



Vlaanderen
is wegen en verkeer

Vlaamse Tunnelrichtlijn

C301 Tunnelventilatie

AGENTSCHAP
WEGEN & VERKEER

COLOFON

Titel	Vlaamse Tunnelrichtlijn: C301 Tunnelventilatie
Opgesteld door	Heidi Cuypers, studie-ingenieur tunnelveiligheid AWV Joachim Peerlinck, studie-ingenieur tunnelveiligheid AWV
Gereviseerd door	Commissie Tunnels, Projectgroep Tunnelrichtlijnen, DON Bureau
Goedgekeurd door/op	Commissie Tunnels (20 juli 2023) Directieraad AWV (28 september 2023)
Versie	1.0

Agentschap Wegen en Verkeer

Graaf de Ferrarisgebouw
Koning Albert II-laan 20 bus 4
1000 BRUSSEL
T 02 533 79 22
<https://wegenverkeer.be/>

DOCUMENTGESCHIEDENIS

Versie	Datum	Auteur	Beschrijving
0.1	25.11.2022	Heidi Cuypers	Eerste draft
0.2	04.01.2022	Heidi Cuypers	Aanpassing figuren en opmerkingen na eerst interne review binnen commissie tunnels
0.3	01.07.2023	Heidi Cuypers	Aanpassingen na externe review
0.4	24.08.2023	Heidi Cuypers	Aanpassingen na finale interne review door Joachim Peerlinck
1.0	28.09.2023	Tom Otten	Goedgekeurd door Directieraad AWV

Colofon	2
Documentgeschiedenis	3
Inhoudsopgave	4
Afkortingen en begrippen	7
0 Inleiding	8
1 Ventilatiesystemen	9
1.1 Algemeen	9
1.2 Rookverspreiding in een tunnel zonder mechanische ventilatie	9
1.3 Algemene beschouwing keuze ventilatieconcept	10
1.4 Langsventilatie	11
1.4.1 In normaal bedrijf: beheersing van vervuilingconcentraties	11
1.4.2 Brand: beheersing van rook en temperatuur	12
1.5 Dwarsventilatie	14
1.5.1 In normaal bedrijf: beheersing van vervuilingconcentraties	14
1.5.2 Brand: beheersing van rook en temperatuur	14
1.6 Samenvatting	15
2 Functionele eisen en aandachtspunten	17
2.1 Algemene functionele eisen	17
2.1.1 In normaal bedrijf: eisen gesteld aan beheersing van vervuilingconcentraties en zicht in de tunnel	17
2.1.2 Tijdens onderhoud en interventie van de brandweer: eisen gesteld aan beheersing van emissieconcentraties in de tunnel	19
2.1.3 Geluid	20
2.1.3.1 Incidenten en calamiteiten: spraakverstaanbaarheid	20
2.1.3.2 Interventie van de brandweer	21
2.1.3.3 Arbeidswetgeving geluid	21
2.2 Specifieke aandachtspunten voor langsventilatie	21
2.2.1 Kritische snelheid	22
2.2.2 Bepaling van de faalkansen voor verschillende brandvermogens	24
2.2.3 Aandachtspunt aerodynamische kortsluiting	26
2.2.3.1 Normaal bedrijf	26
2.2.3.2 Brand	29
2.2.4 Aandachtspunten plaatsing ventilatoren	30
2.2.4.1 Plaatsing in lengterichting	30
2.2.4.2 Interactie met de vluchtweg	31
2.2.4.3 Plaatsing in clusters	32
2.3 Raakvlakeisen	33
2.3.1 Energievoorzieningen	33
2.3.2 C302 Luchtkwaliteitssensors	34
2.3.3 C800 Bewaking, Bediening en Besturing	35
2.3.3.1 Normaal Bedrijf	35
2.3.3.2 Stand-by	36
2.3.3.3 Calamiteit	36
2.3.3.4 Evacuatie	37
2.3.3.5 Ondersteunend (ondersteunende koker)	37
2.3.3.6 Nood	37
2.3.4 FAT- en garantiemetingen	37

2.4	Overzichtstabel functionele eisen	38
2.4.1	Algemene ontwerpeisen	38
2.4.2	Geluid	39
2.4.3	Ontwerpeisen specifiek voor langsventilatie	39
2.4.4	Raakvlakeisen	40
3	Inputparameters 1D-berekeningen	42
3.1	Inhoud en beperkingen van dit hoofdstuk	42
3.2	Algemeen	42
3.3	Normaal bedrijf	43
3.3.1	Beheersing van emissieconcentraties	43
3.3.1.1	Verkeersdichtheid per km rijstrook	45
3.3.1.2	Emissiekengetallen	46
3.4	Brand: bepaling van de langssnelheid	46
3.4.1	Evenwichtsvergelijking voor langsventilatie	46
3.4.2	Drukval door wrijvingsverliezen langs de tunnelwand en aan de portalen	46
3.4.2.1	Drukval door stromingsweerstand aan de ingang	46
3.4.2.2	Drukval door stromingsweerstand aan de wanden	47
3.4.2.3	Drukval door stromingsweerstand aan de uitgang	47
3.4.2.4	Andere aandachtspunten	47
3.4.3	Drukverschil door stromingsverliezen verkeer	47
3.4.3.1	Aantal voertuigen in de voertuigkoker n	47
3.4.3.2	Stromingscoëfficiënt C_w en frontaal aanstroomoppervlak A_v	48
3.4.3.3	Schaduw effect f_s	48
3.4.3.4	Actuele verkeerssnelheid	48
3.4.4	Drukval vanwege meteorologische invloeden	49
3.4.4.1	Windsnelheden op 10 m	49
3.4.4.2	Invloed van het omliggende terrein	50
3.4.4.3	Invloed van de vorm en oriëntatie van de portalen via CP10	51
3.4.5	Drukval veroorzaakt door de brand	53
3.4.6	Drukval door schoorsteeneffect	54
3.4.7	Stuwdruk van aanjaagventilatoren	55
3.4.7.1	Stuwkrachtrendement	55
3.4.7.2	Opstellingsrendement van ventilatoren in de voertuigkoker	55
3.4.7.3	Opstellingsrendement van injectieventilatoren	56
3.4.7.4	Effect van afbuig schoepen	56
4	CFD-studies (Computational Fluid Dynamics)	58
4.1	Inleiding	58
4.2	Invloed van blootstellingsfactoren op het menselijk lichaam	58
4.2.1	Hete gassen	58
4.2.2	Warmtestraling	59
4.2.3	Toxische gassen	59
4.2.4	Verlies van zicht	61
4.3	Wanneer is CFD aangeraden?	62
4.3.1	Tunnel met splitsingen	62
4.3.2	Tijdsafhankelijk modelleren	63
4.3.3	Korte opeenvolging van tunnels	64
4.3.4	Tunnel geeft toegang tot andere ondergrondse complexen, zoals een parking	64
4.3.5	De doorsnede van de tunnel, de samenstelling van het verkeer of de plaatsing van tunneltechnische installaties vraagt om een lokale verfijnde benadering	64

4.3.6 Controle van de bepaling van de kritische snelheid	65
Referenties	66
Annex A: Tabellen en grafieken ter bepaling van de winddruk C_p	68

AFKORTINGEN EN BEGRIPPEN

AFKORTING/BEGRIP	VERDUIDELIJKING
AVV	Aanbevelingen Ventilatie van Verkeerstunnels, Steunpunt Tunnelveiligheid
AWV	Agentschap Wegen en Verkeer
backlayering	De beweging van rook en hete gassen tegen de zin van de ventilatiestroom in
BBB	Bediening, Bewaking en Besturing
CFD	Computational Flow Dynamics
FAT	Factory Acceptance Test
hydraulische diameter	De hydraulische diameter D_h is: $D_h = 4 \times \text{oppervlakte/omtrek}$. Bij ronde kanalen is de hydraulische diameter gelijk aan de werkelijk gemeten diameter.
kritische snelheid	De minimale snelheid die noodzakelijk is voor het beheersen en beperken van de lengte van de <i>backlayering</i>
NFPA	National Fire Protection Association
RWS	Rijkswaterstaat
PIARC	World Road Association
ProTuVem	Software voor de stochastische analyse van langsventilatie in standaard tunnels ter bepaling van de faalkans per brandgrootte.
RARVW	Regeling aanvullende regels veiligheid wegtunnels: https://wetten.overheid.nl/BWBR0019806/2020-10-01
Standaard tunnel	Tunnel zonder splitsingen, zonder grote veranderingen in doorsnede, met vluchten via de vluchtkoker, met langsventilatie en met voldoende ruimte tussen de tunneltechnische installaties en het verkeer
Steady state	De evenwichtstoestand die door een systeem wordt bereikt onder gelijkblijvende omstandigheden.
No-break	Een No-break installatie zorgt ervoor dat er geen onderbreking is van de stroomvoorziening, ook al is er een storing in het elektriciteitsnet. In een tunnel voorziet een batterijpak de continue werking van een lijst kritische systemen in de tijd tussen de uitval van de netstroom en de opstart van het noodaggregaat.
Vervuilingconcentratie	Combinatie van concentratie van emissies en slijtage van banden, remmen en het wegdek

0 INLEIDING

De Vlaamse Tunnelrichtlijn is een verzameling van documenten die ontwerpregels en -richtlijnen voor tunnels omschrijven. De samenstelling van de Vlaamse Tunnelrichtlijn is een werk in ontwikkeling. Stelselmatig zullen er documenten en hoofdstukken toegevoegd en geüpdatet worden.

De Vlaamse Tunnelrichtlijn richt zich tot tunnels op Europese en Vlaamse hoofdwegen. In Vlaanderen wordt hiervoor gescheiden eenrichtingsverkeer met langsventilatie voorgeschreven. Dit specifieke hoofdstuk over ventilatie kan echter ook gebruikt worden als ontwerprichtlijn voor andere tunnel types waarin ventilatie voorzien wordt.

Het document C301 Tunnelventilatie is een levend document en kan worden aangepast tijdens de verdere opmaak van de Vlaamse Tunnelrichtlijn. Het werd opgesteld door de Commissie Tunnels van het Agentschap Wegen en Verkeer en is gebaseerd op verschillende bestaande documenten en steunt veelal op de 'Aanbevelingen ventilatie van verkeerstunnels' (Steunpunt Tunnelveiligheid, 2005). Er wordt ook gebruikgemaakt van opgedane ervaringen in Vlaanderen bij het ontwerp van onder andere de renovatie van de Beverentunnel, de Vierarmtunnel, de Craeybeckxtunnel, de Jan De Vostunnel en van de Margaretatunnel. Dit document heeft als doel om de ontwerpregels en richtlijnen voor mechanische ventilatie te beschrijven. Natuurlijke ventilatie bij korte tunnels (< 250 m) wordt buiten beschouwing gelaten.

Het is aangeraden om het document 'Omkadering' van de Vlaamse Tunnelrichtlijn te lezen om vertrouwd te raken met de gehanteerde definities en om een algemeen beeld te verkrijgen van een tunnelsysteem en de daarrond gedefinieerde rollen.

Hoofdstuk 1 geeft een overzicht van de verschillende (mechanische) ventilatiesystemen en hun specifieke invloed op de beheersing van emissieconcentraties in normaal bedrijf en op de beheersing van rook en warmte bij brand.

Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van de functionele eisen die in Vlaanderen gesteld worden aan een ventilatiesysteem en geeft aan welke invloed deze kunnen hebben op de bouwkundige inpassing ervan.

Hoofdstuk 3 bespreekt de inputparameters die nodig zijn voor een goed 1D-ontwerp voor een "standaard" tunnel. Deze aanbevelingen gelden voor tunnels zonder splitsingen of grote veranderingen in doorsnede met langsventilatie en voldoende ruimte tussen de tunneltechnische installaties en het verkeer. Ook voor bovenstaande gevallen kunnen 1D-berekeningen gebruikt worden in voorontwerp, maar deze dienen dan parallel ondersteund te worden door 3D-berekeningen. Bij 1D-berekeningen is het begrip "kritische snelheid" een belangrijke parameter en hierop wordt in detail ingegaan.

Hoofdstuk 4 gaat nader in op CFD (*Computational Fluid Dynamics*) berekeningen. Deze zijn aan te raden in tunnels waar over grote afstanden (tiental meter of meer) belangrijke gradiënten in luchtsnelheid over de doorsnede worden verwacht. Het begrip "kritische snelheid" is in dit geval niet altijd nuttig. De verschillen tussen commerciële softwarepakketten zijn te groot om een eenduidige aanpak qua modellering voor te stellen. Dit hoofdstuk geeft wel een afwegingskader om de gesimuleerde rook op ooghoogte te evalueren, zodat nagegaan kan worden waar nog leefbare condities zijn en waar niet. Bovendien worden enkele mogelijke afwijkingen van het begrip "standaard" tunnel opgesomd waarbij dit type berekeningen zou moeten toegepast worden.

1 VENTILATIESYSTEMEN

1.1 ALGEMEEN

De primaire functies van tunnelventilatie zijn:

- het vermijden van te hoge concentraties van uitlaatgassen, of andere luchtvervuiling;
- het beheersen en afvoeren van rookgassen bij brand in de incidentkoker om zoveel mogelijk te voorkomen dat gestrande weggebruikers in de rook komen te staan;
- het rookvrij houden van de ondersteunende koker¹ bij een calamiteit;
- te zorgen dat hulpdiensten een brand veilig kunnen benaderen.

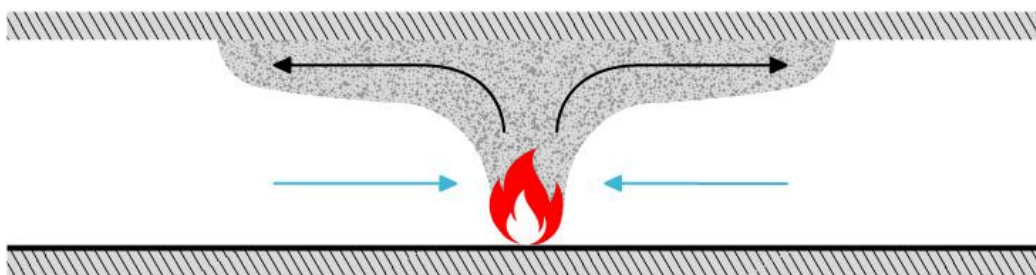
Daarnaast zal de ventilatie ook zorgen voor de noodzakelijke luchtverversing tijdens onderhoudswerkzaamheden.

Bij brand in een tunnel worden mensen blootgesteld aan hete rookgassen, warmtestraling, verlies van zicht en inademing van giftige stoffen. De meeste slachtoffers vallen niet door het vuur zelf, maar door blootstelling aan de rookgassen. De beperkte zichtbaarheid ten gevolge van rook leidt ook tot een vertraging van het vluchtproces.

Dit hoofdstuk gaat globaal in op de mechanismen van rookverspreiding zonder mechanische ventilatie, met langsventilatie en dwarsventilatie. In dit document wordt geen aandacht besteed aan explosies en het vrijkomen van giftige stoffen. Mechanische ventilatie kan in sommige situaties het optreden van een explosie verhinderen. In andere situaties kan het juist het optreden van explosies bevorderen. Ventilatie kan dus niet ontworpen worden om een eenduidig gunstig² effect te bewerkstelligen.

1.2 ROOKVERSPREIDING IN EEN TUNNEL ZONDER MECHANISCHE VENTILATIE

In de eerste fase na het ontstaan van een brand stijgen hete rook en gassen omhoog en verzamelen ze zich tegen het plafond. De rook en gassen verspreiden zich langs het plafond van de incidentkoker (stratificatie) in de richting van beide uiteinden van de tunnel (zie Figuur 1-1).

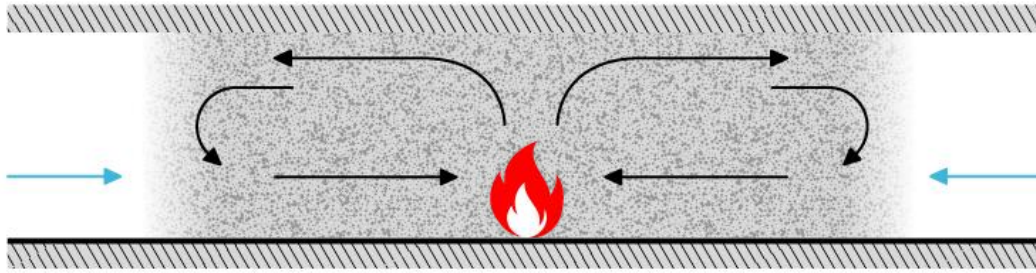


Figuur 1-1: Verspreiding van rook bij brand net na ontstaan van de brand

Op enige afstand van de brand zal door afkoeling het dichtheidsverschil tussen de hete rook en de koele omringende lucht verdwijnen en zullen de rook en gassen naar beneden zakken, waardoor de stratificatie verloren gaat. Finaal wordt de dalende rook opgenomen in de verse luchttoevoer naar de brand, waarna de volledige hoogte van de voertuigkoker wordt verontreinigd (zie Figuur 1-2).

¹ In het geval van een incident of een calamiteit wordt er gesproken over een 'incidentkoker' en een 'ondersteunende koker'. Met de term 'ondersteunende koker' wordt de incidentvrije voertuigkoker bedoeld.

² Dit is afhankelijk van de hoeveelheid gas die ontsnapt. Bij lage hoeveelheden brandbaar gas kan je door veel ventilatie snel mengen en zo snel onder LEL (lower explosion limit) komen. Bij grote hoeveelheden gas kan het zijn dat je in de buurt van de ADR boven UEL (upper explosion limit) zit en door opmenging met lucht daar dan weer onder duikt en dus het mengsel juist explosief maakt.



Figuur 1-2: Rookbeweging bij brand in een tunnel zonder ventilatie na verloren gaan van stratificatie

De rookverspreiding wordt beïnvloed door:

- de helling van de voertuigkoker: door het schoorsteeneffect stromen hete rook en gassen eerder naar boven toe (opwaartse helling);
- wind: bij winddruk op één van de tunnelportalen worden rook en gassen overwegend naar één zijde afgevoerd;
- de mate van afkoeling aan de betonnen wanden en plafond;
- de aanwezigheid van verstoringen in de stroming door bijvoorbeeld doorsnede veranderingen in de tunnel;
- verspruingen in het tunnelplafond en (hoge) voertuigen in de tunnel.

1.3 ALGEMENE BESCHOUWING KEUZE VENTILATIECONCEPT

Of mechanische ventilatie dient voorzien te worden en welk type ventilatie het meest geschikt is, hangt af van de karakteristieken van de tunnel en het verkeer. Het verlies aan stratificatie treedt immers alleen op in lange tunnels. In overkappingen < 100 m en korte gesloten constructies (grootteorde 100 à 250 m) vindt dit proces niet plaats omdat de rook bij het bereiken van de tunneluitgang niet genoeg is afgekoeld om de stratificatie verloren te doen gaan.

Voor de overweging van het al dan niet plaatsen van mechanische ventilatie, kunnen volgende grootteordes worden gebruikt:

- lengte gesloten deel minder dan 250 m: niet noodzakelijk;
- lengte gesloten deel tussen 250 m – 500 m: afhankelijk van nadere analyse;
- lengte gesloten deel meer dan 500 m: noodzakelijk.

Een korte tunnel, die vanwege zijn lengte niet mechanisch geventileerd hoeft te worden, kan deel uitmaken van een samenstel van overdekte wegen of tunnels. Als in de andere (aansluitende) tunnels mechanische ventilatie is aangebracht, kan het nodig zijn in de betreffende tunnel ook mechanische ventilatie toe te passen indien rook-kortsluiting tussen verschillende korte stukken kan optreden..

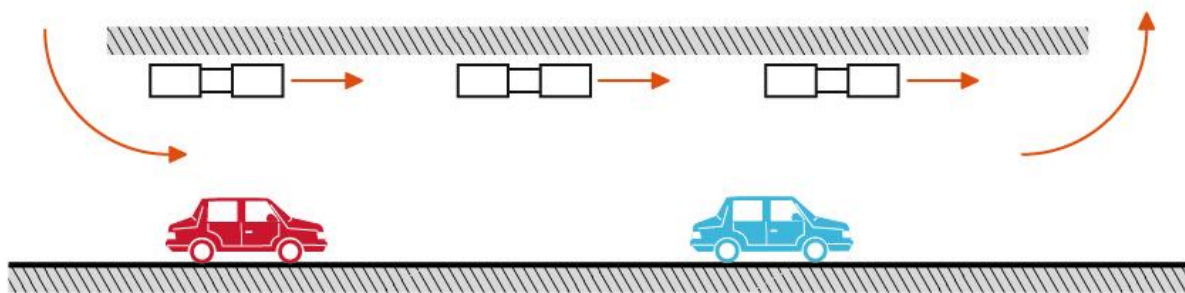
Welk type mechanische ventilatie best wordt toegepast, is afhankelijk van het type tunnel. De Vlaamse Tunnelrichtlijn richt zich op tunnels op Europese en Vlaamse hoofdwegen en schrijft voor dit type wegen in het algemeen gescheiden eenrichtingsverkeer met langsventilatie voor. In dit en volgend hoofdstuk wordt enkel ter info nog even algemeen ingegaan op de mogelijkheden en beperkingen van dwarsventilatie. Een systeem van dwarsventilatie is immers niet in staat de rook van branden tot 200 MW voldoende af te voeren. In dit document wordt daarom standaard langsventilatie voorgeschreven omdat dit in kokers met gescheiden eenrichtingsverkeer wel in staat is branden tot 200 MW te beheersen.

Een bijzonder aandachtspunt is dat structurele file in tunnels met langsventilatie dient vermeden te worden. Bij brand zal in de meeste gevallen stroomopwaarts van de brand een file ontstaan, terwijl het verkeer stroomafwaarts van de brand voldoende tijd heeft om de tunnel uit te rijden. Door langsventilatie worden weggebruikers in de file stroomopwaarts van de brand beschermd tegen rook. Aangezien het gebied stroomafwaarts van een incident met brand niet rookvrij kan gehouden worden, moet een tunnel samen met

de omliggende weginfrastructuur zodanig ontworpen worden dat er geen structurele file in de tunnel kan ontstaan. Dit moet grondig bestudeerd worden aan de hand van macrosimulaties (filegevoeligheid van het traject waarop de tunnel ligt) en microsimulaties (invloed van afritten, verkeerslichten, ...). Aangezien de meeste branden een aanzienlijke ontwikkelingstijd kennen voordat de rook levensbedreigend wordt, is er voor weggebruikers meestal voldoende tijd om langzaam³ de tunnel uit te rijden. Wanneer de rook wel bedreigend wordt, zullen deze weggebruikers gebruik moeten maken van de vluchtroutes; maar deze situatie dient zoveel mogelijk vermeden te worden.

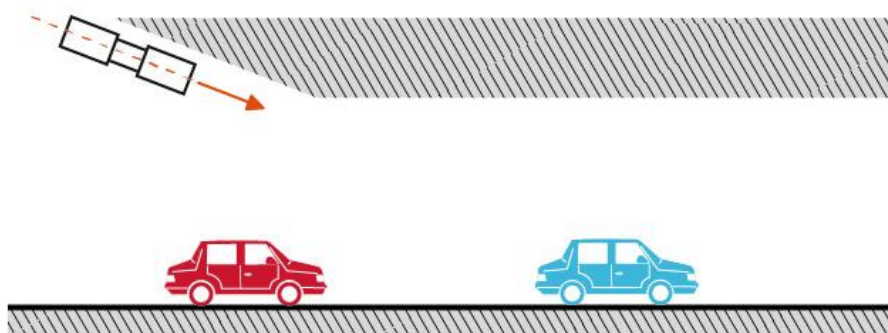
1.4 LANGSVENTILATIE

In een tunnel met langsventilatie wordt door middel van aanjaagventilatoren een luchtstroom in langsrichting opgewekt. De lucht wordt via het ingangsportaal van de tunnel aangezogen en verlaat de tunnel weer via het uitgangsportaal (zie Figuur 1-3).



Figuur 1-3: Schematische voorstelling langsventilatie

Om uitval van ventilatoren door brand zoveel mogelijk te voorkomen, kunnen de ventilatoren in of zo dicht mogelijk bij het ingangsportaal geplaatst worden. Aanjaagventilatoren in het ingangsportaal worden ook wel injectieventilatoren genoemd (zie Figuur 1-4). Het gebruik van uitsluitend injectieventilatoren voor de beheersing van emissieconcentraties geeft mogelijk geluidshinder naar de omgeving. In dichtbevolkte gebieden moeten de voor- en nadelen van uitsluitend injectieventilatoren dus afgewogen worden.



Figuur 1-4: Schematische voorstelling injectieventilator

1.4.1 IN NORMAAL BEDRIJF: BEHEERSING VAN VERVUILINGSCONCENTRATIES

In normaal bedrijf komen in een tunnel door autoverkeer uitlaatgassen vrij. Daarnaast veroorzaakt de slijtage van banden en het wegdek de vorming van stof. Dit leidt binnen en buiten de tunnel tot vervuilende stoffen in de lucht die, afhankelijk van de concentratie, bij inademing schadelijk voor de gezondheid zijn. Bovendien zal bij toenemende vervuilingconcentratie door fijn stof (of zelfs mist) het zicht van weggebruikers op de verkeerssituatie en het verloop van de weg in de tunnel afnemen. Het is daarom noodzakelijk ervoor te zorgen dat de concentraties vervuilende stoffen de gestelde criteria niet overschrijden. De vervuilingconcentratie

³ Indien voertuigen aan 20 km/u de tunnel uit kunnen rijden is dit normaal gezien voldoende om de rook voor te blijven. Langsventilatie zal de rook aan een snelheid van 2,5 à 3,5 m/s voor zich uit duwen. Dit komt overeen met een snelheid van 9 à 12 km/u.

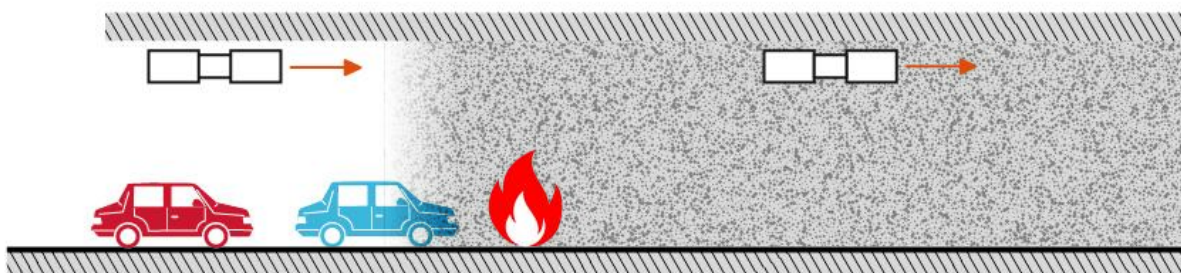
neemt bij langsventilatie lineair toe in de richting van de langsstroom (zie Figuur 1-5) aangezien er onderweg geen verse lucht wordt toe- of afgevoerd. De vervuilingconcentratie van de lucht is beheersbaar door het verhogen of verlagen van de ventilatiesnelheid (in- of uitschakelen van ventilatoren). Doordat de concentratie van de uitlaatgassen lineair oploopt in de rijrichting, is de maximale tunnellenge die met dit systeem kan worden geventileerd 3 – 6 km, indien er geen tussentijdse afvoer wordt voorzien.



Figuur 1-5: Toename concentratie vervuiling in een tunnel met langsventilatie

1.4.2 BRAND: BEHEERSING VAN ROOK EN TEMPERATUUR

Bij brand is de richting waarin de rook en gassen zich bewegen goed beheersbaar, zelfs bij grote branden. Het tunneldeel stroomopwaarts van een brand kan volledig rookvrij worden gehouden (zie Figuur 1-6), waardoor personen in dat deel van de tunnel tegen rook zijn beschermd. Stroomopwaarts van de brand is efficiënt optreden van hulpdiensten dan ook mogelijk. Het tunneldeel stroomafwaarts van de brand vult zich daarentegen geheel met rook.

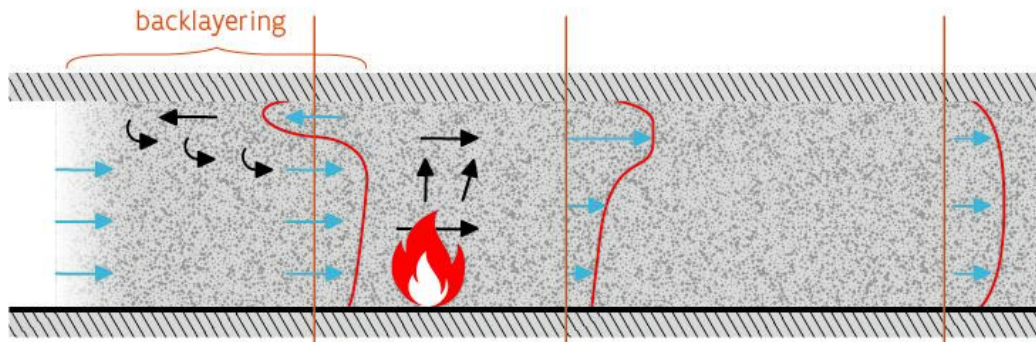


Figuur 1-6: Rookafvoer bij brand in een tunnel met langsventilatie

In langsgeventileerde tunnels kan een klein deel van de rook zich langs het plafond van de tunnel in stroomopwaartse richting bewegen, dus tegen de ventilatierichting in. Dit verschijnsel heet '*backlayering*'. In de backlayeringszone (het deel van de tunnel waar *backlayering* optreedt) koelt de rook af en zakt ze naar beneden (zie Figuur 1-7).

