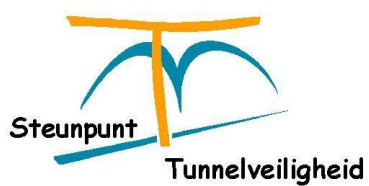

AANBEVELINGEN VENTILATIE VAN VERKEERSTUNNELS

December 2005



Steunpunt Tunnelveiligheid

Kennis- en adviescentrum veiligheid
ondergrondse en overkapte infrastructuur

Colofon

Uitgave

De Aanbevelingen Ventilatie van Verkeerstunnels is een uitgave van Rijkswaterstaat. De Aanbevelingen zijn door de Werkgroep Tunnelventilatie samengesteld in opdracht van het Steunpunt Tunnelveiligheid en de Vakgroep Tunnelinstallaties, beide behorend tot de Rijkswaterstaat Bouwdienst. De tekst van de Aanbevelingen is ter beoordeling voorgelegd aan externe deskundigen.

Werkgroep

ir. J.W. Huijben, voorzitter	Rijkswaterstaat Bouwdienst, Utrecht
ing. P. Fournier	Rijkswaterstaat Bouwdienst, Utrecht
ir. B.P. Rigter	Rijkswaterstaat Bouwdienst, Utrecht
dr. L.A. Brussaard	Rijkswaterstaat Bouwdienst, Utrecht
L. de Jong	Rijkswaterstaat Bouwdienst, Utrecht
ir. B. Derikx	Rijkswaterstaat Bouwdienst, Utrecht
ing. P. Hartman	DHV, Eindhoven / TEC, Veenendaal
ing. P.J.M Jansen	Arcadis Infra, Rotterdam

Extern advies

Ir. D. den Boer	Adviesbureau Peutz, Nijmegen
Ir. E.R. Schermer	Holland Rail Consult, Utrecht
Ir. J. Nieuwenhuizen	Arcadis Infra, Amersfoort
Ing. O.H.G. Jörg	Arcadis Infra, Amersfoort
Ir. E. Jacques	Université Catholique de Louvain
Ir. M.F. Ruland	Royal Haskoning, Nijmegen
Ir. F. Derksen	Royal Haskoning, Nijmegen

Redactie



L. van der Wagt	.DOC, Den Haag
-----------------	----------------

Druk

Thieme GrafiMedia Groep, Deventer

ISBN

90-369-0001-8

Goedgekeurd voor publicatie:		
Ir. J.W. Huijben	Voorzitter Werkgroep Tunnelventilatie	
Ir. E.W. Worm	Hoofd Steunpunt Tunnelveiligheid	



VOORWOORD

De eerste aanbeveling voor het ventileren van autotunnels, samengesteld door Rijkswaterstaat, is in 1975 gepubliceerd door het Koninklijk Instituut van Ingenieurs (KIVI). In 1991 is door de Rijkswaterstaat Bouwdienst in samenwerking met het KIVI een herziene uitgave uitgebracht om in te spelen op veranderde inzichten, uitbreiding van randvoorwaarden aan ventilatiesystemen en verbeterde berekeningsmethoden.

Sinds 1991 heeft de voortschrijdende kennis en ervaring wederom nieuwe inzichten opgeleverd. Er is nu veel meer bekend over windinvloeden, rendementen van ventilatoren, de invloed van brand op een ventilatiesysteem en de vereiste randvoorwaarden voor ventilatiesystemen. Maar het is vooral de motivatie om te ventileren die is veranderd. Vroeger bepaalde vooral de concentratie van schadelijke stoffen de noodzaak om verkeerstunnels te ventileren, maar door de afname van de specifieke emissie van voertuigen is dit bij de kortere tunnels niet meer het geval. Het inzicht is gegroeid dat goede ventilatie zeer belangrijk is om de rook en gasstromen bij brand te beheersen. De rook moet zo worden afgevoerd dat weggebruikers niet in de rookzone terecht komen en vluchtwegen zoveel mogelijk rookvrij blijven. Het belang van tunnelveiligheid is de afgelopen jaren onderstreept door een aantal ernstige tunnelbranden in het buitenland. De toenemende belangstelling voor dit onderwerp heeft geresulteerd in Europese en Nederlandse richtlijnen, die ook gevolgen hebben voor de eisen die aan de ventilatie van een tunnel worden gesteld. Er was daarom alle aanleiding om de nieuwe inzichten en ontwikkelde kennis in nieuwe Aanbevelingen vast te leggen en toegankelijk te maken voor opdrachtgevers, ontwerpers en beheerders. Dit boek past ook in het nieuwe beleid van de overheid, waarbij het ontwerp en beheer & onderhoud zoveel mogelijk aan commerciële partijen wordt overgelaten onder het motto “de markt tenzij ...”.

Tevens leefde de wens om een breder scala van mogelijke oplossingen met de voor- en nadelen aan te bieden. Dit heeft ertoe geleid dat de reikwijdte van de nieuwe Aanbevelingen Ventilatie van Verkeerstunnels afwijkt van vorige uitgaven. Die waren vrijwel uitsluitend gericht op systemen met langsventilatie. In deze nieuwe publicatie is ervoor gekozen een compleet overzicht te geven van beschikbare mogelijkheden tot ventileren.

Niettemin zijn de aangeboden berekeningsmethoden vooral gericht op langsventilatie, omdat daarmee in Nederland unieke kennis en ervaring is opgedaan. Voor het ontwerp van dwarsventilatiesystemen zijn voldoende andere publicaties beschikbaar. De vermelde basisgegevens kunnen als uitgangspunt dienen voor elk type ventilatiesysteem.

Deze Aanbevelingen zijn tot stand gekomen door de werkzaamheden van de Werkgroep Tunnelventilatie, verricht in opdracht van het Steunpunt Tunnelveiligheid en de Vakgroep Tunnelinstallaties, beide behorend tot de RWS Bouwdienst. De tekst van de Aanbevelingen is voor publicatie ter beoordeling voorgelegd aan een externe groep deskundige personen.

De werkgroep heeft een zo groot mogelijke zorgvuldigheid betracht bij de opstelling van de Aanbevelingen. Desondanks kan niet worden uitgesloten dat de Aanbevelingen onvolledig zijn of onvolkomenheden en/of onjuistheden bevatten. De werkgroep, de Rijkswaterstaat Bouwdienst en de andere betrokken partijen sluiten iedere aansprakelijkheid uit voor schade voortvloeiend uit het gebruik van deze Aanbevelingen.

Hierbij wil ik graag de leden van de werkgroep en de overige betrokken personen hartelijk danken voor hun inzet om de Aanbevelingen tot stand te brengen. Ook wil ik het Steunpunt Tunnelveiligheid van de Rijkswaterstaat Bouwdienst danken voor de geboden voorzieningen.

Ir. J.W. Huijben
Utrecht, december 2005

INHOUD

1	INLEIDING	1
1.1	Doel van de Aanbevelingen	1
1.2	Leeswijzer	1
1.3	Enkele algemene begrippen	1
2	VENTILATIESYSTEMEN	3
2.1	Algemeen	3
2.2	Natuurlijke ventilatie	3
2.3	Langsventilatie	7
2.4	Dwarsventilatie	9
2.4.1	<i>Volledige dwarsventilatie</i>	9
2.4.2	<i>Semi-dwarsventilatie</i>	11
2.5	Bijzondere systemen	12
2.5.1	<i>Portaalafzuiging</i>	12
2.5.2	<i>Rookafvoeropeningen op één of meer plaatsen</i>	13
2.5.3	<i>Reiniging van de tunnellucht</i>	15
3	TUNNELVENTILATIE: DOEL EN MIDDELEN	17
3.1	Veiligheid: Rook en warmteafvoer bij brand	17
3.1.1	<i>Doel van ventilatie bij brand</i>	17
3.1.2	<i>Invloed van ventilatie op rookbeweging</i>	18
3.1.3	<i>Invloed van ventilatie op de brand</i>	21
3.1.4	<i>Aanbevelingen voor de beheersing van rook en temperatuur</i>	23
3.2	Luchtkwaliteit: Beperking emissieconcentraties	24
3.2.1	<i>Algemeen</i>	24
3.2.2	<i>Aanbevelingen m.b.t. wettelijke voorschriften en normen</i>	25
3.2.3	<i>Aanbevelingen om concentraties binnen de tunnel te beperken</i>	27
3.2.4	<i>Aanbevelingen om concentraties buiten de tunnel te beperken</i>	27
3.2.5	<i>Monitoring</i>	28
3.3	Beheersing van de temperatuur	29
3.3.1	<i>Algemeen</i>	29
3.3.2	<i>Invloed van ventilatie op de tunneltemperatuur</i>	30
3.3.3	<i>Aanbevelingen om temperatuurstijging in de tunnel te beperken</i>	31
4	ONTWERPEN	33
4.1	Natuurlijke ventilatie	33
4.2	Langsventilatie	33
4.3	Ontwerpeisen	33
4.3.1	<i>Ventilatoropstelling</i>	34
4.3.2	<i>Keuze van de uitblaassnelheid</i>	38
4.3.3	<i>Keuze van bestendigheid tegen hoge temperatuur</i>	39
4.3.4	<i>Samenstelling van aanjaagventilatoren</i>	41
4.3.5	<i>Aërodynamica en Geluid</i>	44
4.3.6	<i>Ophanging van aanjaagventilatoren</i>	45
4.3.7	<i>Motorprestaties</i>	46
4.4	Dwarsventilatie	49
4.4.1	<i>Ontwerpeisen</i>	49
4.4.2	<i>Toevoer</i>	49
4.4.3	<i>Afvoer</i>	50
4.4.4	<i>Onderdelen</i>	50
4.4.5	<i>Geluid naar de omgeving</i>	51

4.4.6	<i>Kosten</i>	51
4.5	Voorkomen van aërodynamische kortsluiting bij tunnelportalen	51
4.5.1	<i>Algemeen</i>	51
4.5.2	<i>Aërodynamische kortsluiting en emissieconcentraties</i>	53
4.5.3	<i>Aërodynamische kortsluiting en brand</i>	57
4.5.4	<i>Berekening concentratie aërodynamische kortsluiting</i>	57
4.6	Ventilatie van vluchtwegen	58
4.6.1	<i>Rookvrij houden</i>	58
4.6.2	<i>Ontwerpaanwijzingen overdrukinstallatie vluchtgang</i>	60
5	UITGANGSPUNTEN VOOR DIMENSIONERING	63
5.1	Basisgegevens verkeer.....	63
5.1.1	<i>Verkeersdichtheid</i>	63
5.1.2	<i>Verkeerssamenstelling</i>	66
5.2	Dimensioneren op brand	67
5.2.1	<i>Langsventilatie</i>	67
5.2.2	<i>Dwarsventilatie</i>	69
5.3	Dimensioneren op luchtkwaliteit	69
5.3.1	<i>Vereiste luchtkwaliteit binnen de tunnel</i>	70
5.3.2	<i>Vereiste luchtkwaliteit buiten de tunnel</i>	72
5.3.3	<i>Berekening concentratie binnen de tunnel</i>	72
5.3.4	<i>Berekening concentratie buiten de tunnel</i>	76
5.3.5	<i>Bepaling van de hoeveelheid emissie</i>	76
5.3.6	<i>Kengetallen voor uitlaatgasemissies</i>	77
5.3.7	<i>Zichtcondities binnen de tunnel</i>	78
5.4	Dimensioneren op temperaturen	79
5.4.1	<i>Berekening luchttemperatuur in een tunnel</i>	79
5.4.2	<i>Aandachtspunten</i>	81
6	DIMENSIONEREN	83
6.1	Rekenmodellen	83
6.1.1	<i>Één- en tweedimensionale modellen</i>	83
6.1.2	<i>CFD-rekenmethode</i>	83
6.2	Deterministische en probabilistische berekeningen	85
6.2.1	<i>Algemeen</i>	85
6.2.2	<i>Probabilistische berekeningen i.v.m. emissie</i>	86
6.2.3	<i>Probabilistische berekeningen i.v.m. brand</i>	86
6.3	Conditie voor natuurlijke ventilatie.....	88
6.3.1	<i>Beperking emissieconcentratie</i>	88
6.3.2	<i>Afvoer van rook en warmte</i>	91
6.4	Dimensionering langsventilatie	93
6.4.1	<i>De evenwichtsvergelijking voor langsventilatie</i>	93
6.4.2	<i>Stromingsweerstand tunnelconstructie</i>	93
6.4.3	<i>Invloed verkeer op de luchtstroming</i>	95
6.4.4	<i>Meteorologische invloeden</i>	97
6.4.5	<i>Invloed van brand op langsventilatie</i>	102
6.4.6	<i>Stuwdruk van aanjaagventilatoren</i>	108
6.4.7	<i>Het stuwkrachtrendement</i>	109
6.4.8	<i>Het opstellingsrendement</i>	110
6.4.9	<i>Invloed van de tunnelluchtsnelheid op de stuwkracht</i>	113
6.4.10	<i>De specifieke stuwkracht</i>	114
6.4.11	<i>Invloed van temperatuur op de stuwkracht</i>	114
6.5	Dimensionering dwarsventilatie.....	115
6.5.1	<i>Dimensionering van de toevoerinstallatie</i>	115
6.5.2	<i>Dimensionering van de afvoerinstallatie</i>	115
6.5.3	<i>Algemene berekeningen dwarsventilatie</i>	116

7	VENTILATORGELUID IN DE TUNNELBUIJS	117
7.1	Grenswaarden	117
7.2	Berekening	119
8	CONTROLEMETINGEN	125
8.1	Aërodynamische metingen	125
8.1.1	<i>Ventilatoren</i>	125
8.1.2	<i>Ventilatiesysteem - Algemeen</i>	126
8.1.3	<i>Ventilatiesysteem - Langsventilatie</i>	127
8.1.4	<i>Ventilatiesysteem - Dwarsventilatie</i>	132
8.1.5	<i>Ventilatiesysteem - Overdrukventilatie</i>	133
8.2	Metingen van geluid	133
8.2.1	<i>Ventilatoren</i>	133
8.2.2	<i>Ventilatiesysteem</i>	133
8.3	Bepaling bestandheid tegen hoge temperatuur	134
8.3.1	<i>Ventilatoren</i>	134
8.3.2	<i>Roosters en brandkleppen</i>	135
9	BEDIENING EN BESTURING	137
9.1	ALGEMEEN	137
9.2	Besturing bij normaal bedrijf	137
9.3	Besturing bij brand/calamiteiten	139
10	Beheer en onderhoud	141
10.1	Inspectie, proefdraaien en testen	141
10.2	Bereikbaarheid	141
10.3	Melding bedrijfstoestand en storingen	141
10.4	Veiligheid	141
10.5	Beperken overlast voor het verkeer	141
10.6	Geheel of gedeeltelijk buiten bedrijf stellen	142
11	Achtergronden	143
11.1	ventilatie en brand	143
11.1.1	<i>Bepaling van de hoeveelheid rook</i>	143
11.1.2	<i>Ventilatie en incident-scenario's</i>	144
11.1.3	<i>Brand in een tunnel</i>	146
11.1.4	<i>Risicoanalyse</i>	147
11.1.5	<i>Overlevingscondities bij brand</i>	148
11.2	Stuwdrukverhoging door een aanjaagventilator	151
11.2.1	<i>Theorie van stuwdrukverhoging door een aanjaagventilator</i>	151
11.2.2	<i>Keuze van de uitblaassnelheid en het vermogensverbruik</i>	153
11.2.3	<i>Straaluitbreiding</i>	154
11.2.4	<i>Terugstroming en kortsluiting</i>	156
11.3	Luchtkwaliteit	157
11.3.1	<i>Soorten emissies</i>	157
11.3.2	<i>Grenswaarden</i>	158
11.3.3	<i>Datasets kengetallen voor uitlaatgasemissies</i>	161
11.3.4	<i>Bepaling van de emissieconcentratie in de tunnel</i>	161
11.4	Aërodynamische kortsluiting bij tunnelportalen	167
11.4.1	<i>Buitenlands onderzoek in de jaren 1958, 1967 en 1979</i>	167
11.4.2	<i>Onderzoek aan de Botlektunnel (1989 – 1990)</i>	169
11.4.3	<i>Onderzoek aan de Leidse Rijn tunnel (2004)</i>	176

11.5	Winddruk op tunnelportalen.....	176
11.5.1	<i>Inleiding</i>	176
11.5.2	<i>Beschrijving modelonderzoek Wijkertunnel</i>	176
11.5.3	<i>Winddruk en tunnelventilatie</i>	178
11.5.4	<i>Formulebenadering resultaten van de modelmetingen</i>	178
11.5.5	<i>Verhouding tunnelluchtsnelheid / windsnelheid u_t / u_{10}</i>	179
11.6	Faalkansen van een langsventilatiesysteem bij brand.....	180
11.6.1	<i>Inleiding</i>	180
11.6.2	<i>Overwegingen om de eisen aan te passen</i>	180
11.6.3	<i>Doel van ventilatie</i>	181
11.6.4	<i>Grenswaarden: de brandgrootte</i>	182
11.6.5	<i>Grenswaarden: kans op te lage ventilatiesnelheid</i>	182
12	LITERATUUR	185
13	Trefwoordenregister	189

BIJLAGEN

BIJLAGE A:	Voorschriften, normen en richtlijnen	B-1
BIJLAGE B:	Kansverdeling van wind naar richting en snelheid	B-3
BIJLAGE C:	Coëfficiënten benaderingsformules windinvloed CP10	B-10
BIJLAGE D:	Grafische weergave gemiddelde windfactor CP10	B-14
BIJLAGE E:	Omrekenfactoren voor emissies	B-17
BIJLAGE F:	Emissiekengetallen	B-19
BIJLAGE G:	Bepalingsmethode emissieverspreiding bij tunnelportalen	B-23
BIJLAGE H:	Keuze van het ventilatiesysteem	B-31

1 INLEIDING

De Aanbevelingen Ventilatie van Verkeerstunnels hebben betrekking op het ventileren van verkeerstunnels in de ruimste zin van het woord.

In deze Aanbevelingen zijn uitgangspunten en functionele eisen voor de ventilatie vastgelegd en worden recente inzichten op het gebied van ontwerp en dimensionering van ventilatiesystemen beschreven. Daarbij is aandacht besteed aan verschillende soorten mechanische ventilatiesystemen, maar ook aan natuurlijke ventilatie.

Naast het ontwerp van ventilatiesystemen wordt ook ingegaan op de bediening van de systemen en aspecten als onderhoud en beheer. Om te kunnen beoordelen of een geleverde ventilatie-installatie aan de gestelde eisen voldoet, zijn uitgangspunten voor garantiemetingen opgenomen.

1.1 Doel van de Aanbevelingen

Het doel van deze Aanbevelingen is om op basis van de huidige normen, onderzoeken en ervaringen, richtlijnen te geven voor het ontwerp en beheer van ventilatiesystemen in tunnels. Daarnaast wordt in dit boek de kennis en ervaring vastgelegd die de afgelopen jaren is opgedaan in onderzoek en bij het gebruik van bestaande ventilatiesystemen.

De Aanbevelingen zijn geschreven als handleiding voor opdrachtgevers, ontwerpers en beheerders van ventilatiesystemen voor verkeerstunnels. De basiselementen die in dit boek worden aangereikt zijn echter ook geschikt voor het ontwerp en de berekening van ventilatiesystemen in metro en spoortunnels.

1.2 Leeswijzer

De Aanbevelingen zijn als volgt opgebouwd:

- Een overzicht van beschikbare ventilatiesystemen in tunnels (Hoofdstuk 2)
- Bepaling van de wijze van ventileren (Hoofdstuk 3)
- Ontwerpen en dimensioneren (Hoofdstuk 4 – 6)
- Ventilatorgeluid (Hoofdstuk 7)
- Controlemetingen (Hoofdstuk 8)
- Aspecten inzake bediening & besturing (Hoofdstuk 9)
- Beheer & onderhoud (Hoofdstuk 10)
- Verslaglegging van onderzoeken en verstrekken van achtergronden (Hoofdstuk 11)

In bijlage H is een schema opgenomen als hulp voor de keuze van het benodigde ventilatiesysteem.

1.3 Enkele algemene begrippen

De betekenis van de meeste begrippen die in deze Aanbevelingen worden gebruikt, blijkt uit het woord zelf of wordt in de tekst verklaard. Enkele algemene begrippen, waarvoor een e nduidige betekenis onmisbaar is voor een juist tekstbegrip, worden hieronder toegelicht.

Incident

Een ongeplande gebeurtenis in de tunnel die van invloed kan zijn op de afwikkeling van het verkeer.

Calamiteit

Een ernstig incident in de verkeersruimte van de tunnel waarbij sprake is van beknelling en/of ernstig gewond zijn van personen (waarvoor hulp van de brandweer/hulpdiensten nodig is), of sprake is van brand of het vrijkomen van gevaarlijke stoffen.

Normaal bedrijf

De bedrijfstoestand van de tunnelinstallaties als zich geen incident of calamiteit voordoet.

Calamiteitenbedrijf

De bedrijfstoestand van de tunnelinstallaties die wordt ingeschakeld bij een calamiteit. Er kan gekozen worden voor een getrapte of tijdsafhankelijke inschakeling van installaties. Daarom wordt soms onderscheid gemaakt tussen “gedeeltelijk” en “volledig” calamiteitenbedrijf.

Normale situatie

De situatie waarin geen incident of calamiteit is opgetreden.

2 VENTILATIESYSTEMEN

2.1 Algemeen

Voor tunnelventilatie wordt een aantal basissystemen gehanteerd:

- Natuurlijke ventilatie
- Mechanische ventilatie
 - Langsventilatie
 - Dwarsventilatie
 - Semi-dwarsventilatie

Dwarsventilatie en semi-dwarsventilatie kunnen worden aangevuld met (beperkte) langsventilatie.

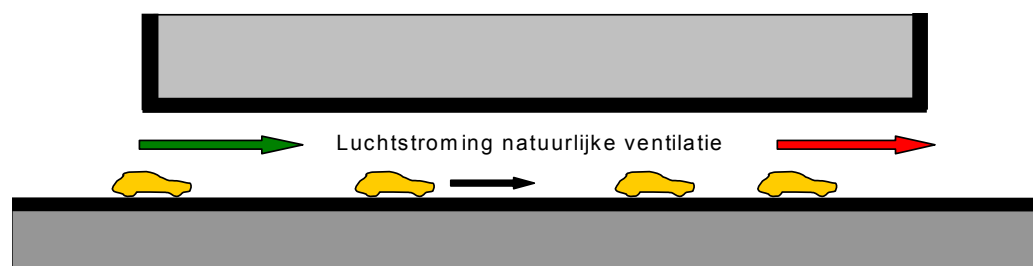
Door lokale omstandigheden kan het nodig zijn deze basissystemen uit te breiden met extra voorzieningen, zoals:

- Portaalafzuiging
- Rookafvoeropeningen

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste kenmerken van de verschillende systemen beschreven, waarbij kort wordt ingegaan op de beheersbaarheid van emissieconcentraties en de effecten van brand.

2.2 Natuurlijke ventilatie

In natuurlijk geventileerde tunnels ontstaat een luchtstroom door de inwerking van toevallig aanwezige krachten. In een tunnelbuis met éénrichtingsverkeer wordt onder normale omstandigheden door de zuigerwerking van het rijdende verkeer een luchtstroom in de rijrichting van het verkeer opgewekt. Hierbij wordt verse buitenlucht via het ingangsportaal van de tunnel aangezogen die de gehele tunnelbuislengte doorstroomt en via het uitgangsportaal de tunnel weer verlaat. Onder invloed van wind kan ondanks de aandrijvende kracht van het verkeer een luchtstroming ontstaan die tegengesteld is aan de verkeersrichting. In een tunnelbuis met tweerichtingsverkeer is het ontstaan van een luchtstroom afhankelijk van de aandrijvende krachten van het verkeer in beide richtingen en van de windinvloed.



Figuur 2-1: Schema natuurlijke ventilatie, luchtstroom opgewekt door het verkeer

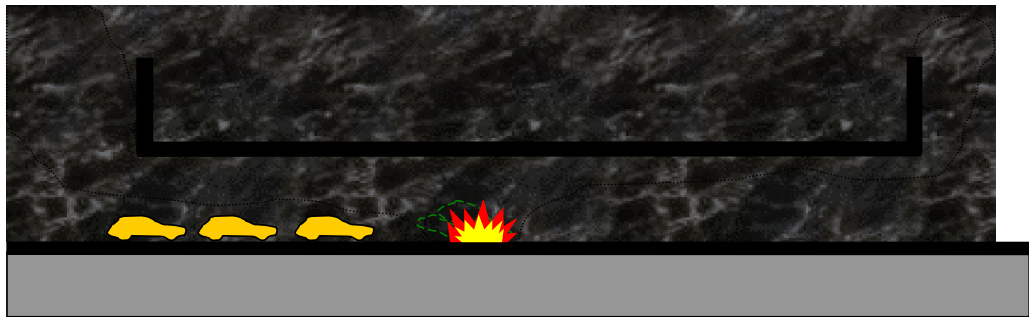
De werking en effectiviteit van natuurlijke ventilatie wordt mede bepaald door het ontwerp van de tunnel. Hierbij kan onderscheid worden gemaakt tussen:

- Geheel gesloten tunnel
- Tunnel met spleten in het dak
- Tunnel met openingen in het dak

Geheel gesloten tunnel

Onder normale omstandigheden wordt bij éénrichtingsverkeer in een geheel gesloten tunnelbuis door verkeer en wind een luchtstroom opgewekt die zorgt voor voldoende luchtverversing. Bij tweerichtingsverkeer met tegengestelde rijrichtingen in dezelfde buis wordt de lucht in de tunnelbuis door het verkeer in wisselende richtingen aangedreven. In dat geval is de invloed van het verkeer op de stromingsrichting van de lucht in de tunnel beperkt en zal de verontreinigingsconcentratie gemiddeld hoger zijn dan bij éénrichtingsverkeer. In principe is de mate van luchtvervuiling niet te beheersen met natuurlijke ventilatie. Bij korte tunnels is de optredende emissieconcentratie echter veelal toelaatbaar.

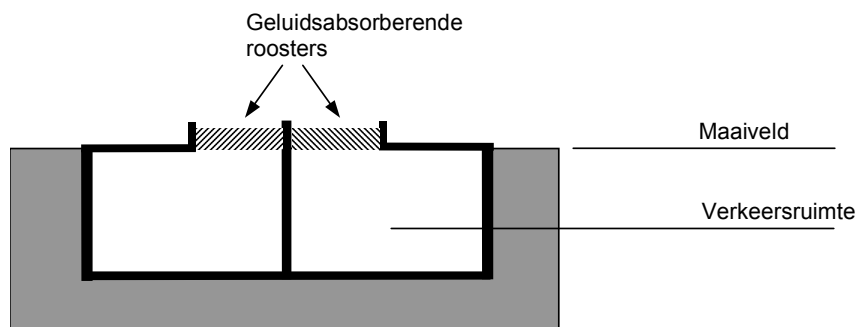
Ook bij brand is de richting waarin de rook en gassen zich bewegen onbeheersbaar. Zolang de rook en gassen een voldoende hogere temperatuur hebben dan de omringende lucht zullen rook- en andere brandproducten zich tegen het plafond van de tunnel verzamelen en gestratificeerd wegstromen. Zolang een temperatuurverschil aanwezig is en de rooklaag niet te dik wordt blijft deze stratificatie aanwezig. (Zie 3.1.2 voor meer informatie over rookbeweging bij natuurlijke ventilatie).



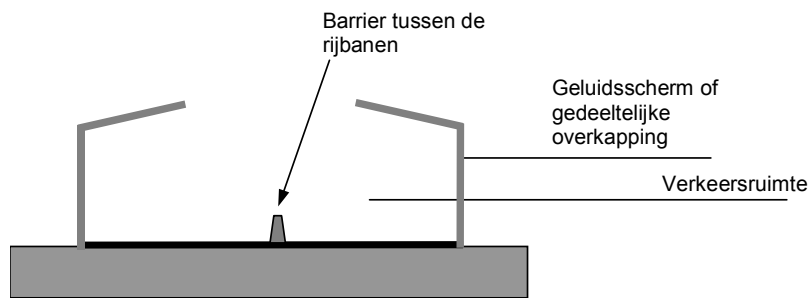
Figuur 2-2: Rookafvoer bij brand in een korte tunnel met natuurlijke ventilatie

Tunnel met spleten in het dak

Bij overkopte wegen op of net onder maaiveld kan het mogelijk zijn in langsrichting spleten in het dak aan te brengen, zoals in de onderstaande figuren.



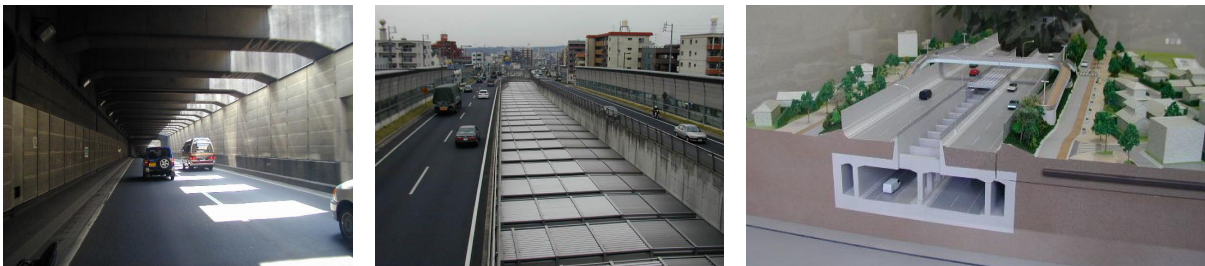
Figuur 2-3: Spleet in langsrichting



Figuur 2-4: Doorlopende opening in langsrichting

Bij deze constructies wordt de concentratie van luchtverontreiniging verlaagd door de uitwisseling via de spleet van verontreinigde tunnellucht met minder verontreinigde buitenlucht.

Bij brand zal de rook meestal onmiddellijk door de openingen in het dak kunnen verdwijnen. Dit gebeurt echter niet bij een combinatie van een kleinere brand (personenautobrand e.d.) en windsnelheden boven 4 m/s. In dat geval vormt zich onder de luifel een zone waarin de rook zich door turbulentie met koele lucht vermengt. Daardoor koelt de rook zoveel af dat (een deel van) de rook niet langer opstijgt maar onder de luifel blijft hangen. De rook kan zich daarbij over 100 m of meer in lengterichting verspreiden waardoor veel weggebruikers in de rook kunnen komen te staan. Wanneer er geen middenwand tussen de rijbanen aanwezig is geldt dit voor beide rijrichtingen.

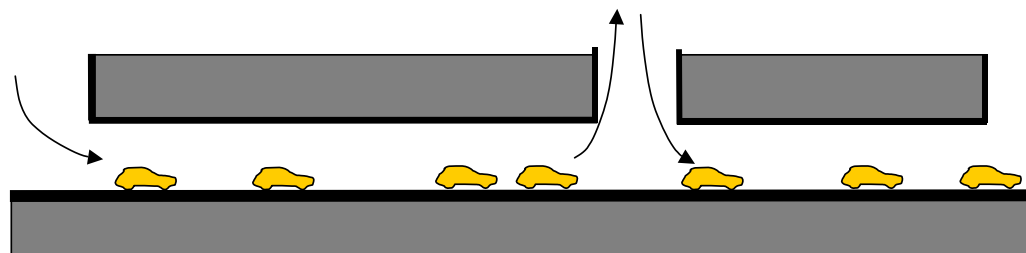


Figuur 2-5: Voorbeelden van langsspleten in het dak, eventueel afgedekt met lamellen

Tunnel met openingen in het dak

Bij overkapte wegen op of net onder maaiveld kan het mogelijk zijn al dan niet afsluitbare openingen in het dak aan te brengen. Een lange tunnel kan op die manier in 'korte' tunnels worden verdeeld. Voorwaarde is dat de openingen groot genoeg zijn, zodat mechanische ventilatie achterwege kan blijven.

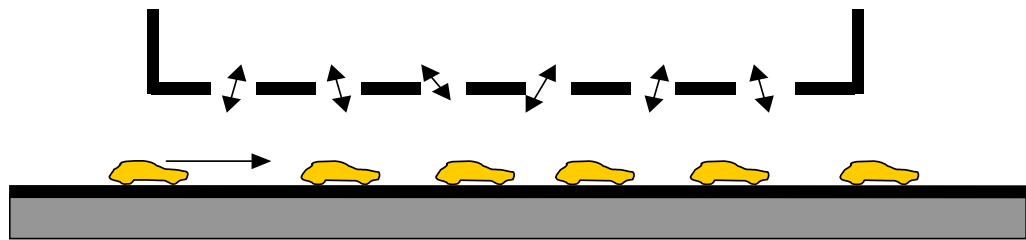
In figuur 2-6 is een situatie aangegeven waarbij op gezette afstanden van elkaar grote openingen in het dak zijn aangebracht.



Figuur 2-6: Natuurlijke ventilatie via openingen beperkt de emissieconcentratie

Deze vorm van ventilatie kan in principe beschouwd worden als een soort 'langsventilatie' waarbij de langstroming in belangrijke mate wordt bepaald door het verkeer. Het concentratieverloop van de luchtverontreiniging tussen de openingen komt dan ook overeen met dat van langsventilatie.

In Figuur 2-7 is een tunnel weergegeven waarbij in het dak op korte afstand van elkaar openingen of spleten zijn aangebracht. Door de openingen vindt uitwisseling van de tunnelucht met de buitenlucht plaats. Daardoor loopt de concentratie van uitlaatgassen minder hoog op als in geheel gesloten constructies.



Figuur 2-7: Natuurlijke ventilatie via spleten of kleine openingen beperkt de emissieconcentratie

Bij dit tunnelontwerp is in feite sprake van een soort 'dwarsventilatie'. Het concentratieverloop van de luchtverontreiniging komt dan ook overeen met dat van dwarsventilatie. De uitwisseling via de openingen kan worden gezien als het toevoeren en afvoeren van tunnelucht, waarbij het toegevoerde en afgevoerde debiet aan elkaar gelijk zijn. Door de aanjagende werking van het verkeer treedt er ook een zekere langstroming op.

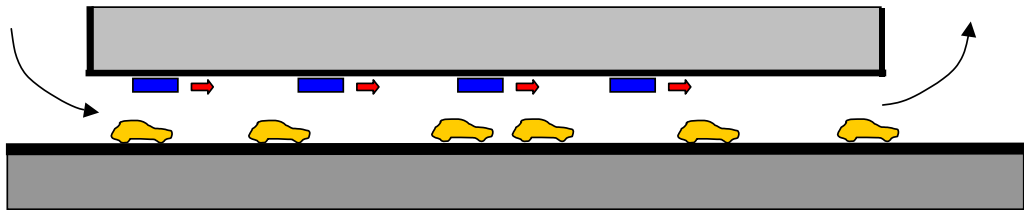
Bij afsluitbare openingen in het dak zijn de rookafvoeropeningen in de normale situatie gesloten en gedraagt de emissieconcentratie zich als in een geheel gesloten tunnel. Bij brand worden de deze openingen geopend en wordt de rook via natuurlijke ventilatie afgevoerd.



Figuur 2-8: Afsluitbare openingen

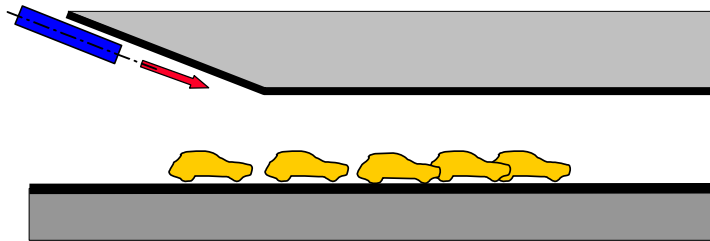
2.3 Langsventilatie

In de tunnel wordt door middel van aanjaagventilatoren een luchtstroom in langsrichting opgewekt. Verse buitenlucht wordt via het ingangsportaal van de tunnel aangezogen en verlaat de tunnel weer via het uitgangsportaal. Omdat het niet nodig is kanalen en soortgelijke bouwkundige voorzieningen aan te brengen, is langsventilatie relatief goedkoop.



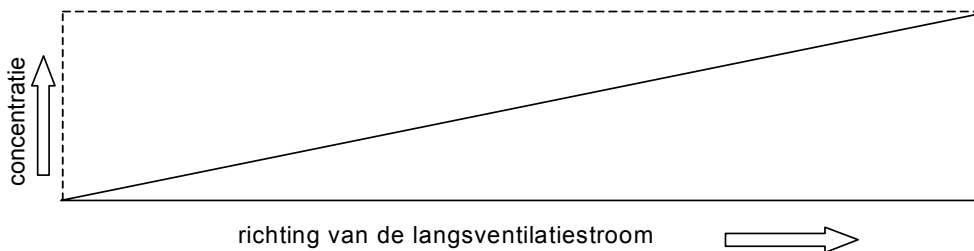
Figuur 2-9: Schema langsventilatie

Om uitval van ventilatoren door brand zoveel mogelijk te voorkomen worden de ventilatoren in of zo dicht mogelijk bij het ingangsportaal geplaatst. Aanjaagventilatoren in het ingangsportaal worden ook wel injectie-ventilatoren genoemd.



Figuur 2-10: Opstelling injectieventilatoren (ingangventilatoren)

De vervuilingconcentratie neemt bij langsventilatie lineair toe in de richting van de langsstroom, aangezien onderweg geen verse lucht wordt toe- of afgevoerd. De vervuilingconcentratie van de lucht is beheersbaar door verhogen of verlagen van de ventilatiesnelheid (in- of uitschakelen van ventilatoren). De maximale tunnelbuislengte die kan worden voorzien van langsventilatie wordt gelimiteerd door de maximaal toelaatbare vervuiling van de lucht in de tunnelbuis. Mede afhankelijk van aantal en soort voertuigen is de maximale tunnellengte die met dit systeem kan worden geventileerd 3 – 6 km.



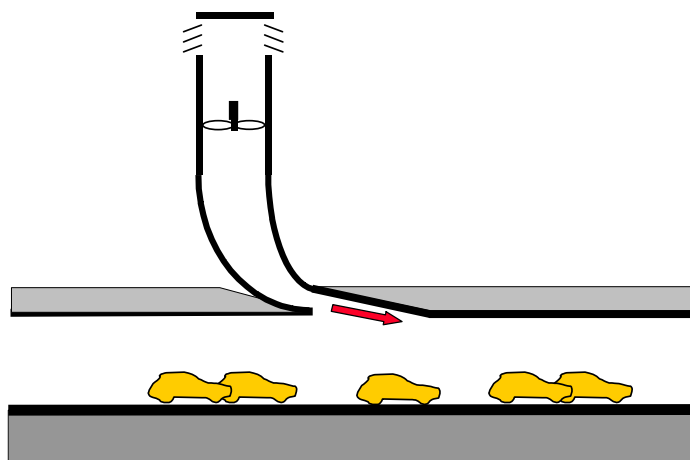
Figuur 2-11: Toename concentratie vervuiling in een tunnel met langsventilatie

Bij brand is de richting waarin de rook en gassen zich bewegen zeer goed beheersbaar, zelfs bij zeer grote branden. Het tunneldeel stroomopwaarts van een brand kan volledig rookvrij worden gehouden 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 2-12: Rookafvoer bij brand in een tunnel met langsventilatie

Een bijzondere vorm van langsventilatie is toepassing van een Saccardo-injector. Daarbij wordt aan het begin van de tunnel via een spleet in het plafond lucht met hoge snelheid toegevoerd waardoor – zowel door het toevoeren zelf als door de aanjagende werking – in de tunnel een luchtstroming ontstaat.



Figuur 2-13: Saccardo-injector

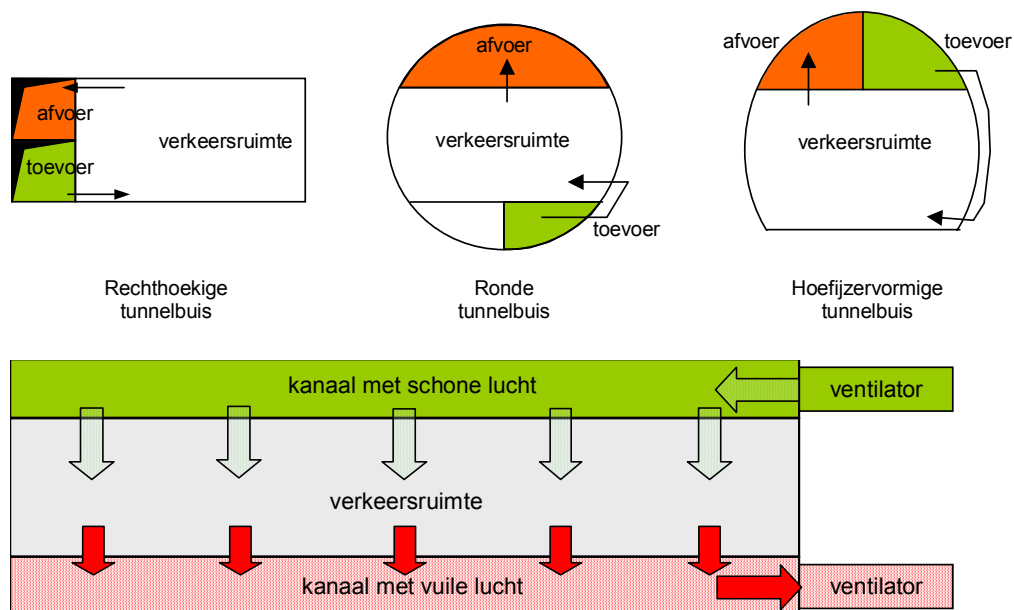
Desgewenst kunnen meerdere Saccardo-injectoren achter elkaar worden geplaatst. In dat geval wordt elke volgende Saccardo-injector voorafgegaan door een afzuigopening om het debiet dat in langsricting stroomt over de lengte van de tunnel constant te houden (Zie ook figuur 2-23).

Een Saccardo-injector kan ook worden gecombineerd met aanjaagventilatoren in de tunnel.

2.4 Dwarsventilatie

2.4.1 Volledige dwarsventilatie

Bij volledige dwarsventilatie wordt over de hele tunnallengte, dwars op de lengteas van de tunnel verse lucht toegevoerd en verontreinigde lucht afgevoerd. De overwegende luchtstroom in de tunnelbuis is dwars op de tunnallengteas. Door invloed van het rijdend verkeer en winddruk op de tunnelportalen is er altijd een zekere stroming in de lengterichting van de tunnel.



Figuur 2-14: Schema volledige dwarsventilatie

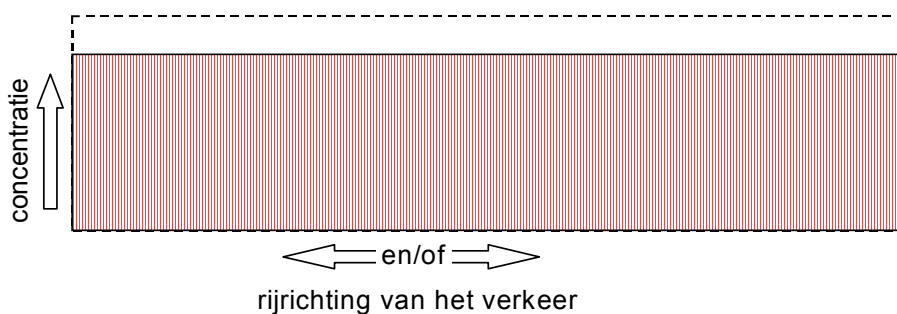


Figuur 2-15: Ventilatietorens van de dwarsventilatie in de Velsertunnel

Volledige dwarsventilatie is bij uitstek geschikt voor zeer lange tunnels of voor tunnels met tweerichting verkeer. Vanwege de zeer hoge kosten voor zowel aanleg als gebruik en onderhoud van dwarsventilatie wordt dit systeem in tunnels met éénrichting-verkeer vrijwel uitsluitend toegepast bij een lengte groter dan 3-6 km. In tunnels met tweerichting-verkeer

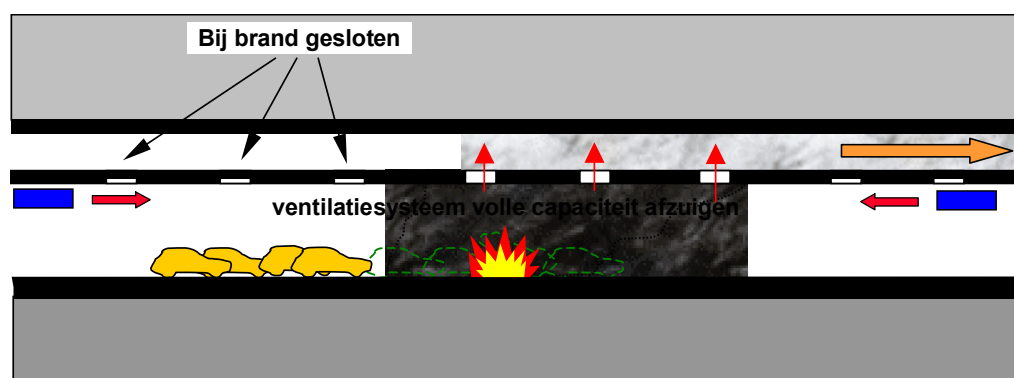
kan dwarsventilatie, afhankelijk van het verkeersaanbod, al noodzakelijk zijn bij een lengte van minder dan 1 km.

Door de gelijktijdige toe- en afvoer van ventilatielucht is de concentratie van vervuiling over de lengte als in principe constant, onafhankelijk van de lengte van de tunnel. Het benodigde luchttoevoer- en luchtafvoerdebiet is recht evenredig met de tunnellengete.



Figuur 2-16: Concentratieverloop van de vervuiling in een tunnel met uitsluitend dwarsventilatie zonder stroming in lengterichting

Een systeem van volledige dwarsventilatie is veelal niet in staat de rook van grote branden af te voeren omdat de ruimte voor rookafvoerkanalen daarvoor te beperkt is. Een ander belangrijk nadeel van dwarsventilatie is de onbeheersbaarheid van rook- en gasstromen in de lengterichting van de tunnel tijdens brand. Windinvloeden, drukverschillen en helling van de tunnel kunnen een onverwachte stroming in langsrichting veroorzaken. 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.



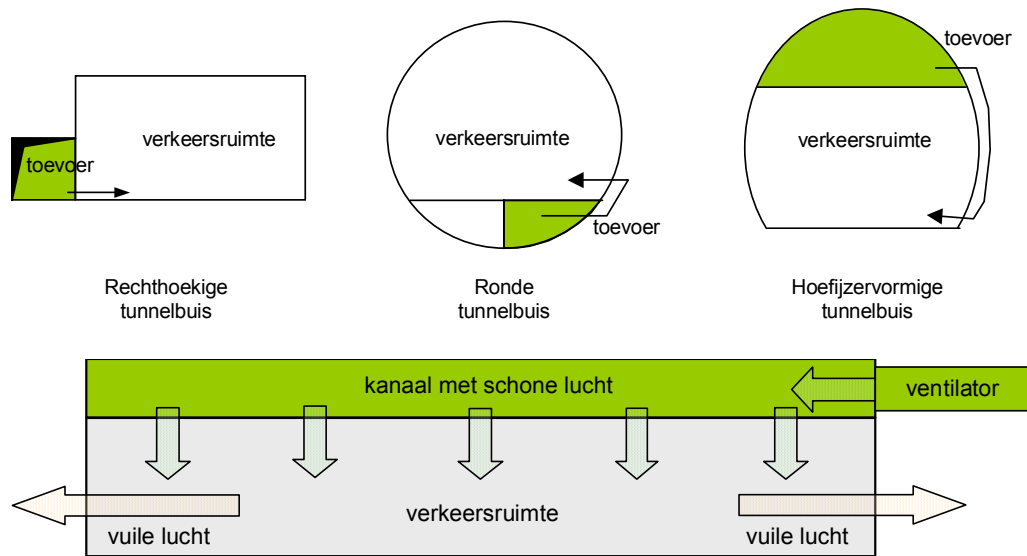
Figuur 2-17: Rookafvoer bij brand met dwarsventilatie en aanvullende langsventilatie

2.4.2 Semi-dwarsventilatie

Bij semi-dwarsventilatie wordt in de normale situatie alleen verse lucht toegevoerd via ventilatieopeningen, die zijn verdeeld over de gehele lengte van de tunnel. De ventilatielucht wordt daarbij dwars op de lengteas van de tunnel toegevoerd. De afgevoerde lucht stroomt in de lengterichting van de tunnel weg en verlaat de tunnel aan beide uiteinden.

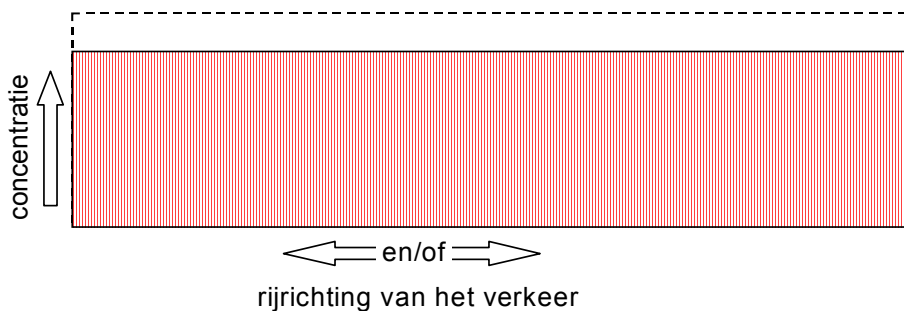
Evenals bij volledige dwarsventilatie zijn luchtkanalen parallel aan de tunnelbuis noodzakelijk, wat hoge kosten met zich meebrengt. Het systeem is geschikt voor tunnels met een lengte van 3 – 6 km.

De overwegende luchtstroom is in de lengterichting van de tunnel. De snelheid van de luchtstroom in lengterichting is daarbij afhankelijk van het verkeer en externe invloeden, zoals winddruk op het tunnelportaal. Omdat over de gehele lengte van de tunnel lucht wordt toegevoerd, neemt de snelheid van wegstromende lucht in de richting van de portalen toe.



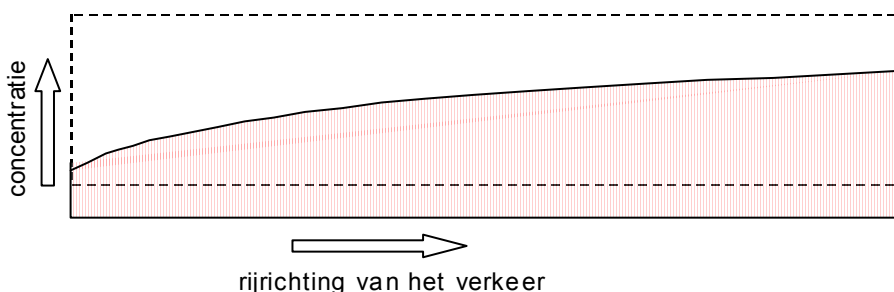
Figuur 2-18: Schema semi-dwarsventilatie

Door de gelijkmatige toevoer van ventilatielucht over de lengte is de concentratie van vervuiling over de lengte as in principe constant, onafhankelijk van de lengte van de tunnel.



Figuur 2-19: Concentratieverloop van de vervuiling in een tunnel met semi-dwarsventilatie

Afhankelijk van een toevallig aanwezige luchtstroom in de lengterichting van de tunnel kan het werkelijke concentratieverloop in de tunnel een andere vorm aannemen (zie figuur 2-20).



Figuur 2-20: Concentratieverloop van de vervuiling in een tunnel met semi-dwarsventilatie en een toevallige langsstroming

Bij brand wordt de toevoer omgeschakeld op afvoer. Een systeem van semi-dwarsventilatie is echter veelal niet in staat de rook van grote branden af te voeren omdat de ruimte voor rookafvoerkanalen daarvoor te beperkt is. Net als bij volledige dwarsventilatie is de onbeheersbaarheid van rook- en gasstromen in de lengterichting van de tunnel tijdens brand een belangrijk nadeel van semi-dwarsventilatie. 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 te beheersen.

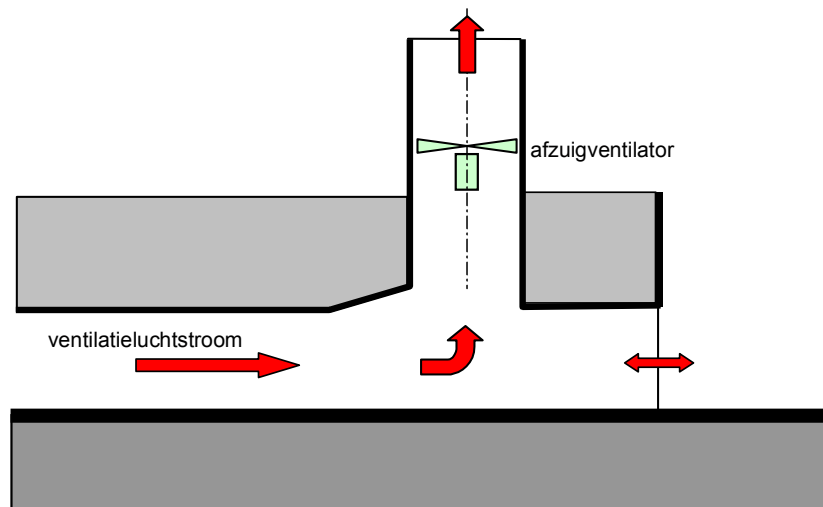
2.5 Bijzondere systemen

2.5.1 Portaalafzuiging

In een dichtbebouwde omgeving kan portaalafzuiging worden toegepast om te voorkomen dat de naaste omgeving van de tunnelopening wordt belast met hoge concentraties verontreiniging uit de tunnelopening.

Portaalafzuiging aan het eind van de tunnelbuis

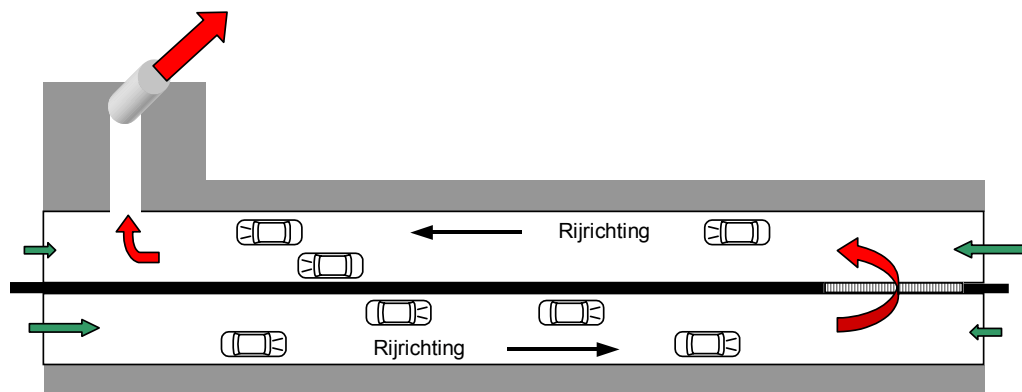
Portaalafzuiging bestaat uit een afzuigsysteem dat luchtstroom afzuigt kort vóórdat deze de tunnel zal verlaten. De afgezogen lucht wordt zo afgevoerd dat minder hinder van de verontreiniging wordt ondervonden. Dat kan bijvoorbeeld via een korte schacht omhoog zodat de tunnellucht zich verspreidt over een groter gebied, waarbij door verdunning de belasting op maaiveldhoogte afneemt. Ook kan de tunnellucht via een luchtkanaal worden afgevoerd naar een omgeving waar de verontreiniging geen hinder veroorzaakt of hogere concentraties zijn toegestaan dan in de directe omgeving van de tunnelopening.



Figuur 2-21: Portaalafzuiging

Omkering van de luchtstroom en portaalafzuiging

In een variant op dit systeem wordt de luchtstroom van de ene tunnelbuis naar de andere tunnelbuis geleid, waarna bij één van de portalen de lucht wordt afgezogen en via een schoorsteen afgevoerd. Met een dergelijk systeem kan bij één of bij beide tunnelportalen worden voorkomen dat emissies in de directe nabijheid van de tunnelopening verspreid worden. Bij brand moet, afhankelijk van de geprojecteerde vluchtwegen, het verkeersmanagement en de wijze van hulpverlening, worden bepaald of de omkering van de ventilatiestroom al dan niet moet worden opgeheven.



