



**Verificatie en validatie overdruksystemen MTK  
wegtunnels, Beschrijving methodiek.**



## **Verificatie en validatie overdruksystemen MTK wegtunnels, Beschrijving methodiek.**

opdrachtgever  
rapportnummer V 1159-2-RA-003  
datum 24 april 2014  
referentie DdB/JvO//V 1159-2-RA-003  
verantwoordelijke ing. D.J. den Boer  
opsteller ir. N.J. van Oerle  
+31 24 3570734  
j.vanoerle@peutz.nl

peutz bv, postbus 66, 6585 zh mook, +31 24 357 07 07, info@peutz.nl, www.peutz.nl  
opdrachten volgens 'De nieuwe regeling 2011' (DNR 2011) ingeschreven kvk onder nummer 12028033  
lid NL-ingenieurs, iso-9001:2008 gecertificeerd

mook – zoetermeer – groningen – düsseldorf – dortmund – berlijn – leuven – parijs – lyon – sevilla

## Inhoudsopgave

<b>1 Inleiding</b>	<b>5</b>
1.1 Omschrijving MTK en tunnelbuizen	5
<b>2 Eisen overdrukinstallatie MTK</b>	<b>7</b>
<b>3 Rekenmodellen</b>	<b>10</b>
3.1 Inleiding	10
3.2 Uitgangspunten V&V methode overdrukinstallatie	11
3.2.1 Stationaire situatie	11
3.2.2 Regeling van de overdrukinstallatie	11
3.2.3 Eigenschappen ventilatoren en kanalen	12
3.2.4 Eigenschappen MTK	12
3.3 Tunnelventilatie	17
3.3.1 Uitgangspunten	17
3.3.2 Stromingsweerstand tunnelbuis (leeg)	17
3.3.3 Stromingsweerstand van brand in de tunnel	18
3.3.4 Afkoeling rookgassen aan tunnelwanden	18
3.3.5 Schoorsteeneffect	18
3.3.6 Drukopbouw aanjaagsecties	19
3.3.7 Stromingsweerstand stilstaand verkeer (file)	19
3.3.8 Stromingsweerstand in- en uitgangportaal	21
3.3.9 Windinvloeden	21
<b>4 V&amp;V Overdrukventilatie MTK</b>	<b>22</b>
4.1 Inleiding	22
4.2 Te berekenen scenario's	23
<b>5 Beoordeling overdruk installatie MTK</b>	<b>29</b>
5.1 Inleiding	29
5.2 Windcondities	29
5.3 Meetmethode	29
5.4 Werkwijze	29
5.4.1 Beoordelingen	29
<b>6 Bijlage I: Gebruikte symbolen in formules</b>	<b>32</b>

<b>7 Bijlage II: Werkwijze relevante aspecten</b>	<b>33</b>
7.1 Inleiding	33
7.2 Aspecten die impliciet zijn meegenomen	34
7.2.1 Windinvloeden	34
7.2.2 Faalkansen	34
7.2.3 Reactietijd van het overdruksysteem	34
7.2.4 Bezwijken aanjaagsecties	34
7.2.5 Civiele constructie	34
7.2.6 Vluchtconcept	35
<b>8 Bijlage III: Literatuur</b>	<b>36</b>
<b>9 Bijlage IV Grafische weergave scenario's 1/15</b>	<b>37</b>

## 1 Inleiding

In opdracht van Rijkswaterstaat heeft Peutz bv een methode opgesteld voor de validatie en verificatie van een overdrukstelsel voor een MiddenTunnelKanaal (verder MTK genoemd).

Het doel van een overdrukinstallatie in een MTK is het voorkomen van rookverspreiding vanuit de tunnelbuis naar het MTK (via kieren en/of geopende vluchtdeuren) in het geval van een brand in de tunnelbuis.

De methode bestaat uit twee delen:

- een methode voor verificatie en validatie (V&V) van het ontwerp van een overdrukstelsel voor een MTK op basis van een 1-D knooppunten model, en
- een beproevingsmethode voor het testen van een gerealiseerde overdrukinstallatie in een MTK.

De V&V methode bevat de te gebruiken rekenmodellen en randvoorwaarden, alsmede de uit te rekenen scenario's met de bijbehorende acceptatie-criteria. De scenario's omschrijven de te berekenen situaties in termen van brandlocatie, brandvermogen, aantal en locatie van de geopende vluchtdeuren en dergelijke. De methode is zoveel mogelijk onafhankelijk van de uitvoering van de overdrukinstallatie en het MTK, alsmede van de uitwerking van de langsventilatie in de tunnel, zodat zo veel mogelijk verschillende configuraties van dergelijke systemen kunnen worden beoordeeld.

In hoofdstuk 3 worden de benodigde rekenmodellen besproken. Het betreft aparte modellen voor de berekening van de tunnelventilatie en de overdrukventilatie in het MTK. Voor de uitwerking van de V&V methode is zoveel mogelijk aangesloten bij de modellen in publicatie "Aanbevelingen ventilatie van verkeerstunnels" inclusief addendum modellering ProTuvem (verder AVV+ genoemd). De rekenmodellen voor de overdrukinstallatie in het MTK zijn op de AVV+ en op de modellen in de ISSO publicatie 17 gebaseerd.

In hoofdstuk 4 wordt de feitelijke methode voor verificatie en validatie van het ontwerp van een overdrukinstallatie in het MTK uitgewerkt. In dit deel zijn de scenario's met de bijbehorende randvoorwaarden (snelheden, drukken, brandlocatie, locatie aanjagers, verkeersintensiteit) omschreven.

In hoofdstuk 5 wordt de meetmethode omschreven voor het in de praktijk beoordelen van een gerealiseerde overdrukinstallatie in een MTK.

### 1.1 Omschrijving MTK en tunnelbuizen

Een MTK bestaat vaak uit een vluchtgang en een daarboven gelegen dienstgang, die met roosters in de vloer van de dienstgang onderling zijn verbonden. Het MTK bevindt zich normaal gesproken tussen twee tunnelbuizen, en is met vluchtdeuren verbonden met beide

tunnelbuizen. Voor alle scenario's wordt er van uitgegaan dat slechts in één van beide buizen een calamiteit optreedt, en dat het MTK alleen voor de aanwezigen in de incidentbuis als vluchtroute wordt gebruikt, en dus de vluchtdeuren naar de andere buis gesloten blijven.

In het geval van een calamiteit in een tunnelbuis zal de langsventilatie in de calamiteitenbuis 100% worden geschakeld, en de langsventilatie in de ondersteunende buis op een lagere capaciteit in dezelfde richting. Op die wijze wordt de kans op ongewenst transport van rook naar de ondersteunende buis voorkomen.

De aanzuiging van de ventilatielucht voor de overdrukinstallatie moet zodanig zijn ontworpen dat geen rook via de aanzuigopening kan worden aangezogen.

In de randvoorwaarden voor het ontwerp van een overdrukinstallatie is omschreven dat de capaciteit van de overdrukventilatie moet worden geregeld op basis van de gemeten drukverschillen tussen de incidentbuis en het MTK.

In de calamiteiten-situatie zal de overdrukventilatie zodanig worden geregeld dat de verspreiding van rook, warmte en/of verontreiniging vanuit de incidentbuis naar de vluchtgang zo veel mogelijk wordt voorkomen. Secundair daarbij zijn de resulterende luchtsnelheden in het MTK en de geopende vluchtdeuren; de capaciteit van de overdrukventilatie wordt zo laag als mogelijk ingesteld om net de vereiste luchtsnelheden bij geopende vluchtdeuren tussen MTK en tunnelbuis te realiseren. Op die wijze wordt een zo laag mogelijke luchtsnelheid in het MTK gerealiseerd.

De inzittenden van alle voertuigen in de incidentbuis zullen via de vluchtgang in het MTK vluchten. De vluchtwegsignalering in de vluchtgang wordt afhankelijk van in welke tunnelbuis de brand plaatsvindt gestuurd: de vluchtenden zullen in het MTK altijd tegen de rijrichting van de incidentbuis in worden gedirigeerd. Op die wijze leidt de vluchtroute in de vluchtgang altijd naar de veilige uitgang nabij het rookvrije portaal van de tunnel.

## 2 Eisen overdrukinstallatie MTK

De eisen aan de werking van het overdruksysteem in een MTK zijn in deze paragraaf omschreven. Het betreft de eisen en voorwaarden aan de LFV overdruk veilige ruimte zoals omschreven in de BSTTI (Basis Specificatie Tunnel Technische Installaties) versie 1.2.2, release 1.2 SP1 B1, datum 14 februari 2014

Deze eisen zijn gerelateerd aan een brand in de (incident) tunnelbuis. Deze scenario's zijn voor de methode aangevuld met een aantal scenario's om het effect van een extra aanjaagsectie in de tunnel te bepalen, en om de situatie te simuleren die overeenkomt met de omstandigheden tijdens een afnametest van een gerealiseerd systeem.

Voor alle te beoordelen scenario's dient gecontroleerd te worden of aan alle eisen wordt voldaan. De eisen aan de luchtsnelheden en drukverschillen zijn direct uit het rekenmodel af te lezen. De eisen aan de benodigde maximale kracht om vluchtdeuren (schuifdeuren) te openen dient separaat te worden onderbouwd aan de hand van de berekende drukverschillen over (gesloten) vluchtdeuren tussen MTK en incidentbuis.

BSTTI#10025 Door middel van een overdrukinstallatie dient te worden voorkomen dat stofwolken, rook of schadelijke gassen of dampen die vrijkomen bij een brand of ongeval vanuit de incidentbuis, de Veilige Ruimte kunnen binnendringen.

BSTTI#13847 (VKF) De overdruk in de Veilige Ruimte dient automatisch geregeld te zijn op basis van metingen van het optredende drukverschil tussen de veilige ruimte en de incidentbuis. Deze regeling dient geschikt te zijn voor alle aangrenzende verkeersbuizen, maar hoeft maar maximaal voor één verkeersbuis (de incidentbuis) tegelijkertijd actief te zijn.

BSTTI#10030 (VKF) De overdruk in de Veilige Ruimte ten opzichte van de incidentbuis dient zodanig te zijn, dat er bij het openen van een vluchtdeur in de incidentbuis geen luchtstroming met rook plaatsvindt van de incidentbuis naar de veilige ruimte.

BSTTI#13849 (VKF) De overdruk in de Veilige Ruimte ten opzichte van de incidentbuis mag er niet toe leiden dat de benodigde kracht om de vluchtdeuren te openen groter wordt dan toegestaan.

BSTTI#9707 (VKF) De bijdrage van de overdruk aan de totaal benodigde kracht om de vluchtdeuren te openen mag niet meer bedragen dan 20 N.  
Toelichting: de benodigde kracht om de vluchtdeur te openen mag

bij een situatie met overdruk dus niet meer dan 20 N toenemen ten opzichte van een situatie zonder overdruk.

BSTTI#10027  
(VKF)

De overdruk dient zodanig te worden gerealiseerd, dat de luchtsnelheid in de Veilige Ruimte gemiddeld nergens hoger is dan:

- 2 m/s bij branden met een vermogen kleiner of gelijk aan 25 MW;
- 5 m/s bij branden met een vermogen groter dan 25 MW.

BSTTI#10028

De overdruk dient zodanig te worden gerealiseerd, dat de gemiddelde luchtsnelheid over een geopende vluchtdeur nergens hoger is dan:

- 6,5 m/s bij branden met een vermogen kleiner of gelijk aan 25 MW;
- 12 m/s bij branden met een vermogen groter dan 25 MW.

BSTTI#10031  
(VKF)

Indien de veilige ruimte wordt uitgevoerd door middel van een middentunnelkanaal dan dient de overdruk zodanig te worden gerealiseerd, dat in de incidentbuis 30% van het totale aantal vluchtdeuren gelijktijdig kunnen worden geopend, zonder dat er luchtstroming met rook vanuit de incidentbuis naar de Veilige Ruimte plaatsvindt, tenzij dit voor de tunnelspecifieke situatie ruimtelijk niet inpasbaar is. Daarbij geldt een minimum aantal van 3 deuren dat gelijktijdig moet kunnen worden geopend.

Toelichting: Omdat bij een evacuatie in principe alle vluchtdeuren kunnen worden gebruikt, geldt eis BSTTI#10031 voor elke mogelijke combinatie van het totaal aantal te openen vluchtdeuren. Uiteraard moet ook rekening worden gehouden met het openen van andere deuren van/naar het middentunnelkanaal die vanwege het gekozen vluchtconcept gelijktijdig met de vluchtdeuren in de incidentbuis kunnen worden geopend, zoals de kopdeur of een andere uitgang die moet worden gebruikt. Er hoeft daarentegen geen rekening te worden gehouden met het gelijktijdig openen van vluchtdeuren in de niet-incidentbuis, bijvoorbeeld door de brandweer. Reden hiervoor is, dat de brandweer in de regel pas na 10-15 minuten arriveert. De incidentbuis is tegen die tijd al ontruimd, behoudens de mensen die niet hebben kunnen vluchten en door de brandweer moeten worden geholpen.

BSTTI#13852  
(VKF)

De overdrukinstallatie mag alleen schone lucht aanzuigen, waarbij het aanzuigpunt zich dient te bevinden op een locatie waar geen rook of schadelijke gassen of dampen kunnen vrijkomen.



Toelichting: er dient buitenlucht te worden aangezogen, tenzij dit niet mogelijk is, bijvoorbeeld bij boortunnels met dwarsverbindingen, waar de lucht uit de ondersteunende buis moet komen.

BSTTI#10034

In vraagspecificatie deel 2 dient op basis van een 0-meting, een risico-inventarisatie en/of metingen/berekeningen te worden vastgesteld of de Overdruk Veilige Ruimte aan de eisen kan voldoen.

BSTTI#4677

Bij gebruik van ventilatieroosters in de vloer tussen de dienstgang en de vluchtweg in het middentunnelkanaal mogen de roosters niet binnen 10m vanaf de vluchtdeuren geplaatst worden.

Toelichting: hierdoor wordt voorkomen dat bij falen van een vluchtdeur de installaties in de dienstgang (bekabeling e.d.) aan hitte worden blootgesteld.

BSTTI#13853

(VKF)

De regeling van het ventilatiedebiet dient te worden gebaseerd op alle gemeten drukverschillen door de druksensoren bij de vluchtdeuren van de incidentbuis.

Toelichting: hiervoor is een algoritme nodig, om het optimale ventilatiedebiet te bepalen.