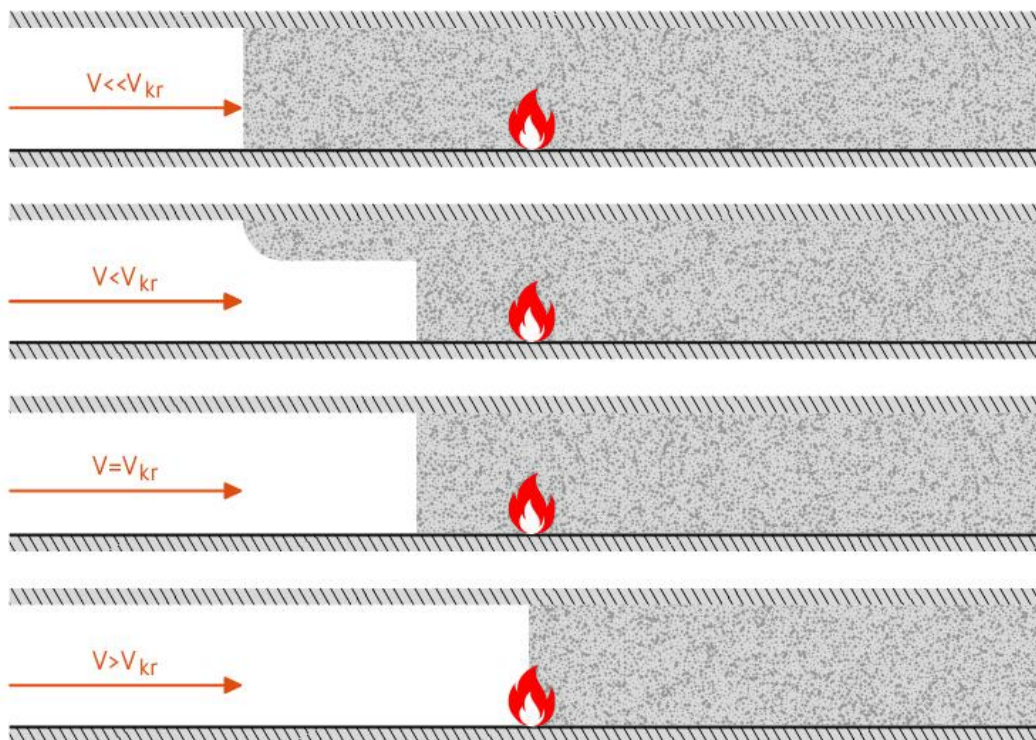
De lengte van de backlayeringszone is afhankelijk van:

- de luchtsnelheid stroomopwaarts van de brand;
- het brandvermogen, dat de hoeveelheid en temperatuur van de rook bepaalt;
- de vorm en de dimensies van de tunneldoorsnede;
- de tunnelhelling ter plaatse van de brand.



Figuur 1-7: Circulatie-richting en snelheid van rook en ventilatielucht bij brand in een tunnel met langssventilatie

De lengte van de *backlayering* kan worden gemanipuleerd door de ventilatiesnelheid te wijzigen. Als de ventilatiesnelheid te laag wordt, zal de rook in de backlayeringslaag zoveel afkoelen dat vermenging met de ventilatielucht (opmenging) plaatsvindt en uiteindelijk de gehele hoogte van de tunnel wordt gevuld met rook (zie Figuur 1-7).

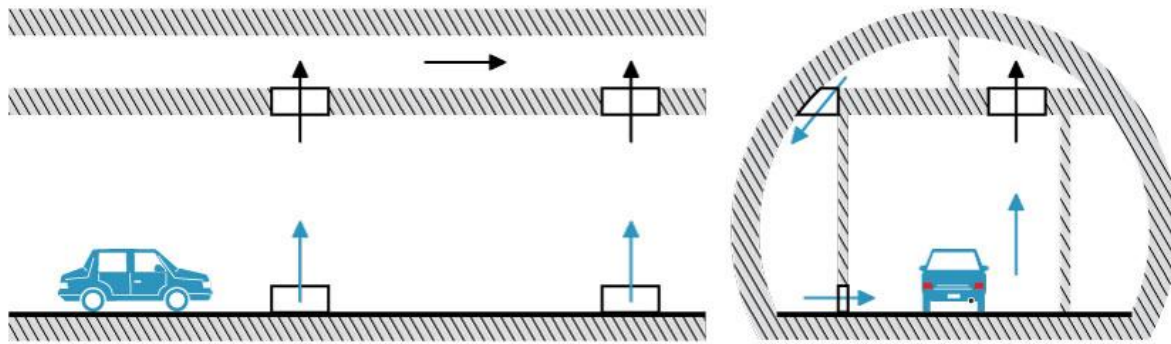


Figuur 1-8: Rookbeweging afhankelijk van de langssnelheid

De minimale snelheid die noodzakelijk is voor het beheersen en beperken van de lengte van de *backlayering*, heet 'kritische snelheid'. Hierbij moet worden opgemerkt dat bij afnemende ventilatiesnelheid en nadering van de kritische snelheid niet meteen opmenging over de volledige tunnelhoogte optreedt (zie Figuur 1-8). Pas bij een aanzienlijke onderschrijding van de kritische snelheid stroomt de rook zover terug dat opmenging over de hele tunneldoorsnede mogelijk is. Bij een kleine onderschrijding van de kritische snelheid verspreidt de rook zich over een aanzienlijke lengte langs het plafond stroomopwaarts van de brand. Al op enige afstand voor de brand mengt de rook zich over de hele hoogte met de lucht; maar op grotere afstand blijft de stratificatie in stand, waardoor onder de rook een niet-verontreinigde zone overblijft. Er zal daarom bij een kleine onderschrijding van de kritische snelheid nog geen ernstige rookoverlast stroomopwaarts van de brand ontstaan.

1.5 DWARSVENTILATIE

Bij volledige dwarsventilatie wordt over de hele tunnellengete, dwars op de lengteas van de tunnel, verse lucht toegevoerd en verontreinigde lucht afgevoerd. De overwegende luchtstroom in de voertuigkoker is dwars op de lengteas van de tunnel (zie Figuur 1-9). Volledige dwarsventilatie is geschikt voor tunnels met tweekerichtingsverkeer, maar zonder vrachtverkeer. Het grootste nadeel van dwarsventilatie is namelijk dat deze niet in staat is de rook van grote branden (> 30 tot 50 MW) voldoende af te voeren. Dit systeem wordt daarom afgeraden in tunnels waar vrachtwagens toegelaten worden.



Figuur 1-9: Schema volledige dwarsventilatie (blauw: aanvoer zuivere lucht; zwart: afvoer vervuilde lucht)

1.5.1 IN NORMAAL BEDRIJF: BEHEERSING VAN VERVUILINGSCONCENTRATIES

Door de gelijktijdige toe- en afvoer van ventilatielucht is de concentratie van vervuiling over de lengteas in principe constant, zoals getoond in Figuur 1-10, en onafhankelijk van de lengte van de tunnel. Het benodigde toe- en afvoerdebiet is recht evenredig met de tunnellengete.



Figuur 1-10: Concentratieverloop van de vervuiling met uitsluitend dwarsventilatie zonder stroming in lengterichting

Er moet rekening worden gehouden met de vervuiling van de kanalen. Vooral de afvoerkanalen kunnen ernstig vervuild worden met stof als de afzuiginstallatie in de normale situatie continu wordt gebruikt om de vervuiling in de tunnel af te voeren. Door vervuiling met stof stijgen de kanaalweerstand aanzienlijk. Regelmatig onderhoud is dan ook onontbeerlijk.

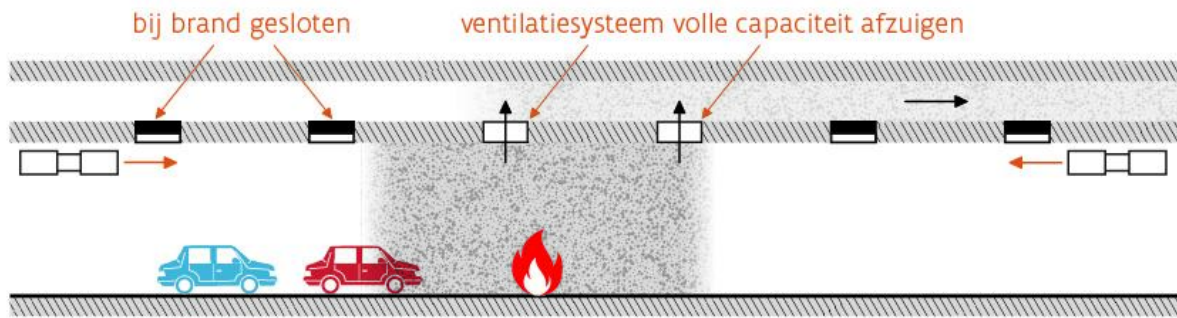
1.5.2 BRAND: BEHEERSING VAN ROOK EN TEMPERATUUR

De rookontwikkeling doorloopt in principe dezelfde fasen als bij een niet-geventileerde tunnel. Voor kleinere branden (< 30 MW)⁴ geldt dat het gebied waar de rook zich verspreidt beperkt kan blijven, wanneer de beschikbare afzuigcapaciteit ter plaatse van de brand volledig wordt ingezet. In een ideale situatie worden alle rook en gassen direct boven de brand afgezogen. Bij grote branden (> 30 MW), waarbij de rook hoeveelheid

⁴ 30 MW komt overeen met het vermogen van een bestelwagen die in brand staat.

niet meer kan worden afgezogen, wordt ook de rest van de tunnel in meer of mindere mate verontreinigd door rook en gassen. Als uitsluitend dwarsventilatie wordt toegepast, is de rookbeweging in de lengterichting van de tunnel bij grote branden (> 50 MW) onbeheersbaar. De rook kan zich dan door de hele tunnel verspreiden.

Om de afvoerrichting van rook bij brand enigszins beheersbaar te maken moet een dwarsventilatiesysteem worden aangevuld met een (beperkt) langsventilatiesysteem dat in staat is om tijdens brand de langsstroming in beide richtingen te beheersen, zoals aangegeven in Figuur 1-11.



Figuur 1-11: Rookafvoer bij brand met dwarsventilatie en ondersteunende langsventilatie

In Tabel 1-1 wordt het minimum afzuigdebiet gegeven voor oplopende brandgrootten volgens *Steunpunt Tunnelveiligheid (2005) Aanbevelingen Ventilatie van Verkeerstunnels*. Daarbij zijn waarden gegeven voor het geval de langssnelheid wel of niet kan worden beheerst. Deze waarden gelden voor tunnels met afzuigpunten in het plafond. Als de afzuigpunten niet in het plafond worden geplaatst, is het vereiste minimum afzuigdebiet 1,5 – 2 maal groter.

Tabel 1-1: Rookproductie en grootte-orde nodige afzuigdebieten bij verschillende types brand, gebaseerd op Aanbevelingen Ventilatie van Verkeerstunnels van Steunpunt Tunnelveiligheid (2005)

Type (maatgevende brand)	Vermogen brand (MW)	Rookproductie (m ³ /s)	Minimum afzuigdebiet zonder ondersteunende langsventilatie (m ³ /s)	Minimum afzuigdebiet met ondersteunende langsventilatie (m ³ /s)
personenwagen	5	12	25	> 15
bus	20-30	50-70	100	> 60
vrachtwagen	50-150	240	niet mogelijk	> 250 ⁵
>plasbrand	200	>400	niet mogelijk	niet mogelijk

1.6 SAMENVATTING

Voor de overweging van het al dan niet plaatsen van mechanische ventilatie in tunnels kunnen volgende grootteordes worden gebruikt:

- lengte gesloten deel minder dan 250 m: niet noodzakelijk;
- lengte gesloten deel tussen 250 m – 500 m: afhankelijk van nadere analyse;
- lengte gesloten deel meer dan 500 m: noodzakelijk.

⁵ De nodige afzuigcapaciteit wordt hierbij zo groot dat men in feite een extra tunnel moet bouwen boven de verkeerstunnel als ventilatiekoker en zelfs dan is het niet zeker dat voor een specifieke tunnel de rook nog steeds goed beheerst kan worden. Rook kan zich over enkele tientallen tot honderden meters verspreiden in de nabijheid van de brand en het is lastig om een eenduidig en robuust ventilatieregime in te stellen wanneer in de tunnel hellingen over een grote afstand voorzien zijn. In de praktijk stuit men bij dwarsventilatie bij branden groter dan 50 MW snel op de limieten van de praktische efficiëntie.

In tunnels met eenrichtingsverkeer per voertuigkoker - zoals voorgeschreven voor Europese en Vlaamse hoofdwegen - wordt langsventilatie voorgeschreven, omdat dit systeem gedimensioneerd kan worden voor rookbeheersing bij grote branden.

Bij brand zal in de meeste gevallen stroomopwaarts van deze brand een file ontstaan. Door langsventilatie worden de weggebruikers in de file stroomopwaarts van de brand beschermd tegen rook. Doordat de rook stroomafwaarts wordt geblazen, dient men de tunnel samen met de omliggende weginfrastructuur zodanig te ontwerpen dat er geen structurele file in de tunnel kan ontstaan. De weggebruikers die zich stroomafwaarts van de brand bevinden, moeten de tunnel ten allen tijde stapvoets rijdend kunnen verlaten.

Indien voor een tunnel < 500 m wordt gekozen om geen ventilatie te plaatsen, dient het bouwkundig ontwerp zo geconcipieerd te worden dat enerzijds rook-kortsluiting tussen de portalen vermeden wordt en anderzijds vluchtende tunnelgebruikers bij het verlaten van de vluchtkoker niet in de rook terecht komen.⁶

⁶ De functionele eisen aan het bouwkundig ontwerp staan voor dit geval in de VTR C504 Rookschermen.

2 FUNCTIONELE EISEN EN AANDACHTSPUNTEN

In dit hoofdstuk wordt nader ingegaan op de functionele eisen die gerespecteerd dienen te worden bij het ontwerp van tunnelventilatie. Daarnaast wordt ook aandacht besteed aan ontwerpkeuzes die een grote invloed hebben op het bouwkundige ontwerp (locatie tunnelmonden, dwarsprofiel, enz.) en die dus in een vroeg stadium van het ontwerp (alternatievenstudie) dienen beschouwd te worden.

2.1 ALGEMENE FUNCTIONELE EISEN

De meeste algemene functionele eisen die onder deze paragraaf vallen, zijn van toepassing op alle tunnels, onafhankelijk van het al dan niet toepassen van mechanische ventilatie of het type ventilatie en kunnen dus ook gebruikt worden voor tunnels die buiten de scope van de algemene Vlaamse Tunnelrichtlijn vallen. De eisen op het gebied van toegelaten emissies in normaal bedrijf zijn voornamelijk gebaseerd op de recente inzichten in de meest recente versie van het *PIARC (2019) Road Tunnels: Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation*. De toegelaten concentraties bij onderhoud en interventie van de hulpdiensten zijn gebaseerd op de Belgische arbeidswetgeving. De eisen gesteld bij brand zijn gebaseerd op een combinatie van *NFPA 502 Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways*, van *RWS (2021) Landelijke Tunnelstandaard* en van *Steunpunt Tunnelveiligheid (2005) Aanbevelingen Ventilatie van Verkeerstunnels*. Deze verwijzingen zijn terug te vinden in de referentielijst op het einde van dit document.

FE. C301-001. Ontwerp, bouw en werking van het ventilatiesysteem zijn berekend op:

- *de beheersing van de emissie van vervuilingconcentraties bij normaal verkeer en tijdens de verkeerspieken;*
- *de beheersing van de emissie van verontreinigende stoffen als het verkeer stilstaat wegens een incident of een ongeval;*
- *de beheersing van hitte en rook bij brand.*

2.1.1 IN NORMAAL BEDRIJF: EISEN GESTELD AAN BEHEERSING VAN VERVUILINGSCONCENTRATIES EN ZICHT IN DE TUNNEL

In normaal bedrijf komen in een tunnel uitlaatgassen vrij door het autoverkeer. Daarnaast veroorzaakt slijtage van banden en het wegdek de vorming van fijn stof. In een semi-gesloten omgeving zoals een tunnel kan dit snel leiden tot hoge concentraties van stoffen in de lucht die bij inademing schadelijk voor de gezondheid kunnen zijn. Het is daarom noodzakelijk ervoor te zorgen dat de concentraties schadelijke stoffen binnen de tunnel voldoen aan de gestelde criteria.

Een tunnelventilatiesysteem dient in staat te zijn om voldoende luchtkwaliteit te garanderen voor zowel normaal verkeer als voor stagnerend verkeer.

Bij de beoordeling van gezondheidsrisico's wordt over het algemeen gelet op de volgende door motorvoertuigen uitgestoten stoffen:

- stikstofdioxide (NO₂);
- koolmonoxide (CO);
- benzeen (C₆H₆);
- benzapreen (BaP);
- zwaveldioxide (SO₂);
- ozon (O₃);
- lood (Pb);
- fijn stof (PM₁₀).

Bij zeer lange tunnels (grootteorde 2 – 3 km of langer) is het mogelijk dat de concentraties schadelijke rookgassen zoals CO en NO₂ de normwaarde bereiken bij normaal rijdend verkeer. In de praktijk blijkt dat in een tunnel vooral rekening moet worden gehouden met de concentraties CO, NO_x en fijn stof (PM₁₀).

De World Road Association (PIARC) levert op regelmatige basis een update van het rapport *Road tunnels: vehicle emission and air demand for ventilation*. Op het moment van publicatie van de 'Vlaamse Tunnelrichtlijn: C301 Ventilatie' worden de waarden van de versie die in 2019 werd gepubliceerd voor de toegestane concentraties CO, NO₂ en fijn stof aangehouden.

Als ontwerpwaarde voor CO dient nagegaan te worden of deze onder 70 ppm blijft bij zowel normaal rijdend verkeer als stagnerend verkeer volgens Tabel 2-1.

Tabel 2-1: Ontwerpwaarden concentratie CO in tunnels

Verkeerssituatie	Scenario	Ontwerpwaarde concentratie CO
Normaal Verkeer	Bij zeer lange tunnels is het mogelijk, dat de concentraties schadelijke rookgassen zoals CO en NO ₂ de normwaarde bereiken bij normaal rijdend verkeer. De snelheid dient van het verkeer te worden ingevoerd.	70 ppm
Stagnerend Verkeer	In de tunnel vindt langzaam rijdend of stilstaand verkeer plaats. De snelheid van het verkeer wordt ingesteld op 30 km/u.	70 ppm

FE. C301-002. In normaal bedrijf wordt de concentratie CO onder 70 ppm gehouden bij vlot rijdend verkeer.

FE. C301-003. Bij langzaam rijdend verkeer aan 30 km/u wordt de concentratie CO onder 70 ppm gehouden.

Slechts een beperkt percentage van de NO_x uitstoot bestaat uit NO₂. De uitstoot van NO_x bestaat grotendeels (90 – 95 %) uit NO. In aanwezigheid van zuurstof in de tunnel zal NO echter omgezet worden in NO₂. In een diesellootruig zorgt de katalysator ervoor dat meer NO omgezet wordt naar NO₂. Globaal zal een diesellootruig 5 tot 6 keer meer NO₂ uitstoten dan een benzinevoertuig. Daar waar NO niet schadelijk is voor de gezondheid, irriteert NO₂ de longen en kan het infecties aan de luchtwegen veroorzaken. Hiervoor wordt een limietwaarde van 1 ppm voorgesteld voor NO₂, gebaseerd op de waarden gepubliceerd door *National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) (2018)* die deze limiet vooropstelt voor een verblijfsduur van 15 minuten.

FE. C301-004. In normaal bedrijf wordt de concentratie NO₂ onder 1 ppm gehouden.

Fijn stof draagt bij tot een beperking van de zichtbaarheid. Zowel de uitstoot van het wagenpark als de algemene cumulatieve vervuiling van de tunnel zelf spelen een rol in de beperking van de zichtbaarheid. Zichtbaarheid door vervuiling of mist wordt niet als een primaire ontwerpparameter vooropgesteld, maar eerder als een variabele die kan gebruikt worden om een ventilatiesysteem te activeren als een sensor aangeeft dat de zichtbaarheid dreigt achteruit te gaan. De zichtcondities in de tunnel worden voornamelijk bepaald door de verstrooiing en absorptie van licht door fijn stof in de tunnel-lucht. De zichtcondities kunnen worden uitgedrukt in de transmissiecoëfficiënt T_{atm} , waarmee wordt uitgedrukt hoeveel licht er over een zekere afstand overblijft van het licht dat wordt uitgezonden door een lichtbron. In een tunnel wordt deze meestal over een afstand van 100 m gemeten en kan de transmissiecoëfficiënt als volgt, bepaald worden:

$$T_{atm, 100 m} = e^{-kL}$$

waarbij:

L = de lengte waarover wordt gemeten, in dit geval 100 meter⁷

k = de (licht)extinctiecoëfficiënt [m^{-1}]

In *PIARC Road Tunnels: Vehicle emission and air demand for ventilation (2019)* worden de volgende waarderingen van k gegeven, op grond waarvan de transmissiecoëfficiënt $T_{atm,100 m}$ en de zichtlengte zijn herleid uit k :

Tabel 2-2: Relatie tussen extinctiecoëfficiënt (k), transmissiecoëfficiënt over 100 m ($T_{atm,100 m}$), zichtlengte en zichtcondities

k	$T_{atm,100 m}$	zichtlengte Z	zichtcondities
0,005 m^{-1}	60 %	600 m ⁸	zichtlengte minstens enkele honderden meter
0,007 m^{-1}	50 %	430 m	lichte waas in de lucht met ruim voldoende zicht
0,009 m^{-1}	40 %	330 m	mistige indruk, doch voldoende zicht
0,012 m^{-1}	30 %	250 m	oncomfortabele indruk, net voldoende zich om een noodstop te maken voor een stilstaand object

Een meting van het zicht in de tunnel kan tevens worden gebruikt voor het detecteren van brand, omdat de rook altijd tot een zichtvermindering leidt.

FE. C301-005. In normaal bedrijf moet het mogelijk zijn de extinctiecoëfficiënt k voor zicht onder 0,007 m^{-1} te houden.

2.1.2 TIJDENS ONDERHOUD EN INTERVENTIE VAN DE BRANDWEER: EISEN GESTELD AAN BEHEERSING VAN EMISSIECONCENTRATIES IN DE TUNNEL

Tijdens onderhoud moet een voertuigkoker worden beschouwd als een arbeidsplaats en moet voldaan worden aan de *Codex boek VI - Chemische, kankerverwekkende, mutagene en reprotoxische agentia*; titel 1- Chemische agentia.

Voor CO- en NO₂-concentraties worden volgende waarden vooropgesteld als grenswaarde:

- NO₂: 0,5 ppm als grenswaarde voor lange blootstellingsduur, 1 ppm voor korte tijd (15 minuten);
- CO: 20 ppm als grenswaarde voor lange blootstellingsduur, 100 ppm voor korte tijd (15 minuten).

Indien de brandweer zich in de ondersteunende koker opstelt voorafgaand aan een interventie in de incidentkoker, dient de ondersteunende koker ook als arbeidsplaats beschouwd te worden en dienen bovenstaande waarden gegarandeerd te worden.

FE. C301-006. Tijdens onderhoud en interventie wordt voor NO₂-concentratie 0,5 ppm als grenswaarde voor lange blootstellingsduur en 1 ppm voor korte tijd (15 minuten) aangehouden.

⁷ Sensoren voor zichtmeting worden standaard op 100 m van elkaar geplaatst.

⁸ De zichtlengte Z kan gemakkelijk uit k worden bepaald via $Z=3/k$

FE. C301-007. Tijdens onderhoud en interventie wordt voor CO 20 ppm als grenswaarde voor lange blootstellingsduur en 100 ppm voor korte tijd aangehouden (15 minuten).

Eis FE. C301-007 geeft een waarde die enkel in ontwerpfase via berekeningen nagekeken wordt. Er worden geen sensoren voorgeschreven om de CO-concentratie ook daadwerkelijk op te volgen.

2.1.3 GELUID

In verschillende situaties kunnen tunnelgebruikers, hulpdiensten of onderhoudspersoneel blootgesteld worden aan lawaai in de tunnel. De grootste geluidsbronnen zijn (stilstaand) verkeer en de ventilatoren. De volgende scenario's verdienen aandacht:

- in geval van pech zal de bestuurder uitstappen en proberen contact te zoeken met de tunneloperator. Communicatie via de intercom moet mogelijk zijn, ondanks het achtergrondlawaai van rijdend verkeer. Daarnaast moeten eventuele instructies van de tunneloperator via een eventueel luidsprekersysteem altijd verstaanbaar zijn;
- indien onderhoud plaatsvindt in een voor het verkeer afgesloten voertuigkoker, moet gehoorschade bij het onderhoudspersoneel worden voorkomen. Hier moet rekening gehouden worden met een lange verblijfsduur;
- indien het verkeer is tot stilstand gekomen door een calamiteit, moeten de weggebruikers te voet de tunnel verlaten. In die situatie moeten boodschappen via een luidsprekersysteem altijd verstaanbaar zijn en moet er communicatie tussen weggebruikers onderling mogelijk zijn;
- na het ontstaan van een incident wordt de hulpverlening in de tunnel actief. Dat betekent dat communicatie tussen hulpverleners onderling en tussen hulpverleners en slachtoffers mogelijk moet zijn. Ook dient er aandacht besteed te worden aan het vermijden van gehoorschade van hulpverleners, daar zij mogelijk lange tijd in de tunnel moeten verblijven.

2.1.3.1 INCIDENTEN EN CALAMITEITEN: SPRAAKVERSTAANBAARHEID

De spraakverstaanbaarheid van luidsprekerinstallaties is afhankelijk van een bepaalde signaal/ruis-verhouding. In het kader van de verstaanbaarheid is het van belang dat het geluidsniveau duidelijk boven het omgevingslawaai uit komt, maar ook weer niet te veel. Voor luidsprekerinstallaties wordt gestreefd naar een geluidsdruk niveau van 100 dB(A) en is een maximum van 105 dB(A) toelaatbaar vanwege de korte duur van de boodschap. Een reden hiervoor is dat bij hogere geluidsdruk niveaus mensen schrikken van het geluid en daardoor de boodschap niet verstaan. Een andere reden is dat door de tijdsduur die een gesproken boodschap vereist, bij hogere geluidsdruk niveaus gehoorschade bij de luisteraars optreedt.

De geluidsdruk van de omroep dient ongeveer 10 tot 13 dB(A) hoger te zijn dan het specifieke omgevingslawaai in de voertuigkoker met ventilatie en verkeer met een snelheid van 70 km/h. Bij voorkeur is het geluidsdruk niveau van de ruis, voornamelijk veroorzaakt door de aanjaagventilatoren, gemiddeld lager dan 87 dB(A) en maximaal 90 dB(A) op 1,60 m boven het wegdek. Bij die geluidsdruk is onderlinge spraak tussen personen op een afstand van 0,5 m ook nog mogelijk.

FE. C301-008. Het gemiddelde geluidsdruk niveau van de ventilatie bij inschakeling mag niet meer bedragen dan 87 dB (A). Op geen enkele plaats in de voertuigkoker, gemeten op een hoogte van 1,60 meter boven het wegdek, is een geluidsdruk niveau van meer dan 90 dB(A) toegestaan bij een snelheid van 70 km/u.

FE. C301-009. De geluidsdruk van de omroep dient uit te komen tussen de 10 en 13 dB(A) hoger dan het specifieke omgevingslawaai in de voertuigkoker bij ventilatie en verkeer met een snelheid van 70 km/h.

FE. C301-010. Voor luidsprekerinstallaties wordt gestreefd naar een geluidsdrukkniveau van 100 dB(A) en is een maximum van 105 dB(A) toelaatbaar vanwege de korte duur van de boodschap.

2.1.3.2 INTERVENTIE VAN DE BRANDWEER

Tijdens een interventie van de hulpdiensten moet het mogelijk zijn om op bevel van de brandweer de ventilatie in de ondersteunende koker lager te zetten. Hierbij moet het mogelijk zijn om in de ondersteunende koker, door middel van het afschakelen van (een deel van) de ventilatie in de ondersteunende koker, een gemiddeld geluidsniveau te bereiken dat niet hoger is dan 55 dB(A). Bij het omlaag schakelen van het ventilatieniveau kan de tunneloperator geen harde garanties meer afgeven voor wat betreft rookterugslag. Voor de incidentkoker is het noodzakelijk dat de ventilatie voluit kan ventileren.

FE. C301-011. Een geluidsniveau van 55 dB(A) of lager is haalbaar door het afschakelen van ventilatoren in de ondersteunende voertuigkoker, gemeten buiten de directe nabijheid van de ventilator en onder normale (weers)omstandigheden.

2.1.3.3 ARBEIDSWETGEVING GELUID

Voor onderhoudspersoneel en hulpdiensten, die langere tijd in de tunnel verblijven, dient er mee rekening gehouden te worden dat de grenzen van het gemiddeld geluidsdrukkniveau niet overschreden worden. De basis hiervoor is de Codex over het welzijn op het werk Boek V.- Omgevingsfactoren en fysieke agentia Titel 2.– Lawaai.

FE. C301-012. Voor onderhoudspersoneel en hulpdiensten wordt de Codex over het welzijn op het werk Boek V.- Omgevingsfactoren en fysieke agentia Titel 2.– Lawaai aangehouden.