Figuur 2-22: Omkering en portaalafzuiging

2.5.2 Rookafvoeropeningen op één of meer plaatsen

In langsgeventileerde tunnels die onderdeel zijn van een druk bereiden stadswegensysteem en waarop regelmatig file kan worden verwacht, is het belangrijk niet toe te laten dat rook zich over een grote lengte stroomafwaarts van de brand verspreidt. Wanneer een brand aan de staart van de file optreedt en rook zich over een grote lengte over de file verspreidt, zullen veel weggebruikers tegelijk in gevaar komen. Uit het oogpunt van veiligheid is dit niet toelaatbaar.

In tunnels onder land kan het gevaar worden beperkt door op één of meer plaatsen afvoeropeningen of afvoerschachten te maken in het tunneldak, waardoor rook uit de tunnel direct naar de buitenlucht kan worden afgevoerd. De onderlinge afstand van de openingen kan variëren van 500 tot 1.500m. Dit hangt af van de situatie bovengronds en van de eisen die aan de emissieconcentraties en het veiligheidsniveau worden gesteld. Desgewenst kunnen in de afvoeropeningen ventilatoren worden geplaatst (zie figuur 2-23).



Figuur 2-23: Toe- en afvoer op regelmatige afstanden

Dergelijke systemen worden gewoonlijk aangevuld met ondersteunende aanjaagventilatoren, om te zorgen dat rook het afzuigpunt niet passeert. Door manipuleren van aanjaagventilatoren in de tunnelbuis kan een zodanige drukverdeling/stroming binnen de tunnelbuis worden opgewekt dat rook van een brand via de afvoeropening direct naar de buitenlucht kan ontwijken (zie figuur 2-23 en figuur 2-24).



Figuur 2-24: Rookafvoer via dakopening in een langsgeventileerde tunnel

De afvoeropeningen zijn in normaal bedrijf afgesloten en worden alleen geopend bij brand in de tunnel. Bovengronds is dan in normaal bedrijf geen overlast van verkeerslawaaï en verkeersemisatie. Bij de keuze van de bovengrondse locatie moet echter wel rekening worden gehouden met het feit dat bij calamiteiten aanzienlijke hoeveelheden rook door deze openingen kunnen ontwijken.

Om hoge luchtweerstand te vermijden moet de nuttige oppervlakte van deze openingen zo worden gekozen dat de luchtsnelheden in de opening niet veel groter worden dan 3-4 m/sec. Dit betekent dat de nuttige oppervlakte van deze openingen ongeveer gelijk moet zijn aan het tunnelbuisoppervlak.

2.5.3 Reiniging van de tunnellucht

In enkele landen is getracht door middel van apparatuur de vervuilde tunnellucht te reinigen alvorens deze in de omgeving vrijkomt. Daarbij is de aandacht vooral gericht op het verwijderen van NO_2 en het filteren van fijn stof. Voor de reiniging voor NO_2 zijn zowel absorbtie- als adsorbtiemethoden beschikbaar.

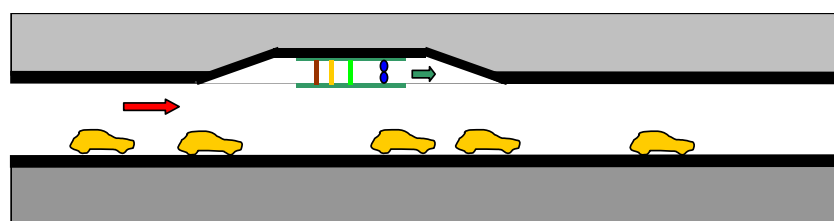
Reinigingsapparatuur voor NO_2 is om een aantal redenen weinig zinvol:

- De meeste NO_2 wordt niet in maar buiten de tunnel gevormd onder invloed van UV-licht (zie 3.2.1).
- De reinigingsapparatuur is buitengewoon kostbaar in aanleg, energiegebruik, onderhoud en beheer. Vaak zijn andere oplossingen veel goedkoper en bedrijfszekerder.
- Vanwege wijzigingen in de emissie van voertuigen, het voertuigaanbod en de verkeerssamenstelling is niet zeker of de kostbare apparatuur zinvol is. Tussen ontwerp en daadwerkelijke inbedrijfstelling ligt vaak een periode van 10 – 15 jaar waarin veel kan veranderen. (Onder andere in Noorwegen zijn een aantal reinigingsinstallaties om deze reden nooit in bedrijf gesteld.)

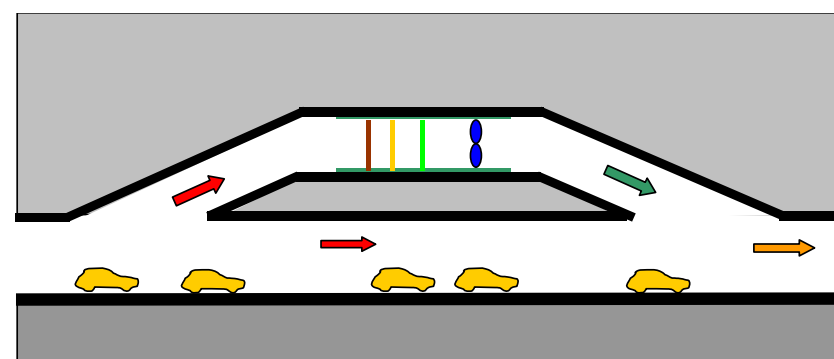
Vanwege de grote hoeveelheid lucht en de vereiste lage stroomsnelheid langs de katalysatoren is een NO_2 -filterinstallatie noodzakelijk die zeer veel ruimte inneemt. De apparatuur is zo groot dat aan het einde van de tunnel een apart ventilatiegebouw moet worden geplaatst, of dat naast de verkeersbuis een vrijwel even grote ventilatiebuis over een lengte van circa 100 m nodig is. De daarvoor benodigde ruimte niet altijd beschikbaar.

De meest toegepaste filters voor stof zijn uitgevoerd als elektrostatische filters: de lucht wordt langs statisch geladen draden of roosters geleid waarop stofdeeltjes neerslaan. Deze filters kunnen als volgt worden geplaatst:

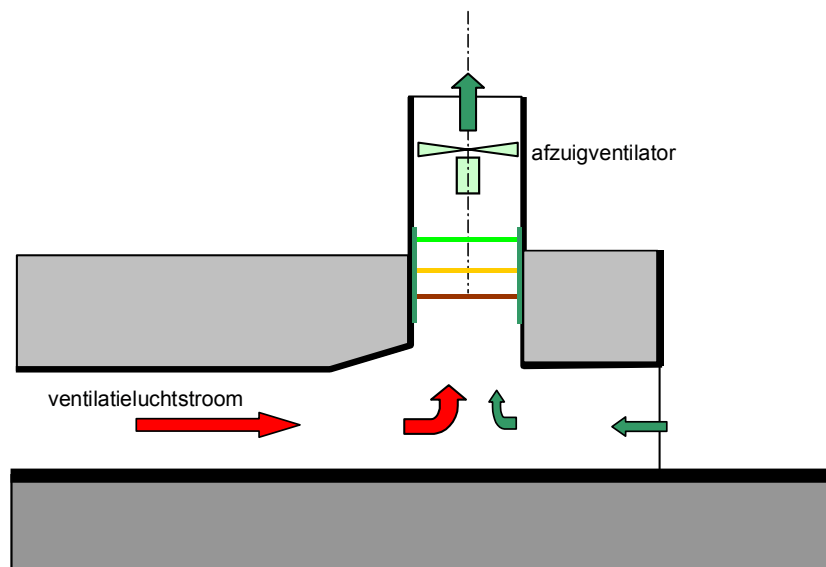
- in de tunnel in nissen in het plafond;
- in een bypass kanaal;
- in een afzuigkanaal of schoorsteen.



Figuur 2-25: Stoffilter in nis in de tunnel



Figuur 2-26: Stoffilter in bypass in de tunnel



Figuur 2-27: Stoffilter in afzuigkanaal

Het filteren van fijn stof wordt vanwege de volgende redenen afgeraden:

- In Nederland is buiten de tunnel de achtergrondconcentratie van fijn stof in het algemeen veel hoger dan er lokaal door het verkeer aan wordt toegevoegd. Het effect van filtering van tunnellucht op de concentraties buiten de tunnel is daardoor klein.
- Filters vangen slechts een beperkt deel van het stof op. De allerkleinste stofdeeltjes, die de sterkste schadelijke invloed hebben, worden niet of nauwelijks gefilterd.
- Bij filters in de tunnel of in een bypass systeem wordt slechts een deel van de tunnellucht gereinigd. Daardoor zit er in de lucht, die de tunnel verlaat, nog steeds veel stof en is het eindresultaat zeer matig.
- De toepassing van stoffilters is kostbaar en vereist veel onderhoud. Ook de energiekosten zijn hoog.

3 TUNNELVENTILATIE: DOEL EN MIDDELEN

Een tunnel moet om een aantal redenen worden geventileerd:

- Bij brand moet de beweging van rookgassen worden beheerst.
- In de normale situatie moeten de concentraties verkeersemmissie worden beperkt, zowel binnen de tunnel als in de directe nabijheid van de tunnel.
- In bijzondere gevallen kan ventilatie ook nodig zijn om bij lange tunnels de temperatuur in de tunnel te beperken.

In dit hoofdstuk wordt nader bekeken hoe ventilatie kan bijdragen aan het bereiken van bovenstaande doelen en worden aanbevelingen gedaan voor de gewenste ventilatieoplossingen.

Er wordt hier geen aandacht besteed aan explosies en het vrijkomen van giftige stoffen. De ventilatie van een tunnel hoeft niet op deze scenario's te worden afgestemd. Hiervoor zijn een aantal redenen:

- De gevolgen van een explosie kunnen niet met ventilatie worden bestreden.
- Mechanische ventilatie kan in sommige situaties het optreden van een explosie verhinderen. In andere situaties kan het juist het optreden van explosies bevorderen. Het is dus niet duidelijk of er wel of niet geventileerd moet worden.
- De gevolgen van het vrijkomen van giftige stoffen kunnen met mechanische ventilatie meestal niet adequaat worden bestreden en de noodzaak tot inschakeling van het ventilatiesysteem is niet éénduidig vast te stellen.
- In tunnels is de kans op brand in het algemeen veel groter dan de kans op explosie en op het vrijkomen van giftige stoffen.

3.1 Veiligheid: Rook en warmteafvoer bij brand

3.1.1 Doel van ventilatie bij brand

Bij brand in een tunnel ontstaat gevaar voor mensen die zich in de tunnel bevinden. Zij worden bedreigd door hete gassen, warmtestraling, verlies van zicht en inademing van giftige stoffen. De meeste slachtoffers vallen niet door het vuur zelf maar door te lange blootstelling aan hete en giftige gassen, het gevolg van verlies van zicht waardoor de vluchtweg niet meer zichtbaar is. In de eerste fasen van de brand worden voornamelijk weggebruikers bedreigd, in de latere fasen voornamelijk personeel van de hulpdiensten.

Ook de constructie van de tunnel wordt door brand bedreigd. Door hoge temperaturen van de rookgassen kan de constructie over een tamelijk groot gebied schade oplopen. Dicht bij de brand loopt de constructie ook gevaar door hittestraling. De constructie kan instorten of anderszins onherstelbaar beschadigen. Daarnaast kan bij ongecontroleerde rookverspreiding schade optreden aan aangrenzende ruimten, zoals bedieningsgebouwen en technische ruimten.

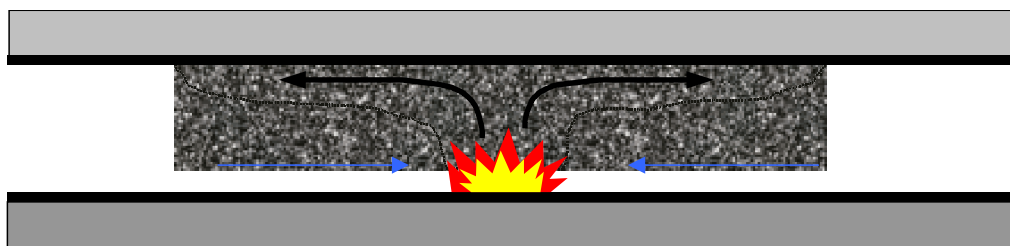
Het is dus zaak om bij brand:

- zoveel mogelijk te voorkomen dat gestrande weggebruikers in de rook komen te staan;
- te voorzien in rookvrije vluchtwegen;
- te zorgen dat hulpdiensten een brand veilig kunnen benaderen om:
 - gewonde, al dan niet beknelde, slachtoffers te bevrijden en af te voeren, en
 - de brand te blussen of te beperken en gecontroleerd uit te laten branden;
- de constructie zo kort mogelijk aan hoge temperaturen bloot te stellen en hoge rookgas-temperaturen te beperken;
- rookverspreiding naar aan de tunnelbuis grenzende ruimten zoveel mogelijk te vermijden.

3.1.2 Invloed van ventilatie op rookbeweging

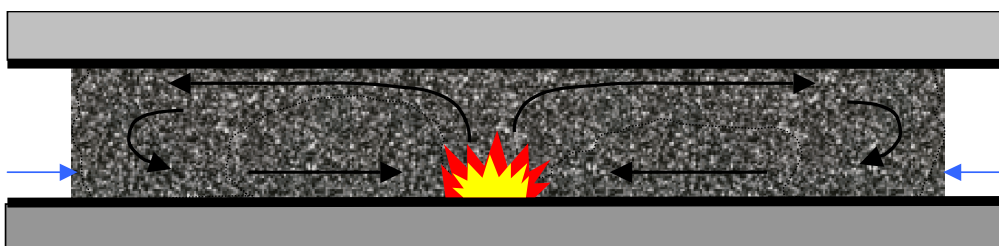
Natuurlijke ventilatie

In de eerste fase na het ontstaan van een brand stijgen – ter plaatse van de brand – hete rook en gassen omhoog en verzamelen zich tegen het plafond. Luchttoevoer naar de brand vindt onderlangs plaats. De rook en gassen verspreiden zich langs het plafond van de tunnelbuis (stratificatie) in de richting van beide uiteinden van de tunnel (zie Figuur 3–1).



Figuur 3–1: Rookbeweging bij brand in een tunnel zonder ventilatie (1e fase)

In de tweede fase zal op enige afstand van de brand 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 (zie Figuur 3–2).



Figuur 3–2: Rookbeweging bij brand in een tunnel zonder ventilatie (2e fase)

In de derde fase wordt de naar beneden zakkende rook opgenomen in de verse luchttoevoer naar de brand, waarna de tunnelbuis over de volle hoogte wordt verontreinigd (zie Figuur 3–3).



Figuur 3–3: Rookbeweging bij brand in een tunnel zonder ventilatie (3e fase)

Dit patroon wordt beïnvloed door:

- Helling van de tunnelbuis: hete rook en gassen stromen bij voorkeur de helling óp (schoorsteeneffect).
- Windinvloed: bij winddruk op één van de tunnelportalen worden rook en gassen overwegend naar één zijde afgevoerd.
- Dichtheidsverschillen: Verschillen in dichtheid tussen de hete rook en de koele omringende lucht bepalen of de rook tegen het plafond blijft hangen of naar beneden zakt.
- De mate van afkoeling aan de tunnelconstructie, de aanwezigheid van verstoringen in de stroming door bijvoorbeeld doorsnede-varianten in de tunnel, verspringingen in het tunnelplafond en (hoge) voertuigen in de tunnel.

De fasen 2 en 3 treden alleen op in lange tunnels. In tunnels van beperkte lengte 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. De rook ontwijkt dan in de vrije lucht.

Mechanische dwarsventilatie + (beperkte) langsventilatie

De rookontwikkeling doorloopt in principe dezelfde fasen als bij een niet-geventileerde tunnel. Voor kleinere branden geldt dat het gebied waar zich de rook verspreidt beperkt kan blijven wanneer de beschikbare afzuigcapaciteit ter plaatse van de brand volledig wordt ingezet. In de ideale situatie worden alle rook en gassen direct boven de brand afgezogen, waardoor de rookontwikkeling niet verder komt dan fase 1. Bij grote branden, waarbij de rookhoeveelheid 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 onbeheersbaar. De rook kan zich dan door de hele tunnel verspreiden, zoals bijvoorbeeld gebeurd is bij de Mont Blanc tunnelbrand in 1999.

Mechanische langsventilatie

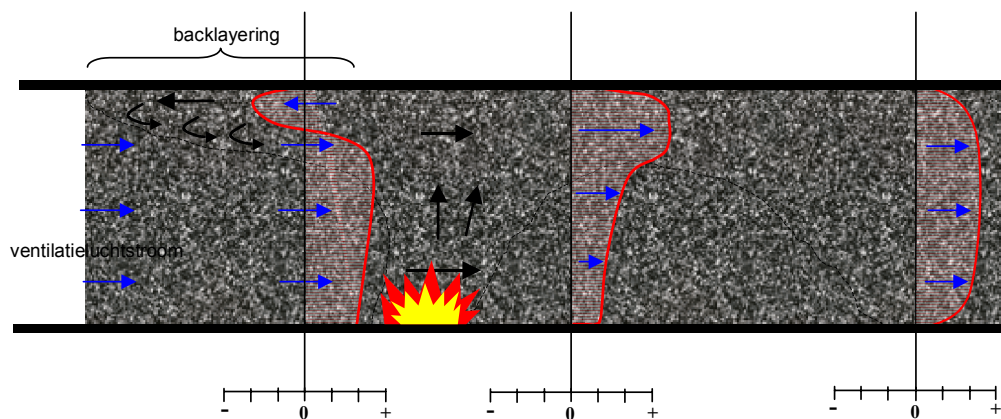
In langsgeventileerde tunnels stromen alle rook en gassen in de ventilatierichting. Bij voldoende ventilatie blijft de zone stroomopwaarts van de brand hierdoor rookvrij. De rookontwikkeling doorloopt dezelfde fasen als in niet-geventileerde tunnels, maar ontwikkelt zich als volgt over de lengterichting van de tunnel:

- Fase 1: in de directe omgeving van de brand hangen rook en gassen tegen het tunnelplafond.
- Fase 2 en 3: na verbreken van de stratificatie wordt de hele tunnelbuis stroomafwaarts van de brand over een groot deel van de hoogte gevuld met rook en verbrandingsgassen.

In langsgeventileerde tunnels zal 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 naar beneden. De rook die uit de backlayeringslaag zakt wordt door de langsstromende ventilatielucht direct terug naar de brand geblazen. Daardoor blijft de lucht onder de backlayeringslaag helder (zie figuur 3-4).

De lengte van de backlayeringszone is afhankelijk van:

- de ventilatiesnelheid 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 3-4: Circulatie-richting en snelheid van rook en ventilatielucht bij brand in een tunnel met langsventilatie

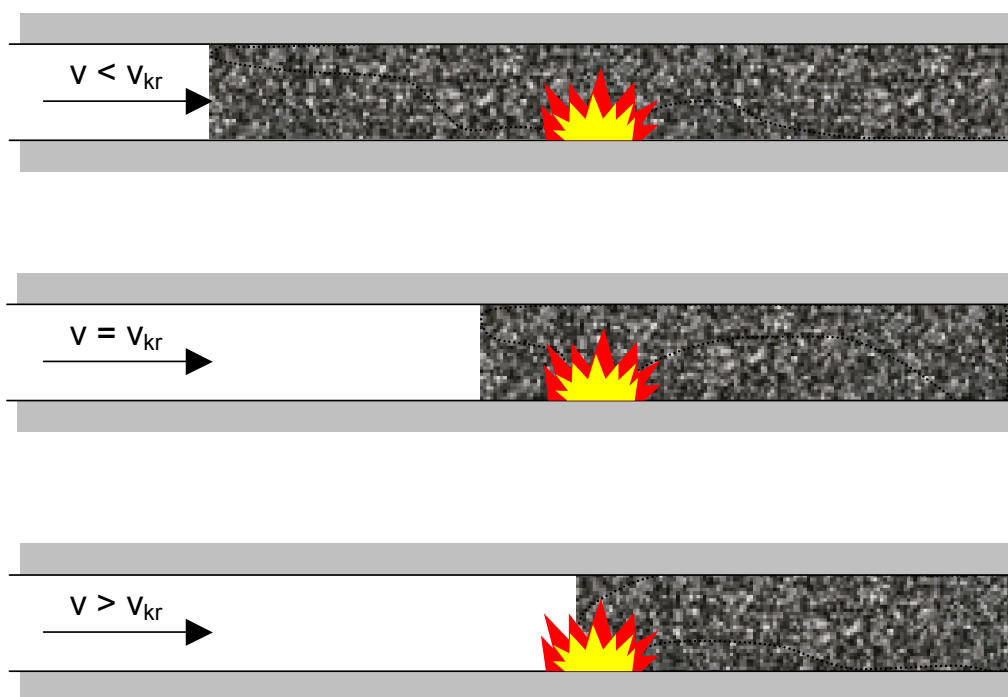


Figuur 3-5: Backlayering tijdens een full-scale testbrand in een verkeerstunnel (brandvermogen 20MW, ventilatiesnelheid 1,5-1,7 m/sec)

Bij brandproeven is gebleken dat de lengte van de backlayering bij een gegeven brandvermogen kan worden gemanipuleerd door de ventilatiesnelheid te wijzigen. Naarmate de ventilatiesnelheid daalt, zal de lengte van de backlayering toenemen. 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. De minimale snelheid die noodzakelijk is voor het beheersen en beperken van de lengte van de backlayering heet 'kritische backlayeringssnelheid'.

Hierbij moet worden opgemerkt dat bij afnemende ventilatiesnelheid en nadering van de kritische backlayeringssnelheid niet meteen opmenging over de volledige tunnelhoogte optreedt. 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 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.



Figuur 3-6: Rookbeweging afhankelijk van de langssnelheid

3.1.3 Invloed van ventilatie op de brand

Op basis van brandproeven en gegevens uit de literatuur kan het volgende worden gesteld over de invloed van ventilatie op de brandgrootte en de snelheid van brandontwikkeling.

Brandgrootte

Door mechanische ventilatie wordt verbrandingslucht aangevoerd. Men zou verwachten dat de toevoer van lucht de brandgrootte doet toenemen, waardoor de situatie verslechtert. De praktijk blijkt echter anders.

Zowel uit verscheidene realistische, grootschalige brandproeven als uit Computational Fluid Dynamics (CFD) simulaties (zie ook 6.1.2) blijkt dat bij langsv ventilatie kleine branden meestal in vermogen afnemen terwijl grote branden (met name plasbranden - verbranding van een plas brandbare vloeistof, bijvoorbeeld door lekkage) in omvang toenemen. In alle gevallen neemt – bij gelijkblijvend brandvermogen – door ventilatie de rookgastemperatuur drastisch af.

Deze afname kan als volgt worden verklaard:

- Door ventilatie wordt de warmte versneld afgevoerd. Daardoor neemt bij voertuig- en ladingbranden de pyrolyse van de vaste stoffen af (pyrolyse is de ontleding van materiaal onder invloed van hitte bij afwezigheid van zuurstof), en loopt bij plasbranden de verdampingsnelheid terug. Dit heeft tot gevolg dat er minder te verbranden gassen vrijkomen, waardoor de brand afneemt.
- Bij grote branden bestaat de kans dat zonder ventilatie een gebrek aan verbrandingslucht ontstaat. Dit heeft tot gevolg dat het vuur verstikt, met als bijkomende effecten het optreden van zeer hoge temperaturen en vorming van onverbrande gassen (hoge CO- en rookproductie). Door ventilatie wordt extra verbrandingslucht toegevoerd en neemt het brandvermogen toe. Bij brandproeven door Rijkswaterstaat in de Beneluxtunnel (2001) werd bijvoorbeeld een toename van 20-50% waargenomen bij ladingbranden onder een gesloten huif en met een vermogen van 15 – 25 MW.
- De lagere temperaturen worden enerzijds veroorzaakt door de toevoer van koude lucht en anderzijds door het wegblazen van hete rook.

Als door ventilatie de brandgrootte toeneemt, neemt de tijdsduur van de brand af. Bijvoorbeeld, CFD-simulatie van een plasbrand met een oppervlak van 10 m² in een tunnel met een doorsnede van circa 10 x 5 m levert de volgende resultaten op:

- Zonder ventilatie is het vermogen circa 40 MW en de brandduur circa 14 uur.
- Bij langsventilatie met een snelheid van 3 m/s is het vermogen circa 240 MW en is de brandduur 2 uur.
- In beide gevallen is de temperatuur aan het plafond boven de brand tussen de 1.100 – 1.300 °C.

In dit extreme voorbeeld neemt de temperatuur dus niet af door ventilatie, maar wordt de tijdsduur wel veel korter.

Hieruit volgt dat het toepassen van ventilatie vrijwel altijd een gunstige invloed heeft op de constructie omdat deze minder lang aan hoge temperaturen wordt blootgesteld.

Wanneer, zoals hiervoor beschreven, door ventilatie de brandgrootte toeneemt, wordt ook de stralingsintensiteit hoger. De kans dat de brand overslaat naar andere voertuigen in de directe nabijheid van de brand neemt dan toe. Voertuigen die verder van de brand staan, worden niet of nauwelijks door de brand aangestraald, maar staan wel in de hete rook. Door te ventileren neemt de kans dat de brand naar deze voertuigen overslaat af omdat de rooktemperatuur in veel gevallen daalt.

Brandontwikkeling

Vanwege de toevoer van verbrandingslucht neemt de snelheid van brandontwikkeling van plasbranden toe. De ontwikkelingssnelheid van dergelijke branden is echter van zichzelf al erg groot.

Bij brand binnen een voertuig heeft ventilatie weinig effect op de snelheid van brandontwikkeling; ventilatie heeft immers niet veel invloed op de luchtstromingen binnen het voertuig. Het is wel zo dat een brand die ontstaat in het motorcompartiment – zoals vaak het geval is – zich bij langsventilatie minder snel naar de achterzijde van het voertuig zal uitbreiden. Uit brandproeven die in 2001 door Rijkswaterstaat in de Beneluxtunnel zijn uitgevoerd blijkt dat die vertraging tot 30 minuten kan oplopen. Als de brand ontstaat aan de voorzijde van de auto, zal door langsventilatie de brandontwikkeling dus afnemen.

Bij open ladingbranden daarentegen, of een brand die aan de achterzijde van het voertuig is ontstaan, zal langsventilatie de brandontwikkeling enigszins versnellen. Het is echter niet eenvoudig om een algemene uitspraak te doen over de brandontwikkeling in een dergelijke situatie. Tijdens bovengenoemde brandproeven van Rijkswaterstaat in 2001 is bijvoorbeeld gebleken dat de verschillen in brandontwikkeling bij een vrachtwagen met zeildoek huif en

met aluminium huif minstens even groot zijn als de verschillen als gevolg van verhoogde ventilatie. Bovendien is ook het type lading van invloed op de brandontwikkeling.

In het algemeen kan worden gesteld dat de invloed van ventilatie op de snelheid van brandontwikkeling in relatie tot de benodigde tijd voor zelfredzaamheid van weggebruikers niet zo groot is dat daardoor beslissingen inzake ventilatie worden beïnvloed.

3.1.4 Aanbevelingen voor de beheersing van rook en temperatuur

Ventilatie is één van de veiligheidsvoorzieningen in een tunnel. Het geheel van veiligheidsvoorzieningen moet ervoor zorgen dat het veiligheidsniveau in de tunnel aan de vooraf gestelde eisen voldoet. Het vereiste veiligheidsniveau buiten de tunnel is voor de keuze van een ventilatiesysteem niet van belang.

Natuurlijke ventilatie versus mechanische ventilatie

In het kader van veiligheid geldt in het algemeen ten aanzien van mechanische ventilatie voor tunnels met een gesloten lengte:

- minder dan 250 m : niet noodzakelijk
- tussen 250 – 500 m : afhankelijk van een risicoanalyse
- meer dan 500 m : noodzakelijk

Met behulp van een risicoanalyse kan worden aangetoond dat met een bepaald ventilatiesysteem daadwerkelijk wordt voldaan aan de gestelde normen voor de veiligheid in de tunnel.

Hierbij geldt echter het volgende:

- Ook wanneer het niet nodig is vanwege veiligheid, kan toepassing van mechanische ventilatie toch noodzakelijk zijn vanwege de wijze waarop verkeersemissies in de omgeving mogen vrijkomen.
- Een korte tunnel, die vanwege zijn lengte niet mechanisch geventileerd hoeft te worden, kan deel uitmaken van een samenstel van overdekte wegen en of tunnels. Als in de andere (aansluitende) tunnels ook mechanische ventilatie is aangebracht, kan het nodig zijn in de betreffende tunnel ook mechanische ventilatie toe te passen.
- Bij gedeeltelijk gesloten constructies (met openingen in het dak) kan worden overwogen de mechanische (langs)ventilatie achterwege te laten. Als dergelijke constructies onderdeel vormen van een groter systeem waarin wel mechanische ventilatie nodig is, moet onderzocht worden of de voordelen van de mindere investering in ventilatie wel opwegen tegen de nadelen van de duurdere constructie.

Brand en het type mechanische ventilatie

Welk type mechanische ventilatie moet worden toegepast is afhankelijk van het type tunnel:

- In tunnels met éénrichtingsverkeer per tunnelbuis heeft langsventilatie de voorkeur.
- In tunnels met tweerichtingsverkeer in een tunnelbuis heeft dwarsventilatie de voorkeur. Het systeem moet wel worden aangevuld met langsventilatie om te voorkomen dat geen ongecontroleerde langsstromingen ontstaan. Overigens is tweerichtingsverkeer in één tunnelbuis voor nieuwe tunnels in principe niet toegestaan en wordt het bij bestaande tunnels ten sterkste ontraden, ook bij sluiting van één van de tunnelbuizen vanwege onderhoud.

De voorkeur voor langsventilatie bij éénrichtingsverkeer heeft de volgende redenen:

- In Nederlandse tunnels geldt in de normale situatie éénrichtingsverkeer in elke tunnelbuis. Bij brand zal in de meeste gevallen stroomopwaarts van de brand een file ontstaan, terwijl het verkeer stroomafwaarts van de brand tijd heeft om de tunnel uit te rijden.

Door langsventilatie worden weggebruikers in de file stroomopwaarts van de brand beschermd tegen rook.

- Er bestaat een kans dat weggebruikers stroomafwaarts van de brand niet tijdig uit de tunnel kunnen rijden en geconfronteerd worden met rook. Dat gebeurt alleen als er een stilstaande file in de tunnel staat; in de praktijk komt dat echter zelden voor. Aangezien verreweg de meeste branden een aanzienlijke ontwikkelingstijd kennen voordat de rook levensbedreigend wordt, is er voor weggebruikers meestal voldoende tijd om (langzaam) de tunnel uit te rijden. Wanneer de rook wel bedreigend wordt zullen deze weggebruikers gebruik moeten maken van de vluchtroutes.

In bijlage H is een beslismodel gegeven voor de keuze van het juiste type ventilatie.

3.2 Luchtkwaliteit: Beperking emissieconcentraties

3.2.1 Algemeen

In normaal bedrijf komen in een tunnel door autoverkeer uitlaatgassen vrij. Daarnaast veroorzaakt slijtage van banden en wegdek de vorming van stof. Dit leidt binnen en buiten de tunnel tot concentraties stoffen in de lucht die, afhankelijk van de concentratie, bij inademing in principe schadelijk voor de gezondheid zijn. Bovendien zal bij toenemende concentraties stof in de tunnel het zicht in 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 schadelijke stoffen binnen en buiten de tunnel voldoen aan de gestelde criteria. Hierbij moet rekening worden gehouden met de reeds in de buitenlucht aanwezige concentraties schadelijke stoffen: de achtergrondconcentratie.

Soorten emissies

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)

In 11.3.1 wordt nader ingegaan op de schadelijke werking van deze stoffen.

In plaats van PM10 - deeltjes kleiner dan 10 micrometer - wordt soms ook de term PM2,5 gehanteerd voor deeltjes kleiner dan 2,5 micrometer. De reden hiervoor is dat men vooral aan de kleinere deeltjes binnen PM10 een schadelijke werking toekent. Omdat de invloed van fijn stof op het menselijk lichaam nog niet in voldoende mate wordt begrepen (2005), wordt hier alleen rekening gehouden met PM10.

Een aanzienlijk deel van de totale hoeveelheid fijn stof (PM10) komt niet vrij uit automotoren maar wordt veroorzaakt door slijtage van banden en het wegdek. In tunnels draagt de opwaaiing van neergeslagen fijn stof eveneens aanzienlijk bij. Het betreft hier de grotere deeltjes binnen PM10.

In de praktijk blijken bij beschouwing van de luchtkwaliteit alleen de volgende stoffen van belang:

- Buiten de tunnel: NO_x en 'Fijn stof' (PM10).
Bij NO_x moet worden opgemerkt dat de schadelijkste component NO₂ is. In uitlaatgasen is de hoeveelheid NO₂ 5-10% van de totale NO_x-uitstoot, maar onder invloed van ozon (O₃) in de lucht wordt een deel van het aanwezige NO omgezet tot NO₂. De hoeveelheid NO₂ kan hierdoor meer dan verdubbelen. Bij het bepalen van de buitenluchtkwaliteit buiten de tunnel moet met deze omzetting rekening worden gehouden.
- Binnen de tunnel: CO en NO₂
Fijn stof (PM10) levert binnen een tunnel niet direct een gezondheidsrisico op, maar kan wel van belang zijn in verband met zichtcondities.

De andere voertuigemissies komen onder de huidige Europese regelgeving voor automotoren in zo'n geringe mate vrij dat ze bij het beoordelen van luchtverontreiniging door wegverkeer veelal geen rol van betekenis spelen.

3.2.2 Aanbevelingen m.b.t. wettelijke voorschriften en normen

Voor luchtkwaliteit *binnen* een tunnel tijdens de normale situatie zijn geen specifieke wettelijke normen beschikbaar. In deze Aanbevelingen worden grenswaarden voor de luchtkwaliteit binnen een tunnel aangegeven (zie 5.3).

Voor luchtkwaliteit *binnen* een tunnel tijdens onderhoud gelden de ARBO-voorschriften.

Bij het projecteren van een tunnel moet rekening worden gehouden met de wettelijke normen en voorschriften voor *buitenluchtkwaliteit* (zie bijlage A), omdat bij de tunnelportalen en eventuele andere openingen de verkeersemissies geconcentreerd vrijkomen. Vooral in stedelijk gebied moet hiermee rekening worden gehouden omdat dit doorslaggevend kan zijn voor de acceptatie van het project. Het is dus van belang te onderzoeken wat de invloed van de tunnel en de aansluitende weg is op de luchtkwaliteit in de omgeving. Hierbij moet niet alleen worden gekeken naar de verwachte waarden op het tijdstip van openstelling, maar ook naar toekomstige ontwikkelingen.

Factoren die van belang zijn met betrekking tot verkeersemissie:

In het tunnelontwerp moet rekening gehouden worden met:

- de verkeersintensiteit en -samenstelling op langere termijn;
- bestaande en toekomstige bebouwing in de nabijheid van de tunnel en de aansluitende weg;
- plaats en vorm van de tunnelportalen en andere openingen;
- de wijze van ventileren van de tunnel;
- het lokale windklimaat;
- plaats en vorm van afschermdesconstructies, zoals geluidschermen;
- de wijze van verspreiding van emissies in de omgeving van de tunnel;
- bestaande en toekomstige achtergrondconcentraties.

Buiten de tunnel vormen de achtergrondconcentraties, die reeds in de buitenlucht aanwezig zijn, een belangrijke factor bij het bepalen van de luchtkwaliteit. Dit is vooral buiten de tunnel van belang omdat de afgevoerde lucht uit de tunnel zich met buitenlucht vermengt, wat (plaatselijk) tot hogere concentraties leidt. Als de achtergrondconcentratie al hoog is, kunnen de wettelijke grenswaarden voor buitenluchtkwaliteit gemakkelijk worden overschreden.

Binnen de tunnel is de achtergrondconcentratie van ondergeschikt belang omdat de bijdrage door het verkeer aan de emissieconcentratie vaak veel hoger is dan de achtergrondconcentratie.

Grenswaarden genuanceerd toepassen

De luchtkwaliteit buiten de tunnel moet in principe op alle plaatsen, ongeacht de ruimtefunctie, voldoen aan de normen voor buitenluchtkwaliteit. Eigenlijk zou overal 'buiten de tunnel', dus buiten de bouwkundige omhulling van de tunnel en naast de rijbaan van aansluitende wegen, moeten worden voldaan aan de grenswaarden. In praktijk moet deze stelling worden genuanceerd:

- Uit tunnelportalen en eventuele openingen in het tunneldak komt ventilatielucht met schadelijke stoffen naar buiten en verspreidt zich vervolgens in de omgeving. Naarmate de afstand tot het tunnelportaal groter wordt, vermengt de ventilatielucht zich meer met de omgevingslucht en dalen de emissieconcentraties. Op zeer korte afstand van tunnelportalen en eventuele openingen in het dak van de tunnel kunnen de concentraties gemiddeld boven de norm voor buitenluchtkwaliteit liggen.
- Wanneer de ventilatielucht vrijkomt uit een schoorsteen of hoog uit een bedieningsgebouw op de tunnel, kan een verhoogde concentratie hoog in de lucht aanvaardbaar zijn. Voorwaarde is wel dat de vrijkomende lucht zo wordt verspreid en verdund dat de concentraties in de leefomgeving onder de toelaatbare waarden liggen. Ook mag de vervuilde lucht niet wordt aangezogen door ventilatiesystemen van hoge gebouwen op korte afstand van de tunnel.

Mits bestuurlijk vastgelegd kan onder een aantal voorwaarden een verhoogde concentratie in de directe nabijheid van de tunnel worden toegestaan. Daarbij kunnen onder andere de volgende overwegingen een rol spelen:

- De ruimte waar de overschrijding optreedt, heeft een verkeersfunctie.
- Een plaatselijke overschrijding zou toelaatbaar kunnen zijn mits de aanleg van de tunnel binnen een nader aan te geven gebied de situatie als geheel niet verslechtert.
- Een plaatselijke overschrijding zou toelaatbaar kunnen zijn wanneer de aanleg van de tunnel op andere plaatsen de situatie voor mens, dier en begroeiing aanzienlijk verbetert. Dit kan vooral in stedelijk gebied voorkomen.
- Overschrijding van de norm is in principe nooit toegestaan op plaatsen waar mensen langdurig verblijven (woningen, scholen, arbeidsplaatsen, enzovoort)
- Overschrijding van de norm op plaatsen met een openbare verblijfsfunctie, zoals parkjes, plantsoenen, kinderspeelplaatsen en sportvelden, moet worden vermeden. Vooral bij sportvelden en kinderspeelplaatsen wordt diep geïnhaleerd en zullen schadelijke stoffen diep in de longen doordringen.
- Een overschrijding kan toelaatbaar zijn mits deze maar niet hoger is dan een verwachte overschrijding zonder aanleg van een tunnel, voor beide situaties bepaald in hetzelfde referentiejaar.

Afspraken vastleggen

Rondom tunnelportalen en openingen in tunnels kunnen contourlijnen worden bepaald die aangeven waar wel en niet aan de eisen voor buitenluchtkwaliteit wordt voldaan.

Ook kan men op een zekere afstand van de wegwand aangeven of aan de eisen voor buitenluchtkwaliteit wordt voldaan.

Er moet bestuurlijke overeenstemming bestaan over de toelaatbaarheid van overschrijdingen van de normwaarden in relatie tot de ruimtelijke ordening voordat tot de bouw van de tunnel wordt overgegaan.

Het verdient aanbeveling onderzoeken en afspraken op dit terrein goed te documenteren.

3.2.3 Aanbevelingen om concentraties binnen de tunnel te beperken

Wanneer *in de ontwerpfase* te hoge emissieconcentraties in de tunnel worden gevonden kunnen de volgende maatregelen worden overwogen:

- Bij voorkeur wordt de natuurlijke ventilatie verbeterd:
 - Natuurlijke ventilatie heeft de voorkeur boven mechanische ventilatie vanwege de grotere betrouwbaarheid en de lagere kosten voor installatie, energie en onderhoud.
 - Bij landtunnels kan het aanbrengen van openingen in het tunneldak – al dan niet voorzien van ondersteunende schachten met natuurlijke trek – oplossing bieden, of het aanbrengen van een lamellendak. Als de tunnel boven maaiveld ligt kunnen openingen in de wanden worden overwogen.
- Als extra natuurlijke ventilatie niet voldoende is, moet mechanische ventilatie worden toegepast.
 - Bij tunnels tot circa 3 – 6 km met éénrichtingsverkeer per buis kan gewoonlijk met een langsventilatiesysteem worden volstaan.
 - Wanneer in lange tunnels met éénrichtingsverkeer per buis een systeem van langsventilatie niet voldoet kan een oplossing bestaan uit:
 - Volledige dwarsventilatie
 - Semi-dwarsventilatie in de hele tunnel
 - Semi-dwarsventilatie in het laatste deel van de tunnel (vanwege de langsstroming die door het verkeer wordt opgewekt ontstaat alleen in het laatste deel van de buis een probleem, zie ook 5.3.3).
 - Bij tunnels met in de normale bedrijfssituatie tweerichtingsverkeer is vrijwel altijd een systeem met dwarsventilatie of semi-dwarsventilatie noodzakelijk. Overigens wordt tweerichtingsverkeer in één verkeersbuis uit veiligheidsoverwegingen ten stelligste afgeraden, ook tijdens onderhoudswerkzaamheden.

Voor informatie over het concentratieverloop in de tunnel bij verschillende ventilatiesystemen wordt verwezen naar hoofdstuk 2 en hoofdstuk 5.

Het is mogelijk om mechanische ventilatie aan te vullen met technieken om de vervuilde lucht in de tunnel te reinigen. Aan het gebruik van reinigingsapparatuur kleven echter grote technische, ruimtelijke en financiële bezwaren (zie 2.5.3). Toepassing van dergelijke apparatuur wordt dan ook ten sterkste afgeraden.

De keuze en het ontwerp van het ventilatiesysteem moet worden afgestemd met de 'brandsituatie'.

Wanneer *in de gebruiksfase* te hoge emissieconcentraties in de tunnel worden gevonden, kunnen de volgende oplossingen worden toegepast:

- verbeteren of aanbrengen van een mechanisch ventilatiesysteem;
- verkeersbeperkende maatregelen zoals een snelheidsbeperking, het beperken van het aantal voertuigpassages of het weren van vrachtauto's.

In bijlage H is een beslismodel gegeven voor de keuze van het juiste type ventilatie.

3.2.4 Aanbevelingen om concentraties buiten de tunnel te beperken

In stedelijke gebieden moet bij de situering en het ontwerp van een tunnel rekening worden gehouden met bestaande bebouwing. Omgekeerd moet het lokale bestuur bij de vergunningverlening voor nieuwe bebouwing in de nabijheid van een bestaande tunnel (en aansluitende wegen) rekening houden met de reeds aanwezige luchtkwaliteit. Soms kan een bepaald type bebouwing echter bijdragen aan verspreiding van te hoge concentraties of zelfs gevoelige gebieden achter deze bebouwing beschermen tegen te hoge concentraties.

Wanneer in de ontwerpfase te hoge concentraties buiten de tunnel worden gevonden, is het niet raadzaam de oplossing meteen te zoeken in dure en onderhoudsgevoelige ventilatiesystemen of systemen voor luchtreiniging (zie ook 2.5.3). De volgende oplossingen verdienen de voorkeur:

- Door middel van openingen in het tunneldak kan – indien mogelijk – de verontreiniging worden gespreid. Hierdoor komt niet alle emissie geconcentreerd bij het tunnelportaal vrij maar kan een deel ontwijken via de openingen. Deze oplossing kan bij tunnels in stedelijk gebied een oplossing vormen als de tunnel nagenoeg aan de oppervlakte ligt. Wel ontstaat meteen de vraag of de resulterende emissieconcentraties in de buurt van deze openingen toelaatbaar zijn vanwege de stedelijke inrichting (zie 2.2).
- Verplaatsing van het tunnelportaal over een lengte van enkele tientallen meters – in een enkel geval zelfs honderden meters – kan een lokaal probleem verschuiven naar een minder kritisch gebied.
- Bestaande of nieuwe bebouwing kan bijdragen aan extra verspreiding van emissies of juist aan het tegenhouden van verspreiding, waardoor de emissieconcentraties in gevoelige gebieden lager worden. Zulke maatregelen kunnen eigenlijk alleen in een windtunnel worden getest. Het is belangrijk om te beseffen dat dit soort oplossingen bindende planologische afspraken over een lange periode vergen.
- Als zich bij het tunnelportaal nog geen bebouwing of gevoelige gebieden (zoals parkjes, sportvelden of verblijfsgebieden) bevinden, is het belangrijk om bindende bestuurlijke afspraken over de planologische inrichting te maken en deze op te nemen in bestemmingsplannen.
- Verkeersmaatregelen kunnen helpen de concentraties omlaag te brengen, bijvoorbeeld door snelheidsbeperking, het weren van vrachtverkeer tijdens spitsuren of het doseren van de verkeersstroom.

Als bovenstaande maatregelen geen oplossing bieden en toch mechanische ventilatie nodig is, kunnen de volgende oplossingen worden overwogen:

- De vervuilde ventilatielucht kan bij het tunnelportaal of op een andere plaats worden afgezogen en via een schoorsteen hoog worden afgevoerd. De verontreiniging wordt dan hoog in de lucht verdund en vormt geen bedreiging meer op maaiveldniveau in de directe omgeving van het portaal (zie 2.5.1).
- Als de emissieconcentraties slechts bij één van de portalen een probleem in de omgeving opleveren, kan worden overwogen de luchtstroom bij het portaal via de andere tunnelbuis (met tegenovergestelde rijrichting) in omgekeerde richting af te voeren en aan de andere kant van de tunnel te laten vrijkomen (zie 2.5.1). De concentratie in die andere tunnelbuis mag daardoor echter niet te hoog worden. Ook moet de omgeving aan de andere kant van de tunnel de extra emissiebelasting kunnen opnemen.
- Wanneer vanwege rookafvoer bij brand toch al een ventilatiesysteem wordt aangelegd, kan verhoging van de capaciteit mogelijk oplossing bieden als het gaat om geringe overschrijdingen van de toelaatbare concentraties.

Opmerking: Langdurige inschakeling van ventilatiesystemen kan aanzienlijke kosten voor energie opleveren en vergt meer onderhoud.

In bijlage H is een beslismodel gegeven voor de keuze van het juiste type ventilatie.

3.2.5 Monitoring

Het kan zinvol zijn om de concentraties vervuilende stoffen (vooral NO₂ en fijn stof) gedurende langere tijd te registreren. Zo kan bijvoorbeeld worden geconstateerd of het systeem aan de verwachtingen voldoet en of aanpassingen nodig zijn. Metingen kunnen ook zinvol zijn om omwonenden – of het publiek in het algemeen – te laten zien welke concentraties schadelijke stoffen optreden, zodat inzicht wordt verkregen in de mate van vervuiling. In

een aantal situaties zijn goede ervaringen opgedaan met rechtstreeks door het publiek afleesbare meetresultaten.

Binnen de tunnel is monitoring zinvol als ook de schakeling van de ventilatoren wordt bijgehouden. Dan kan worden vastgesteld of de wijze van schakelen leidt tot onnodig energieverlies of juist tot regelmatig optreden van te hoge concentraties.

Buiten de tunnel heeft monitoring alleen zin als de meetplaatsen zo zijn gekozen dat de invloed van de tunnel daadwerkelijk wordt gemeten en niet wegvalt tegen de bijdrage uit andere bronnen.

3.3 Beheersing van de temperatuur

3.3.1 Algemeen

In een tunnelbuis ontstaat een temperatuurverhoging door warmte die wordt geproduceerd door het verkeer en door de tunnelinstallaties. Vanwege de door het verkeer opgewekte langsstroming is de temperatuur aan het eind van de tunnel hoger dan aan het begin van de tunnel. Hoe langer de tunnel, des te meer warmte aan de luchtstroming wordt toegevoerd en hoe hoger de temperatuur aan het eind van de tunnel is. De temperatuurverhoging speelt in de praktijk alleen een rol bij tunnels met een lengte van meerdere kilometers.

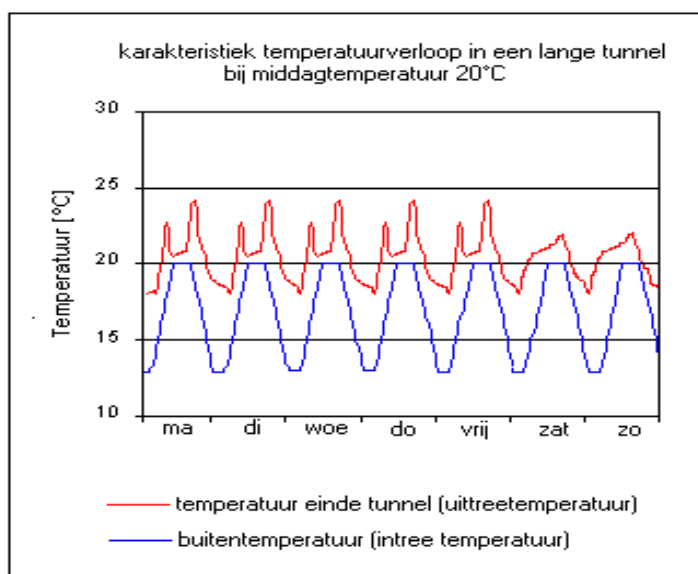
De warmte die door het verkeer en de tunnelinstallaties wordt geproduceerd wordt in eerste instantie opgenomen door de lucht in de tunnel. De opgewarmde lucht staat de warmte vervolgens gedeeltelijk af aan de bouwkundige constructie (uiteraard alleen wanneer de temperatuur van de constructie lager is). De warmte in de bouwkundige constructie wordt voor een deel geaccumuleerd en voor het overige deel afgevoerd via de aangrenzende grondlagen. Wanneer de temperatuur van de lucht weer is gedaald tot onder de temperatuur van de constructie, wordt ook warmte aan de lucht afgegeven. Vanwege het accumulerende vermogen van de bouwkundige constructie zijn kortdurende warmtepieken in de tunnel niet te verwachten.

De temperatuur van de lucht in de tunnel hangt dus af van de balans tussen:

- de hoeveelheid toegevoerde warmte door het verkeer en de installaties in de tunnel;
- de hoeveelheid afgevoerde warmte via ventilatie;
- de hoeveelheid warmte die door de bouwkundige constructie wordt afgevoerd of toegevoerd.

Hierbij zijn de volgende aandachtspunten van belang:

- Brandwerende isolatie van de bouwkundige constructie leidt tot minder warmtegeleidend vermogen. De temperatuur van de lucht in de tunnel zal daardoor sterker stijgen dan in een niet-geïsoleerde tunnel. Dit speelt vooral een rol in geboorde tunnels waarin de gehele zichtbare constructie met brandwerend materiaal is bekleed.
- De warmteafvoer door ventilatie hangt af van de grootte van het ventilatievolume. Een onacceptabele temperatuurverhoging kan enigszins worden opgevangen door het ventilatievolume te verhogen. In verhouding tot de warmteproductie van het verkeer is het warmteopnemend vermogen van de lucht in de tunnel echter te beperkt om grote hoeveelheden warmte af te voeren.



Figuur 3-7: Voorbeeld van het temperatuurverloop in een lange tunnel

In Figuur 3-7 is een voorbeeld gegeven van de simulatie van het temperatuurverloop gedurende een etmaal in een lange tunnel bij een buitentemperatuur van 13°C (nacht) – 20°C (dag) . Het verkeer kent een ochtend- en een avondspits. Vanwege de rustige perioden overdag treedt daardoor een lagere temperatuur in de tunnel op dan tijdens de ochtend- en avondspits, hoewel de buitentemperatuur juist overdag het hoogst is. De temperaturen zijn doorgerekend totdat een stabiele situatie is ontstaan.

3.3.2 Invloed van ventilatie op de tunneltemperatuur

Vanuit het oogpunt van ventilatie kan de hoeveelheid warmte die door het verkeer aan de tunnellucht wordt afgestaan in principe worden beschouwd als een vorm van luchtverontreiniging. De invloed van ventilatie op het temperatuurverloop in de tunnel is dan ook vergelijkbaar met de eerder beschreven relatie tussen ventilatie en verkeersemisies.

Niet-geventileerde of langsgeventileerde tunnel

De temperatuur van de tunnellucht neemt toe naarmate de afstand tot de tunnelingang groter wordt. Dat betekent dat ook het temperatuurverschil met de tunnelwanden stijgt, met als gevolg dat de warmteoverdracht naar de omgeving toeneemt.

Bij een hogere luchtsnelheid stroomt meer lucht door de tunnel, waardoor de temperatuur minder zal toenemen. In tunnels langer dan 3 tot 4 km draagt de warmte-inhoud van de afgevoerde lucht echter niet wezenlijk bij aan de koeling van de tunnel. Afkoeling vindt vrijwel uitsluitend plaats door overdracht aan de tunnelwanden.

Dwarsgeventileerde tunnel

Over de gehele tunnallengte wordt evenveel lucht toegevoerd als afgevoerd. De temperatuurstijging als gevolg van warmteafgifte door verkeer is daarom in principe over de gehele tunnallengte constant. Wel kan de temperatuur naar de uitgang van de tunnel oplopen doordat ook in dwarsgeventileerde tunnels een luchtstroom in lengterichting wordt veroorzaakt door het verkeer. In vergelijking met langsgeventileerde tunnels blijft een dwarsgeventileerde tunnel koeler, doordat op alle plaatsen de warmte direct door de ventilatielucht wordt afgevoerd.

Semi-dwarsgeventileerde tunnel

Er wordt over de gehele tunnallengte lucht toegevoerd, terwijl door het verkeer een ventilatiestroom in de lengterichting wordt opgewekt. Daardoor neemt – net als bij langsventilatie – de temperatuur van de tunnellucht toe naarmate de afstand tot de tunnelingang groeit. In vergelijking met langsventilatie wordt de temperatuurstijging van de tunnellucht echter beperkt door menging met de toegevoerde koelere ventilatielucht.

3.3.3 Aanbevelingen om temperatuurstijging in de tunnel te beperken

De temperatuurverhoging in tunnels vormt alleen een probleem bij tunnels met een lengte van meerdere kilometers. Daarom wordt aanbevolen een verkennende berekening uit te voeren voor tunnels die langer zijn dan 3 tot 4 km en een verkeersintensiteit kennen van meer dan 30.000 voertuigen per rijrichting per tunnelbuis.

Wanneer er teveel warmte in de tunnel ontstaat bij een gegeven ventilatiedebiet, kan uit één of meer van de volgende oplossingen worden gekozen:

- hogere ventilatiesnelheid in langsrichting toepassen;
- dwarsventilatie aanbrengen;
- een koelsysteem in de tunnel aanbrengen.

4 ONTWERPEN

In dit hoofdstuk wordt nader ingegaan op de aspecten die van belang zijn bij het ontwerpen van een tunnelventilatiesysteem, waarbij ook aandacht wordt besteed aan het voorkomen van aërodynamische kortsluiting en de ventilatie van vluchtwegen. De nadruk ligt hierbij op langsventilatiesystemen, waarmee in Nederland een unieke expertise is opgebouwd. Voor gedetailleerde informatie over dwarsventilatiesystemen – waarvoor wel algemene aanwijzingen worden gegeven – wordt u verwezen naar bestaande publicaties op dit gebied.

4.1 Natuurlijke ventilatie

In een tunnel kan met natuurlijke ventilatie worden volstaan als:

- in de normale situatie de emissieconcentraties in de tunnel de grenswaarden niet overschrijden;
- bij brand wordt voldaan aan de normen voor de veiligheid in de tunnel;
- het risico dat ontstaat, doordat de brandweer een brand niet kan benaderen, acceptabel wordt geacht. Dit risico moet zowel voor mensen als voor de constructie worden bekeken.

Het blijkt dat bij tunnels met éénrichtingverkeer en een lengte van 0,5 – 3 km in veel gevallen met natuurlijke ventilatie de emissieconcentratie onder de toelaatbare grenzen kan worden gehouden.

Voor meer ontwerpgegevens voor natuurlijke ventilatie wordt verwezen naar hoofdstuk 2 en naar paragraaf 6.3.

4.2 Langsventilatie

Hieronder wordt nader ingegaan op de ontwerpeisen voor een systeem voor langsventilatie en worden aanbevelingen gedaan over de opstelling, prestaties en technische eigenschappen van de ventilatoren.

De dimensionering van langsventilatie is te vinden in paragraaf 6.4.