## 3 Rekenmodellen

### 3.1 Inleiding

De luchtstroming die in een calamiteitsituatie vanuit het MTK naar de incidentbuis stroomt is qua debiet relatief klein ten opzichte van het minimum ventilatiedebiet in de tunnelbuis dat vanuit de eisen aan de tunnelventilatie wordt voorgeschreven (minimaal 2,5 m/s bij een 200 MW brand).

De optredende drukken en stroming in de tunnelbuis (veroorzaakt door de aanjagers, de brand, het schoorsteeneffect, de file etc.) zijn daarom in redelijke mate onafhankelijk van de werking van het overdrukstelsel in het MTK.

De drukken en luchtstroming in de tunnelbuis in geval van een calamiteit worden berekend met een aantal modellen die in dit hoofdstuk zijn omschreven. Deze modellen zijn ontleend aan de modellen zoals beschreven in de publicatie "Aanbevelingen ventilatie van verkeerstunnels" inclusief addendum modellering ProTuvem (verder AVV+ genoemd) en ISSO publicatie 17.

De berekeningen met een knooppuntenmodel voor de overdrukventilatie van het MTK moeten worden uitgevoerd op basis van de in hoofdstuk 3 omschreven modellen. In hoofdstuk 6 zijn alle in de formules gebruikte symbolen beschreven. Alle in hoofdstuk 4 omschreven scenario's dienen te worden uitgerekend.

Het drukverloop in de incidentbuis moet worden berekend de in hoofdstuk 3 omschreven modellen. Het berekende drukverloop in de incidentbuis (dat verschilt per scenario) mag per scenario als (onafhankelijke) druk-randvoorwaarde voor het knooppuntenmodel worden gebruikt; dat mag omdat de beïnvloeding van het drukverloop in de tunnelbuis door de overdrukventilatie beperkt is (relatief lage debieten).

Alternatief mag de stroming en het drukverloop in de tunnelbuis ook geïntegreerd in het knooppuntenmodel worden berekend, met gebruik van dezelfde modellen. Die aanpak heeft het voordeel dat de scenario's veel eenvoudiger/sneller en met minder handmatige invoer kunnen worden berekend. De genoemde (beperkte) beïnvloeding van het drukverloop in de tunnelbuis door de overdrukventilatie kan op die wijze worden berekend en hoeft dan niet te worden verwaarloosd.

In de scenario's worden alle relevante invoergegevens voor het rekenmodel gegeven. De criteria waaraan het systeem moet voldoen (in termen van de te realiseren minimale en maximale luchtsnelheden cq. overdrukken) zijn in hoofdstuk 2 weergegeven.

De methode gaat er van uit dat het langsventilatiesysteem in de tunnelbuis in alle scenario's (mét file en mét brand) een minimale luchtsnelheid in de tunnelbuis van 2,5 m/s realiseert<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Luchtsnelheid betrokken op de totale lege doorsnede (m<sup>2</sup>) van de tunnel stroomopwaarts van de brand.

Middels de berekeningen kan worden gecontroleerd of bij alle scenario's wordt voldaan aan alle eisen aan de overdrukventilatie zoals die in hoofdstuk 2 zijn omschreven.

Indien de berekende gemiddelde lichtsnelheid over een deur/kier van het MTK naar de tunnelbuis minimaal 1 m/s bedraagt, dan mag er van worden uitgegaan dat er geen rookverspreiding zal plaatsvinden vanuit de tunnelbuis naar het MTK.

### 3.2 **Uitgangspunten V&V methode overdrukinstallatie**

Voor de berekening van de luchtstromingen in het MTK en in de geopende vluchtdeuren kan elk knooppunten rekenmodel worden toegepast dat geschikt is om de luchtstroming op basis van weerstanden en drukrandvoorwaarden te bepalen. Het rekenmodel moet de stroming kunnen bepalen op basis van de relatie tussen de drukval over een verbinding en de gerealiseerde lichtsnelheid in de verbinding zoals in de V&V methode is omschreven. Alle relevante elementen in het systeem moeten als knooppunten worden ingevoerd, met daartussen verbindingen met een bepaalde weerstandsfactor. Daarnaast kan voor elk voorgeschreven scenario (zie hoofdstuk 4) de drukverdeling over de lengte van de tunnel als drukrandvoorwaarde ingevuld. Speciale aandacht verdienen de ventilatoren van het overdrukstelsel, de aanjaagsecties in de tunnelbuis en de extra stromingsweerstand van de brand.

#### 3.2.1 **Stationaire situatie**

De V&V methode is conform uitvraag gebaseerd op de stationaire situatie, die zich enige tijd na een wijziging instelt (bijvoorbeeld na het openen van een vluchtdeur). Tijdsafhankelijke effecten (die wel van belang zijn bij de feitelijke regeling van het systeem) vallen daarmee buiten het kader van de methode. Alle aspecten die niet expliciet in de V&V methode zijn opgenomen worden in paragraaf 7.2 besproken. Voor de buitentemperatuur wordt uitgegaan van 10 °C, waarbij de stroming in het MTK isotherm wordt verondersteld. De temperatuur in de tunnelbuis (incidentbuis) is afhankelijk van de omvang van de brand, en de ventilatiesnelheid in de tunnel. In de V&V methode is de werkwijze weergegeven om de afkoeling van de rookgassen aan de tunnelwanden mee te nemen. Het schoorsteeneffect door de hete rook in een tunnel met helling moet eveneens worden meegenomen; in de V&V methode is ook hiervoor de benodigde werkwijze omschreven.

#### 3.2.2 **Regeling van de overdrukinstallatie**

In de randvoorwaarden voor het ontwerp van een overdrukinstallatie voor een MTK is omschreven dat de capaciteit van de overdrukventilatie moet worden geregeld op basis van de gemeten drukverschillen tussen het MTK en de incidentbuis ter plaatse van de vluchtdeuren. Dat kan bijvoorbeeld worden uitgewerkt door het toerental van de overdrukventilatoren te verlagen als er weinig ventilatielucht gevraagd wordt (geen of een klein aantal geopende vluchtdeuren). Daarmee kunnen de maximaal optredende drukverschillen tussen MTK en tunnelbuis worden beperkt. Ook kan daarmee de lichtsnelheid in een geopende vluchtdeur en in de vluchtgang worden beperkt voor de situatie dat er slechts één of twee vluchtdeuren zijn geopend.

Voor de V&V methode wordt uitgegaan van een enkelvoudige toerenregeling waarbij alle overdrukventilatoren in dezelfde mate worden geregeld tussen 0 en 100% <sup>2</sup>. Een dergelijke regeling kan in sommige rekenpakketten worden geïntegreerd. Alternatief kan een dergelijke regeling ook handmatig worden berekend, door een serie berekeningen uit te voeren met een steeds lager toerental, totdat voor dat scenario nog net aan de randvoorwaarden of regel-instelling wordt voldaan.

### 3.2.3 Eigenschappen ventilatoren en kanalen

De voor de overdrukventilatie benodigde lucht wordt met ventilatoren van buitenaf aangezogen, en via een systeem van appendages (kanalen, dempers, bochten, kleppen) het MTK ingeblazen<sup>3</sup>. Normaal gesproken wordt aan beide uiteinden van het MTK de overdruk lucht ingeblazen, maar in sommige gevallen wordt er op meer of andere plaatsen lucht in het MTK geblazen.

Het maximale volumedebiet van de ventilator is afhankelijk van de tegendruk van het systeem van kanalen in combinatie met de tegendruk door de weerstand in het MTK. Voor de berekeningen moet de druk/debiet relatie van de betreffende ventilator en de toegepaste appendages worden gebruikt in het knooppuntenmodel.

De weerstand van kanalen/dempers, bochten vernauwingen en dergelijke kan op de standaard wijze worden toegepast. Normaal gesproken heeft elk element een bepaalde K-waarde (weerstandswaarde), waarbij de totale drukval over een aantal elementen wordt bepaald door de som van de K-waarden (Kw).

Deze K-waarden worden door de leverancier van de appendages aangeleverd, en kunnen direct in het knooppuntenmodel worden opgenomen.

In formulevorm:

$$dP = \sum_{i=1}^n K w_i \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v_i^2 \quad [1]$$

### 3.2.4 Eigenschappen MTK

#### *Lekoppervlak MTK*

Voor het lekoppervlak van de constructie tussen MTK en de tunnelbuizen wordt uitgegaan van 8 cm<sup>2</sup> per m tunnallengte, met daarnaast nog een breedte aan kieren rondom deuren en luiken van 2 mm breed (totaal naar beide buizen).

- <sup>2</sup> Een ingewikkelder regeling waarbij alle ventilatoren separaat worden geregeld is in principe wel mogelijk, maar omdat er veel belangrijke parameters voor de werking van de overdruk niet beschikbaar zijn (zoals de locatie brand, brandvermogen, winddruk, de verdeling voertuigen/file etc) ligt een dergelijk genuanceerde regeling niet voor de hand.
- <sup>3</sup> Het ontwerp moet zodanig zijn, dat geen rook via de aanzuigopeningen kan worden aangezogen.

Het lekverlies via kieren is daarmee relatief klein (per 2 km tunnel is het lekoppervlak ongeveer gelijk aan één geopende vluchtdeur).

Het lekverlies over een lekopening (kier/spleet) dient, afhankelijk van de oppervlakte van de lekopening en het drukverschil over de lekopening, bepaald te worden met de onderstaande formule.

$$V_{\text{lek}} = 0,8 \cdot A_{\text{lek}} \cdot \sqrt{dP} \quad [2]$$

In principe moet in de berekening van het lekverlies onderscheid worden gemaakt tussen de lucht lekkage naar de incidentbuis en naar de ondersteunende buis. Vanwege de verschillende aansturing van de langsventilatie in beide buizen zal het drukverloop in de buizen verschillen (zie hoofdstuk 3.3. voor details van de tunnelventilatie).

*Alternatief mag het lekverlies over alle lekoppervlakken ook worden berekend door uit te gaan van het drukverschil tussen MTK en de buitenlucht. Dat drukverschil is normaal gesproken groter dan het drukverschil tussen MTK en een tunnelbuis met geactiveerde langsventilatie, resulterend in een groter lekverlies.*

### *Stromingsweerstand dienstgang*

De stromingsweerstand van de dienstgang wordt bepaald door de doorsnede van de gang, en daarnaast in belangrijke mate door de aanwezigheid en afmeting van obstructies zoals electrakasten, kabelgoten, verlichting, etc. De weerstand is daarnaast afhankelijk van het feit of de kasten worden geclusterd (als één lange rij aaneengesloten kasten) of dat de kasten als afzonderlijke losse kasten op onderlinge afstand van enige meters aan de wand worden geplaatst.

Voor de V&V methode wordt een pragmatische aanpak gekozen: voor de stromingsweerstand per lengte eenheid van de gang wordt uitgegaan van de gemiddelde vrije doorsnede van de gang in die sectie, met een wandruwheid van 5 mm<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Deze wandruwheid levert globaal de maximum luchtweerstand op; een nog hogere wandruwheid is nauwelijks meer van invloed op de berekende luchtweerstand.

Met de onderstaande formules kan voor een lengte L van de vluchtgang dan de drukval afhankelijk van de stromingssnelheid in de gang worden bepaald<sup>5</sup>.

$$dP = \lambda \frac{L}{D_h} \cdot 1/2 \cdot \rho u_t^2 \quad [3]$$

Met

$$D_h = \frac{4 \cdot A_t}{O_t} \quad [4a]$$

en

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left( \frac{r_w}{3,72 \cdot D_h} + \frac{5,2337}{\text{Re}^{0,9375} \cdot (r_w/D_h)^{0,0625}} \right) \quad [4b]$$

### *Stromingsweerstand vluchtgang (leeg)*

Normaal gesproken is de vluchtgang in een MTK een leeg rechthoekig betonnen kanaal zonder significante obstructies, met op regelmatige afstanden een vluchtverbinding (schuifdeur) vanuit de tunnelbuis. Voor de weerstand in de langsrichting van de gang, kunnen dezelfde formules als voor de dienstgang worden toegepast, uitgaande van een wandruwheid van 2 mm.

### *Stromingsweerstand vluchtgang (met vluchtenden)*

Vluchtende personen in de vluchtgang zorgen voor een extra stromingsweerstand voor de ventilatie. Verwacht mag worden dat de aanwezigheid van personen een positief (drukvereffenend) effect hebben op de werking van de overdrukventilatie. Het effect is bovendien beperkt, omdat het MTK bestaat uit een dienstgang en een vluchtgang die met roostervloeren in open verbinding met elkaar staan. Voor de stroming vormen de vluchtenden alleen in de vluchtgang een extra luchtweerstand, niet in de dienstgang.

Om deze redenen wordt er in de V&V rekenscenario's geen rekening gehouden met de extra luchtweerstand van de personen in de vluchtgang; ook de luchtstroming door de vluchtdeuren wordt in de methode niet door vluchtende personen geremd.

<sup>5</sup> Alleen als er tijdens de verificatie al voldoende info over de uitwerking/inrichting van het MTK beschikbaar is, zou op basis van bijvoorbeeld publicatie ISSO 17 de weerstand van het MTK nauwkeuriger kunnen worden ingeschat.

Voor de volledigheid is in deze paragraaf toch weergegeven hoe de invloed van personen in de vluchtgang op de stromingsweerstand kan worden berekend.

Deze extra weerstand van de vluchtenden in de vluchtgang met de onderstaande formule worden bepaald. De totale weerstand van de aanwezigen in de vluchtgang mag worden berekend als de som van de weerstand van de individuele personen. Dat mag vanwege de relatief grote gemiddelde afstand tussen personen in de vluchtgang bij de te verwachten bezetting van de vluchtgang.

Voor een berekening kan er van worden uitgegaan dat alle personen in de incidentbuis vluchten via het MTK, en dat deze (n) personen gelijkmatig verdeeld zijn over de lengte van de vluchtgang.

$$dP = \sum_{i=1}^n \frac{A_p}{\left(1 - \frac{A_p}{A_t}\right)^2} \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v_t^2 \quad [5]$$

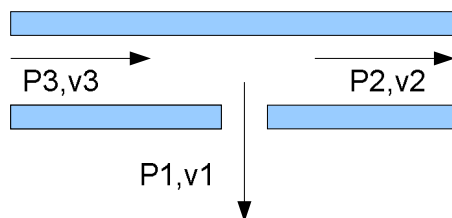
*Noot: Voor het 'aanstroomoppervlak'  $A_p$  van een vluchtende persoon kan worden uitgegaan van  $0,7 \text{ m}^2$*

#### Stromingsweerstand vluchtdeuren

De situatie moet vanwege de dikte van de wand / schuifdeur combinatie in relatie tot de breedte van de deur en de vluchtgang- worden beschouwd als een T-splitsing.