2.2 SPECIFIEKE AANDACHTSPUNTEN VOOR LANGSVENTILATIE

Een systeem van langsventilatie moet in staat zijn om:

- in normaal bedrijf een zodanige luchtstroom in langsrichting van de tunnel op te wekken dat de concentraties verkeersemisatie (CO en NO_2) onder een bepaald maximum blijven;
- bij brand de rook naar één kant te verdrijven met een zodanige snelheid dat stroomopwaarts van de brand geen onveilige terugstroming van rook ontstaat (vermijden van 'backlayering');
- bij brand in een voertuigkoker de ondersteunende koker vrij te houden van rook wanneer daar tijdens de brand mensen (weggebruikers of hulpdiensten) aanwezig kunnen zijn. Hieruit kan worden afgeleid dat een langsventilatiesysteem meestal (gedeeltelijk) omkeerbaar moet zijn.

Daarnaast is bij het ontwerpen het volgende van belang:

- wanneer een systeem van langsventilatie is opgebouwd uit aanjaagventilatoren in de voertuigkoker zelf (dus niet aan het ingangsportaal), kunnen bij brand ventilatoren dicht bij het vuur uitvallen. De hoge temperatuur van rookgassen kan er bovendien voor zorgen dat de ventilatoren stroomafwaarts bij brand minder effectief zijn. Er moet dus rekening worden gehouden met de plaats van de ventilatoren in de tunnel en met de mate van bestendigheid tegen hoge temperaturen;
- de druk op verschillende locaties in de voertuigkoker als gevolg van langsventilatie moet in balans zijn met de druk in vluchtwegen die aansluiten op de voertuigkoker. Er moet zowel bij gesloten als bij geopende vluchtdeuren worden voorkomen dat door een drukverschil rook in de vluchtwegen kan stromen.

Aan bovenstaande eisen kan niet altijd in elke situatie worden voldaan. Dit is mede afhankelijk van de windinvloed, de invloed van het verkeer en de invloed van de plaats en grootte van een brand. Voor standaard

tunnels (tunnels zonder op- en afritten met een lengte tot ongeveer 2000 m) dient een stochastische analyse uitgevoerd te worden om de faalkansen per brandgrootte te bepalen. Voor complexere projecten dienen daarnaast verschillende representatieve maatgevende deterministische studies uitgevoerd te worden.

2.2.1 KRITISCHE SNELHEID

Het basisprincipe bij een langsventilatiesysteem, namelijk dat de zone stroomopwaarts van de brand rookvrij moet blijven, vereist een minimale snelheid om *backlayering* te voorkomen, de zogenaamde 'kritische snelheid'.

De kritische snelheid voor *backlayering* is afhankelijk van het brandvermogen en de geometrie van de tunnel. Naast testresultaten zijn er een aantal theoretische benaderingen voor het berekenen van de kritische snelheid, maar die leverden tot op heden geen eensluitende resultaten op. Dit zorgt ervoor dat in verscheidene publicaties evenzovele voorstellen terug te vinden zijn voor de bepaling van de kritische snelheid.

De vermogens waarvoor de kritische snelheid dient bepaald te worden, zijn gelinkt aan te verwachten brandgroottes voor verschillende types voertuigen. De *Heat Release Rate* (HRR) voor een personenwagen ligt rond 5 MW, voor een bus ligt deze rond 20 – 30 MW en voor een lege vrachtwagen rond 50 – 60 MW. De maximale grootte van vrachtwagenbranden met brandbare lading is ongeveer 100 – 150 MW en voor plasbranden circa 200 MW.

De RARVW (Regeling aanvullende regels veiligheid wegtunnels) houdt waarden aan voor de kritische snelheid in functie van de brandgrootte volgens Tabel 2-3.

Tabel 2-3: Kritische snelheid in functie van brandvermogen volgens de Nederlandse richtlijnen

Brandvermogen	Kritische snelheid
5 MW	1,5 m/s
20 MW	1,8 m/s
50 MW	2,25 m/s
100 MW	2,5 m/s
200 MW	2,5 m/s

De kritische snelheid is volgens de Nederlandse richtlijnen enkel functie van het brandvermogen en niet van de geometrie van de tunnel. Er zijn echter andere publicaties die de invloed van de geometrie wel mee nemen. De NFPA 502-2023⁹ geeft aan dat de snelheid iteratief dient bepaald te worden uit een combinatie van twee formules voor de kritische snelheid en de verbrandingstemperatuur van de verbrandingsgassen. Deze zijn hieronder terug te vinden:

$$V_c = K_1 K_g \left(\frac{gHQ}{\rho C_p AT_f} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$T_f = \left(\frac{Q}{\rho C_p AV_c} \right) + T$$

waarbij:

V_c = kritische snelheid (m/s)

K_1 = Froude factor in functie van de brandgrootte (-) (zie Tabel 2-4)

K_g = hellingsfactor (-) (zie Figuur 2-1)

g = valversnelling (m/s²)

H = hoogte van tunnel op de plaats van de brand (m)

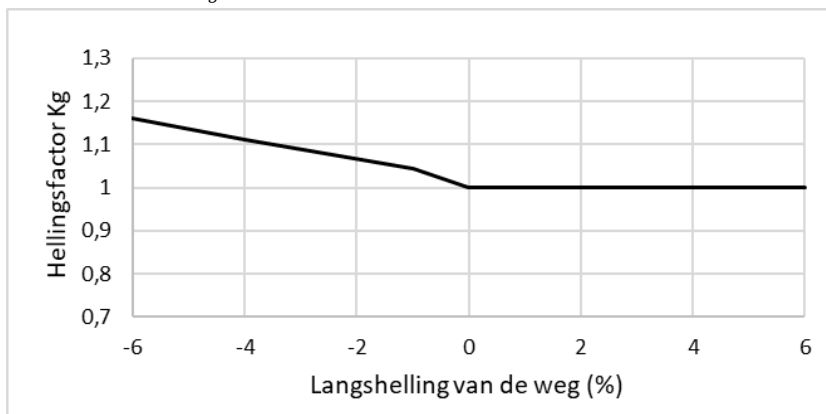
⁹ In de verschillende edities van de NFPA 502 zijn door de jaren heen verschillende formules gepubliceerd in annex D voor de bepaling van de kritische snelheid in functie van het brandvermogen, de hoogte en de breedte van de tunnel en de hellingsgraad. In de versie van 2023 wordt de methodiek van 2017 opnieuw gebruikt, maar wordt meer achtergrondinformatie gegeven over de beperkingen van de voorgestelde formules.

Q = vermogen dat door de brand afgestaan wordt aan de lucht via convectie; $Q = \eta * P$ (kW)
 P = maximale totale vermogen (heat release rate) van de brand door convectie en straling (kW)
 η = convectie factor (-); 0,67 voor branden met een heat release rate 20 MW en 0,73 voor kleinere branden
 ρ = dichtheid van de lucht stroomopwaarts van de brand (kg/m^3)
 C_p = soortelijke warmte (kJ/kgK)
 A = doorsnede van tunnel loodrecht op de luchtstroom (m^2)
 T_f = gemiddelde temperatuur rookgassen (K)
 T = Temperatuur van de aanvoerlucht (K)

Tabel 2-4: Froude factor K_1 in functie van het totale brandvermogen P^{10}

P (MW)	K_1
>100	0,606
90	0,62
70	0,64
50	0,68
30	0,74
<10	0,87

De hellingsfactor K_g is functie van de helling van de weg en kan afgelezen worden op Figuur 2-1:

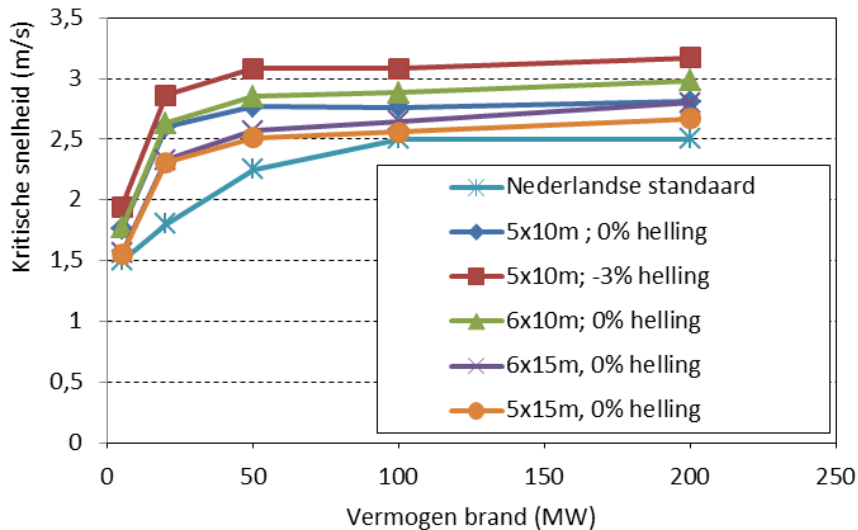


Figuur 2-1: Invloed van de langshelling van de tunnel op de kritische snelheid¹¹

Figuur 2-2 toont ter illustratie de kritische snelheid in functie van het brandvermogen volgens de Nederlandse methodiek enerzijds en volgens de NFPA 502 methodiek anderzijds. Voor deze laatste werden de hoogte, breedte en helling van de tunnel aangepast.

¹⁰ in de NFPA staat dat de Froude factor dient bepaald te worden op basis van het convectieve vermogen, maar in de paper "NFPA 502 Critical Velocity Calculation Methodologies and Dimensionless Heat Release Rate" van Yanan (Scott) Shi et al. uit de proceedings van de Tenth International Symposium on Tunnel Safety and Security, Stavanger, Norway, April 26-28, 2023 wordt vermeld dat dit een fout is in de NFPA publicatie.

¹¹ De hellingsgraad is negatief als de weg daalt in de rijrichting



Figuur 2-2: Illustratieve grafiek berekende kritische snelheid in functie van de geometrie van de tunnel volgens NFPA 502-2017 versus de Nederlandse methodiek

De kritische snelheden van de NFPA 502 liggen systematisch hoger dan de LTS-waarden. De LTS-waarde is opgesteld voor een referentietunnel met een plafondhoogte van 5 m en tussen specifieke grenzen *qua* oppervlakte (70 – 90 m²) en zonder helling. Voor 100-200 MW komen de oranje curve (5 x 15 m, 0 % helling) en de LTS-curve redelijk goed overeen. Voor kleinere branden ligt de NFPA 502-2023 ook hier hoger. In de NFPA 502-2014¹² lagen deze waarden nog lager en kwamen deze beter overeen met de LTS-curve.

Zowel de NFPA 502-2023 als de LTS tonen aan dat boven circa 100 MW geen echte hogere kritische snelheid meer nodig is. Dit kan worden verklaard uit het feit dat de verbranding plaatsvindt in een behoorlijk grote zone stroomafwaarts van de brandhaard. De lengte van de brandzone kan daarbij oplopen tot circa 100 meter bij een brand van 200 MW. Daardoor is het brandvermogen ter plaatse van de brandhaard zelf nooit veel groter dan 100 MW. De druk en turbulentie van de rook aan de stroomopwaartse zijde van de brand neemt daardoor boven 100 MW niet meer toe.

FE. C301-013. De NFPA 502 Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways versie 2023 wordt gebruikt om de kritische snelheid te bepalen in functie van de brandlast.

2.2.2 BEPALING VAN DE FAALKANSEN VOOR VERSCHILLENDE BRANDVERMOGENS

Zoals eerder werd vermeld kan niet altijd aan alle functionele eisen worden voldaan. Indien een ventilatiesysteem wordt ontworpen op de slechtst mogelijke combinatie van wind, verkeer en plaats en grootte van de brand, zal men hiervoor veel te veel en te grote ventilatoren moeten plaatsen. De eisen aan de energievoorziening zullen hierbij ook zeer hoog komen te liggen. De kans dat deze *worst case*-combinatie ook daadwerkelijk zal voorkomen, is weliswaar niet onbestaande maar toch bijzonder klein. In de praktijk wordt dus een zekere mate van falen toegestaan. In de voorontwerpfase dienen probabilistische berekeningen uitgevoerd te worden volgens de volgende werkwijze:

- bereken voor een aantal verwachte brandgrootten met de bijbehorende kritische snelheid, de kans op een te lage langssnelheid;
- hou daarbij rekening met de variabele plaats van de brand waarbij elke positie evenveel kans heeft;

¹² National Fire Protection Association (NFPA). (2014). *NFPA 502: Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways 2014 Edition*.

- hou rekening met de windrichting en windsnelheid conform de statistische gegevens die gelden voor de plaatselijke situatie;
- kies vaste uitgangsgegevens voor het verkeer.

Kleine branden (5 MW) komen vaker voor dan grote (20 – 50 MW) of zeer grote branden (100 – 200 MW). Daarom moet de toegelaten systeemfaalkans (de kans op een te lage langssnelheid) voor kleinere branden strenger zijn dan voor grote branden.

Volgens de RARVW (Regeling aanvullende regels veiligheid wegtunnels) mag de kans dat het systeem faalt doordat de kritische snelheid niet wordt gehaald, niet groter zijn dan aangegeven in Tabel 2-5.

Tabel 2-5: Toegelaten faalkans in functie van brandvermogen

Brandvermogen	Toegelaten faalkans
5 MW	-
20 MW	1×10^{-3}
50 MW	5×10^{-3}
100 MW	15×10^{-3}
200 MW	50×10^{-3}

De genoemde faalkansen gelden voor de stationaire toestand. Dat is de toestand waarbij reeds (groepen) ventilatoren zijn uitgevallen door te hoge werktemperaturen of waarbij ventilatoren een lager rendement hebben door de hoge temperatuur van rookgassen. In de fase van zelfredzaamheid zullen de faalkansen aanzienlijk lager zijn dan aangegeven. In die fase is de brand nog niet uitgegroeid tot maximaal vermogen. Bovendien zijn de ventilatoren nog niet uitgevallen en kunnen ze nog hun maximale prestatie leveren.

In Nederland wordt voorgeschreven dat er ontworpen dient te worden naar de brandvermogens en faalkansen beschouwd in Tabel 2-4, en dit onafhankelijk van de ADR-categorie van de tunnel. In Vlaanderen speelt de ADR-categorie van de tunnel wel een rol in de bepaling van de maximale brandgrootte (zie FE. C301-15).

FE. C301-014. De betrouwbaarheid van langsventilatie wordt via een stochastische analyse bepaald voor verschillende brandgroottes. Per brandgrootte is een toegelaten faalkans gedefinieerd die niet overschreden mag worden. De toegelaten faalkansen per brandgrootte zijn hieronder terug te vinden:

20 MW	$1 \cdot 10^{-3}$
50 MW	$5 \cdot 10^{-3}$
100 MW	$15 \cdot 10^{-3}$
200 MW	$50 \cdot 10^{-3}$

Grofweg kan men de voor de tunnelcategorieën volgende beperkingen op het ADR vervoer definiëren:

- tunnelcategorie A: geen beperkingen voor het vervoer van gevaarlijke goederen;
- tunnelcategorie B: beperking voor gevaarlijke goederen die aanleiding kunnen geven tot een zeer grote explosie;
- tunnelcategorie C: beperking voor gevaarlijke goederen, die aanleiding kunnen geven tot een zeer grote explosie, een grote explosie of het vrijkomen van een grote hoeveelheid giftige stoffen;
- tunnelcategorie D: beperking voor gevaarlijke goederen, die aanleiding kunnen geven tot een zeer grote explosie, een grote explosie, het vrijkomen van een grote hoeveelheid giftige stoffen of een grote brand;
- tunnelcategorie E: door deze tunnel mogen uitsluitend de UN 2919, 3291, 3331, 3359 en 3373.

Voor meer gedetailleerde info over de tunnelcategorieën en beperkingen die hiervoor gelden, verwijzen we naar de folder 'Vervoer gevaarlijke stoffen en tunnels' van Rijkswaterstaat¹³.

In geval een tankwagen met brandbare vloeistof in brand vliegt, zal deze sneller en heviger branden dan de standaard niet-ADR vrachtwagen. De tunnelcategorieën A tot en met C laten bulktransporten toe met een lading die grote branden kunnen veroorzaken en is een brand van 200 MW een reële mogelijkheid. Vanaf categorie D of lager (categorie E) worden deze niet meer toegelaten. Voor categorie D en E kan de totale brandlast wel groot zijn, maar wordt de vrijgave van deze energie meer verspreid over de tijd ten opzichte van een plasbrand. In een tunnel met categorie D of E wordt de kans op een 200 MW brand beduidend kleiner tot quasi onbestaande. Hierbij mag de ontwerp brandlast niet zomaar standaard verlaagd worden, maar moet via een risicoanalyse rekening gehouden worden met andere factoren zoals I/C verhouding, incidentkansen, percentage vrachtvervoer en filekansen. Voor tunnels met vrachtwagens wordt in ieder geval minstens een ontwerp-brandlast van minstens 150 MW aangehouden. Voor tunnels met een vrachtwagenverbod is dit 30 MW.

FE. C301-015. De maximale brandlast die moet toegepast worden bij een ventilatie-ontwerp is:

- voor tunnels met ADR tunnelcategorie A, B of C: 200 MW;
- voor tunnels met ADR tunnelcategorie D of E: de brandlast mag verlaagd worden tot 150 MW na het uitvoeren van een risicoanalyse en met goedkeuring van de stakeholders;
- voor tunnels met vrachtwagenverbod: 30 MW.

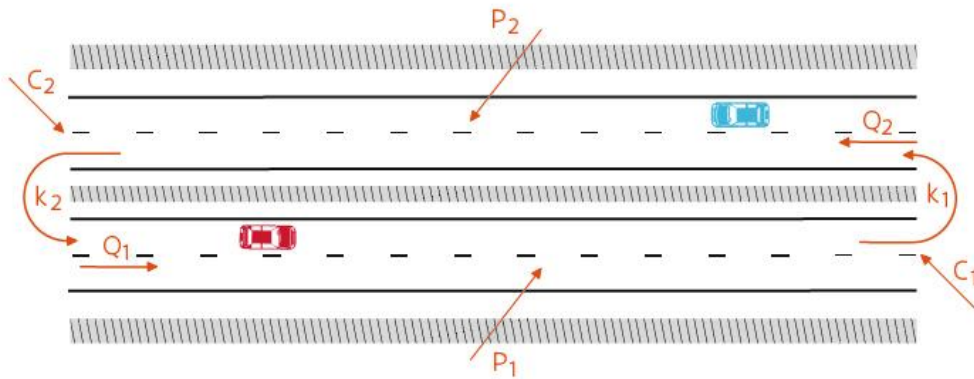
2.2.3 AANDACHTSPUNT AERODYNAMISCHE KORTSLUITING

Een onderwerp dat bijzondere aandacht verdient indien langsventilatie geïnstalleerd wordt, is het risico op aerodynamische kortsluiting, en dit zowel in normaal bedrijf als tijdens brand. Dit effect treedt op als de lucht die het uitgangsportaal van de ene voertuigkoker uitstroomt, bij het ingangsportaal van een daarnaast gelegen voertuigkoker weer naar binnen stroomt. Dit kan nadelige gevolgen hebben wanneer die lucht vervuild is door voertuigemissies of door rook als gevolg van brand. Dit fenomeen doet zich voor wanneer de in- en uitgangsportalen van een tunnel dicht bij elkaar liggen of als ze zich samen in een door zijwanden omsloten ruimte bevinden en de richting van de luchtstroming in de voertuigkoker tegengesteld is. Dit laatste is sowieso het geval indien langsventilatie actief is in normaal bedrijf.

2.2.3.1 NORMAAL BEDRIJF

In de normale bedrijfssituatie kan aerodynamische kortsluiting bij tunnels leiden tot onacceptabel hoge emissieconcentraties, vooral wanneer het fenomeen zich aan beide zijden van de tunnel tegelijkertijd voordoet: de lucht zal rond blijven gaan door de voertuigkokers en steeds meer vervuiling opnemen, zoals geïllustreerd in Figuur 2-3.

¹³ https://www.infomil.nl/publish/pages/113991/folder_vervoer_gevaarlijke_stoffen_en_tunnels.pdf



Figuur 2-3: Schematische weergave van kortsluiting aan de voertuigkoker.

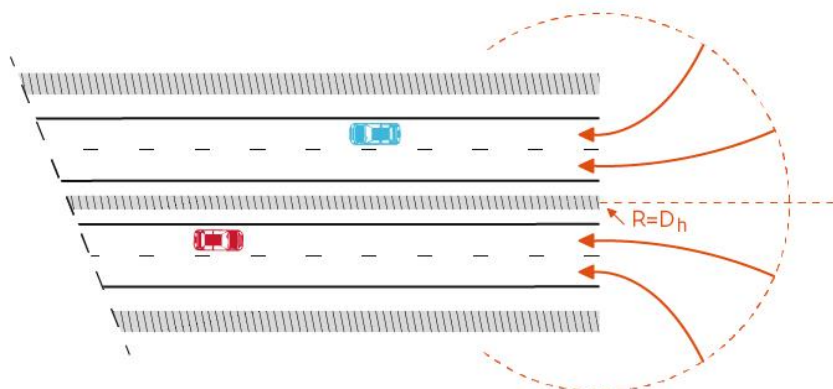
C = achtergrondconcentratie

P = bijdrage concentratie door voertuigen in tunnel

k = concentratieverhoging door kortsluiting luchtstroming tussen tunnels

Q = luchtstroming in voertuigkoker

De grootte van het aanzuiggebied bij een aanzuigopening wordt ruwweg beschreven door een bol waarvan de straal gelijk is aan de hydraulische diameter¹⁴ D_h van de aanzuigopening (zie Figuur 2-4), gerekend vanaf het midden van de aanzuigopening. Op een afstand $R > D_h$ is de luchtsnelheid als gevolg van de aanzuiging te verwaarlozen.

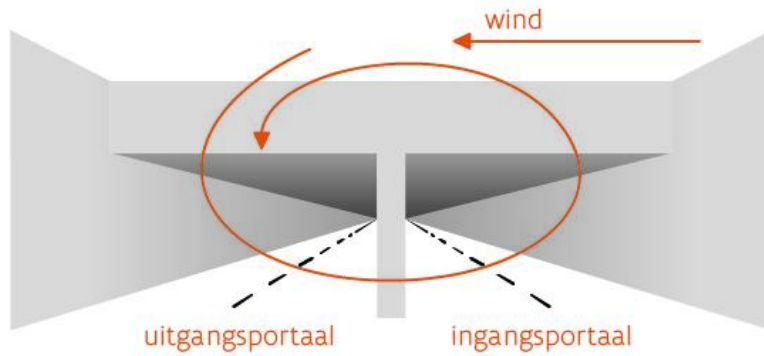


Figuur 2-4: Wijze van instroming bij een aanzuigopening

Om aerodynamische kortsluiting bij een ingangsportaal te voorkomen, moet er dus voor worden gezorgd dat de lucht die het uitgangsportaal verlaat niet binnen het aanzuiggebied terecht kan komen. Afhankelijk van de windrichting en vormgeving van het portaal kan wind ervoor zorgen dat uitstromende lucht het ingangsportaal bereikt. Vooral wanneer er rondom het portaal hoge vlakken (wanden, geluidschermen of gebouwen) aanwezig zijn, treedt turbulentie op. Door deze turbulentie wordt de vervuilde lucht of rook zo verspreid of getransporteerd dat deze bij het ingangsportaal kan worden aangezogen.

In Figuur 2-5 wordt de invloed geschetst die wind heeft op de verspreiding van de tunnellucht bij een tunnelportaal. Is de windrichting dwars op de verkeersrichting, dan ontstaat in de bak van de toerit een werveling. De met emissies of rook vervuilde lucht verspreidt zich daarbij over de hele bak. Vooral wanneer de wind ook nog iets meer van voren komt en naar de portalen is gericht, transporteert de wervel de uitstromende lucht naar het ingangsportaal.

¹⁴ De hydraulische diameter wordt gedefinieerd als: $D_h = 4 \times \text{Oppervlakte van Doorsnede/Omtrek}$. Bij ronde kanalen is de hydraulische diameter gelijk aan de werkelijk gemeten diameter.



Figuur 2-5: Wervel in tunnelbak door wind

In Tabel 2-6 wordt voor de drie belangrijkste typen van in- en uitgangsportalen aangegeven hoe groot de windinvloed kan zijn indien geen compenserende maatregelen worden genomen.

Tabel 2-6: Belangrijkste typen in- en uitgang en bijbehorende mate van recirculatie

Type in- of uitgangsportaal	Mate van zijwaartse afscherming	Mate van circulatie (%)
bovengronds met dwarswand boven portaal	geen zijwanden	afhankelijk van wind: 10 – 50 %
matig verzonken t.o.v. maaiveld	zijwanden tot maximaal 10 m boven rijbaan	afhankelijk van wind: 20 – 40 %
diep verzonken t.o.v. maaiveld	zeer hoge zijwanden	afhankelijk van wind: 20 – 50 %

Er zijn verschillende manieren om de mate van een aerodynamische kortsluiting te verminderen, waarbij een onderscheid wordt gemaakt tussen tunnels op maaiveld en verzonken tunnels.

Voor tunnels op maaiveld treedt bijna geen kortsluiting meer op wanneer:

- hetingangsportaal en uitgangsportaal in de breedte hart op hart meer dan 1,4 maal de kokerbreedte uit elkaar liggen;
- OF
- het uitgangsportaal in de lengte 1 à 2 hydraulische diameters uitsteekt ten opzichte van hetingangsportaal. Hierbij dient de minimale uitritverlenging minstens 20 m en bij voorkeur 40 m te zijn. Het laten uitsteken van hetingangsportaal is veel minder effectief;
- OF
- een scheidingswand wordt voorzien die minstens even hoog is als de voertuigkoker en die een lengte heeft van 1 à 2 maal de hydraulische diameter van de voertuigkoker.

Bij tunnels waarvan de toerit en het portaal verzonken liggen ten opzichte van het maaiveld of de toerit geheel is omsloten door hoge geluidschermen kan aerodynamische kortsluiting vermeden worden als:

- het uitgangsportaal circa 40 meter uitsteekt t.o.v. hetingangsportaal;
- OF
- er een scheidingswand staat tussen het in- en uitgangsportaal die minstens net zo hoog is als de zijwanden van de toerit en die een lengte heeft van circa 40 meter.

Tabel 2-7 geeft een overzicht van de effectiviteit van de verschillende voorgestelde maatregelen.

Tabel 2-7: Effectiviteit genomen maatregelen ter beperking van recirculatie

Type in-/uitrit	Mate van zijwaartse afscherming	Mate van circulatie zonder maatregelen (%)	Mate van circulatie met maatregelen (%)
bovengrond met dwarswand boven portaal	geen zijwanden	10 – 50 %	0 – 10 %
matig verzonken t.o.v. maaiveld	zijwanden tot maximaal 10 m boven rijbaan	20 – 40 %	5 – 10 %
diep verzonken t.o.v. maaiveld	zeer hoge zijwanden	20 – 50 %	10 – 20 %

FE. C301-016. Bij tunnels op maaiveld kan problematische aerodynamische kortsluiting vermeden/beperkt worden door toepassen van volgende maatregelen:

- *het ingangsportaal en uitgangsportaal liggen in de breedte hart op hart meer dan 1,4 maal de kokerbreedte uit elkaar;*

OF

- *het uitgangsportaal steekt in de lengte 1 à 2 hydraulische diameters uit ten opzichte van het ingangsportaal. Hierbij dient de minimale uitritverlenging minstens 20 m en bij voorkeur 40 m te zijn. Het laten uitsteken van het ingangsportaal is veel minder effectief;*

OF

- *een scheidingswand wordt voorzien die minstens even hoog is als de voertuigkoker en die een lengte heeft van 1 à 2 maal de hydraulische diameter van de voertuigkoker.*

FE. C301-017. Bij tunnels waarvan de toerit en het portaal verzonken liggen ten opzichte van het maaiveld of de toerit geheel is omsloten door hoge geluidschermen kan problematische aerodynamische kortsluiting vermeden worden door volgende maatregelen:

- *het uitgangsportaal steekt circa 40 meter uit t.o.v. het ingangsportaal;*

OF

- *er staat een scheidingswand tussen het in- en uitgangsportaal die minstens net zo hoog is als de zijwanden van de toerit en die een lengte heeft van circa 40 meter.*

FE. C301-016 en FE. C301-017 zijn maatregelen die enkel moeten toegepast worden als uit de ontwerpberekening voor normaal bedrijf blijkt dat aerodynamische kortsluiting zodanig voor problemen zorgt dat aan de eisen voor de maximale vervuilingconcentraties niet voldaan kan worden.

2.2.3.2 BRAND

Maatregelen die worden genomen om in de normale bedrijfssituatie aerodynamische kortsluiting te voorkomen, zullen ook bij brand effect hebben. Echter, om er zeker van te zijn dat er geen rook in de naastgelegen voertuigkoker zal stromen, is het noodzakelijk om de luchtstroming dezelfde richting te geven als in de incidentkoker. Dit kan alleen worden bereikt met een vorm van (beperkte) langsventilatie. Hiertoe is het vereist om een snelheid van 0,2 m/s te realiseren met een faalkans van 0,05 %.

FE. C301-018. Als in een ondersteunende koker geventileerd moet worden om deze koker rookvrij te houden, dient tunnelventilatie in de betreffende richting een zodanige betrouwbaarheid te hebben dat de kans op falen bij een langssnelheid van minimaal 0,2 m/s kleiner is dan 0,05 %.