4.3 Ontwerpeisen

Een systeem van langsventilatie moet in staat zijn om:

- in de normale situatie een zodanige luchtstroom in langsrichting van de tunnel op te wekken dat de concentraties verkeersemmissie onder een bepaald maximum blijven;
- desgewenst de concentraties verkeersemmissie in de omgeving van de tunnel onder een bepaald maximum te houden;
- 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 voldoende lucht te kunnen toevoeren voor optimale verbranding. Hiermee wordt voorkomen dat de brand zo lang duurt dat de warmtebelasting op de constructie leidt tot onherstelbare schade;
- bij brand in een tunnelbuis de naastgelegen buis 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 tunnelbuis zelf, kunnen bij brand ventilatoren dichtbij 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 worden gelet op de plaats van de ventilatoren in de tunnel (zie 4.3.1) en op de mate van bestendigheid tegen hoge temperatuur (zie 4.3.3).
- Bij toepassing van een Saccardo-injector (zie 2.3) moet er rekening mee worden gehouden dat bij bepaalde tegendruk geheel of gedeeltelijke terugstroming onder de injector door kan optreden.
- De druk op verschillende plekken in de tunnelbuis als gevolg van langsventilatie moet in balans zijn met de druk in vluchtwegen die aansluiten op de tunnelbuis. Er moet worden voorkomen – zowel bij gesloten als bij geopende vluchtdeuren – dat door drukverschil rook in de vluchtwegen kan stromen.

Aan bovenstaande eisen kan nooit 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. Het is noodzakelijk vast te leggen onder welke condities het systeem in staat moet zijn aan bovengenoemde eisen te voldoen.

Geluidsniveau

Het geluidsniveau en geluidsspectrum in de tunnel als gevolg van de ingeschakelde tunnelventilatie moet zijn afgestemd op de vereiste spraakverstaanbaarheid van de vaste installaties voor communicatie in de tunnel. Ook moet het geluidsniveau zo zijn dat gehoorschade bij weggebruikers en hulpdiensten zoveel mogelijk wordt vermeden. Hoofdstuk 7 geeft hiervoor aanwijzingen.

In bebouwd gebied moet worden gelet op het geluidsniveau dat ventilatoren in de omgeving veroorzaken. Vooral ventilatoren in het ingangsportaal, die gedeeltelijk buiten de tunnel steken, kunnen in de omgeving lawaai veroorzaken. Of aan de wettelijke normen voor geluidsbelasting op de gevels van omliggende gebouwen moet worden voldaan, hangt af de gebruiksfrequentie. Worden de ventilatoren vrij geregeld ingeschakeld (bijvoorbeeld om emissieconcentraties te beheersen), dan moet rekening worden gehouden met de omgeving. Bij incidentele inschakeling (bijvoorbeeld alleen bij brand) hoeft hiermee geen rekening te worden gehouden.

4.3.1 Ventilatoropstelling

De juiste opstelling voor de ventilatoren in een tunnel is voor een belangrijk deel afhankelijk van de lengte van de tunnel. Daarnaast kan het clusteren van ventilatoren in naast elkaar hangende groepen de effectiviteit verbeteren.

Tunnels tot 2 km: ventilatoren voorin plaatsen

In tunnels tot een lengte van 2 km worden aanjaagventilatoren bij voorkeur zoveel mogelijk bij de tunnelingang en voorin de tunnel opgehangen (zie Figuur 4–1, Figuur 4–2 en Figuur 4–3). Bij tunnels van deze lengte dient een systeem van langsventilatie vooral om bij brand de rook te kunnen verdrijven. Bedrijfszekerheid bij brand is dan ook de belangrijkste overweging voor deze aanbeveling. Aanjaagventilatoren in het ingangsportaal zullen vrijwel nooit door hoge temperatuur worden belast, waardoor de kans op uitval door brand klein is.



Figuur 4-1: Thomassentunnel (2004) – ingang met rode roosterconstructie (l) en ingangsv ventilatoren onder het rooster (r)



Figuur 4-2: Beneluxtunnel (2001) – ingang zuidzijde (l) en ingangsv ventilatoren met inlaat in open lucht (r)



Figuur 4-3: Wijkertunnel (1996) – ingang zuidzijde (l) en ingangsv ventilatoren met inlaat in open lucht (r)

Een brand veroorzaakt een aanzienlijke hitte ter plaatse van de brand en ook in de eerste honderden meters stroomafwaarts van de brand loopt de temperatuur flink op. Op grotere afstand van de brand koelen de rookgassen af aan de tunnelconstructie. Branden van circa 30 MW en meer veroorzaken dusdanige temperaturen dat aanjaagventilatoren in de directe omgeving van de brand snel zullen uitvallen. Stroomafwaarts neemt bovendien de prestatie van aanjaagventilatoren af omdat de dichtheid van de stroming 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.

Bij ventilatoren in het ingangsportaal moet rekening worden gehouden met het feit dat hoge vrachtwagens de uitblaasstraal kunnen verstoren, waardoor de effectiviteit afneemt. Dit kan gedeeltelijk worden voorkomen door de ventilatoren zoveel mogelijk boven de linkerrijstrook of -rijstroken op te hangen (zoals te zien in Figuur 4-2).

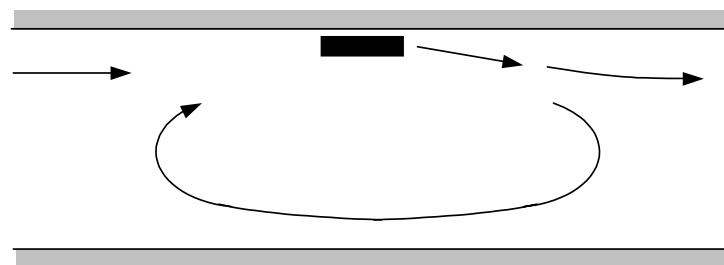
Opstelling in tunnels langer dan 2 km

Bij tunnels langer dan 2 km is het niet meer mogelijk alle ventilatiecapaciteit voorin de tunnel te plaatsen. De ventilatoren moeten dan – eventueel in clusters – evenredig worden verdeeld over de lengte van de tunnel. Bij een grote onderlinge afstand in lengterichting is de kans dat grote aantallen ventilatoren uitvallen door brand klein. Bovendien is de afkoeling van de rookgassen aan de tunnelconstructie vaak dusdanig groot dat aanjaagventilatoren op grotere afstand stroomafwaarts van de brand nog een redelijke prestatie leveren.

De optimale ventilatoropstelling moet per project worden onderzocht door middel van probabilistische berekeningen, waarbij de plaats en grootte van de brand en de windinvloed moeten worden gevarieerd.

Aanjaagventilatoren naast elkaar

Uit proeven en praktijkervaringen blijkt dat clusteren – enkele aanjaagventilatoren naast elkaar plaatsen – de effectiviteit verbetert (zie ook 6.4.8). 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 tunnelbuis stroomt. Is het ventilatorvolume wel groter, dan zal onder de cluster van ventilatoren terugstroming optreden (zie ook 11.2.3). De prestatie van de ventilatoren gaat daardoor achteruit en bij brand kan de rook zelfs de verkeerde kant op worden gedreven. Bij het opstarten van het ventilatiesysteem zal tijdelijk altijd enige terugstroming optreden.

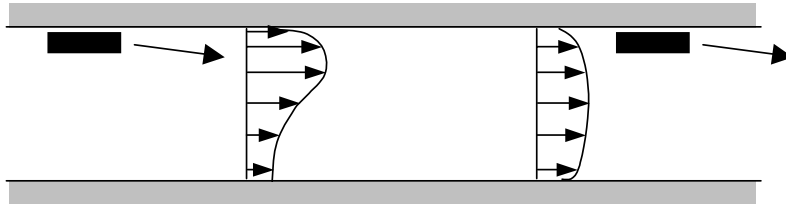


Figuur 4-4: Terugstroming onder aanjaagventilatoren

Aanjaagventilatoren achter elkaar

De onderlinge afstand in lengterichting tussen (clusters van) ventilatoren moet zo zijn dat opeenvolgende aanjaagventilatoren elkaar niet negatief beïnvloeden. De uitblaasstraal moet

(nagenoeg) zijn uitgewerkt in de tunnelstroming en mag niet kunnen worden aangezogen door de volgende ventilator. Wanneer de uitblaasstraal wordt afgebogen met afbuig-schoepen, blijkt de uitblaasstraal zich beter met de tunnelstroming te mengen. Er ontstaat dan sneller een tamelijk gelijkmatig stromingspatroon over de tunneldoorsnede voordat de volgende ventilator worden bereikt.



Figuur 4-5: Afstand tussen ventilatoren in langsrichting

Onbelemmerde uitblaasstraal

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, installaties in de tunnel of door stilstaand of langzaam rijdend verkeer (zie ook 6.4.8). Dit kan worden bereikt door een ventilator op voldoende afstand van het tunnelplafond of de tunnelwand aan te brengen (zie Figuur 4-6), afbuig-schoepen toe te passen (zie Figuur 4-7) of de ventilator enigszins gekanteld te monteren.



Figuur 4-6: Voldoende afstand tot het plafond



Figuur 4-7: Ventilatoren met afbuig-schoepen in een nis

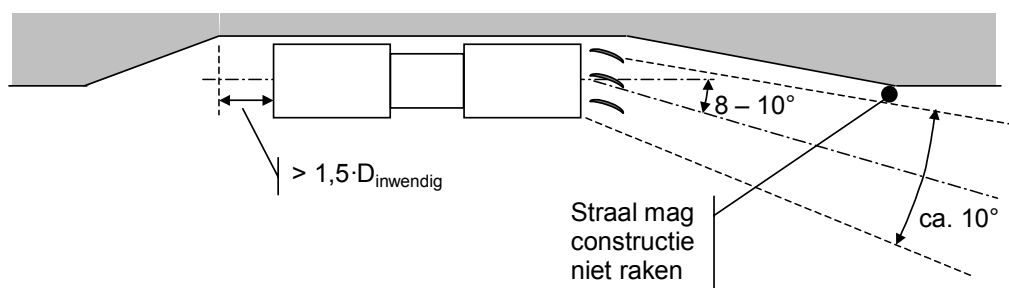
Als aanjaagventilatoren aan de tunnelwand worden bevestigd, moet bij voorkeur een minimale hoogte van 3,5 m boven het wegdek worden aangehouden. Anders is er grote kans dat bij stilstaand of langzaam rijdend verkeer de uitblaasstraal wordt verstoord door voertuigen, waardoor de effectiviteit (sterk) afneemt. Tevens ontstaat in de normale situatie het gevaar dat rijdende voertuigen of motorrijders geraakt worden door de uitblaasstraal, wat tot onveilige verkeerssituaties kan leiden.

Plaatsing in plafondnis

Aanjaagventilatoren worden bij voorkeur aan het plafond opgehangen. Vanwege de tunnelhoogte kan het noodzakelijk zijn de ventilatoren in een nis van voldoende afmetingen te plaatsen. Daarmee kan worden voorkomen dat het plafond over de hele tunnallengte op een grotere hoogte moet worden aangebracht. 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 plafondnis.
- De ruimte tussen de onderkant van de aanjaagventilator (geluiddemper) en het profiel van vrije ruimte. Deze ruimte moet minstens 150 - 200 mm zijn, gelet op:
 - mogelijk opwaaiende dekzeilen van vrachtauto's;
 - Later aan te brengen extra lagen asfalt op de rijweg ("overlaging").

De lengte van de nis, die mede afhankelijk is van de lengte van de aanjaagventilatoren, en de hoek van uitblazen hebben invloed op het rendement. Voorkomen moet worden dat het deel van de uitblaasstraal, waarin hoge snelheden voorkomen, de begrenzingen van de nis raakt. De aanzuigopening van de ventilator moet voldoende ver van de begrenzingen van de nis zijn zodat de lucht vrijelijk kan toestromen. Ter illustratie zijn de benodigde afmetingen in figuur 4-8 weergegeven.



Figuur 4-8: Aanjaagventilator in een nis (in één richting werkende ventilator)

4.3.2 Keuze van de uitblaassnelheid

De prestatie van aanjaagventilatoren is het grootst wanneer wordt gekozen voor een grote uitblaasopening en een relatief lage uitblaassnelheid. Meestal wordt de diameter van aanjaagventilatoren echter beperkt door de beschikbare inbouwruimte in de tunnelbuis. Daardoor is het uitblaasoppervlak gering en is een hoge snelheid noodzakelijk.

In Nederlandse tunnels zijn goede ervaringen opgedaan met een uitblaassnelheid van 30-35 m/s. Bij hogere snelheden treden onevenredig veel verliezen op, zowel in de ventilator als in de impulsoverdracht aan de tunnelluchtstroming (zie ook 11.2.2). Bij een erg lage uitblaassnelheid wordt het systeem gevoelig voor variaties in de snelheid van de luchtstroming in de tunnelbuis. Snelheden lager dan 20 m/s worden daarom afgeraden.

Boven een uitblaassnelheid van 35 m/s nemen de stromingsverliezen sterk toe, waardoor ook het benodigde elektrisch vermogen aanzienlijk stijgt. Ook uit het oogpunt van een economisch verantwoord elektrotechnisch ontwerp verdient het aanbeveling om meer ventilatoren met een lage uitblaassnelheid te installeren, in plaats van minder ventilatoren met een hoge uitblaassnelheid. Per project moet worden onderzocht wat de optimale combinatie van ventilator aantal en uitblaassnelheid is.

4.3.3 Keuze van bestendigheid tegen hoge temperatuur

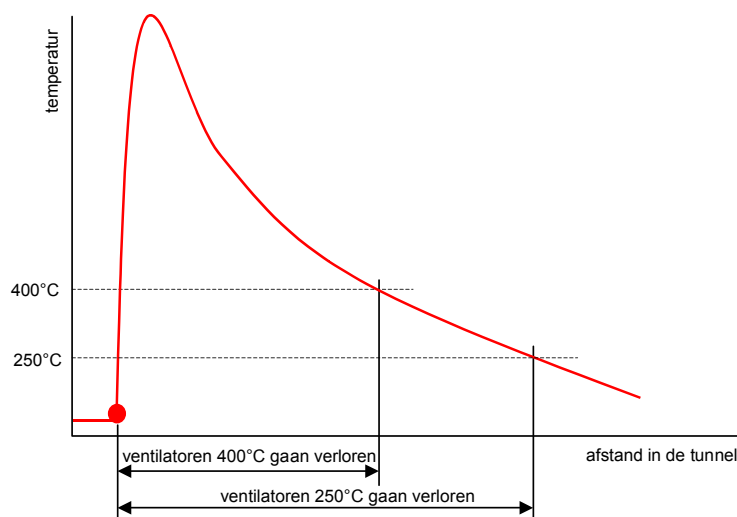
De mate van bestendigheid tegen hoge temperatuur bepaalt:

- hoe snel aanjaagventilatoren in een gebied met hoge rookgastemperaturen zullen uitvallen en
- over welke lengte stroomafwaarts van de brand dat gebeurt.

Bij het ontwerp van een langsventilatiesysteem moet rekening worden gehouden met extra ventilatoren ter compensatie van ventilatoren die bij brand verloren kunnen gaan in de hete zone voorbij de brand.

Aanjaagventilatoren zijn meestal geschikt om 1 of 2 uur te kunnen functioneren in een omgevingstemperatuur van 250 °C. Door bijzondere voorzieningen aan de ventilator kan een temperatuurbestendigheid van 400 °C worden bereikt. In Figuur 4–9 wordt het temperatuurverloop bij brand schematisch weergegeven. Hierin is te zien over welke lengte ventilatoren al vrij snel na het ontstaan van de brand zullen uitvallen vanwege de hoge temperatuur. In het gebied waarin de temperatuur lager is dan de temperatuurbestendigheid van de ventilator zal deze bij langdurige blootstelling aan een verhoogde temperatuur echter uiteindelijk ook uitvallen. Wanneer wordt aangenomen dat de meeste branden niet veel langer dan 2 uur duren, blijven deze ventilatoren naar verwachting gedurende de brand intact.

De hoogte van de temperaturen worden voor een belangrijk deel bepaald door de te verwachten brandgrootte.



Figuur 4–9: Zone waarbinnen ventilatoren uitvallen door te hoge temperatuur bij brand

Relatie tussen ventilatoropstelling en benodigde temperatuurbestendigheid

Omdat ventilatoren die in of nabij het ingangsportaal zijn opgehangen vrijwel nooit aan hoge temperaturen worden blootgesteld, is het voldoende voor deze ventilatoren een (standaard) temperatuurbestendigheid te kiezen van 250 °C.

Zijn de aanjaagventilatoren in de tunnel evenredig verdeeld over de lengte opgehangen en is de onderlinge afstand in lengterichting betrekkelijk kort, dan moet voor die ventilatoren een bestendigheid van bijvoorbeeld 400 °C worden gekozen. Hiermee wordt voorkomen dat een te groot deel van de ventilatoren bij brand door hoge temperatuur verloren gaat.

Bij tunnels langer dan 2 – 3 km wordt de tussenafstand tussen de afzonderlijke aanjaagventilatoren zo groot dat slechts enkele ventilatoren in het gebied met hoge temperatuur aanwezig zijn. In dat geval is het niet lonend ventilatoren bestendig te maken tegen temperaturen van meer dan 250 °C. Zo nodig kunnen enkele extra ventilatoren worden aangebracht om uitval van ventilatoren te compenseren.

Vergeleken met een evenredige verdeling over de tunnallengte verkleint de toepassing van ventilatorclusters de kans dat de ventilatoren zich binnen de hete zone stroomafwaarts van de brand terechtkomen. Er kunnen voorin de tunnel clusters worden geplaatst die slechts een kleine kans hebben in een hete zone te hangen. Omdat de onderlinge afstand in lengte richting bij clusters groter is dan bij enkele ventilatoren is de kans kleiner dat een cluster in een te hete zone terechtkomt. De kwetsbaarheid neemt daarentegen toe: als de brand te dicht bij een cluster ontstaat, gaat de gehele cluster verloren.

De optimale combinatie van temperatuurbestendigheid en ventilatoropstelling moet door middel van probabilistische berekeningen worden vastgesteld.

Aanbevelingen voor de keuze van de temperatuurbestendigheid

Hoe groter de temperatuurbestendigheid, hoe beter en langer aanjaagventilatoren bij een brand zullen blijven functioneren. Een grotere temperatuurbestendigheid leidt echter tot duurdere ventilatoren. Maar de meerkosten van de grotere temperatuurbestendigheid worden al vrij snel gecompenseerd door de besparing op het aantal ventilatoren. Er moet dus aan afweging worden gemaakt tussen de temperatuurbestendigheid en het aantal ventilatoren. Een temperatuurbestendigheid van 400 °C is hierbij een geaccepteerd optimum. Bij deze temperatuurgrens is een redelijk evenwicht aanwezig tussen de kosten voor het temperatuurbestendig maken van het ventilatorsysteem, en de prestatie die het systeem bij deze temperatuur nog kan leveren.

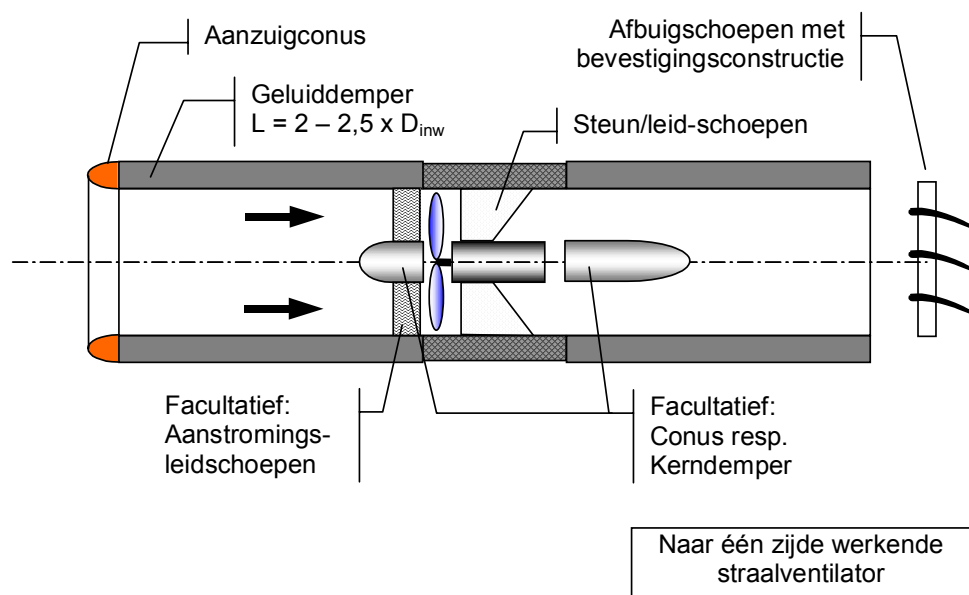
Met betrekking tot de temperatuurbestendigheid moeten de volgende eisen aan een aanjaagventilator worden gesteld:

- De motor moet qua constructie, lagering en isolatie van de wikkelingen zo zijn uitgevoerd dat vereiste gebruiksduur is gegarandeerd bij een bepaalde temperatuur.
- De voedingkabel en de wijze waarop deze wordt ingevoerd in de behuizing en aangesloten op de ventilatormotor moet bestand zijn tegen de hoge temperaturen.
- De kast voor de elektrische aansluiting op de ventilator en de eventuele werkschakelaar mag beschadigd raken, maar de stroomvoering moet gedurende de vereiste tijd zijn gewaarborgd.
- Gedurende de vereiste gebruiksduur mag de waaier niet kan vastlopen in het ventilatorhuis. De waaier zet door de hogere temperatuur uit en tevens treedt “kruip” van het materiaal op door de centrifugale belasting. Ook zal door de hoge temperatuur het ventilatorhuis enigszins vervormen. Desondanks moet voldoende tipspeling tussen waaier en ventilatorhuis gewaarborgd blijven.
- Het materiaal voor de balancerings van de waaier mag niet smelten of losraken.

4.3.4 Samenstelling van aanjaagventilatoren

Aanjaagventilatoren zijn van het axiale type, geconstrueerd in horizontale uitvoering.

Een ventilator bestaat in hoofdzaak uit een waaier, een draaistroommotor, een ventilatorhuis, geluiddempers, een aanzuigconus (bij omkeerbare ventilatoren aan beide zijden), een werkschakelaar en een montageframe.



Figuur 4-10: Samenstelling aanjaagventilator

Motor

De motor wordt bij voorkeur in de ventilator gemonteerd met de waaier direct op de motoras. Het verdient daarbij aanbeveling de motor uit te voeren als een gesloten draaistroommotor met uitwendige koeling.

Omdat de motor in een luchtstroom met hoge snelheid is geplaatst, vindt geforceerde koeling plaats. Het werkelijk opgenomen elektrisch vermogen van de motor mag hierdoor hoger zijn dan het nominale vermogen.

De motor moet bestand zijn tegen de omstandigheden in de tunnel, zoals:

- Grote temperatuurwisselingen
- Hoge relatieve vochtigheid
- Agressief chemisch milieu

Omdat de ventilatoren meestal niet zijn ingeschakeld is de motortemperatuur gelijk aan de omgevingstemperatuur. Bij inschakeling stijgt de temperatuur in de motor waardoor de aanwezige lucht sterk uitzet. De motor moet daarom zijn voorzien van drukontlasting om drukopbouw over de lagerdichtingen te voorkomen.

Elektrische voedingsleidingen moeten vanaf de buitenzijde van de straalventilator direct naar de motor worden gevoerd, om twee redenen:

- Elektrische aansluitklemmen binnen de straalventilator zijn slecht bereikbaar.
- Een aansluitkast op de motor levert aërodynamische verliezen op.

Als een aansluitkast wordt gebruikt, moet deze aan de buitenzijde van de ventilator zijn aangebracht. De elektrische voeding moet zo zijn uitgevoerd dat – ondanks beschadiging

van leidingen en aansluitingen door hoge temperatuur – de motor elektrisch wordt gevoed gedurende de vereiste tijd van brandbestendigheid van de gehele ventilator.

Ventilatorhuis

Voor het ventilatorhuis geldt:

- De stijfheid van de constructie is zo groot dat onder normale belasting de speling tussen huis en waaierbladen over de hele omtrek nagenoeg constant is.
- Het ventilatorhuis mag niet van vorm veranderen als gevolg van hoge temperaturen.
- Het ventilatorhuis is bij voorkeur aan de buitenzijde akoestisch geïsoleerd en van een beschermmantel voorzien.

Steun/Leidschoepen

De motor is met steunen in het ventilatorhuis bevestigd. De steunen zijn tegelijkertijd leidschoepen voor de luchtstroom die door de waaier wordt geproduceerd. De vormgeving van deze steunen is van invloed op het aërodynamisch rendement:

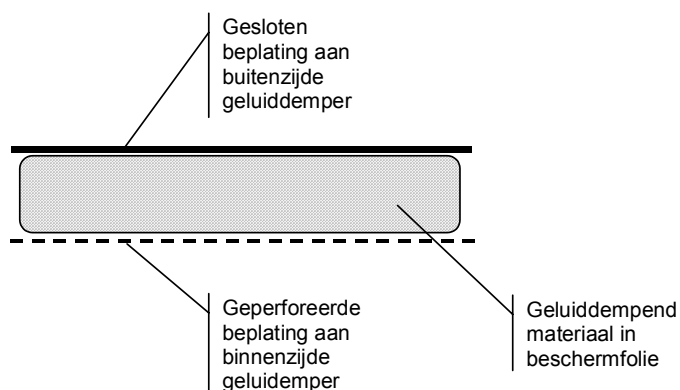
- De leidschoepen verbeteren het aërodynamisch rendement doordat de stroming na de waaier wordt 'gestrekt'. Eventuele turbulenties worden hierdoor gecorrigeerd.
- Stroomafwaarts heeft de stroming 'swirl' ofwel een draaiing rond de axiale as. Dit wordt veroorzaakt door de draaiing van de waaier. Goed vormgegeven leidschoepen kunnen deze swirl wegnemen of verminderen waardoor het aërodynamisch rendement toeneemt. De winst is echter niet zo groot dat het de moeite loont om de steunschoepen een speciale vorm te geven.

Door leidschoepen voor de waaier aan te brengen kan van de aanstroming van de waaier worden verbeterd. Het nadeel is echter dat de leidschoepen zelf ook stromingsweerstand opleveren en eventuele winst moet daarom worden afgewogen tegen het verlies. In de meeste straalventilatoren worden deze aanstromingsleidschoepen weggelaten.

Geluiddempers

Voor de geluiddempers in een ventilator geldt:

- Geluiddempend materiaal in geluiddempers moet vochtbestendig zijn.
- Tussen geluiddempend materiaal en geperforeerde beplating moet een beschermfolie worden aangebracht (zie Figuur 4–11).
- Onderlinge overlappingsen van delen van de buitenbeplating van de demperhuizen moeten afwaterend zijn.
- De demperhuizen van de ingangventilatoren moeten op het laagste punt aan de buitenzijde zijn voorzien van ontwateringsgaten.



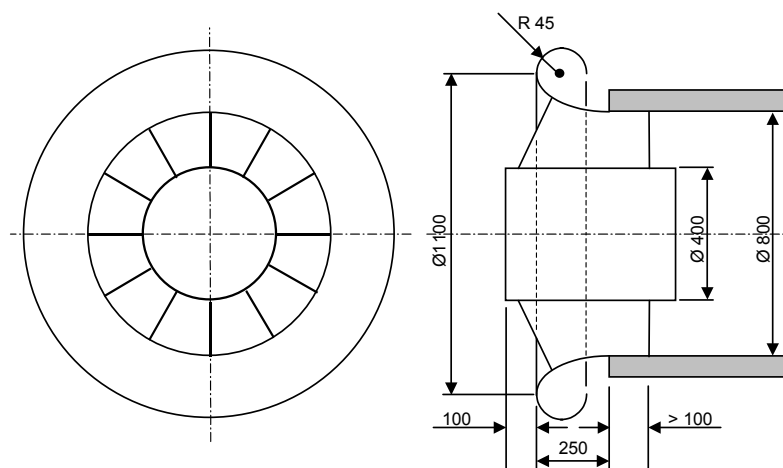
Figuur 4–11: Doorsnede over de wand van een geluiddemper

Aanzuigconus

Een ventilator moet aan de aanzuigzijde zijn voorzien van een aanzuigconus. Deze aanzuigconus moet zo gevormd zijn dat aanzuigverliezen door turbulenties en loslatingsverschijnselen minimaal zijn. Aan de uitblaaszijde is geen conus aangebracht.

Volledig omkeerbare ventilatoren moeten aan beide zijden zijn voorzien van een aanzuigconus. Vanwege de vereiste vorm van de beide aanzuigconussen is de prestatie van een omkeerbare aanjaagventilator altijd lager dan van een ventilator waarbij de stromingsrichting niet kan worden omgekeerd.

Wanneer een ventilator in het ingangsportaal wordt opgehangen moet rekening worden gehouden met mogelijke zijwind. De aanzuigconus moet zo gevormd zijn dat bij een zijwind van 0 – 10 m/s de ventilator een stabiele, rustige loop heeft. Ook mogen door de zijwind geen loslatingsverschijnselen en turbulenties in het aanzuiggedeelte ontstaan. In Figuur 4-12 wordt een mogelijke oplossing aangegeven, gebaseerd op modelonderzoek en onderzoek op ware schaal aan een aanjaagventilator met een inwendige diameter van 800 mm.



Figuur 4-12: Aanzuigconus ventilatoren in ingangsportaal



Figuur 4-13: Aanzuigconus ventilatoren in ingangsportaal – praktijksituatie

Inwendige conus en kerndemper

In sommige gevallen kan een inwendige conus de aanstroming naar de waaier verbeteren. De inwendige conus kan desgewenst als kerndemper worden uitgevoerd. Hetzelfde geldt aan de stroomafwaartse zijde van de motor of waaiernaaf (zie figuur 4-10).

Inwendige conussen en kerndempers kunnen echter ook een negatief effect hebben op de stuwkracht en dragen niet altijd effectief bij aan de geluiddemping. Immers, een dergelijke conus of kerndemper veroorzaakt zelf ook een stromingsweerstand en is zelf ook een geluidsbron. De noodzaak van deze maatregel zal daarom per type straalventilator moeten worden bekeken.

Voorkomen van stof- en vochtophoping

Aan de buitenzijde moeten het ventilatorhuis en de trillingsdempers zo zijn uitgevoerd, dat na montage in de tunnel de randen afwaterend zijn. Bovendien mogen stof en water zich zo min mogelijk kunnen verzamelen in spleten, op randen of in verdiepte gedeelten.

Geluiddempers van opgehangen ventilatoren moeten op het laagste punt zijn voorzien van afwateringsopeningen.

Afbuigschoepen

Wanneer aanjaagventilatoren dichtbij het plafond of een wand wordt geplaatst kan het zo zijn dat de straal het plafond of de wand raakt, waardoor het opstellingsrendement van de ventilatoren afneemt. Om dit te voorkomen worden afbuigschoepen op de uitblaasopening geplaatst. Bij omkeerbare ventilatoren gebeurt dit aan beide zijden.

Afbuigen van de straal leidt echter ook tot stuwkrachtverlies. Daarom moet bij toepassing van afbuigschoepen worden gelet op het volgende:

- Aangezien vanwege de afbuighoek de krachtwerking op de stroming in de tunnel afneemt zijn afbuighoeken groter dan 12° niet aan te bevelen (zie 6.4.8).
- Door de afbuigschoepen een vleugelvorm te geven wordt het stuwkrachtverlies beperkt tot maximaal 2,5%.
- De optimale stand (verdraaiing) van de afbuigschoepen moet door metingen in de tunnel worden vastgesteld.

Afbuigschoepen vormen een geluidsbron vanwege de hoge stroomsnelheid langs de schoepen. Uitgevoerd als een enkelvoudige gebogen plaat veroorzaakt een stel afbuigschoepen een toename van circa 5 – 6 dB(A).

De geluidsproductie kan beperkt worden door:

- het aantal schoepen te beperken tot 3 of hooguit 4;
- de vorm van de schoep vleugelvormig uit te voeren (zie figuur 4-1). Hierdoor worden loslatingsverschijnselen en bijbehorende turbulenties beperkt en bedraagt de verhoging van de geluidsproductie niet meer dan 2 – 3 dB(A);
- de koorde van de schoep niet te kort te kiezen (minimaal circa 20 cm), maar ook niet te lang omdat anders teveel aërodynamische weerstand ontstaat;
- de achterzijde gekarteld uit te voeren zodat geen tonale loslatingsverschijnselen ontstaan (Von Karman wervels).

4.3.5 Aërodynamica en Geluid

Geluid wordt veroorzaakt door wervelingen en door loslatingsverschijnselen die turbulentie tot gevolg hebben. Turbulentie leidt bovendien tot aërodynamische verliezen.

Turbulentie kan zoveel mogelijk worden voorkomen door:

- een zorgvuldige vormgeving van constructies;
- een optimale vorm van de waaier en eventuele leidschoepen;
- de binnenzijden van het ventilatorhuis en de trillingdempers (in het gebied met hoge luchtsnelheden) zo vloeiend en glad mogelijk uit te voeren. Scherpe randen en spleten moeten worden voorkomen of, als dit onvermijdelijk is, worden beperkt tot maximaal 2 mm. Ook uitstekende schroeven, bouten of blindklinknagels moeten worden vermeden;
- steun- en leidschoepen aan de aanstroomzijde af te ronden;
- de achterzijde van steun- en leidschoepen aan de afstroomzijde niet haaks op de stroomrichting plaatsen of anders voorzien van een karteling (het voorkomen van Von Karman wervels).

De geluidsproductie van straalventilatoren in een tunnel kan verder worden beperkt door voldoende lange geluiddempers. Vaak is een demperlengte van 2 tot 2,5 maal de inwendige hydraulische diameter noodzakelijk. Een bijkomend voordeel van zulke lange dempers is dat de aërodynamische prestaties van de ventilator verbeteren: de turbulentie in de uitstroom vermindert, waardoor de stuwkracht groter wordt. Dit vereist echter wel de juiste beplating aan de binnenzijde van de demper om de inwendige weerstand niet teveel te laten oplopen. Uit proeven is gebleken dat de optimale perforatie van de beplating aan de binnenzijde van de demper 30 – 35% is. Dit percentage zorgt voor een goed evenwicht tussen weerstand en demping. Bij demperlengtes van meer dan 2,5 maal de inwendige hydraulische diameter weegt de extra geluidsdemping meestal niet op tegen de grotere stromingsweerstand.

4.3.6 Ophanging van aanjaagventilatoren

Ventilatoren mogen in de normale situatie niet los kunnen raken van de civiele constructie. Dat zou leiden tot gevaarlijke situaties voor het verkeer. Ook tijdens brand – zeker in de zelfredzaamheidsfase – mogen ventilatoren niet naar beneden kunnen vallen in gebieden waar redelijkerwijs personen aanwezig kunnen zijn.

De bevestiging van ventilatoren wordt belast door:

- het eigen gewicht van de ventilator;
- de stuwkracht van de ventilator vermeerderd met trillingen en/of stoten;
- door het rijdende verkeer opgewekte luchtstromingen. Vooral vrachtwagens kunnen aanzienlijke stootbelastingen uitoefenen, veroorzaakt door de drukgolf voor en het zog achter de vrachtwagen.

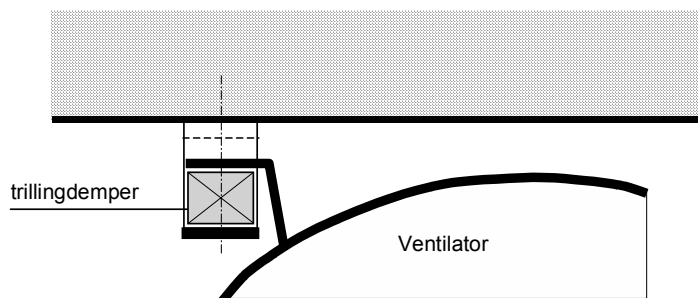
De wisselende belasting, vooral door drukgolven van rijdend verkeer, maakt het noodzakelijk de bevestiging voor een dynamische belasting te berekenen. Hierbij moet worden bedacht dat het aantal belastingswisselingen zeer groot is.

Voor bevestiging kunnen verschillende soorten ankers worden gebruikt, die echter niet allemaal even geschikt zijn:

- Gewone spreidankers voor bevestiging aan beton blijken de neiging te hebben bij dynamische toepassingen los te trillen. Daarom wordt voor de bevestiging van tunnelventilatoren bij voorkeur gebruik gemaakt van achtersnijdingsankers.
- In constructief opzicht is het gebruik van frames met instortankers een goede oplossing. Het nadeel van instortankers is echter dat de plaatsbepaling nogal eens te wensen overlaat. De instortankers worden immers reeds geplaatst in een fase waarin mogelijk de leverancier van de ventilatoren nog niet bekend is. Gebruik van instortankers is niet mogelijk in geboorde tunnels met een mantel van geprefabriceerde betonnen segmenten.

- Chemische ankers verliezen al bij vrij lage temperaturen hun sterkte. Bij brand is de kans dus groot dat de ventilatoren van het plafond vallen.

Trillingdempers worden voor aanjaagventilatoren vrijwel nooit toegepast. Wanneer wel trillingdempers worden toegepast mag breuk van een trillingdemper niet leiden tot losraken van de verbinding (zie Figuur 4-14).

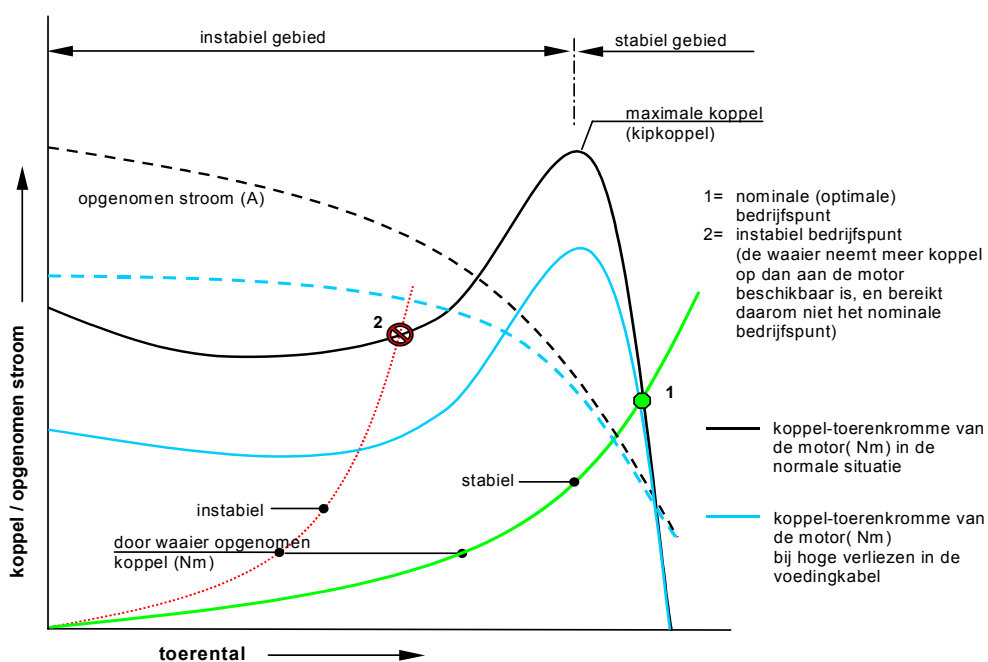


Figuur 4-14: Uitvoering van trillingdempers

4.3.7 Motorprestaties

Motorprestatie in de normale situatie:

Aanjaagventilatoren zijn meestal voorzien van kooianker draaistroommotoren. Het door deze elektromotoren geleverde koppel is afhankelijk van het toerental en is maximaal bij het zogeheten 'kippkoppel'. Bij aanlopen (toenemend toerental) wordt de prestatie van de motor stabiel voorbij het kippkoppel. Voorbij het kippkoppel is het toerental vrijwel constant en kan de belasting worden gevarieerd tussen 0 en maximaal.



Figuur 4-15: Karakteristieken van een kooianker (draaistroom) elektromotor

Na aanlopen van de motor ontstaat een evenwicht tussen het voor de waaier benodigde koppel enerzijds en het door de motor geleverde koppel anderzijds. Dit evenwicht (de gewenste situatie) ontstaat op een punt op de koppel-toerenkromme voorbij het kipkoppel. Op dit deel van de koppel-toerenkromme zal de motor goed presteren bij een vrijwel constant toerental. Belastingvariaties resulteren in een geringe afname van het toerental en een dito verlies aan prestatie en stroomopname.

Bij ventilatoren ontstaat deze stabiele situatie vrijwel altijd. De waaier heeft namelijk een koppel-toerenkromme die begint bij koppel=nul, en waarbij het koppel kwadratisch toeneemt met het toerental (de hoeveelheid verplaatste hoeveelheid lucht neemt kwadratisch toe met het waaierental). De waaier neemt pas vol vermogen op nadat het kipkoppel is gepasseerd (zie Figuur 4–15).

Motorprestatie bij (te) hoge belasting

In het deel van de koppel-toerenkromme vóór het kipmoment kan ook evenwicht ontstaan tussen het gevraagde en het geleverde koppel als het gevraagde koppel sterker toeneemt dan het beschikbare koppel. Dit is bijvoorbeeld het geval bij een veel te licht gekozen motor of als de waaier al bij lage toerentalen een hoog koppel opneemt (bijvoorbeeld bij een vastlopende waaier). In dat geval zal de motor zeer slecht presteren: het toerental is (te) laag, de stroomopname is (te) hoog en belastingvariatie resulteert in een sterke variatie van het toerental. De prestatie is instabiel en in de praktijk zal de maximaalstroombeveiliging geactiveerd worden en het apparaat uitschakelen.

Motorprestatie bij toenemende belasting

In de normale, stabiele situatie zal bij toenemende belasting het nominale bedrijfspunt omhoog kruipen op de prestatielijn: het toerental wordt iets lager (de slip neemt toe) en de opgenomen stroom neemt toe. Uiteindelijk wordt het kipkoppel bereikt, waarna de motor instabiel wordt en door de maximaalstroombeveiliging wordt uitgeschakeld.

Motorprestatie bij hoge aanloopverliezen in de voedingkabel van een ventilator

Een klein gedimensioneerde voedingskabel (hoge weerstand) heeft vooral tot gevolg dat de (kabel)verliezen hoog zijn op het moment dat de motor veel stroom vraagt. Dit is het geval tijdens aanlopen van de motor. Ook de prestatie van de motor vermindert (de koppel-toerenkromme komt lager in de grafiek te liggen). Dit heeft de volgende invloed op de prestatie van de ventilator:

- Het nominale bedrijfspunt zal bereikt worden omdat het opgenomen vermogen van de waaier toeneemt met het toerental. De kabelverliezen zijn op dit punt laag in verhouding tot die tijdens het aanlopen.
- Het toerental van de ventilator neemt minder snel toe: het aanlopen duurt langer.
- De reservecapaciteit wordt minder (bij toenemende belasting wordt het kipkoppel eerder overschreden).

Geen van deze invloeden leiden tot een merkbaar lagere prestatie van de ventilator. Het is daarom mogelijk de ventilator met een betrekkelijk klein gedimensioneerde kabel aan te sluiten op de elektrische voeding. Aanloopverliezen van 15 – 20% zijn in dit verband niet bezwaarlijk gebleken.

Bedrijf in koude lucht

Een aanjaagventilator verplaatst altijd evenveel volume, maar de hoeveelheid verplaatste massastroom is afhankelijk van de dichtheid van de lucht. Bij gelijkblijvende omgevingsdruk is de dichtheid afhankelijk van de temperatuur en luchtvochtigheid.

De door de ventilatorfabrikant verstrekte gegevens gelden meestal bij normaal bedrijf in lucht van 20 °C, een dichtheid 1,2 kg/m³ bij een druk van 1013 mbar, en gemiddelde luchtvochtigheid. In een tunnel is de temperatuur echter afhankelijk van de weersgesteld-

heid en kan dus aanzienlijk variëren. Met de variatie in temperatuur varieert ook de dichtheid van de lucht volgens:

$$\frac{\rho_{T=T_{actueel}}}{\rho_{T=293K}} = \frac{293}{273 + T_{actueel}} \quad \text{ofwel} \quad \rho_{actueel} = 1,2 \cdot \frac{293}{273 + T_{actueel}}$$

waarbij $T_{actueel}$ de op dat moment aanwezige temperatuur in °C is.

Het opgenomen vermogen van een ventilator is evenredig met de dichtheid van lucht, en daardoor afhankelijk van de temperatuur in de tunnel. Als lucht kouder is dan 20 °C, dan is het ook zwaarder. De ventilator zal dus in koude lucht meer vermogen opnemen. Omgekeerd neemt de ventilator in warmere lucht minder vermogen op.

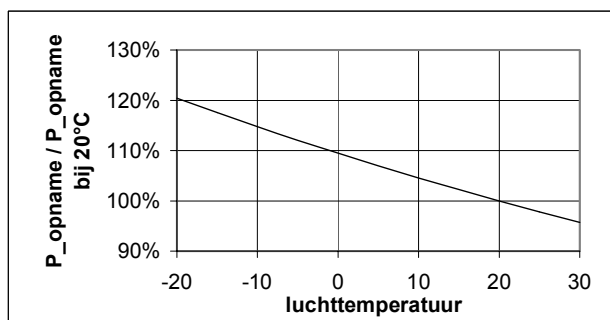
Het ontwerp van de motoren van tunnelventilatoren moet zijn afgestemd op lage temperaturen. Bij het ontwerp van de elektrische voeding van aanjaagventilatoren moet er rekening mee worden gehouden dat de door de motorfabrikant verstrekte gegevens gelden bij 20 °C, maar dat de werkelijke omgevingstemperatuur aanzienlijk lager kan zijn.

De laagste omgevingstemperatuur wordt meestal op -15 °C gekozen. Hoewel zulke lage temperaturen in Nederland vrijwel nooit voorkomen moet bedacht worden dat de werkzame aanjaagventilatoren zich stroomopwaarts van de brand bevinden. Uitval door te lage temperatuur zou in die situatie leiden tot uitval van het effectiefste deel van het ventilatiesysteem. Dit is onacceptabel. De grens van -15 °C leidt niet tot een veel grotere voedingsinstallatie dan een grens van bijvoorbeeld -7 °C of -10 °C.

Bij motoren met een vermogen van 10 – 50 kW neemt het opgenomen vermogen met circa 0,1% toe per 1 °C afname ten opzicht van het referentiepunt van 20 °C. Rekening houdend met de toename van de dichtheid wordt het opgenomen vermogen beschreven door:

$$P_{opgenomen} = P_{opgenomenbij\ 20^{\circ}C} \cdot \frac{293}{273 + T_{actueel}} \cdot [1 + 0,001 \cdot (20 - T_{actueel})]$$

Het opgenomen vermogen is bij -15°C een factor 1,17 hoger dan bij +20°C.



Figuur 4–16: Verband tussen opgenomen vermogen en luchttemperatuur

4.4 Dwarsventilatie

Hieronder wordt beknopt ingegaan op de ontwerpeisen voor een systeem voor dwarsventilatie. Meer ontwerpgegevens voor dwarsventilatie zijn te vinden in hoofdstuk 2 en in paragraaf 6.5.

4.4.1 Ontwerpeisen

Een systeem van dwarsventilatie moet in staat zijn om:

- in de normale situatie de concentraties verkeersemisatie onder een bepaald maximum te houden;
- desgewenst de concentraties verkeersemisatie in de omgeving van de tunnel onder een bepaald maximum te houden;
- bij brand de rook af te zuigen zodat wordt voorkomen dat de rook zich over een groot deel van de tunnelbuis verspreid;
- bij brand voldoende lucht te kunnen toevoeren voor optimale verbranding. Hiermee wordt voorkomen dat de brand zo lang duurt dat de warmtebelasting op de constructie leidt tot onherstelbare schade;
- bij brand de (eventuele) stratificatie zo goed mogelijk in stand te houden. Daardoor blijven vluchtwegen zolang mogelijk zichtbaar en zullen toxische rookgassen niet worden ingeademd.

Dwarsventilatie moet worden aangevuld met voorzieningen om bij brand ongecontroleerde stroming van rookgassen in langsrichting door windinvloed te voorkomen. Om stratificatie te behouden moet worden getracht de stroomsnelheid in langsrichting in de tunnel onder de 2 m/s te houden. Een hogere snelheid zal de rooklaag verstoren waardoor deze zich zal mengen met de lucht eronder. Bovendien moet rekening worden gehouden met het feit dat de voertuigen in de tunnelbuis en objecten aan de tunnelwanden en het tunnelplafond turbulentie veroorzaken.

De voorzieningen kunnen bestaan uit een bepaalde schakeling van secties van dwarsventilatie of door een langsv ventilatiesysteem.

Om de afmetingen van de kanalen en de grootte van ventilatoren te beperken wordt dwarsventilatie meestal verdeeld in secties van 400 – 800 m tunnellengete.

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

Voor de eisen met betrekking tot beheer en onderhoud wordt verwezen naar hoofdstuk 10.

4.4.2 Toevoer

Wanneer bij brand ook in de brandzone lucht wordt ingeblazen moet er naar gestreefd worden de stratificatie zo goed mogelijk in stand te houden. Daarom moeten de toevoerpunten laag worden geplaatst, bij voorkeur niet hoger dan 0,5 m boven het wegdek. Luchttoevoerpunten in het plafond of hoog in de wand verstoren de rooklaag en vergroten de hoeveelheid rook door opmenging met verse lucht. Bij deze aanbeveling gelden echter twee uitzonderingen:

- Als in de tunnelsectie waar de brand zich bevindt de toevoerventilatie wordt uitgeschakeld, mogen de toevoerpunten wel in het plafond of hoog in de wand worden geplaatst.

-
- Als de toevoer wordt omgeschakeld op afvoer, moeten de toevoerpunten hoog zijn geplaatst.

De inblaassnelheid van laag geplaatste inblaasroosters moet zodanig worden beperkt dat de rooklaag niet wordt verstoord. Een hoge uitblaassnelheid veroorzaakt turbulentie waardoor de hele tunneldoorsnede met rook wordt gevuld. De relatief veilige ruimte onder de rooklaag verdwijnt daardoor.

4.4.3 Afvoer

De beste plaats voor de afvoerpunten is in het plafond. Bij brand kan dan de meeste rook worden afgevoerd met een laag afvoerdebiet. Plaatsing hoog in wand is een goed alternatief, hoewel het benodigde afzuigdebiet 1,5 – 2 maal groter is dan bij afvoerpunten in het plafond.

Traditioneel werden in het verleden veel kleine plafondafzuigroosters/-openingen (circa 0,2 m²) op korte onderlinge afstand door gehele tunnel toegepast, die alle continu geopend zijn. Dit heeft als nadeel dat de lokale afzuigcapaciteit te klein is in verhouding tot de hoeveelheid rook, waardoor de rook zich over een grote lengte kan verspreiden.

Er wordt aanbevolen grote afvoeropeningen toe te passen. De openingen moeten afsluitbaar zijn door middel van kleppen. In de normale situatie staan deze kleppen open. Bij brand worden de tunnelsecties in de brandzone op maximaal afzuigen gezet; in de overige secties worden de afzuigventilatoren afgeschakeld en/of de kleppen gesloten, en wordt alleen toevoerlucht ingeblazen. Daardoor wordt het hele afzuigdebiet geconcentreerd op de brandzone. Bovendien worden langsstromingen op deze manier enigszins beheersbaar, hoewel werkelijke beheersing alleen met aanvullende langsventilatie mogelijk is.

De bediening van de kleppen kan plaatsvinden door lokale rook-/branddetectoren of via centrale bediening. De kleppen kunnen elk met een kleefmagneet/-grendel worden uitgerust of met motorbediening. Het systeem met een kleefmagneet/-grendel vergt minder onderhoud dan een systeem met motorbediening, maar heeft als nadeel is dat na het sluiten de luiken niet meer op afstand te openen zijn. En geopende luiken kunnen op afstand niet meer worden gesloten.

Wanneer kleppen door een kleefmagneet/-grendel of door een temperatuurgevoelig mechanisme worden bediend ontstaat bovendien het gevaar dat een brandend voertuig, dat nog rijdt en vervolgens tot stilstand komt, over een grote lengte de kleppen zijn geopend. Deze geopende kleppen dragen niet of weinig bij tot het afzuigen van rook maar beperken wel de efficiëntie van het systeem sterk.

Er wordt aanbevolen om ook in normaal bedrijf permanent een minimum afzuigcapaciteit ingeschakeld te houden, zodat bij het eerste ontstaan van brand de rook meteen wordt afgevoerd. Vanwege de tijd die nodig is om de brand te detecteren, het ventilatiesysteem te starten en de gewenste kleppen van de afvoerpunten te sluiten, kan rook zich anders over een aanzienlijke lengte verspreiden, geholpen door de vrijwel altijd aanwezige langsstroming van de tunnellucht.

4.4.4 Onderdelen

Aan de onderdelen van het dwarsventilatiesysteem moeten de volgende eisen worden gesteld:

- De kanalen moeten volledig te inspecteren en te reinigen zijn om geleidelijke ophoping van vervuiling te kunnen voorkomen.

-
- De brandbestendigheid van afzuigkanalen, afzuigventilatoren en afzuigroosters moet zijn uitgevoerd conform NEN EN 12101-1 tot en met NEN EN 12101-10.
 - Bij de keuze van de temperatuurbestendigheid van afvoerventilatoren moet rekening worden gehouden met de afkoeling van rookgassen aan de kanaalwanden. De afkoeling zal na verloop van tijd afnemen omdat de temperatuur van de kanaalwanden stijgt.
 - Beschadiging van afzuigroosters en kanalen boven de brandhaard is toelaatbaar mits de afzuiging in de brandzone hierdoor niet stagneert.

4.4.5 Geluid naar de omgeving

Omdat zowel de luchttoevoer als de luchtafvoer centraal buiten de tunnel geschieden, moet het ontwerp voldoen aan de wettelijke maximale geluidsbelasting naar de omgeving. Zo nodig moeten geluiddempende maatregelen worden getroffen.

4.4.6 Kosten

Een systeem van volledige dwarsventilatie kost 20 – 50 maal meer dan een langsventilatiesysteem. Dit wordt met name veroorzaakt door de aanzienlijke kosten voor de civiele voorzieningen, zoals afzuig- en toevoerkanalen, ventilatiegebouwen, enzovoort. Bovendien zijn de energiekosten relatief hoog en vormt ook het onderhoud, met name van de afvoerkanalen en -roosters, een aanzienlijke kostenpost vergeleken met langsventilatie.

4.5 Voorkomen van aërodynamische kortsluiting bij tunnelportalen

4.5.1 Algemeen

Aërodynamische kortsluiting tussen tunnelportalen treedt op als de lucht die het uitgangsportaal van de ene tunnelbuis uitstroomt, bij het ingangsportaal van een daarnaast gelegen tunnelbuis weer naar binnen stroomt. Dit kan nadelige gevolgen hebben wanneer die lucht vervuild is met voertuigemissies of met rook als gevolg van brand.

Dit fenomeen doet zich voor wanneer:

- in- en uitgangsportaal van een tunnel dicht bij elkaar liggen of – ook als ze niet vlak naast elkaar liggen – als ze zich samen in een door zijwanden omsloten ruimte bevinden EN
- de richting van de luchtstroming in de buizen tegengesteld is.

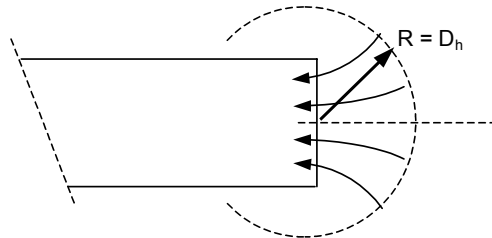
Als de stroming in naast elkaar liggende tunnelbuizen dezelfde richting heeft, treedt nooit aërodynamische kortsluiting op.

De mate van aërodynamische kortsluiting hangt af van een aantal factoren:

- de wijze waarop tunnelportalen door wanden worden omsloten;
- de vorm van de tunnelportalen, waaronder:
 - de onderlinge afstand in de breedte tussen de tunnelbuizen;
 - verspringing van in- en uitgangsportaal;
 - een eventuele scheidingswand tussen in- en uitgangsportalen;
- de verhouding tussen de luchtstroming in de tunnel en de windsnelheid;
- de windrichting.