Bij elke (geopende) vluchtdeur zal de ventilatielucht zich splitsen in een deel dat rechtdoor gaat, en een deel dat via de vluchtdeur de tunnelbuis instroomt. Dit is in de onderstaande figuur schematisch weergegeven.

De weerstand die de luchtstroming ondervindt is afhankelijk van de snelheid van de luchtstroming in de vluchtgang voor en na de splitsing, en de snelheid in de geopende vluchtdeur.



De drukval voor de stroming rechtdoor ( $dP_2 = P_3 - P_2$ ) en voor de stroming via de vluchtdeur ( $dP_1 = P_3 - P_1$ ) kunnen als volgt worden bepaald:

$$dP_1 = \zeta_1 \cdot \left(\frac{v_3}{v_1}\right)^2 \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v_1^2 \quad dP_2 = \zeta_2 \cdot \left(\frac{v_3}{v_2}\right)^2 \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v_2^2 \quad [6]$$

met

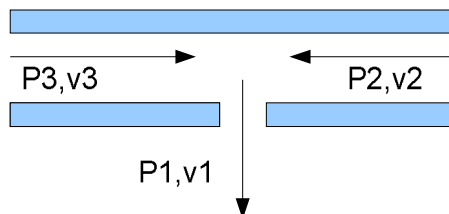
$$\zeta_{1,2} = a_0 + a_1 \cdot \frac{v_1}{v_3} + a_2 \cdot \left(\frac{v_1}{v_3}\right)^2 + a_3 \left(\frac{v_2}{v_3}\right) + a_4 \cdot \left(\frac{v_2}{v_3}\right)^2 + a_5 \cdot \left(\frac{v_1}{v_3}\right) \cdot \left(\frac{v_2}{v_3}\right) \quad [7]$$

en met de volgende constanten a0 t/m a5 in de bovenstaande formules voor respectievelijk  $\xi_1$  en  $\xi_2$ :

constanten	$\xi_1$	$\xi_2^{(*)}$
a0	0,67	0,57
a1	0,09	0
a2	0,4	0
a3	-0,4	-1,5
a4	0,73	1,0
a5	0,12	0

(\*): Als  $v_2/v_3 > 0,75$  dan bedraagt  $\xi_2=0,0$

Als een bepaalde vluchtdeur van twee zijden van lucht wordt voorzien (zie onderstaande figuur),



of als een van beide snelheden  $v_2$  of  $v_3$  gelijk aan 0 is, dan kan de drukval van de stroming door de vluchtdeur  $dP_1 (= P_3 - P_1)$  worden bepaald met de volgende formule:

$$dP_1 = 1,3 \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v_1^2 \quad [8]$$

*Stromingsweerstand verbinding dienstgang/vluchtgang*



In tunnels wordt de verbinding tussen de dienstgang en de vluchtgang normaal gesproken zeer open uitgevoerd in de vorm van roostervloeren. Alleen in de directe nabijheid van vluchtdeuren (tot 10 m afstand van de deur) is de vloer van de dienstgang gesloten, om in geval van brand bij een geopende vluchtdeur schade aan de dienstgang te voorkomen. In het knooppuntenmodel kan de drukval met onderstaande formule worden berekend afhankelijk van de lichtsnelheid  $v$  in de verbinding.

$$dP = 0,5 \cdot \rho \cdot v^2 \quad [9]$$

*Noot: Bij grote openingen tussen dienstgang en vluchtgang zoals die normaal gesproken in Nederlandse tunnels worden toegepast, kan deze drukval worden verwaarloosd, en kunnen de dienstgang en de vluchtgang in de berekeningen worden samengenomen tot één ruimte (het MTK).*

### 3.3 Tunnelventilatie

#### 3.3.1 Uitgangspunten

Analoog aan de AVV+ modellen.

#### 3.3.2 Stromingsweerstand tunnelbuis (leeg)

De stromingsweerstand van een (lege) tunnelbuis (wrijving aan wanden) kan worden bepaald aan de hand van een drukval per m tunnelbuis, afhankelijk van de wandruwheid van de tunnel, de omvang van de tunnel en de lichtsnelheid in de tunnel.

$$dP = \lambda \frac{L}{D_h} \cdot 1/2 \cdot \rho u_t^2 \quad [10]$$

met:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left( \frac{r_w}{3,72 \cdot D_h} + \frac{5,2337}{\text{Re}^{0,9375} \cdot (r_w/D_h)^{0,0625}} \right) \quad [11]$$

met

*Noot: Omdat er bij de testmethode (zie hoofdstuk 5) geen file aanwezig is in de tunnelbuis, is ook de situatie zonder file in de modellen opgenomen, zodat de berekende situatie zonder file kan worden vergeleken met de resultaten van de testmethode. Voor de bepaling van de weerstand van de tunnelbuis in de situatie met file wordt verwezen naar paragraaf 3.3.7*

### 3.3.3 Stromingsweerstand van brand in de tunnel

In de AVV+ zijn aanwijzingen gegeven voor het bepalen van de drukval over een brand, afhankelijk van de doorsnede van de tunnel en het vermogen van de brand. De drukval wordt veroorzaakt door de temperatuurstijging (hete rook), de extra turbulentie van de brand en de extra weerstand van het brandend voertuig zelf in de tunnel.

Omdat de V&V methode er van uitgaat dat er in geval van brand een file over de gehele lengte van de tunnelbuis (alle rijstroken) aanwezig is, wordt in de V&V methode de extra weerstand door het brandende voertuig zélf verwaarloosd, en wordt alleen de extra turbulentie door de brand en de invloed van de temperatuurstijging berekend. Dat resulteert in de volgende vereenvoudigde formulering:

$$dP = 0,64 \cdot 1,5 \cdot u_{t0} \cdot \left( \frac{P}{A_t \cdot c_p \cdot T_0} \right) \quad [12]$$

### 3.3.4 Afkoeling rookgassen aan tunnelwanden

De afkoeling van de rookgassen aan de tunnelwand wordt gevormd door de warmteoverdracht door straling ( $h_r$ ) en door convectie ( $h_c$ ). De warmteoverdracht per m tunnallengte kan op basis van onderstaande formules worden bepaald:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{-(h_r + h_c) \cdot O_t \cdot (T_g - T_w)}{\rho \cdot C_p \cdot u_t \cdot A_t} \quad [13]$$

met

$$h_r = \epsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T_g + T_w) \cdot (T_g^2 + T_w^2) \quad [14]$$

en

$$h_c = \frac{1/8 \cdot \lambda \cdot c_p \cdot \rho \cdot u_r}{1.07 + 12.7 \cdot (Pr^{2/3} - 1) \cdot \sqrt{1/8 \cdot \lambda}} \quad [15a]$$

en

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{k} \quad [15b]$$

Op basis van de berekende temperatuur ter plaatse van een aanjaagsectie zou kunnen bepaald worden of de aanjaagsectie voldoende bestand is tegen de rookgastemperatuur.

### 3.3.5 Schoorsteeneffect

Omdat de soortelijke massa van hete rookgassen kleiner is dan van omgevingslucht, zal de hete rook in een tunnelsectie met een helling, omhoog willen stromen. Daardoor ontstaat

een extra drukverschil over de tunnelbuis, het zogenaamde schoorsteeneffect. Er mag van worden uitgegaan dat de tunnelventilatie zodanig is ontworpen, dat onder de omstandigheden in de V&V scenario's in de incidentbuis altijd een snelheid in de rijrichting wordt gerealiseerd. Daardoor hoeft er in de berekeningen geen rekening te worden gehouden met terugstroming van de rookgassen tegen de ventilatie-/rijrichting in.

Het extra drukverschil door het schoorsteeneffect kan -per m tunnellengete ( $x$ ) die is gevuld met hete rook- als volgt worden berekend:

$$\frac{dP}{dx} = -\rho_0 \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_r(x)}\right) \cdot g \cdot \tan(\phi) \quad [16]$$

waarbij  $T_r(x)$  de temperatuur van de rook in de tunnel als functie van de plaats in de tunnel is. Daarbij dient de afkoeling van de rookgassen conform par. 3.3.4 te worden berekend.

### 3.3.6 Drukopbouw aanjaagsecties

De drukopbouw van een aanjaagsectie kan als volgt berekend worden op basis van de uitblaassnelheid en totale uitblaasoppervlakte van alle aanjagers van de aanjaagsectie e.e.a. afhankelijk van de snelheid in de tunnel<sup>6</sup>.

$$dP = \frac{2\alpha \cdot (1-\psi)}{\psi^2} \cdot \frac{(1-0.5 \cdot \alpha \cdot (3-\psi))}{(1-\alpha^2)} \cdot 1/2 \cdot \rho u_t^2 \quad [17]$$

De drukopbouw van de stuwventilatoren is onder andere afhankelijk van de gemiddelde snelheid van de luchtstroming in de tunnel. Hoe hoger deze snelheid, hoe lager het drukverschil dat de aanjaagsectie (bij gelijkblijvende overige parameters zoals de uitblaassnelheid) in de tunnel opbouwt. Dit is de reden om niet de vereenvoudigde bepalingsmethode uit de AVV+ te hanteren.

Als de gehele tunnel gevuld is met een file die zorgt voor een significante afname van het doorstroomoppervlak van de tunnel, dan dient in de formule de stromingsnelheid  $u_t$  gebaseerd te worden op de verminderde doorsnede ter plaatse van de aanjaagsectie.

### 3.3.7 Stromingsweerstand stilstaand verkeer (file)

De validatie & verificatie methode voor het ontwerp van een overdrukinstallatie voor een MTK gaat uit van de situatie dat er een file in de tunnel staat over de gehele lengte van de tunnelbuis.

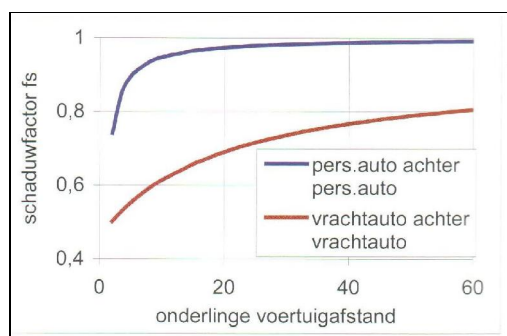
Voor de verkeers-samenstelling in de incidentbuis kan worden uitgegaan van één totale verkeerssamenstelling, die net als in de AVV+ voor alle rijstroken wordt aangehouden. De

<sup>6</sup> Normaal gesproken dient de resulterende waarde van de snelheid iteratief te worden bepaald. Vanwege het te verwachten effect van de aanjaagsectie is in de V&V methode niet gekozen voor de vereenvoudigde formule in AVV+.

weerstand van de file in de tunnelbuis kan via de onderstaande formule worden berekend als functie van de aanwezige voertuigen<sup>7</sup>.

$$dP = \sum_{i=1}^n \frac{f_s \cdot c_w \cdot A_v}{1 - \frac{A_v}{A_t}} \cdot 1/2 \rho \cdot (u_t)^2 \quad [18]$$

In de onderstaande figuur kan de schaduwfactor  $f_s$  voor individuele voertuigen als functie van de afstand tot de voorliggende voertuigen worden bepaald.



De windschaduw van een auto achter een vrachtwagen wordt gelijk verondersteld aan de windschaduw van een vrachtauto achter een vrachtauto; de windschaduw van een vrachtauto achter een auto wordt gelijk verondersteld aan de schaduwfactor van een auto achter een auto.

De schaduwfactor achter een bestelbus wordt gelijk verondersteld aan de gemiddelde waarde tussen de schaduwfactor van een auto en van een vrachtauto. Een autobus kan worden gelijkgesteld aan een vrachtwagen.

De te hanteren waarden voor het aanstrooppervlak  $A_v$  en de stromingscoëfficiënt  $C_w$  van voertuigen zijn in onderstaande tabel opgenomen.

Soort voertuig	$A_v$	$C_w$
Personenauto	2,5 m <sup>2</sup>	0,55
Bestelbus	5 m <sup>2</sup>	0,8
Vrachtauto/autobus	10 m <sup>2</sup>	1

<sup>7</sup> Voor de berekeningen met een file over de gehele lengte van de tunnelbuis kan de eerder beschreven bijdrage van de tunnelwanden aan de totale luchtweerstand van de tunnel worden verwaarloosd.

### 3.3.8 Stromingsweerstand in- en uitgangportaal

De in- en uittreeverliezen (extra drukval) bij de portalen van de in- resp. uitstromende lucht bij de portalen van de tunnelbuis kunnen als volgt (afhankelijk van de luchtsnelheid  $u_t$  en dichtheid  $\rho$  ter plaatse) worden bepaald:

$$dP_{in} = dP_{uit} = 1/2 \cdot \rho \cdot u_t^2 \quad [19]$$

### 3.3.9 Windinvloeden

#### *Tunnelventilatie*

Windinvloeden op de werking van de tunnelventilatie worden conform uitvraag niet meegenomen in de validatie en verificatie methode. De belangrijkste reden is dat mag worden uitgegaan van een adequaat ventilatiesysteem in de tunnelbuis (langsventilatie). Het ontwerp is zodanig dat zelfs bij de ongunstigste omstandigheden (brand/wind/helling/etc) het langsventilatiesysteem van de tunnel stroomopwaarts van de brand een snelheid van minimaal 2,5 m/s in de rijrichting realiseert, en dat daarmee backlayering (rookverspreiding tegen de ventilatierichting in) kan worden uitgesloten. De verwachting is bovendien dat de windeffecten wel effect hebben op de netto luchtstroming in de tunnelbuis, maar beperkt van invloed zijn op de verdeling van de overdrukventilatie over geopende vluchtdeuren<sup>8</sup>, omdat de eventuele winddruk zich verdeelt over de gehele lengte van de tunnelbuis. Lokale drukeffecten (zoals de brand of een aanjaagsectie in de tunnel) hebben een veel sterker effect op de werking van de overdrukventilatie.

#### *Overdrukventilatie*

Voor de werking van de overdrukventilatie in het MTK, kan de windinvloed ter plaatse van de vluchtdeur vanuit het MTK naar buiten (via de kopdeur) wel van grote invloed zijn.

*Noot: Alleen de uitgang van het MTK aan de inrijzijde van de tunnel wordt gebruikt voor het vluchten; de vluchtenden worden middels vluchtwegaanduiding naar die zijde gedirigeerd.*

Het effect van wind op de werking van de overdrukinstallatie van het MTK moet worden berekend met een druk van -10 Pa bij het ingaande portaal en de (geopende) vlucht(kop)deur van het MTK, en een druk van +10 Pa bij het uitgaande portaal van de tunnel.