2.2.4 AANDACHTSPUNTEN PLAATSING VENTILATOREN

2.2.4.1 PLAATSING IN LENGTERICHTING

Branden van circa 30 MW en meer veroorzaken dusdanige temperaturen dat ventilatoren in de directe omgeving van de brand snel zullen uitvallen. Stroomafwaarts neemt bovendien de prestatie van de ventilatoren af omdat de dichtheid van de lucht te laag is en de stroomsnelheid in de tunnel hoog. Stroomopwaarts van een brand heeft de stroming de buitenluchttemperatuur en is de dichtheid normaal, evenals de stroomsnelheid in de tunnel. Dat betekent dat ventilatoren in het ingangsportaal een hogere prestatie leveren dan ventilatoren die in de tunnel zijn opgehangen. Voor tunnels met een tunnallengte korter dan 2 km worden de ventilatoren daarom bij voorkeur zo dicht mogelijk bij het ingangsportaal en voorin de tunnel opgehangen. Aanjaagventilatoren in het ingangsportaal zullen vrijwel nooit door een hoge temperatuur worden belast, waardoor de kans op uitval door brand klein is.

Alle injectieventilatoren dienen met de aanzuigzijde geïnstalleerd te worden net buiten de tunnel (of met voldoende vrije ruimte vanaf de ventilator tot aan het plafond) om een vrije aanzuig te waarborgen. Bij tunnels met een tunnallengte langer dan 2 km is het over het algemeen niet meer mogelijk alle ventilatiecapaciteit vooraan in de tunnel te plaatsen. Er moeten in die gevallen bijkomende ventilatoren worden geïnstalleerd evenredig verspreid over de lengte van de tunnel (eventueel in clusters). Bij een grote onderlinge afstand in de lengterichting is de kans dat grote aantallen ventilatoren uitvallen door brand klein. Hierbij kan het raadzaam zijn in de tunnel ventilatoren te plaatsen met een hoger brandklasse¹⁵ (F400 i.p.v. F300).

FE. C301-019. Ventilatoren dienen uitgevoerd te worden als klasse F300/2h conform NBN-EN 12101. Ventilatoren die in de tunnel zelf worden geplaatst dienen bij voorkeur als klasse F400/2h worden uitgevoerd conform NBN-EN 12101. De keuze tussen F300 en F400 kan genomen worden op basis van het aantal benodigde ventilatoren voor beide opties om de toegelaten faalkansen niet te overschrijden.

De optimale ventilatie-opstelling moet per project worden onderzocht door middel van probabilistische berekeningen, waarbij de plaats en grootte van de brand en de windinvloed moeten worden gevarieerd. Hierbij mogen verschillende diameters toegepast worden in functie van de plaats van de ventilatoren, maar in het kader van onderhoud wordt aangeraden het aantal verschillende diameters tot 2 te beperken.

FE. C301-020. In een tunnel mogen maximaal twee verschillende diameters voor de ventilatoren toegepast worden.

Obstakels kunnen de prestaties van de tunnelventilatie beïnvloeden en de levensduur van de installaties neemt af als deze zich in de uitblaasstraal van een ventilator bevinden. Aanjaagventilatoren moeten zo worden geplaatst dat de impuls van de uitblaasstraal zoveel mogelijk wordt overgedragen op de tunnellucht en niet wordt verstoord door de constructie zelf, installaties in de tunnel of door stilstaand of langzaam rijdend verkeer. Dit kan worden bereikt door een ventilator op voldoende afstand van het tunnelplafond of de tunnelwand aan te brengen en afbuigschoppen toe te passen of de ventilator enigszins gekanteld te monteren.

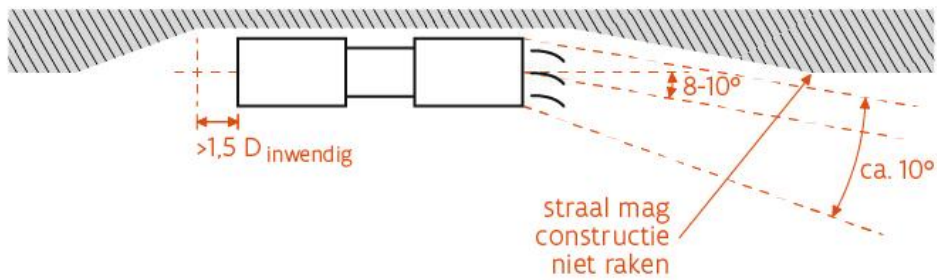
Aanjaagventilatoren worden bij voorkeur aan het plafond opgehangen. Vanwege de tunnelhoogte kan het noodzakelijk zijn de ventilatoren aan de wand te hangen of in een nis te plaatsen. De hoogte van de nis wordt bepaald door:

- de diameter D van de ventilator;
- de benodigde afstand tussen de hartlijn van de ventilator en de bovenkant van de plafonds-nis.

De lengte van de nis, die mede afhankelijk is van de lengte van de ventilatoren en de hoek van uitblazen, heeft een invloed op het rendement. Er moet worden vermeden dat het gedeelte van de uitblaasstraal waarin hoge

¹⁵ De brandklasse is een maat voor de temperatuur waarbij de ventilator uitvalt.

snelheden voorkomen, de begrenzingen van de nis raakt. De aanzuigopening van de ventilator moet zich voldoende ver van de begrenzingen van de nis bevinden zodat de lucht vrijelijk kan toestromen. Ter illustratie zijn de benodigde afmetingen in Figuur 2-6 weergegeven.



Figuur 2-6: Plaatsing ventilator in nis

De onderlinge afstand in lengterichting tussen (clusters van) ventilatoren moet zo zijn dat opeenvolgende ventilatoren elkaar niet negatief beïnvloeden (zie Figuur 2-7). De uitblaasstraal moet (nagenoeg) zijn uitgemiddeld in de tunnelstroming en mag niet kunnen worden aangezogen door de volgende ventilator. Voor de longitudinale afstand tussen de ventilatoren dient daarom minimaal tienmaal de hydraulische diameter van de voertuigkoker te worden aangehouden.

FE. C301-021. De longitudinale afstand tussen de ventilatoren dient minimaal tienmaal de hydraulische diameter van de voertuigkoker te zijn.



Figuur 2-7: Uitmiddeling uitblaasstraal opeenvolgende ventilatoren

Naast de richtlijnen qua plaatsing van de ventilatoren in langsricting op basis van aerodynamische afwegingen, dient ook aandacht besteed te worden aan het beperken van de elektrische verliezen. Hierbij verdient het de aanbeveling de ventilatoren zo dicht mogelijk bij het dienstgebouw te plaatsen van waaruit zij hun voeding krijgen om de kabelsecties te kunnen beperken. Dit uiteraard indien er niet te grote negatieve effecten zijn op de aerodynamische efficiëntie en het geoptimaliseerd ventilatieontwerp voor beheersing van brand.

FE. C301-022. De ventilatoren worden zo dicht mogelijk bij het dienstgebouw geplaatst waaruit zij hun voeding betrekken, waarbij dit niet ten koste mag gaan van de aerodynamische efficiëntie.

2.2.4.2 INTERACTIE MET DE VLUCHTWEG

Bij het openen van de vluchtdeuren mag er geen rook binnendringen van de incidentkoker naar de veilige vluchtweg toe. De veilige vluchtweg moet in overdruk gehouden worden ten opzichte van de incidentkoker, ook als 30 % van de vluchtdeuren tegelijk geopend wordt. De door te rekenen scenario's voor overdrukinstallaties zijn terug te vinden in het Addendum 'Verificatie en validatie overdrukssystemen MTK wegtunnels, Beschrijving methodiek' gepubliceerd door RWS op 1 oktober 2017.

Bovendien moet de vluchtoker en de voertuigoker zodanig op elkaar afgestemd zijn dat vluchtende tunnelgebruikers bij de kopdeuren niet alsnog aan rook blootgesteld worden en mag het tegelijk openen van twee tegenover elkaar gelegen deuren in de vluchtoker door de brandweer niet leiden tot rookdoorslag naar de ondersteunende koker.

FE. C301-023. De Overdrukinstallatie vluchtwegen en Tunnelventilatie mogen elkaar niet nadelig beïnvloeden.

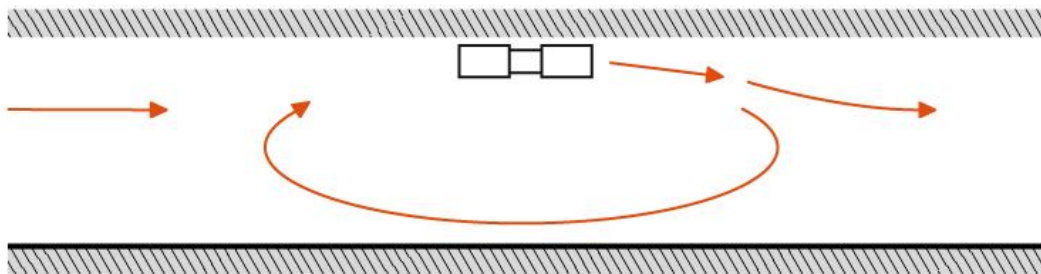
FE. C301-024. Rookdoorslag via dwarsverbindingen bij geopende vluchtdeuren en/of rookoverslag via de tunnelportalen van de incidentkoker naar de ondersteunende koker dient te worden voorkomen.

Een ventilator direct stroomopwaarts van een vluchtdeur resulteert in een lokale drukverhoging bij de vluchtdeur. Daarom is het wenselijk de ventilatoren stroomafwaarts van de vluchtdeuren te positioneren. Om de impact op de overdrukinstallatie in de vluchtwegen zo beperkt mogelijk te houden, worden de ventilatoren in de voertuigoker bij voorkeur minimum 20 m stroomafwaarts van een vluchtdeur gepositioneerd.

FE. C301-025. Ventilatoren in de voertuigoker worden bij voorkeur minimum 20 m stroomafwaarts van een vluchtdeur gepositioneerd.

2.2.4.3 PLAATSING IN CLUSTERS

Uit proeven en praktijkervaringen blijkt dat het clusteren (het naast elkaar plaatsen) van enkele ventilatoren de effectiviteit van het ventilatiesysteem verbetert. Het is daarbij echter wel belangrijk te zorgen dat het totale volume dat door de ventilatoren stroomt niet groter is dan het totale volume dat door de voertuigoker stroomt. Is het ventilatorvolume wel groter, dan zal onder de cluster van ventilatoren terugstroming optreden. De prestatie van de ventilatoren gaat daardoor achteruit en bij brand kan de rook zelfs de verkeerde kant op worden gedreven.



Figuur 2-8: Terugstroming ter hoogte van een te grote cluster

FE. C301-026. In de stationaire situatie moet worden voorkomen dat de totale luchtstroom door de ventilatoren in één cluster groter is dan de luchtstroom in de voertuigoker, om terugstroming van rook onder de ventilatoren te voorkomen.

Een cluster dient zodanig ontworpen te worden dat onderhoud nog steeds mogelijk is.

FE. C301-027. De laterale afstand tussen ventilatoren is groter of gelijk aan een half maal de buitendiameter van een aanjaagventilator en minimaal 0,5 m. Deze ruimte is onder andere benodigd voor onderhoud aan ventilatoren.

In het ontwerp worden meer ventilatoren ter beschikking gesteld dan nodig is om de Functioneel Benodigde Capaciteit te kunnen halen, zodat bij uitval (vb. defect) van één ventilator nog steeds de nodige

luchtverplaatsing gerealiseerd wordt en dit zowel in normaal bedrijf als bij brand. Hierbij moet gerekend worden met uitval van de ventilator die de grootste bijdrage heeft in het behalen van de kritische snelheid. Het kan dus zijn dat er meer dan een extra ventilator moet voorzien worden om deze uitval op te vangen.

FE. C301-028. In het ventilatieontwerp dient voldoende redundantie voorzien te worden om uitval van een ventilator op te vangen. Hierbij dient in de berekening de meest efficiënte ventilator weggelaten te worden.

2.3 RAAKVLAKEISEN

In dit hoofdstuk worden raakvlakken besproken met andere onderdelen van het tunnelsysteem.

2.3.1 ENERGIEVOORZIENINGEN

Met een langsv ventilatiesysteem is het cruciaal dat de voertuigkoker stroomopwaarts van de brand rookvrij wordt gehouden voordat de stratificatie van de rook verloren gaat. De tijd tussen het inschakelen van de eerste en de laatste ventilator mag daarom niet te lang zijn. De energievoorziening moet de inschakelstromen kunnen faciliteren.

FE. C301-029. Binnen 60 seconden na het opstartsignaal moeten alle ventilatoren in de incidentkoker op de maximumcapaciteit (hoogtoeren) ingeschakeld kunnen zijn in netbedrijf.

Ook de ondersteunende koker moet tijdig rookvrij gehouden worden. Dit gebeurt echter pas nadat alle ventilatoren van de incidentkoker zijn opgestart.

FE. C301-030. Binnen 30 seconden na het inschakelen van alle ventilatoren in de incidentkoker dienen de ventilatoren die benodigd zijn om recirculatie in de ondersteunende koker te voorkomen te zijn ingeschakeld in netbedrijf.

In de praktijk worden beide eisen meestal gehaald indien de energievoorziening wordt ontworpen zodat de tijd tussen het inschakelen van twee ventilatoren slechts 5 seconden bedraagt. Bij kleine vermogens is het mogelijk een ontwerp te maken zonder softstarters; bij grotere ventilatoren is dit niet mogelijk.

FE. C301-031. Een ventilator met een vermogen kleiner dan 20 kW mag geen gebruik maken van softstarters. Ventilatoren van dit type moeten voorzien zijn van motoren die geschikt zijn voor directe aanloop.

Bovendien dient verzekerd te zijn dat het geheel van de uitrustingen, die ervoor zorgt dat de ventilatoren draaiende blijven, voldoende zijn uitgerust om omgevingsinvloeden te weerstaan en dit zowel in normaal bedrijf als bij brand.

FE. C301-032. De energievoorziening van de tunnelventilatie dient correct functioneren mogelijk te maken binnen het gehele voorgeschreven bereik van de omgevingstemperatuur.

FE. C301-033. De combinatie van materialen en de installatiewijze van voedingskabels, werkschakelaars en aansluitdozen ten behoeve van de ventilatoren in de voertuigkoker moet zodanig uitgevoerd worden dat deze het voorziene functiebehoud van de ventilatoren bij brand niet verhinderen.

2.3.2 C302 LUCHTKWALITEITSENSORS

De langsventilatie in normaal bedrijf heeft als doel om de emissieconcentraties te beperken. Het schakelen van de ventilatie gebeurt automatisch aan de hand van luchtkwaliteitsmetingen en schakel- en grenswaarden. Bij goede luchtkwaliteit in een voertuigkoker is de langsventilatie uitgeschakeld. Wanneer de luchtkwaliteit in de voertuigkoker verslechtert, wordt de langsventilatie stapsgewijs ingeschakeld om de luchtkwaliteit te verbeteren. Wanneer grenswaarden worden overschreden, worden er extra ventilatoren ingeschakeld totdat het zicht weer onder de grenswaarde is gekomen en de ventilatoren weer stapsgewijs worden afgeschakeld.

De luchtkwaliteit wordt in normaal bedrijf gemeten via de zichtwaarde (een afgeleide van een of meerdere extinctiecoëfficiënten) en de NO₂-concentratie. De (default) zichtwaarden en de bijbehorende status zijn weergegeven in Tabel 2-8.

Tabel 2-8: Status als functie van de zichtwaarde en NO₂-concentratie

K = gemiddelde waarde over X (waarbij $X \geq 2^{16}$) naastgelegen sensoren en over Y seconden (Y tussen 10 en 60 seconden)

k = gemiddelde waarde van een enkele sensor over 10 seconden

[NO₂] = gemiddelde concentratie NO₂ over X (waarbij $X \geq 2$) naastgelegen sensoren en over Y seconden (Y tussen 10 en 60 seconden) genomen

Status	Zichtwaarde	Gemiddelde NO ₂ -concentratie over X naastgelegen sensoren
Geen zichtbeperking	$K < 0,005 \text{ m}^{-1}$	$[\text{NO}_2] < 0,7 \text{ ppm}$
Lichte zichtbeperking	$0,005 \text{ m}^{-1} \leq K < 0,007 \text{ m}^{-1}$	$0,7 \text{ ppm} < [\text{NO}_2] < 1 \text{ ppm}$
Matige zichtbeperking	$0,007 \text{ m}^{-1} \leq K < 0,009 \text{ m}^{-1}$	$1 \text{ ppm} \leq [\text{NO}_2] < 1,25 \text{ ppm}$
Waarneembare zichtbeperking	$0,009 \text{ m}^{-1} \leq K < 0,012 \text{ m}^{-1}$	$[\text{NO}_2] \geq 1,25 \text{ ppm}$
Ernstige zichtbeperking	$k \geq 0,012 \text{ m}^{-1}$	-

FE. C301-34. De luchtkwaliteit wordt in normaal bedrijf gemeten via de extinctiecoëfficiënt en de NO₂-concentratie. Er zijn vijf beperkingen gedefinieerd:

- *Geen zichtbeperking: $K < 0,005 \text{ m}^{-1}$ OF $[\text{NO}_2] < 0,7 \text{ ppm}$*
- *Lichte zichtbeperking: $0,005 \text{ m}^{-1} \leq K < 0,007 \text{ m}^{-1}$ OF $0,7 \text{ ppm} < [\text{NO}_2] < 1 \text{ ppm}$*
- *Matige zichtbeperking: $0,007 \text{ m}^{-1} \leq K < 0,009 \text{ m}^{-1}$ OF $1 \text{ ppm} \leq [\text{NO}_2] < 1,25 \text{ ppm}$*
- *Waarneembare zichtbeperking: $0,009 \text{ m}^{-1} \leq K < 0,012 \text{ m}^{-1}$ OF $[\text{NO}_2] \geq 1,25 \text{ ppm}$*
- *Ernstige zichtbeperking: $k \geq 0,012 \text{ m}^{-1}$*

waarbij:

K = gemiddelde waarde over X (waarbij $X \geq 2$) naastgelegen sensoren en over Y seconden (Y tussen 10 en 60 seconden)

k = gemiddelde waarde van een enkele sensor over 10 seconden

[NO₂] = gemiddelde concentratie NO₂ over X (waarbij $X \geq 2$) naastgelegen sensoren en over Y seconden (Y tussen 10 en 60 seconden) genomen.

Voor de overschrijding van lichte tot waarneembare zichtbeperking dient het gemiddelde genomen te worden van de laatste 'Y' seconden op basis van een bemonstering per seconde waarbij de defaultwaarde voor de tijdsduur Y 30 seconden dient te zijn en instelbaar moet zijn tussen de 10 en 60 seconden.

Als het gemiddelde van de extinctiecoëfficiënt over een tijdsduur van 10 seconden de grenswaarde voor 'Ernstige zichtbeperking' overschrijdt, wordt dit als een brandmelding gezien.

¹⁶ Om ervoor te zorgen dat de ventilatoren niet nutteloos beginnen en blijven draaien in normaal bedrijf bij een aanhoudende sensorfout van een enkele sensor, wordt voor alle niet-brand gerelateerde overschrijdingen van de zichtbeperking aangeraden de zichtbeperking over verschillende sensoren uit te middelen.

2.3.3 C800 BEWAKING, BEDIENING EN BESTURING

De besturing van ventilatoren kan zowel automatisch als manueel gebeuren. Om ongewenste interacties van automatische en manuele sturing te voorkomen, worden de volgende principes aangehouden:

FE. C301-035. Elke ventilator dient zowel individueel als collectief bestuurd te kunnen worden.

FE. C301-036. Bij collectieve besturing moet de ventilator bestuurd worden door de interne besturing van de tunnelventilatie.

FE. C301-037. Bij individuele besturing mag de ventilator niet bestuurd worden door de interne besturing van de tunnelventilatie. Bij individuele besturing kan de ventilator bestuurd worden door de ventilator individuele commando's te geven.

FE. C301-038. Als een ventilator uitvalt of manueel wordt uitgeschakeld, dient de eventueel nog beschikbare ventilatiecapaciteit via de collectieve besturing zodanig te worden ingeschakeld (of bijgeschakeld) dat het ingestelde ventilatieniveau in de ingestelde richting zoveel mogelijk gehandhaafd blijft.

FE. C301-039. Bij uitval van de besturing dient de tunnelventilatie in de ingestelde stand en richting te blijven ventileren.

2.3.3.1 NORMAAL BEDRIJF

In verband met de optimalisatie van de levensduur van de ventilatoren dient in normaal bedrijf de draaitijd zoveel mogelijk gelijk verdeeld te worden over alle ventilatoren.

FE. C301-040. De tunnelbesturing dient te borgen dat de draaiuren van de tunnelventilatie in normaal bedrijf gelijkmatig worden verdeeld over de ventilatoren.

Om te vermijden dat de levensduur van de ventilatoren negatief wordt beïnvloed door frequent kort inschakelen, wordt ervoor gezorgd dat er een minimale looptijd is na inschakelen.

FE. C301-041. De Tunnelbesturing dient te borgen dat een ingeschakelde ventilator minimaal gedurende een parametreerbare duur (default: 4 minuten) draait voordat deze weer wordt uitgeschakeld.

Om enerzijds het niet overreageren bij een lichte overschrijding van de waarden van zicht of NO₂ en anderzijds ook niet te veel tussenstappen te hebben bij het inschakelen van ventilatoren indien de vervuiling inderdaad snel oploopt, is het raadzaam een algoritme uit te werken in een beperkt aantal stappen een vast aantal ventilatoren mee inschakelt indien de gemeten waarden van de sensoren beduidend oplopen.

Hieronder wordt een voorbeeld gegeven van een mogelijke aanpak voor een tunnelkoker met 16 ventilatoren. Deze aanpak dient zeker niet letterlijk voor alle tunnels gebruikt te worden, ongeacht het aantal ventilatoren, maar kan als algemeen voorbeeld dienen.

Voorbeeld van mogelijke aansturing sanitaire ventilatie in 8 stappen.

Er wordt gekozen om 16 ventilatoren in paren van 2 op te starten indien de vervuiling te hoog oploopt. Dit zijn geen vaste paren, maar telkens ad hoc een combinatie van de 2 ventilatoren die op dat moment het minste draaiuren hebben in de afgelopen maand.

- indien het zicht 'Matige zichtbeperking' is, worden 2 ventilatoren in de tunnel gestaffeld (een voor een: elke 5 seconden een ventilator) in de rijrichting ingeschakeld. Nadat 2 ventilatoren zijn gestart en het zicht nog steeds 'Matige zichtbeperking' is en een instelbare (te bepalen) tijd X verstreken is, worden de volgende 2 ventilatoren in de rijrichting gestart. Dit wordt gedaan tot maximaal alle omkeerbare ventilatoren in de rijrichting ingeschakeld zijn;
- indien het zicht 'Waarneembare zichtbeperking' is, wordt de procedure van 'Matige zichtbeperking' gevolgd, maar zal de extra wachttijd X tussen de eerste en tweede stap overgeslagen worden;
- zodra de zichtmeting 'Geen zichtbeperking' is, worden alle ventilatoren stapsgewijs (instelbare wachttijd Y van 0 – 240 s tussen de verschillende uit te schakelen ventilatoren) weer uitgeschakeld.

De volgorde waarin ventilatoren worden ingeschakeld is functie van het aantal draaiuren van de ventilatoren over de laatste maanden.. Een stilstaande ventilator met het minste aantal draaiuren wordt telkens als eerste ingeschakeld. Indien injectieventilatoren aan het ingangsportaal zijn opgehangen in een omgeving met bebouwing, worden deze normaal gezien niet in het proces ingeschakeld zoals hierboven vermeld. Dit om geluidsoverlast naar de buitenomgeving te beperken.

De injectieventilatoren worden alleen automatisch ingeschakeld als alle andere ventilatoren in de tunnel zijn ingeschakeld in de rijrichting en het zicht nog steeds 'Matige zichtbeperking' (of slechter) is en een instelbare tijd X verstreken is. Nu worden 2 injectieventilatoren gestaffeld ingeschakeld (op basis van draaiuren). Nadat 2 injectieventilatoren zijn ingeschakeld en het zicht nog steeds 'Matige zichtbeperking' (of slechter) is en een instelbare tijd X verstreken is, zullen de volgende 2 injectieventilatoren gestaffeld ingeschakeld worden (tot maximaal alle injectieventilatoren zijn ingeschakeld).

Zodra de zichtmeting 'Geen zichtbeperking' is, worden alle injectieventilatoren direct tegelijk uitgeschakeld.

2.3.3.2 *STAND-BY*

Tijdens de bedrijfstoestand 'stand-by' worden in de desbetreffende voertuigkoker automatisch Z^{17} ventilatoren in de tunnel (dus niet de injectieventilatoren) gestaffeld ingeschakeld in de rijrichting, startende bij de tunnelventilator het dichtste bij de ingang van de koker (gezien in de gebruikelijke rijrichting) en vanaf daar per tunnelventilator verder stroomafwaarts. Dit is ter voorbereiding op een eventuele calamiteit. De ventilatoren in de ondersteunende koker worden nog niet ingeschakeld. Naast dat Z tunnelventilatoren worden ingeschakeld bij stand-by, blijft de procedure van kracht zoals bij normaal bedrijf op basis van de luchtkwaliteitsmeting, behalve dat de Z ingeschakelde ventilatoren niet worden uitgeschakeld.

2.3.3.3 *CALAMITEIT*

In het geval van een calamiteit worden automatisch in de incidentkoker alle ventilatoren (behalve de redundante ventilatoren) gestaffeld ingeschakeld (elke 5 seconden een ventilator). De ventilatoren in de incidentkoker hebben prioriteit voor wat betreft het inschakelen over de ventilatoren in de ondersteunende koker (zie Ondersteunend). Betreffende de automatische volgorde van inschakelen in de bedrijfstoestand 'Calamiteit' geldt:

- de injectieventilatoren van de incidentkoker worden eerst gestaffeld ingeschakeld (elke 5 seconden een ventilator);
- als tunnelventilatoren in de rijrichting van de incidentkoker waren ingeschakeld vanuit de bedrijfstoestand 'stand-by', blijven deze tunnelventilatoren ingeschakeld;

¹⁷ Z is het aantal ventilatoren dat nodig is om de eisen aan de kritische snelheid te kunnen behalen voor een 50 MW brand. In stand-by is dit aantal een afweging tussen het reeds in beweging krijgen van de luchtkolom in de tunnel om mogelijke escalatie voor te zijn en het beperken van mogelijke geluidsoverlast in en rond de tunnel indien het vals alarm is.

2.3.3.4 EVACUATIE

Zie Calamiteit.

2.3.3.5 ONDERSTEUNEND (ONDERSTEUNENDE KOKER)

Nadat de ventilatoren in de naastliggende koker in bedrijfstoestand 'Calamiteit' zijn ingeschakeld, worden in de koker in de bedrijfstoestand 'Ondersteunend' (de ondersteunende koker) automatisch alle voorziene (omkeerbare) tunnelventilatoren gestaffeld ingeschakeld om de nodige minimale luchtsnelheid te bekomen om rookkortsluiting aan de portalen te vermijden. Elke 5 seconden wordt een ventilator ingeschakeld, 5 seconden na de laatst ingeschakelde ventilator in de koker in toestand calamiteit, blazend tegen de gebruikelijke rijrichting in die koker in.

Hierbij wordt gestart bij de tunnelventilator het dichtste bij de uitgang van de koker (gezien in gebruikelijke rijrichting) en vanaf daar per tunnelventilator richting het begin van de koker. Omkeerbare ventilatoren die in de rijrichting van de ondersteunende koker in zijn ingeschakeld, worden uitgeschakeld vooraleer deze weer in tegenrijrichting (vertraagd) worden ingeschakeld.

2.3.3.6 NOOD

Bij uitval van besturing of transmissie blijft de tunnelventilatie in de ingestelde stand en richting ventileren.

2.3.4 FAT- EN GARANTIEMETINGEN

Voor het openstellen van de tunnel dienen Factory Acceptance Tests (FATs) en garantiemetingen verricht te worden door de leverancier van de ventilatoren. Hiervoor dienen FAT-protocollen en garantiemeting-protocollen opgesteld te worden en de resultaten dienen verwerkt te worden in een FAT-rapportage en garantierapportage. Deze garantiemetingen dienen aan te tonen dat de capaciteit van de ventilatoren toereikend is. De aerodynamische metingen worden uitgevoerd conform 'Aanbevelingen ventilatie van verkeerstunnels' (Steunpunt tunnelveiligheid, 2005) §8.1. Hierbij worden in een lege tunnel minimaal de toestanden uit Tabel 2-9 opgemeten.

Indien in een tunnel splitsingen worden voorzien (op- of afritten, splitsingen of samenvoelingen), worden meestal verschillende schakelregimes aangehouden in functie van de plaats van de brand. Voor elk voorziene schakelregime dient in dit geval Tabel 2-9 toegepast te worden.

De geluidsmetingen worden uitgevoerd conform 'Aanbevelingen ventilatie van verkeerstunnels' (Steunpunt tunnelveiligheid, 2005) §8.2. Hierbij dienen volgende aandachtspunten in acht genomen te worden:

- de geluidsdruk dient te worden gemeten op +2,0 m hoogte boven asfalt in het midden van de tunnelbreedte;
- de meetposities voor de geluidsmetingen zijn: -5 en +5 m ter weerszijden van elke ventilatorcluster, en op elke 50 m tussen de ventilatorclusters voor iedere ventilatie-schakeltoestand;
- de metingen dienen te worden uitgevoerd voor de schakelingen 'calamiteit' en de schakeling 'ondersteunend'.