Het aanzuiggebied

De grootte van het aanzuiggebied bij een aanzuigopening wordt ruwweg beschreven door een bol waarvan de straal gelijk is aan de hydraulische diameter D_h van de aanzuigopening, gerekend vanaf het midden van de aanzuigopening (voor de definitie van de hydraulische diameter, zie 6.4.2). Op een afstand $R > D_h$ is de luchtsnelheid als gevolg van de aanzuiging te verwaarlozen.



Figuur 4–17: Wijze van instroming bij een aanzuigopening

Om aërodynamische kortsluiting bij een ingangsportaal te voorkomen moet dus worden gezorgd dat de lucht die het uitgangsportaal verlaat niet binnen dit gebied terecht kan komen.

De luchtstroom uit het uitgangsportaal heeft een zekere impuls waardoor de lucht van nature 'doorschiet' en niet gauw wordt aangezogen door het naastgelegen ingangsportaal. Zonder windinvloed is de mate van recirculatie daarom vrijwel nihil, ongeacht de vormgeving van het portaal. De situatie verandert wanneer er wél sprake is van windinvloed.

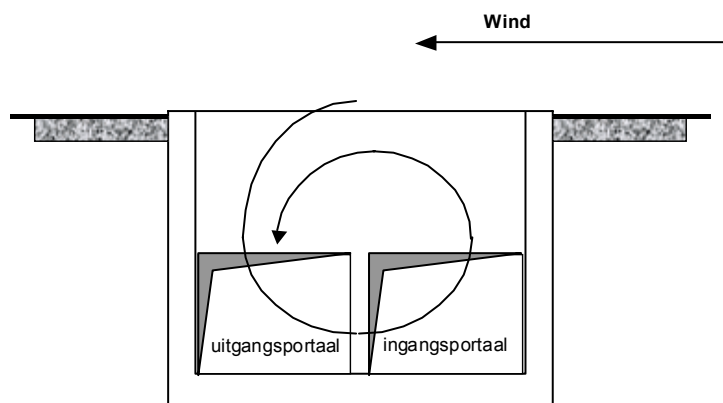
Windinvloed

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 aanwezig zijn – wanden, geluidschermen of gebouwen – treedt aan de lijszijde van deze vlakken turbulentie op. Door deze turbulentie wordt de vervuilde lucht of rook zo verspreid of getransporteerd dat deze bij het ingangsportaal kan worden aangezogen. In Tabel 4–1 wordt voor de drie belangrijkste typen in- en uitgang aangegeven hoe groot de windinvloed kan zijn.

Type in-/uitrit	Mate van zijwaartse afscherming	Mate van recirculatie (%)
Bovengronds met dwarswand boven portaal	Geen zijwanden	Zonder maatregelen afhankelijk van windrichting: 10 - 50%
Matig verzonken t.o.v. maaiveld	Zijwanden tot maximaal 10 m boven wegdek	Zonder maatregelen afhankelijk van windrichting: 20 - 40%
Diep verzonken t.o.v. maaiveld	Zeer hoge zijwanden	Zonder maatregelen afhankelijk van windrichting: 20 - 50%

Tabel 4–1: Invloed van wind op recirculatie bij verschillende types in-/uitrit

In Figuur 4–18 wordt de invloed geschetst die wind heeft op de verspreiding van de tunnel-lucht 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. Aan de lijszijde van de bak ontstaat een zog waarin de meeste emissie/rook zich verzamelt. Aangezien dat juist de plaats van het ingangsportaal is, wordt in die situatie veel vervuilde lucht of rook bij het ingangsportaal naar binnen gezogen. 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.



Figuur 4-18: Wervel in tunnelbak door wind

4.5.2 Aërodynamische kortsluiting en emissieconcentraties

In de normale bedrijfssituatie kan aërodynamische kortsluiting bij tunnels leiden tot onacceptabel hoge emissieconcentraties, vooral wanneer het fenomeen zich aan beide zijden van de tunnel tegelijkertijd voordoet. Er treedt dan opslinging van de emissieconcentraties op: de lucht zal rond blijven gaan door de tunnelbuizen en steeds meer vervuiling opnemen. Wanneer de kortsluiting maar aan één zijde tegelijk optreedt, kan in sommige gevallen de emissieverhoging in de tunnel acceptabel zijn. Voor aanbevolen grenswaarden wordt verwezen naar 11.3.2.

Aërodynamische kortsluiting verminderen

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

Voor tunnels op maaiveld geldt:

- Er treedt bijna geen kortsluiting meer op wanneer in- en uitgangsportaal in de breedte hart op hart meer dan 1,4 maal de tunnelbuisbreedte uit elkaar liggen.
- Het met 1 – 2 hydraulische diameters laten uitsteken van het uitgangsportaal blijkt effectief. Het laten uitsteken van het ingangsportaal is veel minder effectief.
- Een scheidingswand die minstens even hoog als de tunnelbuizen en die een lengte heeft van 1 – 2 maal de hydraulische diameter van de tunnelbuizen, is eveneens effectief.

Bij tunnels waarvan de toerit en het portaal verzonken liggen ten opzichte van het maaiveld – of de toerit geheel is omsloten door hoge geluidschermen – zijn een tweetal maatregelen effectief:

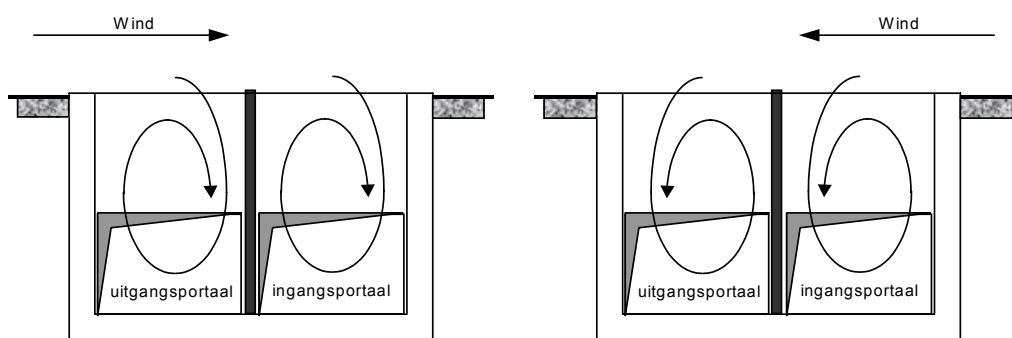
- Het uitgangsportaal steekt circa 40 meter uit t.o.v. het ingangsportaal.
- Er staat een scheidingswand tussen in- en uitgangsportaal die minstens net zo hoog is als de zijwanden van de toerit en die een lengte heeft van circa 40 meter.

Beide maatregelen werken ongeveer even goed.

Wanneer het uitgangsportaal wordt verlengd ten opzichte van het ingangsportaal, komt de vervuilde lucht zo ver van het ingangsportaal vrij dat er weinig kortsluiting optreedt, ondanks wervelingen door wind. Daarbij is de transportweg zo lang dat de vervuilde lucht sterk wordt verdund met verse buitenlucht, waardoor uiteindelijk weinig vervuilde lucht het ingangsportaal bereikt.

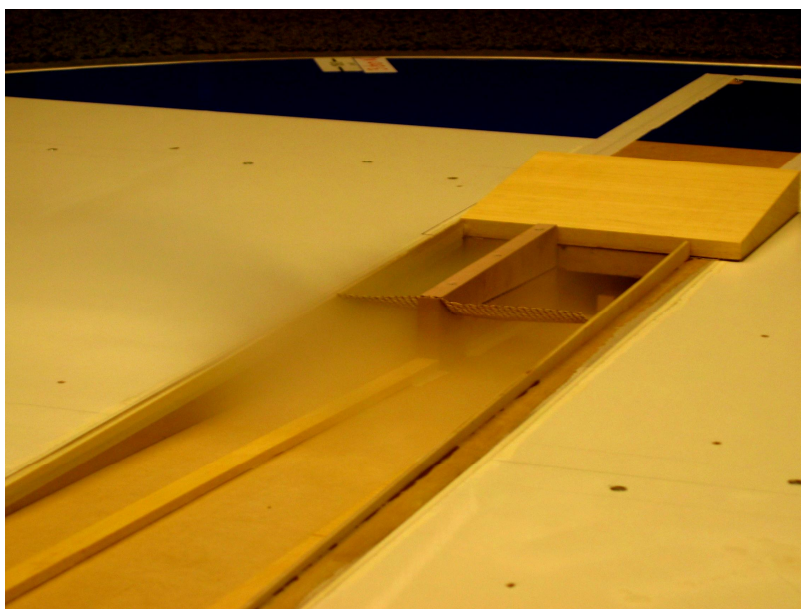
Opmerking: Het laten uitsteken van het ingangsportaal t.o.v. het uitgangsportaal is een slechte oplossing. Er is dan namelijk nog steeds een grote kans op aanzuigen van vervuilde lucht aanwezig, tenzij het ingangsportaal meer dan 80 – 100 m ten opzichte van het uitgangsportaal uitsteekt.

Als een scheidingswand wordt geplaatst, zal de wervel in de tunnelbak in twee wervels worden gesplitst die weinig of geen contact met elkaar hebben (zie Figuur 4–19). Via de bovenzijde en aan het einde van de scheidingswand wordt nog wel enige emissie getransporteerd naar de bak voor het ingangsportaal, maar dit is aanzienlijk minder dan zonder scheidingswand, zoals Tabel 4–2 laat zien.



Figuur 4–19: Door wand gescheiden wervels in tunnelbak

Een voorbeeld van een dergelijke situatie is getoond in de foto van een modelproef.



Figuur 4–20: Modelproef tunnelportaal met een hoge scheidingswand

De effecten van de maatregelen zijn globaal aangegeven in Tabel 4–2.

Type in-/uitrit	Mate van zijwaartse afscherming	Mate van recirculatie (%) zonder maatregel	Mate van recirculatie met scheidingswand of verspringende portalen
Bovengronds met dwarswand boven portaal	Geen zijwanden	Afhankelijk van windrichting: 10 - 50%	0 - 10%
Matig verzonken t.o.v. maaiveld	Zijwanden tot maximaal 10 m boven wegdek	Afhankelijk van windrichting: 20 - 40%	5 - 10%
Diep verzonken t.o.v. maaiveld	Zeer hoge zijwanden	Afhankelijk van windrichting: 20 - 50%	10 - 20%

Tabel 4–2: Effect van scheidingswand of verspringende portalen op recirculatie bij verschillende types in- en uitrit

Aanbevolen maatregelen

Wanneer kortsluiting aan beide uiteinden van de tunnel optreedt of wanneer kortsluiting aan één zijde al tot te hoge emissieconcentraties in de tunnel leidt (zie 11.3.2), moeten aan minstens één zijde van de tunnel voorzieningen worden getroffen die de aërodynamische kortsluiting beperken. Tabel 4–3 geeft hiervoor concrete aanwijzingen:

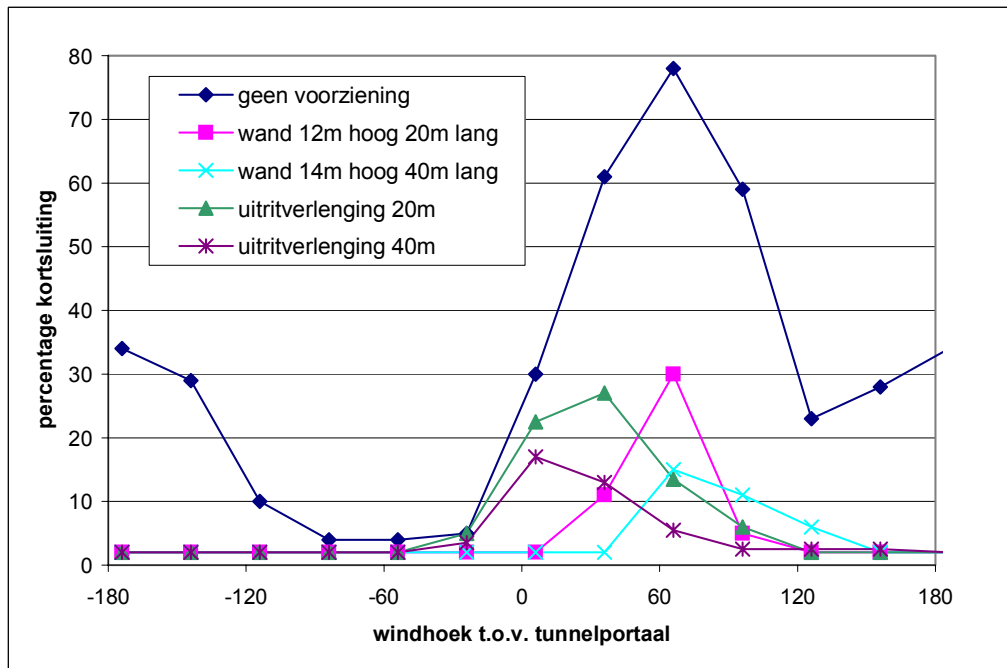
Type in/uitrit	Mate van zijwaartse afscherming	Aanbevolen voorziening
Bovengronds met dwarswand boven portaal	Geen zijwanden	Uitritverlenging minstens 20 m, bij voorkeur 40 m of Scheidingswand minstens 20 x 12 m, bij voorkeur 40 x 12 m of Afstand tussen tunnelbuizen h.o.h. meer dan 1,4 x de breedte van een tunnelbuis
Bovengronds met dwarswand boven portaal of Diep verzonken t.o.v. maaiveld	(Zeer) Hoge zijwanden	Scheidingswand met bovenzijde gelijk of hoger dan zijwanden, lengte minstens 40 m of Uitritverlenging met lengte minstens 40 m

Tabel 4–3: Aanbevolen voorzieningen ter beperking van aërodynamische kortsluiting

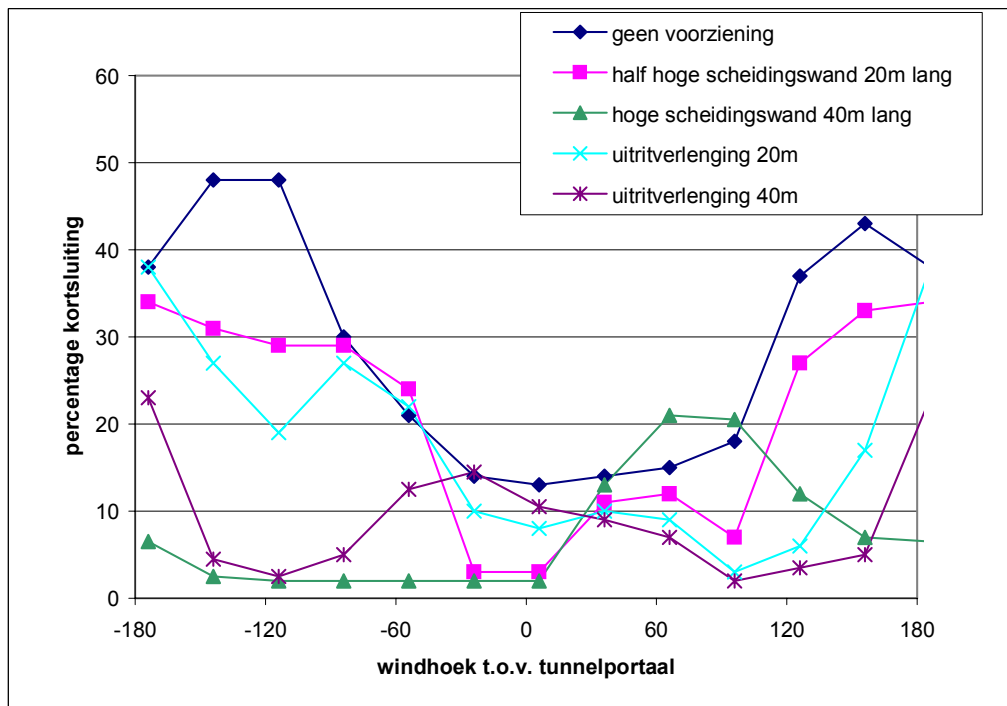
Als aërodynamische kortsluiting wordt verwacht is meestal nadere studie inclusief modelonderzoek in een windtunnel noodzakelijk.

Kwantitatieve beschrijving

In Figuur 4–21 en Figuur 4–22 wordt weergegeven welke kortsluitpercentages kunnen worden verwacht. De getoonde waarden zijn verkregen door modelonderzoek en geven een goede indruk voor een tunnel met twee naast elkaar liggende tunnelbuizen, elk met een breedte van circa 10 m.



Figuur 4-21: Mate van kortsluiting bij een bovengronds tunnelportaal zonder afschermdende zijwanden (verhouding windsnelheid / luchtsnelheid in de tunnel is 1)



Figuur 4-22: Mate van kortsluiting bij een (zeer) diep verzonken tunnelportaal of tunnelportaal met hoge afschermdende zijwanden (verhouding windsnelheid / luchtsnelheid in de tunnel is 2)

Uit metingen bij verschillende windsnelheden blijkt dat, wanneer de verhouding tussen de windsnelheid en de luchtsnelheid in de tunnel $U_t/U_w = 0,5$ tot 1, de variatie in kortsluitingspercentage bij een eerste schatting mag worden verwaarloosd. De luchtsnelheid in een tunnel als gevolg van rijdend verkeer ligt onder normale omstandigheden rond 5 m/s. Aangezien in Nederland de meest voorkomende windsnelheden tussen 5 – 10 m/s liggen, valt de verhouding U_t/U_w in Nederland meestal binnen de hiervoor aangegeven ordegrootte van 0,5 - 1.

4.5.3 Aërodynamische kortsluiting en brand

Bij brand kan aërodynamische kortsluiting ervoor zorgen dat de rook afkomstig uit de calamiteitenbuis door de naastgelegen tunnelbuis wordt aangezogen. Bij brandproeven in de Beneluxtunnel (2001) en een rookproef in de Westerscheldetunnel (2003) – de toeritten van beide tunnels zijn omsloten door verticale wanden – is dit ook geconstateerd. Wanneer de rook niet erg warm is en dus niet of nauwelijks opstijgt, blijkt een groot deel van de toerit te worden gevuld met rook. Als een tunnelbuis in die situatie lucht aanzuigt vanuit de toerit, zal de buis zich dus vullen met rook.

Aërodynamische kortsluiting kan bij brand dus problemen opleveren als nog steeds verkeer in de brandvrije buis wordt toegelaten of wanneer de hulpverlening vanuit die buis de calamiteitenbuis wil benaderen.

Aanbevolen maatregelen

Maatregelen die worden genomen om in de normale situatie aërodynamische kortsluiting te voorkomen zullen ook bij brand effect hebben (zie 4.5.2). Echter, om er zeker van te zijn dat geen rook in de naastgelegen buis zal stromen is het noodzakelijk om de luchtstroming dezelfde richting te geven als in de calamiteitenbuis. Dit kan alleen worden bereikt met een vorm van (beperkte) langsventilatie.

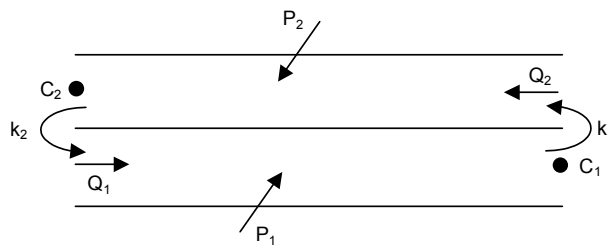


Figuur 4–23: Rook vult de gehele toerit (personenautobrand in de Westerscheldetunnel 2004)

4.5.4 Berekening concentratie aërodynamische kortsluiting

Wanneer aan beide zijden van de tunnel aërodynamische kortsluiting optreedt, vervuilen de buizen elkaar en wordt in beide buizen een hogere concentratie gevonden dan wanneer er geen kortsluiting optreedt.

Hieronder is voor een tunnel met langsventilatie (natuurlijk en/of mechanisch) afgeleid wat de concentratie aan het eind van beide buizen is (zie Figuur 4–24).



Figuur 4-24: Schematische weergave van aërodynamische kortsluiting

De concentratie aan het eind van de tunnelbuizen is gelijk aan:

$$C_1 = \frac{P_1 + k_2 P_2}{Q_1} \cdot \left[\frac{1}{1 - k_1 k_2} \right] \quad \text{en} \quad C_2 = \frac{P_2 + k_1 P_1}{Q_2} \cdot \left[\frac{1}{1 - k_1 k_2} \right]$$

Hierin zijn:

- P = de emissieproductie in de betreffende tunnelbuis (gr/s)
- Q = de luchtstroom in de betreffende tunnelbuis (m³/s)
- C = de concentratie aan het eind van de betreffende tunnelbuis (gr/m³)
- k₁ = de mate van kortsluiting van buis 1 naar buis 2 (factor tussen 0 en 1)
- k₂ = de mate van kortsluiting van buis 2 naar buis 1 (factor tussen 0 en 1)

Voorbeeld

In het voorbeeld hieronder wordt aangenomen dat P₁ = P₂, Q₁ = Q₂ en k₁ = 0,3. De waarde van k₂ is gevarieerd tussen 0,1 en 0,6.

In de tabel zijn de vermenigvuldigingsfactoren gegeven waarmee de concentratie hoger is dan de concentratie zonder kortsluiting.

k ₁	k ₂	Factor C1	Factor C2
0,3	0,1	1,13	1,34
0,3	0,2	1,28	1,38
0,3	0,3	1,43	1,43
0,3	0,4	1,59	1,48
0,3	0,5	1,76	1,53
0,3	0,6	1,95	1,59

Tabel 4-4: Rekenvoorbeeld voor verschillende kortsluitfactoren

4.6 Ventilatie van vluchtwegen

4.6.1 Rookvrij houden

In een tunnel zijn vluchtwegen aangebracht waarlangs personen de calamiteitenbuis kunnen ontvluchten. Hiervoor wordt gewoonlijk een van de twee onderstaande oplossingen gebruikt:

- Een vluchtgang tussen twee tunnelbuizen
- Op regelmatige afstanden dwarsverbindingen tussen twee gescheiden tunnelbuizen

Deze vluchtwegen moeten tijdens brand worden vrijgehouden van rook en andere gevaarlijke gassen. Gangen, trappenhuizen en andere ruimten die grenzen aan een tunnelbuis moeten daarom normaal gesproken op overdruk worden gehouden om te zorgen dat er

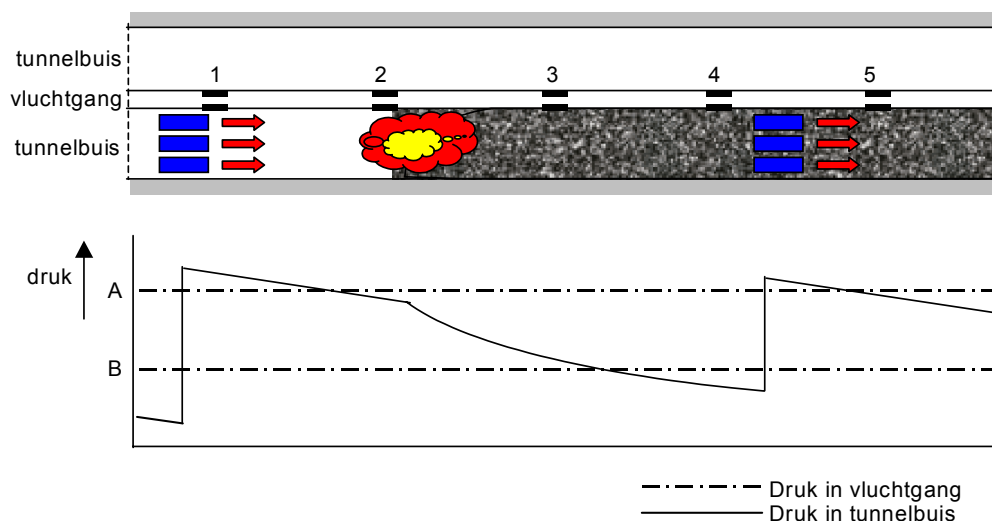
geen rook via kieren en spleten rondom (vlucht-)deuren of via andere openingen kan binnendringen. Ook door geopende deuren mag geen rook in deze ruimten kunnen stromen. Bij dwarsverbindingen tussen tunnelbuizen mag er geen rook in een dwarsverbinding en in de naastliggende tunnelbuis kunnen stromen.

Bij het ontwerp van de ventilatie van vluchtwegen moet rekening worden gehouden met de optredende verhoudingen tussen enerzijds druk in de tunnelbuis of -buizen als gevolg van de tunnelventilatie en anderzijds de druk in de vluchtweg. Dit is mede afhankelijk van het type ventilatie:

- Bij langsventilatie stroomt de rook in principe naar één kant van de tunnel en hoeft alleen in de zone stroomafwaarts van de brand rekening te worden gehouden met de drukverhoudingen.
- Bij natuurlijke ventilatie en dwarsventilatie moet aan beide zijden van de brand rekening worden gehouden met de drukverhoudingen.

Voorbeeld drukverhoudingen vluchtgang & langsventilatie

Figuur 4-25 bevat een voorbeeld van drukverhoudingen tussen de tunnelbuis en de vluchtgang bij langsventilatie, waarbij wordt gekeken naar twee verschillende drukniveaus (A en B) in de vluchtgang. De druk in de tunnelbuis is mede afhankelijk van de plaats van de ventilatoren.



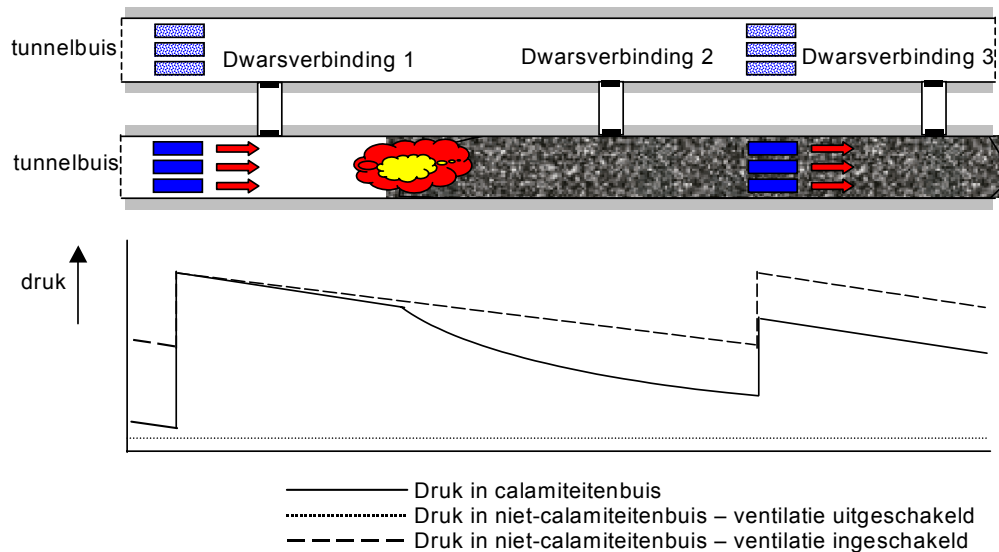
Figuur 4-25: Drukverhoudingen tussen de tunnelbuis en de vluchtgang

In het voorbeeld is stroomopwaarts van de brand zowel in geval A als in geval B de druk in de vluchtgang bij vluchtdeur 1 lager dan de druk in de tunnelbuis. Als de vluchtdeur wordt geopend stroomt er dus lucht de vluchtgang in. Er kan echter geen rook in de vluchtgang stromen omdat alleen stroomafwaarts van de brand rook aanwezig is.

Stroomafwaarts van de brand is in geval B bij de vluchtdeuren 3 en 5 de druk in de vluchtgang lager dan in de tunnelbuis. Als een van deze deuren wordt geopend stroomt er rook in de vluchtgang. Bovendien kan bij een gesloten vluchtdeur rook via kieren in de vluchtgang stromen. In geval A is dat niet het geval omdat de druk in de vluchtgang hoog genoeg is om de rook buiten de vluchtgang te houden.

Voorbeeld drukverhoudingen dwarsverbindingen & langsventilatie

Figuur 4-26 bevat een voorbeeld van drukverhoudingen tussen twee tunnelbuizen met dwarsverbindingen bij langsventilatie.



Figuur 4–26: Drukverhoudingen tussen twee tunnelbuizen met dwarsverbindingen

Wanneer alleen in de tunnelbuis met brand de ventilatoren worden ingeschakeld, is overal in de tunnel de druk in de calamiteitenbuis hoger dan de druk in de niet-calamiteitenbuis. Alleen stroomafwaarts van de brand zal, wanneer beide vluchtdeuren van een dwarsverbinding zijn geopend, rook naar de niet-calamiteitenbuis stromen. Bij een proef in de Westerscheldetunnel in 2004 is gebleken dat op die manier via drie opeenvolgende en volledig geopende dwarsverbindingen stroomafwaarts van de brand alle rook van de calamiteitenbuis naar de niet-calamiteitenbuis kan stromen.

Uit ervaring blijkt dat overdrukinstallaties per dwarsverbinding de rook buiten de dwarsverbinding kunnen houden als de vluchtdeuren gesloten zijn of als slechts één deur wordt geopend. Maar als beide deuren worden geopend kan door de krachtige tunnelventilatie onvoldoende overdruk in de dwarsverbinding worden opgebouwd.

Aanbevolen strategie

Bij brand moet de ventilatie in de niet-calamiteitenbuis worden ingeschakeld, en wel in dezelfde richting als in de calamiteitenbuis. Met een goed gedimensioneerd en geschakeld systeem voor langsventilatie kan ervoor worden gezorgd dat de druk in de niet-calamiteitenbuis in ieder geval stroomafwaarts van de brand altijd hoger is dan de druk in de calamiteitenbuis.

4.6.2 Ontwerpaanwijzingen overdrukinstallatie vluchtgang

Capaciteit

Voor het berekenen van de overdrukinstallatie van een vluchtgang tussen twee tunnelbuizen wordt aanbevolen uit te gaan van de mogelijkheid dat er 3 vluchtdeuren tegelijk geopend kunnen zijn. De overdrukinstallatie moet in die situatie nog in staat zijn te voorkomen dat rook in de vluchtgang stroomt.

De overdruk in een vluchtweg moet binnen 1 –2 minuten na het start commando zijn opgebouwd.

Luchtsnelheden in de vluchtweg

In de loopzone van vluchtwegen mag de luchtstroom het vluchten niet belemmeren. Aanbevolen wordt de luchtsnelheid ten gevolge van de overdrukinstallatie tot een hoogte van 1,8m boven het loopvlak te beperken tot 2,5 m/s. Ter plaatse van vluchtdeuren kan een uitzondering worden gemaakt: de luchtsnelheid door de opening moet beperkt worden tot 6 m/s.

Aanzuigpunten

Bij het ontwerpen van de overdrukinstallatie moet worden gelet op het volgende:

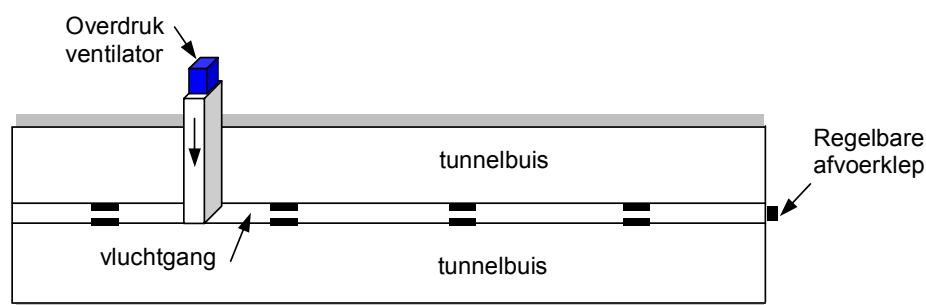
- Overdrukinstallaties mogen in principe alleen buitenlucht toevoeren. Het aanzuigpunt moet zodanig zijn gekozen dat er geen rook, afkomstig van de brand, wordt aangezogen.
- Als het aanzuigen van buitenlucht uit technische of praktische overwegen onmogelijk is, kan binnenlucht worden aangezogen mits er geen kans bestaat dat in deze lucht gevaarlijke dampen of gassen aanwezig zijn.
- De drukverhoudingen over vluchtdeuren moeten zo zijn dat – in combinatie met de constructie en bediening van de deur – het openen van de vluchtdeuren een kracht van maximaal 100 N vergt.
- Om te voorkomen dat vluchtenden worden gehinderd moet:
 - de luchtsnelheid in een vluchtweg kleiner zijn dan 5 m/s;
 - de luchtsnelheid door een geopende vluchtdeur kleiner zijn dan 6 m/s;
 - het geluidsvermogen in vluchtwegen als gevolg van overdrukinstallaties lager zijn dan 80 dB(A).

Reactie op drukwijzigingen

Overdrukinstallaties zijn meestal gebouwd op het voorzien in overdruk bij een relatief gering debiet. Het openen van een vluchtdeur kan echter een plotselinge drukdaling veroorzaken die moet worden opgevangen door de overdrukinstallatie. Oplossingen hiervoor kunnen bestaan uit:

- het toepassen van ventilatoren die zijn voorzien van verstelbare schoepen en/of een veranderlijk toerental;
- het toepassen van een ventilator met vaste schoepen en een regelbaar toerental in combinatie met een op druk regelbare afsluitopening aan het andere einde van een vluchtgang (zie Figuur 4–27). Bij het openen van een vluchtdeur daalt de druk in de vluchtgang en zal de (op druk geregelde, veerbelaste) afvoerklep vrijwel direct sluiten.

Het is belangrijk dat het regelsysteem zeer snel reageert om drukdalingen op te vangen, zodat wordt voorkomen dat meteen bij het openen van de deur toch rook in de vluchtweg stroomt.



Figuur 4–27: Overdruk in vluchtgang met regelbare afvoerklep

Geluidsproductie

De geluidsdruk in vluchtwegen moet voldoende laag zijn om de vluchtweg aantrekkelijk te laten zijn in een vluchtsituatie. De geluidsproductie door overdrukinstallaties moet daarom in voor mensen toegankelijke ruimtes lager zijn dan 80 dB(A).

5 UITGANGSPUNTEN VOOR DIMENSIONERING

Dit hoofdstuk bevat een overzicht van de gegevens die nodig zijn om de ventilatiecapaciteit te kunnen vaststellen en om een ventilatiesysteem te dimensioneren.

5.1 Basisgegevens verkeer

In deze paragraaf wordt ingegaan op:

- de verkeersdichtheid (aantal voertuigen/km per rijstrook)
- de verkeerssamenstelling (verdeling in categorieën en aantallen per categorie)

Deze aspecten zijn van belang:

- voor de bepaling van de hoeveelheid verkeersemissie, waarmee vervolgens de benodigde hoeveelheid ventilatielucht kan worden berekend om de emissieconcentraties te beperken;
- vanwege de invloed van het verkeer op de langstroming.

Het verkeer wordt in de volgende categorieën onderscheiden:

- Licht verkeer (personenauto's, hier aangeduid als *pa*)
- Middelzwaar verkeer (bestel- en kleine vrachtauto's, hier aangeduid als *ba*)
- Zwaar verkeer (grote vrachtauto's en bussen, hier aangeduid als *va*)

5.1.1 Verkeersdichtheid

De verkeersdichtheid is het aantal voertuigen dat op een rijstrook van een zekere lengte aanwezig is. Deze dichtheid wordt uitgedrukt in het aantal voertuigen per kilometer rijstrook. Dit wordt ook wel rijstrookbezetting genoemd. Bij meerdere rijstroken naast elkaar is het totaal aantal voertuigen op een wegvak de som van het aantal voertuigen op elke rijstrook.

De hoeveelheid voertuigen, die tegelijkertijd in een tunnel aanwezig is, varieert per:

- dag (weekdagen, weekend);
- uur (spitsuur, buiten de spits, overdag, in de avond en de nacht);
- locatie van de tunnel (stad, landelijke gebieden, autosnelwegen);
- aantal rijstroken.

Ook de wijze van toelating beïnvloedt het maximaal aantal voertuigen dat in een tunnel aanwezig kan zijn:

- tolpoorten voor een tunnel hebben invloed op de maximaal mogelijke verkeersintensiteit;
- snelle afsluiting van een tunnel na ontdekking van een incident beperkt het aantal voertuigen dat de tunnel nog kan binnenrijden na optreden van het incident, zodat stroomopwaarts van een blokkade niet de hele tunnel hoeft vol te staan met voertuigen.

Diverse instanties hebben in de afgelopen jaren metingen uitgevoerd naar de afstanden tussen de verkeersdeelnemers en de daaruit voortvloeiende maximaal mogelijke verkeersdichtheid. De uitkomsten van deze metingen zijn verwerkt in de hierna volgende aanbevelingen. Overigens is het aan te raden bij elk tunnelproject vooraf te inventariseren wat de werkelijke en maatgevende verkeersdichtheid zal zijn. Hierbij moet ook met de toekomstverwachtingen rekening worden gehouden.

Berekening verkeersdichtheid

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.

Uit diverse meetresultaten en ervaringscijfers zijn door de RWS Bouwdienst de volgende formules voor de maximaal mogelijke verkeersdichtheid bij een bepaalde rijnsnelheid afgeleid. Deze formules gelden per rijstrook.

- Maximale verkeersdichtheid op één rijstrook bij uitsluitend licht- en middelzwaar verkeer:

$$D_{pa \& ba} = \frac{2500}{v + 17} + 1,5 \quad [\text{vtg/km,rijstrook}]$$

- Maximale verkeersdichtheid op één rijstrook bij uitsluitend zwaar verkeer:

$$D_{va} = \frac{2500}{v + 40} + 1,5 \quad [\text{vtg/km,rijstrook}]$$

Hierin is v de verkeerssnelheid in km/h.

Met de bovenstaande formules voor de verkeersdichtheid per categorie kan de maximale totale verkeersdichtheid op 1 rijstrook voor alle categorieën samen worden bepaald met:

$$D_{gem} = \frac{100}{\frac{(\%pa + \%ba)}{D_{pa \& ba}} + \frac{\%va}{D_{va}}} \quad [\text{vtg/km,rijstrook}]$$

waarbij:

D_{gem} = de verkeersdichtheid bij gemengd verkeer

$\%pa$ = het percentage licht verkeer

$\%ba$ = het percentage middelzwaar verkeer

$\%va$ = het percentage zwaar verkeer

$D_{pa \& ba}$ = de maximale verkeersdichtheid van licht en middelzwaar verkeer

D_{va} = de maximale verkeersdichtheid van zwaar verkeer

Bij stagnerend verkeer zal bijna altijd de maximale verkeersdichtheid worden bereikt. Bij normaal rijdend verkeer hoeft dat niet het geval te zijn. De verkeersdichtheid wordt dan bepaald met:

$$D_{gem} = \frac{I_v}{v_v} \quad [\text{vtg/km,rijstrook}]$$

waarbij:

I_v = verkeersintensiteit (vtg/h)

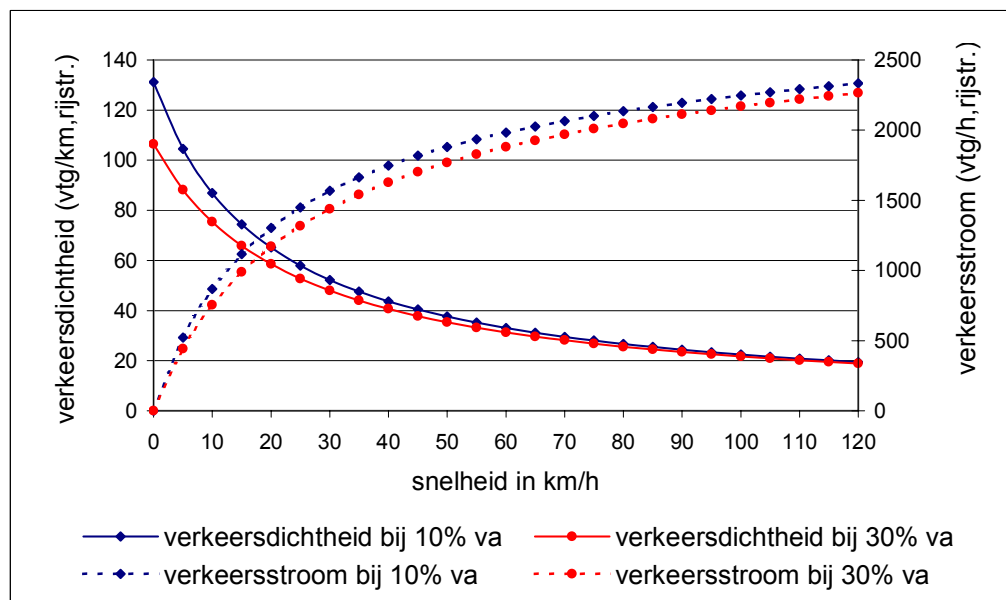
v_v = gemiddelde verkeerssnelheid (km/h)

Maximale verkeersdichtheid in tabel- en grafiekvorm

De hierboven vermelde formules zijn in onderstaande tabel toegepast op situaties met alleen licht- en middelzwaar verkeer, alleen zwaar verkeer en gemengde verkeerssituaties met 10% en 30% zwaar verkeer.

verkeers- snelheid	verkeersdichtheid en verkeersstromen							
	personenauto's		vrachtauto's		gemengd verkeer		gemengd verkeer	
	0% va		100% va		10% va		30% va	
km/h	vtg per km,rijstr.	vtg per h	vtg per km,rijstr.	vtg per h	vtg per km,rijstr.	vtg per h	vtg per km,rijstr.	vtg per h
120	20	2.370	17	2.055	19	2.334	19	2.266
110	21	2.330	18	1.998	21	2.292	20	2.220
100	23	2.287	19	1.936	22	2.246	22	2.169
90	25	2.238	21	1.866	24	2.194	23	2.111
80	27	2.182	22	1.787	27	2.135	26	2.046
70	30	2.116	24	1.696	30	2.065	28	1.970
60	34	2.038	27	1.590	33	1.982	31	1.879
50	39	1.941	29	1.464	38	1.879	35	1.768
40	45	1.814	33	1.310	44	1.747	41	1.627
30	55	1.641	37	1.116	52	1.567	48	1.438
20	69	1.381	43	863	65	1.303	59	1.171
10	94	941	52	515	87	869	75	754
0	149	0	64	0	131	0	106	0

Tabel 5-1: Verkeersdichtheid en verkeersstromen



Figuur 5-1: Grafiek verkeersdichtheid en verkeersstroom afhankelijk van verkeerssnelheid

5.1.2 Verkeerssamenstelling

Voor emissieberekeningen is het van belang welke categorieën voertuigen deel uitmaken van de verkeersstroom.

Indeling naar categorie

De samenstelling van het verkeer naar categorie wordt sterk bepaald door de ligging van de tunnel en het tijdstip waarnaar wordt gekeken. Door een stadstunnel zullen minder vrachtauto's rijden dan door een tunnel in de buurt van een industriegebied. In het weekend zullen er minder vrachtauto's op de weg zijn, terwijl doordeweeks op sommige trajecten buiten de spijtijden juist relatief meer vrachtauto's aanwezig zullen zijn. De verdeling in categorieën moet dus telkens voor de betreffende locatie en voor een bepaald tijdstip afzonderlijk worden vastgesteld.

De samenstelling van het verkeer wijzigt ook per dagdeel. Tijdens spitsuren zal bijvoorbeeld het procentuele aandeel vrachtwagens kleiner zijn dan buiten de spitsuren. En tijdens het weekend is het aandeel vrachtwagenverkeer anders dan tijdens werkdagen. Deze invloeden moeten in de berekening worden verdisconteerd.

Als er geen gegevens bekend zijn, kan globaal de volgende verdeling in licht, middelzwaar en zwaar verkeer worden aangehouden:

- Het aandeel middelzwaar verkeer is circa 10%
- Het aandeel zwaar verkeer is
 - In de spits niet groter dan 10%
 - Overdag niet meer dan 15%
 - 's Nachts circa 30%
- De rest is personenauto's

Indeling naar brandstofsoort en leeftijdsklasse

Voertuigen rijden in het algemeen op benzine, LPG of diesel.

In de loop der jaren zijn naar aanleiding van Europese regelgeving steeds strengere wettelijke eisen gesteld aan de maximale uitstoot van een voertuigmotor. Tegenwoordig worden voertuigmotoren daarom onderscheiden in emissieklassen conform de Europese standaarden ECE en EURO zoals vermeld in Tabel 5-2.

Personenauto's en Bestelbussen	Vanaf jaar	Vrachtauto's	Vanaf jaar
ECE 15/04 benzine	1982	ECE R49 diesel	1982
EURO 1 benzine	1992	preEURO diesel	1991
EURO 1 diesel	1992	ECE R49/02 (EURO 1) diesel	1992
EURO 2 benzine	1997		
EURO 2 diesel	1997	EURO 2 diesel	1997
EURO 3 benzine	2000		
EURO 3 diesel	2000	EURO 3 diesel	2000
EURO 4 benzine	2005		
EURO 4 diesel	2005	EURO 4 diesel	2005
EURO 5	2008	EURO 5 diesel	2008

Tabel 5-2: Indeling kwaliteit motoren volgens Europese normen

In de te verkrijgen emissiegegevens van het verkeer zijn de verschillende brandstofsoorten en de verdeling naar leeftijdsklasse meestal al verwerkt. Daarom wordt hier verder niet op ingegaan.

5.2 Dimensioneren op brand

Op de volgende pagina's wordt ingegaan op de eisen waaraan een mechanisch ventilatiesysteem moet voldoen om de veiligheid bij brand te waarborgen. Algemene informatie over de invloed van ventilatie op de brand en op de verspreiding van rook is te vinden in hoofdstuk 0.

5.2.1 Langsventilatie

Bij brand gelden in principe twee voorwaarden voor een langsventilatiesysteem:

- De zone stroomopwaarts van de brand moet rookvrij blijven. Dit vereist een minimale snelheid om backlayering te voorkomen, de zogenaamde kritische snelheid (zie 3.1.2).
- Er moet voldoende zuurstof naar de brand worden gevoerd om te voorkomen dat de brand wordt gesmoord en – zonder blussen – erg lang zou duren, waardoor de constructie lange tijd aan hoge temperatuur wordt blootgesteld (zie 3.1.3).

Het blijkt dat wanneer de kritische snelheid wordt bereikt, bij de gebruikelijke tunneldwarsdoorsneden van verkeerstunnels altijd voldoende zuurstof naar de brand wordt gevoerd, zelfs bij tunnels met één rijstrook. Voor brand moet een langsventilatiesysteem daarom worden gedimensioneerd op de kritische snelheid voor backlayering.

Opmerking: Volgens de Nederlandse richtlijnen voor tunnels is de minimale breedte van een tunnelbuis 7 m. Bij een hoogte van 5 m is de doorsnede 35 m². Bij een 200 MW plasbrand is er voor dieselolie 88 m³/s nodig (zie hoofdstuk 0). Dit leidt tot een vereiste snelheid van 2,5 m/s. Dit is ongeveer gelijk aan de kritische snelheid. Bij kleinere branden is de vereiste snelheid voor toevoer van voldoende zuurstof kleiner dan de kritische snelheid.

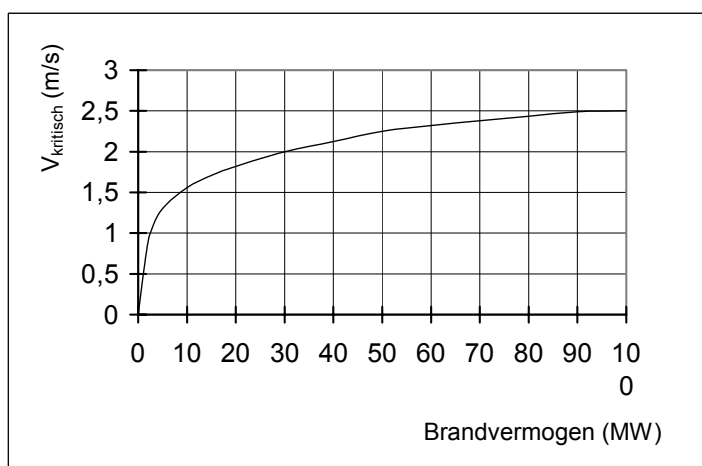
Kritische snelheid voor backlayering

De kritische snelheid voor backlayering is afhankelijk het brandvermogen. Naast testresultaten zijn er een aantal theoretische benaderingen voor het berekenen van de kritische snelheid, maar die leveren bij vermogens van meer dan 50 MW geen eensluitende resultaten op. Simulatieprogramma's leveren voor een brandvermogen van meer dan 50 MW wel een indicatie van de kritische snelheid. Uit testen, theoretische benaderingen en simulatieberekeningen blijkt dat

- hellingen tot 5% een verwaarloosbare invloed hebben op de kritische snelheid voor backlayering;
- de kritische snelheid constant is boven een brandvermogen van 100 MW.

Dat boven circa 100 MW geen hogere kritische snelheid noodzakelijk is kan worden verklaard uit het feit dat de verbranding plaatsvindt in een aanzienlijke 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.

In Figuur 5-2 is het verband tussen brandgrootte en kritische snelheid voor backlayering gegeven. De grafiek is gebaseerd op een tunneldoorsnede van 60 – 80 m² en een plafondhoogte van 5 m.



Figuur 5-2: Kritische snelheid voor backlayering

Probabilistisch ontwerp van langsventilatie

Voor probabilistische berekeningen wordt de volgende werkwijze aanbevolen:

- bereken voor een aantal verwachte brandgrootten met de bijbehorende minimale backlayeringssnelheid de kans op te lage backlayeringssnelheid;
- houd daarbij rekening met de variabele plaats van de brand waarbij elke positie evenveel kans heeft;
- houd rekening met windrichting en windsnelheid conform de statistische gegevens geldig voor de plaatselijke situatie;
- kies voor het verkeer vaste uitganggegevens.

Het is niet zo dat een te lage backlayeringssnelheid automatisch leidt tot gevaarlijke situaties. Beperkte terugstroming van rook tegen de ventilatierichting in resulteert in een rooklaag tegen het plafond (zie 3.1.2). Onder deze laag kunnen – afhankelijk van de temperatuur – onbeschermde weggebruikers enige tijd verblijven. De situatie wordt pas echt gevaarlijk wanneer de rook ongecontroleerd tegen de ventilatierichting in begint te stromen en zich vervolgens door afkoeling gaat vermengen met de luchtstroom.

De kans dat het systeem faalt doordat de minimale backlayeringssnelheid niet wordt gehaald mag niet groter zijn dan aangegeven in Tabel 5-3 (zie voor de definitie van deze kansen 11.6). Eerst wordt de maximaal mogelijke brandgrootte bepaald aan de hand van het verkeer dat gebruik zal maken van de tunnel. Voor elke brandgrootte in de tabel die kleiner of gelijk is aan de maximaal mogelijke brandgrootte in de tunnel, moet de langsventilatie vervolgens voldoen aan de bijbehorende maximale faalkans.

Brandvermogen	Minimale snelheid om backlayering te voorkomen	Maximaal toegestane kans op niet halen van de kritische snelheid voor backlayering
5 W	1,5 m/s	-
20 W	1,8 m/s	1×10^{-3}
50 MW	2,25 m/s	5×10^{-3}
100 MW	2,5 m/s	15×10^{-3}
200 MW	2,5 m/s	50×10^{-3}

Tabel 5-3: Maximaal toegestane kans op niet halen van de kritische snelheid voor backlayering

Grotere branden hoeven niet veroorzaakt te worden door afzonderlijke voertuigen; deze branden kunnen ook bestaan uit meerdere brandende voertuigen die vlakbij of tegen elkaar staan.

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 (zie ook 4.3.1). 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.

5.2.2 Dwarsventilatie

Bij brand moet het ventilatiesysteem in staat zijn de hoeveelheid geproduceerde rook af te zuigen. In Tabel 5-4 wordt het minimum afzuigdebiet gegeven voor oplopende brandgrootten. 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 (zie ook 4.4.3).

Type (maatgevende) brand	Brand-vermogen	Rook- productie	Minimum afzuigdebiet	
			Beheerste langssnelheid	Onbeheerste langssnelheid
			MW	m ³ /s
1 personenauto	5 – 6	12	15	25
bus	20 – 30	50 – 70	60	100
kleine vrachtwagen	30 – 50	70 – 120	100	150
grote vrachtwagen	100	240	250	Praktisch niet mogelijk
tankwagen (koolwaterstofbrand)	200 – 300	> 400	Praktisch niet mogelijk	Praktisch niet mogelijk

Tabel 5-4: Brand- en rookkarakteristieken voertuigbranden vs. afzuigdebiet

Afvoerdebieten groter dan 250 m³/s zijn praktisch gesproken niet mogelijk omdat bij een tunneldoorsnede van 60 – 80 m² de langssnelheid meer dan 2 m/s wordt waardoor de eventuele stratificatie wordt verstoord (zie 3.1.2).

Ook de benodigde afmetingen van de ventilatiekanalen worden dan veelal te groot.

Aanvullende langsventilatie moet in staat zijn drukverschillen in de stroming te overwinnen en de windinvloed op te vangen om te zorgen dat ter plaatse van de brand de stroomsnelheid nagenoeg nul is.

5.3 Dimensioneren op luchtkwaliteit

Op de volgende pagina's wordt ingegaan op het bepalen van de hoeveelheid vrijkomende emissie en het berekenen van de concentraties vervuilende stoffen, zowel binnen de tunnel als daarbuiten.

Algemene informatie over soorten voertuigemissies, de afleiding van grenswaarden en maatregelen ter beperking van emissieconcentraties is te vinden in hoofdstuk 2, paragraaf 3.2 en paragraaf 11.3.1.

5.3.1 Vereiste luchtkwaliteit binnen de tunnel

Bij de bepaling van de vereiste luchtkwaliteit in de tunnel wordt gewerkt met de volgende scenario's:

- Normaal rijdend verkeer
- Stagnerend verkeer
- Werkzaamheden

Opmerking: Deze scenario's dienen om een ventilatieontwerp voor een tunnel te maken of te beoordelen, maar niet voor het aansturen van mechanische ventilatie.

Voor het bepalen van de maatgevende concentratie in de tunnel moet worden nagegaan:

- bij welk scenario' de hoogste concentratie voorkomt;
- wat de verblijfsduur van personen in de tunnel is op plaatsen met hoge concentraties.

Hierbij wordt gekeken naar de luchtkwaliteit in de tunnelbuis, niet naar de luchtkwaliteit in voertuigen. Ondanks diverse onderzoeken bestaat er namelijk nog steeds onzekerheid over de verhouding tussen de concentraties binnen en buiten voertuigen. Bovendien is wel bekend dat plotselinge en kortdurende veranderingen buiten het voertuig niet worden waargenomen binnen het voertuig.

Hieronder worden de drie scenario's nader toegelicht, waarna vervolgens de toelaatbare concentraties worden aangegeven.

Scenario 1: Normaal verkeer

Bij normaal rijdend verkeer verblijven weggebruikers slechts kort in een tunnel. Met een snelheid van 100 km/uur duurt het verblijf in een tunnel van 500 meter bijvoorbeeld slechts 18 seconden en in een tunnel van 4 km slechts 2,5 minuut.

Omdat weggebruikers slechts kort aan verhoogde concentraties worden blootgesteld, zijn er per keer dat iemand door de tunnel rijdt geen problemen te verwachten. Maar wanneer zeer geregeld of elke dag gebruik wordt gemaakt van een tunnel (bijvoorbeeld door woon-werkverkeer) treden toch effecten op door de regelmatige blootstelling aan schadelijke stoffen (cumulatief effect), waardoor het nodig is eisen te stellen aan de maximale concentratie.

Voor kort verblijf in de tunnel moet rekening worden gehouden met de concentratie NO₂. In principe geldt dat ook voor de concentratie fijn stof (PM10), dat niet wordt tegengehouden door de buitenlucht- en interieurstoffilters in auto's. Voor kortdurende invloeden van fijn stof op het menselijk lichaam zijn momenteel echter geen grenswaarden bekend.

Scenario 2: Stagnerend verkeer

Hoewel stagnerend verkeer of fileverkeer in een tunnel uit het oogpunt van veiligheid in principe een onwenselijke situatie is, kan in dichtbevolkte gebieden en bij veel op- en afritten in het wegvak na de tunnel het verkeer tijdens drukke uren gemakkelijk stagneren als geen filebepalende maatregelen zijn getroffen.

Voor de berekening van de emissie van stagnerend verkeer worden de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- het verkeer beweegt zich éénparig met een gemiddelde snelheid van 30 km/uur;
- de verkeersstroom heeft gemiddeld genomen een gesloten karakter en is gelijkmatig over de lengte verdeeld zonder grote open ruimten;

Bij stagnerend verkeer moet rekening worden gehouden met de concentraties CO, NO₂ en fijn stof (PM10). Daarbij geldt dat vooral in dichtbevolkte gebieden veel woon-werkverkeer zal voorkomen, waardoor sprake is van een dagelijkse blootstelling aan emissies.