In die toestand kan een onevenredig groot deel van de beschikbare overdrukdebiet via de kopdeur wegstromen, zeker als een inblaasvoorziening van de overdrukventilatie in het MTK in de nabijheid van deze kopdeur is gesitueerd.

Voor deze benadering is uitgegaan van 'standaard' portalen en een windsnelheid van 3-5 m/s ter plaatse van de portalen. Deze windsnelheid komt in Nederland zeer veel voor.

<sup>8</sup> Het is juist de verdeling van de overdrukventilatielucht over de geopende vluchtdeuren die bepaalt of de overdrukventilatie goed functioneert.

## 4 V&V Overdrukventilatie MTK

### 4.1 Inleiding

De theoretische werking van een ontwerp van een overdrukinstallatie in een MTK kan worden geverifieerd met de in hoofdstuk 3 gegeven uitgangspunten en submodellen.

Voor elke willekeurige scenario kan het drukverloop in de incidentbuis worden bepaald, afhankelijk van de tunnelventilatie, brandomvang en brandlokatie, geopende vluchtdeuren etc. Het drukverloop in de tunnelbuis kan als druk-randvoorwaarde worden gebruikt voor de berekeningen met het knooppuntenmodel. Alternatief kan het drukverloop in de tunnelbuis ook geïntegreerd in het knooppuntenmodel worden opgelost.

Op basis van de berekende luchtstromingen en drukken in het MTK kan voor ieder scenario op alle (knoop-)punten in het model worden bepaald of aan de te stellen eisen in termen van minimale en maximale luchtsnelheden en overdrukken wordt voldaan. In de volgende paragraaf zijn alle te berekenen scenario's weergegeven. De eisen aan de luchtsnelheden en overdruk in het MTK zijn in hoofdstuk 2 weergegeven.

De scenario's 1 t/m 15 zijn -inclusief een beknopte omschrijving van het doel van het scenario- omschreven in de uitvraag. In de bijlage bij dit rapport zijn deze scenario's nader grafisch omschreven, inclusief een korte omschrijving van het doel van de scenario's.

De scenario's 16 en 17 zijn ten opzichte van de uitvraag toegevoegd, om het effect van een extra aanjaagsectie in de tunnelbuis te beoordelen. Het relatief grote drukverschil over een aanjaagsectie (orde grootte 10-50 Pa) kan de werking van de overdrukventilatie ongunstig beïnvloeden. Dit speelt zeker bij een aanjaagsectie stroomafwaarts van de brand.

De scenario's 18, 19 en 20 zijn bedoeld als referentie voor de uit te voeren metingen van de werking van een gerealiseerd overdruksysteem. Op die wijze is een kwantitatieve beoordeling van de berekeningen aan de hand van de metingen mogelijk. Deze scenario's gaan uit van de situatie zonder brand en zonder file, omdat een file of een brand bij een controlemeting niet goed realiseerbaar zijn.

Als de gemeten luchtsnelheden en drukverschillen tijdens de afnametest voldoende nauwkeurig overeenkomen met de berekende waarden, dan mag er van worden uitgegaan dat inschattingen van de lekkage van het MTK, de weerstanden in het MTK en de luchtstroming via kieren en deuren, alsmede de werking van de tunnelventilatie voldoende nauwkeurig in het rekenmodel zijn opgenomen. Er wordt dan impliciet ook van uitgegaan dat de resultaten van berekeningen van de overige scenario's (met brand én file in de tunnel) de situatie voldoende nauwkeurig beschrijven.

Voor alle scenario's wordt van het volgende uitgegaan:

- De (buiten)temperatuur is 10 °C.
- Het langsventilatiesysteem in de calamiteiten buis draait op 100% van de capaciteit, en het langsventilatiesysteem in de ondersteunende buis draait op gereduceerde capaciteit in dezelfde richting als in de calamiteitenbuis (om rookverspreiding naar de ondersteunende buis te voorkomen bij het benedenstroomse portaal).

## 4.2 Te berekenen scenario's

### Scenario 1

Brandgrootte	25 MW
Brandlocatie	Bij de vluchtdeur op het diepste punt van de tunnel
Geopende deuren	Uitgangen MTK gesloten (kopdeuren) Totaal 30% van de vluchtdeuren tunnel open: = 1 deur direct na de brand = overige deuren direct aansluitend vóór de brand;

### Scenario 2

Brandgrootte	25 MW
Brandlocatie	Bij de vluchtdeur op het diepste punt van de tunnel
Geopende deuren	Uitgangen MTK gesloten (kopdeuren) Totaal 30% van de vluchtdeuren incidentbuis open: = alle 30% deuren aaneengesloten rij, te beginnen direct ná de brand.

### Scenario 3

Brandgrootte	25 MW
Brandlocatie	Bij de vluchtdeur op het diepste punt van de tunnel
Geopende deuren	Uitgangen MTK gesloten (kopdeuren) Totaal 30% van de vluchtdeuren tunnel open: (als 30% oneven is, dan 1 deur minder open) = de helft van de 30% deuren aaneengesloten vóór de brand, de andere helft aaneengesloten direct na de brand.

## Scenario 4

Brandgrootte	25 MW
Brandlocatie	Bij de een na laatste vluchtdeur (in de rijrichting gezien)
Geopende deuren	Uitgang MTK gesloten (kopdeur) Totaal 1 vluchtdeur open : = de laatste deur (=direct na de brand)

## Scenario 5

Brandgrootte	25 MW
Brandlocatie	Bij de vluchtdeur op het diepste punt van de tunnel
Geopende deuren	Uitgang MTK gesloten (kopdeur) Totaal 30% van de vluchtdeuren tunnel open: = alle 30%-1 deur aaneengesloten direct voor de brand = 1 deur direct na de brand

## Scenario 6

Brandgrootte	25 MW
Brandlocatie	Bij de vluchtdeur op het diepste punt van de tunnel
Geopende deuren	Uitgang MTK open (kopdeur: vluchten tegen de rijrichting in) Totaal 30% van de vluchtdeuren tunnel open: = 1 deur direct voor de brand = overige 30%-1 deur aaneengesloten na de brand

## Scenario 7

Brandgrootte	5 MW
Brandlocatie	Naast de tweede vluchtdeur in de tunnel (in rijrichting gezien)
Geopende deuren	Uitgang MTK open (kopdeur: vluchten tegen de rijrichting in) Totaal 30% van de vluchtdeuren tunnel open: = 1 deur direct voor de brand = overige 30%-1 deur aaneengesloten na de brand



## Scenario 8

Brandgrootte	5 MW
Brandlocatie	Naast de tweede vluchtdeur in de tunnel (in rijrichting gezien)
Geopende deuren	Uitgang MTK open (kopdeur: vluchten tegen de rijrichting in) Totaal 30% van de vluchtdeuren tunnel open: = alle 30% deuren aaneengesloten direct na de brand

## Scenario 9

Brandgrootte	200 MW
Brandlocatie	Bij de vluchtdeur op het diepste punt van de tunnel
Geopende deuren	Uitgang MTK gesloten (kopdeuren) Totaal 30% van de vluchtdeuren tunnel open: = alle 30%-1 deuren aaneengesloten direct voor de brand = 1 deur direct na de brand

## Scenario 10

Brandgrootte	200 MW
Brandlocatie	Bij de vluchtdeur op het diepste punt van de tunnel
Geopende deuren	Uitgang MTK gesloten (kopdeuren) Totaal 30% van de vluchtdeuren tunnel open: = alle 30% deuren aaneengesloten direct na de brand

## Scenario 11

Brandgrootte	200 MW
Brandlocatie	Bij de vluchtdeur op het diepste punt van de tunnel
Geopende deuren	Uitgang MTK gesloten (kopdeuren) Totaal 30% van de vluchtdeuren tunnel open: (als 30% oneven is, dan 1 deur minder open) = de helft aaneengesloten direct voor de brand = de andere helft direct na de brand

## Scenario 12

Brandgrootte	200 MW
Brandlocatie	Bij de 1 na laatste vluchtdeur in de tunnel (in rijrichting gezien)
Geopende deuren	Uitgang MTK gesloten (kopdeuren) = 1 deur geopend = de vluchtdeur direct na de brand (laatste vluchtdeur tunnel)

## Scenario 13

Brandgrootte	200 MW
Brandlocatie	Bij de vluchtdeur op het diepste punt van de tunnel
Geopende deuren	Uitgang MTK open (kopdeur: vluchten tegen de rijrichting in) Totaal 30% van de vluchtdeuren tunnel open: = alle 30%-1 deur aaneengesloten direct voor de brand = 1 deur direct na de brand

## Scenario 14

Brandgrootte	200 MW
Brandlocatie	Bij de vluchtdeur op het diepste punt van de tunnel
Geopende deuren	Uitgang MTK open (kopdeur: vluchten tegen de rijrichting in) Totaal 30% van de vluchtdeuren tunnel open: = 1 deur direct voor de brand = overige 30%-1 deuren aaneengesloten direct na de brand

## Scenario 15

Brandgrootte	200 MW
Brandlocatie	Bij de vluchtdeur op het diepste punt van de tunnel
Geopende deuren	Uitgang MTK open (kopdeur: vluchten tegen de rijrichting in) Totaal 30% van de vluchtdeuren tunnel open: = de eerste vluchtdeur in de tunnel = alle 30%-2 deur aaneengesloten direct voor de brand = 1 deur direct na de brand

## Scenario 16

Brandgrootte	5 MW
Brandlocatie	Naast de tweede vluchtdeur in de tunnel (in rijrichting gezien)
Geopende deuren	Uitgang MTK open (kopdeur: vluchten tegen de rijrichting in) Totaal 30% van de vluchtdeuren tunnel open: = 1 deur direct ná een extra aanjaagsectie in de tunnel = overige 30%-2 deur aaneengesloten direct voor de aanjaagsectie

## Scenario 17

Brandgrootte	200 MW
Brandlocatie	Naast de tweede vluchtdeur in de tunnel (in rijrichting gezien)
Geopende deuren	Uitgang MTK open (kopdeur: vluchten tegen de rijrichting in) Totaal 30% van de vluchtdeuren tunnel open: = 1 deur direct ná een extra aanjaagsectie in de tunnel = overige 30%-1 deur aaneengesloten direct voor die aanjaagsectie

## Scenario 18

Brandgrootte	Geen brand
Brandlocatie	Geen brand
Geopende deuren	Uitgang MTK dicht (kopdeuren) geen vluchtdeuren in de tunnel open
Bijzonderheden tunnel	Lege tunnelbuis, geen file; langsventilatie in beide tunnelbuizen uitgeschakeld.
Opmerking	Deze variant is met name bedoeld om de inschatting van het lekoppervlak van het MTK te beoordelen.

## Scenario 19

Brandgrootte	Geen brand
Brandlocatie	Geen brand
Geopende deuren	Uitgang MTK dicht (kopdeuren) 2 vluchtdeuren tunnel open: = 1 deur direct ná een extra aanjaagsectie in de tunnel = 1 deur direct voor die aanjaagsectie Noot: Indien geen extra aanjaagsectie in de tunnel aanwezig is, dan 2 deuren naast elkaar in het midden van de tunnel geopend.
Bijzonderheden tunnel	Lege tunnelbuis, geen file; Tunnelventilatie (calamiteitbuis 100%, ondersteunende buis lagere capaciteit)
Opmerking	Dit scenario is, samen met scenario 20, bedoeld om de inschattingen van de weerstand van de luchtstroming in het MTK en van de stroming door geopende deuren in het rekenmodel te beoordelen.

## Scenario 20

Brandgrootte	Geen brand
Brandlocatie	Geen brand
Geopende deuren	Uitgang MTK open (kopdeur: vluchten tegen de rijrichting in) Totaal 30% van de vluchtdeuren tunnel open: = 1 deur direct ná de extra aanjaagsectie in de tunnel = overige 30%-1 deur aaneengesloten direct voor die aanjaagsectie. Indien geen extra aanjaagsectie in de tunnel aanwezig is, dan alle 30% deuren aansluitend rondom het midden van de tunnel geopend.
Bijzonderheden tunnel	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Tunnelventilatie (calamiteitbuis 100%, ondersteunende buis verlaagde capaciteit)</li> <li>– Modelmatige blokkade (dwars staande vrachtwagen) aan het einde van de tunnel aanbrengen, zodanig dat de gemiddelde luchtsnelheid in de calamiteiten buis 4 m/s bedraagt.</li> <li>– lege tunnelbuis (geen file).</li> </ul>
Opmerking	De waarde 4 m/s is gekozen als laagste snelheid die in een experiment eenvoudig kan worden ingesteld/gemeten, en waarbij toch een significante drukval over de obstructie zal optreden, en een significante drukopbouw in de tunnel aanwezig is.

## 5 Beoordeling overdruk installatie MTK

### 5.1 Inleiding

De beoordeling van een gerealiseerd overdruksysteem wordt uitgevoerd aan de hand van de meting van luchtsnelheden en drukverschillen in het MTK en de tunnelbuis.

Een belangrijk onderdeel van de beoordeling is het vergelijken van de resultaten van de meting met de resultaten van de berekeningen met het knooppuntenmodel.

In dit hoofdstuk is de beoordelingsmethode uitgewerkt.

### 5.2 Windcondities

De metingen moeten worden verricht bij windcondities die voldoen aan de volgende voorwaarde:

- De windsnelheid tijdens de metingen moet voldoende laag zijn, zodat de door de wind geïnduceerde luchtstroming in de tunnelbuis (bij uitgeschakelde ventilatie in MTK en tunnel) een snelheid van maximaal 1,5 m/s heeft.

### 5.3 Meetmethode

De luchtsnelheden en de overdrukken dienen gemeten te worden met gekalibreerde meetinstrumenten. De onnauwkeurigheid van de drukopnemers mag maximaal 5 % bedragen. De onnauwkeurigheid van de snelheidsopnemers mag maximaal 0,1 m/s bedragen<sup>9</sup>.

De snelheidsmetingen in geopende vluchtdeuren dienen te worden uitgevoerd met een meetraster voor een aantal snelheden (bijvoorbeeld bij 2 m/s en 5 m/s). Bij herhalingsmetingen kan worden volstaan met een meting op een drietal punten in de opening, met een na-correctie voor de bepaling van de gemiddelde snelheid.