Tabel 2-9: Minimale luchtsnelheden garantiemetingen

Koker	Bedrijfstoestand	Schakeling	Gemiddelde Luchtsnelheid
rijrichting 1	Calamiteit	alle ventilatoren aan (behalve deze om redundantie te voorzien)	te bepalen via 1D-simulatie
rijrichting 1	Calamiteit, redundantie	alle ventilatoren aan, inclusief ventilator(en) voor redundantie, maar exclusief de meest kritische ventilator	te bepalen via 1D-simulatie
rijrichting 1	Stand-by	Z ventilatoren aan, zie §5.4.2 Stand-by	te bepalen via 1D-simulatie
rijrichting 1	Ondersteunend	voorzien aantal ventilatoren aan om luchtsnelheid te behalen om rookkortsluiting te vermijden, zie §2.2.3.1	te bepalen via 1D-simulatie
rijrichting 2	Calamiteit	alle ventilatoren aan (behalve deze om redundantie te voorzien)	te bepalen via 1D-simulatie
rijrichting 2	Calamiteit, redundantie	alle ventilatoren aan, inclusief ventilator(en) voor redundantie, maar exclusief de meest kritische ventilator	te bepalen via 1D-simulatie
rijrichting 2	Stand-by	Z ventilatoren aan, zie §5.4.2 Stand-by	te bepalen via 1D-simulatie
rijrichting 2	Ondersteunend	voorzien aantal ventilatoren aan om luchtsnelheid te behalen om rookkortsluiting te vermijden, zie §2.2.3.1	te bepalen via 1D-simulatie

2.4 OVERZICHTSTABEL FUNCTIONELE EISEN

Deze paragraaf geeft een overzichtstabel van de functionele eisen die gesteld worden aan een ventilatiesysteem. Deze lijst met functionele eisen moet gezien worden als een opsomming van nodige, maar niet noodzakelijk voldoende voorwaarden. Deze is dus niet limitatief en kan projectspecifiek aangevuld worden.

2.4.1 ALGEMENE ONTWERPEISEN

FUNCTIONELE EIS
FE. C301-001. Ontwerp, bouw en werking van het ventilatiesysteem zijn berekend op: <ol style="list-style-type: none"> 1. De beheersing van de emissie van vervuilingconcentraties bij normaal verkeer en tijdens de verkeerspieken. 2. De beheersing van de emissie van verontreinigende stoffen als het verkeer stilstaat wegens een incident of een ongeval 3. De beheersing van hitte en rook bij brand.
FE. C301-002. In normaal bedrijf wordt de concentratie CO onder 70 ppm gehouden bij vlot rijdend verkeer
FE. C301-003. Bij langzaam rijdend verkeer aan 30 km/u wordt de concentratie CO onder 70 ppm gehouden
FE. C301-004. In normaal bedrijf wordt de concentratie NO ₂ onder 1 ppm gehouden
FE. C301-005. In normaal bedrijf moet het mogelijk zijn de extinctiecoëfficiënt k voor zicht onder 0,007 m ⁻¹ te houden.
FE. C301-006. Tijdens onderhoud en interventie wordt voor de NO ₂ -concentratie 0,5 ppm als grenswaarde voor lange blootstellingsduur en 1 ppm voor korte tijd (15 minuten) aangehouden
FE. C301-007. Tijdens onderhoud en interventie wordt voor CO 20 ppm als grenswaarde voor lange blootstellingsduur en 100 ppm voor korte tijd aangehouden (15 minuten)

2.4.2 GELUID

FUNCTIONELE EIS

FE. C301-008. Het gemiddelde geluidsdruk niveau van de ventilatie bij inschakeling mag niet meer bedragen dan 87dB (A). Op geen enkele plaats in de voertuigkoker, gemeten op een hoogte van 1,60 meter boven het wegdek, is een geluidsdruk niveau van meer dan 90 db(A) toegestaan bij een snelheid van 70 km/u.

FE. C301-009. De geluidsdruk van de omroep dient uit te komen tussen de 10 en 13 dB(A) hoger dan het specifieke omgevingslawaai in de voertuigkoker bij ventilatie en verkeer met een snelheid van 70 km/h.

FE. C301-010. Voor luidsprekerinstallaties wordt gestreefd naar een geluidsdruk niveau van 100 dB(A) en is een maximum van 105 dB(A) toelaatbaar vanwege de korte duur van de boodschap.

FE. C301-011. Een geluidsniveau van 55 dB(A) of lager is haalbaar door het afschakelen van ventilatoren in de ondersteunende voertuigkoker, gemeten buiten de directe nabijheid van de ventilator en onder normale (weers)omstandigheden.

FE. C301-012. Voor onderhoudspersoneel en hulpdiensten wordt de Codex over het welzijn op het werk Boek V.- Omgevingsfactoren en fysieke agentia Titel 2.- Lawaai aangehouden.

2.4.3 ONTWERPEISEN SPECIFIEK VOOR LANGSVENTILATIE

FUNCTIONELE EIS

FE. C301-013. De NFPA 502 Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways versie 2023 wordt gebruikt om de kritische snelheid te bepalen in functie van de brandlast.

FE. C301-014. De betrouwbaarheid van langsventilatie wordt via een stochastische analyse bepaald voor verschillende brandgroottes. Per brandgrootte is een toegelaten faalkans gedefinieerd die niet overschreden mag worden. De toegelaten faalkansen per brandgrootte zijn hieronder terug te vinden:

20 MW	$1 \cdot 10^{-3}$
50 MW	$5 \cdot 10^{-3}$
100 MW	$15 \cdot 10^{-3}$
200 MW	$50 \cdot 10^{-3}$

FE. C301-015. De maximale brandlast die moet toegepast worden bij een ventilatie-ontwerp is:

- voor tunnels met ADR tunnelcategorie A, B of C: 200 MW;
- voor tunnels met ADR tunnelcategorie D of E: de brandlast mag verlaagd worden tot 150 MW na het uitvoeren van een risicoanalyse en met goedkeuring van de stakeholders;
- voor tunnels met vrachtwagenverbod: 30 MW.

FE. C301-016. Bij tunnels op maaiveld kan problematische aerodynamische kortsluiting vermeden/beperkt worden door toepassen van volgende maatregelen:

- het ingangsportaal en uitgangsportaal liggen in de breedte hart op hart meer dan 1,4 maal de kokerbreedte uit elkaar;

OF

- het uitgangsportaal steekt in de lengte 1 à 2 hydraulische diameters uit ten opzichte van het ingangsportaal. Hierbij dient de minimale uitritverlenging minstens 20 m en bij voorkeur 40 m te zijn. Het laten uitsteken van het ingangsportaal is veel minder effectief;

OF

-
- een scheidingswand wordt voorzien die minstens even hoog is als de voertuigkoker en die een lengte heeft van 1 à 2 maal de hydraulische diameter van de voertuigkoker.
-

FE. C301-017. Bij tunnels waarvan de toerit en het portaal verzonken liggen ten opzichte van het maaiveld of de toerit geheel is omsloten door hoge geluidschermen kan problematische aerodynamische kortsluiting vermeden worden door volgende maatregelen:

- het uitgangsportaal steekt circa 40 meter uit t.o.v. het ingangsportaal;

OF

- er staat een scheidingswand staat tussen het in- en uitgangsportaal die minstens net zo hoog is als de zijwanden van de toerit en die een lengte heeft van circa 40 meter.
-

FE. C301-018. Als in een ondersteunende koker geventileerd moet worden om deze koker rookvrij te houden, dient tunnelventilatie in de betreffende richting een zodanige betrouwbaarheid te hebben dat de kans op falen bij een langssnelheid van minimaal 0,2 m/s kleiner is dan 0,05 %.

FE. C301-019. Ventilatoren dienen uitgevoerd te worden als klasse F300/2h conform NBN-EN 12101. Ventilatoren die in de tunnel zelf worden geplaatst dienen bij voorkeur als klasse F400/2h worden uitgevoerd conform NBN-EN 12101. De keuze tussen F300 en F400 kan genomen worden op basis van het aantal benodigde ventilatoren voor beide opties om de toegelaten faalkansen niet te overschrijden.

FE. C301-020. In een tunnel mogen maximaal twee verschillende diameters voor de ventilatoren toegepast worden.

FE. C301-021. De longitudinale afstand tussen de ventilatoren dient minimaal tienmaal de hydraulische diameter van de voertuigkoker te zijn.

FE. C301-022. De ventilatoren worden zo dicht mogelijk bij het dienstgebouw geplaatst waaruit zij hun voeding betrekken, waarbij dit niet ten koste mag gaan van de aerodynamische efficiëntie.

FE. C301-023. De Overdrukinstallatie vluchtwegen en Tunnelventilatie mogen elkaar niet nadelig beïnvloeden.

FE. C301-024. Rookdoorslag via dwarsverbindingen bij geopende vluchtdeuren en/of rookoverslag via de tunnelportalen van de incidentkoker naar de ondersteunende koker dient te worden voorkomen.

FE. C301-025. Ventilatoren in de voertuigkoker worden bij voorkeur minimum 20 m stroomafwaarts van een vluchtdeur gepositioneerd.

FE. C301-026. In de stationaire situatie moet worden voorkomen dat de totale luchtstroom door de ventilatoren in één cluster groter is dan de luchtstroom in de voertuigkoker, om terugstroming van rook onder de ventilatoren te voorkomen.

FE. C301-027. De laterale afstand tussen ventilatoren is groter of gelijk aan een half maal de buitendiameter van een aanjaagventilator en minimaal 0,5 m. Deze ruimte is onder andere benodigd voor onderhoud aan ventilatoren.

FE. C301-028. In het ventilatieontwerp dient voldoende redundantie voorzien te worden om uitval van een ventilator op te vangen. Hierbij dient in de berekening de meest efficiënte ventilator weggelaten te worden.

2.4.4 RAAKVLAKELIEN

FUNCTIONELE EIS

FE. C301-29. Binnen 60 seconden na het opstartsignaal moeten alle ventilatoren in de incidentkoker op de maximumcapaciteit (hoogtoeren) ingeschakeld kunnen zijn in netbedrijf.

FE. C301-30. Binnen 30 seconden na het inschakelen van alle ventilatoren in de incidentkoker dienen de ventilatoren die benodigd zijn om recirculatie in de ondersteunende koker te voorkomen te zijn ingeschakeld in netbedrijf.

FE. C301-31. Een ventilator met een vermogen kleiner dan 20 kW mag geen gebruik maken van softstarters. Ventilatoren van dit type moeten voorzien zijn van motoren welke geschikt zijn voor directe aanloop.

FE. C301-32. De energievoorziening van tunnelventilatie dient correct functioneren mogelijk te maken binnen het gehele voorgeschreven bereik van de omgevingstemperatuur.

FE. C301-33. De combinatie van materialen en de installatiewijze van voedingskabels, werkschakelaars en aansluitdozen ten behoeve van de ventilatoren in de voertuigkoker moet zodanig uitgevoerd worden dat deze het voorziene functiebehoud van de ventilatoren bij brand niet verhinderen.

FE. C301-34. De luchtkwaliteit wordt in normaal bedrijf gemeten via de extinctiecoëfficiënt en de NO₂-concentratie. Er zijn vijf beperkingen gedefinieerd:

- Geen zichtbeperking: $K < 0,005 \text{ m}^{-1}$ OF $[\text{NO}_2] < 0,7 \text{ ppm}$
- Lichte zichtbeperking: $0,005 \text{ m}^{-1} \leq K < 0,007 \text{ m}^{-1}$ OF $0,7 \text{ ppm} < [\text{NO}_2] < 1 \text{ ppm}$
- Matige zichtbeperking: $0,007 \text{ m}^{-1} \leq K < 0,009 \text{ m}^{-1}$ OF $1 \text{ ppm} \leq [\text{NO}_2] < 1,25 \text{ ppm}$
- Waarneembare zichtbeperking: $0,009 \text{ m}^{-1} \leq K < 0,012 \text{ m}^{-1}$ OF $[\text{NO}_2] \geq 1,25 \text{ ppm}$
- Ernstige zichtbeperking: $k \geq 0,012 \text{ m}^{-1}$

waarbij:

K = gemiddelde waarde over X (waarbij $X \geq 2$) naastgelegen sensoren en over Y seconden (Y tussen 10 en 60 seconden)

k = gemiddelde waarde van een enkele sensor over 10 seconden

[NO₂] = gemiddelde concentratie NO₂ over X (waarbij $X \geq 2$) naastgelegen sensoren en over Y seconden (Y tussen 10 en 60 seconden) genomen.

Voor de overschrijding van lichte tot waarneembare zichtbeperking dient het gemiddelde genomen te worden van de laatste 'Y' seconden op basis van een bemonstering per seconde waarbij de defaultwaarde voor de tijdsduur Y 30 seconden dient te zijn en instelbaar moet zijn tussen de 10 en 60 seconden.

Als het gemiddelde van de extinctiecoëfficiënt over een tijdsduur van 10 seconden de grenswaarde voor 'Ernstige zichtbeperking' overschrijdt, wordt dit als een brandmelding gezien.

FE. C301-35. Elke ventilator dient zowel individueel als collectief bestuurd te kunnen worden.

FE. C301-36. Bij collectieve besturing moet de ventilator bestuurd worden door de interne besturing van Tunnelventilatie

FE. C301-37. Bij individuele besturing, mag de ventilator niet bestuurd worden door de interne besturing van Tunnelventilatie. Bij individuele besturing kan de ventilator bestuurd worden door de ventilator individuele commando's te geven.

FE. C301-38. Als een ventilator uitvalt of manueel wordt uitgeschakeld dient de eventueel nog beschikbare ventilatiecapaciteit via de collectieve besturing zodanig te worden ingeschakeld (bijgeschakeld), dat het ingestelde ventilatieniveau in de ingestelde richting zoveel mogelijk gehandhaafd blijft.

FE. C301-39. Bij uitval van de besturing dient tunnelventilatie in de ingestelde stand en richting te blijven ventileren.

FE. C301-40. De tunnelbesturing dient te borgen dat de draaiuren van de tunnelventilatie in normaal bedrijf gelijkmatig worden verdeeld over de ventilatoren.

FE. C301-41. De Tunnelbesturing dient te borgen dat een ingeschakelde ventilator minimaal gedurende een parametreerbare duur (default: 4 minuten) draait voordat deze weer wordt uitgeschakeld.

3 INPUTPARAMETERS 1D-BEREKENINGEN

3.1 INHOUD EN BEPERKINGEN VAN DIT HOOFDSTUK

Indien een tunnel wordt uitgerust met langsventilatie, kunnen gerichte 1D-berekeningen over het algemeen reeds tot een bruikbare optimalisatie van het ventilatieontwerp leiden. Daar waar de vereenvoudiging van de rookdichtheid en de concentraties van rookgassen over de dwarsdoorsnede van de tunnel meestal nog tot nuttige inzichten kunnen leiden voor langsventilatie, is dit niet meer het geval voor dwarsventilatie.

Dit hoofdstuk beschrijft de parameters en randvoorwaarden die de ontwerper moet bepalen om in zijn 1D-berekeningssoftware voor de analyse van langsventilatie in te geven. Het is belangrijk dat dit op een uniforme manier gebeurt..

In hoofdstuk 2 werd reeds aangegeven dat een ventilatieontwerp niet wordt ontworpen voor de absolute worst case, maar dat een zekere faalkans wordt toegestaan per brandgrootte. Dit om een economisch ontwerp te bekomen en toch het gros van alle mogelijke brandscenario's onder controle te houden.

Indien een "standaard" tunnel (geen splitsingen, geen grote veranderingen in doorsnede, vluchten langs vluchtkoker, langsventilatie, voldoende ruimte tussen de tunneltechnische installaties en het verkeer, enzovoorts) wordt ontworpen, wordt aangeraden zeker gebruik te maken van een stochastische methode zoals uitgewerkt in ProTuVem. Dit om een goed overzicht te krijgen van de globale faalkansen.

Daarnaast is het dikwijls raadzaam deze stochastische scan aan te vullen met enkele gerichte deterministische berekeningen. Voor complexere tunnels die buiten de "standaard" definitie vallen, dienen voldoende 1D-berekeningen uitgevoerd te worden om te bepalen welke scenario's binnen en welke buiten de faalkansen vallen. In geval van een tunnel met splitsing, is Protuvem helemaal niet geschikt en wordt beter meteen overgegaan op een andere 1D-software.

Dit hoofdstuk richt zich op het bepalen van de inputparameters voor 1D berekeningen, waarbij de nadruk wordt gelegd op het al dan niet halen van de kritische snelheid, zoals gedefinieerd in hoofdstuk 2.

Bij complexe tunnels worden best nog enkele scenario's waarbij net de kritische snelheid wordt behaald in een 3D model gecontroleerd. De definitie van de kritische snelheid in hoofdstuk 2 is namelijk zelf een vereenvoudiging die werd uitgewerkt op basis van eerdere metingen en er bestaan evenveel formules en definities van kritische snelheid als er publicaties zijn. Men kijkt dus best via een 3D model na of er toch geen rookterugslag gebeurt, zelfs indien het 1D ontwerp aantoont dat de kritische snelheid wordt behaald. Dit wordt verder toegelicht in hoofdstuk 4.

3.2 ALGEMEEN

Het doel van dit hoofdstuk is het aanleveren van inputparameters om te gebruiken in het 1D model van langsventilatie in een voertuigkoker voor het bepalen van:

- de behaalde snelheid in de incidentkoker met langsventilatie;
- het algemene drukverloop in de incidentkoker om deze te vergelijken met de overdruk in de vluchtweg;
- het behalen van een minimale luchtsnelheid van 0,2 m/s in de ondersteunende koker om rookkortsluiting tegen te gaan;
- indien van toepassing: drukverloop in de ondersteunende koker indien deze de vluchtweg is;
- voor tunnels met een lengte van meer dan 2 km: nagaan of een systeem met enkel langsventilatie voldoet aan de eisen qua maximale toegelaten vervuiling in normaal bedrijf of dat een tussentijdse extractie dient voorzien te worden. Over het algemeen zijn brandscenario's maatgevend voor het bepalen van het aantal functioneel benodigde ventilatoren en van de beste locatie voor de plaatsing ervan. Voor tunnels korter dan 2 km dient deze berekening ter controle normaal gezien niet te gebeuren. Voor hele brede tunnels (4 rijstroken of meer) met hoge intensiteiten ($I/C > 0,8$ gedurende

lange tijdsblokken) is het raadzaam deze eis toch ook te controleren, zelfs als de tunnel net korter is dan 2 km.

Dit hoofdstuk is grotendeels gebaseerd op de AVV (Aanbevelingen ventilatie van verkeerstunnels) van Steunpunt Tunnelveiligheid, 2005. Hoofdstuk 3 beperkt zich enkel tot formules die nodig zijn om tunnelspecifieke inputparameters te bepalen. Voor nadere info betreffende de formules die intern in de meeste 1D softwarepakketten worden gebruikt, wordt verwezen naar de AVV.

(https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_125999_31/)

3.3 NORMAAL BEDRIJF

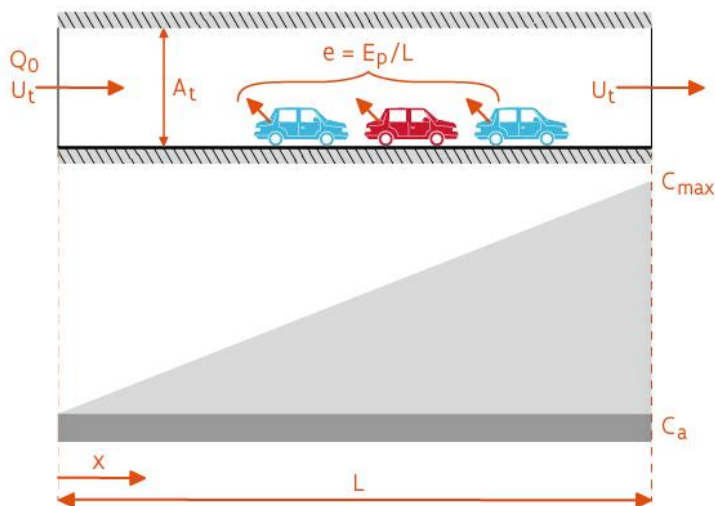
3.3.1 BEHEERSING VAN EMISSIECONCENTRATIES

Enkel in een zeer lange tunnel (> 2 km) met langsventilatie en een hoge verkeersintensiteit kunnen de emissieconcentraties stroomafwaarts cumulatief zodanig hoog oplopen (zie Figuur 3-1) dat de eisen gesteld in normaal bedrijf het ontwerp bepalen. Hierbij wordt verwezen naar de eisen aan beperking van CO en NO₂ in hoofdstuk 2.

Indien de beheersing van emissieconcentraties dient gecontroleerd te worden, worden 2 deterministische scenario's doorgerekend:

- stagnerend Verkeer (deterministisch): In de tunnel vindt langzaam rijdend of stilstaand verkeer plaats. De snelheid van het verkeer wordt ingesteld op 30 km/u;
- normaal Verkeer (deterministisch): Bij zeer lange tunnels is het mogelijk, dat de concentraties schadelijke rookgassen zoals CO en NO₂ de normwaarde bereiken bij normaal rijdend verkeer. De snelheid van het verkeer dient te worden ingevoerd.

De concentraties zijn het hoogst aan het uitgangsportaal.



Figuur 3-1: oplopende emissieconcentratie in voertuigkoker met langsventilatie

De concentratie $C(x)$ (g/m³) op een afstand x (m) van het ingangsportaal kan berekend worden met de formule:

$$C(x) = \frac{e}{Q_0} \cdot x + C_a$$

$$Q_0 = u_t \cdot A_t$$

waarbij:

Q_0 = hoeveelheid lucht die aan het begin van de tunnel naar binnen of naar buiten stroomt (m^3/s)

u_t = snelheid lucht in voertuigkoker door combinatie ventilatie en wind (m/s)

A_t = doorsnede voertuigkoker (m^2)

E_p = toevoeging emissie aan de luchtstroom (g/s)

e = toevoeging emissie aan de luchtstroom per lengte-eenheid ($g/(s.m)$)

C_a = achtergrondconcentratie (g/m^3)

In stedelijk gebied kunnen de achtergrondconcentraties C_a reeds behoorlijk oplopen. De lokale achtergrondconcentratie stikstofdioxide (NO_2) kan bijvoorbeeld opgevraagd worden via [de website van de Vlaamse Milieumaatschappij \(VMM\)](#).¹⁸

De toevoeging van de totale emissie van het verkeer in de tunnel E_p wordt bepaald door:

- de snelheid van het verkeer en bijbehorende capaciteit (en dit zowel voor quasi stilstaand aan 30 km/u als voor normaal rijdend verkeer);
- de samenstelling van het verkeer;
- de aanwezige achtergrondconcentratie;
- de verkeersdichtheid (bijvoorbeeld 50 % en 100 % van de maximale capaciteit);
- windstil of tegenwind.

De emissieproductie E_p door het verkeer wordt per scenario als volgt gevonden:

- 1 Bepaal de intensiteit, samenstelling en snelheid van het verkeer.

- 2 Splits de samenstelling van de verkeersstroom naar de deelstromen lichtverkeer (personenauto's), middelzwaar verkeer (bestelauto's en lichte vrachtauto's) en zwaar verkeer (vrachtauto's en bussen)

- 3 Vermenigvuldig vervolgens per deelstroom het aantal voertuigen met het emissiekengetal. Dit levert per deelstroom de hoeveelheid emissie op.

- 4 Bereken de totale emissie door alle deelstromen bij elkaar op te tellen met volgende formule:

$$E_p = N_r \cdot D_{gem} \cdot L \cdot (\%pa \cdot q_{pa} + \%ba \cdot q_{ba} + \%va \cdot q_{va})$$

waarbij:

E_p = totale emissie binnen de tunnel (g/s)

N_r = aantal rijstroken (-)

D_{gem} = verkeersdichtheid per km rijstrook ($vtg/kmrijstrook$)

L = tunnallengte of beschouwde deel lengte (km)

q_{pa} = emissiekengetal personenauto's ($g/(s.vtg)$)

q_{ba} = emissiekengetal middelzwaar voertuig ($g/(s.vtg)$)

q_{va} = emissiekengetal zwaar voertuig ($g/(s.vtg)$)

$\%pa$ = percentage personenauto's

$\%ba$ = percentage middelzwaar verkeer

$\%va$ = percentage zwaar verkeer

¹⁸ Vlaamse overheid. Vlaamse Milieumaatschappij. Concentratie stikstofdioxide (NO_2) in de omgevingslucht. Geraadpleegd 5 oktober 2022 op <https://www.vmm.be/lucht/stikstof/concentratie-stikstofdioxide>

De percentages personenwagens, middelzwaar verkeer en zwaar verkeer kunnen uit de verkeersindicatoren van het Verkeerscentrum gehaald worden¹⁹. De parameters verkeersdichtheid en emissiekengetal dienen nog berekend of opgezocht te worden en worden hieronder toegelicht.

3.3.1.1 VERKEERSDICHTHEID PER KM RIJSTROOK

De capaciteit van de voertuigkoker kan bepaald worden aan de hand van het handboek *Capaciteitswaarden Infrastructuur Autosnelwegen* (Rijkswaterstaat, 2015)²⁰, maar kan voor een eenvoudige tunnel zonder specifieke complexe kenmerken ook ingeschat worden aan de hand van de vereenvoudigde formule die ook in ProTuVem gebruikt wordt. In ProTuVem wordt in het tabblad voor ‘stagnerend verkeer’ automatisch de maximale verkeersdichtheid bepaald in functie van de ingegeven rijsnelheid. Hiervoor wordt een vereenvoudigde formule gebruikt als volgt (zie Tabel 3-1 ter illustratie van de verkeersdichtheid en verkeersstromen voor de verschillende snelheden en samenstellingen):

$$D_{gem} = \frac{100}{\frac{(\%pa + \%ba)}{D_{pa+ba}} + \frac{\%va}{D_{va}}}$$

waarbij:

D_{gem} = verkeersdichtheid bij gemengd verkeer (vtg/kmrijstrook)

$\%pa$ = percentage personenauto's

$\%ba$ = percentage middelzwaar verkeer

$\%va$ = percentage zwaar verkeer

D_{pa+ba} = maximale verkeersdichtheid licht en middelzwaar verkeer²¹ (vtg/kmrijstrook) = $\frac{2500}{v+17} + 1,5$

D_{va} = maximale verkeersdichtheid van zwaar verkeer (vtg/kmrijstrook) = $\frac{2500}{v+40} + 1,5$

v = verkeerssnelheid (km/u)

Tabel 3-1 : Maximale verkeersdichtheid en capaciteit voor verschillende verkeerssamenstellingen en snelheden

Verkeers- snelheid	Verkeersdichtheid en verkeersstromen							
	personenauto's		vrachtauto's		gemengd verkeer		gemengd verkeer	
	0 % va		100 % va		10 % va		10 % va	
km/u	vtg/ kmrijstrook	vtg/u	vtg/ kmrijstrook	vtg/u	vtg/ kmrijstrook	vtg/u	vtg/ kmrijstrook	vtg/u
120	20	2370	17	2055	19	2334	19	2266
110	21	2300	18	1998	21	2292	20	2220
100	23	2287	19	1936	22	2246	22	2169
90	25	2238	21	1866	24	2194	23	2111
80	27	2182	22	1787	27	2135	26	2046
70	30	2116	24	1696	30	2065	28	1970
60	34	2038	27	1590	33	1982	31	1879
50	39	1941	29	1464	38	1879	35	1768
40	45	1814	33	1310	44	1747	41	1627
30	55	1641	37	1116	52	1567	48	14381
20	69	1381	43	863	65	1303	59	1171
10	94	941	52	515	87	869	75	754
0	149	0	64	0	131	0	106	0

¹⁹ De verkeersindicatoren van het Verkeerscentrum zijn te raadplegen op <http://indicatoren.verkeerscentrum.be>.

²⁰ Rijkswaterstaat. (2015). *Capaciteitswaarden Infrastructuur Autosnelwegen (Handboek, versie 4)*. Dienst Water, Verkeer en Leefomgeving, Rijkswaterstaat | GPO. <https://www.rijkswaterstaat.nl/zakelijk/werken-aan-infrastructuur/bouwrichtlijnen-infrastructuur/autosnelwegen>

²¹ De lengte van voertuigen die behoren tot middelzwaar verkeer wijkt in het algemeen niet veel af van de lengte van personenauto's. Ter vereenvoudiging wordt daarom voor de berekening van de verkeersdichtheid middelzwaar verkeer ook als licht verkeer beschouwd.

3.3.1.2 EMISSIEKENGETALLEN

Voor de uitstoot van verkeer kan bijvoorbeeld uitgegaan worden van de gegevens die door PIARC gepubliceerd zijn in 2019²². Deze gegevens worden internationaal gebruikt en aanvaard. In bijlage F van de AVV zijn de tabellen van de kengetallen²³ van CO, NO_x en PM₁₀ gegeven voor licht en zwaar verkeer in functie van de langshelling van het wegprofiel en snelheid van het voertuig.

In ProTuVem kan een emissie prognose jaar aangevinkt worden. De prognose die binnen ProTuVem kan aangevinkt worden loopt tot 2015. Voor meer recente prognoses wordt aangeraden de file met de kengetallen 2015 in de Protuvem folder aan te passen en deze vervolgens op te laden binnen Protuvem.

3.4 BRAND: BEPALING VAN DE LANGSSNELHEID

3.4.1 EVENWICHTSVERGELIJKING VOOR LANGSVENTILATIE

In een tunnel dienen de gecombineerde *aanjaagventilatoren* een zodanige stuwdruk op te bouwen dat het verlies van druk door wrijving van de tunnelconstructie, het verkeer, de brand en meteorologische invloeden gecompenseerd worden en toch de kritische snelheid gehaald wordt. Dit wordt uitgedrukt door volgende vergelijking:

$$\sum_{i=1-n} (\Delta p_{jet})_i = \Delta p_{tunnel} + \Delta p_{verkeer} + \Delta p_{meteo} + \Delta p_{brand} + \Delta p_{thermostatisch}$$

waarbij:

Δp_{jet} = stuwdruk door aanjaagventilator (zie 3.4.7)

Δp_{tunnel} = drukval door wrijvingsverliezen langs de tunnelwand en de portalen (zie 3.4.2)

$\Delta p_{verkeer}$ = drukverschil door stromingsverliezen verkeer (zie 3.4.3)

Δp_{meteo} = drukverschil door meteorologische invloeden (zie 3.4.4)

Δp_{brand} = drukval veroorzaakt door brand (zie 3.4.5)

$\Delta p_{thermostatisch}$ = drukverschil vanwege thermostatische effecten (=schoorsteeneffect) (zie 3.4.6)

In bovenstaande vergelijking is elke term afhankelijk van de gehaalde gemiddelde snelheid in de tunneldoorsnede u_t . Door het oplossen van deze vergelijking kan dus u_t bepaald worden.