Scenario 3: Werkzaamheden

Als er in de tunnel werkzaamheden worden uitgevoerd terwijl er ook normaal verkeer door de tunnel rijdt, worden hulpverleners of arbeiders gedurende langere tijd aan bepaalde emissieconcentraties blootgesteld.

Ook bij dit scenario moet rekening worden gehouden met CO, NO₂ en fijn stof (PM10).

Tunnelbuizen met één of twee rijstroken worden vrijwel altijd geheel afgesloten tijdens werkzaamheden. Tunnels met meer rijstroken of met een vluchtstrook kunnen, mits de veiligheidsvoorschriften dat toelaten, open blijven terwijl één of meer rijstroken zijn afgesloten. In dat geval blijft er verkeer door de tunnel rijden, meestal met een beperkte maximum snelheid (50 – 70 km/uur).

Als de werkzaamheden bestaan uit hulpverlening aan een gestrande weggebruiker, zal de verblijftijd van hulpverleners meestal niet meer dan 1 uur bedragen. Bij onderhoudswerkzaamheden is de verblijfsduur veel langer en kan oplopen tot 8 uur per dag. Onderhoudswerkzaamheden vinden echter meestal veelal 's nachts plaats, als de verkeersintensiteit en dus de emissie laag is.

Toelaatbare concentraties

De toelaatbare concentraties hoeven niet te worden gebaseerd op de normen voor buitenluchtkwaliteit omdat deze in principe nooit worden toegepast op de rijbaan. Voor weggebruikers zijn deze grenswaarden daarom gebaseerd op internationaal aanvaarde en aanbevolen grenswaarden waarbij cumulatieve effecten zijn verdisconteerd. In situaties waar personen arbeid verrichten (zie scenario 3, hiervoor) kunnen MAC-grenswaarden worden toegepast. (De Maximaal Aanvaarde Concentratie (MAC) van een schadelijke stof wordt vastgesteld door het Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid).

De effecten van luchtverontreiniging hangen af de blootstellingsduur. Hoewel de effecten niet lineair verlopen met de expositie (blootstellingsduur x concentratie) geldt bij benadering dat bij een kortere blootstellingsduur een hogere concentratie toelaatbaar is.

In Tabel 5-5 worden grenswaarden aangegeven voor emissieconcentraties in de tunnelbuis, rekening houdend met de verblijfsduur (zie paragraaf 11.3.2 voor achtergronden bij deze waarden).

Stofsoort	Scenario 1 en 2			Scenario 3
	Verblijfsduur in de tunnel			Verblijfsduur in de tunnel
	1 – 2 min.	2 – 5 min	5 – 10 minuten	1 – 8 uur
NO ₂	1.880 µg/m ³ (1 ppm)	1.100 µg/m ³ (0,6 ppm)	750 µg/m ³ (0,4 ppm)	200 µg/m ³ (0,1 ppm)
CO	Geen eisen		40.000 µg/m ³ (34 ppm)	29.000 µg/m ³ (25 ppm)
PM10	Geen eisen		5.000 µg/m ³	5.000 µg/m ³

Tabel 5-5: Toelaatbare concentraties verkeersemisatie in de tunnel

5.3.2 Vereiste luchtkwaliteit buiten de tunnel

Voor de luchtkwaliteit buiten de tunnel is het voldoende om te toetsen op de concentraties NO₂ en fijn stof (PM10). Als de concentraties voor deze stoffen voldoen aan de grenswaarden voor luchtkwaliteit, wordt tegenwoordig (2005) ook altijd aan de normen voor de andere schadelijke stoffen voldaan.

De grenswaarden voor NO₂ en fijn stof (PM10) zijn gebaseerd op de Nederlandse wetgeving, die is gebaseerd op Europese richtlijnen. Vanaf 2010 gelden de volgende grenswaarden voor concentraties in de buitenlucht:

NO ₂	Jaargemiddelde concentratie	40 µg/m ³
	1-uursgemiddelde concentratie	200 µg/m ³ overschrijding max. 18x/jaar
PM10	Jaargemiddelde concentratie	40 µg/m ³
	24-uursgemiddelde concentratie	50 µg/m ³ overschrijding max. 35x/jaar

Tabel 5-6: Toelaatbare concentraties luchtkwaliteit buitenlucht

5.3.3 Berekening concentratie binnen de tunnel

De concentratie als gevolg van het verkeer wordt berekend door de emissie te delen door de luchtstroom. In principe moet de achtergrondconcentratie in de buitenlucht hierbij worden opgeteld.

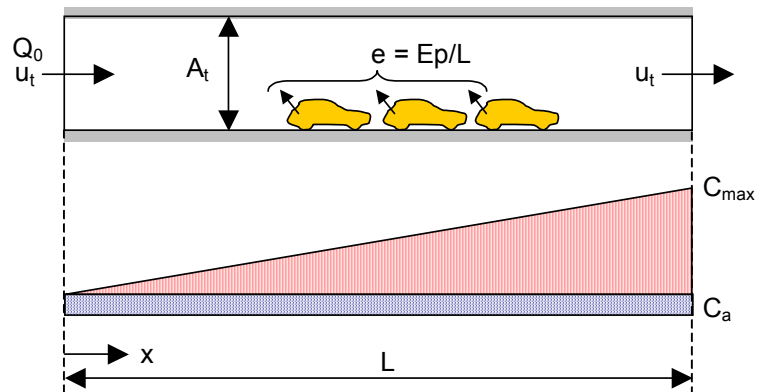
Zowel voor langsventilatie als voor (semi-)dwarsventilatie worden hierna formules gegeven voor het bepalen van de concentraties schadelijke stoffen (zie voor afleiding van de formules 11.3.4). Op basis hiervan moet de minimale ventilatiebehoefte worden vastgesteld die nodig is om te hoge emissieconcentraties te voorkomen:

- Bij langsventilatie wordt de benodigde stroomsnelheid in langsrichting berekend.
- Bij (semi-)dwarsventilatie moet de door het verkeer opgewekte langsstroming eerst worden berekend waarna de benodigde waarde van q_i respectievelijk q_u kan worden bepaald.

In de hierna volgende formules zijn de volgende variabelen gebruikt:

- q_i = met dwarsventilatie ingeblazen hoeveelheid lucht per lengte [m³/s.m]
- q_u = met dwarsventilatie afgezogen hoeveelheid lucht per lengte [m³/s.m]
- Q_0 = hoeveelheid lucht die aan het begin van de tunnel naar binnen of naar buiten stroomt [m³/s]
- E_p = toevoeging emissie aan de luchtstroom [gr/s]
- e = toevoeging emissie aan de luchtstroom per lengte-eenheid [gr/s.m] (e wordt constant verondersteld over de beschouwde lengte)
In de figuren wordt E_p vermeld als de totale emissie in de tunnel.
- C_a = de achtergrondconcentratie (gr/m³)
- C_{id} = de concentratie reeds aanwezig in de ingeblazen lucht (gr/m³)
De concentratie C_{id} kan gelijk zijn aan C_a .
- u_{ini} = de lichtsnelheid in de tunnel zonder dwarsventilatie
- A_t = oppervlak tunneldoorsnede (m²)
- u = lichtsnelheid in langsrichting (m)
- x = afstand vanaf ingangsportaal (m)
- L = tunnellengete (m)

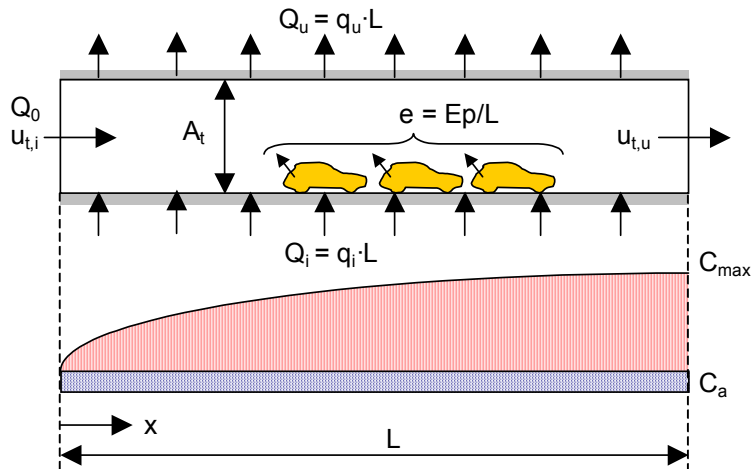
Concentratieverloop bij langsventilatie



Figuur 5-3: Berekening concentratie binnen een tunnel bij langsventilatie

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

Concentratieverloop bij dwarsventilatie



Figuur 5-4: Berekening concentratie binnen een tunnel bij dwarsventilatie

$$Q_u = Q_i \quad Q_0 = 0 \quad C(x) = \frac{e}{q_i} + C_{id} \quad (\text{onafhankelijk van } x)$$

$$Q_0 > 0 \quad C(x) = \left(\frac{e}{q_i} + C_{id} - C_a \right) \left[1 - \exp \left(-\frac{q_i \cdot x}{Q_0} \right) \right] + C_a$$

$Q_0 < 0$ Leg $x = 0$ bij de uitgang van de tunnel en $x = L$ bij de ingang van de tunnel, gebruik dezelfde formule als bij $Q_0 > 0$

$$Q_u < Q_i \quad Q_0 = 0 \quad C(x) = \frac{e}{q_i} + C_{id}$$

$$Q_0 > 0 \quad C(x) = \left(\frac{e}{q_i} + C_{id} - C_a \right) \left[1 - \left\{ \frac{Q_0}{(q_i - q_u)x + Q_0} \right\}^{\frac{q_i}{q_i - q_u}} \right] + C_a$$

$Q_0 < 0$ Als de lucht bij het uitgangsportaal naar buiten stroomt:

$$C(x) = \frac{e}{q_i} + C_{id}$$

Als de lucht bij het uitgangsportaal naar binnen stroomt:

Leg $x = 0$ bij de uitgang van de tunnel en $x = L$ bij de ingang van de tunnel, gebruik dezelfde formule als bij $Q_0 > 0$

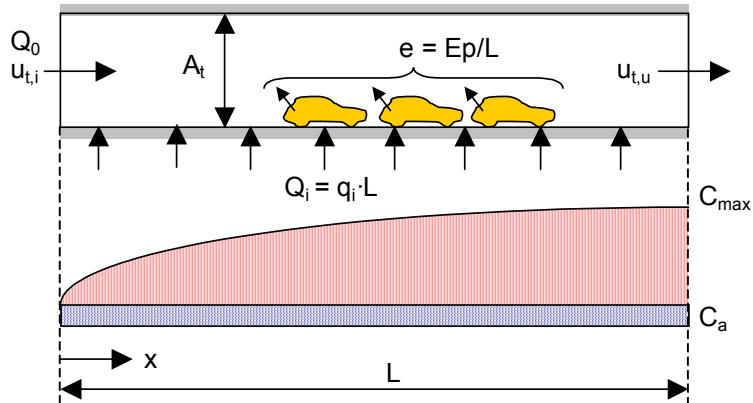
$$Q_u > Q_i \quad Q_0 > 0 \quad C(x) = \left(\frac{e}{q_i} + C_{id} - C_a \right) \left[1 - \left\{ \frac{Q_0}{(q_i - q_u)x + Q_0} \right\}^{\frac{q_i}{q_i - q_u}} \right] + C_a$$

geldig in het bereik tot de positie waar $u(x) = 0$.

$$x(u = 0) = \frac{1}{2}L - \frac{u_{ini} A_t}{q_i - q_u}$$

$$C_{\max} = \frac{e}{q_i} + C_{id}$$

Concentratieverloop bij semi-dwarsventilatie met uitsluitend toevoer



Figuur 5-5: Berekening concentratie binnen een tunnel bij semi-dwarsventilatie (toevoer)

$$Q_u = 0 \quad Q_0 = 0 \quad C(x) = \frac{e}{q_i} + C_{id}$$

$$Q_0 > 0 \quad C(x) = \left(\frac{e}{q_i} + C_{id} - C_a \right) \left[1 - \left\{ \frac{Q_0}{q_i x + Q_0} \right\} \right] + C_a$$

$Q_0 < 0$ Als de lucht bij het uitgangsportaal naar buiten stroomt:

$$C(x) = \frac{e}{q_i} + C_{id}$$

Als de lucht bij het uitgangsportaal naar binnen stroomt:

Leg $x = 0$ bij de uitgang van de tunnel en $x = L$ bij de ingang van de tunnel, gebruik dezelfde formule als bij $Q_0 > 0$

5.3.4 Berekening concentratie buiten de tunnel

De concentratie buiten de tunnel is afhankelijk van veel verschillende factoren. De belangrijkste daarvan zijn:

- De vorm van het tunnelportaal
- De verhouding tussen de windsnelheid en de luchtsnelheid bij het uitgangsportaal
- De windrichting
- Gebouwen en beplanting in de directe omgeving van het tunnelportaal
- De terreinruwheid in de ruimere omgeving van het tunnelportaal

Aangezien er veel verschillende variabelen zijn is het in de meeste gevallen nagenoeg onmogelijk een nauwkeurige berekening uit te voeren. Alleen schaalmodelmetingen kunnen dan uitsluitend geven over het te verwachten concentratieverloop en contouren van de overschrijding van grenswaarden. Er bestaan echter wel berekeningsmethoden waarmee schattingen kunnen worden gemaakt. In bijlage F is hiervan een voorbeeld gegeven.

Een zeer belangrijke factor in de bepaling van de concentratie buiten de tunnel is de reeds aanwezige achtergrondconcentratie in de buitenlucht. Bij uitgevoerde berekeningen is gebleken dat de toevoeging door het verkeer aan de totale concentratie meestal niet hoger is dan 20-25%. Dat betekent dat bij hoge achtergrondconcentraties, zoals die in stedelijk gebied aanwezig kunnen zijn, al snel een overschrijding van de maximale grenswaarden is te verwachten in de directe nabijheid van een tunnelportaal. Het is dan van belang de contouren vast te stellen van gebieden waarbinnen overschrijding van toelaatbare concentraties worden verwacht.

Metingen in de omgeving van een tunnel geven vaak een zeer beperkt beeld van de situatie op lange termijn. Voor de situatie op lange termijn is een meetperiode van minstens een jaar nodig: de normen stellen immers eisen aan jaargemiddelde waarden. Vaak is zelfs een meetperiode over meerdere jaren nodig omdat de weersomstandigheden niet voor elk jaar gelijk zijn. Het probleem is echter dat over zo'n lange periode waarschijnlijk ook andere gegevens veranderen, zoals het verkeer zelf en bebouwing en begroeiing in de omgeving. Daarom zullen uiteindelijk alleen berekeningen, gebaseerd op modelonderzoek en uitgevoerd voor een overeengekomen referentiejaar, voldoende zekerheid kunnen bieden voor een acceptabele situatie.

5.3.5 Bepaling van de hoeveelheid emissie

De grootte van de verkeersemisatie in een bepaald jaar kan worden verkregen bij organisaties als RIVM, TNO en het Ministerie van VROM.

Deze gegevens gelden voor een vlakke weg en voor een bepaald rijgedrag. In tunnels zijn echter vaak hellingen aanwezig. In tunnels is het rijgedrag in het algemeen vloeiender dan op de open weg. Men kan er desgewenst voor kiezen de gegevens zoals gepubliceerd door Piarc in 2004 te gebruiken wanneer hellinginvloeden moeten worden beschouwd. In dat geval moet worden gewerkt volgens de hierna beschreven methode.

De emissieproductie door het verkeer wordt als volgt gevonden:

1. Bepaal de intensiteit, samenstelling en snelheid van het verkeer.
2. Splits de samenstelling van de verkeersstroom naar de deelstromen lichtverkeer (persoonauto'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.

De berekening moet worden uitgevoerd voor een vooraf vast te stellen referentiejaar waarin de verkeersintensiteit en de verkeerssamenstelling zijn vastgesteld of geschat aan de hand van extrapolatie of een andere toekomstschatting. Het referentiejaar kan het jaar van openstelling van de tunnel zijn. Vaker wordt een referentiejaar gekozen dat verder in de toekomst ligt om wijzigingen in verkeersintensiteit en/of verkeerssamenstelling in de periode na opening van de tunnel op te vangen.

De emissie van het verkeer wordt berekend met:

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

waarbij:

- E_p = de totale emissie binnen de tunnel [g/s]
- N_r = aantal rijstroken [-]
- D_{gem} = de verkeersdichtheid per km rijstrook [vtg/km.rijstrook]
- L = tunnallengte of beschouwde deel van de lengte [km]
- q_{pa} = emissiekengetal personenauto [g/s.vtg]
- q_{pa} = emissiekengetal middelzwaar voertuig [g/s.vtg]
- q_{pa} = emissiekengetal zwaar voertuig [g/s.vtg]
- $\%pa$ = het percentage personenauto's
- $\%ba$ = het percentage middelzwaar verkeer
- $\%va$ = het percentage zwaar verkeer

5.3.6 Kengetallen voor uitlaatgasemissies

In bijlage F zijn emissiekengetallen gegeven afhankelijk van snelheid, weghelling en jaartal. Deze kengetallen zijn gegeven in gram per uur [g/h.vtg] terwijl in de formule wordt gewerkt met gram per seconde [g/s.vtg].

In bijlage F worden geen kengetallen voor middelzwaar verkeer gegeven. Voor oriënterende berekeningen mag worden verondersteld dat de emissiekengetallen voor middelzwaar verkeer 75% van de emissiekengetallen van zwaar verkeer zijn.

In bijlage F worden alleen emissiekengetallen van NO_x verschaft. Alleen het aandeel NO_2 in NO_x wordt schadelijk geacht. Ten tijde van het samenstellen van deze publicatie zijn onvoldoende gegevens beschikbaar over de hoeveelheid NO_2 in NO_x . In het algemeen wordt het aandeel NO_2 in uitlaatgassen geschat op 5 - 10% van de hoeveelheid NO_x (bron: PIARC Pollution by Nitrogen Dioxide in Road Tunnels - 2000). Meer informatie over NO_x en NO_2 is te vinden in 3.2.1.

Langshelling van de weg en de rijnsnelheid

Langshellingen hebben invloed op de rijnsnelheid. Vooral bij vrachtauto's is dit merkbaar. Een richtlijn hiervoor is te vinden in Tabel 5-7.

	Neerwaarts				Opwaarts		
Helling [%]	-6	-4	-2	0	2	4	6
v [km/h]	35-60	40-80	70-100	80-100	70-90	40-70	35-60

Tabel 5-7: Snelheid van vrachtauto's als functie van de langshelling

5.3.7 Zichtcondities binnen de tunnel

De zichtcondities in de tunnel worden voornamelijk bepaald door verstrooiing en absorptie van licht door stof in de tunnellucht. De zichtcondities kunnen worden uitgedrukt in de transmissiecoëfficiënt T_{atm} , waarmee wordt uitgedrukt hoeveel licht er over een zekere afstand overblijft van het licht uitgezonden door een lichtbron.

De algemene formule voor T_{atm} is:

$$T_{atm} = e^{-3a/V_m}$$

waarbij:

- a = waarnemersafstand [m]
- V_m = het meteorologisch zicht [m]

Voor de situatie in de tunnel wordt (conform de PIARC-aanbevelingen) een iets aangepaste formulering gebruikt:

$$T_{atm} = e^{-kL}$$

waarbij:

- L = de lengte waarover wordt gemeten, in dit geval 100 meter
- k = de lichtextinctie [1/m]

Vereiste zichtconditie

Voor de zichtcondities in de tunnel moet er een grens worden gesteld aan de mate waarin het zicht door stof in de lucht belemmerd mag worden. In PIARC Road Tunnels: Emissions, Ventilation and Environment (2004) worden de volgende waarderingen van k gegeven, op grond waarvan $T_{atm, 100meter}$ en V_m zijn herleid uit k van :

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

Tabel 5-8: Zichtcondities

Het heeft alleen zin een zichtconditie te definiëren voor normaal rijdend verkeer en wel bij snelheden van meer dan 50 km/uur. In dat geval mag de waarde van k niet hoger zijn dan 0,007/m.

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. Een brandmelding zou bijvoorbeeld kunnen worden gegeven bij de waarde $k = 0,020$.

Bepaling hoeveelheid geproduceerd fijn stof

Om de werkelijk zichtconditie te kunnen berekenen moet duidelijk zijn hoeveel fijn stof door het verkeer wordt geproduceerd. Fijn stof wordt in de lucht gebracht via:

- uitlaatgassen;
- slijtage van banden door remmen, slijtage van het wegdek en opwaaien van stof.

Een belangrijk deel van de deeltjes die niet afkomstig zijn van uitlaatgassen, is groter dan 10 micron. In dit verband zijn echter alleen de deeltjes van belang die kleiner zijn dan 10 micron en die daardoor vallen binnen de categorie PM10. De kengetallen voor deze categorie fijn stof (niet afkomstig uit uitlaatgassen) zijn:

- Personenauto's : 220 – 260 [mg/km/vtg]
- Vrachtauto's en bussen : 1400 – 1750 [mg/km/vtg]

De concentratie van fijn stof kan vervolgens worden berekend door de hoeveelheid vrijkomend stof te delen door de volumestroom van de lucht.

Berekening van de zichtconditie

De waarde van de lichtextinctie k wordt gevonden door:

$$k = C_{\text{fijn stof}} / 4,7 \text{ m}^2/\text{g}$$

waarbij:

$C_{\text{fijn stof}}$ = de concentratie van fijn stof uitgedrukt in g/m^3 .

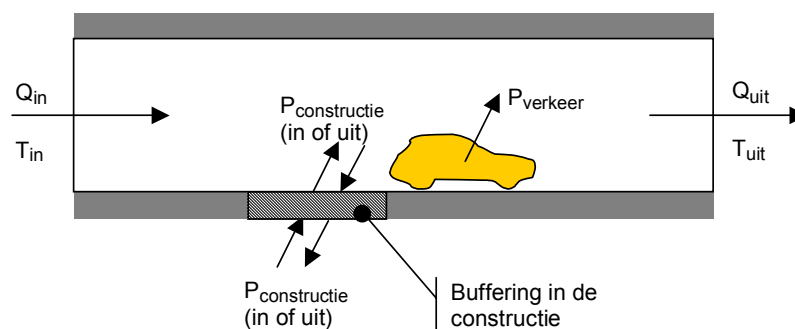
De vermindering van het zicht door deeltjes fijn stof hangt sterk af van de verdeling van de grootte van deze deeltjes, voor zover deze vallen binnen PM10. De berekening geeft een gemiddelde waarde aan.

5.4 Dimensioneren op temperaturen

5.4.1 Berekening luchttemperatuur in een tunnel

De temperatuur van de lucht in de tunnel hangt af van de balans tussen:

- de hoeveelheid toegevoerde warmte door het verkeer en
- de hoeveelheid afgevoerde warmte via de ventilatie en de hoeveelheid warmte die door de bouwkundige constructie wordt afgevoerd respectievelijk wordt toegevoerd.



Figuur 5-6: Toe- en afvoer van warmte aan de tunnellucht

Warmtetoevoer door het verkeer

De warmte die door de tunnelinstallaties wordt afgegeven is meestal verwaarloosbaar in verhouding tot de door het verkeer afgegeven warmte zodat alleen rekening hoeft te worden gehouden met de warmte die door het verkeer wordt afgestaan.

Uitgangspunt is dat de passieve warmte-inhoud van een met constante snelheid rijdend voertuig niet verandert en dat voertuigen dus evenveel warmte mee naar buiten nemen als ze mee naar binnen nemen. Afwijkingen die ontstaan door het naar binnen of naar buiten

transporteren van warmte in de vorm van kinetische energie (een voertuig rijdt met een andere snelheid in dan uit) zijn verwaarloosbaar. Dat geldt ook voor afwijkingen die ontstaan doordat voertuigen in de tunnel opwarmen (warmte bufferen) en deze warmte buiten de tunnel weer afstaan.

Uit het voorgaande is duidelijk dat de hoeveelheid toegevoerde warmte door het verkeer alleen afhankelijk is van de hoeveelheid verstoekte brandstof binnen de tunnel en daarmee afhankelijk van de verkeersintensiteit, de rijnsnelheid en het type voertuigen. Alle brandstof die binnen de tunnel wordt verbrand wordt in warmte omgezet. Immers, ook de energie nodig om een voertuig te laten rijden, wordt uiteindelijk grotendeels aan de lucht afgestaan door luchtwervelingen die in warmte worden omgezet.

Voor een verkennende berekening kan van de volgende aannamen worden uitgegaan:

- Het gemiddelde brandstofverbruik van een personenauto is circa 8 l/100 km.
- Het verbruik van een vrachtauto is circa 24 l/100 km
- De effectieve verbrandingswarmte van benzine en diesel in een automotor is circa 33 MJ/l

Rekenvoorbeeld:

Het afgegeven vermogen van één personenauto bij 80 km/h is:

$$P_{pa} = 33 \text{ MJ/l} \times 8 \text{ l/100km} \times 80 \text{ km/h} = 211 \text{ MJ/h ofwel } 59 \text{ kW}$$

en van één vrachtauto bij 80 km/h:

$$P_{va} = 33 \text{ MJ/l} \times 24 \text{ l/100km} \times 80 \text{ km/h} = 634 \text{ MJ/h ofwel } 176 \text{ kW}$$

Bij een 3.000 m lange tunnel en een intensiteit van 1.200 voertuigen/uur waarvan 10% vrachtwagenverkeer, zijn er in de tunnel voortdurend 38 personenauto's en 7 vrachtauto's aanwezig. In totaal wordt door het verkeer een vermogen afgegeven van

$$P_{verkeer} = 35 \times 59 \text{ kW} + 7 \times 176 \text{ kW} = 3,3 \text{ MW.}$$

Bij dit vermogen moet het vermogen van verlichting en andere apparatuur worden opgeteld:

$$P_{verlichting} = 0,06 \text{ MW (bij } 20 \text{ W/m)}$$

$$P_{ventilatie} = 0,6 \text{ MW (langsgeventileerde tunnel, } 200 \text{ W/m)}$$

$$P_{overige} = 0,04 \text{ MW (camera's, detectieapparatuur, signaalgevers, etc)}$$

In totaal wordt 4 MW aan de tunnellucht toegevoerd.

Toevoer en afvoer van warmte door ventilatie

De energie in de toegevoerde lucht is

$$P_{lucht,in} = c_p \cdot Q_{in} \cdot T_{in}$$

De energie in de afgevoerde lucht is

$$P_{lucht,uit} = c_p \cdot Q_{uit} \cdot T_{uit}$$

Voor langsventilatie geldt $Q_{uit} = Q_{in}$.

Toevoer/afvoer van warmte door de tunnelconstructie

Voor de berekening van de warmteafvoer naar en de warmtetoevoer van de tunnelomgeving zijn de materiaaleigenschappen bepalend, ofwel het warmtegeleidend en warmteaccumulerend vermogen van de omhullende tunnelconstructie en de daaraan grenzende grondlagen.

Door geleiding ontstaat een warmtestroom vanuit de tunnelbuis naar de omliggende grond. In principe vormt de grond buiten de tunnel een oneindig groot koelreservoir met een constante temperatuur van ongeveer 10 °C. Op de lange duur zal grond grenzend aan de tun-

nel een hogere temperatuur aannemen. Bij tunnels die rondom in de grond zijn ingebed kan worden aangenomen dat het overgangsgebied rond de tunnel ongeveer 1m dik is.

Bij zinktunnels of ondergrondse tunnels die ondiep zijn gelegen en bij tunnels die gedeeltelijk aan een andere omgeving grenzen (bijvoorbeeld overkapte wegen), moeten de warmtegeleidende en warmtebufferende eigenschappen van het aangrenzende medium per geval worden bepaald.

Voor de berekening van de warmteoverdracht naar en de geleiding in de tunnelconstructie zijn in Tabel 5–9 thermische eigenschappen van hittewerende bekleding gegeven. De thermische eigenschappen van beton en grond kunnen in de literatuur worden gevonden.

	Hittewerende bekleding	Beton	Grond rondom de tunnel	
warmtegeleidend vermogen	0,19 (Fendolite) 0,174 (PromatectH)	1,6-1,9	1,4	W/m.K
soortelijk gewicht	750 (Fendolite) 900 (PromatectH)	2100	2.000 (normaal) 3.000 (Boomse klei)	kg/m ³
warmtebufferend vermogen C_p	980 (Fendolite) 920 (PromatectH)	880-920	1.000	J/kg.K

Tabel 5–9: Thermische eigenschappen van hittewerende bekleding

De warmteoverdrachtscoëfficiënt α van de lucht naar de tunnelwand wordt bepaald door een convectieve component α_c en een gedwongen component α_d .

Voor α_c wordt een vaste waarde aangenomen = 2.3 W/m.K.

Voor α_d wordt de waarde bepaald uit de relatie tussen het Nusseltgetal (Nu), het Reynoldsgetal (Re) en het getal van Prandtl (Pr) waarbij $Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}$.

Bij een gemiddelde luchtsnelheid in de tunnelbuis van 4 m/s en een gebruikelijke hydraulische diameter $D_h = 7 - 8$ m kan worden aangenomen dat α een totale waarde van 10 W/m².K heeft. Bij een luchtsnelheid oplopend tot 10 m/s neemt de waarde van α toe tot ongeveer 17 W/m².K.

5.4.2 Aandachtspunten

Onderstaand zijn enige aandachtspunten gegeven t.a.v. de temperatuur in een tunnel:

- Warmtebuffering in de tunnelmassa en de directe omgeving speelt bij de warmtehuishouding in verkeerstunnels een belangrijke rol. Warmtepieken tijdens spitsuren worden in de tunnelconstructie gebufferd en buiten de spits weer afgestaan aan de tunnellucht. Dit heeft een nivellerend effect.
- Isolatie in de vorm van een brandwerende massa vertraagt de warmtedoorgang vanuit de tunnelatmosfeer naar de omgeving en terug aanzienlijk, maar is mede daardoor een belangrijke warmtebuffer.
- In sommige situaties ontstaat er een warmtestroom vanuit de tunnelbuis naar de omgeving, die de toegevoerde hoeveelheid warmte in de tunnellucht overtreft. Dit treedt vooral op als de buitenluchttemperatuur midden op de dag gemiddeld hoger ligt dan de gemiddelde omgevingstemperatuur (de tunnelomgeving is relatief koel). De buitenlucht koelt dan tijdens doorstroming van de tunnelbuis af aan de koelere tunnelwanden (de temperatuur door het verkeer ligt onder de luchttemperatuurcurve). Deze situatie blijft bestaan bij een matig verkeersaanbod. Het koelend effect van de omgeving is voldoende om alle warmte uit de tunnellucht én de warmteafgifte van voertuigen af te voeren.

In dit geval:

- "verdwijnt" alle door het verkeer afgestane warmte naar de omgeving;
- is de temperatuur aan het einde van de tunnelbuis lager dan aan het begin;
- Is de uittredetemperatuur gemiddeld over een etmaal lager dan de intreetemperatuur.

Dit effect verdwijnt grotendeels bij lage buitenluchttemperaturen (de tunnelomgeving is relatief warm) en bij een hoger verkeersaanbod. In dat geval:

- wordt over een etmaal gemiddeld de uittredetemperatuur hoger dan de intreetemperatuur en
- worden de pieken tijdens spitsstijden hoger dan de buitenluchttemperatuur of is het gehele etmaal de tunneltemperatuur hoger dan de buitenluchttemperatuur.
- Bij een kortdurend, hoog aanbod van (eventueel langzaam rijdend) verkeer in combinatie met een hoge buitentemperatuur kan de temperatuur in de tunnelbuis aanzienlijk stijgen. Bij de uitgang kunnen dan hoge waarden worden gemeten zolang deze situatie bestaat. Naarmate een dergelijke situatie in aansluitende tijdsperioden steeds weer terugkeert, neemt het effect toe door temperatuurverzadiging van de tunnel (opwarmefect).
- Om bij hoge waarden de temperatuur in de tunnelbuis omlaag te brengen is de door het verkeer opgewekte luchtstroom meestal onvoldoende. Het is dan noodzakelijk (een deel van) de tunnelventilatie te starten. Als de uittredetemperatuur desondanks boven acceptabele waarden (bijv. 40 °C) uitstijgt moet net als bij te hoge luchtverontreiniging door gassen, de verkeersdosering worden ingesteld of de tunnel worden afgesloten.
- Extreem verkeersaanbod en/of lage rijsnelheden gedurende een langere periode kunnen onacceptabel hoge temperaturen tot gevolg hebben (boven de 50 °C, mede afhankelijk van de buitenluchttemperatuur). Dit maakt andere maatregelen voor de warmteafvoer noodzakelijk dan alleen ventilatie, bijvoorbeeld tijdelijke afsluiting van de tunnel of verkeersdosering.
- Een tegen de gevolgen van brand geïsoleerde tunnel met een lengte van meer dan 4.000 m is alleen geschikt voor het toelaten een verkeersintensiteit van meer dan 50.000 vtg/etmaal/richting), als aanvullende maatregelen worden genomen voor de afvoer van de warmte die door het verkeer in de verkeersruimte wordt afgegeven.

6 DIMENSIONEREN

6.1 Rekenmodellen

6.1.1 Één- en tweedimensionale modellen

Een tunnel kan worden beschouwd als een buis waarin langs de lengteas luchtsnelheid, temperatuur, druk en concentratie kunnen variëren. Bij veel rekenmodellen wordt uitsluitend rekening gehouden met de variatie langs de lengteas: er kan dan worden gesproken van een ééndimensionaal model. De meeste berekeningen die in deze publicatie worden gepresenteerd zijn opgezet volgens een ééndimensionaal model.

Omdat bij brand er meestal een gelaagde stroming ontstaat – een rooklaag boven een luchtlaag – bestaan er ook tweedimensionale modellen die rekening houden met deze gelaagdheid. In deze publicatie is geen aandacht aan deze modellen besteed omdat de hierna te behandelen CFD-rekenmethode betere rekenresultaten geven. Niettemin kunnen tweedimensionale rekenmodellen inzicht verschaffen in de wijze van rookverspreiding en de dikte van een rooklaag.

6.1.2 CFD-rekenmethode

Computational Fluid Dynamics (CFD) wordt gebruikt om de stroming en het gedrag van gassen en vloeistoffen met behulp van een computerprogramma te simuleren. Daarbij spelen grootheden als massa, impuls, warmte en stofsoort een rol. Hiervan afgeleide grootheden zijn onder andere temperatuur, dichtheid, grootte en richting van de bewegingssnelheid, absolute en statische druk.

Bij CFD-simulaties wordt een ruimte denkbeeldig verdeeld in ruimtelijke volumecellen zoals kubussen of andere vormen. De hoekpunten van de volumecellen vormen een samenstel van roosterpunten. De genoemde grootheden worden voor elke volumecel berekend door de behoudswetten voor massa, impuls en energie toe te passen in achtereenvolgende tijdstappen. Veranderingen van de grootheden kunnen daardoor in de tijd worden berekend.

Niet alle CFD-simulatiepakketten zijn gelijk. Er bestaan pakketten waarmee verschillende situaties kunnen worden gesimuleerd, andere pakketten zijn afgestemd op een specifieke toepassing. Sommige pakketten zijn voorzien van specifieke onderdelen waarmee onder meer verbrandingsprocessen, rookdichtheid, concentraties schadelijke stoffen kunnen worden bepaald. Enkele pakketten zijn zelfs gekoppeld aan rekenmodellen waarin wordt gesimuleerd hoe personen zullen vluchten uit een gevaarlijke situatie in een gebouw of tunnel.

CFD wordt meer en meer ingezet als vervanging van modelproeven op schaal of van praktijkproeven. Een belangrijke reden hiervoor is dat variaties in de uitgangspunten gemakkelijker kunnen worden getest zonder dat dit gepaard gaat met hoge kosten. De uitkomsten van zulke berekeningen moeten, net als bij elk ander rekenpakket voor de computer, met voorzichtigheid worden gebruikt. Er moet worden nagegaan of de uitkomsten overeenkomen met of sterk afwijken van het verwachtingspatroon en wat de reden van gevonden afwijkingen kan zijn. Gebruikelijke vuistregels of versimpelde vergelijkende berekeningen kunnen daarbij behulpzaam zijn.

Modellering van turbulentie

De modellering van de turbulentie heeft een belangrijke invloed op de nauwkeurigheid van de uitkomsten. Ten tijde van deze publicatie bestaan er minstens drie rekenmethoden voor de numerieke simulatie van turbulentie:

- RANS : Reynolds Averaged Navier Stokes
- DNS : Direct Numerical Simulation
- LES : Large Eddy Simulation

Bij de *Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS)* methode – ook wel het Kappa-Epsilon-model genoemd – wordt turbulentie benaderd door in elk roosterpunt de snelheid te verdelen in een gemiddelde snelheid en een variabele snelheidscomponent. Daarmee ontstaat een stelsel vergelijkingen waarin het aantal onbekenden groter is dan het aantal vergelijkingen. Om dit probleem op te lossen is een extra relatie nodig. Hiervoor is de Kappa-theorie ontwikkeld, waarin turbulente spanning aan de lokale vervormingsnelheid is gekoppeld. Omdat turbulentie in werkelijkheid niet ‘lokaal’ is, vormt deze koppeling slechts een ruwe benadering van de realiteit. Bovendien vereist de Kappa-theorie specificatie van een aantal empirische gegevens die vaak op beperkte experimentele resultaten zijn gebaseerd.

Toch blijkt de Kappa-theorie in de praktijk in veel situaties een goede benadering op te leveren. Dit geldt in het bijzonder voor stromingen in eenvoudige geometrieën.

Bij de *Direct Numerical Simulation (DNS)* methode wordt uitgegaan van een driedimensionaal numeriek rooster. Op dit rooster worden bij elke tijdstap op elk roosterpunt de snelheidsvector en druk berekend. De oplossing fluctueert als functie van tijd en plaats en simuleert daarmee turbulentie. Voor voldoende nauwkeurigheid is een zeer groot aantal roosterpunten noodzakelijk waardoor al vrij snel de grenzen van de hedendaagse computers wordt bereikt.

Bij de *Large Eddy Simulation (LES)* worden de grotere turbulenties (large eddy) expliciet uitgerekend en alleen de kleinere turbulenties (small eddy) benaderd. Dit laatste is aanzienlijk eenvoudiger, omdat de microscales een universele structuur hebben, die bovendien met een eenvoudige theorie beschreven kan worden. Uit resultaten van LES-simulaties is gebleken dat de statistiek van de grote, gesimuleerde structuren (macrostructuren) betrekkelijk ongevoelig is voor de details van de benadering van de microstructuur. Het grote voordeel van een LES simulatie is dat met relatief bescheiden computercapaciteit toch realistische turbulente stromingen met grote Reynolds-getallen kunnen worden berekend.

Aandachtspunten bij CFD-berekeningen

Een belangrijke factor voor de nauwkeurigheid van de berekeningen is de verdeling van de volumecellen en de roosterpunten. Een zeer fijne verdeling levert gevoelsmatig betrouwbaarder resultaten op dan een grovere verdeling. In werkelijkheid is dat lang niet altijd het geval, terwijl een fijne verdeling bovendien erg veel rekentijd kost. Een goed gekozen grovere verdeling kan betrouwbare resultaten opleveren en kost veel minder rekentijd.

Voor de keuze van de juiste verdeling worden momenteel (internationale) richtlijnen ontwikkeld. Enige aanbevelingen uit de praktijk zijn:

- de grootste afmeting van een element is niet groter dan 2 maal de kleinste afmeting;
- bij de overgangen van een fijne op een grovere verdeling is de verhouding tussen de afmetingen van de aan elkaar grenzende volumecellen niet groter dan 1,5;
- in een tunneldoorsnede is de maximale hoogte- en breedtemaat van een volumecel niet groter dan 0,5 m;
- ter plaatse van de brand en op plaatsen waar ‘veel in de stroming gebeurt’ is verfijning van de volumecellen nodig.

Verder moet bij CFD-simulaties worden gelet op het volgende:

- De randvoorwaarden moeten goed worden gedefinieerd en vastgelegd.
- Bij het simuleren van brandsituaties moet extra aandacht worden besteed aan de modellering van de brandhaard. Een verkeerde modellering kan leiden tot ongewenste warmtetoevoer, rookproductie en aanvangssnelheid van de stroming, waardoor de uitkomst wordt beïnvloed.
- In de praktijk blijkt dat de meeste simulatiepakketten geen plotselinge grote veranderingen aankunnen. Verhoging van de ventilatiesnelheid, het ontstaan van brand en het procesmatig wijzigen van andere omstandigheden moeten veelal als geleidelijke veranderingen in de tijd worden ingevoerd om instabiliteit of vastlopen van het programma te voorkomen.

Uitkomsten altijd toetsen

De uitkomsten van CFD-berekeningen kunnen op een zeer aantrekkelijke manier worden gepresenteerd. Kleurenschema's, uitgebreide grafieken en zelfs bewegende beelden zijn mogelijk. Deze mogelijkheden wekken ten onrechte de indruk dat CFD-berekeningen een zeer nauwkeurige weergave van de werkelijkheid zijn. Het is belangrijk om een simulatiemodel te valideren en toetsen aan de hand van bekende situaties of aan de hand van werkelijke meetresultaten. Ook moet er een fysische verklaring voor de resultaten zijn. Men moet zich steeds afvragen of het resultaat (gevoelsmatig) aansluit bij werkelijke waarnemingen.

De inzet van CFD-berekeningen is goed bruikbaar wanneer het gaat om een vergelijking van situaties of ontwerpen. Wanneer beslissingen worden genomen op basis van de kwantitatieve uitkomsten is voorzichtigheid geboden.

6.2 Deterministische en probabilistische berekeningen

6.2.1 Algemeen

Het ontwerp van een ventilatiesysteem voor een tunnel is afhankelijk van verschillende variabelen.

Bij het ontwerpen kan op twee manieren te werk worden gegaan:

- Deterministisch: kies voor elke variabele een waarde, maak daarmee een berekening die leidt tot één uitkomst.
- Probabilistisch: bepaal de kansverdeling van elke variabele en maak een deterministische berekening voor alle mogelijke combinaties van waarden. De uitkomsten worden vervolgens zo gerangschikt dat aan elke uitkomst een kansverdeling kan worden toegekend.

Bij deterministische berekeningen moet er een keuze worden gemaakt voor de waarden van de variabelen. De keuze van de waarden is gewoonlijk gebaseerd op kennis en ervaring van de ontwerper. Daardoor bestaat, vooral in complexe situaties met meerdere variabelen, de kans dat de keuze een arbitrair karakter krijgt met mogelijk discussies over de uitkomst als gevolg.

Deterministische berekeningen zijn daarom goed geschikt voor situaties met slechts 1 of 2 variabelen, waarbij de waarden van de variabelen bovendien met vrij grote zekerheid kunnen worden bepaald. Het is wel raadzaam de berekening vergezeld te laten gaan van een gevoeligheidsanalyse om inzicht te krijgen in de invloed van variaties in de waarden van variabelen.

Een nadeel van een deterministische berekening is dat vaak wordt uitgegaan van een 'worst case' scenario en allerlei veiligheidsfactoren worden ingevoerd, waardoor een constructie of

installatie zwaarder wordt uitgevoerd dan strikt noodzakelijk is. Daarnaast geeft een deterministische berekening geen inzicht in de kans op falen.

Bij probabilistische berekeningen wordt bij elke variabele de kansverdeling van mogelijke waarden die de variabele kan aannemen in rekening gebracht. Variabelen die waarden volgens een kansverdeling aannemen heten dan stochasten. In feite is een probabilistische berekening niet meer dan een vaak herhaalde deterministische berekening met verschillende waarden voor de variabelen waarbij rekening wordt gehouden met de kansverdelingen van de waarden. Daardoor heeft de uitkomst van de berekeningen ook een kansverdeling. Zo wordt informatie verkregen over de kans op het optreden van volledig falen of een ongewenste situatie. Hiermee kan een ontwerp beter worden aangepast aan de vraag dan wanneer alleen deterministische berekeningen worden gemaakt.

Probabilistische en deterministische berekeningen kunnen worden gezien als aanvulling op elkaar: beide soorten berekeningen zijn bij het maken van een ontwerp zinvol.

6.2.2 Probabilistische berekeningen i.v.m. emissie

Bij het ontwerpen van een langsventilatiesysteem moet worden voorkomen dat de gestelde grenswaarden voor emissieconcentraties binnen en buiten de tunnel worden overschreden. Voor dit doel zijn probabilistische berekeningen minder zinvol. Hiervoor zijn een aantal redenen aan te wijzen:

- De emissieconcentratie in de tunnel is alleen bij lange tunnels belangrijker voor het ontwerp dan brand. In de emissie van schadelijke stoffen zit weinig variatie. De hoeveelheid uitgestoten uitlaatgassen is immers tamelijk éénduidig vast te stellen op basis van de verkeersstroom. Dat geldt ook voor de grootte van de luchtstroom bij lange tunnels. De wind speelt in die situatie slechts een kleine rol.
- De emissieconcentraties buiten de tunnel moeten voldoen aan wettelijke richtlijnen waarbij zowel jaargemiddelde waarden als piekwaarden worden beschouwd. Daarvoor is het juist wel zinvol om de variabele invloeden van verkeersintensiteit, weersgesteldheid en windklimaat te beschouwen.

6.2.3 Probabilistische berekeningen i.v.m. brand

Bij het ontwerp van een langsventilatiesysteem is het voornaamste uitgangspunt dat bij een brand de rook naar één zijde wordt verdreven. De aanstroomsnelheid stroomopwaarts van de brand moet daarbij zo worden gekozen dat de rook niet tegen de ventilatierichting in stroomt (backlayering).

Bij brand zijn probabilistische berekeningen zeker zinvol. In principe zouden de volgende variabelen als stochasten in de berekening moeten worden betrokken:

- De brandgrootte
- De plaats van de brand
- De windinvloed, gesplitst in
 - windrichting
 - windsnelheid
- Het verkeer

Zoals uit de onderstaande toelichting zal blijken, is in de praktijk is niet elk van deze variabelen geschikt om als stochast te worden opgenomen.

De stochast 'brandgrootte'

De brandgrootte bepaalt de temperatuur van de rookgassen en de hoeveelheid rook die vrijkomt. Bij een langstroming in de tunnel levert de brand bovendien een weerstand op.

Vanwege het type en aantal betrokken voertuigen kan de brandgrootte variëren van circa 5 MW voor een personenvoertuig tot 200 MW of meer voor een plasbrand. Personenauto-branden komen in tunnels met enige regelmaat voor, maar vrachtwagenbranden en plasbranden doen zich slechts zeer zelden voor in tunnels. Daardoor zijn er voor branden groter dan 20 MW nauwelijks statistische gegevens bekend, terwijl juist de brandgrootten van 50 MW of meer bepalend zijn voor het ontwerp. Dit maakt het ondoenlijk een realistische kansverdeling voor de brandgrootte op te stellen.

Daarom wordt aanbevolen de brandgrootte niet als stochast te beschouwen, maar probabilistische berekeningen te maken voor een aantal brandgrootten. Daarmee wordt de variabele 'brandgrootte' in feite wel gevarieerd, maar niet volgens een kansverdeling. In de vaststelling van de maximale kans op het niet halen van de kritische snelheid voor backlayering is wel rekening gehouden met de brandgrootte: naarmate de brand groter is, is de grenswaarde minder streng (zie paragraaf 5.2.1).

De stochast 'plaats van de brand'

In veel situaties zal het verkeer stroomopwaarts van de brand tot stilstand komen en het verkeer stroomafwaarts van de brand de tunnel uitrijden. De plaats van de brand in lengterichting bepaalt dus meestal hoeveel verkeer er in de tunnel tot stilstand komt. De stilstaande voertuigen leveren een bepaalde stromingsweerstand op.

Bij de berekeningen moet de plaats van de brand over de lengte van de tunnel worden gevarieerd. De kans dat brand optreedt wordt daarbij op elke plaats even groot verondersteld. Er zijn namelijk onvoldoende statistische gegevens bekend over de plaatsen waar de meeste branden plaatsvinden. Bij enkele tunnels met een neergaande en opgaande helling lijken de meeste ongevallen op het diepste punt plaats te vinden, maar bij andere tunnels met dezelfde vorm is dit niet het geval. Ook bij tunnelingangen en tunneluitgangen kan geen éénvoudig verband worden aangetoond met de ongevalsfrequentie. Bovendien ontstaan de meeste branden door pech en niet door een ongeval, en pechbranden kunnen op elke plaats op de weg plaatsvinden.

Wanneer in de tunnel hellingen aanwezig zijn, heeft de plaats van de brand invloed op de stroming van lucht en rook vanwege thermische effecten (schoorsteeneffect).

De stochast 'windinvloed'

Wind is een onzekere factor die zeer variabel is. Zowel de windrichting als de windsnelheid kan van invloed zijn. Bij tunnels met een lengte tot circa 2 km is windinvloed zelfs een belangrijke factor in het ontwerp van langsventilatie.

Voor windrichting en windsnelheid zijn uitgebreide en goed onderbouwde statistische gegevens op basis van metingen beschikbaar. Bij de berekeningen moeten beide grootheden worden gevarieerd en moeten kansverdelingen worden toegepast.

Opmerking: Bij de berekeningen moet rekening worden gehouden met het windklimaat in het gebied waarin de tunnel ligt. Het KNMI meet in Nederland op verschillende locaties het windklimaat. Het verdient aanbeveling de gegevens te bekijken van één of meer meetlocaties, bij voorkeur zo dicht mogelijk bij de tunnel. Hierbij moet worden gelet op de plaatselijke omstandigheden rondom de tunnelportalen, zoals bebouwing, begroeiing en terreinaccidentatie.

De stochast 'verkeer'

Stilstaand verkeer in een tunnel levert een weerstand op bij een stroming in langsrichting. Hoe groot deze weerstand is, hangt af van een groot aantal factoren. De belangrijkste factoren zijn de verkeersintensiteit en de verkeerssamenstelling. Omdat de meeste branden door pech ontstaan, is de kans op brand in hoge mate aan de verkeersintensiteit gekoppeld. Uit statistische gegevens blijkt dat de kans op brand waarschijnlijk ook afhankelijk is van de verkeerssamenstelling.

Als de variatie in verkeersintensiteit en verkeerssamenstelling bekend zijn, kunnen deze als stochast worden ingevoerd. Daarmee zou aan de weerstand van het verkeer stroomopwaarts van de brand een kansverdeling kunnen worden toegekend.

Het is echter zo dat de hoeveelheid verkeer die stroomopwaarts van een brand tot stilstand komt, ook afhankelijk is van de snelheid van branddetectie, het nemen van verkeersmaatregelen, de plaats van de brand en de lengte van de tunnel. Soms kan met verkeersmaatregelen worden voorkomen dat de hele tunnel vanaf de ingang tot aan de brand vol verkeer komt te staan. Een file is echter nooit te vermijden. Afhankelijk van de plaats van de brand staat deze file 'ergens' in de tunnel. In een korte tunnel met hoge verkeersintensiteit kan worden aangenomen dat de tunnel stroomopwaarts geheel met verkeer is gevuld.

Vanwege deze onderlinge afhankelijkheden is het ondoenlijk om het verkeer als een stochastische variabele te gebruiken. Mede omdat de verkeersweerstand vrijwel nooit de belangrijkste invloed is, wordt aanbevolen voor het verkeer vaste waarden aan te nemen. Als dat nodig is, kan daarbij rekening worden gehouden met de maximale hoeveelheid verkeer die stroomopwaarts van de brand tot stilstand komt.

6.3 Condities voor natuurlijke ventilatie

6.3.1 Beperking emissieconcentratie

Bij natuurlijke ventilatie is het uitwisselingsdebiet – de hoeveelheid tunnellucht die per tijds-eenheid door buitenlucht wordt vervangen – afhankelijk van de wind en van de luchtbewegingen die door het verkeer worden opgewekt.

De berekeningswijze is afhankelijk van het type tunnel:

- In een korte tunnel, zonder openingen in dak of wanden, wordt de richting en snelheid van de natuurlijke langsventilatie op dezelfde manier berekend als voor mechanische langsventilatie.
- In een tunnel met openingen of spleten in het dak wordt een virtuele spleetbreedte bepaald op basis van het totale doorlatende oppervlak, ofwel het totale oppervlak van alle spleten en openingen. Hierbij wordt aangenomen dat deze samen rekenkundig kunnen worden beschouwd als een doorlopende spleet.

Virtuele spleetbreedte

De virtuele spleetbreedte b wordt gegeven door:

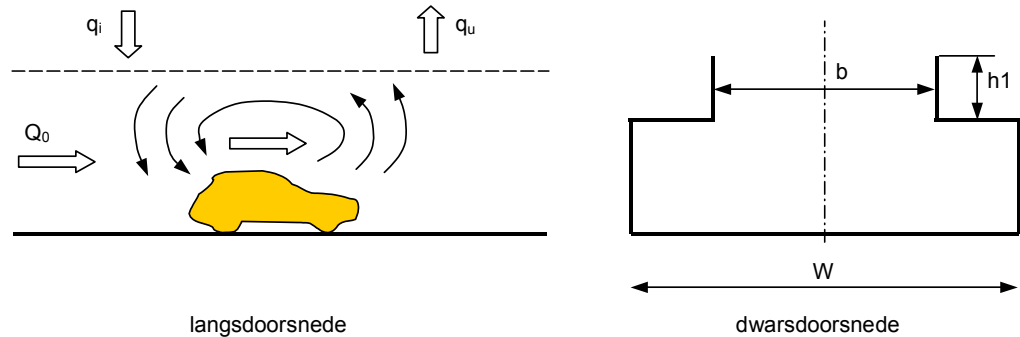
$$b = \frac{A_{\text{opendak}}}{L_{\text{rep}}}$$

waarbij:

L_{rep} = repetitielengte: de lengte van het terugkerend patroon van de openingen in het dak

A_{opendak} = de oppervlakte van de openingen in het dak over de repetitielengte

De uitwisseling via de spleet is geschetst in figuur 6-1.



Figuur 6-1: Uitwisseling door spleten in een tunneldak.

De mate van uitwisseling door de spleet wordt weergegeven door q_i en q_u . De waarde van q_i en q_u moet door experimenten worden bepaald en is in het algemeen afhankelijk van:

- de geometrie
- de wind
- de verkeersstroom

Meetresultaten uitwisselingsdebiet

In Duitsland zijn metingen uitgevoerd aan een gedeeltelijk gesloten constructie bij Oberkassel. De scheiding tussen de rijrichtingen bestaat uit enkele kolommen in plaats van een middenwand. De totale breedte van de opening in het dak $b = 7$ m, de totale breedte van de constructie $W = 30$ m.

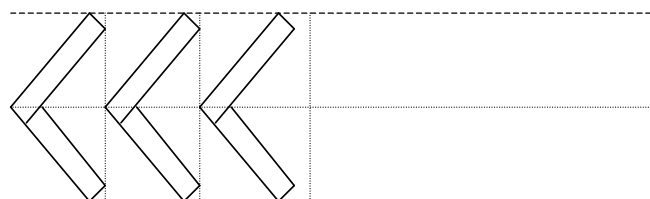
Bij deze constructie zijn metingen uitgevoerd om het uitwisselingsdebiet te bepalen, met de volgende uitkomsten:

- voor langzaam rijdend verkeer (10 km/u) : $q_i = q_u = 0,15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$
- voor doorstromend verkeer (60 km/h) : $q_i = q_u = 0,20 - 0,25 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$

Als het verkeer stilstaat en er geen wind is, blijkt nog steeds uitwisseling mogelijk als gevolg van thermische effecten (temperatuurverschillen tussen de lucht binnen de constructie en de buitenlucht, onder meer veroorzaakt door draaiende motoren).

In Japan zijn in vrij veel grote steden gedeeltelijk gesloten (ondergrondse) constructies gebouwd.

In het midden van het dak is een sleufvormige opening met breedte b . Ter hoogte van het dak kan een lamellenconstructie tussen de twee horizontale gestippelde lijnen worden aangebracht. De lamellen bevatten geluidabsorberend materiaal. Bovendien wordt door de lamellen directe lichtinval tegengegaan. De lamellenconstructie heeft in Japan veelal een vorm zoals aangegeven in Figuur 6-2.