De meetduur per variant/positie dient minimaal 30 s te bedragen om een stationaire situatie te garanderen. De meting van de luchtsnelheid in de tunnelbuis dient middels een rastermeting te worden uitgevoerd conform de voorschriften in de AVV+ (pagina 129 t/m 132) of andere voor rastermeting bedoelde internationale normen.

### 5.4 Werkwijze

#### 5.4.1 Beoordelingen

<sup>9</sup> Deze meetonnauwkeurigheid is (zeker) voldoende goed, en kan met normaal in de handel beschikbare meetinstrumenten worden bepaald.

De beoordeling van de werking van de overdrukinstallatie van het MTK dient tweemaal te worden uitgevoerd (elke buis een keer als calamiteitenbuis beschouwen). De beoordeling van de werking van de overdrukinstallatie is gebaseerd op de meting van drukverschillen en luchtsnelheden. Bij de eisen wordt een toegestane afwijking van maximaal 25% gehanteerd. Deze -op het oog nogal grote- toegestane afwijking is gebaseerd op de ervaring in de praktijk van luchtsnelheidsmetingen in het verleden, en sluit aan bij de andere onzekerheden in het rekenmodel, zoals de wandruwheden, het lekoppervlak van het MTK, de luchtweerstand in het MTK door techniek (e-kasten, kablegoten, bouwkundige voorzieningen als trappen) en de praktijksituatie in de incidentbuis (het brandvermogen, de brandlocatie, de samenstelling van de file etc.).

De beoordeling van de overdrukinstallatie bestaat uit:

1. een 0-meting: (meting tunnelventilatie)
  - a. drukverschilmeting tussen MTK en tunnelbuis bij de vluchtdeuren, bij volledig ingeschakelde tunnelventilatie (calamiteitenbuis 100%, ondersteunende buis verlaagde capaciteit) en uitgeschakelde overdrukventilatie  
Doel: Als het drukverschil tussen de tunnelbuis en het MTK bij de vluchtdeuren meer dan 25% afwijkt van de aannames in de beoordeling van het ontwerp, dienen de controleberekeningen van het ontwerp aangepast te worden.
2. Overdrukmetingen MTK (controlemeting lekoppervlak/prestatie ventilatoren analoog aan V&V scenario 18)
  - a. met uitgeschakelde tunnelventilatie en ingeschakelde overdrukinstallatie en alle deuren gesloten worden de drukverschillen over de gesloten vluchtdeuren bepaald.  
Eis: de drukverschillen over de gesloten vluchtdeuren in de tunnelbuis dienen binnen 25% nauwkeurigheid overeen te komen met de knooppuntenberekening van het ontwerp (scenario 18).
  - b. met ingeschakelde tunnelventilatie en ingeschakelde overdrukinstallatie en alle deuren gesloten de drukverschillen over de gesloten vluchtdeuren bepalen.  
Eis: de drukverschillen over de gesloten vluchtdeuren in de tunnelbuis dienen binnen 25% nauwkeurigheid overeen te komen met de knooppuntenberekening van het ontwerp (variant analoog aan scenario 18).
3. Scenariometingen 19
  - a. Controlemeting knooppunten scenario 19.
    - i Meting van de gemiddelde luchtsnelheid in beide geopende vluchtdeuren  
Eis: de luchtsnelheid in de deuren mag niet meer dan 25% afwijken van de berekende snelheid met het knooppuntenmodel.
    - ii Meting van de luchtsnelheid in de vluchtgang in het MTK op de drie posities waar in de knooppuntberekening de hoogste snelheid in het MTK wordt gevonden.  
Eis: de gemeten luchtsnelheden mogen niet meer dan 25% afwijken van de berekende waarde.
4. Scenariometingen 20
  - a. Middels vrachtauto's aan het einde van de tunnel een zodanige weerstand realiseren, dat de gemeten gemiddelde luchtsnelheid in de calamiteitentunnelbuis 4 +/- 0,1 m/s bedraagt.

- b. Meting van de gemiddelde luchtsnelheid in beide geopende vluchtdeuren  
Eis: de luchtsnelheid in de deuren mag niet meer dan 25% afwijken van de berekende snelheid met het knooppuntenmodel.
- i Meting van de luchtsnelheid in de vluchtgang in het MTK op de drie posities waar in de knooppuntberekening de hoogste snelheid in het MTK wordt gevonden.  
Eis: de drie gemeten gemiddelde luchtsnelheden mogen niet meer dan 25% afwijken van de berekende waarde. In het geval dat de *berekende* snelheid (knooppuntenmodel) niet groter is dan 1 m/s, mag de positieve luchtstroming (naar de tunnel toe) ook middels een kleine rookmachine worden aangetoond.

Dit rapport bevat 31 pagina's

**4 bijlagen**

Bijlage I: Gebruikte symbolen in formules

Bijlage II: Werkwijze relevante aspecten

Bijlage III: Literatuur

Bijlage IV: Grafische weergave scenario's 1 t/m 15



Mook,

## 6 Bijlage I: Gebruikte symbolen in formules

$A_t$	Doorsnede buis / kanaal [ $m^2$ ]
$A_j$	Uitstroomoppervlakte stuwventilatoren [ $m^2$ ]
$A_p$	Aanstroomoppervlakte van personen in de vluchtgang [ $m^2$ ]
$A_{lek}$	Oppervlakte lekopening [ $m^2$ ]
$V_{lek}$	Volumedebiet door een lekopening [ $m^3/s$ ]
$O_t$	Omtrek buis / kanaal [m]
$r_w$	wandruwheid buis / kanaal [m]
$u_t$	luchtsnelheid in de kanaal / buis [m/s]
$u_{t0}$	Luchtsnelheid in de tunnelbuis, net stroomopwaarts van de brand [m/s]
$u_r$	luchtsnelheid stroomafwaarts van de brand (rookgassen) [m/s]
$u_f$	uitblaassnelheid stuwventilatoren [m/s]
$\alpha$	$A_j / A_t$ [-]
$\psi$	$u_t / u_f$ [-]
$T_g$	lucht/gastemperatuur [K]
$T_w$	wandtemperatuur [K]
$T_0$	buitentemperatuur [K]
$\rho$	dichtheid van de lucht = $353 / (T_g)$
$dP$	drukverschil [Pa]
$D_h$	hydraulische diameter buis / kanaal
$\nu$	kinematische viscositeit lucht (= $1.5 \cdot 10^{-5} m^2 / s$ )
$\mu$	dynamische viscositeit lucht [ $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ ]
$\varepsilon$	emissiviteit wand van buis / kanaal [-] = 0.7 voor tunnelwand
$\sigma_0$	constant van Boltzmann = $5.67 \cdot 10^{-8} [W/m^2 \cdot K^4]$
$C_p$	Soortelijke warmte lucht = 1005 J/kg.K
$Re$	Reynoldsgetal van de luchtstroming = $\rho \cdot u_t \cdot D_h / \nu$
$k$	warmtegeleidingscoëfficiënt lucht [ $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$ ]
$Pr$	Prandtl getal van de stroming
$K_w$	weerstandsgetal luchtstroming [-]
$\lambda$	wandwrijvingscoëfficiënt [-]
$n$	aantal voertuigen in de tunnelbuis [-]
$L$	lengte tunnel/kanaal(deel) [m]
$A_v$	frontaal aanstromingsoppervlak voertuigen [ $m^2$ ]
$c_w$	stromingscoëfficiënt voertuigen [-]
$f_s$	schaduwfactor [-]



## 7 Bijlage II: Werkwijze relevante aspecten

### 7.1 Inleiding

In deze paragraaf zijn de aspecten weergegeven die in de uitvraag zijn geïdentificeerd als relevant voor de werking van een overdruksysteem in een MTK.

1. Plaats brand in de tunnel (begin, midden einde)
2. Inblaasconfiguratie overdruksysteem MTK
3. Regeling overdruksysteem MTK
4. Reactietijd overdruksysteem
5. Drukverloop in de verkeersbuis (aantal en capaciteit aanjaagsecties, brand)
6. Configuratie LFV ventilatie verkeersbuis
7. Schoorsteen effect in verkeersbuis
8. Drukval in de incidentbuis over de brand
9. Windrichting
10. Kopdeuren
11. Faalkansen
12. Vermogen brand
13. Welke deuren worden geopend en wanneer
14. Civiele constructie
15. Vlucht concept

Om een praktisch bruikbare en eenvoudige V&V methode conform uitvraag op te stellen is het niet mogelijk om alle genoemde uitgangspunten te variëren en van alle combinaties/varianties berekeningen te maken.

Bijvoorbeeld twaalf windrichtingen x 100 brandlocaties x 10 brandvermogens x n-faculteit geopende vluchtdeuren) leidt al tot duizenden variantberekeningen.

In de uitvraag is een pragmatisch aanpak gekozen, waarbij een set scenario's is gedefinieerd op basis waarvan de werking van het systeem moet worden gecontroleerd. De gedachte is dat de scenario's zodanig zijn gekozen dat op die wijze de goede werking van het overdruksysteem in de praktijk voldoende geborgd is, en de kans dat in de praktijk niet aan de/alle eisen wordt voldoen voldoende laag is.

Dit is een deterministische aanpak, waarbij de kans dat een scenario optreedt en de kans dat het systeem faalt (alleen) impliciet zijn meegenomen.

Een aantal van de bovengenoemde aspecten is in de scenario's niet meegenomen.

In de volgende paragrafen worden de aspecten van de bovengenoemde lijst die niet expliciet in de scenario's zijn opgenomen nader besproken.

## 7.2 Aspecten die impliciet zijn meegenomen

### 7.2.1 Windinvloeden

In de scenario's in de V&V wordt de invloed van wind op de werking van de overdrukinstallatie in het MTK op zeer eenvoudige manier meegenomen door voorgeschreven drukken op te leggen ter plaatse van de uitgang van het MTK, en ter plaatse van de tunnelportalen.

### 7.2.2 Faalkansen

Conform uitvraag is de V&V methode gebaseerd op een aantal (deterministische) scenario's, waarmee de werking in de praktijk voldoende wordt geborgd, en de faalkansen voldoende wordt beperkt.

### 7.2.3 Reactietijd van het overdruksysteem

Dit aspect is niet expliciet opgenomen in de V&V methode. De V&V methode is conform uitvraag een stationaire methode. Voor de beschouwde scenario's wordt uitsluitend de situatie beoordeeld waarin de ventilatie/stroming zich na een wijziging (zoals het openen/sluiten van een of meer deuren) weer heeft ingesteld.

In het ontwerp van het systeem dient uiteraard met dit aspect wel rekening te worden gehouden. Analoog aan de EN 12101-6 ("specificaties voor overdruksystemen") zou kunnen worden gesteld dat het overdruksysteem binnen 60 s na een brandmelding operationeel moet zijn. Indien het overdruksysteem gebruik maakt van ventilatoren of ventielen/kleppen waarvan de capaciteit (toerenregeling) wordt geregeld op basis van (over-)drukopnemers, kan aanvullend worden gesteld dat de reactietijd tot 90% van de benodigde flow maximaal 5 s mag bedragen.

### 7.2.4 Bezijken aanjaagsecties

Omdat de V&V methode een stationaire methode is, kan er geen uitspraak worden gedaan over het bezwijkgedrag/moment van een aanjaagsectie in de incidentbuis. Voor de mate van rookverspreiding naar het MTK is de situatie dat een aanjaagsectie niet bezwijkt naar verwachting maatgevend door de drukverschillen rondom de sectie. Het niet meenemen van het eventuele bezijken van een aanjaagsectie geeft naar verwachting dus een conservatieve/veilige inschatting.

### 7.2.5 Civiele constructie

Van de civiele constructie van het MTK en de tunnel is voor de werking van de overdrukinstallatie in het MTK met name de lekkageoppervlak tussen MTK en tunnelbuis en de wandruwheden van belang. Een te groot lekoppervlak kan een verminderde werking van de installatie betekenen, zodat wellicht niet meer aan de eisen ten aanzien van het voorkomen van rookverspreiding naar het MTK kan worden voldaan.

In de V&V methode is forfaitair uitgegaan van een bepaalde hoeveelheid lekoppervlak conform uitgangspunten voor het ontwerp van tunnels. De aannemer dient zodanig te bouwen dat deze mate van luchtdichtheid wordt gerealiseerd.

## 7.2.6 Vluchtconcept

Een ventilatiesysteem in een tunnel (langsventilatie) is normaal gesproken zo ontworpen dat zelfs bij de ongunstigste omstandigheden (brand/wind/helling/etc) het langsventilatiesysteem van de tunnel een snelheid van minimaal 2,5 m/s in de rijrichting realiseert, en dat daarmee backlayering (rookverspreiding tegen de ventilatierichting in) kan worden uitgesloten. De automobilisten 'bovenstrooms' van de brand zijn in principe veilig. Alle aanwezigen in de incidentbuis zullen via het MTK vluchten. De vluchtrichting in de vluchtgang van het MTK is tegen de rijrichting in de tunnel in, naar de uitgang op de kop van het MTK aan de inrijzijde van de tunnel. In de V&V methode voor de overdrukventilatie wordt geen rekening gehouden met de extra luchtweerstand van de vluchtende personen in het MTK. Het aantal vluchtenden is impliciet wel opgenomen in het aantal vluchtdeuren dat in de berekeningen open moet worden verondersteld.