Hieronder wordt elke term in de vergelijking kort toegelicht in een aparte paragraaf en worden de inputparameters die dienen bepaald te worden besproken.

3.4.2 DRUKVAL DOOR WRIJVINGSVERLIEZEN LANGS DE TUNNELWAND EN AAN DE PORTALEN

De drukval door de tunnel (Δp_{tunnel}) bestaat uit:

- een drukval door de stromingsweerstand aan de ingang van de tunnel ΔP_{in} ;
- een drukval door de stromingsweerstand door wandwrijving met de wand, plafond en wegdek in de tunnel ΔP_{wand} ;
- een drukval door de stromingsweerstand aan de uitgang van de tunnel ΔP_{uit} .

Deze worden hieronder toegelicht.

3.4.2.1 DRUKVAL DOOR STROMINGSWEERSTAND AAN DE INGANG

De drukval aan het ingangsportaal is functie van de snelheid u_i , de dichtheid van de lucht en de ingangsweerstand ζ_{in} . Deze ingangsweerstand dient door de ontwerper ingegeven te worden in de software.

²² World Road Association (PIARC), *Road Tunnels: Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation* (2019)

²³ Het kengetal is de referentie-emissie voor een bepaald type voertuig (licht, zwaar) in functie van de snelheid en helling.

Uit praktijkmetingen en literatuur blijkt dat $\zeta_{in} = 0,2 - 0,4$ wanneer boven de tunnelingang geen lichtrooster is aangebracht. Met een lichtrooster moet een waarde van $\zeta_{in} = 0,8 - 1,0$ worden aangehouden.

3.4.2.2 DRUKVAL DOOR STROMINGSWEERSTAND AAN DE WANDEN

De wrijvingsverliezen van de lucht langs de wanden zijn functie van de ruwheid van de wanden λ en de hydraulische diameter D_h .

Het begrip hydraulische diameter D_h wordt gebruikt om de afwijking van de tunneldoorsnede ten opzichte van een ronde doorsnede te compenseren. Er wordt een fictieve ronde doorsnede bepaald die een gelijke doorsnede heeft als de tunneldoorsnede. De hydraulische diameter is dus een fictieve diameter van de dwarsdoorsnede van de voertuigkoker. De hydraulische diameter wordt bepaald door:

$$D_h = 4 \cdot \frac{A_t}{O_t}$$

waarbij:

D_h = hydraulische diameter (m)

A_t = oppervlak dwarsdoorsnede van de voertuigkoker (m²)

O_t = omtrek dwarsdoorsnede van de voertuigkoker (m)

In tunnels met gladde zijwanden, een vlak plafond en een normaal vlak wegdek ligt de gemiddelde waarde van λ tussen 0,014 – 0,016. In tunnels met overwegend ruwe wanden en plafond (bijvoorbeeld gespoten brandwerende bekleding) en een normaal vlak wegdek ligt de gemiddelde waarde van λ tussen 0,016 – 0,018.

3.4.2.3 DRUKVAL DOOR STROMINGSWEERSTAND AAN DE UITGANG

De drukval aan het uitgangsportaal is functie van de snelheid van u_v , de dichtheid van de lucht en de uitgangsweerstand ζ_{uit} . Deze uitgangsweerstand dient door de ontwerper ingegeven te worden in de software. Voor ζ_{uit} wordt een waarde van 1 aangehouden. De dynamische energie die in de uitstromende luchtstroming aanwezig is wordt geheel in statische druk omgezet.

3.4.2.4 ANDERE AANDACHTSPUNTEN

Er moet rekening worden gehouden met het volgende:

- vanwege veranderingen in de doorsnede kunnen instroom- en uitstroomsnelheid van elkaar afwijken;
- bij brand zorgt de temperatuursverhoging ervoor dat zowel instroomsnelheid en uitstroomsnelheid als de dichtheden van instroming en uitstroming van elkaar afwijken.

3.4.3 DRUKVERSCHIL DOOR STROMINGSVERLIEZEN VERKEER

Afhankelijk van de rijrichting en de rijnsnelheid kan het verkeer een weerstand in de luchtstroom opleveren of juist een positieve bijdrage leveren aan de luchtstroming. De totale verkeersweerstand of aanjagende werking is een optelsom van de individuele voertuigweerstand.

De invloed van het verkeer op de luchtstroming is functie van volgende inputparameters:

- het aantal voertuigen in de voertuigkoker (-) (zie 3.4.3.1);
- het frontaal aanstromingsoppervlak A_v van het voertuig (m²) (zie 3.4.3.2);
- de stromingscoëfficiënt C_w van het voertuig (-) (zie 3.4.3.2);
- de schaduwfactor f_s , die het effect beschrijft van voertuigen die dicht achter elkaar staan (-);
- de actuele verkeerssnelheid (m/s).

De verschillende factoren worden hieronder toegelicht:

3.4.3.1 AANTAL VOERTUIGEN IN DE VOERTUIGKOKER N

In geval zich calamiteit voordoet in een voertuigkoker, zal het verkeer stroomopwaarts een file vormen tot de tunnel vol is of deze gesloten wordt en dit over alle rijstroken heen. ProTuVem gaat ervan uit dat een tunnel

niet structureel filegevoelig is en houdt wel rekening met het mogelijk stroomopwaarts vollopen van een tunnel bij calamiteit, maar houdt geen rekening met mogelijke extra wrijving van verkeer stroomafwaarts van de brand. Zoals reeds eerder aangehaald werd, dient de combinatie van een filegevoelige tunnel en langsventilatie te allen tijde vermeden te worden.

Indien een bestaande tunnel toch filegevoelig is of dreigt te worden, volstaat een standaardberekening in PROTUVEM niet meer en kan het noodzakelijk blijken de efficiëntie van de ventilatie voor de werkelijke situatie opnieuw te analyseren. De weerstandsverliezen door verkeer in een tunnel kunnen sterk oplopen naarmate een tunnel vol komt te staan en dienen dus met de nodige voorzichtigheid voldoende conservatief ingeschat te worden.

3.4.3.2 STROMINGSCOËFFICIËNT C_w EN FRONTAAL AANSTROOMOPPERVLAK A_v

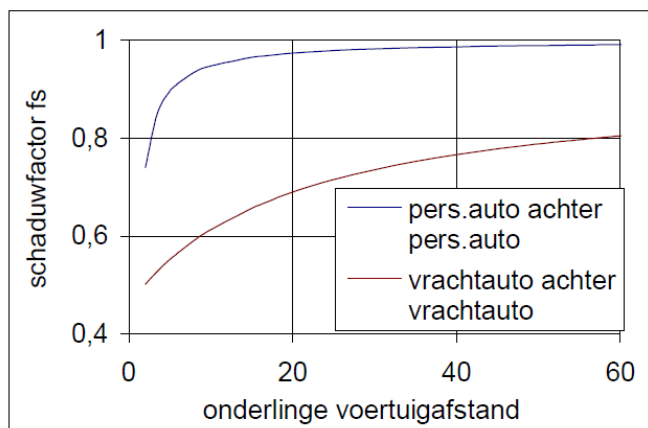
De stromingscoëfficiënt C_w en het frontaal aanstroomoppervlak A_v kunnen uit Tabel 3-2 gehaald worden. ProTuVem berekent automatisch deze invloed over de tunnel in functie van de aangegeven verkeerssamenstelling en maximale filelengte.

Tabel 3-2: Stromingscoëfficiënt en het frontaal aanstroomoppervlak

Soort voertuig	A_v (m ²)	C_w bij aanstroming voorzijde	C_w bij aanstroming achterzijde
personenauto	2,5	0,4	0,55
bestelbus	5	0,5	0,8
vrachtwagen	10	0,8	1,0

3.4.3.3 SCHADUWEEFFECT f_s

Als voertuigen dicht achter elkaar staan of rijden, neemt de individuele invloed op de stroming af. Dit wordt het 'schaduw effect' of 'zoeffect' genoemd. De grootte van het schaduw effect is afhankelijk van de afstand tussen de voertuigen. De grootte van de schaduw factor f_s valt af te lezen uit Figuur 3-2.



Figuur 3-2: Schaduwfactoren verschillende voertuigen

3.4.3.4 ACTUELE VERKEERSSNELHEID

Indien de beheersing van emissieconcentraties dient gecontroleerd te worden, worden 2 deterministische scenario's doorgerekend:

- stagnerend Verkeer (deterministisch): In de tunnel vindt langzaam rijdend of stilstaand verkeer plaats. De snelheid van het verkeer wordt ingesteld op 30 km/u;
- normaal Verkeer (deterministisch): Bij zeer lange tunnels is het mogelijk, dat de concentraties schadelijke rookgassen zoals CO en NO₂ de normwaarde bereiken bij normaal rijdend verkeer. De snelheid dient van het verkeer te worden ingevoerd.

3.4.4 DRUKVAL VANWEGE METEOROLOGISCHE INVLOEDEN

Meteorologische invloeden werken in op het in- en uitgangsportaal en kunnen worden veroorzaakt door:

- de wind;
- een verschil in barometrische druk bij het in- en uitgangsportaal.

Bij het berekenen van ventilatiesystemen voor tunnels moet worden gelet op de windinvloed. In vlakke gebieden, zoals in Vlaanderen, kan het aandeel van de wind in de totale weerstand die door het ventilatiesysteem moet worden overwonnen meer dan 30 % bedragen. Het precieze aandeel van de windinvloed is hierbij mede afhankelijk van de tunnelconfiguratie. Bij berekeningen moet de windinvloed dus voldoende nauwkeurig bekend zijn. Barometrische drukverschillen zijn in Vlaanderen niet te verwachten mogen verwaarloosd worden.

De windinvloed moet voor elk tunnelportaal afzonderlijk berekend worden. Hiervoor worden volgende stappen voorgeschreven:

- 1 Vraag de windsnelheden op op 10 m hoogte van het maaiveld van het dichtstbijzijnde representatieve weerstation (zie 3.4.4.1)

- 2 Bepaal de correctiefactor om de gecorrigeerde windsnelheden op het maaiveld te bepalen. In een stedelijke omgeving zullen de windsnelheden sterk afgeremd worden ten opzichte van een open veld (zie 3.4.4.2)

- 3 Bepaal per tunnelportaal de correctiefactor CP10 die je op de druk gaat toepassen. Deze factor geeft de invloed weer van de configuratie van het tunnelportaal en de interactie van de windvector (richting en snelheid) en luchtsnelheid in de tunnel (zie 3.4.4.3). Vermits de luchtsnelheid niet op voorhand gekend is, zal deze eerst ingeschat moeten worden en gebeurt de berekening iteratief.

- 4 Bereken de winddrukken p_w aan het ingangs- en uitgangsportaal in functie van de windsnelheden
$$p_{wind} = CP10 \frac{1}{2} \rho u_w^2$$

waarbij voor de dichtheid van de lucht $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ mag aangenomen worden.

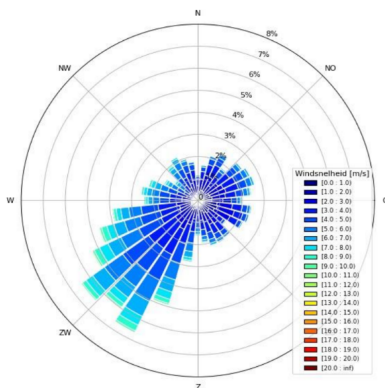
- 5 De bekomen curve van de kans op het overschrijden van bepaalde drukken kan nu gebruikt worden om ofwel een stochastische analyse uit te voeren ofwel in functie van een gekozen percentiel dat niet overschreden wordt een deterministische berekening uit te voeren.

Vermits deze stappen op een statische verdeling toegepast dienen te worden en de bepaling van de interactie van de wind en tunnellucht iteratief dient te gebeuren, gebeuren deze het best via een softwarepakket.

3.4.4.1 WINDSNELHEDEN OP 10 M

Voor de windsnelheid u_w wordt de waarde op 10 m hoogte boven het maaiveld genomen. De reden hiervoor is dat de windsnelheden en -richtingen die optreden in de omgeving van de tunnel worden bepaald aan de hand van statistische weergegevens. In statistische meteorologische gegevens wordt de windsnelheid steeds op 10 m hoogte boven het maaiveld gegeven. Ter hoogte van de in- of uitgang van de tunnel is de windsnelheid altijd lager doordat het grondoppervlak de windsnelheid afremt. In verband met de vormgeving van het tunnelportaal is het nagenoeg onmogelijk om de windsnelheid te bepalen op portaalniveau. Bij hierna beschreven bepaling van de windinvloed op portalen is daarom steeds gerekend met de windsnelheid op 10 m hoogte boven het maaiveld.

Bij voorkeur wordt hierbij gebruikgemaakt van een windroos die is opgesteld uit lokale data over een periode van 10 jaar. Hiervoor kan bijvoorbeeld gebruikgemaakt worden van de winddata die ter beschikking wordt gesteld door *Iowa State University of Science and Technology*.²⁴



Figuur 3-3: Windroos voor Antwerpen op basis van IOWA data van 2000-2019

3.4.4.2 INVLOED VAN HET OMLIGGENDE TERREIN

De wind op maaiveld wordt beïnvloed door het omliggende terrein rond de tunnel. Omgevingsinvloeden moeten in berekeningen worden verdisconteerd door de windsnelheid op 10 m hoogte boven het maaiveld te vermenigvuldigen met een terreinruweheidsfactor ξ_t conform onderstaande tabel. In een stedelijke omgeving zullen de windsnelheden sterk afgeremd worden ten opzichte van een open veld en zal de druk op het tunnelportaal minder hoog zijn. Tabel 3-3 geeft de terreinruweheidsfactoren in functie van de omgevingsklasse.

Tabel 3-3: Terreinruweheidsfactoren in functie van de omgevingsklasse

Klasse	Omschrijving	Benaming	Terreinruweheidsfactor ξ_t
1	open wateroppervlak, vrije strijklengte minstens 5 km	zee	1,12
2	wad of sneeuwvlakte, geen begroeiing of obstakels	glad	1,06
3	weiland of braakliggend bouwland met vrijwel geen obstakels, startbanen van vliegvelden, enzovoorts	open	1,0
4	bouwland met laag gewas, weinig verspreide obstakels op vrij grote onderlinge afstand (>20 x obstakelhoogte)	open/ruw	0,94
5	cultuurland met verspreide obstakels, heggen hoge gewassen	ruw	0,88
6	bos, laagbouw met regelmatige vrije dichte bedekking van obstakels (obstakelafstand = obstakelhoogte)	zeer ruw	0,82
7	stad met dichte bebouwing	gesloten	0,8

In uitzonderlijke gevallen kunnen plaatselijke grote obstakels voor de betreffende windrichting worden verdisconteerd door de windsnelheid op 10 m hoogte boven maaiveld te vermenigvuldigen met een schaduwfactor ξ_s . Deze factor moet naar eigen inzicht worden gekozen en ligt altijd tussen 0 en 1.

²⁴ Deze data is raadpleegbaar op de website van Iowa State University of Science and Technology: https://mesonet.agron.iastate.edu/request/download.phtml?network=BE_ASQS.

3.4.4.3 INVLOED VAN DE VORM EN ORIËNTATIE VAN DE PORTALEN VIA CP10

CP10 is een factor die rekening houdt met de interactie van de tunnel lucht met de wind. Deze houdt rekening met de oriëntatie van de wind ten opzichte van het tunnelportaal en van de mogelijke afscherming van het tunnelportaal ten opzichte van deze wind door bijvoorbeeld verzonken te zijn of afgeschermd te worden door akoestische schermen.

Door de Bouwdienst van Rijkswaterstaat is tussen 1990 en 2000 modelonderzoek verricht naar de meest voorkomende vormen van tunnelportalen. Daarbij is uitgegaan van een tunnel met twee naast elkaar gelegen voertuigkokers met een breedte van circa 10 m. Bij de metingen is de winddruk gemeten op zowel ingangs- als uitgangsportalen. Voor zowel ingangs- als uitgangsportaal zijn hierbij empirische formules afgeleid uit windtunnelproeven om CP10

Voor het ingangsportaal wordt CP10 wordt bepaald door de benaderingsformule:

$$CP10 = A_0 + A_1 \cos \gamma + A_2 \cos 2\gamma + A_3 \cos 3\gamma + A_4 \sin \gamma + A_5 \sin 2\gamma + A_6 \sin 3\gamma$$

Voor het uitgangsportaal wordt CP10 wordt bepaald door de benaderingsformule:

$$CP10 = B_0 + B_1 \cos \gamma + B_2 \cos 2\gamma + B_3 \cos 3\gamma + B_4 \sin \gamma + B_5 \sin 2\gamma + B_6 \sin 3\gamma$$

De bepaling van de factoren A_{0-6} en B_{0-6} in de benaderingsformules voor CP10 is gegeven in Annex A. Deze zijn afhankelijk van de configuratie van de tunnel. Tabel 3-4 geeft enkele voorbeelden die gebruikt worden in ProTuVem als leidraad om te bepalen in welke van deze 16 configuratie een tunnel zich bevindt. Hierbij wordt best de configuratie gekozen die het dichtst aanleunt en verschillende discrete verhoudingen voor u_i/u_w (-1, -½, 0, +½ of +1), te bepalen in functie van de configuratie van het portaal (zie Tabel 3-4).

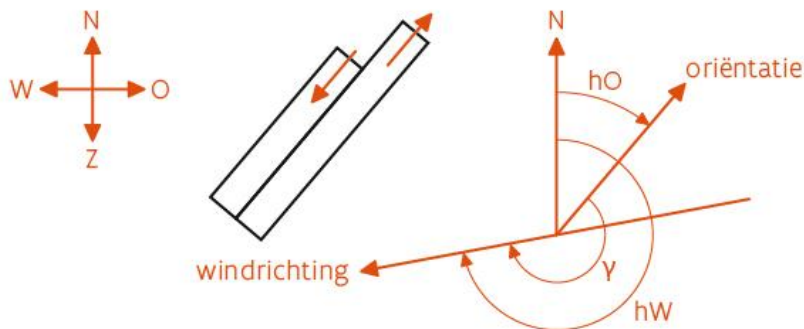
Tabel 3-4: Standaard configuraties ter illustratie van te kiezen hoofdvorm voor windinvloed

	hoofdvorm	zijwanden toerit	gebouw boven tunnelportaal	scheidingswand tussen in- en uitrit	lichtrooster boven inrit	uitritverlenging ten opzichte van inrit
1		recht	aanwezig	100 x 13 m	100 m	20 m
2		recht	aanwezig	100 x 13 m	100 m	
3		recht	aanwezig	100 x 13 m		20 m
4	verzonken	recht	aanwezig	100 x 13 m		
5		recht	aanwezig			20 m
6		recht	aanwezig	20 x 13 m		
7		talud	aanwezig	20 x 13 m		
8		recht	aanwezig	100 x 8 m	100 m	20 m
9	half verzonken	recht	aanwezig			20 m
10		recht				20 m
11		talud		20 x 8 m		
12		talud		20 x 8 m		
13		geen		100 x 6 m	100 m	20 m
14	bovengronds	geen				20 m
15		geen		100 x 6 m		20 m
16		geen		20 x 8 m		

De hoek γ is de hoek tussen de windrichting en oriëntatie van het tunnelportaal. Voor de bepaling van γ geldt de volgende regel:

- de windrichting is de hoek (met de klok mee) tussen het noorden (0°) en de richting waar de wind vandaan komt;
- de oriëntatie van het tunnelportaal is de hoek (met de klok mee) tussen het noorden (0°) en de kijkrichting van binnen naar buiten volgens de lengteas van de voertuigkoker ter hoogte van het portaal;

- de hoek γ is de hoek van de windrichting minus de oriëntatiehoek van het tunnelportaal. Voor een wind die loodrecht blaast op een portaal betekent dit dat de hoek γ gelijk is aan 0.



Figuur 3-4: Hoek tussen de windrichting en oriëntatie van het tunnelportaal

Daar CP10 zelf afhankelijk is van de verhouding u_t/u_w , dient u_t/u_w in eerste instantie ingeschat te worden. De verhouding is hierbij positief indien de resulterende luchtverplaatsing met de rijrichting mee is en negatief indien tegen de rijrichting. Indien bij controle van de berekening blijkt dat de verhouding sterk varieert ten opzichte van de ingeschatte waarde dient de bepaling van CP10 opnieuw te gebeuren. Men kan bijvoorbeeld checken of de snelheidsverhouding u_t/u_w meer dan 5 à 10 % afwijkt van de aangenomen snelheidsverhouding. Gezien het iteratieve karakter van de berekening en de vele berekeningen met de coëfficiënten, is deze berekening eigenlijk alleen goed mogelijk via een computer.

Het stappenplan voor de berekening van CP10 is als volgt:

- 1 Bepaal het hoekverschil tussen de windrichting en de oriëntatie van het ingangs- en het uitgangsportaal. Het gevonden hoekverschil is de windhoek.

- 2 Bepaal de windsnelheid op 10 m hoogte boven maaiveld voor de gekozen windrichting en breng eventueel reducties aan voor afwijkende terreinaccidentatie en windschaduw.

- 3 Neem voor het bepalen van de coëfficiënten voor de winddrukfactor CP10 voorlopig een positieve tunnelluchtstroming (met de rijrichting mee) aan met $u_t/u_w = +\frac{1}{2}$ en bepaal de coëfficiënten A_{0-6} en B_{0-6} en bereken daarna CP10.

- 4 Bereken de winddruk voor zowel het ingangs- als het uitgangsportaal.

- 5 Bereken de totale winddruk met: $p_{\text{wind,totaal}} = p_{\text{wind,uitgangsportaal}} - p_{\text{wind,ingangsportaal}}$

- 6 Maak vervolgens de complete berekening voor de tunnel, waaruit dan de tunnellsnelheid u_t volgt.

- 7 Kijk of bij de berekende waarde de absolute snelheidsverhouding $|u_t/u_w|$ meer dan (bijvoorbeeld) 5 % afwijkt van de bij stap 4 aangenomen snelheidsverhouding.

- 8 Zo ja, herhaal dan stap 4 t/m 7 opnieuw met de nieuwe snelheidsverhouding, net zolang tot het resultaat voldoende nauwkeurig is. Als de tunnellsnelheid daarbij in richting blijkt om te keren, moet hiermee bij het bepalen van de windcoëfficiënten rekening worden gehouden.

In ProTuVem wordt de invloed van de wind en het bijbehorende drukverschil over de tunnel heen over hele windroos in functie van de kansen op het behalen van bepaalde combinaties van windsnelheden en windrichtingen bepaald. Indien deterministische berekeningen worden gedaan, wordt aangeraden de verschildruk tussen beide portalen toe te passen die in 95 % van de gevallen niet overschreden wordt.

Op eenvoudige aanvraag kan een rekenblad met macro's opgevraagd worden bij AWW om de winddruk te bepalen met een vooropgelegde kans dat deze niet overschreden wordt (bijvoorbeeld 95%) in functie van de windroos en omgeving van een welbepaalde locatie. Dit rekenblad kan opgevraagd worden door een mail te sturen naar teamtunnelveiligheid.vwt@mow.vlaanderen.be.

3.4.5 DRUKVAL VEROORZAAKT DOOR DE BRAND

Een brand treedt niet op één punt op, maar heeft een zekere lengte. Deze brandlengte bedraagt minstens de lengte van het brandende voertuig of de lengte van de plasbrand. Bij een grote plasbrand kunnen de vlammen zich over een lengte van 100 m of meer uitstrekken. De brandlengte wordt bij benadering in Tabel 3-5 gegeven.

Tabel 3-5: brandlengte in functie van brandvermogen

Brandvermogen	Brandlengte
5 MW	5 m
20 MW	10 m
50 MW	20 m
100 MW	65 m
200 MW	100 m

Ter plaatse van de brandhaard wordt hitte gedeeltelijk door straling afgestaan aan de tunnelconstructie en gedeeltelijk afgestaan aan de rookgassen. Het gedeelte van het brandvermogen dat aan de rook wordt afgestaan, is afhankelijk van de brandgrootte. Bij hogere vermogens is het effect van de straling groter dan bij kleinere branden. Het percentage van het vermogen η dat voor verschillende brandvermogens aan de rookgassen wordt afgestaan, is terug te vinden in Tabel 3-6. Hierbij wordt opgemerkt dat deze waarden gelden voor luchtsnelheden gelijk aan of groter dan de kritische snelheid.

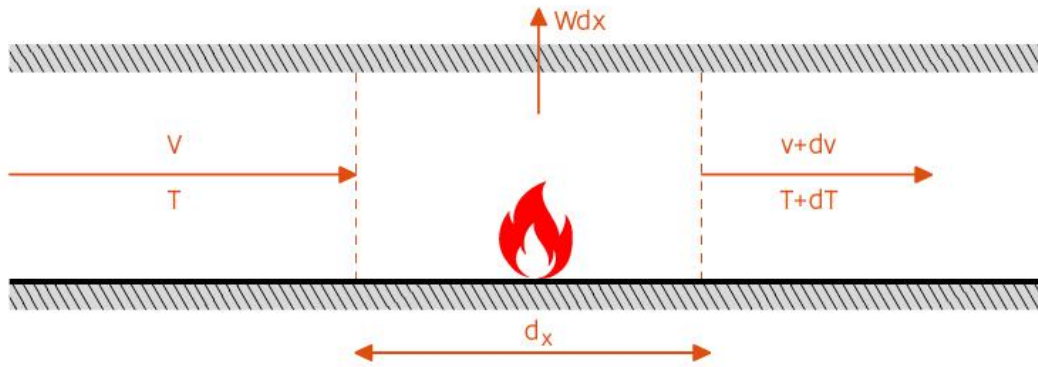
Tabel 3-6: Deel totale brandvermogen dat aan rook wordt toegevoegd

Brandvermogen	Deel vermogen dat aan rook wordt toegevoegd, η
5 MW	73 %
> 20 MW	67 % ²⁵

Door temperatuurstijging ter plaatse van de brand neemt de dichtheid af en het volume toe. Vanwege de toename in volume bij een gelijkblijvende doorsnede neemt ook de snelheid toe. Als gevolg van de hogere snelheid van de rookgassen neemt de druk over de brandhaard af. Dit verschijnsel wordt 'drukval over de brand' genoemd. Ook turbulentie, veroorzaakt door de brandhaard, leidt tot drukverlies. Daarnaast neemt een brandend voertuig ook ruimte in de tunneldoorsnede in, waardoor plaatselijk de stroming moet versnellen. Dit leidt tot extra drukverlies. De extra verliesfactor veroorzaakt door deze lokale brandweerstand f_{brwst} kan ingeschat worden op een factor 1,5 à 2.

Stroomafwaarts van de brand neemt de temperatuur van de afgevoerde rookgassen af doordat warmte wordt afgestaan aan de voertuigkoker. De warmteoverdracht vindt voornamelijk plaats door conductie en voor een deel door straling. Dit zal leiden tot een temperatuursdaling (zie Figuur 3-5).

²⁵ In de AVV staat hier 64 %, maar hier werd 67 % gebruikt om in lijn te blijven met hfst. 2, waarin de waarde uit het NFPA 502 wordt gebruikt.

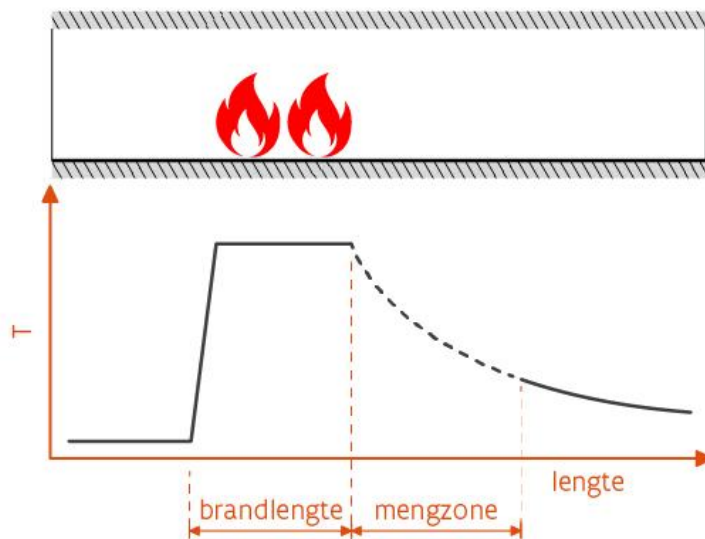


Figuur 3-5: Afkoeling stroomafwaarts van de brand

De inputgegevens die de ontwerper eventueel nog dient in te geven zijn:

- ϵ (wandemissiviteit): deze factor is 0,7 voor beton en steenachtige materialen;
- λ (wandwrijvingsfactor): zie § 3.4.2.2.

Het verloop van de temperatuur van de rookgassen na de brand wordt voorgesteld in Figuur 3-6 hieronder. Deze grafiek is van belang om in te schatten of een bepaalde plaats van brand tot uitval van een ventilatie(cluster) stroomafwaarts van de brand kan leiden. Ventilatoren die ontworpen zijn voor langsventilatie in tunnels en die effectief in de tunnel opgehangen zijn (en dus niet aan het ingangsportaal) hebben meestal een werkingsgebied tot 400 °C.