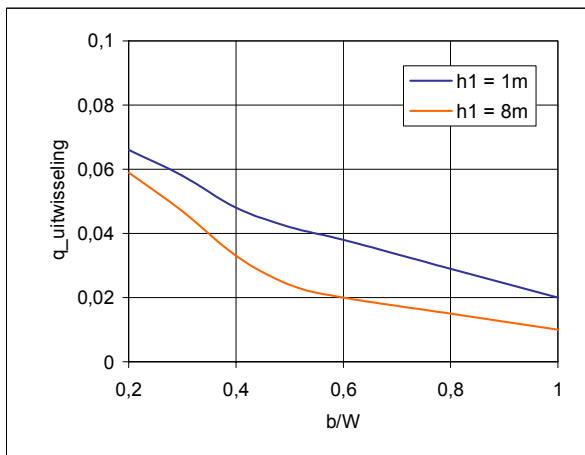


Figuur 6-2: Lamellen in het tunneldak - dwarsdoorsnede

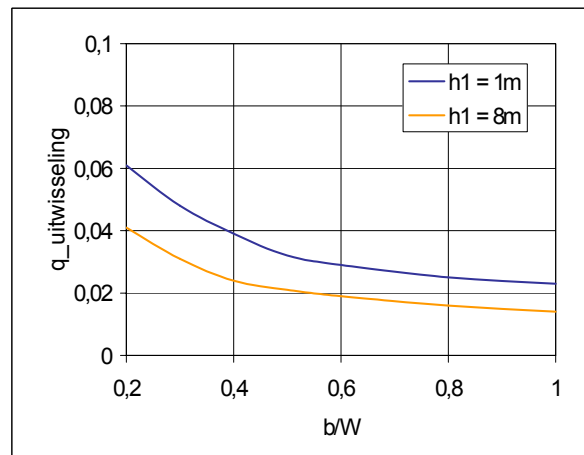
De hoogte van de lamellenconstructie is circa 50 – 70 cm. De dikte van de lamellen is 10 cm. De afstand tussen de lamellen is 10 tot 15 cm. De hoek van de lamellen met de verticaal is 60°. De lamellen liggen in het dak loodrecht op de richting van het verkeer. Door de V-vorm van de lamellen kan in de rijrichting te plaatsen of juist daar tegenin, kan het uitwisselingsdebiet worden beïnvloed.

Voor deze constructies zijn veelvuldig modelmetingen in een laboratorium uitgevoerd. Daarbij is voor de hoogte h_1 in Figuur 6–1 uitgegaan van waarden van ongeveer 1 m en ongeveer 8 m. Ook zijn verschillende waarden voor de spleetbreedte gebruikt. Onderstaande grafieken laten de resultaten van deze metingen zien, waarbij het uitwisselingsdebiet dimensieloos is gemaakt door het te delen door de luchtstroming in de tunnel.

Opmerking: De resultaten gelden voor constructies zonder lamellen, terwijl er buiten geen wind is.



Figuur 6–3: Dimensieloos uitwisselingsdebiet bij éénrichtingsverkeer



Figuur 6–4: Dimensieloos uitwisselingsdebiet bij tweerichtingsverkeer

De mate van uitwisseling is:

$$q_i = q_u = q_{uitwisseling} \cdot Q_0$$

waarbij:

Q_0 = luchtstroming in de tunnel

Door de openingen in het dak vertoont de luchtstroom in de tunnel een ander gedrag dan een luchtstroom in een volledig gesloten tunnel. Naarmate de breedte b van de spleet kleiner wordt, zal de luchtsnelheid in de constructie toenemen. Dat is logisch, omdat de constructie steeds meer op een tunnel gaat lijken en het zuigereffect van het verkeer groter wordt. Door het groeiende snelheidsverschil tussen de lucht in de tunnel en de buitenlucht neemt de uitwisseling toe, terwijl de waarde van b/W kleiner wordt. Het effect van het toenemende snelheidsverschil is dus sterker dan de toenemende weerstand als gevolg van de kleinere spleetbreedte b .

Bij een verhouding $b/W = 0,2$ en een luchtsnelheid van ongeveer 4 m/s volgt uit bovenstaande figuur een waarde voor het uitwisselingsdebiet w van ongeveer 0,24 m/s. Dit komt goed overeen met de Duitse metingen.

Door de lamellenconstructie wordt de effectieve opening in het dak aanzienlijk vermindert. Aangezien ook de weerstand tegen uitwisseling zal toenemen, mag verwacht worden dat het uitwisselingsdebiet minder zal worden dan op grond van de metingen zonder lamellen zou worden verwacht.

Aanbevelingen

Het uitwisselingsdebiet hangt af van een groot aantal factoren. Onderzoek naar deze verbanden is – zeker in Europa – nog zeer beperkt. Daarom wordt, als een gedeeltelijk gesloten constructie wordt overwogen, aanbevolen om naast oriënterende berekeningen ook uitgebreid modelonderzoek te verrichten.

6.3.2 Afvoer van rook en warmte

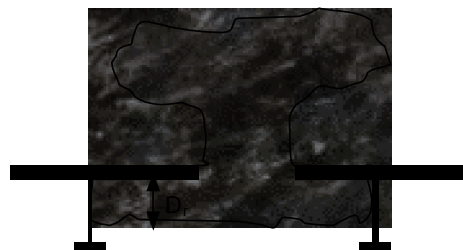
In een tunnel met openingen of spleten in het dak zal bij brand de rook grotendeels door deze openingen worden afgevoerd.

De mate van afvoer hangt af van de temperatuur van de rook en van de dikte van de rooklaag onder het dak. De temperatuur van de rook is afhankelijk van de afstand tussen de onderkant van de rooklaag en de brand. Doordat de opstijgende hete rook koele lucht meeneemt en zich daarmee vermengt, daalt de temperatuur. Er moet een schatting gemaakt worden van de dikte van de rooklaag op basis van de hoeveelheid toegevoerde en afgevoerde rook. De temperatuur van de rook kan worden geschat op basis van het brandvermogen.

In Figuur 6-5 is de situatie bij openingen, al dan niet voorzien van een schoorsteen, aangegeven. In Figuur 6-6 is de situatie bij spleten in dwarsrichting aangegeven.



Figuur 6-5: Rookafvoer door een opening met schoorsteen



Figuur 6-6: Afvoer van rook door spleten in dwarsrichting

Om de rookafvoer bij spleten in dwarsrichting te bevorderen is het gunstig als het dak wordt voorzien van verticale schotten. Deze schotten kunnen ook in de constructie een rol spelen door ze een dragende functie te geven.

Bij spleten in langsrichting verdeelt de rook zich over een zekere lengte in de tunnel en ontwijkt vervolgens door de spleet. Hierbij moet een schatting gemaakt worden van de lengte van de spleet die gebruikt wordt voor het ontwijken van de rook.

Het rookdebiet Q_r dat door één opening respectievelijk een spleet wordt afgevoerd is te berekenen met de formule:

$$Q = A \sqrt{\frac{2gD_r \frac{T_r - T_0}{T_0}}{1 + (\xi_i + \xi_w + \xi_u)}}$$

De algemene formule voor het rookdebiet per meter spleet is:

$$q = B_{\text{spleet}} \sqrt{\frac{2gD_r \frac{T_r - T_0}{T_0}}{1 + (\xi_i + \xi_w + \xi_u)}}$$

In de formules is:

- A = oppervlakte van de opening of spleet in het dak [m²]
- D_r = dikte van de rooklaag [m]
- T_r = temperatuur van de rooklaag [K]
- T₀ = temperatuur van de omgeving [K]
- g = zwaartekrachtversnelling [m/s²]
- ξ_i = coëfficiënt voor de instroomverliezen
- ξ_w = coëfficiënt voor de wandwrijvingsverliezen in de opening of spleet
- ξ_u = coëfficiënt voor de uitstroomverliezen

Coëfficiënt voor de instroomverliezen ξ_i

De instroomverliezen zijn afhankelijk van de vormgeving van de instroomopening. De waarde van ξ_i kan variëren tussen 0,1 en 0,6.

Coëfficiënt voor de wrijvingsverliezen ξ_w

Voor de grootte van de coëfficiënt voor het wrijvingsverlies geldt ξ_w = 4 kh/b met h als hoogte en b als breedte van de spleet

Omdat k = λ_w/8 geldt ook ξ_w = 1/2 λ_w h/b.

Coëfficiënt voor de uitstroomverliezen ξ_u

De grootte van coëfficiënt voor de uitstroomverliezen is ξ_u = 1.

6.4 Dimensionering langsventilatie

6.4.1 De evenwichtsvergelijking voor langsventilatie

In de tunnel is de door het systeem van langsventilatie geleverde stuwdruk aan de tunnel-lucht in evenwicht met de weerstand (drukval) die de lucht in de tunnel ondervindt. Dit leidt tot de volgende evenwichtsvergelijking:

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

waarbij:

Δp_{jet} = stuwdruk van een aanjaagventilator (zie 6.4.6 t/m 6.4.11)

Δp_{tunnel} = drukval door de tunnelconstructie, bestaande uit stromingsverliezen bij de in- en uitgang, wandwrijving en stromingsverliezen t.g.v. constructies in de tunnel (zie 6.4.2)

$\Delta p_{verkeer}$ = drukverschil veroorzaakt door stilstand of rijdend verkeer (zie 6.4.3)

Δp_{meteo} = drukverschil vanwege meteorologische invloeden (zie 6.4.4)

Δp_{brand} = drukval veroorzaakt door een brand (zie 6.4.5)

$\Delta p_{thermostatisch}$ = drukverschil vanwege thermostatische effecten (schoorsteeneffect) (zie 6.4.5)

Voor de componenten in de evenwichtsvergelijking geldt dat in kortere tunnels meteorologische effecten belangrijk zijn, terwijl in langere tunnels de wandwrijving een belangrijke rol speelt.

Bij brand hangen drukverschillen in de evenwichtsvergelijking af van de plaats van de brand in de tunnel. Berekeningen voor brandsituaties moeten dan ook voor meerdere plaatsen in de tunnel worden uitgevoerd.

6.4.2 Stromingsweerstand tunnelconstructie

Stromingsverliezen bij het ingangs- en uitgangsportaal

De waarden van de weerstand bij het ingangs- en uitgangsportaal hangen samen met de dynamische druk en met de in- en uitstroomcoëfficiënten ζ_{in} en ζ_{uit} . De drukverliezen worden berekend met:

$$\Delta p_{in} = \zeta_{in} \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot u_t^2 \quad \text{en} \quad \Delta p_{uit} = \zeta_{uit} \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot u_t^2$$

waarbij:

$\Delta p_{in/uit}$ = drukval over het in- en uitgangsportaal [N/m²]

ζ_{in} = instroomcoëfficiënt [-]

ζ_{uit} = uitstroomcoëfficiënt [-]

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.

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.

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.

Stromingsverliezen door wandwrijving

De weerstand door wandwrijving wordt berekend met:

$$\Delta p_{wand} = \lambda \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot u_t^2$$

waarbij:

Δp_{wand} = drukval door de wandwrijving [Pa]

λ = wandwrijvingscoëfficiënt [-]

L = lengte van de tunnel [m]

D_h = hydraulische diameter [m]

Het begrip 'hydraulische diameter' 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 weerstand heeft als de tunneldoorsnede. De hydraulische diameter is dus een fictieve diameter van de dwarsdoorsnede van de tunnelbuis.

De hydraulische diameter is gedefinieerd als:

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

waarbij:

D_h = hydraulische diameter [m]

A_t = oppervlak dwarsdoorsnede van de tunnelbuis [m²]

O_t = omtrek dwarsdoorsnede van de tunnelbuis [m]

Bij de bepaling van de wandwrijvingscoëfficiënt moet met behulp van het Reynolds-getal worden vastgesteld of de stroming laminair of turbulent is:

$$Re = \frac{u_t D_h}{\nu}$$

waarbij:

ν = kinematische viscositeit, voor lucht $1,5 \cdot 10^{-3}$ m²/s bij 20 °C

Bij een luchtsnelheid in de tunnel van 2 tot 5 m/s en – zoals veel voorkomt – een hydraulische diameter tussen 7 en 10 m, ligt de waarde van het Reynolds-getal boven 10.000, waardoor de stroming in de tunnel altijd turbulent is.

Voor een turbulente stroming kan de coëfficiënt voor de wandwrijving λ worden bepaald volgens de empirische formule van Coolebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,72 \cdot D_h} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} \right)$$

waarbij:

ε = de wandruwheid uitgedrukt in [m]. De wandruwheid is een maat voor de gemiddelde afmeting van oneffenheden van de wanden.

De juiste waarde van λ kan alleen door iteratie worden gevonden. Zonder afbreuk te doen aan de nauwkeurigheid kan de waarde van λ ook worden berekend uit:

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

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.

Bij de berekening van de wandwrijving in een situatie met brand moet rekening worden gehouden met de situatie stroomopwaarts en stroomafwaarts van de brand. De snelheid en dichtheid hebben stroomafwaarts van de brand door de temperatuursverhoging een andere waarde dan stroomopwaarts. Ook moet rekening worden gehouden met de afkoeling van rookgassen aan de wanden.

Stromingsverliezen door constructies in de tunnel

In een tunnel zijn altijd bepaalde constructies aan plafond en wanden gemonteerd. Dit zijn meestal installatiedelen, zoals verlichting, verkeerssignalering en CCTV-camera's. Soms zijn deze installaties aan portalen bevestigd die zelf ook stromingsweerstand opleveren. Afhankelijk van de situatie moet een schatting worden gemaakt van de stromingsweerstand die deze constructies opleveren. Voor de berekening van de weerstand van zulke constructies wordt verwezen naar literatuur en handboeken op dit gebied.

6.4.3 Invloed verkeer op de luchtstroming

Afhankelijk van de rijrichting en de rijsnelheid 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 wordt in principe beschreven met:

$$\Delta P_{\text{verkeer}} = \sum_{i=1}^n \frac{f_s \cdot c_w \cdot A_v}{\left(1 - \frac{A_v}{A_t}\right)^2} \cdot \frac{1}{2} \rho (u_t - u_v) \cdot |u_t - u_v|$$

waarbij:

$\Delta p_{\text{verkeer}}$ = drukval- of toename door het verkeer [N/m²]

n = aantal voertuigen in de tunnelbuis [-]

f_s = schaduwfactor [-]

c_w = stromingscoëfficiënt [-]

A_v = frontaal aanstroomoppervlak van de voertuigen [m²]

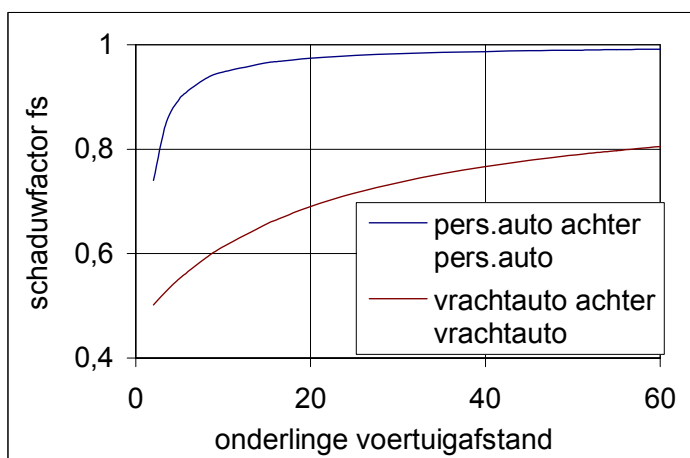
u_v = actuele verkeerssnelheid [m/s]

In Tabel 6-1 zijn waarden voor de verschillende factoren gegeven.

Soort voertuig	A_v	C_w bij aanstroming voorzijde	C_w bij aanstroming achterzijde
Personenauto	2,5 m ²	0,4	0,55
Bestelbus	5 m ²	0,5	0,8
Vrachtauto	10 m ²	0,8	1,0

Tabel 6-1: Waarden voor aanstroomoppervlak en stromingscoëfficiënt

Als voertuigen dicht achter elkaar staan of rijden, neemt de individuele invloed op de stroming af. Dit wordt het 'schaduweffect' of 'zoeffect' genoemd. De grootte van het schaduweffect is afhankelijk van de afstand tussen de voertuigen. De grootte van de schaduwfactor valt af te lezen uit Figuur 6-7.

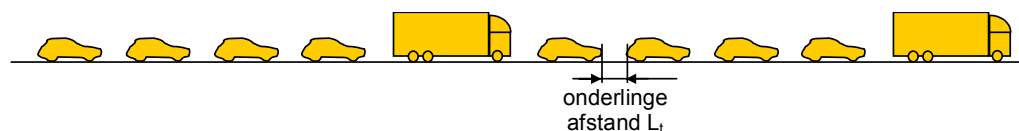


Figuur 6-7: Schaduwfactor voor voertuigen in colonne

Er zijn in de literatuur geen gegevens gevonden van personenauto's die in de windschaduw staan van een vrachtauto. Er kan worden aangenomen dat voor personenauto's in de windschaduw dezelfde schaduwfactor geldt als voor vrachtauto's in de windschaduw van een vrachtauto. Hetzelfde geldt voor vrachtauto's in de windschaduw van een personenauto.

Rekenvoorbeeld

Stel, een rijstrook is gevuld met 80% licht verkeer (personenauto's) en 20% zwaar verkeer, zoals aangegeven in figuur 6-8.



Figuur 6-8: Rijstrook 80% licht en 20% zwaar verkeer

Als wordt uitgegaan van een voertuiglengte voor personenauto's van 4,5 m en voor vrachtauto's van 15 m, levert dat samen met de gegevens uit paragraaf 5.1 de volgende parameters op:

Verkeerssnelheid [km/h]	Verkeersdichtheid bij gemengd verkeer [vtg/km,rijstrook]	Gemiddelde onderlinge afstand tussen de voertuigen [m]
0	118	1,9
100	22	38,9

Tabel 6-2: Parameters voor rijstrook 80% licht en 20% zwaar verkeer

Bij 0 km/h is de gemiddelde onderlinge afstand tussen vrachtauto's:

$$4 \cdot L_{pa} + 5 \cdot L_t = 4 \cdot 4,5 + 5 \cdot 1,9 = 27,5m$$

De schaduwwerking van een vrachtauto werkt tot op een afstand die groter is dan 27,5 m. Alle personenauto's achter de vrachtauto staan dus in de windschaduw, net als de eerstvolgende vrachtauto. Het totaal van de 4 schaduwfactoren van de personenauto's (alle achter de vrachtauto) is:

Voertuig nr.	Afstand tot achterzijde vrachtauto	Schaduwfactor
Pers.auto 1	1,9m	0,5
Pers.auto 2	$2 \times 1,9 + 1 \times 4,5 = 8,3$ m	0,6
Pers.auto 3	$3 \times 1,9 + 2 \times 4,5 = 14,7$ m	0,65
Pers.auto 4	$4 \times 1,9 + 3 \times 4,5 = 21,1$ m	0,7

Tabel 6-3: Schaduwfactoren bij stilstaand verkeer

De schaduwfactor voor de vrachtauto is ongeveer 0,72 bij een afstand tussen de vrachtauto's van 27,5 m.

Bij 100 km/h rijdt alleen de eerste personenauto in de windschaduw van de vrachtwagen ervoor. De schaduwwerking van personenauto op personenauto is bij 38,9 m onderlinge afstand te verwaarlozen. De schaduwfactoren zijn dan:

Voertuig nr.	Afstand tot voorganger	Schaduwfactor
Pers.auto 1	Afstand tot achterzijde vrachtauto 38,9m	0,77
Pers.auto 2	Afstand tot achterzijde pers.auto 38,9m	1
Pers.auto 3	Afstand tot achterzijde pers.auto 38,9m	1
Pers.auto 4	Afstand tot achterzijde pers.auto 38,9m	1
Vrachtauto	Afstand tot achterzijde pers.auto 38,9m	1

Tabel 6-4: Schaduwfactoren bij 100 km/h

6.4.4 Meteorologische invloeden

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

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

Meteorologische invloeden werken overigens ook op andere openingen in de tunnelbuis.

Bij het berekenen van ventilatiesystemen voor tunnels moet worden gelet op de windinvloed. In vlakke gebieden, zoals in Nederland, 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 Nederland niet te verwachten. Misschien kan bij tunnels onder grote wateroppervlakten een barometrisch drukverschil ontstaan door een verschil in weersysteem aan beide zijden van het water, maar dit is meestal te verwaarlozen.

Stappenplan berekening windinvloed

De windinvloed moet bij de tunnelportalen afzonderlijk berekend worden.

De berekening van de windinvloed op een tunnelportaal bij een vastgestelde windrichting gaat 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 $u_t/uv=1/2$ en bepaal de coëfficiënten A_{1-6} en B_{1-6} en bereken daarna CP10.
4. Bereken de winddruk voor zowel het ingangs- als het uitgangsportaal.
5. Bereken de totale winddruk met $p_{wind, totaal} = p_{wind, uitgangsportaal} - p_{wind, ingangsportaal}$.
6. Maak vervolgens de complete berekening voor de tunnel, waaruit dan de tunnelluchtsnelheid u_t volgt.
7. Kijk of bij de berekende waarde de absolute snelheidsverhouding $|u_t/uv|$ 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 tunnelluchtsnelheid daarbij in richting blijkt om te keren, moet hiermee bij het bepalen van de windcoëfficiënten rekening worden gehouden.

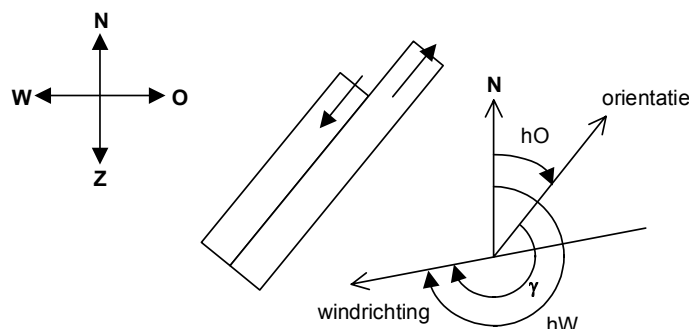
De verschillende stappen worden hierna toegelicht.

Gezien het iteratieve karakter van de berekening en de vele berekeningen met de coëfficiënten is deze berekening eigenlijk alleen goed mogelijk via een computer.

Bepaling van de windhoek γ

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.
- De hoek γ is de hoek van de windrichting minus de oriëntatiehoek van het tunnelportaal.



Figuur 6-9: Windrichting en oriëntatie

Ter illustratie van de bepaling van de hoek γ wordt het volgende voorbeeld gegeven:

- Ingangsportaal tunnelbuis X : oriëntatie 20°
- Uitgangsportaal tunnelbuis X : oriëntatie 190°
- Windrichting : Oost, ofwel 90°
- $\gamma_{\text{ingangsportaal}}$: windrichting - oriëntatie = $90^\circ - 20^\circ = 70^\circ$
- $\gamma_{\text{uitgangsportaal}}$: windrichting - oriëntatie = $90^\circ - 190^\circ = -100^\circ$

Wanneer de windhoek groter dan 180° of kleiner dan -180° is, moet er 360° worden afgetrokken respectievelijk opgeteld, aangezien de grafieken voor de hoeken -180° t/m $+180^\circ$ zijn gegeven.

Bepaling windsnelheid

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 weersgegevens. In statistische meteorologische gegevens wordt altijd de windsnelheid op 10 m hoogte boven 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 maaiveld.

Omgevingsinvloeden

Omgevingsinvloeden bestaan onder andere uit terreinaccidentatie, begroeiing en gebouwen in de omgeving. Vooral gebouwen of andere bouwconstructies in de directe omgeving van tunnelportalen kunnen voor bepaalde windrichtingen grote invloed hebben. Deze projectafhankelijke variabelen moeten steeds opnieuw worden bekeken en in de berekening worden betrokken. Dat vindt plaats door twee correctiefactoren op de windsnelheid:

- een correctiefactor ξ_t voor de terreinaccidentatie;
- een schaduwfactor ξ_s voor blokkade van de wind uit één of meerdere windrichtingen.

De gecorrigeerde plaatselijke windsnelheid u_w op 10m hoogte wordt dan berekend met

$$u_{w,corr} = \xi_t \cdot \xi_s \cdot u_w$$

Schaduwfactor voor blokkade van de wind uit een richting

De invloed van plaatselijke obstakels kan 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.

Correctiefactor voor terreinaccidentatie

Bij het meten van de winddrukfactoren in het bovengenoemde modelonderzoek is rekening gehouden met een vlakke omgeving met weinig terreinruwheid (klasse 3 in Tabel 6–5). Afwijkende omgevingsinvloeden moeten in berekeningen worden verdisconteerd door de windsnelheid op 10 m hoogte boven maaiveld te vermenigvuldigen met een terreinruwheidsfactor ξ_t conform Tabel 6–5.

klasse	omschrijving	Benaming	Terrein- ruwheidsfactor
1	Open wateroppervlak, vrije strijklengte minstens 5 km	Zee	1,12
2	Wad of sneeuwvlakte, geen begroeiing of obstakels	Glad	1,06
3	Weidland of braakliggend bouwland met vrijwel geen obstakels, startbanen van vliegvelden, etc.	Open	1,00
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 vrij dichte bedekking van obstakels (obstakelafstand ≈ obstakelhoogte)	Zeer ruw	0,82
7	Stad met dichte bebouwing	Gesloten	0,8

Tabel 6-5: Terreinruwheidsfactor

Berekening van de windinvloed

De mate van de winddruk op tunnelportalen hangt grotendeels af van de plaats en vorm van het portaal. Een portaal boven maaiveld vangt meer wind dan een portaal onder maaiveldniveau. Andere belangrijke factoren zijn de afmetingen en vorm van de portaal façades, de helling van de muren of bermen naast de weg en de aanwezigheid van geluidsschermen naast de weg, en van gebouwen en bomen rondom de portalen.

Bij tunnelportalen hebben de luchtstroming in de tunnel en de wind een zekere interactie. In de formule voor de winddruk worden daarom zowel de 'normale' stuwdruk door wind als de interactie beschreven:

$$p_{wind} = \xi_{wind} \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot u_w^2 + \xi_{wind\&tun} \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot u_w \cdot u_t$$

waarbij:

p_{wind} = winddruk [N/m²]

u_w = windsnelheid gemeten 10 m hoogte boven maaiveld [m/s]

ξ_{wind} = windfactor die representatief is voor bovengenoemde omstandigheden [-]

$\xi_{wind\&tun}$ = factor die de interactie van wind met de tunnellucht weergeeft [-]

De formule voor de winddruk kan worden herschreven tot:

$$p_{wind} = CP10 \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot u_w^2$$

waarbij:

$$CP10 = \xi_{wind} + \xi_{wind\&tun} \cdot u_t/u_w$$

De waarde van winddrukfactor CP10 is afhankelijk van de verhouding tussen windsnelheid op 10 m hoogte boven maaiveld en de ventilatiesnelheid in de tunnel, de oriëntatie en de vormgeving van het tunnelportaal, en de terreinaccidentatie.

Bepaling van de winddrukfactor CP10

Omdat de wind een grote invloed heeft op de berekeningen, verdient het aanbeveling om modelonderzoek te verrichten naar de juiste waarden van de winddrukfactor CP10. Dit

modelonderzoek moet wel worden uitgevoerd met een model dat met gesimuleerde luchtsnelheden in de tunnelbuis werkt, omdat CP10 hiervan mede afhankelijk is.

Door de Bouwdienst van Rijkswaterstaat is tussen 1990 en 2000 modelonderzoek verricht naar de meest voorkomende vormen van tunnelportalen (zie Tabel 6–6). Daarbij is uitgegaan van een tunnel met twee naast elkaar gelegen tunnelbuizen met een breedte van circa 10 m. Bij de metingen is de winddruk gemeten op zowel ingangs- als uitgangsportalen.

	<i>Hoofdvorm</i>	zijwanden toerit	gebouw boven tunnelportaal	scheidingswand tussen inrit en uitrit	lichtrooster boven inrit	uitritverlenging t.o.v. inrit
1	Verzonken	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		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	Half verzonken	recht	aanwezig	100 x 8 m	100 m	20 m
9		recht	aanwezig			20 m
10		recht				20 m
11		recht		20 x 8 m		
12		talud		20 x 8 m		
13	Bovengronds	geen		100 x 6 m	100 m	20 m
14		geen				20 m
15		geen		100 x 6 m		20 m
16		geen		20 x 8 m		

Tabel 6–6: Standaard configuraties voor windinvloed

In de windtunnelproeven is:

- de waarde van CP10 gemeten voor discrete verhoudingen van $u_t/u_w = -1, -1/2, 0, +1/2$ en $+1$;
- de windrichting gevarieerd in stappen van 30° ;
- geen aparte waarde voor ξ_{wind} en voor $\xi_{wind\&tun}$ gemeten.

De meetresultaten voor CP10 in de windtunnelproeven zijn verwerkt tot benaderingsformules die kunnen worden gebruikt om de waarde van CP10 te berekenen.

Voor het ingangsportaal is 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 is 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 bijlage C.

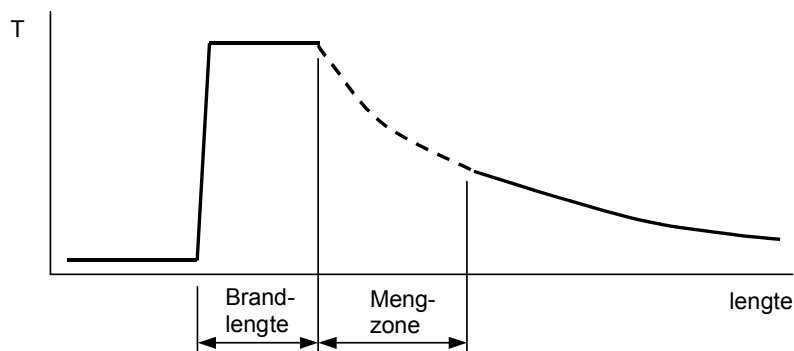
De gemiddelde waarde van CP10 voor de meest voorkomende soorten tunnelportalen is in grafiekvorm weergegeven in bijlage D. Deze waarden kunnen worden gebruikt voor een eerste benadering.

6.4.5 Invloed van brand op langsventilatie

De bij verbranding vrijkomende energie wordt omgezet in warmte en straling. De warmte en de straling worden voor een deel aan de tunnelwanden overgedragen en voor een deel aan de rookgassen in de tunnel.

Een brand treedt niet op één punt op maar heeft een zekere lengte. De lengte bedraagt minstens de lengte van het brandende voertuig of de lengte van de plasbrand. Bij een langsstroming – door natuurlijke trek of door langsventilatie – stromen onverbrande gassen die door pyrolyse of verdamping zijn vrijgekomen al brandend door de tunnel. Bij een grote plasbrand kunnen de vlammen zich over een lengte van 100 m of meer uitstrekken.

Voor verbranding is het nodig dat lucht wordt toegevoerd naar de brandhaard. Omdat lang niet alle toegevoerde lucht de brandhaard zal bereiken, kan niet worden volstaan met de ventilatiesnelheid die is gebaseerd op de benodigde verbrandingslucht; er is dan een hogere ventilatiesnelheid nodig. Bij voldoende turbulentie zal de overmaat aan lucht zich mengen met de zuivere rookgassen afkomstig van de brandhaard. In het algemeen ontstaat door de temperatuur van de rookgassen echter stratificatie, waardoor de rookgassen zich pas op enige afstand van de brand (na de mengzone) vermengen met de omringende lucht. Verder stroomafwaarts koelt de rook verder af aan de wanden van de tunnel.



Figuur 6–10: Temperatuurverloop bij brand

Ter plaatse van de brandhaard wordt de hitte vooral door straling afgestaan aan de tunnelconstructie. De overige hitte komt in de rookgassen terecht en wordt voor een deel door geleiding aan de tunnelconstructie afgestaan.

De brandlengte is bij benadering:

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

Tabel 6–7: Brandlengte

Hoewel door verbranding enige massa aan de rookgassen wordt toegevoerd, is het voor ventilatieberekeningen voldoende nauwkeurig aan te nemen dat bij gelijke temperatuur de dichtheid van de toegevoerde lucht gelijk is aan de dichtheid van de rookgassen. Ook voor

de soortelijke warmte mag worden aangenomen dat deze voor rookgassen gelijk is aan die van lucht.

Door de brand neemt de snelheid direct stroomafwaarts van de brand toe, terwijl de dichtheid afneemt. Door 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.

Brandvermogen en rookgastemperatuur

De temperatuur van de rookgassen wordt bepaald door:

- het toegevoerde brandvermogen;
- het vermogen dat in de brandlengte door straling en geleiding aan de tunnelconstructie wordt afgestaan.

Een zeer klein deel van de energie wordt gebruikt om de stroming te versnellen: door de temperatuurverhoging zetten de rookgassen immers uit, terwijl de dwarsdoorsnede gelijk blijft. Deze kinetische energie mag echter worden verwaarloosd vanwege de lage dichtheid van de rookgassen en de lucht.

Omdat een deel van de energie in de brandlengte door straling en geleiding wordt afgestaan aan de tunnelconstructie, wordt slechts een deel aan de rookgassen toegevoerd. Daarvoor geldt:

$$\eta P = A \rho_0 v_0 c_p (T_r - T_0)$$

waarbij:

- P = het brandvermogen [W] of [J/sec]
- η = het deel van het brandvermogen dat aan de rookgassen wordt toegevoerd [%]
- v_0 = de snelheid van de aangevoerde lucht [m/s]
- ρ_0 = de soortelijke massa of dichtheid van de aangevoerde lucht [kg/m³]
- T_0 = de temperatuur van de aangevoerde lucht [K]
- T_r = de temperatuur van de rookgassen [K]
- c_p = de soortelijke warmte van lucht [J/kgK] (1005 kJ/kg)
- A = de tunneldoorsnede [m²]

Voor η kunnen de waarden in Tabel 6–8 worden aangehouden. Hierbij wordt opgemerkt dat deze waarden gelden voor luchtsnelheden gelijk of groter dan de kritische snelheid voor backlayering.

Brandvermogen	Deel dat aan rook wordt toegevoerd
5 MW	73%
20 MW	64%
50 MW	64%
100 MW	64%
200 MW	64%

Tabel 6–8: Hoeveelheid brandvermogen dat aan de rook wordt toegevoerd

Opmerking: 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.

Verandering van volume en snelheid bij de brand

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. Deze kinetische energie is echter te verwaarlozen vanwege de lage dichtheid van de rookgassen en lucht.

Omdat mag worden aangenomen dat bij de verbranding geen massa wordt toegevoegd aan de stroming door de tunnel, volgt uit de massabalans stroomopwaarts en stroomafwaarts van de brand:

$$\rho_0 v_0 A = \rho_r v_r A \quad \text{ofwel} \quad v_r = \frac{\rho_0}{\rho_r} v_0$$

waarbij:

ρ_r = de soortelijke massa of dichtheid van de rookgassen [kg/m^3].

v_r = de snelheid van de rookgassen [m/s]

Voor ideale gassen bij constante druk geldt:

$$\frac{\rho_r}{\rho_0} = \frac{T_0}{T_r} \quad \text{zodat} \quad v_r = \frac{T_r}{T_0} v_0$$

Gebruik makend van de relatie tussen rookgastemperatuur en brandvermogen volgt:

$$v_r = \left(1 + \frac{\eta P}{A \rho_0 v_0 c_p T_0} \right) v_0 \quad \text{en} \quad \rho_r = \left(\frac{A \rho_0 v_0 c_p T_0}{\eta P + A \rho_0 v_0 c_p T_0} \right) \rho_0$$

Drukval over de brandhaard

Als gevolg van de hogere snelheid van de rookgassen neemt de druk over de brandhaard af. Dit verschijnsel wordt 'drukval over de brand' genoemd.

De balans van het impulstransport is:

$$A p_0 + A \rho_0 v_0^2 = A p_r + A \rho_r v_r^2 \quad \text{ofwel} \quad p_0 - p_r = \rho_r v_r^2 - \rho_0 v_0^2$$

waarbij:

p_0 = de druk stroomopwaarts van de brand [N/m^2]

p_r = de druk stroomafwaarts van de brand [N/m^2]

Omdat de massastroom door de doorsneden boven en benedenstreams van de brand gelijk is, geldt:

$$A \rho_0 v_0 = A \rho_r v_r$$

Hieruit volgt:

$$p_0 - p_r = \rho_0 v_0 (v_r - v_0)$$

Als wordt aangenomen dat de rook zich als een ideaal gas gedraagt, geldt:

$$p_0 - p_r = \rho_0 v_0^2 \left(\frac{T_r - T_0}{T_0} \right)$$

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.

Volgens CFD-simulaties lijkt de brandweerstand hierdoor met een factor 1,5 – 2 toe te nemen (dit is overigens een punt van nadere studie, die ten tijde van publicatie nog niet is uitgevoerd).

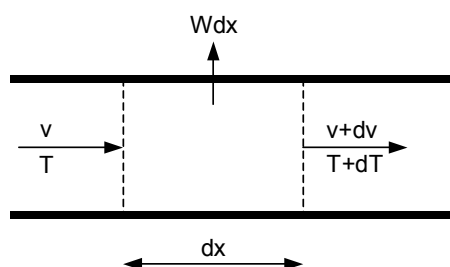
Met de formule voor de temperatuurverhoging door het toegevoerde vermogen en de genoemde factor voor de weerstandstoename, kan het drukverlies ter plaatse van de brand worden berekend met:

$$p_0 - p_r = f_{brwst} \cdot v_0 \left(\frac{\eta P}{A c_p T_0} \right) \quad \text{met} \quad f_{brwst} = 1,5 - 2$$

Warmtegeleiding en -straling

Stroomafwaarts van de brand neemt de temperatuur van de afgevoerde rookgassen af doordat warmte wordt afgestaan aan de tunnelconstructie. De warmteoverdracht vindt voornamelijk plaats door geleiding en voor een deel door straling.

Bij berekeningen moet rekening worden gehouden met de verschillende thermische eigenschappen van plafond, wanden en wegdek. Vooral bekleding van het plafond met een materiaal dat de constructie beschermt tegen hoge temperaturen, kan grote invloed hebben.



Figuur 6–11: Afkoeling stroomafwaarts van de brand

Wanneer wordt uitgegaan van een gelijkmatige temperatuurverdeling over de tunneldoorsnede geldt:

$$dT \cdot \rho_0 c_p v A = -WS \cdot dx$$

waarbij:

S = de omtrek van de tunneldoorsnede [m]

W = de warmtestroom door de wanden van de tunnel per oppervlakte-eenheid [W/m^2]

Voor W geldt:

$$W = h(T - T_{wand})$$

waarbij:

h = de warmteoverdrachtscoëfficiënt [W/m^2K].

Uit beide vergelijkingen volgt:

$$\frac{dT}{dx} = - \frac{hS(T - T_{wand})}{\rho_0 c_p v A}$$

De warmteoverdrachtscoëfficiënt h wordt deels door straling (h_r) en deels door conductie (h_c) bepaald. Volgens de literatuur kunnen de coëfficiënten h_r en h_c worden bepaald met:

$$h_r = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T + T_{wand})(T^2 + T_{wand}^2)$$

$$h_c = \frac{\frac{1}{8} \lambda \cdot c_p \cdot \rho \cdot u_r}{1,07 + 12,7(\text{Pr}^{2/3} - 1)\sqrt{\frac{1}{8} \lambda}} \quad (\text{Incropera en De Witt, 1996})$$

waarbij:

ε = wandemissiviteit (gesteld op 0,7 voor beton en steenachtige materialen)

σ_0 = constante van Stefan-Boltzmann ($5,68 \cdot 10^{-8} W/m^2K^4$)

T = rookgastemperatuur [K]

T_{wand} = wandtemperatuur [K]

λ = wandwrijvingsfactor

ρ = dichtheid van de rook [kg/m^3]

c_p = soortelijke warmte [J/kgK]

u_r = stroomsnelheid van de rook [m/s]

Pr = getal van Prandtl

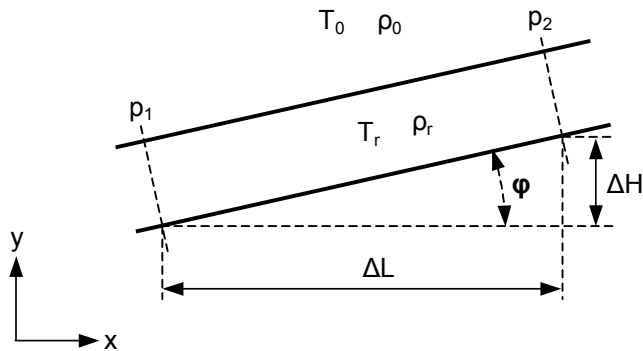
Het gevolg van de afkoeling is dat de luchtsnelheden stroomafwaarts minder worden. Daardoor zal ook weer enige drukopbouw plaatsvinden, hoewel rekening moet worden gehouden met drukverliezen door wandwrijving en verkeer.

In principe neemt de wandtemperatuur door de warmteoverdracht toe. De toename is buiten de brandzone echter dusdanig klein ten opzichte van de rookgastemperatuur, dat dit effect in de berekeningen kan worden verwaarloosd.

Invloed van hellingen

Bij brand heeft een helling invloed op de evenwichtsvergelijking door thermosatische 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.

De opwaartse druk door rookgassen kan worden beschreven op basis van Figuur 6–12.



Figuur 6-12: invloed helling (schoorsteeneffect)

Als het tunneldeel ΔL rookgassen bevat met een constante temperatuur T_r , geldt volgens het kracht-evenwicht voor de rookgassen in tunneldeel L :

$$p_1 = p_2 + \rho_r g \Delta H$$

Voor ideale gassen geldt bij constante druk $\rho_r T_r = \rho_0 T_0$.
Tevens geldt dat $H = L \tan \varphi$.

Wanneer het tunneldeel ΔL rookgassen bevat met een constante temperatuur T_r , kan het drukverschil over lengte ΔL worden geschreven als:

$$p_2 - p_1 = -\rho_0 \left(\frac{T_0}{T_r} \right) g (\Delta L) \tan \varphi$$

Wanneer hetzelfde tunneldeel ΔL lucht met een temperatuur T_0 zou bevatten is het drukverschil:

$$p_2 - p_1 = -\rho_0 g (\Delta L) \tan \varphi$$

Het verschil tussen beide drukverschillen geeft het resulterende schoorsteeneffect:

$$\Delta p_{\text{schoorsteen}} = -\rho_0 \left(1 - \frac{T_0}{T_r} \right) g (\Delta L) \tan \varphi$$

Deze berekening van het schoorsteeneffect kan worden gebruikt als een eerste benadering. In werkelijkheid koelen rookgassen af aan de wanden van de tunnelbuis waardoor het schoorsteeneffect anders uitvalt. Voor een lengte $\Delta L = dx$ kan het schoorsteeneffect worden geschreven als een differentiaalvergelijking:

$$\frac{dp}{dx} = -\rho_0 \left(1 - \frac{T_0}{T_r(x)} \right) g \tan \varphi$$

waarbij T_r een functie is van x .

Het verloop van de druk kan alleen worden bepaald als de functie $T_r(x)$ bekend is. De formule voor het schoorsteeneffect is een oplossing van de differentiaalvergelijking, waarbij wordt aangenomen dat T_r constant is over de lengte.

6.4.6 Stuwdruk van aanjaagventilatoren

De stuwdruk van aanjaagventilatoren wordt gegeven door:

$$\Delta p_j = \frac{F_j}{A_t} = \frac{\eta_{opst} \cdot \eta_{afbuig} \cdot \eta_{stk} \cdot \rho \cdot Q_j \cdot (u_j - u_t) \cdot \cos(\alpha)}{A_t}$$

waarbij:

- Δp_j = stuwdruk van één aanjager [N/m^2]
- F_j = stuwkracht van één aanjager [N]
- A_t = dwarsdoorsnede van de tunnelbuis [m^2]
- η_{stk} = stuwkrachtrendement van de aanjaagventilator [-]
- η_{opst} = opstellingsrendement van de aanjaagventilator [-]
- η_{afbuig} = rendement van (eventuele) afbuig schoepen [-]
- α = afbuighoek door (eventuele) afbuig schoepen [$^\circ$]
- ρ = dichtheid van medium dat door ventilator stroomt (lucht of rookgas) [kg/m^3]
- Q_j = debiet van bij de uitblaasopening van de aanjager [m^3/s]
- u_j = gemiddelde stroomsnelheid in uitblaasopening van aanjager (bij $u_t = 0$) [m/s]
- u_t = stroomsnelheid van de lucht waarin de straal blaast [m/s]

In een tunnel wordt de stroomsnelheid u_t bepaald door het verschil tussen de totale hoeveelheid lucht die door de tunnel stroomt en de hoeveelheid lucht die door de aanjaagventilatoren stroomt.

Bij een cluster met N ventilatoren wordt u_t gegeven door:

$$u_t = \frac{A_t u_{t0} - N \cdot Q_j}{A_t - N \cdot A_j}$$

waarbij:

- u_{t0} = luchtsnelheid in de tunnel in een ongestoorde doorsnede
- A_j = oppervlak van een aanjaagventilator

Rekenvoorbeeld:	$A_t = 50 \text{ m}^2$	$N = 4$
	$A_j = 0,75 \text{ m}^2$	$Q_j = 18 \text{ m}^3/\text{s}$
	$u_{t0} = 4 \text{ m/s}$	$u_t = 2,72 \text{ m/s}$

Uit dit voorbeeld blijkt dat u_t aanzienlijk kan verschillen van u_{t0} . Omdat de snelheid van de aanjaagstraal echter veel groter is dan de snelheid in de tunnel, is de afwijking slechts ongeveer 5% wanneer voor u_t de waarde van u_{t0} wordt genomen.

6.4.7 Het stuwkrachtrendement

Theoretisch wordt de stuwkracht van een aanjaagventilator in stilstaande omringende lucht gegeven door:

$$F_{th} = \rho \cdot \int_{A_f} u_f^2 \cdot dA$$

waarbij:

- F_{th} = theoretische stuwkracht [N]
- ρ = dichtheid van de lucht [kg/m^3]
- u_f = luchtsnelheid ter plaatse van deelvakje dA [m/s]
- A_f = uitstroomoppervlak [m^2]

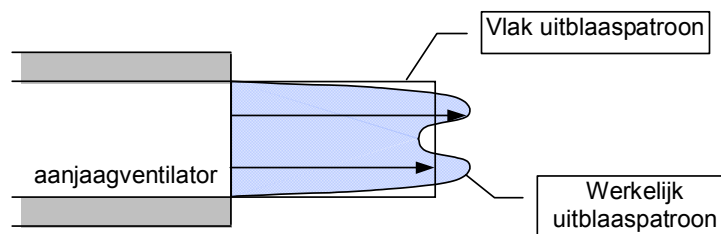
Wanneer het uitblaaspatroon geheel vlak is, gaat deze formule over in:

$$F_{th} = \rho \cdot Q_f \cdot u_f \quad \text{ook te schrijven als} \quad F_{th} = \rho \cdot \frac{Q_f}{A_f}$$

waarbij:

- Q_f = de volumestroom door de ventilator [m^3/s]

In praktijk is het uitblaaspatroon echter niet vlak. De motor en naaf van de waaier blokkeren de luchtstroom in het centrum van de uitblaasstraal. Bovendien is de stroomsnelheid langs de binnenwanden van de ventilator lager door de wandwrijving. Er ontstaat dan bijvoorbeeld een uitblaaspatroon zoals aangegeven in Figuur 6–13.



Figuur 6–13: Uitblaaspatronen aanjaagventilator

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. Een goede vormgeving van de instroomopening leidt tot minimale turbulentie in de luchtstroming.

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.

De werkelijke stuwkracht van een aanjaagventilator in stilstaande omringende lucht wordt dan gegeven door

$$F_f = \eta_{stk} \cdot \rho \cdot Q_f \cdot u_f$$

Het stuwkrachrendement η_{stk} kan worden bepaald door het oppervlak van de uitstroo-
opening vast te stellen, en de luchtstroom door de ventilator en de werkelijke stuwkracht te
meten.

Het stuwkrachrendement wordt dan gegeven door:

$$\eta_{stk} = \frac{F_{f,werkelijk}}{F_{th}} \cdot 100\%$$

waarbij:

$$\begin{aligned}\eta_{stk} &= \text{stuwkrachrendement [\%]} \\ F_{f,werkelijk} &= \text{gemeten werkelijke stuwkracht [N]} \\ F_{th} &= \text{theoretische stuwkracht [N]}\end{aligned}$$

Bij goede aanjaagventilatoren ligt het stuwkrachrendement tussen 94 en 96%. Een stuw-
krachrendement lager dan 92% is onacceptabel. Een stuwkrachrendement van 98%
wordt als zeer goed beoordeeld.

Voorbeeld

Een aanjaagventilator met een inwendige diameter van 1.000 mm heeft een uitblaasope-
ning van 0,785 m². Bij een debiet van 29,4 m³/s is de theoretische stuwkracht 1.320 N bij
een dichtheid 1,20 kg/m³ van de lucht. Bij een gemeten stuwkracht van 1.268 N is het
stuwkrachrendement 96%.

6.4.8 Het opstellingsrendement

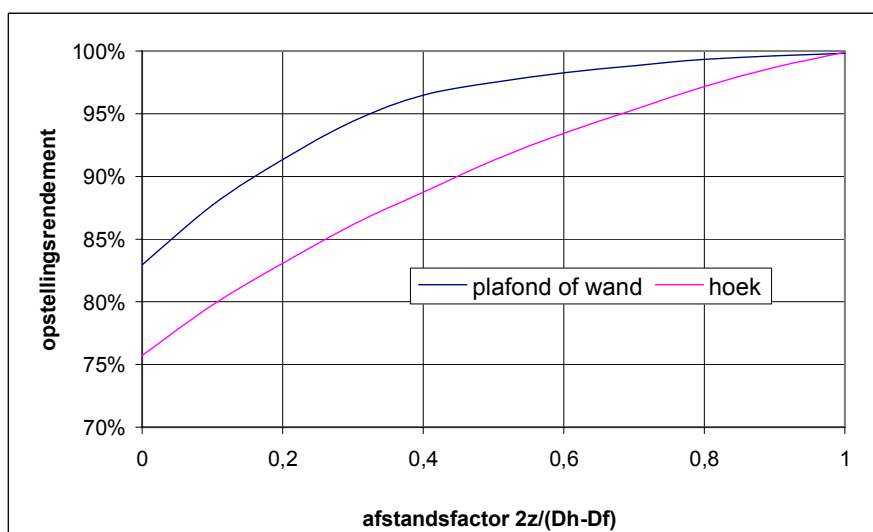
Aan de uitblaaszijde verlaat de luchtstroom de ventilator in een gebonden straal die zich
kegelvormig uitbreidt naarmate de afstand van de uitblaasopening groter wordt. De top-
hoek van de kegel is tussen 10° en 15°, afhankelijk van de vorm van de uitblaasopening.
Naarmate de luchtstroming een grotere diameter krijgt, neemt de snelheid af. 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, enzovoort) 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 op-
stellingsrendement η_{opst} .

Het opstellingsrendement van een aanjaagventilator in een tunnel wordt gegeven door

$$\eta_{opst} = \frac{F_{f,effectief}}{F_{f,werkelijk}} \cdot 100\%$$

Invloed van plafond en wanden

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 (zie ook
4.3.1). Op basis van de manier waarop de uittredende luchtstraal uitwaaiert, kan worden
bepaald op welke afstand van de ventilator de straal de wand of het plafond raakt. De gra-
fiek in Figuur 6-14 toont het opstellingsrendement voor een enkele aanjaagventilator zon-
der afbuigschoppen.



Figuur 6–14: Opstellingsrendement afhankelijk van positie van de aanjaagventilator

In de figuur is:

z = de afstand van de hartlijn van de ventilator tot aan de wand of het plafond [m]

D_h = de hydraulische tunneldiameter [m]

D_f = de inwendige vrije diameter van de ventilator [m]

Zo kan bijvoorbeeld uit de grafiek worden afgelezen dat:

- een enkele ventilator zonder afbuigschoppen;
- met een diameter van 1 meter;
- in een tunnel met een hydraulische diameter van 8 meter;
- op een afstand van 1 meter van een wand of plafond

een opstellingsrendement zal hebben van:

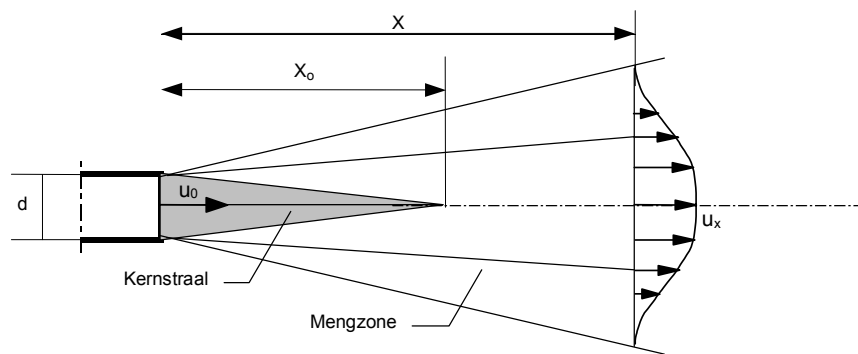
- 94% (wand of plafond)
- 86% (hoek opstelling).

Aanjaagventilatoren naast elkaar

Wanneer twee of meer ventilatoren naast elkaar worden geplaatst, zullen de uitwaaiende luchtstromen elkaar raken. Omdat de lichtsnelheden van deze luchtstromen ongeveer gelijk zijn, treedt hierbij geen wrijvingsverlies op. Modelproeven hebben aangetoond dat bijvoorbeeld een rij van vier aanjagers een totaal rendement heeft dat zelfs 3 – 5% beter kan zijn dan het rendement van een enkele aanjaagventilator (zie ook 4.3.1). Aanbevolen wordt om bij een ontwerp geen rekening te houden met deze mogelijke rendementsverbetering. Deze is sterk afhankelijk van de afstand tussen de aanjaagventilatoren waardoor bij een ontwerp niet goed kan worden bepaald of de rendementsverbetering daadwerkelijk optreedt.

Aanjaagventilatoren achter elkaar

De werking van aanjagers is gebaseerd op het feit dat de met hoge snelheid uittredende luchtstroom zijn energie kan overdragen aan de tunnellucht. Als de luchtstraal wordt aanzogen door de 'volgende' ventilator voordat de kernsnelheid (zie Figuur 6–15) is afgenomen tot de tunnellsnelheid, gaat er echter energie verloren. De niet-overgedragen energie wordt immers niet benut.



Figuur 6–15: Uitblaaspatroon aanjaagventilator

Zoals beschreven in Figuur 6–15 blijft de snelheid in de hartlijn van de uitlaatopening nog over een zekere afstand x_0 constant. Deze afstand x_0 bedraagt 4,25 keer de diameter (d) van de aanjaagventilator, afhankelijk van de mate van turbulentie. Daarna wordt de primaire lucht met de tunnellucht gemengd en zal de snelheid afnemen.

Uitgaande van een uittredesnelheid u_j van 34 m/s van een aanjaagventilator met een diameter (d) van 1 meter, zal pas na 50 meter (afstand x) de kernsnelheid zijn afgenomen tot een snelheid u_x van circa 5 m/s. Afbuig schoepen bekorten deze lengte enigszins maar dit effect is te verwaarlozen.

Als twee achter elkaar geplaatste ventilatoren (1.000 mm diameter) een tussenafstand hebben van minimaal 45 tot 50 meter, zal het effect op het opstellingsrendement te verwaarlozen zijn.

Rendement van ingangventilatoren

Ingangventilatoren 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 ingangventilatoren onder een hoek aangebracht zodat geen afbuig schoepen nodig zijn.

Volgens de gehanteerde definitie voor het opstellingsrendement kan bij ingangventilatoren het opstellingsrendement meer dan 100% bedragen (volgens schaalmodelmetingen 110 – 130%). Een deel van de luchtstroming door de tunnel wordt rechtstreeks aangezogen en in de tunnel geblazen, maar door de aanjaagwerking wordt ook lucht bij het ingangsportaal mee de tunnel ingezogen.

Bij ingangventilatoren kan de straal worden verstoord door stilstaande hoge voertuigen. Dit leidt tot verlies van opstellingsrendement. Dat blijkt ook uit praktijkmetingen. Zo is het opstellingsrendement in een tunnel met 3 rijstroken en 7 ingangventilatoren naast elkaar:

- circa 30% lager als op één van de rijstroken een hoog voertuig in de straal stilstaat;
- circa 50% lager als op twee van de rijstroken een hoog voertuig in de straal stilstaat.