## 8 Bijlage III: Literatuur







- [1] Aanbevelingen ventilatie van verkeerstunnels, steunpunt tunnelveiligheid, 2005
- [2] Addendum modellering ProTuvenv2.0, Efectis, 2011
- [3] ProTuVem; Rekenmodel Tunnelventilatie v2.0, steunpunt tunnelveiligheid, 2011
- [4] Taschenbuch fur Heizung+Klimatechnik; Recknagel e.a. , 1980
- [5] Beveiliging van vluchtwegen, SBR publikatie 184, 1988
- [6] NEN 6092, overdrukventilatie
- [7] NEN EN 12101-6: overdrukventilatie
- [8] Fysische transportverschijnselen, TU Delft 1981
- [9] Scenarios verificatie en validatie overdruksysteem MTK, RWS, 2013
- [10] Basisspecificatie TTI RWS Tunnelsysteem, RWS-1264869, 2012
- [11] ISSO-publicatie 17 Kwaliteitseisen voor luchtkanaalsystemen in woning- en utiliteitsbouw



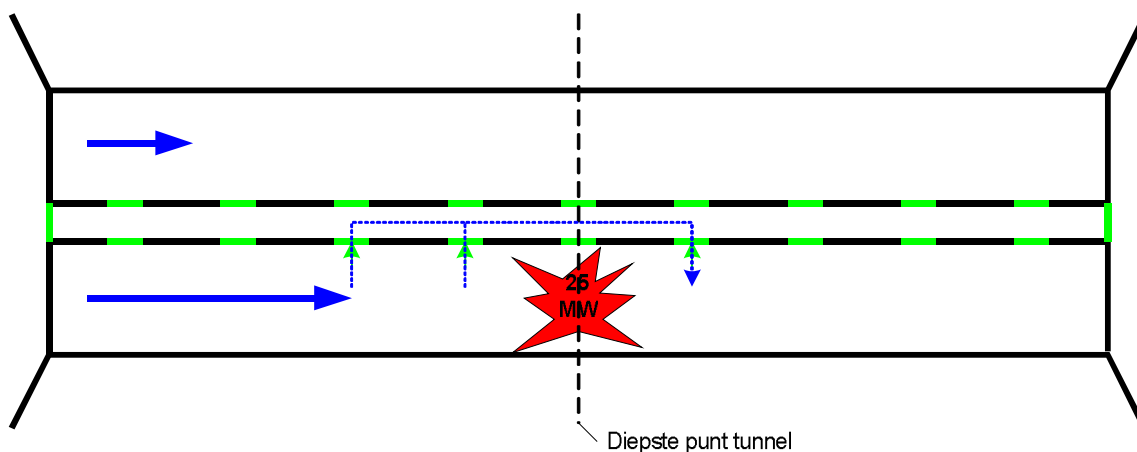
**9 Bijlage IV Grafische weergave scenario's 1/15**

## Bijlage IV: Omschrijving van scenario's 1 t/m 15

Legenda scenarioplaatjes.

	Kop- en vluchtdeur
	Vluchtrichting in open kop- en vluchtdeur
	Luchtstroom door open kop- en vluchtdeur
	Locatie brand met brandgrootte.
	Ventilatie-richting in incidentbuis (vol vermogen)
	Ventilatie-richting in ondersteunende buis (vermogen 50%)

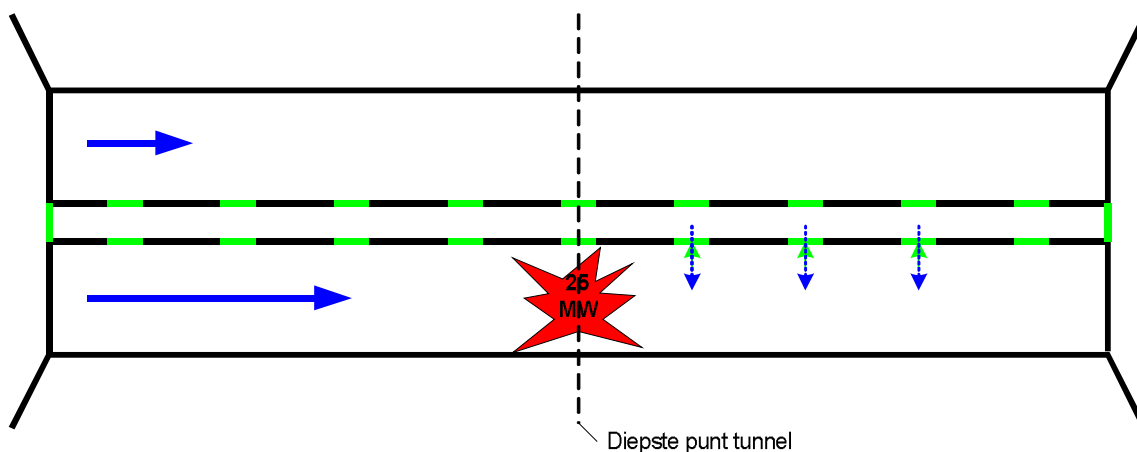
Scenario 1: V&V eis BSTTI#10027 ( $v_{\text{lucht,MTK}} \leq 2 \text{ m/s}$ )



Argumenten voor deze eis-scenario combinatie:

aspect	argument
Locatie brand	Op het diepste punt van de tunnel. Hierdoor treedt het schoorsteeneffect maximaal op waardoor de druk in de incidentbuis direct na de brand nog lager zal zijn, doordat er hogere lichtsnelheden optreden.
Brandgrootte	25 MW. Hoe groter de brand hoe groter het temperatuurverschil en dus hoe groter het schoorsteeneffect en de drukval over de brand.
Aantal open vluchtdeuren	30% van het totaal aantal deuren minus 1 direct voor de brand en één deur direct na de brand. Hoe meer deuren open voor de brand hoe makkelijker er lucht vanuit de incidentbuis naar het MTK kan stromen. Zie ook volgend aspect.
Locatie open vluchtdeuren	De redenering is dat in de incidentbuis de druk voor de brand relatief hoog is en direct na de brand relatief laag is. Als de aangegeven deuren zijn geopend, dan zal er een luchtstroom ontstaan vanuit de incidentbuis, door het MTK, naar de incidentbuis na de brand. In combinatie met de overdruk in het MTK wordt nu een maximale lichtsnelheid in het MTK verwacht
kopdeur	Dicht. Om de druk in het MTK zo hoog mogelijk te houden.
opmerking	Scenario 6, waarbij 1 deur voor de brand de rest na de brand, zou ook maatgevend kunnen zijn voor deze eis. Echter, dit scenario is gebruikt ter toetsing "Geen rook in MTK". Daar bij ieder scenario alle eisen getest worden, zal blijken of dit inderdaad het geval is.

Scenario 2: V&V eis BSTTI#10028 ( $v_{\text{lucht, deur}} \leq 6,5 \text{ m/s}$ )

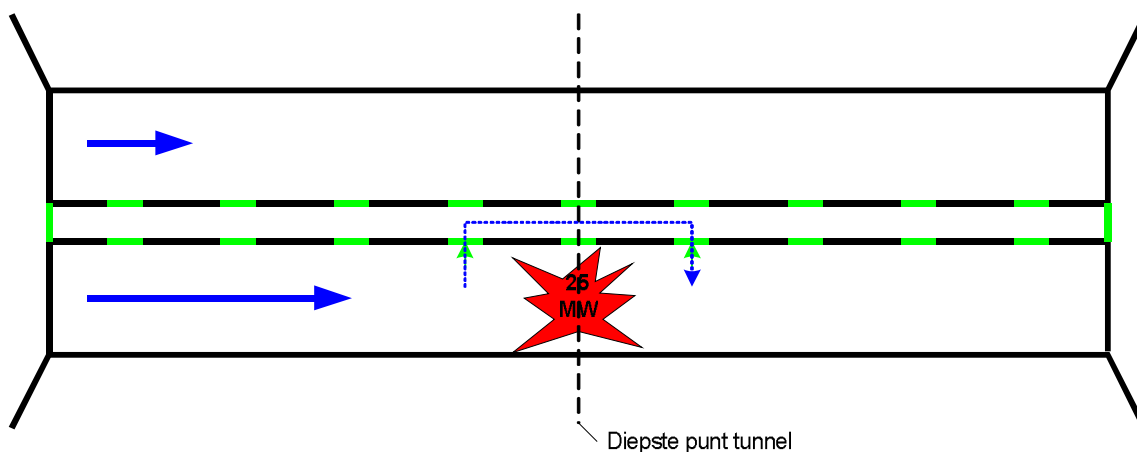


Argumenten voor deze eis-scenario combinatie:

aspect	argument
Locatie brand	Op het diepste punt van de tunnel. Hierdoor treedt het schoorsteeneffect maximaal op waardoor de druk in de incidentbuis direct na de brand nog lager zal zijn, doordat er hogere snelheden optreden.
Brandgrootte	25 MW. Hoe groter de brand hoe groter het temperatuurverschil en dus hoe groter het schoorsteeneffect en de drukval over de brand.
Aantal open vluchtdeuren	30% van het totaal aantal vluchtdeuren. Dit om zoveel mogelijk lucht uit het MTK te verliezen.
Locatie open vluchtdeuren	Direct na de brand. De overdruk in het MTK wordt zo hoog mogelijk gehouden. Hierdoor wordt het drukverschil tussen MTK en de incidentbuis direct na de brand gemaximaliseerd waardoor een hoge lichtsnelheid door de open vluchtdeur optreedt.
kopdeur	Dicht. Om de druk in het MTK zo hoog mogelijk te houden.



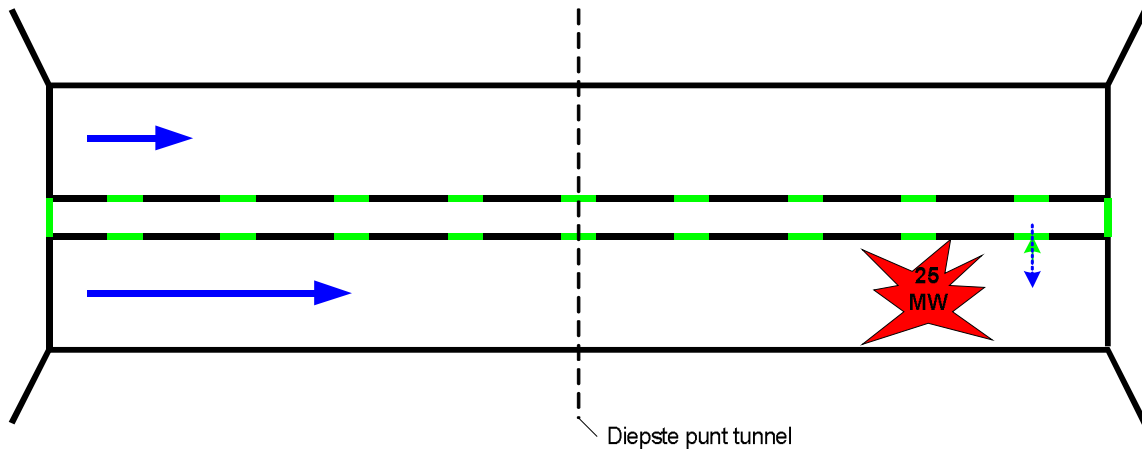
Scenario 3: V&V eis BSTTI#10028 ( $v_{\text{lucht,deur}} \leq 6,5 \text{ m/s}$ )



Argumenten voor deze eis-scenario combinatie:

aspect	argument
Locatie brand	Op het diepste punt van de tunnel. Hierdoor treedt het schoorsteeneffect maximaal op waardoor de druk in de incidentbuis direct na de brand nog lager zal zijn, doordat er hogere snelheden optreden.
Brandgrootte	25 MW. Hoe groter de brand hoe groter het temperatuurverschil en dus hoe groter het schoorsteeneffect en de drukval over de brand.
Aantal open vluchtdeuren	30% van het totaal aantal vluchtdeuren. Wanneer dit een oneven aantal is dan 30%-1 deur. Dit is om zoveel mogelijk lucht uit het MTK te verliezen.
Locatie open vluchtdeuren	Evenveel vluchtdeuren voor als na de brand staan open. Er wordt gebruik gemaakt van het drukverschil over de brand waardoor er meer lucht door het MTK stroomt en waardoor er meer lucht vanuit het MTK door de open vluchtdeuren na de brand naar de incidentbuis stroomt.
kopdeur	Dicht. Geen luchtverlies door de kopdeur waardoor de overdruk in het MTK is verhoogd, waardoor de luchtsnelheid door de openstaande vluchtdeur na de brand wordt verhoogd.

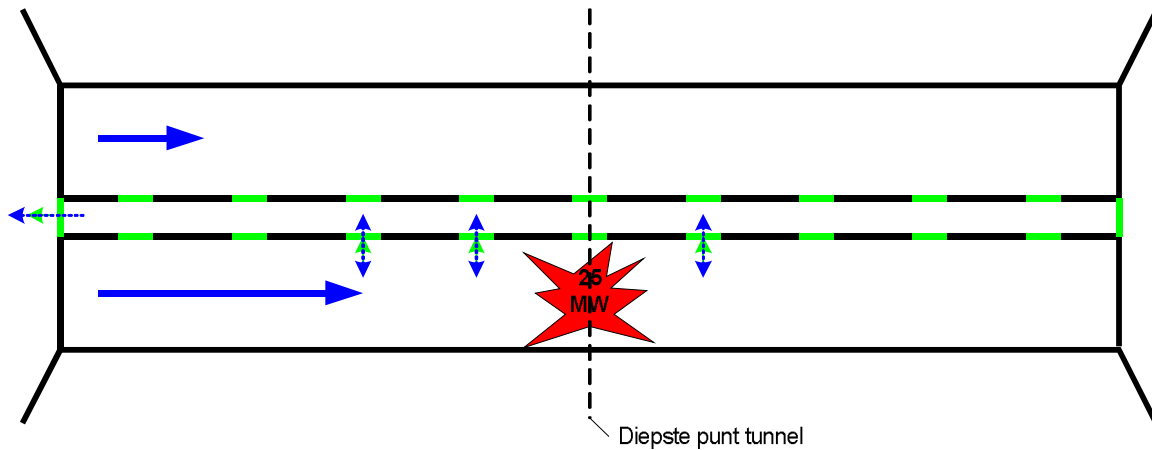
Scenario 4: V&V eis BSTTI#10028 ( $v_{\text{vlucht, deur}} \leq 6,5 \text{ m/s}$ )



Argumenten voor deze eis-scenario combinatie:

aspect	argument
Locatie brand	Bij de 1 na laatste vluchtdeur. Direct na de brand is de druk relatief laag. Dit effect wordt versterkt daar de brand dicht bij de uitgang is waar atmosferische druk is
Brandgrootte	25 MW. Hoe groter de brand hoe groter het temperatuurverschil en dus hoe groter het schoorsteeneffect, en drukval over de brand.
Aantal open vluchtdeuren	1 open vluchtdeur. Door slechts 1 deur te openen op de plek waar het drukverschil relatief hoog is, zal de lichtsnelheid door de vluchtdeur maximaal zijn.
Locatie open vluchtdeuren	De vluchtdeur direct na de brand.
Kopdeur	Dicht. Om de druk in het MTK zo hoog mogelijk te houden..