Figuur 3-6: Afkoeling stroomafwaarts van de brand

Door deze afkoelingseffecten daalt de snelheid weer enigszins en stijgt de dichtheid. Dit gedrag moet bij berekeningen worden verwerkt in de bepaling van de weerstanden door wandwrijving, de verkeersweerstand, en het stromingsverlies en de windinvloed bij het uitgangsportaal.

Bij volledige opmenging van de rook met lucht die niet aan de verbranding deelneemt, ontstaat een temperatuurdaling. Deze temperatuurdaling is afhankelijk van de overmaat aan lucht die aan de brand wordt toegevoerd. Deze kan eventueel, indien gewenst, mee in rekening gebracht worden.

3.4.6 DRUKVAL DOOR SCHOORSTEENEFFECT

Bij brand heeft een helling invloed op de evenwichtsvergelijking door thermostatische effecten van de rook. Dit heet ook wel het 'schoorsteeneffect'. Bij stroming langs een neergaande helling moet extra druk worden opgebracht, terwijl bij een opgaande helling de opstijgende rook juist meehelpt aan de stroming. In sommige

gevallen kan het schoorsteeneffect van de rook zo groot zijn dat ook zonder mechanische ventilatie al een stroming ontstaat.

Dit schouweffect is een effect dat intern door de software wordt doorgerekend. Daar de ontwerper hier geen inputparameters moet definiëren, wordt hier in dit document niet nader op ingegaan. Voor meer uitleg wordt verwezen naar Aanbevelingen Ventilatie van Verkeerstunnels, Steunpunt Tunnelveiligheid. (2005)

3.4.7 STUWDRIJK VAN AANJAAGVENTILATOREN

De efficiëntie van een aanjaagventilator is functie van het stuwkrachtrendement en opstellingsrendement. Deze factoren worden hieronder besproken.

3.4.7.1 STUWKRACHTRENDEMENT

In theorie zou de stuwkracht van een ventilator moeten kunnen berekend worden aan de hand van de volumestroom door deze ventilator.

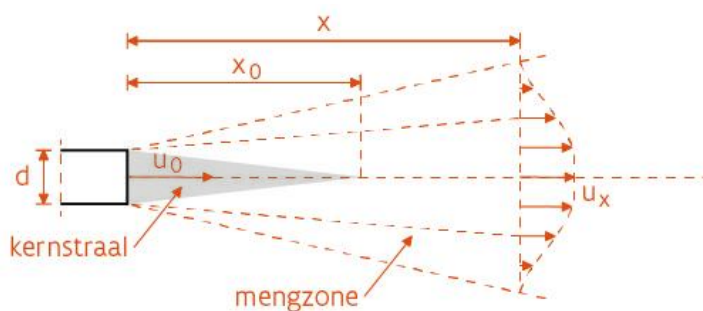
In werkelijkheid blokkeren de motor en naaf van de waaier de luchtstroom in het centrum van de uitblaasstraal. Bovendien is de stroomsnelheid langs de binnenwanden van de ventilator lager door de wandwrijving. De kracht die een ventilator uitoefent wordt ook beïnvloed door de wijze van instroming bij de aanzuigopening. Als de rand van de aanzuigopening veel turbulentie in de luchtstroom naar de waaier veroorzaakt, treedt rendementsverlies op. Al deze effecten kunnen in de berekening worden verwerkt door een 'stuwkrachtrendement' η_{stk} in te voeren.

Het stuwkrachtrendement is de verhouding tussen de op een proefstand gemeten stuwkracht van een aanjaagventilator zonder afbuigschoppen en de berekende stuwkracht uitgaande van een vlak uitblaaspatroon bij de uitlaatblaasopening.

Bij goede aanjaagventilatoren ligt het stuwkrachtrendement tussen 94 en 96 % en is raadpleegbaar bij de fabrikant.

3.4.7.2 OPSTELLINGSRENDEMENT VAN VENTILATOREN IN DE VOERTUIGKOKER

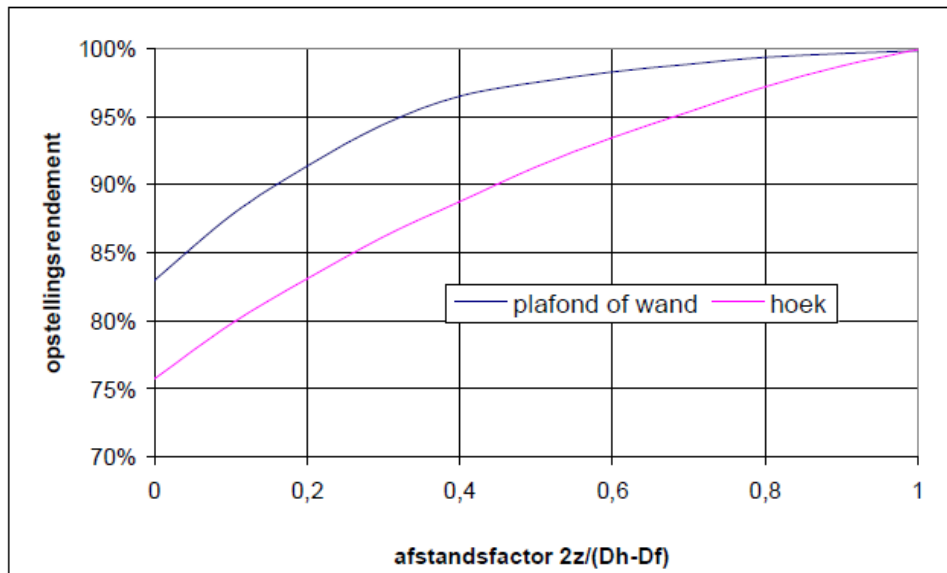
Aan de uitblaaszijde verlaat de luchtstroom de ventilator in een gebonden straal die zich kegelvormig uitbreidt naarmate de afstand van de uitblaasopening groter wordt. De tophoek van de kegel is tussen 10° en 15°, afhankelijk van de vorm van de uitblaasopening. Naarmate de luchtstroming een grotere diameter krijgt, neemt de snelheid af (zie Figuur 3-7).



Figuur 3-7: Uitblaaspatroon aanjaagventilator

De energie van de gebonden straal wordt overgebracht op de luchtstroming in de tunnel door wrijving langs het oppervlak van de kegel. Als de gebonden straal echter wanden, plafond, wegdek of componenten (verlichtingsarmaturen, luidsprekers, signaleringsborden, enzovoorts) raakt, wordt niet de volledige energie op de luchtstroming in de tunnel overgebracht. Er treedt daardoor stuwkrachtverlies op dat in rekening wordt gebracht door invoering van een opstellingsrendement η_{opst} .

De invloed van het plafond en de wanden op het rendement van de ventilatoren wordt in sterke mate bepaald door de afstand van deze elementen tot aan de ventilator. De grafiek in Figuur 3-8 toont het opstellingsrendement voor een enkele aanjaagventilator zonder afbuigspoepen overgenomen uit de AVV²⁶ ter illustratie. Recent onderzoek toont echter aan dat de opstellingsrendementen in werkelijkheid meestal lager liggen. Figuur 3-8 kan met de nodige voorzichtigheid gebruikt worden voor een eerste voorontwerp, maar voor het vastleggen van een definitief ontwerp dienen de opstellingsrendementen voor specifieke ventilatoren best opgevraagd te worden bij de leveranciers en/of dient recentere literatuur geraadpleegd te worden.



Figuur 3-8: Opstellingsrendement afhankelijk van positie van de aanjaagventilator volgens de AVV
 z = afstand van hartlijn van ventilator tot aan de wand van het plafond (m)
 D_h = hydraulische diameter tunnel (m)
 D_f = inwendige vrije diameter ventilator (m)

3.4.7.3 OPSTELLINGSRENDEMENT VAN INJECTIEVENTILATOREN

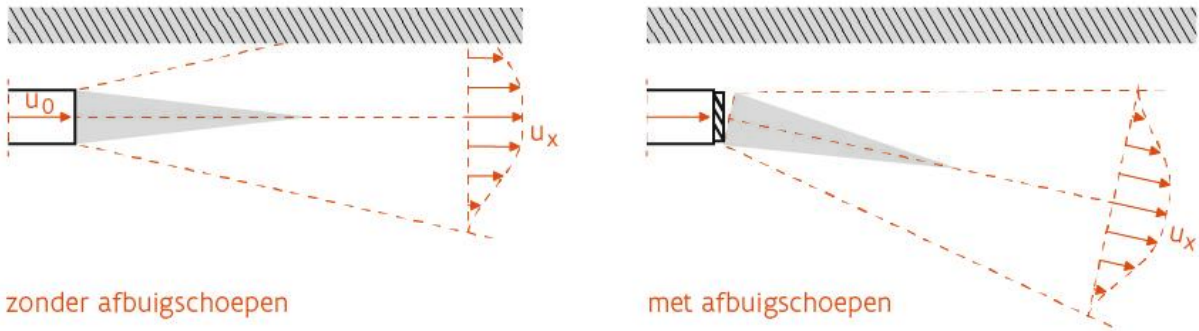
Injectieventilatoren worden direct in de ingang van de tunnel geplaatst en wel zo dat ze vrij buitenlucht kunnen aanzuigen. De aangezogen lucht hoeft daardoor niet door de tunnelopening te stromen. Meestal worden injectieventilatoren onder een hoek aangebracht zodat geen afbuigspoepen nodig zijn. Volgens de gehanteerde definitie voor het opstellingsrendement kan bij injectieventilatoren het opstellingsrendement een stuk hoger liggen dan wanneer dezelfde ventilator in de tunnel wordt geplaatst. Een deel van de luchtstroming door de tunnel wordt rechtstreeks aangezogen en de tunnel ingeblazen, maar door de aanjaagwerking wordt ook de lucht bij het ingangsportaal mee de tunnel ingezogen.

Het grote voordeel van injectieventilatoren is dat de kans dat deze uitvallen in de mengzone van de brand zo goed als 0 % is.

3.4.7.4 EFFECT VAN AFBUIGSCHOEPEN

Eén van de oplossingen om het opstellingsrendement te verbeteren is het aanbrengen van afbuigspoepen aan de uitblaa zijde.

²⁶ Steunpunt Tunnelveiligheid (2005). *Aanbevelingen Ventilatie van Verkeerstunnels*.



Figuur 3-9: Uitblaadpatroon aanjaagventilator zonder en met afbuigschoepen

Het gebruik van afbuigschoepen zorgt echter zelf voor een stuwkrachtverlies van ongeveer 4 – 4,5 %. Dit verlies moet opwegen tegen de winst aan opstellingsrendement.

4 CFD-STUDIES (*COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*)

4.1 INLEIDING

In tunnels met langsv ventilatie waar belangrijke gradiënten in lichtsnelheid over de doorsnede worden verwacht, kan het raadzaam zijn 3D-berekeningen uit te voeren. De simulatie van het gedrag van rook onder dwarsventilatie in de voertuigkoker dient sowieso driedimensionaal te gebeuren om een realistisch beeld te krijgen van de (beperking van) rookverspreiding.

De verschillen tussen commerciële softwarepakketten zijn te groot om één aanpak qua modellering voor te stellen. Het is wel nuttig om een eenduidig afwegingskader te hanteren voor de bepaling van de efficiëntie van de ventilatie. Het begrip “kritische snelheid” is in dit geval niet meer nuttig. Dit hoofdstuk gaat in op de mogelijke criteria die kunnen gebruikt worden om de gesimuleerde rook op ooghoogte te evalueren, zodat nagegaan kan worden waar nog leefbare condities zijn en waar niet. Het eerste deel van dit hoofdstuk gaat nader in op het effect van rookgassen en hitte op het menselijk lichaam.

Er zijn verschillende redenen waarom het raadzaam kan zijn enkele gerichte 3D-simulaties uit te voeren, zelfs indien een uitgebreide 1D-studie werd uitgevoerd. Deze worden kort besproken in het tweede deel van dit hoofdstuk.

Daar waar 3D-simulaties tot extra inzichten kunnen leiden, bestaat ook het gevaar dat dankzij de presentatie van mooie kleurtekeningen en video's van rookverspreiding de kritische blik verloren gaat *qua* veelheid aan scenario's die in werkelijkheid kunnen optreden. Daar 3D-berekeningen veel rekentijd vragen, worden meestal maar een beperkt aantal scenario's doorgerekend en bekomt men niet altijd het probabilistische inzicht in mogelijke combinaties van externe inputparameters, zoals verkeer, wind, positie van ventilatoren en/of kleppen ten opzichte van de brand, grote en kleine branden, plasbranden op een helling, enzovoorts. De scenario's dienen dus met zorg gekozen te worden.

De simulatie van van een ventilatieconcept door middel CFD analyses worden gebaseerd op brandscenario's die gemodelleerd worden in functie van de brandlast (heat release rate per tijdseenheid), *soot release* (mate van vrijkomen van organische deeltjes per tijdseenheid) en het vrijkomen van giftige gassen (waaronder CO, HCN, CO₂ de belangrijkste zijn). Verschillende softwarepakketten stellen hier dikwijls verschillende defaultwaarden of curven voor. Deze dienen altijd afgestemd te worden tussen de bouwheer en ontwerper.

4.2 INVLOED VAN BLOOTSTELLINGSFACTOREN OP HET MENSELIJK LICHAAM

Indien CFD's worden doorgevoerd, wordt over het algemeen de tijdsafhankelijke rookontwikkeling en verhoging van de temperatuur bepaald. Indien de tunnelgebruiker er niet in slaagt de dichtstbijzijnde vluchtdeur te bereiken voordat de temperatuur of samenstelling van de rookgassen hem/haar fataal worden, wordt deze bij het aantal dodelijke slachtoffers gerekend. Deze blootstellingsfactoren worden hieronder toegelicht.

4.2.1 HETE GASSEN

Mensen die zich in hete lucht of rook bevinden, kunnen letsel oplopen door huidverbranding of longverbranding. Boven 150 °C ontstaan binnen 5 minuten huidbrandwonden. Onder de 70 °C kan iemand oncomfortabel, maar wel veilig, langere tijd verblijven.

Samenvattend worden voor het verblijf in een warme omgeving de volgende kritieke waarden voorgesteld:

- hinderlijk: temperatuur = 70 °C in droge omgeving (oncomfortabel, maar wel veilig, langere tijd te verblijven);
- dodelijk: temperatuur = 150 °C (er ontstaan binnen 5 minuten brandwonden op de huid).

4.2.2 WARMTESTRALING

Personen kunnen worden bedreigd door de warmtestraling die wordt uitgezonden door hete gassen en vaste oppervlakken. Volgens het achtergronddocument van *QRA-tunnels 2.0* zal blootstelling aan warmtestraling volgende effecten hebben:

- 1 % van de blootgestelden loopt eerstegraads verbranding op bij 3 kW/m³ gedurende 30 seconden of 4,1 kW/m² gedurende 20 seconden of 6,9 kW/m² gedurende 10 seconden;
- 1 % van de blootgestelden loopt letaal letsel op bij 7,2 kW/m³ gedurende 30 seconden of 9,8 kW/m² gedurende 20 seconden of 16,5 kW/m² gedurende 10 seconden.

Verder zullen voor traag ontwikkelende branden, de slachtoffers stroomafwaarts van de brand eerder vallen ten gevolge van de effecten (temperatuur en toxiciteit) van de rookgassen. Voor snel ontwikkelende branden geldt dit ook voor de bovenstroomse zijde. Enkel bij een trage brand moet dus gekeken worden of er bovenstrooms extra slachtoffers vallen door straling, bovenop de gevallen die te wijten zijn aan de rookgassen.

In de literatuur zijn verschillende grenzen voor stralingsflux te vinden in functie van het % slachtoffers en de blootstellingstijd die voorgesteld worden. Als conservatief criterium kunnen volgende vereenvoudigde criteria gebruikt worden in de incidentkoker, gebaseerd op het effect na blootstelling gedurende 100 seconden volgens de AVV:

- hinderlijk : stralingsflux = 2 kW/m² (helpt vluchtenden eerstegraads brandwonden);
- dodelijk : stralingsflux = 6 kW/m² (helpt vluchtenden zal omkomen).

Als criterium voor de ondersteunende koker of veilige vluchtweg of verblijfsruimte voor langere tijd kan gesteld worden dat de straling niet hoger mag worden dan 1 kW/m².

4.2.3 TOXISCHE GASSEN

Toxische gassen die via de ademhaling in het bloed worden opgenomen hebben verschillende effecten:

- CO en CO₂ hebben een verstikkende werking, waardoor bij hoge concentraties mensen snel het bewustzijn kunnen verliezen;
- een aantal verbrandingsgassen bemoeilijken het functioneren. De belangrijkste zijn H₂S, NO_x, NH₃, SO₂, HF en HCN. In principe zal er altijd lichaamsschade optreden wanneer iemand aan deze gassen wordt blootgesteld.

Het moment waarop personen bezwijken aan toxische gassen is zeer verschillend van persoon tot persoon, maar deze probabilistische parameter wordt in de praktijk sterk vereenvoudigd tot één bezwijkmoment. Het moment waarbij vluchtende tunnelgebruikers niet meer in staat zijn tot verder vluchten kan aan de hand van de FID²⁷ (*Fractional Incapacitating Dose*) worden bepaald. Deze factor houdt rekening met graad van blootstelling aan CO, HCN en het gebrek aan zuurstof.²⁸ De concentratie CO₂ heeft een invloed in de FID omdat een teveel aan CO₂ de ademhaling versnelt via hyperventilatie en dus de blootstelling aan CO en HCN zo verergert.

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

waarbij:

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

²⁷ Purser, D. (1995). *Toxicity assessment of combustion products*. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd edition. Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association.

²⁸ "Building exodus manual", University of Greenwich, 2004

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

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

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

waarbij:

t = de blootstellingstijd in minuten;

$V\%$ = de concentratie van een stof in volumeprocent;

$[HCN]$ = de concentratie van HCN in ppm; $[CO]$ is de concentratie van CO in ppm;

RMV = het 'Respiratory Minute Volume', ofwel het aantal liters dat men per minuut inademt. Hiervoor mag 25 l/min gebruikt worden.

In de praktijk mag de FID op een vereenvoudigde wijze berekend worden, waarbij enkel de concentratie CO expliciet wordt bepaald via de modellering²⁹. De invloed van HCN en O2 wordt bepaald via een correctiefactor F_{corgas} uit Tabel 4-1 in functie van het type brand. De invloed van de hyperventilatiefactor VCO_2 mag uit Tabel 4-2 gehaald worden.

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

Tabel 4-1: Correctiefactor giftige rookgassen F_{corgas}

Soort brand	F_{corgas}	F_{corgas}
	Wel ventilatie	Geen ventilatie
plasbrand 300 m ² en 1200 m ²	9	9
plasbrand 30 m ²	1	1
voertuigbranden	1,5	1

Tabel 4-2: Hyperventilatiefactor VCO_2

Grootte brand	VCO_2	VCO_2
	Wel ventilatie	Geen ventilatie
plasbrand 1200 m ²	10	15
plasbrand 300 m ²	10	15
plasbrand 30 m ²	1,5	3
200 MW	3	5
100 MW	1	2
50 MW	1	1,5
kleiner	1	1

Tot een FID < 0,3 kan verondersteld worden dat personen nog vlot kunnen vluchten. Voor een FID tussen 0,3 en 1 wordt het vluchtproces ernstig gehinderd. Als de FID gelijk aan of groter is dan 1 kan worden verondersteld dat personen zullen overlijden.

Bovenstaande formule laat toe de FID te berekenen voor constante concentraties. Om rekening te houden met het werkelijke verloop van concentraties bij brand, kan een eindige som gemaakt worden van de tijdstippen waarop de concentraties berekend zijn.

²⁹ De voorgestelde vereenvoudiging is overgenomen uit de achtergronddocumentatie van QRA-tunnels 2.0.

Om het effect van rookgassen op de vluchtsnelheid te bepalen is het belangrijk te weten hoeveel van welke potentieel gevaarlijke rookgassen er worden geproduceerd in een brand. Onderstaande tabel komt uit het achtergronddocument van *QRA-tunnels 2.0* en kan als default gebruikt worden:

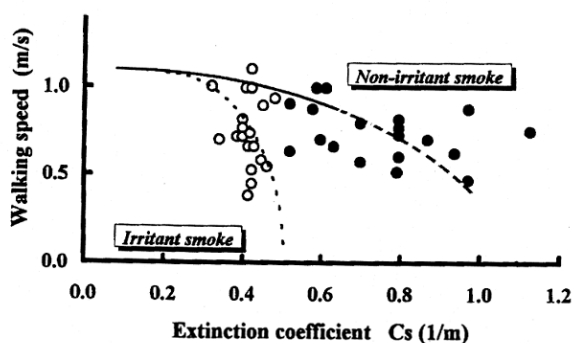
Tabel 4-3: Productiefactor giftige rookgassen

Stof	Productiefactor
CO	3,33 g/MJ
HCL	1,95 g/MJ
NOx	0,1 g/MJ
HCN	0,0125 g/MJ

4.2.4 VERLIES VAN ZICHT

Ook zichtverlies door aanwezige rook is een bedreiging bij brand. Hierdoor treedt desoriëntatie op met als gevolg dat mensen niet meer in staat zijn om (snel) de vluchtuitgangen te bereiken. Maatgevend voor de zichtomstandigheden is de zichtlengte, omdat daarmee wordt bepaald of personen de nooduitgangen nog kunnen zien.

Jin (1997) heeft volgende relaties vastgesteld tussen de (licht)extinctiecoëfficiënt k (aangeduid als C_s in Figuur 4-1) en de wandelsnelheid. In Figuur 4-1 is duidelijk dat er voor irriterende rook een omslagpunt is rond $k = 0,4$ waarbij de wandelsnelheid sterk daalt.



Figuur 4-1: Relatie tussen extinctiecoëfficiënt en vluchtsnelheid in rook volgens Jin (1997)

In simulaties waarbij het vluchtgedrag samen met de rook gesimuleerd wordt, kunnen de volgende veronderstellingen gebruikt worden:

- zolang de extinctiecoëfficiënt onder 0,4 blijft³⁰, mag men uitgaan van een vluchtsnelheid van 1,1 m/s;
- eens het zicht minder goed wordt, daalt deze snelheid tot 0,3 m/s.

De uitstoot van roetdeeltjes die zorgen voor de rookontwikkeling en bijbehorend verlies aan zicht van een brand is sterk afhankelijk van de (on)zuiverheid van de brandstof. Een veel gebruikte waarde voor het rookpotentieel (RP waarde) is het zogenaamde RP-mengsel Benelux³¹ dat een rookpotentieel geeft van 400 m⁻¹m³/kg. De keuze van het rookpotentieel dient in onderlinge afstemming bepaald te worden.

³⁰ Dit komt overeen met een zichtlengte van 7,5 m. Alternatief mag ook een zichtlengte van 10 m als limiet genomen worden.

³¹ Zie bijvoorbeeld annex B in het achtergronddocument van QRA-tunnels 2.0 of "Rookdichtheid en zichtlengte" van Ruud van Herpen, kennisbank bouw fysica voor respectievelijk een dieselbrand en autobrand in een parkeergarage.

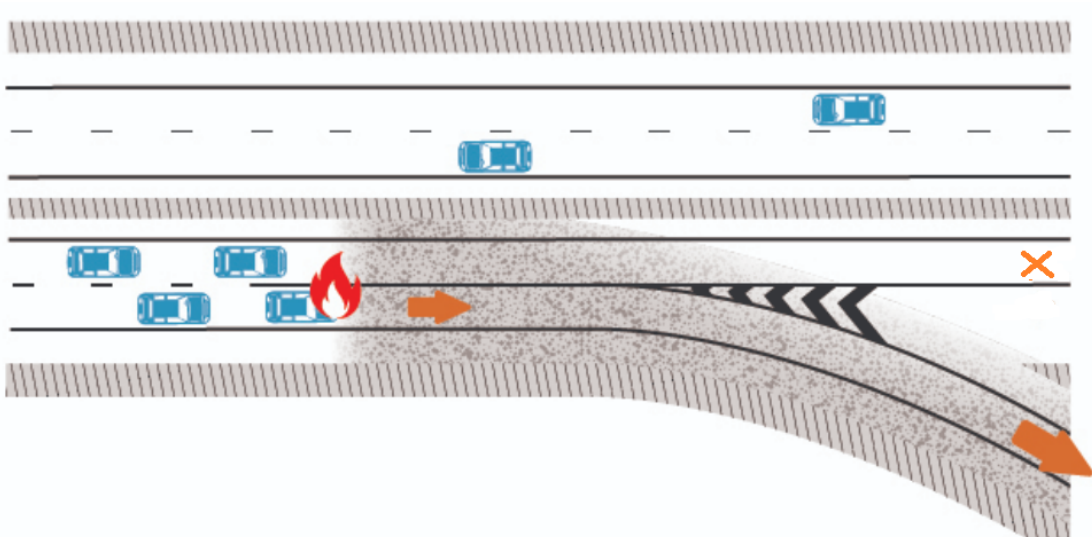
4.3 WANNEER IS CFD AANGERADEN?

Hieronder worden de gevallen opgesomd waarbij het aan te raden is gericht enkele 3D-simulaties uit te voeren voor tunnels met langsventilatie.

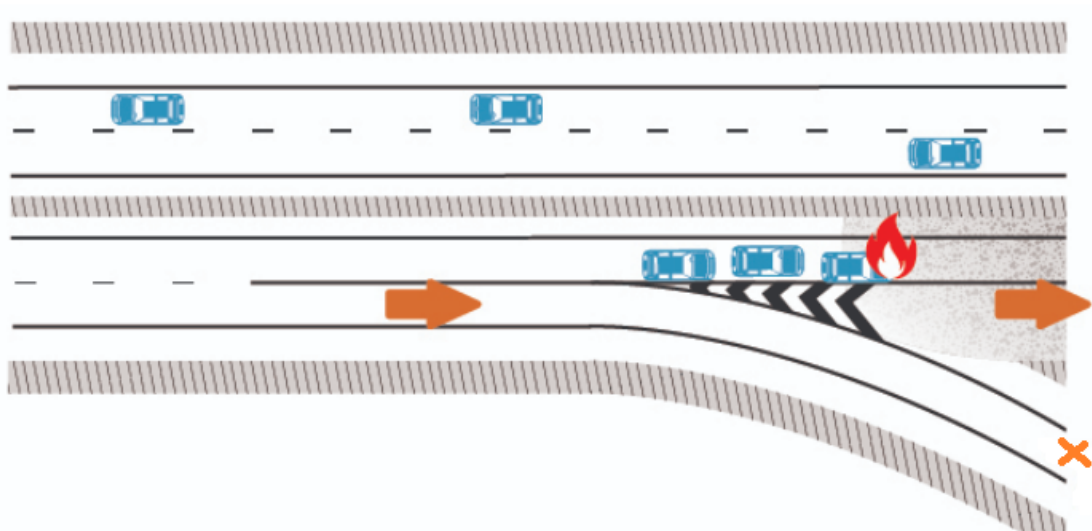
4.3.1 TUNNEL MET SPLITSINGEN

In TEN-V-tunnels > 500m mag het aantal rijstroken niet veranderen in de tunnel, maar dienen deze veranderingen ruim voor het ingangsportaal voorzien te worden. Voor andere tunnels is dit niet verboden, maar blijft het niet aan te raden in- of uitvoegers, splitsingen of samenvoegingen te voorzien indien er andere alternatieven zijn.

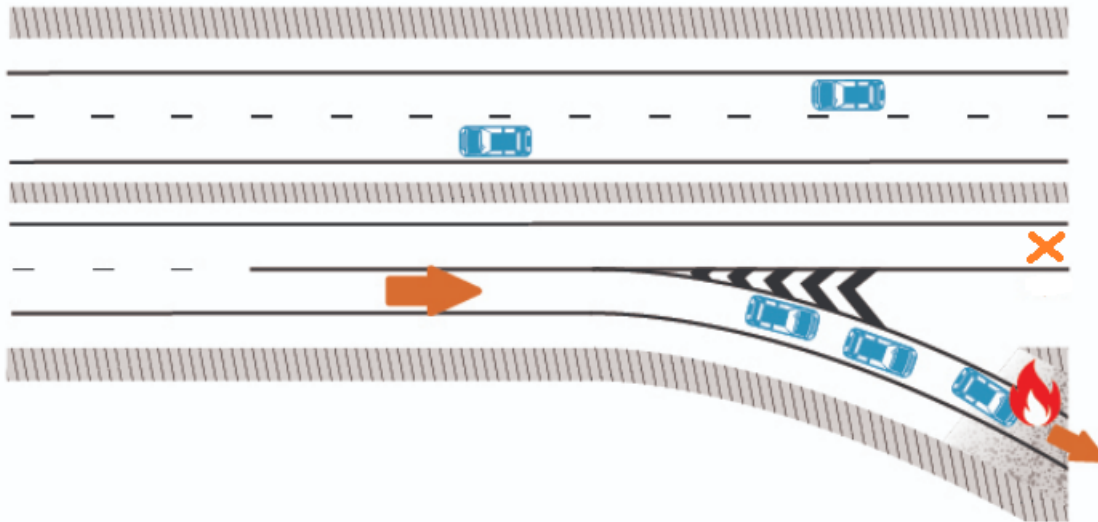
In geval toch splitsingen of samenvoegingen in een tunnel voorzien worden, is het raadzaam te overwegen of best één eenduidig ventilatieregime of verschillende ventilatieregimes, afhankelijk van de plaats van de brand worden voorzien. Figuur 4-2 tot 4-4 geeft ter illustratie enkele schematische voorbeelden van mogelijke ventilatieregimes in een tunnel met een splitsing in functie van de plaats van de brand. Hierbij wordt verondersteld dat de rijrichting die naar links afslaat de hoofdrichting is en zowel meer verkeer bevat als langer is.



