie rijrichting in ondersteunende buis is tegengesteld aan rijrichting incidentbuis Mogelijke maatregelen Ad 1	Situatie rijrichting in ondersteunende buis is gelijk aan rijrichting incidentbuis Mogelijke maatregelen Ad 2	Mogelijke maatregelen Ad 1	Mogelijke maatregelen Ad 2	Mogelijke maatregelen Ad 3	Keuze maatregel t.b.v. 1+2+3
Dwarsverbindingen	<p>Versprongen tunnelmonden</p> 	<p>Versprongen tunnelmonden</p> 	<p>[-]</p> <p>Zowel versprongen tunnelmonden als emissie-/rookmuren als verkeersbuizen op voldoende afstand zijn acceptabel.</p>	<p>[-]</p> <p>Zowel rookmuren als verkeersbuizen op voldoende afstand zijn acceptabel.</p>	<p>[-]</p>	<p>Keuze maatregel t.b.v. 1+2+3</p> <p>Zowel rookmuren als verkeersbuizen op voldoende afstand zijn acceptabel.</p>
	<p>Of: rookmuren (analoog aan emissiemuren)</p> 	<p>Rookmuren</p> 	<p>[-]</p>	<p>[-]</p>	<p>[-]</p>	
	<p>Of: verkeersbuizen op voldoende afstand van elkaar</p> 	<p>Of: verkeersbuizen op voldoende afstand van elkaar</p> 	<p>[-]</p> <p>Noot: Geen maatregelen nodig (omdat beide buizen dezelfde rijrichting hebben is er geen sprake van aerodynamische kortsluiting).</p>	<p>[-]</p> <p>Noot: N.v.t., men komt uit in ondersteunende buis en niet buiten de tunnel.</p>	<p>[-]</p> <p>Noot: N.v.t., men komt uit in ondersteunende buis en niet buiten de tunnel.</p>	

Vluchtconcept	Situatie rijrichting in ondersteunende buis is tegengesteld aan rijrichting incidentbuis Mogelijke maatregelen Ad 1	Situatie rijrichting in ondersteunende buis is gelijk aan rijrichting incidentbuis Mogelijke maatregelen Ad 2	Situatie rijrichting in ondersteunende buis is gelijk aan rijrichting incidentbuis Mogelijke maatregelen Ad 3	Keuze maatregel t.b.v. 1+2+3	Situatie rijrichting in ondersteunende buis is tegengesteld aan rijrichting incidentbuis Mogelijke maatregelen Ad 1	Situatie rijrichting in ondersteunende buis is gelijk aan rijrichting incidentbuis Mogelijke maatregelen Ad 2	Situatie rijrichting in ondersteunende buis is gelijk aan rijrichting incidentbuis Mogelijke maatregelen Ad 3	Keuze maatregel t.b.v. 1+2+3
Vluchtdeuren in middenwand	Versprongen tunnelmonden 	Versprongen tunnelmonden						
	Of: emissiemuren 	Of: rookmuren (analoog aan emissiemuren)						



Noot:
N.v.t., men komt uit in ondersteunende buis en niet buiten de tunnel.

Noot:
Geen maatregelen nodig (omdat beide buizen dezelfde rijrichting hebben is er geen sprake van aerodynamische kantsluiting).

Noot:
N.v.t., men komt uit in ondersteunende buis en niet buiten de tunnel.

Samenvatting / conclusie:

In geval van MTK met kopdeuren moet een verlengd MTK worden toegepast om alle 3 de functies te voldoen.

In geval van andere vluchtconcepten zijn emissie-/rookmuren in alle gevallen geschikt. Versprongen tunnelmonden of verkeersbuizen op voldoende afstand van elkaar bieden niet in alle situaties voldoende oplossing voor de vereiste functies. Er wordt daarom geadviseerd om bij deze vluchtconcepten een emissie-/rookmuur als standaardoplossing op te nemen in de LTS.

Afmetingen

Bij de lengte van het verlengde MTK of de emissie-/rookmuur speelt de hydraulische diameter (D_h) van de tunnelbuis. Hierbij geldt:

$$D_h = 4 * (A_{buis}/O_{buis}) [m]$$

A_{buis} : het oppervlak van de doorsnede van de tunnelbuis [m^2]

O_{buis} : de omtrek van de doorsnede van de tunnelbuis [m]

Vluchtconcept	Rijrichting buizen tegengesteld	Rijrichting buizen gelijk
MTK met kopdeuren	Verlengd MTK (beide zijden tunnel)	Verlengd MTK (beide zijden tunnel)
	Lengte:	Lengte:
	- 2 * de hydraulische diameter van de verkeersbuis bij een tunnel op maaiveld, c.q. als de toeritten zich niet in een zijdelings gesloten constructie bevinden	- 2 * de hydraulische diameter van de verkeersbuis (1)
	- 4 * de hydraulische diameter van de verkeersbuis bij een tunnel onder maaiveld, c.q. als de toeritten zich in een zijdelings gesloten constructie bevinden	
	Hoogte:	Hoogte:
	Tenminste gelijk aan hoogte buitenwanden toerit	Tenminste gelijk aan hoogte MTK (vluchtgang + dienstgang) (2)
Overige vluchtconcepten	Emissie-/rookmuur (beide zijden tunnel)	Rookmuur (beide zijden tunnel)
	Lengte:	Lengte:
	- 2 * de hydraulische diameter van de verkeersbuis bij een tunnel op maaiveld, c.q. als de toeritten zich niet in een zijdelings gesloten constructie bevinden	- 2 * de hydraulische diameter van de verkeersbuis (1)
	- 4 * de hydraulische diameter van de verkeersbuis bij een tunnel onder maaiveld, c.q. als de toeritten zich in een zijdelings gesloten constructie bevinden	
	Hoogte:	Hoogte:
	Tenminste gelijk aan hoogte buitenwanden toerit	Tenminste gelijk aan hoogte buitenwanden toerit

(1) Omdat de maatregelen alleen worden genomen voor situaties waarin de mensen niet in de preferabele richting vluchten en/of voor situaties waarin de ventilatie in de incidentbuis en/of ondersteunende buis faalt, wordt hier volstaan met een beperkte lengte voor het verlengde MTK respectievelijk de rookmuur (minder strenge eisen bij lager risico).

(2) Omdat het verlengde MTK hier met name dient om de mensen en rookvrije uitgang te bieden (en de functie van rookmuur minder belangrijk is) hoeft de hoogte van de constructie niet per se gelijk te zijn aan de hoogte van de buitenwanden van de toerit.