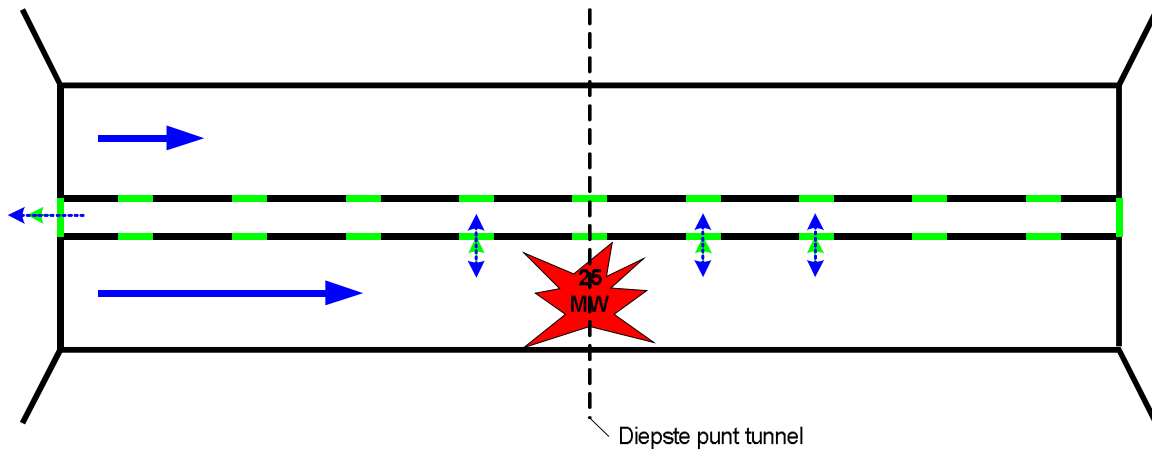
Scenario 5: V&V eis BSTTI#10025 (Geen rook van incidentbuis naar MTK)



Argumenten voor deze eis-scenario combinatie:

aspect	argument
Locatie brand	Op het diepste punt van de tunnel. Hierdoor treedt het schoorsteeneffect maximaal op waardoor de druk in de incidentbuis direct na de brand nog lager zal zijn, doordat er hogere snelheden optreden.
Brandgrootte	25 MW. Hoe groter de brand hoe groter het temperatuurverschil en dus hoe groter het schoorsteeneffect en de drukval over de brand.
Aantal open vluchtdeuren	30% van het totaal aantal vluchtdeuren. Dit om zoveel mogelijk lucht uit het MTK te verliezen.
Locatie open vluchtdeuren	30%-1 direct voor de brand en één direct na de brand. Zie argument volgend aspect.
kopdeur	Open. Hierdoor wordt het luchtverlies uit MTK vergroot waardoor lagere overdruk. Hierdoor wordt het drukverschil tussen MTK en de incidentbuis na brand negatief

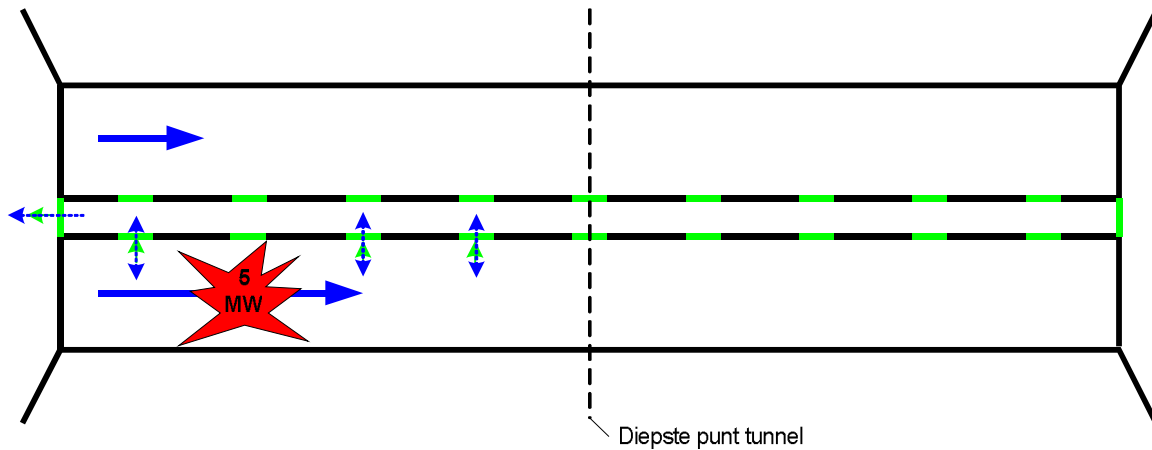
Scenario 6: V&V eis BSTTI#10025 (Geen rook van incidentbuis naar MTK)



Argumenten voor deze eis-scenario combinatie:

aspect	argument
Locatie brand	Op het diepste punt van de tunnel. Hierdoor treedt het schoorsteeneffect maximaal op waardoor de druk in de incidentbuis direct na de brand nog lager zal zijn, doordat er hogere snelheden optreden.
Brandgrootte	25 MW. Hoe groter de brand hoe groter het temperatuurverschil en dus hoe groter het schoorsteeneffect en de drukval over de brand.
Aantal open vluchtdeuren	30% van het totaal aantal vluchtdeuren. Dit om zoveel mogelijk lucht uit het MTK te verliezen.
Locatie open vluchtdeuren	Eén direct voor de brand, 30%-1 direct na de brand. Zie argument volgend aspect.
Kopdeur	Open. Hierdoor wordt het luchtverlies uit MTK vergroot waardoor lagere overdruk. Hierdoor wordt het drukverschil tussen MTK en de incidentbuis na brand negatief

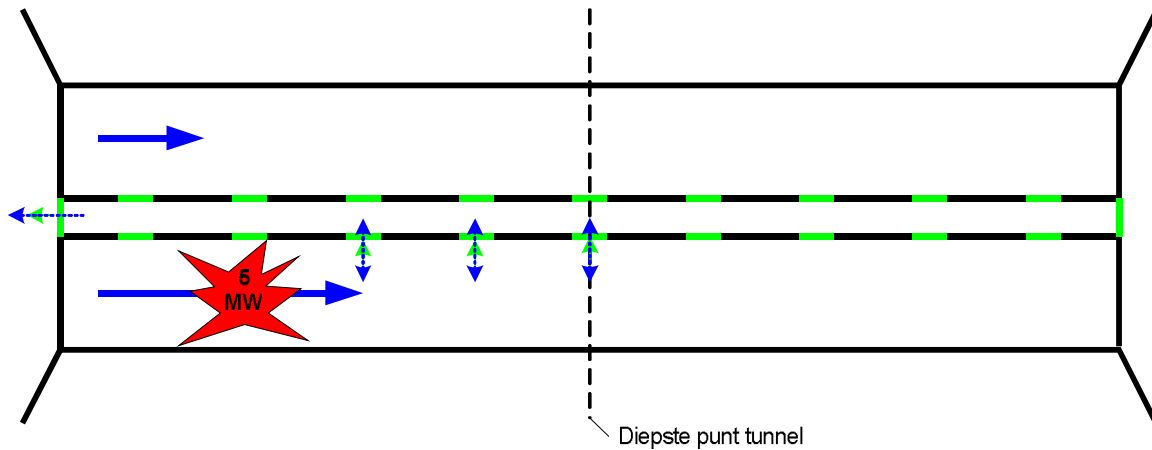
Scenario 7: V&V eis BSTTI#10025 (Geen rook van incidentbuis naar MTK)



Argumenten voor deze eis-scenario combinatie:

aspect	argument
Locatie brand	Aan het begin van de tunnel. Hier is de druk als gevolg van de ventilatie in de incidentbuis relatief hoog.
Brandgrootte	5 MW. Een kleine brand met relatief veel rook. Door het relatief lage brandvermogen is de drukval over de brand gering en bijdrage van het schoorsteeneffect beperkt. Daardoor is de druk in de incidentbuis na de brand relatief hoog en kan er een negatief drukverschil over de vluchtdeur na de brand ontstaan.
Aantal open vluchtdeuren	30% van het totaal aantal vluchtdeuren. Dit om zoveel mogelijk lucht uit het MTK te verliezen.
Locatie open vluchtdeuren	Eén direct voor de brand, 30%-1 direct na de brand. Zie
Kopdeur	Open. Hierdoor wordt het luchtverlies uit MTK vergroot waardoor lagere overdruk.

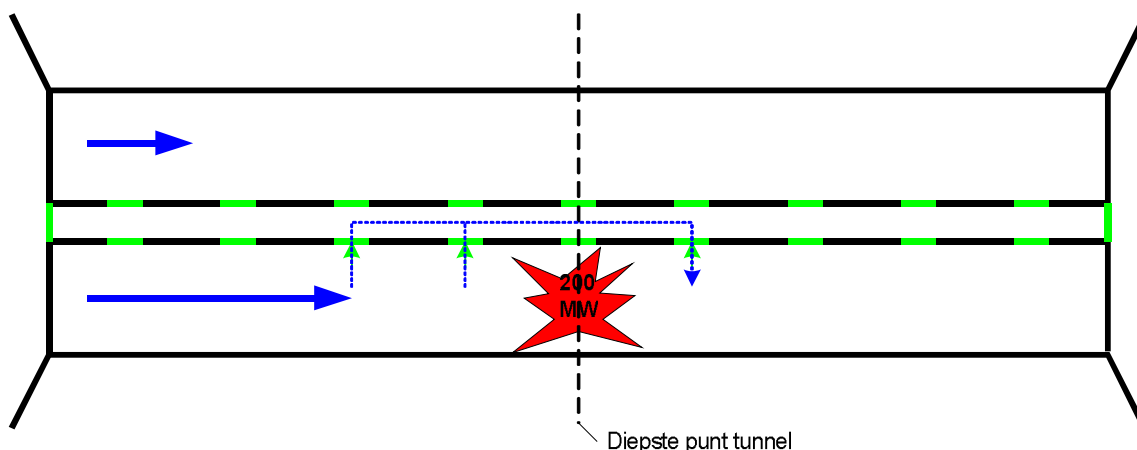
Scenario 8: V&V eis BSTTI#10025 (Geen rook van incidentbuis naar MTK)



Argumenten voor deze eis-scenario combinatie:

aspect	argument
Locatie brand	Aan het begin van de tunnel. Hier is de druk als gevolg van de ventilatie in de incidentbuis relatief hoog.
Brandgrootte	5 MW. Een kleine brand met relatief veel rook. Door het relatief lage brandvermogen is de drukval over de brand gering en bijdrage van het schoorsteeneffect beperkt. Daardoor is de druk in de incidentbuis na de brand relatief hoog en kan er een negatief drukverschil over de vluchtdeur na de brand ontstaan.
Aantal open vluchtdeuren	30% van het totaal aantal vluchtdeuren. Dit om zoveel mogelijk lucht uit het MTK te verliezen.
Locatie open vluchtdeuren	Alle open vluchtdeuren bevinden zich direct na de brand.
Kopdeur	Open. Hierdoor wordt het luchtverlies uit MTK vergroot waardoor lagere overdruk.

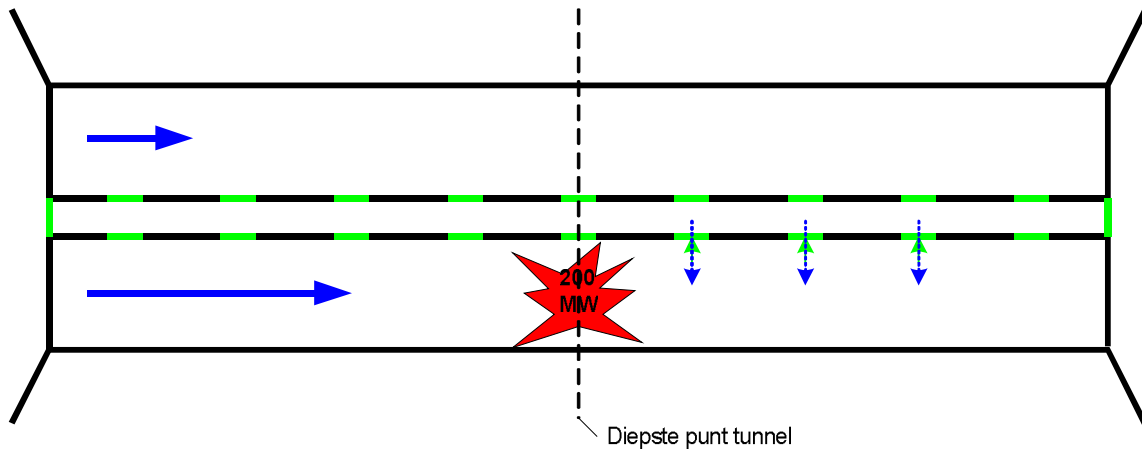
Scenario 9: V&V eis BSTTI#10027 ( $v_{\text{lucht,MTK}} \leq 5 \text{ m/s}$ )



Argumenten voor deze eis-scenario combinatie:

aspect	argument
Locatie brand	Op het diepste punt van de tunnel. Hierdoor treedt het schoorsteeneffect maximaal op waardoor de druk in de incidentbuis direct na de brand nog lager zal zijn, doordat er hogere lichtsnelheden optreden.
Brandgrootte	200 MW. Hoe groter de brand hoe groter het temperatuurverschil en dus hoe groter het schoorsteeneffect en de drukval over de brand.
Aantal open vluchtdeuren	30% van het totaal aantal deuren minus 1 direct voor de brand en één deur direct na de brand. Hoe meer deuren open voor de brand hoe makkelijker er lucht vanuit de incidentbuis naar het MTK kan stromen. Zie ook volgend aspect.
Locatie open vluchtdeuren	De redenering is dat in de incidentbuis de druk voor de brand relatief hoog is en direct na de brand relatief laag is. Als de aangegeven deuren zijn geopend, dan zal er een luchtstroom ontstaan vanuit de incidentbuis, door het MTK, naar de incidentbuis na de brand. In combinatie met de overdruk in het MTK wordt nu een maximale lichtsnelheid in het MTK verwacht
kopdeur	Dicht. Om de druk in het MTK zo hoog mogelijk te houden.
opmerking	Scenario 14, waarbij 1 deur voor de brand de rest na de brand geopend worden, zou ook maatgevend kunnen zijn voor deze eis. Echter, dit scenario is gebruikt ter toetsing "Geen rook in MTK". Daar bij ieder scenario alle eisen getest worden, zal blijken of dit inderdaad het geval is.