Figuur 4-2: Tunnel met korte afrit na splitsing; brand voor splistingspunt, ventilatieregime 1



Figuur 4-3: Tunnel met korte afrit na splitsing; brand doorgaand verkeer na splistingspunt, ventilatieregime 2



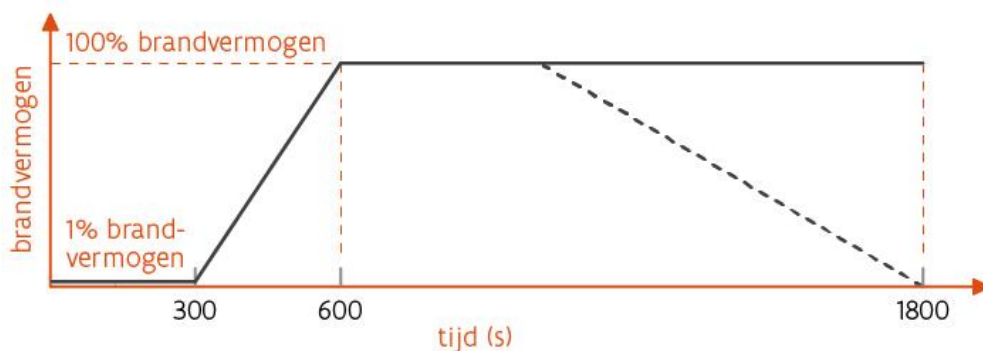
Figuur 4-4: Tunnel met korte afrit na splitsing; brand afrit na splistingspunt, ventilatieregime 3

Indien verschillende ventilatieregimes worden gebruikt in functie van de plaats van de brand, dient men ook de nodige voorzieningen te implementeren die een snelle en nauwkeurige plaatsbepaling van de brand verzekeren. Ook dient automatisch een hierop afgestemd ventilatieregime aan de operator van het Verkeerscentrum voorgesteld te worden, waarbij deze nog wel de kans krijgt om het regime handmatig aan te passen als hij/zij waarneemt dat de plaatsbepaling niet klopt. Het verdient ook aanbeveling de extra risico's in kaart te brengen indien een grote brand dicht bij het splitsingspunt plaatsvindt, daar er dan een reëel risico kan zijn op een foute plaatsbepaling ten opzichte van het splitsingspunt. Aan de hand van een CFD-studie dient nagegaan te worden wat de effecten stroomopwaarts van de brand kunnen zijn als een verkeerd regime ingesteld wordt.

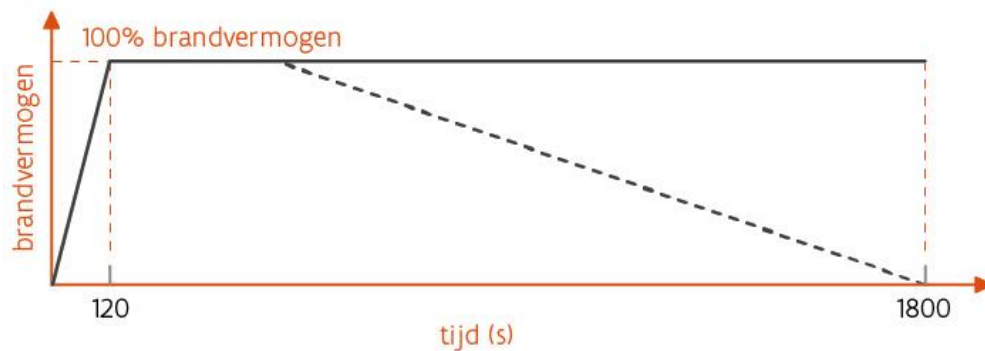
4.3.2 TIJDSAFHANKELIJK MODELLEREN

In eerste instantie richten simulaties zich in een ventilatieontwerp op het beheersen van de *steady state* toestand. In sommige gevallen kan het echter interessant zijn om het werkelijke tijdsverloop van de brand te simuleren om bijvoorbeeld te effectiviteit van de integrale maatregelen, inclusief de timing van de te nemen acties, in de eerste 10-15 minuten beter te kunnen inschatten. In dat geval mogen volgende timings aangenomen worden.

- langzame brand: de brand ontwikkelt zich lineair tot zijn volle vermogen in een tijdspanne van 10 minuten. De eerste 5 minuten zal de brand nog smeulen (1 %) en daarna lineair oplopen tot zijn maximale vermogen;
- snelle brand (plasbrand): de brand ontwikkelt zich onmiddellijk lineair tot zijn volle vermogen in een tijdspanne van 2 minuten.



Figuur 4-5: Trage brandontwikkeling in functie van tijd (de stippellijn is voor kleine branden voor 5 MW en 10 MW, daar hier de 'brandstof' voor de brand na 30 minuten op is)



Figuur 4-6: Snelle brandontwikkeling in functie van tijd (de stippellijn is voor kleine branden voor 5 MW en 10 MW, daar hier de 'brandstof' voor de brand na 30 minuten op is)

Indien de verspreiding van rook afgezet wordt ten opzichte van de vluchtsnelheid, dient ook rekening gehouden te worden met realistische detectie- en reactietijden van de sensoren en betrokken personen. Ook dient men rekening te houden met de gestaffelde³² opstarttijd van de ventilatoren en de tijd die nodig is om de luchtkolom in beweging te krijgen tot de gewenste stationaire toestand is bereikt.

4.3.3 KORTE OPEENVOLGING VAN TUNNELS

Zelfs indien tunnels niet in elkaars verlengde liggen, kan een korte opeenvolging van tunnels voor aerodynamische kortsluiting zorgen indien de windrichting ongunstig is.

In dit geval is het aan te raden een of enkele driedimensionale CFD-scenario's door te rekenen waarbij een ongunstige windrichting rookgassen van de ene naar de andere tunnel kan blazen. Die simulaties moeten inzicht geven in de blootstellingsfactoren waaraan de tunnelgebruikers van de tunnel die grenst aan de tunnel met brand in het slechtste geval aan blootgesteld worden. Indien de rook voldoende verdund wordt zodat noch de toxiciteit noch de temperatuur te hoog oploopt, dienen geen extra slachtoffers doorgerekend te worden. Indien de rook niet voor extra slachtoffers zorgt, maar wel het zicht zodanig hindert dat extra incidenten zouden kunnen ontstaan in de aangrenzende tunnel, dienen extra veiligheidsmaatregelen overwogen te worden om deze hinder in te perken of zelfs volledig tegen te gaan.

4.3.4 TUNNEL GEEFT TOEGANG TOT ANDERE ONDERGRONDSE COMPLEXEN, ZOALS EEN PARKING

Bij tunnels die toegang geven tot andere ondergrondse complexen dient aan de hand van scenarioanalyses volop ingezet te worden op maatregelen die de verschillende systemen (tunnel, parking, enzovoorts) van elkaar scheiden op het moment dat er een brand of ADR-incident ontstaat. Dit kan door bijvoorbeeld brandwerende poorten te voorzien, tegenventilatie in te schakelen aan de knooppunten, enzovoorts. Dit dient zoveel mogelijk automatisch te gebeuren, gezien stresstesten uit het verleden hebben aangetoond dat menselijke interacties tussen verschillende exploitanten zo goed als altijd tot onaanvaardbare verlenging van de reactietijd of zelfs tot foute acties kunnen leiden.

4.3.5 DE DOORSNEDE VAN DE TUNNEL, DE SAMENSTELLING VAN HET VERKEER OF DE PLAATSING VAN TUNNELTECHNISCHE INSTALLATIES VRAAGT OM EEN LOKALE VERFIJNDE BENADERING

Een veelgehoorde kritiek op ProTuVem is dat de wrijvingsverliezen ten gevolge van verkeer niet altijd conservatief genoeg worden ingeschat. Dit is effectief het geval indien de doorsnede van de tunnel beperkt is en er hierdoor weinig plaats is voor de tunneltechnische installaties. Dit heeft namelijk tot gevolg dat in de

³² De opstart van een ventilator leidt tot een kortstondige vermogenspiek, waardoor men ze niet allemaal tegelijk kan opzetten. Als grootteorde voor een berekening kan men 5 s tussen elke opstart van een ventilator vooropstellen.

uitblaasstraal van de ventilatie reeds lokaal grote verliezen zullen optreden ten gevolge van wrijving met de bovenzijde van een vrachtwagen of ten opzichte van het plafond. Daar dicht bij de uitblaasstraal de lokale luchtsnelheid nog vele malen groter is dan verder stroomafwaarts, zullen de verliezen lokaal vele malen groter oplopen. Hetzelfde geldt wanneer de ventilator dicht tegen de wand of het plafond wordt opgesteld of wanneer andere tunneltechnische installaties in de buurt van de uitblaasstraal worden geplaatst.

4.3.6 CONTROLE VAN DE BEPALING VAN DE KRITISCHE SNELHEID

De kritische snelheid voor *backlayering* is afhankelijk van het brandvermogen en de geometrie van de tunnel. Naast testresultaten zijn er een aantal theoretische benaderingen voor het berekenen van de kritische snelheid, maar die leverden tot op heden geen eensluidende resultaten op. Dit zorgt ervoor dat in verscheidene publicaties evenzovele voorstellen terug te vinden zijn voor de bepaling van de kritische snelheid. Zelfs indien de kritische snelheid wordt bepaald via de NFPA 502 versie 2017, zoals aangegeven in §2.2.2, kan het nuttig zijn een 3D scenario door te rekenen. Hierbij worden best scenario's gekozen waarbij in de 1D-studie nog net de kritische snelheid werd behaald. Indien de CFD effectief aantoont dat er geen beduidende rookverspreiding stroomopwaarts van de brand plaatsvindt eens *steady state* is bereikt, bevestigt dit dat de bepaling van de kritische snelheid waarschijnlijk voldoende conservatief is gebeurd.

REFERENTIES

- Codex boek VI - Chemische, kankerverwekkende, mutagene en reprotoxische agentia; titel 1- Chemische agentia. (n.d.).
https://www.praxistraining.be/images/WETGEVING/Codex_boek_VI_titel_1_Chemische_agentia.pdf
- Codex over het welzijn op het werk Boek V.- Omgevingsfactoren en fysische agentia Titel 2.- Lawaai. (n.d.).
<https://werk.belgie.be/sites/default/files/content/documents/Welzijn%20op%20het%20werk/Regelgeving/Codex%20boek%20V%20titel%202%20Lawaai.pdf>
- National Fire Protection Association (NFPA). (2023). *NFPA 502: Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways (2023 Edition)*.
- National Fire Protection Association (NFPA). (2017). *NFPA 502: Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways (2017 Edition)*.
- National Fire Protection Association (NFPA). (2014). *NFPA 502: Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways (2014 Edition)*.
- Purser, D. (1995). *Toxicity assesment of combustion products*. In: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd edition. Quincy, Massachussets: National Fire Protection Association.
- PIARC. (2019). *Road Tunnels: Vehicle Emission and air demand for ventilation*.
<https://www.piarc.org/ressources/publications/10/30199,2019R02-EN.pdf>
- Rijkswaterstaat. (2015). *Capaciteitswaarden Infrastructuur Autosnelwegen (Handboek, versie 4)*. Dienst Water, Verkeer en Leefomgeving, Rijkswaterstaat | GPO.
https://www.rijkswaterstaat.nl/zakelijk/werken-aan-infrastructuur/bouwrichtlijnen-infrastructuur/auto_snelwegen
- Rijkswaterstaat. (2012). Gebruikershandleiding QRA-tunnels 2.0.
https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_159718_31/
- Rijkswaterstaat. Softwarepakket ProTuVem, gratis aan te vragen via:
<https://www.rijkswaterstaat.nl/zakelijk/werken-aan-infrastructuur/bouwrichtlijnen-infrastructuur/aanleg-tunnels/steunpunt-tunnelveiligheid/basismaatregelen>
- Rijkswaterstaat. (2021). *Landelijke Tunnelstandaard*.
<https://www.rijkswaterstaat.nl/zakelijk/werken-aan-infrastructuur/bouwrichtlijnen-infrastructuur/aanleg-tunnels/landelijke-tunnelstandaard>
- Rijkswaterstaat. (2017). *Addendum 'Verificatie en validatie overdruksystemen MTK wegtunnels, Beschrijving methodiek', rapport nr. V 1159-2-RA-003 d.d. 24 april 2014 (Peutz); 1 oktober 2017*.
- Steunpunt Tunnelveiligheid (2005). *Aanbevelingen Ventilatie van Verkeerstunnels*.
https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_125999_31/
- The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), *Nitrogen Dioxide* Geraadpleegd op 5 oktober 2022, van <https://www.cdc.gov/niosh/pe188/10102-44.html>
- Vlaamse overheid. Agentschap Wegen en Verkeer. (2021). *ObjectTypenBibliotheek (OTL)*. Geraadpleegd 16 augustus 2021 op <https://wegenenverkeer.be/zakelijk/bim/otl>

- Vlaamse overheid. Agentschap Wegen en Verkeer. *Over ons*. Geraadpleegd 16 augustus 2021 op <https://wegenenverkeer.be/over-ons>
- Vlaamse overheid. Vlaamse Milieumaatschappij. *Concentratie stikstofdioxide (NO₂) in de omgevingslucht*. Geraadpleegd 5 oktober 2022 op <https://www.vmm.be/lucht/stikstof/concentratie-stikstofdioxide>
- World Road Association (PIARC). (2019). *Road Tunnels: Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation*. <https://www.piarc.org/ressources/publications/10/30199,2019R02-EN.pdf>
- World Health Organization (WHO). (2000). *Air quality guidelines for Europe, 2nd edition*. World Health Organization, Regional Office for Europe.

ANNEX A: TABELLEN EN GRAFIEKEN TER BEPALING VAN DE WINDDRUK CP

De coëfficiënten voor de benaderingsformules windinvloed CP10 kunnen als volgt bepaald worden volgens de achtergrondredenering van de AVV:

- 1 Bepaal de configuratie via Tabel 3-4.

Hierbij moet volgens de AVV een combinatie onder de noemer 'met lichtrooster boven ingangsportaal' gekozen worden voor de kant van het uitgangsportaal indien het een tunnel met lichtrooster aan het ingangsportaal is en dit onafhankelijk van het feit of het uitgangsportaal al dan niet een lichtrooster heeft. In de studie die gediend heeft tot opmaak van de formules voor CP10 is namelijk de invloed van een lichtrooster op het ingangsportaal voor zowel het ingangs- als uitgangsportaal bestudeerd.

-
- 2 Bepaal de verhouding tussen de luchtsnelheid in de tunnel en de windsnelheid (u_t/u_w)

Daarbij geldt dat in de formule voor CP10 de verhouding u_t/u_w positief is wanneer de lucht bij het ingangsportaal naar binnen en bij het uitgangsportaal naar buiten stroomt (met de verkeersrichting mee) en negatief wanneer de lucht bij het uitgangsportaal naar binnen en het ingangsportaal naar buiten stroomt (tegen de verkeersrichting in).

De windfactoren zijn gegeven voor discrete verhoudingen van u_t/u_w . Voor andere verhoudingen kan onderstaande werkwijze worden aangehouden:

- $0 < u_t/u_w < \frac{1}{2}$: lin. interpolatie tussen waarden voor $u_t/u_w = 0$ en $u_t/u_w = \frac{1}{2}$;
- $\frac{1}{2} < u_t/u_w < 1$: lin. interpolatie tussen waarden voor $u_t/u_w = \frac{1}{2}$ en $u_t/u_w = 1$;
- $1 < u_t/u_w$: lin. interpolatie tussen waarden voor $u_t/u_w = 1/2$ en $u_t/u_w = 1$ (in principe dus extrapolatie van curve tussen $\frac{1}{2}$ en 1 naar waarden > 1);
- $-\frac{1}{2} < u_t/u_w < 0$: lin. interpolatie tussen waarden voor $u_t/u_w = -\frac{1}{2}$ en $u_t/u_w = 0$;
- $-1 < u_t/u_w < -\frac{1}{2}$: lin. interpolatie tussen waarden voor $u_t/u_w = -1$ en $u_t/u_w = -\frac{1}{2}$;
- $u_t/u_w < -1$: lin. interpolatie tussen waarden voor $u_t/u_w = -\frac{1}{2}$ en $u_t/u_w = -1$ (in principe dus extrapolatie van curve tussen $-\frac{1}{2}$ en -1 naar waarden < -1);

-
- 3 Lees in onderstaande tabel de coëfficiënten af voor de benaderingsformules van CP10
-

Configuratie		Factoren ingangsportaal						Factoren uitgangsportaal							
RWS1	ut/uw	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6
	-1	-0,13	0,09	-0,06	-0,01	-0,04	-0,02	0,01	-0,05	0,62	0,17	0	-0,01	0,05	-0,03
	-0,5	-0,03	0,19	0,02	0,03	-0,02	0,01	0,02	0,02	0,47	0,14	-0,03	-0,03	0,03	-0,01
	0	0	0,24	0,06	0,01	-0,01	0	0	0,1	0,34	0,1	-0,03	-0,04	0,01	0,01
	0,5	-0,01	0,33	0,14	-0,01	-0,03	-0,01	-0,01	0,12	0,24	0,09	-0,02	-0,07	0,04	0
	1	-0,1	0,41	0,19	-0,03	-0,06	-0,02	-0,01	0,07	0,15	0,05	-0,01	-0,13	0,05	0,02
RWS2	ut/uw	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6
	-1	-0,13	0,1	-0,06	0	-0,02	-0,03	0,01	-0,08	0,62	0,15	0,06	0,04	0,02	-0,05
	-0,5	-0,03	0,2	0,02	0,04	0	0	0,02	-0,01	0,47	0,12	0,03	0,02	0	-0,03
	0	0	0,25	0,06	0,02	0,01	-0,01	0	0,07	0,34	0,08	0,03	0,01	-0,02	-0,01
	0,5	-0,01	0,34	0,14	0	-0,01	-0,02	-0,01	0,09	0,24	0,07	0,04	-0,02	0,01	-0,02
	1	-0,1	0,42	0,19	-0,02	-0,04	-0,03	-0,01	0,04	0,15	0,03	0,05	-0,08	0,02	0
RWS3	ut/uw	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6
	-1	-0,1	0,21	-0,02	-0,02	-0,03	-0,01	0,01	-0,04	0,63	0,17	-0,01	-0,02	0,05	-0,04
	-0,5	0	0,31	0,06	0,02	-0,01	0,02	0,02	0,03	0,48	0,14	-0,04	-0,04	0,03	-0,02
	0	0,03	0,36	0,1	0	0	0,01	0	0,11	0,35	0,1	-0,04	-0,05	0,01	0
	0,5	0,02	0,45	0,18	-0,02	-0,02	0	-0,01	0,13	0,25	0,09	-0,03	-0,08	0,04	-0,01
	1	-0,07	0,53	0,23	-0,04	-0,05	-0,01	-0,01	0,08	0,16	0,05	-0,02	-0,14	0,05	0,01
RWS4	ut/uw	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6
	-1	-0,08	0,2	-0,02	0	0	-0,02	0,02	-0,03	0,64	0,15	0,06	0,03	0,01	-0,05
	-0,5	0,02	0,3	0,06	0,04	0,02	0,01	0,03	0,04	0,49	0,12	0,03	0,01	-0,01	-0,03
	0	0,05	0,35	0,1	0,02	0,03	0	0,01	0,12	0,36	0,08	0,03	0	-0,03	-0,01
	0,5	0,04	0,44	0,18	0	0,01	-0,01	0	0,14	0,26	0,07	0,04	-0,03	0	-0,02
	1	-0,05	0,52	0,23	-0,02	-0,02	-0,02	0	0,09	0,17	0,03	0,05	-0,09	0,01	0
RWS5	ut/uw	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6
	-1	-0,13	0,21	-0,05	0,02	-0,02	-0,02	0,07	0,13	0,54	0,23	-0,08	-0,13	0,18	-0,09
	-0,5	0,05	0,26	0,03	0,03	0,02	-0,01	0,05	0,12	0,51	0,09	-0,11	-0,09	0,04	-0,07
	0	0,1	0,33	0,07	-0,04	0,01	0,01	0,04	0,14	0,38	0,08	-0,04	-0,06	0,02	-0,06
	0,5	-0,02	0,38	0,09	-0,11	0,1	0,03	0,08	0,13	0,25	0,08	-0,06	-0,11	0,01	-0,08
	1	-0,26	0,5	0,14	-0,16	0,19	0	0,02	0,09	0,14	0,03	-0,02	-0,25	0,01	-0,01
RWS6	ut/uw	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6
	-1	-0,09	0,31	-0,07	0,01	-0,02	-0,03	-0,01	-0,11	0,42	0,17	-0,08	-0,07	0,14	-0,01
	-0,5	0,03	0,37	0,02	0,04	0,05	-0,02	0,07	0,04	0,44	0,09	-0,04	-0,05	0,02	-0,08
	0	0,09	0,4	0,05	0	0,05	-0,05	0,06	0,1	0,42	0,05	-0,01	-0,03	0,01	-0,1
	0,5	0,02	0,41	0,09	-0,07	0,04	-0,05	0,05	0,05	0,36	-0,02	0,02	0,02	0	-0,09
	1	-0,13	0,41	0,2	-0,09	0,03	-0,14	0	-0,01	0,29	-0,13	0,04	0,04	0,06	0,02

Configuratie		Factoren ingangsportaal						Factoren uitgangsportaal							
RWS7	ut/uw	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6
	-1	0,01	0,2	-0,09	0,01	-0,14	-0,1	0,05	0,15	0,39	0,06	0,09	0,14	-0,01	0,03
	-0,5	0,11	0,31	-0,02	0,04	-0,08	-0,06	0,05	0,18	0,39	0,02	0,08	0,09	0,04	-0,04
	0	0,17	0,39	0,02	0,05	-0,04	-0,06	0,03	0,21	0,39	-0,01	0,03	0,04	0,01	-0,03
	0,5	0,14	0,4	0,02	0,09	-0,08	-0,03	0,05	0,12	0,33	-0,04	0,01	0,05	0,03	-0,07
	1	-0,13	-0,12	-0,04	0,09	-0,18	-0,02	-0,08	-0,21	-0,18	-0,05	0,03	0,14	0,14	0
RWS8	ut/uw	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6
	-1	-0,17	0,1	-0,05	-0,02	0,01	-0,04	0,03	-0,08	0,63	0,22	0	-0,08	0,09	-0,02
	-0,5	-0,06	0,2	0,03	0,02	0,03	-0,02	0,02	-0,01	0,49	0,18	-0,04	-0,1	0,05	-0,01
	0	-0,03	0,26	0,08	0	0,03	-0,03	0,01	0,07	0,36	0,15	-0,03	-0,11	0,04	0,01
	0,5	-0,09	0,32	0,2	-0,04	0,02	-0,02	0,04	0,08	0,25	0,1	0	-0,13	0,07	0,01
	1	-0,13	0,36	0,26	-0,04	-0,02	-0,03	0,08	0,04	0,15	0,06	0,02	-0,21	0,07	0,03
RWS9	ut/uw	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6
	-1	-0,18	0,25	-0,01	0,03	0,02	-0,06	0,08	0,12	0,57	0,29	-0,04	-0,2	0,22	-0,08
	-0,5	-0,02	0,32	0,08	0	0,03	-0,02	0,04	0,11	0,54	0,15	-0,07	-0,16	0,08	-0,06
	0	0,05	0,37	0,11	-0,03	0,05	-0,03	0,05	0,13	0,41	0,14	0	-0,13	0,06	-0,05
	0,5	-0,04	0,43	0,19	-0,12	0,1	-0,02	0,08	0,11	0,29	0,1	0	-0,17	0,08	-0,05
	1	-0,2	0,45	0,27	-0,15	0,16	-0,12	0,07	0,04	0,21	0,09	0,02	-0,28	0,09	0,02
RWS10	ut/uw	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6
	-1	-0,16	0,22	0,02	0	0,02	-0,07	0,12	-0,06	0,89	0,07	0,04	-0,14	0,14	0,01
	-0,5	-0,16	0,22	0,02	0	0,02	-0,07	0,12	-0,06	0,89	0,07	0,04	-0,14	0,14	0,01
	0	0,06	0,33	0,11	-0,04	0,01	0,04	0,05	0,16	0,41	0,18	-0,02	-0,11	0,08	-0,03
	0,5	-0,13	0,61	0,11	-0,09	0,04	0,04	0,07	0,14	0,25	0,1	-0,01	-0,14	0,04	-0,02
	1	-0,38	0,87	0,1	-0,13	0,09	-0,07	0,01	0,1	0,2	0,08	0,01	-0,23	0,03	0,07
RWS11	ut/uw	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6
	-1	-0,03	0,13	0,03	-0,02	-0,12	-0,08	0,04	0,1	0,32	0,13	0,06	0,12	-0,01	-0,03
	-0,5	0,08	0,24	0,1	0	-0,08	-0,04	0,03	0,12	0,33	0,12	0,03	0,05	0,05	-0,05
	0	0,09	0,31	0,13	-0,02	0,02	0	0,06	0,13	0,32	0,14	0	-0,05	-0,04	-0,03
	0,5	-0,07	0,65	0,14	-0,07	0,04	0,01	0,08	0,11	0,18	0,1	0,01	-0,04	-0,03	-0,02
	1	-0,24	1,04	0,3	-0,11	0,05	0	0,11	0,02	0,03	0	0,03	-0,07	-0,02	-0,01
RWS12	ut/uw	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6
	-1	0,03	0,13	-0,03	-0,04	-0,22	-0,09	0,08	0,16	0,34	0,11	0,05	0,21	0,01	0
	-0,5	0,13	0,24	0,04	-0,01	-0,16	-0,05	0,08	0,19	0,34	0,07	0,04	0,16	0,06	-0,07
	0	0,19	0,32	0,08	0	-0,12	-0,05	0,06	0,22	0,34	0,04	-0,01	0,11	0,03	-0,06
	0,5	0,12	0,5	0,09	0,02	-0,27	0,11	0,02	0,13	0,21	0,04	0,03	0,13	0,04	-0,04
	1	-0,26	0,41	0,01	0,03	-0,39	0,24	-0,09	-0,23	-0,29	0	0,1	0,09	0,07	0,05

Configuratie		Factoren ingangsportaal						Factoren uitgangsportaal							
RWS13	ut/uw	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6
	-1	-0,18	-0,06	0,07	0,01	0,11	0,06	-0,02	-0,06	0,59	0,16	0,01	0,41	-0,04	0,07
	-0,5	-0,06	0,07	0,17	0,03	0,08	0	-0,07	0,03	0,48	0,14	0,01	0,28	-0,01	0
	0	-0,06	0,15	0,21	0,03	0,06	-0,03	-0,07	0,1	0,34	0,16	0,02	0,24	0,01	0,01
	0,5	-0,2	0,43	0,22	0,06	0,03	-0,04	-0,06	0,09	0,27	0,09	-0,01	0,2	0,04	0,01
	1	-0,3	0,78	0,14	0,06	-0,03	-0,07	-0,12	0,05	0,22	0,03	-0,05	0,2	0,06	0,01
RWS14	ut/uw	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6
	-1	-0,1	0,08	0,02	0,03	-0,14	-0,03	-0,04	-0,08	0,66	0,32	0	0,2	0	-0,03
	-0,5	0,04	0,19	0,03	0,05	-0,19	-0,08	-0,02	-0,04	0,58	0,31	-0,02	0,06	-0,01	0,01
	0	0,08	0,24	0,02	0,06	-0,22	-0,11	0	0,03	0,44	0,28	-0,02	-0,02	0	-0,02
	0,5	-0,07	0,32	0,01	0,09	-0,4	-0,09	-0,08	0,12	0,36	0,13	-0,07	-0,01	-0,01	0
	1	-0,28	0,56	-0,01	0,14	-0,66	-0,03	-0,16	0,08	0,26	0,04	-0,08	0,04	0,01	0,01
RWS15	ut/uw	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6
	-1	-0,01	0,02	-0,09	0,02	-0,19	0,09	0,08	-0,08	0,62	0,22	0,01	0,44	-0,06	0,02
	-0,5	0,11	0,15	0,01	0,04	-0,22	0,03	0,03	0,01	0,51	0,2	0,01	0,31	-0,03	-0,05
	0	0,11	0,23	0,05	0,04	-0,24	0	0,03	0,08	0,37	0,22	0,02	0,27	-0,01	-0,04
	0,5	-0,03	0,51	0,06	0,07	-0,27	-0,01	0,04	0,07	0,3	0,15	-0,01	0,23	0,02	-0,04
	1	-0,13	0,86	-0,02	0,07	-0,33	-0,04	-0,02	0,03	0,25	0,09	-0,05	0,23	0,04	-0,04
RWS16	ut/uw	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6
	-1	-0,12	0,04	0,11	0,05	-0,2	-0,04	0,04	-0,18	0,86	0,16	0,09	0,58	-0,19	-0,06
	-0,5	0,04	0,18	0,11	0,05	-0,27	-0,08	0,02	-0,02	0,54	0,16	0,08	0,36	-0,05	-0,11
	0	0,1	0,31	0,14	0,06	-0,25	-0,06	0,1	0,1	0,32	0,14	0,04	0,24	0,03	-0,1
	0,5	-0,02	0,52	0,17	0,12	-0,39	0,06	0,11	0	0,14	0,04	0,02	0,28	0,13	0,04
	1	-0,17	0,8	0,17	0,17	-0,65	0,14	0	-0,11	0,09	0,12	0,05	0,23	0,05	-0,02