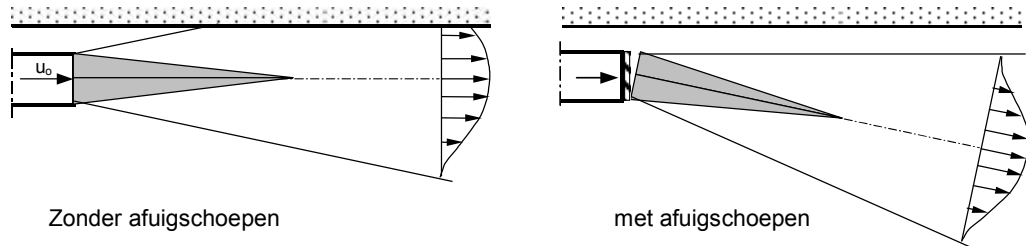
Er is altijd een kans dat er één stilstaand hoog voertuig precies in de uitblaasstraal staat. Zonder voertuig in de uitblaasstraal zou het opstellingsrendement circa 110% bedragen, met één voertuig in de uitblaasstraal circa 80%.

Het lijkt redelijk een gemiddeld opstellingsrendement van 90-95% aan te houden.

De kans dat twee naast elkaar stilstaande hoge voertuigen precies in de uitblaasstraal staan, is zeer klein. Met deze situatie hoeft daarom in praktijk geen rekening te worden gehouden. Vooral wanneer berekeningen probabilistisch worden uitgevoerd, moet ervoor worden gewaakt dat meerdere gebeurtenissen met kleine kans op elkaar worden gestapeld.

Mogelijkheden ter verbetering van het opstellingsrendement

Eén van de oplossingen om het opstellingsrendement te verbeteren is het aanbrengen van afbuig-schoepen aan de uitblaaszijde.



Figuur 6–16: Uitblaaspatroon aanjaagventilator zonder en met afbuig-schoepen

Het aanbrengen van afbuig-schoepen beïnvloedt het stuwkrachrendement in 2 opzichten:

- De kracht wordt uitgeoefend onder een hoek α met de luchtstroom in de tunnel. De werkelijke uitgeoefende kracht is daardoor evenredig kleiner met de cosinus van de uitblaashoek α . Afbuig-schoepen met een hoek van $8 - 10^\circ$ blijken in praktijk een goede oplossing te bieden. Het verlies door de afbuighoek is dan circa 2%.
- Afbuig-schoepen leiden zelf ook tot stuwkrachtverlies door stroming langs de schoepen. Bij goed vormgegeven afbuig-schoepen kan dit verlies worden beperkt tot maximaal 2,5%.

Het totale stuwkrachtverlies door toepassing van afbuig-schoepen is daardoor $4 - 4,5\%$. Dit verlies moet opwegen tegen de winst aan opstellingsrendement.

Een andere oplossing om het opstellingsrendement te verbeteren is de aanjaagventilator onder een kleine hoek ten opzichte van de naastgelegen wand of het plafond te plaatsen. Een dergelijke aanjaagventilator kan slechts in  een werkingsrichting worden gebruikt. Deze opstelling is daarom niet geschikt voor omkeerbare aanjaagventilatoren.

6.4.9 Invloed van de tunnellsnelheid op de stuwkracht

De hiervoor genoemde formules en getallen zijn gebaseerd op volledige omzetting van de uitblaassnelheid van de aanjaagventilator. De tunnellsnelheid heeft echter ook een bepaalde snelheid, die kan variëren van 1 tot 8 m/s. Hierdoor neemt de effectieve stuwkracht van de ventilatoren af.

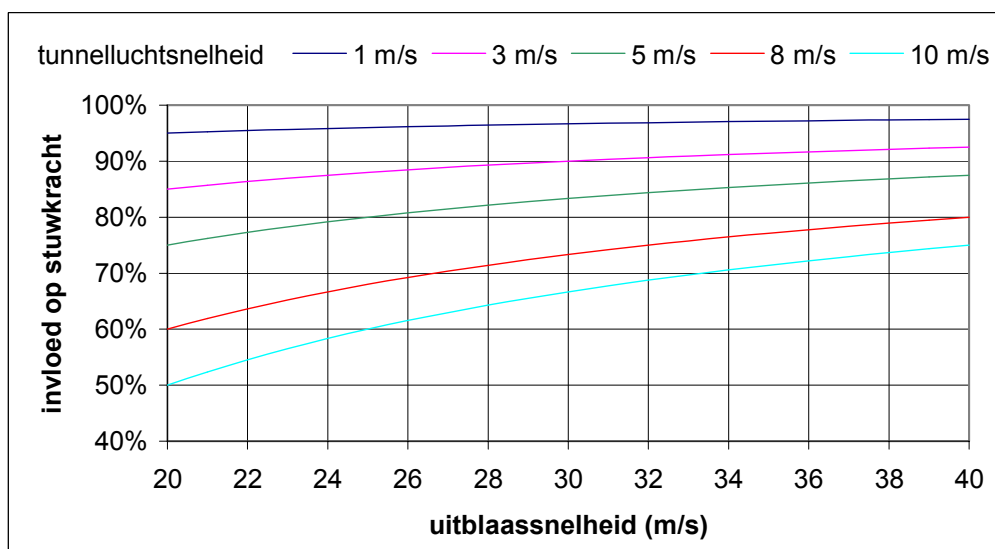
Om deze invloed te laten zien kan de theoretische (netto) stuwkracht van een aanjaagventilator ook geschreven worden als:

$$F_j = \rho \cdot \frac{Q_t^2}{A_t} = \rho \cdot Q_j \cdot (u_j - u_t)$$

waarbij:

u_j = de gemiddelde uitstroomsnelheid (m/s)

u_t = de gemiddelde tunnellsnelheid (m/s).



Figuur 6–17: Invloed luchtsnelheid in de tunnel op de stuwkracht

De grafiek laat de invloed zien van verschillende tunnellsnelheden op de stuwkracht van de aanjaagventilator.

6.4.10 De specifieke stuwkracht

De specifieke stuwkracht F_{sp} van een ventilator is de op een proefstand gemeten werkelijke stuwkracht per eenheid van het bij de aansluiting opgenomen elektrisch vermogen.

De specifieke stuwkracht wordt gegeven door:

$$F_{sp} = \frac{F_{\text{werkelijk}}}{P_{\text{elektrisch}}} \quad [\text{N/kW}_e]$$

Bijvoorbeeld, een aanjager heeft een gemeten stuwkracht van 850 N bij een opgenomen motorvermogen uit het net van 25 kW_e. De specifieke stuwkracht is dan 34 N/kW_e.

Een aanjaagventilator wordt als goed beoordeeld als $F_{sp} > 30 \text{ N/kW}_e$ en als uitstekend wanneer $F_{sp} > 35 \text{ N/kW}_e$. Dit geldt voor de normale stromingsrichting, zowel bij éénrichtingsventilatoren als bij omkeerbare ventilatoren.

6.4.11 Invloed van temperatuur op de stuwkracht

Stroomafwaarts van de brand is de stuwdruk van in bedrijf zijnde aanjaagventilatoren lager dan stroomopwaarts van de brand. Stroomafwaarts van de brand is de temperatuur hoger. Daardoor is enerzijds de dichtheid lager, terwijl anderzijds – vanwege de wet van behoud van massa(stroom) – de stroomsnelheid van de tunnellsucht hoger is. Het volume zet immers uit bij een gelijkblijvende tunneldoorsnede. Beide effecten leiden tot een afname van de stuwkracht, zoals in onderstaand voorbeeld wordt geïllustreerd:

Stel dat de stuwkracht van een aanjaagventilator 500 N is bij een uittredesnelheid van 35 m/s, en dat dit bij een luchttemperatuur van 20 °C resulteert in een snelheid in de tunnel van 5 m/s.

Dezelfde aanjager levert bij 400 °C de volgende stuwkracht:

- De dichtheid bij 400 °C is $\rho = (273 + 20)/(273 + 400) \cdot 1,2 \text{ kg/m}^3 = 0,52 \text{ kg/m}^3$
- De stroomsnelheid in de tunnel is $u_t = 1,2/0,74 \cdot 5 \text{ m/s} = 11,5 \text{ m/s}$
- De uittredesnelheid van de aanjaagventilator $u_j = 35 \text{ m/s}$ wordt niet of nauwelijks beïnvloed door de temperatuur, omdat het toerental bij een kortsluitankermotor nauwelijks wijzigt. De waaier blijft dus evenveel volume verplaatsen.
- De stuwkracht bij 400 °C zal dan 34% van de stuwkracht bij 20 °C bedragen.

6.5 Dimensionering dwarsventilatie

6.5.1 Dimensionering van de toevoerinstallatie

Voor de toevoerinstallatie geldt (zie ook 4.4.2):

- Toevoersecties hebben een maximale lengte van circa 800 m
- De onderlinge afstand van de roosters is 3 – 12 m
- De maximumsnelheid van de uitblaasstraal is:
 - 2 – 4 m/s als ook wordt ingeblazen in de brandzone
 - 8 – 10 m/s als niet wordt ingeblazen in de brandzone
- De weerstand van de inblaasroosters moet instelbaar zijn om een uniforme verdeling over de roosters te verkrijgen.

6.5.2 Dimensionering van de afvoerinstallatie

Voor de afvoerinstallatie geldt (zie ook 4.4.3):

- Het oppervlak van afvoeropeningen is 1 – 4 m²
- De onderlinge afstand is 50 – 100 m
- Afvoersecties zijn verdeeld in zones van maximaal 400 – 600m waarbinnen de kleppen van afzuigroosters alle tegelijk kunnen worden geopend of gesloten.
- Alle kleppen in de brandzone moeten bij calamiteit geheel worden geopend.

In verband met het zogeheten ‘plug-effect’ moet de luchtsnelheid in de afzuigopening lager dan 15 m/s zijn. Bij een hogere afzuigsnelheid wordt er een ‘plug’ uit de gestratificeerde rooklaag getrokken en zuigt het systeem voornamelijk de schonere lucht aan die onder de rooklaag hangt.

Elk afzuigpunt moet een relatief hoge luchtweerstand krijgen om zonder inregelkleppen te komen tot een redelijk uniforme luchtverdeling.

Bij de dimensionering van de afvoerinstallatie moet rekening worden gehouden met de hoge rookgastemperaturen tijdens brand. Deze verhoogde temperaturen doen zich vooral voor op het punt waar de rookgassen de afzuigroosters instromen. Op hun weg door de afvoerkanalen naar afzuigventilator zullen de rookgassen hun warmte deels afgeven aan de (bouwkundige) kanalen, waardoor ze afkoelen. Aangezien de ventilatoren ‘verplaatsers van volume’ zijn, is hun capaciteit niet direct afhankelijk van de doorstromende luchttemperatuur. Dit betekent dat door de afkoeling – en dus volumeverkleining – van de rookgassen in de kanalen er meer m³ worden afgevoerd door de gezamenlijke afvoerroosters dan uiteindelijk door de ventilatoren wordt uitgeblazen.

6.5.3 Algemene berekeningen dwarsventilatie

De luchthoeveelheden worden bepaald door:

- de verkeersemisatie in de tunnel en de toelaatbare concentratie in de normale situatie;
- het benodigde rookafvoerdebiet gedurende een calamiteit.

Voor een dwarsventilatiesysteem gelden de volgende voorwaarden:

- De maximale stroomsnelheid in kanalen is 15 – 25 m/s.
- Om de afmetingen van kanalen te beperken worden toevoer- en afvoersystemen verdeeld in tunnelsecties, die elke worden aangesloten op een toevoer- respectievelijk afvoerschacht.
- De installaties en luchtweerstand worden berekend zoals bij elk ander luchtkanalenstelsel. Er wordt daarvoor verwezen naar de betreffende ISSO-publicaties en het LUKA-handboek.

Voor alle individuele weerstanden geldt de volgende formule:

$$\Delta P_i = \sum \zeta * \frac{1}{2} * \rho * v^2$$

Hierbij is ζ de weerstandscoefficiënt.

Voor alle *gesloten* kanalen geldt de volgende formule:

$$\Delta P_k = \lambda * \frac{1}{2} * \rho * v^2 * \frac{L}{D_h}$$

Hierbij is λ de wandruwheids-weerstandsfactor van de luchtkanalen. Bij betonnen en steenachtige kanalen (ruwheid circa 1 mm) ligt deze waarde tussen 0,015 en 0,018.

Voor distributiekkanalen met *open* toevoerroosters en voor afzuigkanalen met *open* afzuigpunten geldt de volgende conservatieve, praktische formule op basis van de literatuur:

$$\Delta P_d = \frac{1}{3} * \lambda * \frac{1}{2} * \rho * v^2 * \frac{L}{D_h}$$

Het systeem moet in staat zijn de luchtdrukwisselingen door passerende voertuigen te compenseren:

- Voor de toevoerinstallatie wordt dit wordt gewoonlijk uitgevoerd door alle toevoerkanalen op minimum statische overdruk te zetten. Deze minimum overdruk wordt praktisch gesteld op $\Delta P_0 = 150$ Pa.
- Voor de afvoerinstallatie wordt dit meestal uitgevoerd door alle afvoerkanalen op minimum statische onderdruk te zetten. Deze minimum onderdruk wordt praktisch gesteld op $\Delta P_0 = 300 - 400$ Pa.

De totale, door de ventilator te leveren druk is:

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_i + \Delta P_k + \Delta P_d + \Delta P_o$$

Hierbij moeten nog de weerstanden in het ventilatiestation zelf worden opgeteld.

7 VENTILATORGELUID IN DE TUNNELBUIS

7.1 Grenswaarden

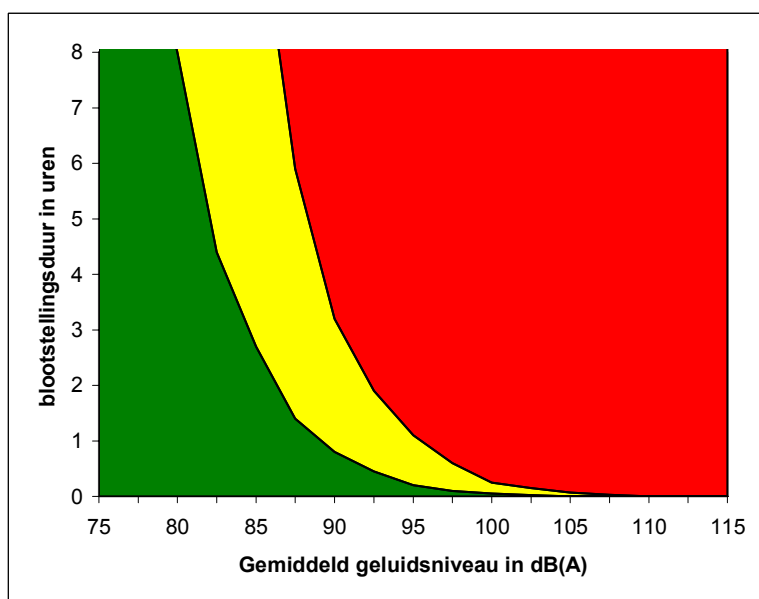
Het toelaatbare geluidsniveau in de tunnel is in de volgende situaties van belang:

- Het verkeer is tot stilstand gekomen door een incident en weggebruikers moeten te voet de tunnel verlaten. In die situatie moet gehoorschade bij de weggebruikers worden voorkomen. Daarnaast moeten boodschappen via een eventueel luidsprekersysteem altijd verstaanbaar zijn, en moet ook communicatie tussen weggebruikers onderling mogelijk zijn.
Het geluidsniveau wordt bepaald door draaiende voertuigmotoren en aanjaagventilatoren in de tunnel.
- 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 moet gehoorschade van weggebruikers en hulpverleners worden voorkomen.
Het geluidsniveau in de tunnel wordt vooral bepaald door werkende aanjaagventilatoren en mogelijk door motoren van hulpverleningsvoertuigen.
- Een voertuig komt door pech tot stilstand in de tunnel. De bestuurder stapt uit, loopt naar een intercom-post en probeert 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.
Het geluidsniveau in de tunnel wordt bepaald door rijdend verkeer en mogelijk door in bedrijf zijnde aanjaagventilatoren.
- Er vindt onderhoud plaats in een voor het verkeer afgesloten tunnelbuis. In deze situatie moet gehoorschade bij het onderhoudspersoneel worden voorkomen. Het geluidsniveau wordt vooral bepaald door voertuigmotoren en door ingeschakelde aanjaagventilatoren.

Op basis van de beschreven situaties kan worden geconcludeerd dat de geluidsdruk door aanjaagventilatoren vooral van belang is in situaties met stilstaande voertuigen, al dan niet met draaiende motor. In de derde situatie, met een door pech gestrande weggebruiker, is het niet mogelijk door beperking van het geluid van het ventilatiesysteem het geluidsniveau in de tunnel te beperken.

Geluidsdruk en gehoorschade

De grafiek in Figuur 7-1 geeft aan bij welke blootstellingsduur een bepaald geluidsdrukniveau kan worden toegelaten. In het linker gebied (groen) treedt geen gehoorschade op, in het middelste gebied (geel) treedt beperkte gehoorschade op en in het rechter gebied (rood) zelfs aanzienlijke gehoorschade. Er *moet* worden gestreefd naar situaties die in het groene gebied liggen. Het rode gebied is ontoelaatbaar voor openbare ruimten waarin mensen zonder gehoorbescherming verblijven.



Figuur 7-1: Kans op blijvende gehoorschade

Volgens de Wet Geluidshinder mag het equivalente geluidsdruk niveau – het gemiddelde geluidsdruk niveau – niet meer zijn dan 80 dB(A). Boven 85 dB(A) is gehoorbescherming verplicht, en boven 90 dB(A) moet de bron worden aangepakt.

De verblijftijd van hulpverleners tijdens een incident in de tunnel is meestal niet langer dan 1 uur. Volgens de Wet Geluidshinder is bij een equivalent geluidsdruk niveau $L_{eq} = 80$ dB(A) en de aanname dat de rest van de dag het geluidsdruk niveau voor een persoon minder dan 80 dB(A) is, het maximaal toegestane geluidsdruk niveau in dat uur 89 - 90 dB(A).

Geluidsdruk en spraakverstaanbaarheid

Voor luidsprekerinstallaties wordt, bij geheel uitgestuurde volumeregeling, op de luisterpositie 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. Eén 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 spraakverstaanbaarheid van luidsprekerinstallaties is afhankelijk van een bepaalde signaal/ruis-verhouding. Uit berekeningen blijkt dat het geluidsdruk niveau van de ruis, veroorzaakt door aanjaagventilatoren en verkeer, bij voorkeur lager is dan 90 dB(A). Bij die geluidsdruk is onderlinge spraak tussen personen op een afstand van 0,5 meter ook nog mogelijk.

Geproduceerde geluidsdruk

Rijdend verkeer leidt meestal tot een geluidsdruk variërend tussen 90 en 100 dB(A). Stationair draaiende motoren van vrachtwagens veroorzaken in een tunnel op circa 10 m afstand al een geluidsdruk variërend tussen 80 en 90 dB(A). Stationair draaiende motoren van personenauto's veroorzaken een veel lagere geluidsdruk.

Ter illustratie is in Tabel 7-1 de totale resulterende geluidsdruk bij verschillende combinaties van het geluid door aanjaagventilatoren en verkeersgeluid gegeven.

Geluidsdruk door verkeer	Geluidsdruk door aanjaagventilatoren	Totale geluidsdruk
80 dB(A)	87 dB(A)	87 dB(A)
85 dB(A)	87 dB(A)	89 dB(A)
90 dB(A)	87 dB(A)	92 dB(A)
80 dB(A)	90 dB(A)	90 dB(A)
85 dB(A)	90 dB(A)	91 dB(A)
90 dB(A)	90 dB(A)	93 dB(A)
87 dB(A)	87 dB(A)	90 dB(A)

Tabel 7-1: Totale geluidsdruk als gevolg van de combinatie van aanjaagventilatoren en verkeer

Uit Tabel 7-1 kan worden afgeleid dat de gemiddelde geluidsdrumniveau ten gevolge van een ventilatiesysteem in een tunnel niet hoger moet zijn dan 87 dB(A). Dit zou plaatselijk een probleem kunnen opleveren, bijvoorbeeld door clustering van ventilatoren. De kans dat iemand langdurig op zulke plaatsen verblijft is klein, zodat overwogen kan worden daar hogere geluidsniveaus toe te laten. Een grens van 90 dB(A) lijkt daarbij realistisch.

Aanbevelingen

Samenvattend zijn de volgende eisen geformuleerd voor de geluidsdruk die door een ventilatiesysteem in de tunnel wordt veroorzaakt:

- In het algemeen geldt een geluidsdrumniveau dat niet hoger is dan 87 dB(A).
- Plaatselijk is een maximaal geluidsdruk niveau van 90 dB(A) toegestaan.

Opmerking: Deze geluidsdrumniveaus zijn samengesteld uit een weging van de geluidsdruk in de frequentiebanden. Er is hier gebruik gemaakt van de A-weging hoewel de niveaus aanleiding geven tot een B- of zelfs C-weging. De A-weging, waarmee de eenheid dB(A) ontstaat, is echter veel meer bekend en in gebruik dan de andere wegingen.

7.2 Berekening

Het geluidsdrumniveau L_p in een ruimte neemt af als de afstand tussen waarnemer en bron groter wordt. Boven een bepaalde afstand neemt het niveau nauwelijks meer af en blijft het geluidsniveau vrijwel constant.

Dit wordt goed beschreven door het waargenomen geluid te beschouwen als een combinatie van:

- het geluidsveld door direct geluid;
- een diffuus galmveld veroorzaakt door reflecties tegen de wanden van de ruimte.

De mate waarin reflectie optreedt, is afhankelijk van het geluidsabsorberend vermogen van de ruimte. In een volledig 'harde' ruimte worden alle geluidsgolven gereflecteerd, in een volledig absorberende ruimte worden alle geluidsgolven geabsorbeerd ('dode' of stille ruimte). De totale absorptie in een ruimte wordt uitgedrukt in het equivalente absorberend oppervlak. Dit wordt ook wel 'm² open raam' genoemd, ofwel niet-reflecterend oppervlak.

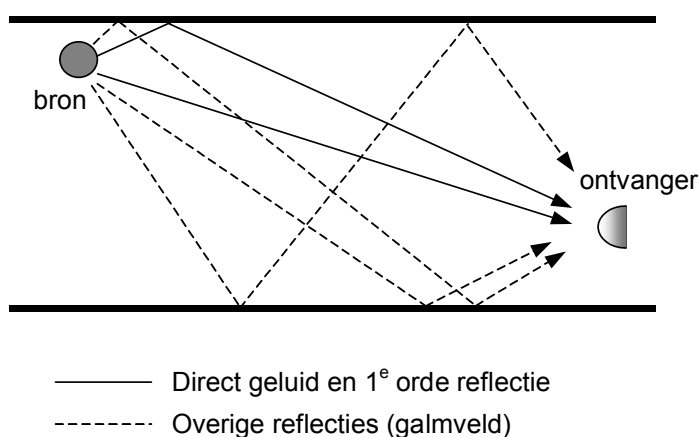
Meestal wordt voor het bepalen van de geluidsabsorptie in min of meer kubusvormige ruimten de zogenaamde wet van Sabine toegepast. Hiermee wordt het absorberend oppervlak bepaald op basis van de nagalmtijd. Door de langwerpige vorm van de tunnel leidt deze rekenmethode echter niet tot bevredigende resultaten.

Het hierna beschreven berekeningsmodel voorspelt het geluidsdruk niveau per frequentieband op een vrij te kiezen locatie in de tunnelbuizen, veroorzaakt door geluidsbronnen met een gegeven geluidsvermogen niveau.

Het geluid op de waarnemerpositie wordt bepaald aan de hand van:

- het geluidsveld door direct geluid met eerste-orde reflecties;
- het galmveld van de hogere-orde reflecties.

Het totale geluidsdruk niveau moet worden bepaald door de berekende geluidsdruk niveaus te combineren met behulp van de A-weging.



Figuur 7-2: Geluidsbron en ontvanger in een tunnel

Direct geluidsveld

Het directe geluid volgt uit de geluidsdrukgegevens van de bron, aangevuld met één enkelvoudige reflectie tegen het plafond en één enkelvoudige reflectie tegen een nabije zijwand via de spiegelbronmethode. Voor deze eerste-orde reflecties wordt aangenomen dat het geluid van de bron en het geluid van de spiegelbron in fase zijn.

De herhaalde reflecties (spiegelingen) van de verderaf gelegen zijwanden worden in het directe veld op energetische wijze meegenomen.

Bij een kleine afstand tussen de geluidsbron en de reflecterende vlakken is het onderscheid tussen in-fase reflectie en energetische reflectie hooguit van belang voor de octaafbanden van 250 Hz en lager. Dat frequentiegebied is echter nauwelijks relevant, noch voor het geluidsniveau in dB(A), noch voor de invloed op spraakverstaanbaarheid.

Het geluidsdruk niveau *per frequentieband* volgt uit onderstaande formules. De eerste formule geeft de limietsituatie weer voor grotere afstanden tussen bron en waarnemer. Met de tweede formule kunnen zoveel spiegelingen i worden meegenomen als zinvol wordt gevonden.

$$L_p = L_w + \Delta L_w + DI - 10 \log(2d) - 10 \log(B) - 10 \log(H)$$

of

$$L_p = L_w + \Delta L_w + DI + 10 \log \left[\frac{1}{2\pi d} + \sum_{i=1}^n \frac{2 \cdot (1 - \alpha_w - \alpha_p)^i}{2\pi \cdot (d + iB + iH)^2} \right]$$

waarin:

$$\Delta L_w = 10 \log \left(1 + r_p + r_w \right) \left[1 + r_p \frac{\sin(2k_0 x)}{2k_0 x} + r_w \frac{\sin(2k_0 y)}{2k_0 y} + \sqrt{r_p r_w} \frac{\sin(2k_0 \sqrt{x^2 + y^2})}{2k_0 \sqrt{x^2 + y^2}} \right]$$

waarbij:

- B = breedte van de tunnel [m]
- H = hoogte van de tunnel [m]
- d = afstand van waarneempunt tot geluidsbron [m]
- L_p = geluidsdruk niveau op afstand d van de geluidsbron [dB]
- L_w = geluidsvermogen niveau van de geluidbron [dB]
- ΔL_w = geluidsvermogen toename door enkelvoudige reflecties tegen plafond en/of zijwand, berekend uit afstand en absorptie [dB]
- DI = directiviteit van de geluidsbron, die de afwijking van de zuiver bolvormige geluidsuitbreiding beschrijft [dB]
- x = afstand centrum van de geluidsbron tot het plafond [m]
- y = afstand centrum van de geluidsbron tot de dichtstbijzijnde zijwand [m]
- α_p = absorptiecoëfficiënt plafond (r_p = 1 - α_p)
- α_w = absorptiecoëfficiënt zijwand (r_w = 1 - α_w)
- i = volgnummer van de gebruikte spiegeling
- n = het aantal gebruikte spiegelingen
- k₀ = golfgetal k₀ = 2πf/c₀ met f de octaafband-middenfrequentie en c₀ de geluidssnelheid 343 m/s

Opmerking: Voor frequenties groter dan 500 Hz kan de term tussen vierkante haken bij de bepaling van ΔL_w gelijk worden gesteld aan 1. Dit leidt slechts tot verwaarloosbare afwijkingen in de uitkomst.

De sterkte van de reflecties wordt bepaald door de absorptie van de reflecterende vlakken (plafond, wanden, vloer). Voor harde afwerkingen zoals beton, tegels en DAB (dicht asfaltbeton) is de absorptie zeer gering. Met geluidsabsorberende bekleding van wanden en/of plafond kan wel een aanzienlijke geluidsreductie worden bereikt. Voor poreuze wegdekken zoals ZOAB (zeer open asfaltbeton) kan dat in sommige frequentiebanden ook het geval zijn. Tabel 7-2 geeft absorptiewaarden die voor verschillende materialen die in tunnels worden gebruikt.

Octaafband (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
ZOAB	1	2	3	4	6	8	8	10
DAB	1	2	3	3	3	4	7	7
Vlak beton	1	1	1	2	2	3	3	3
Baksteen	1	2	3	3	4	5	5	5
Wandtegels	1	1	1	1	2	2	2	2
Brandwerende platen (direct op beton)	1	1	1	2	2	3	4	6
Brandwerend spuitwerk (direct op beton)	1	2	3	3	4	5	7	7

Tabel 7-2: Absorptiecoëfficiënten in % van materialen

Als op wanden of plafond meerdere soorten afwerkingen zijn gebruikt, mag voor de hele wand of het hele plafond een over de oppervlakken gewogen gemiddelde absorptiecoëfficiënt worden gebruikt.

Voor de directiviteit DI van langsventilatoren worden in Tabel 7-3 gegevens verstrekt gebaseerd op basis van metingen en literatuurgegevens. Voor de tussenliggende hoeken kan lineair worden geïnterpoleerd.

Oktaafband (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
DI - 0°	0	0	0	0	4	7	7	7
DI - 45°	0	0	0	0	0	0	0	0
DI - 90°	0	0	0	-1	-2	-5	-9	-12

Tabel 7-3: Directiviteit van langsventilatoren in dB

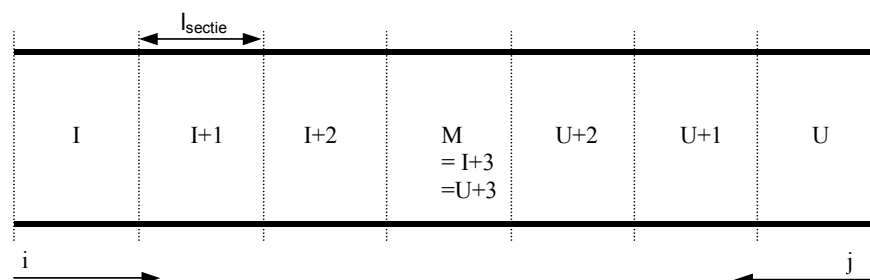
Bij meerdere geluidsbronnen in dezelfde doorsnede worden de bijdragen van die bronnen energetisch opgeteld.

In de formules is geen luchtdemping opgenomen. De reden hiervoor is dat op afstanden groter dan 50 m het galmveld overheerst en het directe geluidsveld nauwelijks invloed heeft. Bij dergelijke afstanden is de geluidsdemping in de lucht te verwaarlozen.

Het galmveld

Voor de bijdrage van het galmveld met hogere-orde reflecties wordt uitgegaan van het totale niveau van het geluidsvermogen per frequentieband, voor zover niet betrokken in de eerste-orde-reflecties. Hiervoor wordt een ééndimensionaal model gebruikt waarbij de tunnel denkbeeldig in een oneven aantal secties van gelijke lengte wordt verdeeld.

In figuur 7-3 is als voorbeeld een verdeling in 7 secties weergegeven.

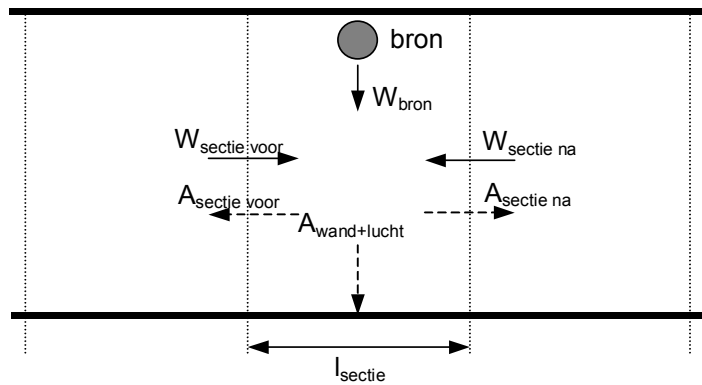


Figuur 7-3: Verdeling in een oneven aantal secties t.b.v. de bepaling van het galmveld

Voor elke sectie is een vermogensbalans opgesteld op basis van het geluidsvermogen dat:

- wordt toegevoerd
 - door een bron in die sectie en
 - vanuit de naburige secties
- en wordt afgevoerd
 - door de absorptie van geluidsvermogen door de wanden;
 - door de lucht in die sectie;
 - door de akoestische energiestromen door de open eindvlakken van de sectie.

De vermogensbalans van een sectie is weergegeven in Figuur 7-4.



Figuur 7-4: Vermogensbalans van een sectie

Het oplossen van het stelsel van vermogensbalansen voor alle secties resulteert in het gemiddelde geluidsdrukkniveau per frequentieband per sectie. Deze benadering van de werkelijkheid biedt de mogelijkheid de variatie van het geluidsveld in de lengte van de tunnel in de berekeningen te betrekken. Hiermee kan deze benadering worden beschouwd als een verbetering van de eenvoudige benadering van een diffuus veld in een ruimte.

Elke sectie i en j kent geluidsabsorptie GA_i aan de wanden en in de lucht volgens de formule:

$$GA_i = A_w \alpha_w + A_p \alpha_p + A_v \alpha_v + (4m) A_t l_{sectie}$$

De gemiddelde geluidsabsorptiecoëfficiënt van de sectie i is gelijk aan:

$$\bar{\alpha}_i = \frac{GA_i}{A_w + A_p + A_v}$$

Het geluidsvermogen dat in een sectie met geluidsbronnen wordt toegevoerd wordt gegeven door:

$$W_i = (1 - \bar{\alpha}_i) \cdot \sum_{k=1}^n 10^{L_{w,bron k} / 10}$$

In deze formules is:

- l_{sectie} = lengte van de sectie (voor alle secties gelijk !) [m]
- A_w = oppervlak zijwanden [m²]
- A_p = oppervlak plafond [m²]
- A_v = oppervlak vloer (wegdek) [m²]
- A_t = oppervlak tunneldoorsnede [m²]
- α_w = absorptiecoëfficiënt zijwanden
- α_p = absorptiecoëfficiënt plafond
- α_v = absorptiecoëfficiënt vloer (wegdek)
- $4m$ = luchtdempingscoëfficiënt
- k = geluidsbronnummer $k = 1 \dots n$
- $L_{W,bron}$ = geluidsvermogen van bron k [dB]

Met bovenstaande formules worden vanaf de ingang en vanaf de uitgang van de tunnel tussengrootheden berekend. Het betreft de effectieve absorptie A' en het effectieve toegevoerde geluidsvermogen W' per sectie i vanaf de ingang en per sectie j vanaf de uitgang.

Voor de secties $i=I$ en $j=U$:

$$GA'_i = 2A_i + GA_i \qquad GA'_j = 2A_j + GA_j$$

$$W'_i = W_i \qquad W'_j = W_j$$

Voor de secties $i = I+1$ t/m $M-1$ en $j = U+1$ tot $M-1$:

$$GA'_i = 2A_i + GA_i - \frac{A_i^2}{GA'_{i-1}} \qquad GA'_j = 2A_j + GA_j - \frac{A_j^2}{GA'_{j-1}}$$

$$W'_i = W_i + \frac{A_i W'_{i-1}}{GA'_i} \qquad W'_j = W_j + \frac{A_j W'_{j-1}}{GA'_j}$$

Voor de sectie $i = j = M$:

$$GA'_M = 2A_M + GA_M - \frac{A_M^2}{GA'_{M-1}} - \frac{A_M^2}{GA'_{M-1}}$$

$$W'_M = W_M + \frac{A_M W'_{M-1}}{GA'_{M-1}} + \frac{A_M W'_{M-1}}{GA'_{M-1}}$$

Per sectie i en j volgt hieruit de gemiddelde geluidsdruk L_p via:

$$I_i = \frac{W'_i}{GA'_i} + I_{i+1} \frac{A_i}{GA'_i} \qquad I_j = \frac{W'_j}{GA'_j} + I_{j+1} \frac{A_j}{GA'_j} \qquad I_M = \frac{W'_M}{GA'_M}$$

$$L_{p,i} = 10 \log(4I_i) \qquad L_{p,j} = 10 \log(4I_j) \qquad L_{p,M} = 10 \log(4I_M)$$

Luchtdemping levert bij lange tunnels en hogere frequenties een belangrijke bijdrage aan de absorptie. De luchtabSORPTIE wordt bepaald door de temperatuur en luchtvochtigheid. Tabel 7-4 geeft waarden voor de luchtdemping per kilometer lengte.

Oktaafband (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
0°C / RV 50%	0,2	0,4	0,8	1,9	5,2	14,6	47	111
0°C / RV 90%	0,1	0,3	0,7	1,3	2,9	7,4	26	88
10°C / RV 50%	0,1	0,5	1,0	1,7	3,4	8,1	28	98
10°C / RV 90%	0,1	0,3	0,9	1,8	2,9	5,4	16	55
20°C / RV 50%	0,1	0,4	1,2	2,5	4,0	6,8	18	62
20°C / RV 90%	0,1	0,2	0,9	2,5	4,4	6,9	14	38

Tabel 7-4: Luchtdempingsfactor '4m' [dB/km] in octaafbanden

8 CONTROLEMETINGEN

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de metingen die noodzakelijk zijn om te kunnen vaststellen of een tunnel voldoet aan de gestelde eisen. In principe moeten metingen worden verricht zoals beschreven in de normen die hiervoor gelden (zie bijlage A). Dit hoofdstuk is geen herhaling van deze normen maar geeft aanwijzingen over de toepassing ervan en bevat specifieke aanwijzingen voor tunnels.

8.1 Aërodynamische metingen

8.1.1 Ventilatoren

Het verdient aanbeveling van elk toegepast type ventilator minstens één exemplaar aërodynamisch te testen. Eventueel kan genoeg worden genomen met een testcertificaat van de leverancier.

Testrapport

In een testrapport moeten in ieder geval de volgende gegevens worden vermeld:

- Het debiet in de bedrijfsrichting(en) en de daarbij behorende druk
- Het uit het net opgenomen elektrisch vermogen
- De nominale stroom
- De aanloopstroom
- De aanlooptijd
- De dichtheid, temperatuur en relatieve luchtvochtigheid van de lucht tijdens de meting
- Het vermogensrendement
- Bij aanjaagventilatoren moet ook worden vermeld:
 - De gemiddelde luchtsnelheid in de uitblaasopening in de bedrijfsrichting(en)
 - De stuwkracht in de bedrijfsrichting(en)
 - Het stuwkrachtrendement
 - Het stuwkracht/vermogen-rendement

Als een aanjaagventilator is voorzien van afbuigschoepen, moeten deze gegevens zowel zonder als met afbuigschoepen zijn vermeld.

Het debiet

Het debiet moet worden gemeten onder de te verwachten bedrijfscondities, dus bij het verwachte bereik van drukwaarden die in praktijk optreden. Meestal is voor deze meting een testkamer noodzakelijk, waarmee de nodige over- of onderdruk op de ventilator kan worden gecreëerd.

Meting van het debiet met behulp van drukopnemers in of nabij de inlaat- en uitblaasopening van een ventilator levert meestal onnauwkeurige meetresultaten op. Dit wordt onder andere veroorzaakt door turbulentie. Het aansluiten van de ventilator op een meetkamer conform NEN-ISO 13350 artikel 10.2 is een nauwkeuriger methode.

Gemiddelde luchtsnelheid

De gemiddelde luchtsnelheid is voor straalventilatoren van belang omdat de aandrijvende kracht op de luchtstroming in de tunnel mede afhangt van het snelheidsverschil tussen luchtstroming en stroming uit de ventilator.

Directe meting van de gemiddelde luchtsnelheid in de uitblaasopening leidt vrijwel altijd tot een onacceptabele onnauwkeurigheid door turbulentie en een ongelijk uitblaaspatroon. De gemiddelde luchtsnelheid in de uitblaasopening moet worden bepaald door het gemeten luchtdebiet te delen door het oppervlak van de uitblaasopening.

De stuwkracht

Er zijn verschillende methoden om de stuwkracht van een straalventilator te meten. Aanbevolen wordt de stuwkracht te meten met behulp van een slede waarin een druk- of trekkrachtopnemer is geplaatst met een zeer kleine slag, bijvoorbeeld een piëzo-opnemer. Deze meting komt overeen met NEN-ISO 13350 artikel 7.3 of 7.4.

Bij stuwkrachtmetingen aan straalventilatoren mag de wijze waarop het uitgeblazen debiet vrijkomt de meting niet beïnvloeden. Bij een meting in een ruimte moet bijvoorbeeld voldoende afstand tot wanden worden gehouden. Meestal moet vanaf de uitblaasmond een afstand worden vrijgehouden van minstens 7 tot 8 maal de hydraulische diameter van de uitblaasopening. Ook mogen er geen voorwerpen direct in het uitblaasdebiet zijn geplaatst.

Wanneer afbuigschoepen worden toegepast moet de stuwkracht worden gemeten in de richting van de afgebogen luchtstroom. Ter bepaling van het stuwkrachtverlies van de afbuigschoepen verdient het echter aanbeveling de stuwkracht ook zonder afbuigschoepen te meten.

Uit het net opgenomen elektrisch vermogen en stroom

Het opgenomen vermogen kan rechtstreeks worden gemeten maar ook worden berekend uit de gemeten opgenomen stroom bij de gemeten voedingsspanning.

Rendementen

Uit de meetgegevens kan het stuwkrachtrendement worden berekend en beoordeeld.

8.1.2 Ventilatiesysteem - Algemeen

Een ventilatiesysteem moet, nadat het is geïnstalleerd, worden gecontroleerd op goede werking en op het voldoen aan de gestelde eisen. Niet alleen zal de apparatuur zelf op goede werking moeten worden gecontroleerd, ook moet worden aangetoond dat het systeem als geheel de vereiste capaciteit levert. Deze paragraaf gaat in op het in de praktijk testen van een ventilatiesysteem als geheel.

De gekozen meetomstandigheden zullen nooit geheel conform de ontwerpcondities kunnen worden uitgevoerd. Het is immers vaak niet mogelijk – en ook niet toelaatbaar – om een zeer grote brand te creëren tijdens een test. De meetomstandigheden moeten dus zo worden ingericht dat de resultaten kunnen worden vergeleken met berekeningsresultaten onder gelijke condities. Op grond van deze vergelijking moeten conclusies kunnen worden getrokken over de werking van het systeem onder de ontwerpcondities. Metingen moeten daarom plaatsvinden onder goed gedefinieerde omstandigheden.

Bij metingen moet erop worden gelet dat de omstandigheden de meetresultaten niet ongecontroleerd kunnen beïnvloeden. Bijvoorbeeld de volgende factoren kunnen van invloed zijn op de nauwkeurigheid van de meetresultaten:

- Meteorologische invloeden (wind, buig weer, extreme koude of warmte):
Metingen moeten plaatsvinden bij gunstige weersomstandigheden. Er mogen dus geen grote wisselingen in windklimaat optreden gedurende de metingen.
- Eventuele obstakels in de luchtstroom:
De metingen moeten zo worden uitgevoerd dat met redelijke nauwkeurigheid kan worden vastgesteld dat het systeem aan de gestelde eisen voldoet. Zo nodig moeten de verwachte stromingsweerstand worden gesimuleerd.
- De gebruikte meetapparatuur
- De gebruikte meetmethode

8.1.3 Ventilatiesysteem - Langsventilatie

Bij langsventilatie is vooral de opgewekte luchtsnelheid in de tunnel van belang. Er moet voldoende snelheid worden opgewekt om bij brand backlayering te voorkomen. In de normale situatie moet het systeem voldoende verse lucht toevoeren om concentraties beneden een toelaatbaar niveau te houden. Om dit te controleren moeten de onderstaande metingen worden verricht.

Aërodynamische eigenschappen van de tunnel

Door in een lege tunnelbuis na te gaan hoeveel tijd er verstrijkt tussen het in één keer uitzetten van alle ventilatoren en het bereiken van een stationaire situatie, kunnen de aërodynamische eigenschappen van de tunnel worden vastgesteld. De gevonden gegevens, zoals het totaal van in- en uitstroomweerstand, de wandwrijving en eventuele overige weerstanden door tunnelinstallaties, kunnen worden gebruikt in controleberekeningen.

Metten van luchtsnelheid

De snelheid van de luchtstroming moet worden gemeten. Bij een omkeerbaar langsventilatiesysteem moet dit in beide werkingsrichtingen worden gedaan. Hierbij moet aan verschillende aspecten aandacht worden besteed:

- Als de ventilatoren in meerdere clusters zijn ondergebracht, moet niet alleen worden gemeten als alle ventilatoren zijn ingeschakeld, maar moeten ook metingen worden verricht per ingeschakeld cluster. Hiermee wordt onder andere informatie verkregen over de werking van het systeem als één of meer clusters uitvallen bij brand.
- Behalve de opgewekte luchtsnelheid in de stationaire situatie moet ook worden nagegaan wat de opstarttijd is waarbinnen de vereiste luchtstroming wordt bereikt.
- Er moet worden nagegaan of in de stationaire situatie op enige plaats in de tunnel terugstroming optreedt dan wel 'dode' gebieden aanwezig zijn. Daarbij moet worden opgemerkt dat er bij aanloop van het systeem altijd kans op terugstroming aanwezig is.

Bij berekeningen wordt uitgegaan van de gemiddelde luchtsnelheid over de dwarsdoorsnede van de tunnel. In werkelijkheid is er sprake van een snelheidsverdeling waarvan een gemiddelde kan worden bepaald. Voor een betrouwbare bepaling van de gemiddelde snelheid moet dus via een meetraster op meerdere plaatsen in de dwarsdoorsnede worden gemeten.

Er moet ook worden gecontroleerd of de kernstraal van de ventilatoren in het gebied met hoge luchtsnelheid raakt aan plafond, wanden of installatiedelen. Zo nodig moet de uitblaasrichting worden gewijzigd, bijvoorbeeld door middel van afbuig schoepen.

Metten van temperatuur en barometrische druk

De stuwkracht van het ventilatiesysteem is lineair afhankelijk van de dichtheid van de lucht. De dichtheid is weer afhankelijk van temperatuur, barometrische druk en luchtvochtigheid. De veel gebruikte standaardwaarde $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ geldt alleen bij standaardcondities (16°C, 100.000 Pa en RV = 65%). Voor niet al te vochtige lucht en temperaturen lager dan 23°C kan de volgende benaderingsformule voor ρ worden gebruikt, waarin alleen temperatuur en barometrische druk voorkomen:

$$\rho = \frac{3,468 p}{1000 (273 + T)}$$

waarbij:

- p = de absolute (barometrische) druk in Pa
T = de temperatuur in graden Celsius

Bij de meest voorkomende weersomstandigheden kan ρ variëren tussen 1,15 en 1,22. Deze variatie kan afwijkingen tot 4% op de totale stuwkracht tot gevolg hebben. In principe is het dus zinvol om tijdens proeven temperatuur en druk te meten en vervolgens de juiste dichtheid in berekeningen te verwerken. Een eventuele onnauwkeurigheid veroorzaakt door een afwijkende luchtdichtheid valt echter vrijwel in het niet bij de onnauwkeurigheden veroorzaakt door de luchtsnelheidsmetingen. Het meten van temperatuur en barometrische druk tijdens proeven is daarom niet persé noodzakelijk, maar kan een nuttige toevoeging zijn.

Meten van drukverschil over een tunnelsectie

In het verleden is meermalen geprobeerd te meten wat het drukverschil is over een bepaalde tunnallengte of over het ingangs- of uitgangsportaal. Deze metingen zijn vrijwel allemaal mislukt of worden als zeer onbetrouwbaar beschouwd. Een belangrijke reden hiervoor is dat de onnauwkeurigheid van de meetapparatuur in dezelfde orde van grootte ligt als de gemeten drukverschillen. Andere oorzaken zijn onvoldoende compensatie voor temperatuurschommelingen en gebruik van onnauwkeurige apparatuur voor referentiedrukken.

Het uitvoeren van drukverschilmetingen wordt daarom afgeraden tenzij er dringende redenen bestaan. Als drukverschilmetingen worden uitgevoerd moet de grootste zorgvuldigheid bij de meetopstelling worden betracht om voldoende meetnauwkeurigheid te verkrijgen.

Meetomstandigheden: lege tunnelbuis

Metingen moeten worden uitgevoerd in een geheel lege tunnelbuis. De aanwezigheid van obstakels, zoals voertuigen of bouw materiaal, geeft aanleiding tot onvoorspelbare weerstanden waardoor geen betrouwbare metingen kunnen worden verricht.

Meetomstandigheden: windinvloed

Vooraf bij kortere tunnels heeft wind veel invloed op de luchtstroming. Krachtige wind kan in een tunnel luchtsnelheden opwekken van 3 – 5 m/s. In een lege tunnel en zonder windinvloed kan een langsventilatiesysteem een luchtsnelheid van 5 – 8 m/s opwekken. Bij sterke wind is het daarom niet mogelijk met voldoende nauwkeurigheid de invloed van het ventilatiesysteem te meten. Daarom mag tijdens metingen de luchtsnelheid in de tunnelbuis als gevolg van de wind niet groter zijn dan 1 m/s. In de praktijk betekent dat meestal dat de windsnelheid buiten de tunnel niet hoger mag zijn dan 3 m/s.

De windinvloed moet bij de metingen worden gemeten om via corrigerende berekeningen de werking van het ventilatiesysteem te kunnen bepalen. De meting van de windinvloed kan op verschillende manieren worden uitgevoerd:

- Een snelheidsmeting met uitgeschakelde ventilatie zowel voor als na de snelheidsmetingen met ingeschakelde ventilatie.
- Een snelheidsmeting in een parallelle tunnelbuis waarin geen mechanische ventilatie is ingeschakeld.

Over de nauwkeurigheid van beide methoden kan het volgende worden opgemerkt:

- Een rastermeting is niet praktisch voor het meten van de windinvloed omdat dat veel tijd vergt. Het is praktischer om eerst een rastermeting uit te voeren en vervolgens 1 tot 3 plaatsen in de dwarsdoorsnede aan te wijzen die representatief zijn voor de totale dwarsdoorsnede.
- Bij een snelheidsmeting voor en na de metingen met ingeschakelde ventilatie moet worden bedacht dat het uitvoeren van een rastermeting in een dwarsdoorsnede al gauw 15 – 30 minuten vergt. Bij onstuimig weer kan in die periode de windinvloed aanzienlijk variëren. Voor betrouwbare metingen zijn daarom weersomstandigheden met lage windsnelheden wenselijk.
- Een snelheidsmeting in een parallelle buis lijkt aantrekkelijk omdat tijdens een rastermeting de windinvloed continu wordt gemeten. Echter, de windinvloed op beide buizen

hoeft niet gelijk te zijn. En het is ook mogelijk dat mechanische ventilatie in een tunnelbuis van invloed is op de luchtstroming in een naastgelegen tunnelbuis.

Beide manieren van meting van de windinvloed lijken daarom even acceptabel te zijn, mits ze nauwkeurig worden uitgevoerd en eventuele meetfouten worden bepaald.

De luchtsnelheid in de tunnelbuis die alleen wordt veroorzaakt door het ventilatiesysteem, kan pas worden gevonden na correctie voor de windinvloed. Dit kan worden gedaan door de windinvloed Δp_{wind} te berekenen op basis van de luchtsnelheid in de tunnel, louter veroorzaakt door de wind (zie 6.4.4). Dan is de luchtsnelheid u_t zonder windinvloed te berekenen met de formule:

$$\Delta p_{fans} = \left(\zeta_{in} + \zeta_{uit} + f_{wand} \frac{L}{D_h} \right) \cdot \frac{1}{2} \rho u_{t, gemeten}^2 + \Delta p_{wind}$$

Een eenvoudiger correctie is echter te vinden met:

$$u_{t, corr} = \sqrt{(u_{t, ventilatie}^2 - u_{t, wind}^2)} \quad \text{bij wind mee}$$

$$u_{t, corr} = \sqrt{(u_{t, ventilatie}^2 + u_{t, wind}^2)} \quad \text{bij wind tegen}$$

waarbij:

$u_{t, corr}$ = gecorrigeerde luchtsnelheid bij ingeschakelde ventilatie [m/s]

$u_{t, ventilatie}$ = gemeten luchtsnelheid bij ingeschakelde ventilatie [m/s]

$u_{t, wind}$ = gemeten luchtsnelheid bij uitgeschakelde ventilatie [m/s]

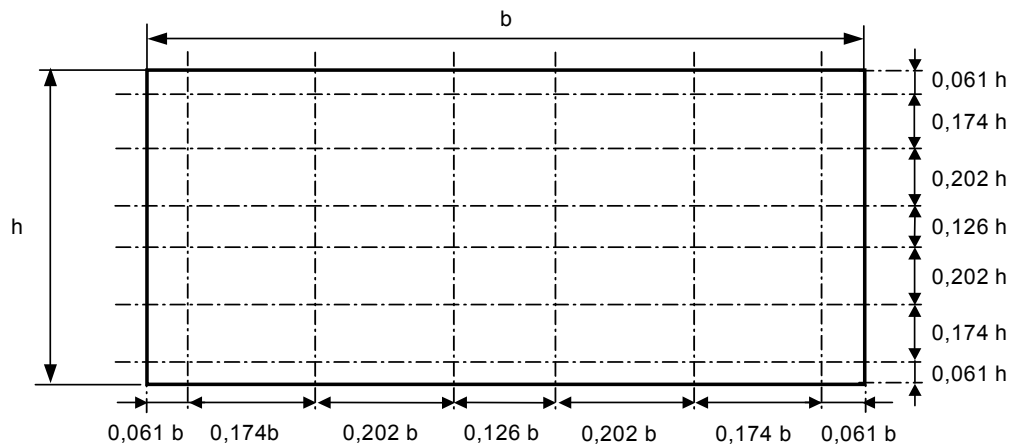
Meetrasters

Snelheidsmetingen in de doorsnede van een tunnelbuis moeten worden uitgevoerd volgens een meetraster. Daarbij zijn meetrasters met een lineaire verdeling van de meetpunten over de dwarsdoorsnede onvoldoende nauwkeurig. Het is veel beter om een logaritmischn-lineaire verdeling aan te brengen, zoals gedefinieerd in bijvoorbeeld ISO 5801:1997 of British Standard 848-1:1997. Zulke meetrasters geven een grotere nauwkeurigheid, vooral bij een grote variatie in snelheden over de doorsnede.

Het basisprincipe is als volgt. In een rechthoekige doorsnede wordt zowel in horizontale als in verticale richting een vaste verdeling van meetpunten gekozen die alleen afhankelijk is van het aantal meetpunten. Het aantal meetpunten op een lijn in horizontale richting mag afwijken van het aantal meetpunten op een lijn in verticale richting, maar moet wel voor alle horizontale respectievelijk verticale lijnen gelijk zijn. Bovendien geldt een minimum van 5 meetpunten op een lijn.

Bij de deze verdeling is de gemiddelde snelheid gelijk aan het rekenkundig gemiddelde van de snelheden in alle punten van het raster.

Een voorbeeld van een logaritmischn-lineair meetraster met 36 meetpunten is gegeven in Figuur 8-1.



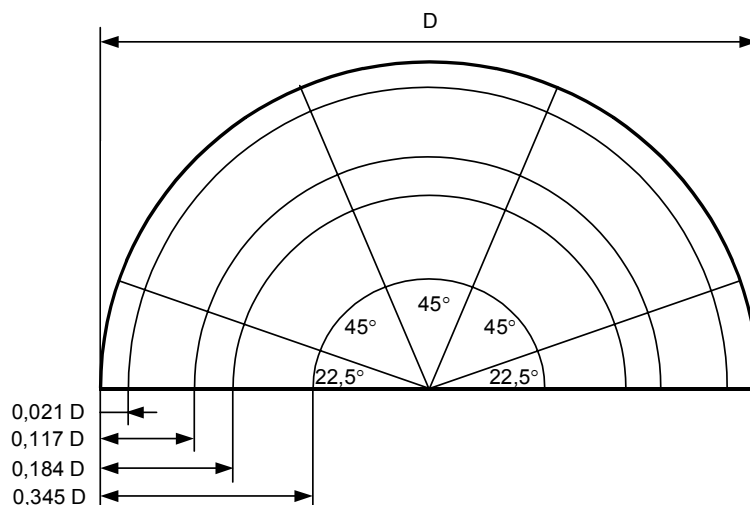
Figuur 8-1: Logaritmisch-lineair meetraster met 6 x 6 meetpunten in een rechthoekige doorsnede

Voor een rechthoekige doorsnede is de optimale verdeling, afhankelijk van het aantal meetpunten per lijn, weergegeven in Tabel 8-1.

Aantal meetpunten langs lijn met lengte h of b	Afstand tot wand	Onderlinge afstanden van meetpunten (x/b of x/h)						Afstand tot wand
5	0,074	0,214	0,212	0,212	0,214		0,074	
6	0,061	0,174	0,202	0,126	0,202	0,174	0,061	
7	0,053	0,15	0,163	0,134	0,134	0,163	0,15	

Tabel 8-1: Verdeling meetpunten voor rechthoekige doorsnede

In boortunnels is de dwarsdoorsnede minstens voor een deel cirkelvormig. De dwarsdoorsnede kan ofwel als een (deel van een) cirkel worden beschouwd ofwel als halfrond en daaronder een rechthoekige vorm. Een voorbeeld van een logaritmisch-lineair meetraster met 16 meetpunten in een halfronde doorsnede is gegeven in Figuur 8-2. Het aantal meetpunten op een lijn moet minstens 3 bedragen.