Scenario 10: V&V eis BSTTI#10028 ( $v_{\text{lucht,deur}} \leq 12 \text{ m/s}$ )

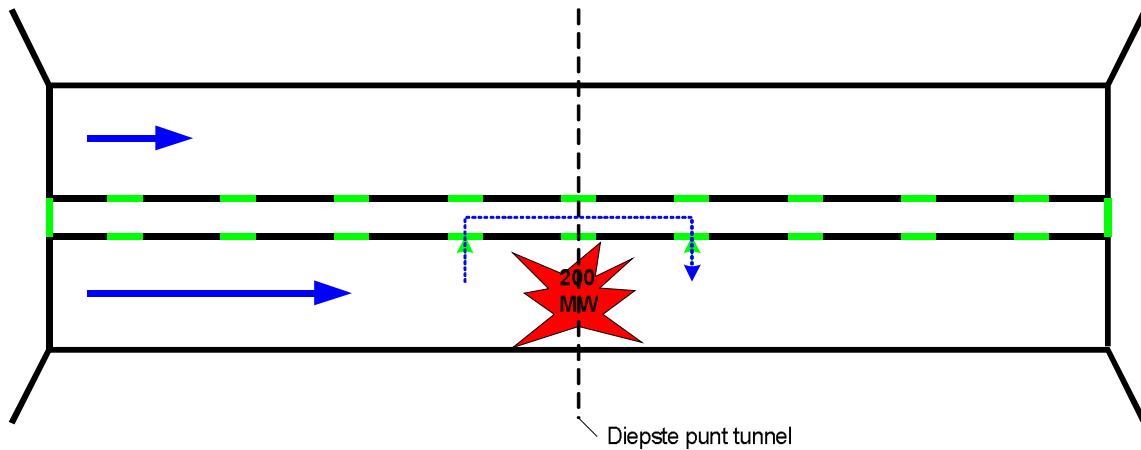


Argumenten voor deze eis-scenario combinatie:

aspect	argument
Locatie brand	Op het diepste punt van de tunnel. Hierdoor treedt het schoorsteeneffect maximaal op waardoor de druk in de incidentbuis direct na de brand nog lager zal zijn, doordat er hogere snelheden optreden.
Brandgrootte	200 MW. Hoe groter de brand hoe groter het temperatuurverschil en dus hoe groter het schoorsteeneffect en de drukval over de brand.
Aantal open vluchtdeuren	30% van het totaal aantal vluchtdeuren. Dit om zoveel mogelijk lucht uit het MTK te verliezen.
Locatie open vluchtdeuren	Direct na de brand. De overdruk in het MTK wordt zo hoog mogelijk gehouden. Hierdoor wordt het drukverschil tussen MTK en de incidentbuis direct na de brand gemaximaliseerd waardoor een hoge luchtsnelheid door de open vluchtdeur optreedt..
kopdeur	Dicht. Om de druk in het MTK zo hoog mogelijk te houden.



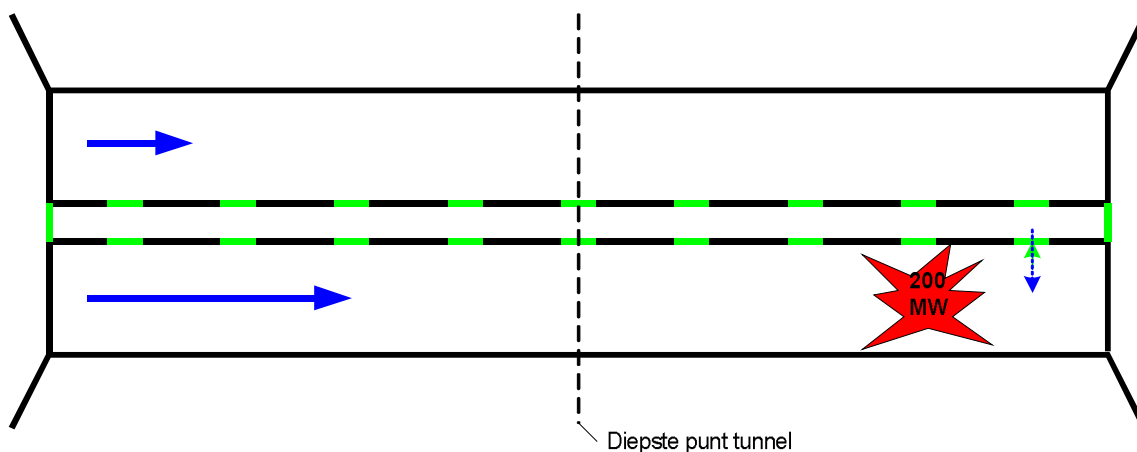
Scenario 11: V&V eis BSTTI#10028 ( $v_{\text{lucht, deur}} \leq 12 \text{ m/s}$ )



Argumenten voor deze eis-scenario combinatie:

aspect	argument
Locatie brand	Op het diepste punt van de tunnel. Hierdoor treedt het schoorsteeneffect maximaal op waardoor de druk in de incidentbuis direct na de brand nog lager zal zijn, doordat er hogere snelheden optreden.
Brandgrootte	200 MW. Hoe groter de brand hoe groter het temperatuurverschil en dus hoe groter het schoorsteeneffect en de drukval over de brand.
Aantal open vluchtdeuren	30% van het totaal aantal vluchtdeuren. Wanneer dit een oneven aantal is dan 30%-1 deur. Dit is om zoveel mogelijk lucht uit het MTK te verliezen.
Locatie open vluchtdeuren	Evenveel vluchtdeuren voor als na de brand staan open. Er wordt gebruik gemaakt van het drukverschil over de brand waardoor er meer lucht door het MTK stroomt en waardoor er meer lucht vanuit het MTK door de open vluchtdeuren na de brand naar de incidentbuis stroomt.
kopdeur	Dicht. Geen luchtverlies door de kopdeur waardoor de overdruk in MTK verhoogd, waardoor de lichtsnelheid door de openstaande vluchtdeur na de brand wordt verhoogd.

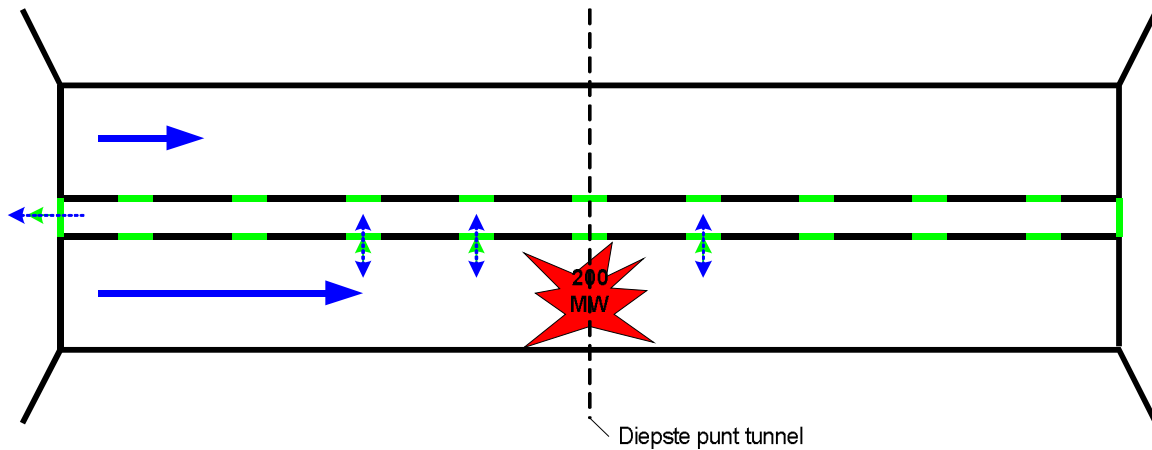
Scenario 12: V&V eis BSTTI#10028 ( $v_{\text{lucht, deur}} \leq 12 \text{ m/s}$ )



Argumenten voor deze eis-scenario combinatie:

aspect	argument
Locatie brand	Voor de 1 na laatste vluchtdeur. Direct na de brand is de druk relatief laag. Dit effect wordt versterkt daar de brand dicht bij de uitgang is waar atmosferische druk is
Brandgrootte	200 MW
Aantal open vluchtdeuren	1 open vluchtdeur. Door slechts 1 deur te openen op de plek waar het drukverschil relatief hoog is, zal de lichtsnelheid door de vluchtdeur maximaal zijn.
Locatie open vluchtdeuren	De vluchtdeur direct na de brand.
Kopdeur	Dicht. Om de druk in het MTK zo hoog mogelijk te houden..

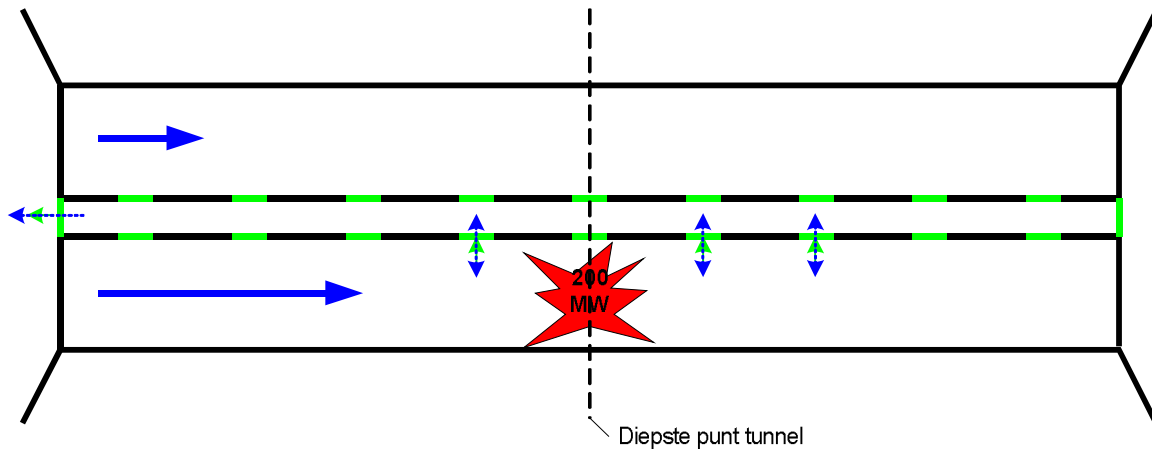
Scenario 13: V&V eis BSTTI#10025 (Geen rook van incidentbuis naar MTK)



Argumenten voor deze eis-scenario combinatie:

aspect	argument
Locatie brand	Op het diepste punt van de tunnel. Hierdoor treedt het schoorsteeneffect maximaal op waardoor de druk in de incidentbuis direct na de brand nog lager zal zijn, doordat er hogere snelheden optreden.
Brandgrootte	200 MW. Hoe groter de brand hoe groter het temperatuurverschil en dus hoe groter het schoorsteeneffect en de drukval over de brand.
Aantal open vluchtdeuren	30% van het totaal aantal vluchtdeuren. Dit om zoveel mogelijk lucht uit het MTK te verliezen.
Locatie open vluchtdeuren	30%-1 voor de brand en één na de brand. Zie argument volgend aspect.
kopdeur	Open. Hierdoor wordt het luchtverlies uit MTK vergroot waardoor lagere overdruk. Hierdoor wordt het drukverschil tussen MTK en de incidentbuis na brand negatief

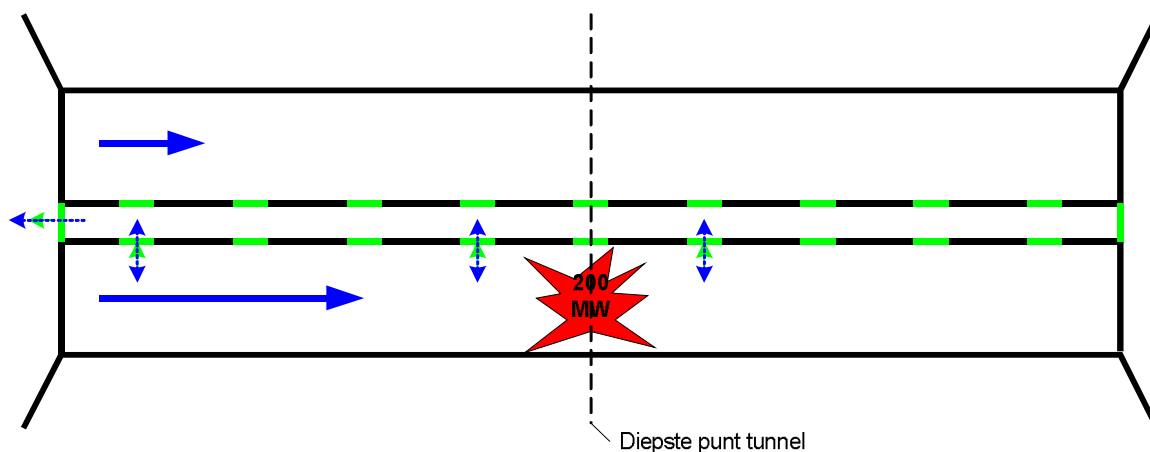
Scenario 14: V&V eis BSTTI#10025 (Geen rook van incidentbuis naar MTK)



Argumenten voor deze eis-scenario combinatie:

aspect	argument
Locatie brand	Op het diepste punt van de tunnel. Hierdoor treedt het schoorsteeneffect maximaal op waardoor de druk in de incidentbuis direct na de brand nog lager zal zijn, doordat er hogere snelheden optreden.
Brandgrootte	200 MW. Hoe groter de brand hoe groter het temperatuurverschil en dus hoe groter het schoorsteeneffect en de drukval over de brand.
Aantal open vluchtdeuren	30% van het totaal aantal vluchtdeuren. Dit om zoveel mogelijk lucht uit het MTK te verliezen.
Locatie open vluchtdeuren	Eén direct voor de brand, 30%-1 direct na de brand. Zie argument volgend aspect.
Kopdeur	Open. Hierdoor wordt het luchtverlies uit MTK vergroot waardoor lagere overdruk. Hierdoor wordt het drukverschil tussen MTK en de incidentbuis na brand negatief

Scenario 15: V&V eis BSTTI#10025 (Geen rook van incidentbuis naar MTK)



Argumenten voor deze eis-scenario combinatie:

aspect	argument
Locatie brand	Op het diepste punt van de tunnel. Hierdoor treedt het schoorsteeneffect maximaal op waardoor de druk in de incidentbuis direct na de brand nog lager zal zijn, doordat er hogere snelheden optreden.
Brandgrootte	200 MW. Hoe groter de brand hoe groter het temperatuurverschil en dus hoe groter het schoorsteeneffect en de drukval over de brand.
Aantal open vluchtdeuren	30% van het totaal aantal vluchtdeuren. Dit om zoveel mogelijk lucht uit het MTK te verliezen.
Locatie open vluchtdeuren	1 vluchtdeur in de nabijheid van het inblaaspunt van de overdrukventilatie, één na de brand en de resterende vluchtdeuren direct voor de brand. Zie argument volgend aspect.
kopdeur	Open. Hierdoor wordt het luchtverlies uit MTK vergroot waardoor lagere overdruk. Hierdoor wordt het drukverschil tussen MTK en de incidentbuis na brand negatief