Figuur 8-2: Logaritmisch-lineair meetraster met 4 x 4 meetpunten in een halfronde doorsnede

Voor een (half-)ronde doorsnede is de optimale verdeling, afhankelijk van het aantal meetpunten per lijn, weergegeven in Tabel 8-2.

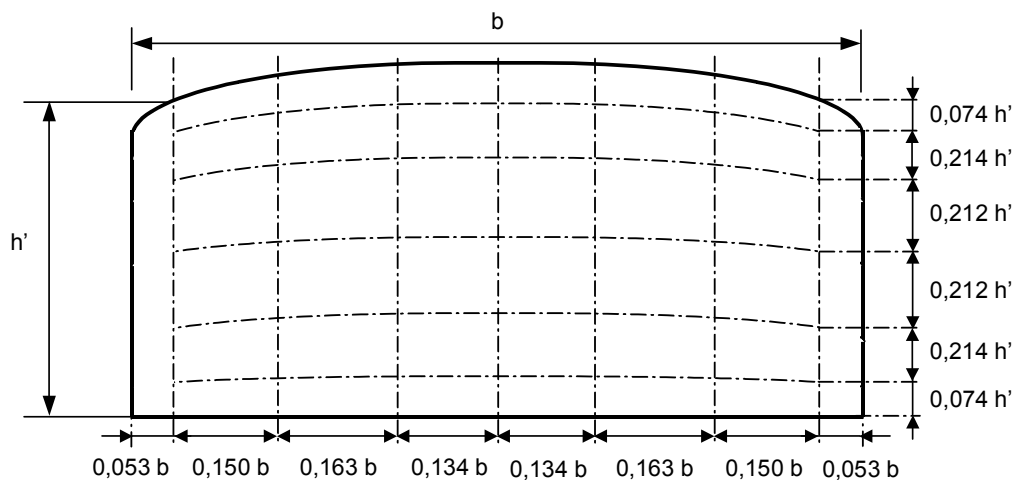
aantal meetpunten op een radiaal	afstand tot buitenwand (x/D)				
3	0,032	0,135	0,321		
4	0,021	0,117	0,184	0,345	
5	0,019	0,077	0,153	0,217	0,361

Tabel 8-2: Verdeling meetpunten voor (half)ronde doorsnede

Voor bovenstaande verdelingen geldt:

- Bij een lage, brede doorsnede, zoals in een tunnel, ligt het voor de hand meer meetpunten langs de horizontale lijnen te kiezen dan langs de verticale lijnen.
- In een tunnel mogen de meetpunten in verticale richting niet meer dan 1 m uit elkaar liggen, en in horizontale richting niet meer dan 2,5 m.
- Bij een halfronde doorsnede mogen de meetpunten langs een radiaal niet meer dan 1,6 m uit elkaar liggen.

In werkelijkheid is een rechthoekige tunneldoorsnede vaak niet precies rechthoekig. De dwarsdoorsnede van rechthoekige tunnels is soms vanwege constructieve redenen aan de bovenzijde afgeschuind of varieert om andere redenen. In dat geval zou kunnen worden gehandeld door gebruik te maken van het principe dat is aangegeven in figuur 8-3.



Figuur 8-3: 'Rechthoekige' doorsnede met variabele hoogte

Bij elke positie van een verticale meetlijn zijn de meetpunten steeds volgens dezelfde verhouding verdeeld over de hoogte ter plaatse. De gemiddelde luchtsnelheid over het meetraster wordt dan gevonden door:

1. Per verticale lijn de gemiddelde snelheid te bepalen ($u_{t,h1}$, $u_{t,h2}$, enzovoort).
2. Vervolgens het gewogen gemiddelde van deze gemiddelde snelheden te bepalen met

$$u_t = \frac{u_1 \cdot h_1 + u_2 \cdot h_2 + \dots}{h_1 + h_2 + \dots}$$

Wanneer meetopnemers boven elkaar op een vaste standaard zijn bevestigd is dit echter geen handige methode. In dat geval zou ervoor gekozen kunnen worden enkele van de bovenste punten weg te laten in de meting. Een andere mogelijkheid is om de afstand van het bovenste meetpunt tot aan het tunnelplafond maximaal 50% groter te kiezen dan in de tabel is aangegeven. De daaruit voortvloeiende meetfouten zijn aanvaardbaar.

Het meetinterval per meetpunt moet minstens 60 seconden bedragen. Er wordt echter aanbevolen om een meetinterval van enkele minuten aan te houden, vooral bij variaties als gevolg van wind of turbulenties.

Daarnaast wordt aanbevolen meerdere meetpunten tegelijk te meten om te voorkomen dat de totale meettijd over het raster te groot wordt. Hierdoor zouden in de meetperiode veranderingen in de stationaire toestand kunnen optreden. Het is bijvoorbeeld mogelijk alle boven elkaar gelegen meetpunten tegelijk te meten door meerdere luchtsnelheidsmeters aan een verticale (stabiel op te stellen) standaard te bevestigen. Eventuele beïnvloeding van de luchtstroom door de standaard mag geen invloed hebben op de luchtsnelheidsmetingen.

Beïnvloeding van de metingen door de aanwezigheid van bedienend personeel en registratieapparatuur kan worden voorkomen door minstens 1 m stroomafwaarts van de meetopnemers te blijven.

Bovenstaande heeft betrekking op het meten van de gemiddelde snelheid in een tunnelbuis ter bepaling van de ventilatiecapaciteit. Wanneer een snelheidsverdeling in de nabijheid van een ventilator of groep van ventilatoren wordt gemeten, is toepassing van bovenstaande meetrasters niet nodig. Het gaat dan vaak om een ongelijkmatige snelheidsverdeling waarbij, vooral dichtbij de ventilator, een fijnmaziger raster noodzakelijk is. Hiervoor voldoen rasters met lineair verdeelde meetpunten.

Plaats van meetrasters

De plaats van de meetrasters moet zorgvuldig worden gekozen. Posities waar grootschalige wervelingen voorkomen moeten hierbij worden vermeden. Bij een langsstroming zal de luchtstroming nabij de tunnelingang meestal nog niet gelijkmatig zijn en wervelingen vertonen. Na een lengte die overeenkomt met 7 – 8 hydraulische diameters zal de stroming zich stabiliseren.

Uit ervaring blijkt dat de beste resultaten van snelheidsmetingen worden verkregen op minimaal 100 m en bij voorkeur op 200 m na de tunnelingang, een ventilator of groep van ventilatoren.

Om te meten hoe de kernstralen van aanjaagventilatoren zich mengen met de luchtstroming in de tunnel wordt aanbevolen de volgende metingen te verrichten:

- ter hoogte van het midden van de aanjaagventilator;
- minimaal een meting op 25 m voor de inlaatopening;
- minimaal een meting op 5, 25 en 50 m na de uitblaasopening.

8.1.4 Ventilatiesysteem - Dwarsventilatie

Bij dwarsventilatie is van belang of voldoende capaciteit wordt toe- en/of afgevoerd. De capaciteit wordt meestal gemeten door snelheden te meten in kanalen of bij roosters en deze resultaten te vermenigvuldigen met de dwarsdoorsnede. Soms zijn ook drukverschilmetingen noodzakelijk.

Daarnaast is het belangrijk het volgende te controleren:

- Er moet worden nagegaan of de vereiste debieten onder alle gedefinieerde omstandigheden worden gehaald.

-
- Met name bij een debietregeling moet elke instelling met een voorgedefinieerde stand worden beproefd.
 - Als mechanisch te openen of te sluiten roosters zijn toegepast, moet de complete schakeling van het systeem worden beproefd.

8.1.5 Ventilatiesysteem - Overdrukventilatie

Bij ventilatie van vluchtwegen is het belangrijk om te controleren of voldoende druk wordt opgebouwd, zodat rook niet in de vluchtweg kan stromen (zie 4.6). Daarnaast mag de druk over een vluchtdeur niet zo groot zijn dat deze niet of alleen met grote moeite kan worden geopend. Ook mag de lichtsnelheid in de deuropening niet zo groot zijn dat vluchtenden worden gehinderd. Er moeten daarom zowel drukverschil- als snelheidsmetingen worden uitgevoerd.

Overdrukinstallaties worden meestal gebruikt in vluchtgangen en trappenhuizen. Hierbij moet worden vastgesteld of de vluchtruimte inderdaad rookvrij zal blijven als de overdrukinstallatie is ingeschakeld. Dit moet zowel bij gesloten als bij één of meer geopende deuren het geval zijn.

Bij tunnels met een vluchtgang tussen 2 tunnelbuizen kan het voorkomen dat tegelijk 3 vluchtdeuren zijn geopend. De overdrukinstallatie moet dan in staat zijn over elk van de geopende deuren voldoende drukverschil op te bouwen. Hierbij moet rekening worden gehouden met de invloed van de tunnelventilatie of van andere overdrukssystemen.

8.2 Metingen van geluid

8.2.1 Ventilatoren

Van ventilatoren moet in elke bedrijfsrichting het geluidsvermogen worden bepaald, bij voorkeur conform ISO 13350 artikel 8. De hierin beschreven methode gaat uit van een galmkamer, waardoor de meting direct toepasbaar is in de tunnelomgeving.

Het is ook mogelijk geluidsintensiteitsmetingen uit te voeren door middel van puntmetingen op een zekere afstand of metingen waarbij een denkbeeldig oppervlak rondom de ventilator wordt 'gescand'. Deze metingen vergen echter een omrekening naar het geluidsvermogen in een ruimte, waardoor gemakkelijker fouten kunnen ontstaan. Verder geldt bij puntmetingen het volgende:

- Puntmetingen moeten op veel posities worden uitgevoerd voor een voldoende betrouwbaar resultaat. Een enkele puntmeting op bijvoorbeeld 1 m afstand van de uitblaasopening geeft hooguit een indruk van het geluidsvermogen, maar kan nooit representatief zijn vanwege het verschil in uitstraalkarakteristiek voor de verschillende frequentiebanden.
- Het heeft geen zin puntmetingen te doen in de uitblaasopening of in de uitblaasstraal van de ventilator. De hoge luchtsnelheid veroorzaakt zoveel turbulentie bij de opnemer dat te grote meetafwijkingen ontstaan.

8.2.2 Ventilatiesysteem

Na de montage en in bedrijf stelling van ventilatiesystemen moeten geluidsmetingen worden verricht. Vooral tijdens situaties waarin mensen moeten vluchten en hulpverlening noodzakelijk is, mag het geluidsniveau in de tunnelbuizen en de vluchtwegen niet te hoog zijn.

Geluidsmetingen in een tunnelbuis zijn vooral van belang bij in de tunnelbuis opgestelde aanjaagventilatoren. Ventilatoren van dwarsventilatiesystemen veroorzaken vrijwel nooit teveel geluid in een tunnelbuis.

Positie van de metingen in de tunnelbuis

Een goede referentie voor geluidsmetingen in een tunnelbuis is op het midden van de breedte op 1,6 m boven het wegdek (gemiddelde 'oor- en luisterhoogte'). De metingen moeten over de hele lengte van de tunnel worden uitgevoerd, waarbij de afstanden zo worden gekozen dat een redelijk beeld van het geluid in de tunnel wordt verkregen. Hierbij geldt:

- Het is zinvol om dichtbij aanjaagventilatoren de meetpunten niet te ver uit elkaar te kiezen. Een meetpunt direct onder een ventilator en bijvoorbeeld 2 of 3 meetpunten aan elke zijde van een ventilator op een afstand van 5 – 10 m geven een goede indruk van het geluid in de nabijheid van een ventilator.
- In tunnelsecties zonder ventilatoren kunnen afstanden van 25 – 50 – 100 m worden gekozen, afhankelijk van de situatie.

De metingen moeten voor elke mogelijke schakelstand van het ventilatiesysteem worden uitgevoerd.

Meetomstandigheden in de tunnelbuis

Tijdens de metingen:

- moeten de tunnelbuizen leeg zijn om onverwachte reflecties en demping te voorkomen;
- mogen er geen andere geluidsbronnen aanwezig zijn, tenzij die geluidsbronnen een geluidniveau veroorzaken dat in elke frequentieband 20 dB of meer onder het niveau van de tunnelventilatie ligt;
- mag de lichtsnelheid ter plaatse van de meetmicrofoon niet hoger zijn dan circa 8 – 10 m/s. Bij hogere lichtsnelheden ontstaan te grote afwijkingen in de geluidmeting. Afscherming van de microfoon tegen te hoge lichtsnelheden is vrijwel onmogelijk omdat daarmee ook geluid wordt afgeschermd.

Bepaling akoestische eigenschappen van de tunnelbuis

Om de akoestische eigenschappen van de tunnel te bepalen moet met gebruik van een gekalibreerde bron per frequentieband de nagalmtijd worden bepaald.

Frequentiebanden

Geluidsmetingen moeten minstens worden uitgevoerd in de frequentiebanden 63 – 125 – 250 – 500 – 1000 – 2000 – 4000 – 8000 dB en als gewogen gemiddelde. Deze gegevens zijn daarmee onder andere bruikbaar om berekeningen van spraakverstaanbaarheid te maken.

8.3 Bepaling bestandheid tegen hoge temperatuur

8.3.1 Ventilatoren

Om te bepalen of ventilatoren voldoen aan de eisen van temperatuurbestandheid is een praktijktest noodzakelijk. De temperatuurbestandheid moet worden getest volgens EN 12101-3 (bijlage D).

Bij het testen van de temperatuurbestandheid van aanjaagventilatoren is het belangrijk dat de bedrijfsomstandigheden zoals die bij een brand in de tunnel optreden, zoveel mogelijk worden nagebootst. De volgende omstandigheden verdienen hierbij bijzondere aandacht:

- De ventilator moet tijdens de test in zijn geheel in de hete gassen worden geplaatst, dus inclusief dempers en alle andere normaal aan de ventilator bevestigde hulpapparatuur

en (voedings)kabels. Zo zullen alle onderdelen gelijktijdig aan dezelfde temperatuursomstandigheden zijn blootgesteld (EN 12101-3, fig.C.3).

- De ventilator moet zo realistisch mogelijk worden belast, alsof hij in een tunnelbuis is geplaatst. De ventilator moet met eigen vermogen de lucht verplaatsen. Voor de grootte van de ruimte waarin de ventilator is opgesteld geldt dat aan- en afstroming van de ventilator de werking van de ventilator niet merkbaar mag beïnvloeden. Als de testopstelling correct is opgebouwd, presteert de ventilator bij kamertemperatuur in de oven conform de fabrieksspecificaties.
- Direct voorafgaand aan de feitelijke temperatuurtest, moet de ventilator in de testopstelling minimaal 60 minuten in bedrijf zijn geweest bij normale omgevingstemperatuur en moeten ventilatoropbrengst en -temperatuur zijn gestabiliseerd (EN 12101-3, art.C.4.2).
- De opwarmtijd van de oven tot de temperatuur waarop wordt getest moet liggen tussen 5 en 10 minuten (EN 12101-3, art.C.4.3).
- De ventilator moet, de opwarmtijd inbegrepen, minstens 60 minuten worden beproefd op de testtemperatuur, met een tolerantie van -0 °C tot +25 °C.
- Een uitschakeltijd van 2 minuten en een herstart als omschreven in de EN 12101-3, art.C.4.4 wordt niet noodzakelijk geacht en mag achterwege worden gelaten. Dit stemt namelijk niet overeen met de werkelijke situatie in de tunnel.

Technische aandachtspunten ten aanzien van de ventilator bij temperatuurtesten zijn:

- De motorlagers en motoras moeten beneden de testtemperatuur vrij kunnen lopen.
- De schoepen moeten voldoende grote tipspeling hebben, zodat de waaier niet in het huis vastloopt of geen hevige trillingen ontstaan die kunnen leiden tot uitval van de ventilator.
- Eventueel toegevoegd materiaal voor het balanceren van de waaier mag niet smelten beneden de testtemperatuur
- De motorwikkelingen moeten voldoende zijn geïsoleerd (geen gehele of gedeeltelijke kortsluiting).
- De voedingkabel moet tot op de ventilatormotor in stand blijven.
- De aansluiting van de voedingskabel binnen de motor moet in stand blijven.
- Eventueel bezwijken van (onderdelen van) de werkschakelaar, aansluitkasten en aansluitklemmen mag de doorgave van stroom niet belemmeren.

Aanbeveling

Er wordt aanbevolen een test op bestendigheid tegen hoge temperaturen te laten beoordelen door een erkende onafhankelijke partij, zoals DNV, Lloyds, TÜV of CTICM. De beoordeling moet schriftelijk worden gerapporteerd, waarbij in ieder geval een verslag van de test is opgenomen. Het rapport dient ter autorisatie van de bevindingen van de test.

Opmerking: Aan ventilatoren voor het op overdruk houden van vluchtwegen worden meestal geen bijzondere temperatuurseisen gesteld. Deze ventilatoren moeten buitenlucht aanzuigen die nooit van hoge (rookgas)temperatuur is. Ventilatoren die rook afvoeren uit ruimten van vluchtwegen moeten wel bestand te zijn tegen hoge (rookgas)temperaturen.

8.3.2 Roosters en brandkleppen

Roosters en brandkleppen moeten bestand zijn tegen de maximaal verwachte temperatuur op de plaats waar zij zijn gemonteerd. Ook de tijdsduur moet daarbij zijn gedefinieerd.

Het testen van elementen in rook- en warmteafvoerinstallaties moet in het algemeen volgens de daarvoor geldende normen geschieden.

Roosters en brandkleppen die in het tunnelplafond zijn gemonteerd en direct boven een brand moeten functioneren, hoeven niet per se bestand te zijn tegen de zeer hoge temperaturen die boven de brand optreden. Hier geldt immers het motto: “als het gat maar open is”, zodat rook kan worden afgevoerd. Wel moet worden voorkomen dat brandkleppen onverhoeds sluiten door kortsluiting van actuatoren of niet kunnen openen door vastsmelten, het weigeren van de actuatoren, en dergelijke.

9 BEDIENING EN BESTURING

In dit hoofdstuk wordt aandacht besteed aan de bediening en de besturing van het ventilatiesysteem.

9.1 ALGEMEEN

Allereerst geldt dat de besturing van ventilatie kan niet los gezien worden van de alarmmeldingen en regelingen van andere tunneltechnische en verkeerstechnische installaties.

Voor het ventilatiesysteem levert een volledig automatisch werkende besturing, dus zonder dat menselijk ingrijpen noodzakelijk is, de meest veilige situatie op. Wel moet altijd de mogelijkheid aanwezig zijn om handmatig in te grijpen in de besturing van de verschillende installaties, bijvoorbeeld vanuit een verkeerscentrale. Dat is noodzakelijk om de gevolgen van eventuele onterechte of valse meldingen ongedaan te kunnen maken, bijvoorbeeld door het systeem te 'resetten'. Deze ingrepen moeten bij voorkeur kunnen worden gestart met een druk op de knop of via een enkel commando, waarna automatisch een aantal gewenste vervolgacties plaatsvinden.

Opmerking: Hoewel onterecht starten van het ventilatiesysteem moet worden vermeden, levert dit natuurlijk geen onveilige situaties op. Er wordt uitsluitend onnodig elektrische energie verbruikt.

De hierna volgende aanbevelingen gelden in principe voor alle mogelijke ventilatiesystemen. Immers, het doel van de verschillende ventilatiesystemen is altijd hetzelfde, zowel tijdens normaal bedrijf als tijdens calamiteitenbedrijf. Op enkele punten is de informatie echter specifiek van toepassing op een systeem van langsventilatie.

9.2 Besturing bij normaal bedrijf

Als algemene aanbeveling geldt dat een eenvoudige en directe besturing van het ventilatiesysteem de minste risico's op storingen oplevert. Het ventilatiesysteem moet worden geschakeld op basis van emissieconcentraties. Daarvoor is een meting van de concentratie nodig. Een alternatieve oplossing is de verkeersintensiteit te meten en op basis daarvan een schatting te maken van de emissieconcentratie. Met dergelijke systemen is wereldwijd slechts beperkte ervaring (In de Belliard tunnel in Brussel is een meetsysteem gebaseerd op verkeersintensiteit toegepast).

Metingen van de emissieconcentratie

Om de emissieconcentratie in de normale bedrijfssituatie te beperken, kan een zichtmeting worden toegepast als schakelcriterium voor de benodigde ventilatiecapaciteit. Hierbij wordt vooralsnog aangenomen dat er een voldoende eenduidige relatie bestaat tussen de emissie van NO₂ en fijn stof. Hoewel het zicht zelf in kortere tunnels bijna nooit een criterium vormt om de ventilatie in te schakelen kan het, vanwege de veronderstelde relatie met NO₂ wel gebruikt worden als schakelcriterium.

Meting van de NO₂-concentratie wordt afgeraden. De beschikbare apparatuur voor een tunnelomgeving heeft onvoldoende meetnauwkeurigheid en is niet stabiel genoeg voor de optredende concentraties in een tunnel. Daarbij komt dat de concentraties NO₂ sterk worden beïnvloed door de achtergrondconcentratie. Bovendien is de beschikbare apparatuur tot op heden niet bestand gebleken tegen het agressieve corrosieve milieu in de tunnel.

De toepassing van meetapparatuur voor CO is tegenwoordig weinig zinvol. In de praktijk is gebleken dat slechts zeer lage concentraties CO optreden die ver onder de gezondheidscriteria blijven. Dit betekent dat de ventilatie nooit zal starten, terwijl de concentratie van andere schadelijke stoffen te hoog kan zijn. Het verlagen van de inschakelcriteria zou een voor de hand liggende oplossing zijn, maar dat leidt ertoe dat de criteria dicht bij de meetnauwkeurigheid van de apparatuur liggen, zodat de meting onbetrouwbaar wordt. Een CO-meting heeft dus alleen zin als te hoge concentraties worden verwacht.

Hoewel tot op heden – voor zover bekend – nooit in tunnels toegepast, zou een meting van CO₂ of NO_x kunnen worden gebruikt. De hoeveelheid CO₂ is rechtstreeks gerelateerd aan de hoeveelheid verbruikte brandstof van motorvoertuigen. Het meten van NO_x is robuuster uit te voeren dan het meten van NO₂.

Meting van de verkeersintensiteit

Tijdens normaal bedrijf dient het ventilatiesysteem de concentraties van de verkeersemisies beneden de maximale waarden te houden. De daarvoor benodigde ventilatiecapaciteit is dan afhankelijk van de hoeveelheid en soort verkeer.

Bij tunnels tot een lengte van circa 2 km is de beschikbare reactietijd op een plotselinge verhoging van de concentraties te kort om deze goed te kunnen regelen. Het anticiperen op mogelijke (te) hoge concentraties aan de hand van historische verkeersgegevens kan hiervoor een oplossing zijn.

Een andere oplossing is de ventilatiecapaciteit te sturen op basis van een uur-/dagschema, gebaseerd op voorafgaande metingen van de verkeersintensiteit. Hierbij moet wel rekening worden gehouden met het verschil tussen weekdays en weekenddagen.

Meting van de werkelijke concentraties kan eventueel worden gebruikt om indien nodig de ventilatiecapaciteit bij te stellen.

Besturing van langsventilatie in normaal bedrijf

Bij langsventilatie kunnen de aanjaagventilatoren in een tunnelbuis meestal in groepen worden geschakeld; het is niet noodzakelijk elke ventilator apart te schakelen. In tunnels tot een lengte van circa 2 km kan een energiezuinig ontwerp worden bereikt door de ventilatoren per tunnelbuis in twee of drie schakelgroepen te verdelen.

In normaal bedrijf is het meestal niet noodzakelijk alle ventilatoren in te schakelen. Door de groepen ventilatoren om de beurt in te schakelen blijft het aantal bedrijfsuren voor alle ventilatoren ongeveer gelijk en slijten alle ventilatoren ongeveer even snel.

Uit het oogpunt van verkeersveiligheid wordt aanbevolen om er voor te zorgen dat de maximale luchtsnelheid nooit meer bedraagt dan maximaal 15 m/s.

Het mag niet mogelijk zijn aanjaagventilatoren binnen één tunnelbuis gelijktijdig in verschillende ventilatierichtingen te schakelen.

Besturing van dwarsventilatie in normaal bedrijf

De ventilatorcapaciteit kan worden gevarieerd door het in- of uitschakelen van ventilatoren of door het aanpassen van het ventilatordebiet. Dat laatste kan worden uitgevoerd door de ventilatoren van verstelbare schoepen te voorzien of door het toerental aan te passen.

9.3 Besturing bij brand/calamiteiten

De besturing van het tunnelventilatiesysteem moet zijn gebaseerd op de overkoepelende veiligheidsscenario's.

Automatische of handmatige besturing

Incidenten of calamiteiten kunnen handmatig of automatisch worden gedetecteerd en gemeld. Handmatige detectie – door bedienend personeel via monitoren – heeft het meeste kans op falen en mag niet als uitgangspunt worden genomen voor het inschakelen van ventilatie. Automatische signalering en inschakeling van ventilatie verdient de voorkeur. Daarbij moet de wijze van inschakeling horen bij het specifieke brandscenario, dat wordt vastgesteld op basis van de ontvangen melding of meldingen.

Er moet minimaal één systeem zijn waarmee het ventilatiesysteem automatisch in de juiste stand wordt geschakeld bij brand of dreigend brandgevaar. Voor het ontdekken van incidenten, calamiteiten of gevaarlijke situaties in de verkeersbuizen kunnen de volgende detectie- of meldsystemen worden gebruikt, al dan niet gecombineerd:

- Stilstandsdetectie- of snelheidsonderschrijdingssysteem;
- Branddetectiesysteem;
- Zichtmeting (plotselinge verslechtering van het zicht kan veroorzaakt worden door een rookontwikkeling);
- Melding bij het openen van een hulppostdeur;
- Melding bij het uitnemen van een handblusser uit hulppost;
- Melding van het uitnemen of kantelen van een slanghaspel in een hulppost;
- Melding bij gebruik van de intercom.

Rol van de tunneloperator

Hoewel automatische detectie en inschakeling de voorkeur heeft, moet de operator altijd in staat zijn handmatig in te grijpen:

- Bij automatische detectie kan een onterechte of valse melding worden gedaan. Om te voorkomen dat hierdoor een onveilige situatie ontstaat voor de verkeersafwikkeling, moet de operator kunnen ingrijpen door de automatisch in gang gezette schakelactie te stoppen of te beperken.
- Het kan ook gebeuren dat een ongewenste situatie niet wordt gesignaleerd. Uiteraard moet een operator dan in staat zijn de ventilatie handmatig aan te passen aan de situatie, bij voorbeeld naar aanleiding van een waarneming via het CCTV-systeem of alarmering door een weggebruiker.
- Na beëindiging van het incident of de calamiteit moet het terugschakelen naar normaal bedrijf altijd plaatsvinden door een handmatige ingreep van de operator.

Het kan zijn dat de brandweer tijdens de brand adviezen geeft om het ventilatieregime aan te passen. Deze adviezen moeten altijd via de operator worden uitgevoerd. De operator is namelijk degene met een totaaloverzicht van de installaties die in bedrijf zijn en is ook beter bekend met de (on)mogelijkheden van de besturing van het ventilatiesysteem.

Besturing van langsventilatie bij brand

Langsventilatie moet altijd starten in de normale rijrichting van het verkeer. De kans dat er stroomopwaarts van de brand weggebruikers aanwezig zijn, is veel groter dan de kans dat er stroomafwaarts weggebruikers aanwezig zijn (zie ook 3.1.2).

Ook als er een file in de tunnel staat moet de ventilatie starten in de normale rijrichting van het verkeer. Files hebben meestal nog een geringe rijsnelheid (20 – 30 km/h) en de kans is groot dat in de eerste fasen van de brand – waarin er nog weinig rookproductie is – de file

stroomafwaarts van de brand de tunnel geheel kan verlaten. De zone met weggebruikers stroomopwaarts van de brand blijft door inschakeling van de ventilatie vrij van rook.

De minimale (kritische) luchtsnelheid die bij de maatgevende brand behoort, moet zo snel mogelijk worden bereikt. Daarom moet een langsventilatiesysteem binnen 3 minuten na het inschakel-commando volledig operationeel zijn. De elektrische voedingsinstallatie moet hierop zijn aangepast.

In tunnels met langsventilatie moet in een tunnelbuis naast de calamiteitenbuis de ventilatierichting gelijk gemaakt worden aan de richting in de buis waar de brand optreedt, wanneer rook in die tunnelbuis kan doordringen en daar tijdens de brand mensen aanwezig kunnen zijn. Er moet een minimale luchtsnelheid van ongeveer 0,5 tot 1 m/s wordt bereikt. Het aantal in te schakelen ventilatoren moet daarop zijn afgestemd.

In een aantal situaties kan de aanbevolen ventilatierichting worden omgekeerd:

- De brand is op korte afstand van het ingangsportaal ontstaan. Deze situatie kan worden vergeleken met een systeem van natuurlijke ventilatie, waarbij de vluchtweg gewoonlijk niet langer dan circa 100 m is. Als de brand op minder dan 100 m van de tunnelingang optreedt, kan het onder bepaalde, van de situatie afhankelijke omstandigheden verstandig zijn niet te ventileren of – nadat weggebruikers de tunnel hebben verlaten – te ventileren in tegengestelde richting mits het systeem dat mogelijk maakt.
- In een – overigens ongewenste – situatie met tegengestelde rijrichtingen in één tunnelbuis moet per geval worden beoordeeld of en in welke richting de ventilatie wordt ingeschakeld.
- Hetzelfde geldt bij brand tijdens onderhoud.

Het is raadzaam dergelijke beslissingen niet alleen aan de tunneloperator over te laten, maar hierover vooraf bindende afspraken te maken.

Per tunnel moet worden overwogen of de ventilatierichting op last van de brandweer moet kunnen worden omgekeerd. In het algemeen is dit echter niet aan te bevelen. De brandweer arriveert meestal wanneer de brand al een aanzienlijke grootte heeft bereikt en de ventilatie de rook al in de rijrichting afvoert. Alle aanwezigen zijn op die situatie ingesteld. Het omkeren van de ventilatierichting kan leiden tot situaties waarbij personen juist in de rook terecht komen.

Het mag niet mogelijk zijn aanjaagventilatoren binnen één tunnelbuis gelijktijdig in verschillende ventilatierichtingen te schakelen.

Besturing van dwarsventilatie bij brand

Afhankelijk van de uitvoering van het systeem moet een dwarsventilatiesysteem zo worden geschakeld dat :

- er zoveel mogelijk rook op de goede plaats wordt afgezogen;
- de stratificatie zo goed mogelijk in stand blijft;
- ongecontroleerde langsstromingen zoveel mogelijk worden vermeden.

Een dwarsventilatiesysteem moet binnen 3 minuten nadat het bij brand wordt ingeschakeld volledig operationeel zijn. Systemen die van inblazen overschakelen op afzuigen moeten binnen 3 minuten omkeerbaar zijn. De elektrische voedingsinstallatie moet hierop zijn aangepast.

Besturing van overdrukventilatie bij brand

De wijze van schakeling van de overdrukventilatie moet zodanig zijn dat wordt voldaan aan de eis dat geen rook van buiten of schadelijke dampen of gassen van binnen worden aanzogen.

10 Beheer en onderhoud

10.1 Inspectie, proefdraaien en testen

Alle onderdelen van een ventilatiesysteem moeten geregeld worden gecontroleerd op goede werking. De controle moet minimaal bestaan uit

- periodieke visuele inspecties
- op gezette tijden de goede werking van zowel de onderdelen als het gehele systeem vaststellen
- periodiek testen van de besturing van het ventilatiesysteem

Alle ventilatoren moeten regelmatig proefdraaien, waarbij de belangrijkste bedrijfsaspecten moeten worden gecontroleerd. Het proefdraaien moet voor zover mogelijk automatisch plaatsvinden.

10.2 Bereikbaarheid

Ventilatoren die niet in de tunnelbuis zijn geplaatst moeten goed bereikbaar zijn voor onderhoud en inspectie.

10.3 Melding bedrijfstoestand en storingen

Status- en storingsmeldingen moeten via de besturing automatisch worden teruggemeld en bewaard. Dit moet zowel tijdens normaal bedrijf als tijdens proefdraaien worden uitgevoerd.

10.4 Veiligheid

Bij dwarsventilatie moeten de kanalen veilig toegankelijk zijn voor inspectie, reiniging en onderhoud aan apparatuur.

Ventilatoren moeten zijn voorzien van een werkschakelaar op of direct nabij de ventilatoren. Dit geldt ook voor de aanjaagventilatoren in de tunnelbuis.

10.5 Beperken overlast voor het verkeer

Aanjaagventilatoren moeten zo zijn geconstrueerd dat onder normale, in de verkeersruimte gebruikelijke bedrijfsomstandigheden, het noodzakelijke onderhoud en de (visuele) inspectie van de ventilatoren kan worden beperkt tot maximaal 1x per jaar. Daarmee wordt oponthoud van het verkeer door een gehele of gedeeltelijke afsluiting van de tunnel zoveel mogelijk beperkt.

De constructie en bevestiging van een ventilator in de verkeersruimte moet zo zijn uitgevoerd dat uitwisselen (demontage en vervanging) zonder speciaal gereedschap binnen korte tijd mogelijk is. Als richttijd kan hiervoor ongeveer 1 uur per aanjaagventilator worden aangehouden.

10.6 Geheel of gedeeltelijk buiten bedrijf stellen

Wanneer één of meer ventilatoren vanwege onderhoud buiten bedrijf moeten worden gesteld, of zelfs worden gedemonteerd om elders te worden gerepareerd, moet de resterende ventilatie-capaciteit voldoende zijn om in ieder geval de meest voorkomende situaties met brand te kunnen hanteren. Aanbevolen wordt altijd minstens 50% van de normale ventilatiecapaciteit in stand te houden. Als dat niet mogelijk is moet worden overwogen om de tunnel tijdelijk te sluiten of een aangepast toelatingsbeleid uit te voeren.

Hetzelfde geldt wanneer een ventilatiesysteem gedeeltelijk buiten bedrijf moet worden gesteld vanwege werkzaamheden aan kleppen, kanalen, roosters, elektrische installatie of besturing. Een tijdelijke vermindering van de beschikbare ventilatie moet zo kort mogelijk duren. Een tijdelijke aanpassing in de beschikbare ventilatiecapaciteit moet van tevoren met de betrokken verantwoordelijke partijen worden overlegd en bestuurlijk zijn vastgelegd.

11 Achtergronden

11.1 ventilatie en brand

11.1.1 Bepaling van de hoeveelheid rook

In de literatuur over tunnelbranden en tunnelventilatie zijn een aantal gegevens over de hoeveelheid geproduceerde rook bij een brand te vinden:

	PIARC 1987	Eureka tests	CETU (voorstel 1999)
Personenauto	20 m ³ /s	-	-
Personenauto met veel plastic	-	30 m ³ /s	-
2 – 3 personenauto's			30 m ³ /s
1 kleine vrachtauto			50 m ³ /s
Bus / kleine vrachtauto	60 m ³ /s	50 – 60 m ³ /s	80 m ³ /s
Grote vrachtauto	-	-	-
Plasbrand	100 – 200 m ³ /s		300 m ³ /s

Tabel 11-1: PIARC 1999 - Fire and smoke control in tunnels

2 – 3 personenauto's	8 MW	-
Een bestelauto	15 MW	50 m ³ /s
Vrachtwagen	30 MW	80 m ³ /s
Tankauto	200 MW	>300 m ³ /s

Tabel 11-2: Cetu - Le dossier pilote de tunnels - Ventilation 2003

1 grote personenauto	5 MW	20 m ³ /s
1 vrachtwagen	30 MW	80 m ³ /s

Tabel 11-3: Bundesamt für Strassen - Systemwahl, Dimensionierung und Betrieb von Tunnelüftungsanlagen

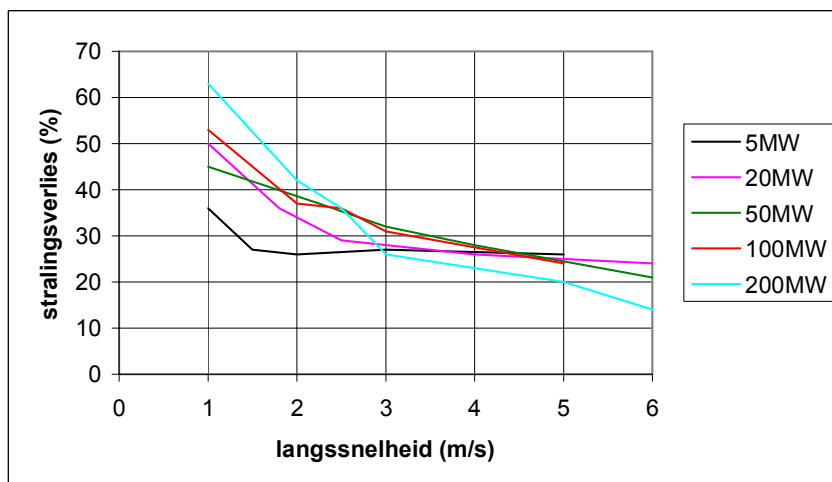
De hoeveelheid rook – gemeten als volume – wordt voornamelijk bepaald door de uitzetting van lucht als gevolg van de toegevoerde energie. De beïnvloeding van de soortelijke massa door de toevoering van verbrandingsproducten is te verwaarlozen, waardoor ook de beïnvloeding van het volume te verwaarlozen is.

Voor de hoeveelheid rook is ook de luchttoevoer van belang:

- Wanneer de brandgrootte wordt bepaald door de hoeveelheid toegevoerde lucht, is de hoeveelheid rook alleen afhankelijk van de energie die vanuit de brand in de rook terecht komt.
- Wanneer het toegevoerde volume lucht groter is dan nodig voor de verbranding, is de hoeveelheid rook een functie van de energie die vanuit de brand in de rook terecht komt en de hoeveelheid toegevoerde lucht. Hierbij wordt aangenomen dat de niet voor verbranding gebruikte lucht zich vermengt met de rook.
- Wanneer de verbrandingslucht van één zijde toestroomt en de backlayeringsnelheid wordt aangehouden, is er altijd enige overmaat aan verbrandingslucht.

In een tunnel wordt een deel van het brandvermogen door straling aan de wanden en plafond overgedragen. Volgens literatuur bedraagt dit aandeel bij een kleine brand circa 10% en bij een grote brand circa 30%. Uit CFD-simulaties blijkt dat het deel van de warmte, dat door straling, aan de wanden en plafond wordt overgedragen, afhankelijk is van de langzaamheid (zie Figuur 11-1).

Bij de kritische snelheid voor backlayering is de hoeveelheid warmteverlies door straling bij kleine branden van 5 MW circa 27% en bij branden groter dan 20 MW circa 36%. Bij een langssnelheid net boven de kritische snelheid is het stralingsverlies bij een kleine brand circa 26% en bij grotere branden gemiddeld circa 30%.



Figuur 11-1: Warmteverlies door straling afhankelijk van de langssnelheid

Een berekening op basis van een verbrandingsmodel, uitgaande van verbranding van een koolwaterstofbrand met een verbrandingswaarde van 30 MJ/kg (gemiddelde van de praktische verbrandingswaarde van benzine en diesel) levert de resultaten volgens Tabel 11-4.

Brand-vermogen	Vermogenoverdracht door straling naar de tunnelwanden	In de rook opgenomen vermogen	Berekende hoeveelheid rook
5 MW	27% / 26%	3,7MW / 3,7 MW	12 m ³ /s / 12 m ³ /s
20 MW	36% / 30%	13 MW / 14 MW	44 m ³ /s / 48 m ³ /s
30 MW	36% / 30%	19 MW / 21 MW	66 m ³ /s / 71 m ³ /s
50 MW	36% / 30%	32 MW / 35 MW	110 m ³ /s / 119 m ³ /s
100 MW	36% / 30%	64 MW / 70 MW	220 m ³ /s / 238 m ³ /s
200 MW	36% / 30%	128 MW / 140 MW	442 m ³ /s / 476 m ³ /s
300 MW	36% / 30%	192 MW / 210 MW	663 m ³ /s / 715 m ³ /s

Tabel 11-4: Berekening ter bepaling van de hoeveelheid rook

Tot een vermogen van circa 30 MW komen de berekende hoeveelheden rook overeen met de Franse en Duitse gegevens en met de Eureka-proeven. Voor grotere vermogens zijn weinig gegevens bekend en moet worden uitgegaan van de hoeveelheden zoals hier berekend.

11.1.2 Ventilatie en incident-scenario's

In verkeerstunnels worden onveilige situaties in hoofdzaak veroorzaakt door het verkeer, waarbij drie belangrijke situaties worden onderscheiden:

- Uitbreken van brand met rookontwikkeling
- Kans op explosie
- Vrijkomen van giftige stoffen

Deze situaties kunnen ook in combinatie met elkaar voorkomen.

Deze drie situaties hebben invloed op alle op dat moment aanwezige personen in een tunnel. Brand en ontploffing hebben ook invloed op de tunnelconstructie.

Scenario bij brand

Een tunnel is een besloten ruimte waarin rook zich snel en over een grote lengte kan verspreiden, waardoor veel mensen bedreigd kunnen worden. Bij brand vallen dan ook de meeste slachtoffers doordat ze ingesloten raken in de rook en vervolgens overlijden door vergiftiging en/of verstikking. Slechts weinig slachtoffers vallen door directe invloed van het vuur.

Door middel van ventilatie kan voor rookvrije zones worden gezorgd.

Scenario bij explosie

Explosies in tunnels kunnen optreden bij ongevallen waarbij explosieve stoffen, zoals munitie en vuurwerk, betrokken zijn. Of het vervoer van dergelijke stoffen wordt toegelaten, is afhankelijk van het vastgestelde toelatingsbeleid voor de tunnel.

Explosies kunnen ook optreden bij ongevallen en branden met verkeer dat normaal gesproken wel wordt toegelaten in tunnels. Oorzaken van een explosie kunnen zijn:

- Verdamping van vrijgekomen vloeibare brandbare stoffen, waarbij het mengsel damp/lucht explosief is en wordt ontstoken door een warmtebron.
- Lekkage van een gastank door beschadiging of doorboren van de tank, waarbij het mengsel gas/lucht explosief is en wordt ontstoken door een warmtebron.
- Een druktank, waarin tot vloeistof verdicht gas wordt vervoerd, raakt zo beschadigd dat de tank door de druk geheel openscheurt en de vloeistof instantaan gaat koken en in de gasfase overgaat (koude BLEVE).
- Een druktank, waarin tot vloeistof verdicht gas wordt vervoerd, wordt door een brand zo opgewarmd dat de tank door de opgelopen druk geheel openscheurt. De vloeistof gaat daarbij instantaan koken en gaat over in de gasfase (warme BLEVE), en kan vervolgens ontbranden.

Mechanische ventilatie kan in deze gevallen zowel een positief als een negatief effect hebben:

- Door ventilatie worden de temperaturen in de omgeving van een brand kleiner waardoor een potentiële warme BLEVE uitblijft. De brandintensiteit neemt echter door ventilatie vaak toe, waardoor ook de straling toeneemt. Dat zorgt er weer voor dat bij een onder druk staande tankauto dicht bij de brand de kans op een warme BLEVE toeneemt.
- Ventilatie kan de kans op een explosie bevorderen omdat door de luchttoevoer een brandstof-/luchtmengsel binnen de explosiegrenzen komt, terwijl zonder mechanische ventilatie het mengsel misschien daarbuiten blijft. Het is ook mogelijk dat ventilatie zorgt voor een verdunning van het brandstof/luchtmengsel tot een concentratieverhouding waarbij een explosie niet meer kan optreden. Dat is echter niet zeker omdat dit effect dat sterk afhangt van de hoeveelheid en soort brandstof.

Opmerking: Ventilatie heeft geen effect op de kans van optreden van een koude BLEVE.

Scenario bij vrijkomen giftige stoffen zonder brand

Giftige stoffen kunnen in tunnels vrijkomen bij ongevallen met vrachtwagens die deze stoffen vervoeren. Daarnaast kunnen ook de verbrandingsproducten van brandende voertuigen giftig zijn. Giftige stoffen kunnen zowel zwaarder als lichter dan lucht zijn.

Over het algemeen is het aandeel van het vrachtverkeer met gevaarlijke stoffen in de totale verkeersstroom gering. Of het vervoer van dergelijke stoffen wordt toegelaten, is afhankelijk van het vastgestelde toelatingsbeleid voor de tunnel.

Bij langsventilatie is het inschakelen van de ventilatie tijdens het vrijkomen van giftige stoffen over het algemeen gunstig: de gevaarlijke gassen worden dan weggevoerd van de weggebruikers in de file. Wel moet rekening worden gehouden met eventuele effecten op de omgeving.

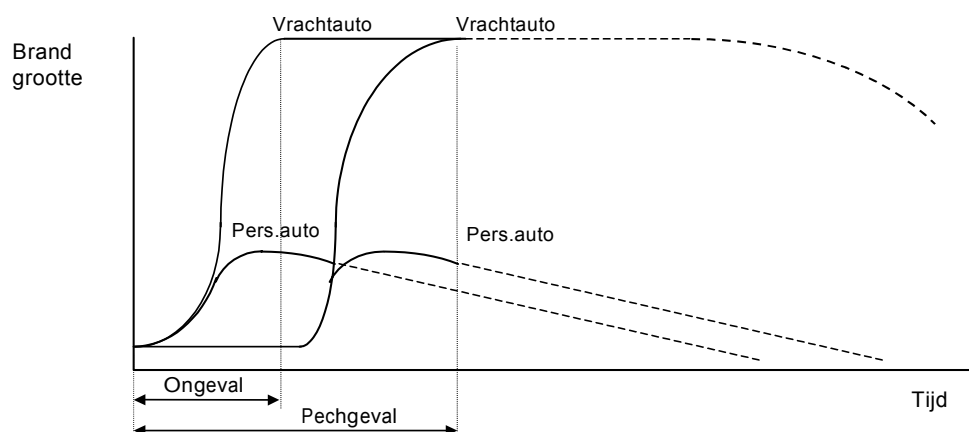
In de praktijk kunnen de gevolgen van het vrijkomen van giftige stoffen echter meestal niet adequaat met ventilatie worden bestreden, omdat niet goed kan worden vastgesteld wanneer de ventilatievoorzieningen moeten worden ingeschakeld. Giftige stoffen zijn voor een tunneloperator niet waarneembaar en vanwege de grote verscheidenheid aan giftige stoffen is het aanbrengen van automatische detectieapparatuur voor alle stoffen niet realistisch. Wel kan worden overwogen dit te doen voor enkele stoffen die veel door de tunnel worden vervoerd.

11.1.3 Brand in een tunnel

Bij het bepalen van de kans op brand moet in principe onderscheid worden gemaakt naar de grootte van de brand. Vanwege de beperkte hoeveelheid beschikbare statistische gegevens wordt echter meestal aangenomen dat de kans op brand voor alle brandgrootten gelijk is. In Nederland is de gemiddelde kans op brand 2 per honderd miljoen voertuigkilometer. Uit buitenlandse gegevens valt op te maken dat de brandfrequentie voor vrachtwagens hoger is dan voor personenauto's, maar dit betreft meestal branden in tunnels in bergachtige gebieden.

Verreweg de meeste branden (meer dan 95%) ontstaan door technische problemen, zoals een oververhitte motor, oververhitte remmen of vlamvattende bedrading. Slechts een klein aantal branden (minder dan 5%) ontstaat door een ongeval, waarbij lekkende brandstoftanks leiden tot directe ontsteking van brandbare vloeistoffen (plasbrand).

Als een brand niet snel kan worden geblust kan de brand zich ontwikkelen tot een hevige brand, waarbij veel rook vrijkomt. De snelheid waarmee een brand zich ontwikkelt is bij ongevallen meestal groter dan bij brand door pech. Bij een brand ten gevolg van technische problemen duurt het meestal 10 – 15 minuten voordat de brand zich tot volle omvang heeft ontwikkeld. Bij een brand door een ongeval wordt veiligheidshalve aangenomen dat de brand 2 minuten na het ongeval ontsteekt en zich daarna binnen 3 – 5 minuten geheel ontwikkelt. Voorbeelden van tunnelbranden na een ongeval zijn de brand in de Tauertunnel in 2000 en in de St. Gotthardtunnel in 2001. Beide scenario's worden vergeleken in Figuur 11-2.



Figuur 11-2: Verloop van de brandgrootte voor verschillende scenario's.

Als de voertuigen in de tunnel dicht op elkaar staan, kunnen voertuigen die dichtbij de brand staan door stralingswarmte en/of hete rook zo verhitten dat ze tot zelfontbranding overgaan. Hierdoor kunnen uiteindelijk alle voertuigen in de tunnel worden verbrand. Dit is bijvoorbeeld gebeurd in de Nihonzaka-tunnel Japan in 1987 en in de Mont Blanc tunnel in 1999.

Uit het bovenstaande blijkt dat er in veel situaties voldoende tijd is voor zelfredzaamheid, mits weggebruikers voldoende snel reageren. Ventilatie helpt daarbij de vluchtwegen rookvrij te houden.

11.1.4 Risicoanalyse

De keuze van het type ventilatie in geval van brand kan worden gemaakt aan de hand van risicoanalyse. Hierbij kunnen twee technieken worden gehanteerd:

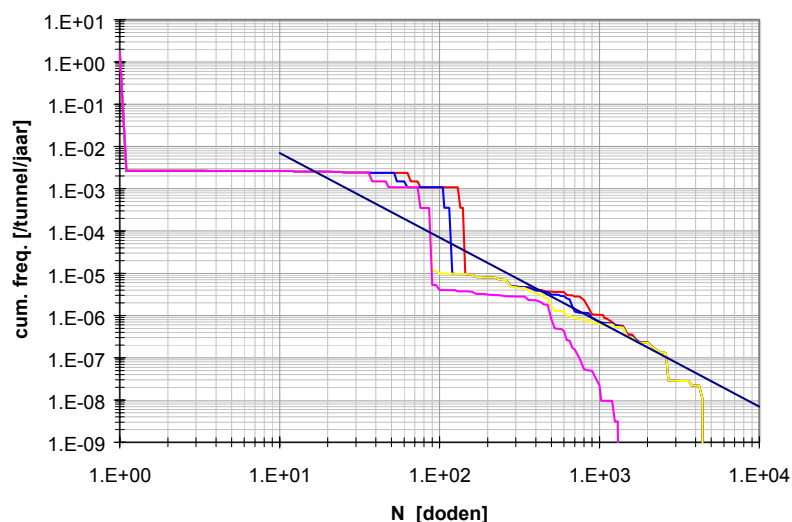
- Kwantitatieve risicoanalyse
- Deterministische scenarioanalyse

Kwantitatieve risicoanalyse

Bij kwantitatieve risicoanalyse wordt een groot aantal mogelijke scenario's bekeken en wordt per scenario het aantal (dodelijke) slachtoffers bepaald. Er wordt hierbij gekeken naar de (cumulatieve) kans f per jaar en per kilometer tunnel op een calamiteit met N of meer dodelijke slachtoffers. Aan de hand van berekeningen kan een zogenaamde f/N kromme worden bepaald. Deze kromme blijkt sterk te worden bepaald door de verkeersintensiteit, de kans op filevorming en de kans op vrachtwagenbranden. Ook ventilatie heeft invloed op de f/N -kromme.

In Figuur 11–3 zijn als voorbeeld voor een aantal situaties f/N -krommen weergegeven.

Groepsrisico hele tunnel t.g.v. kleine kans, grote gevolgen



Figuur 11–3: f/N -krommen

Volgens de huidige Nederlandse norm moet de kans f kleiner zijn dan $10^{-1}/N^2$.

Dit wil zeggen dat de kans op ongevallen:

- met meer dan 10 doden kleiner moet zijn dan 10^{-3} per jaar per km;
- met meer dan 100 doden kleiner moet zijn dan een 10^{-5} per jaar per km;
- Enzovoort.

De lijn die bij deze grenswaarde hoort is de figuur aangegeven. In het voorbeeld ligt de werkelijke f/N -kromme hier en daar boven de norm, waarmee wordt aangegeven dat het risico te hoog is.

Deterministische Scenarioanalyse

Bij deterministische scenarioanalyse wordt een aantal scenario's verder uitgewerkt om na te gaan of de beschikbare veiligheidsmiddelen voldoen. Hierbij moet ook de invloed van het type ventilatie en de wijze van schakelen worden onderzocht.

11.1.5 Overlevingscondities bij brand

Bij brand worden de aanwezigen mogelijk blootgesteld aan:

- hete gassen
- warmtestraling
- verlies van zicht
- toxische stoffen

Hete gassen

Mensen die zich in hete lucht of rook bevinden kunnen op twee manieren letsel oplopen:

- huidverbranding
- longverbranding

Tabel 11–5 vermeldt de temperatuurseffecten op mensen gebaseerd op droge lucht:

<i>Temperatuur (°C)</i>	<i>Effect</i>
127	Moeilijk ademen
140	Tolerantielimiet 5 minuten
149	Moeilijk door mond ademen, grens voor vluchten
160	Ondraaglijke pijn
182	Onomkeerbare schade in 30 seconden
200	Ademhalingssysteem bezwijkt binnen 4 minuten

Tabel 11–5: Temperatuur versus effect

Boven 150 °C ontstaan binnen 5 minuten huidbrandwonden. Onder de 70 °C kan iemand oncomfortabel, maar wel veilig, langere tijd verblijven.

Tussen 70 en 150 °C kan onderstaande relatie tussen de maximale blootstellingsduur t in seconden en de temperatuur T in °C worden gebruikt:

$$t = 5.33 \cdot 10^8 \cdot (1 / T^{3.66})$$

Na gebruik van een sprinkler ontstaat een 'watermist'-omgeving. Blootstelling aan een temperatuur van 50 °C kan in zo'n omgeving al dodelijk zijn. Dit komt omdat de warmte-overdracht naar de huid sterk toeneemt ten opzichte van een droge omgeving, en ook de kans op condensatie in de longen in die omstandigheden toeneemt.

Samenvattend worden voor 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)
- *dodelijk* : temperatuur = 50 °C in een vochtige omgeving

Warmtestraling

Personen kunnen ook worden bedreigd door de warmtestraling die wordt uitgezonden door hete gassen en vaste oppervlakken, buiten het vlam bereik en de hete rookgaszone. Hierbij is maatgevend:

- de intensiteit van de warmtestraling die invalt op de huid;
- de tijdsduur van blootstelling;

Bij een beperkte tunnelbrand kan een tunnelgebruiker zich gemakkelijk onttrekken aan de vlamwarmtestraling door weg te vluchten van de brand. Aan de warmtestraling afkomstig van een tegen het tunneldak liggende rooklaag is minder gemakkelijk te ontkomen, omdat deze over grote afstand hoog kan zijn.

Gegevens over kritieke niveaus voor de warmtestralingsflux kunnen worden ontleend aan het "Groene Boek" (Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from releases of hazardous materials, CPR16E, SZW Den Haag: Ministerie van SZW, 1992). Op basis hiervan worden voor straling een tweetal kritieke waarden voorgesteld, gebaseerd op het effect na 100 seconden:

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

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 vluchtingangen te bereiken. Maatgevend voor de zichtomstandigheden is de zichtlengte, omdat daarmee wordt bepaald of personen de nooduitgangen nog kunnen zien.

Als de vluchtroute goed te lokaliseren is, blijft het gevaar beperkt tot een vertraging van het vluchten. Is de vluchtroute niet te lokaliseren, dan zal de vertraging gepaard gaan met verlies aan richtingsgevoel. Het risico op langdurige blootstelling aan warmte, straling en toxische gassen neemt dan snel toe.

Toxische gassen

Toxische gassen die via de ademhaling in het bloed worden opgenomen hebben de volgende 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.

Toepassing bij brand

Door Rijkswaterstaat zijn in 2001 in de Beneluxtunnel full-scale brandproeven gehouden. Daarbij zijn plasbranden van 5MW en 20MW gebruikt, en ook voertuigbranden in personenauto's (5 MW) en kleine vrachtauto's (15 – 25 MW). Uit deze proeven is het volgende gebleken:

-
- Nabij de brand is de bedreiging door warmtestraling groter dan de bedreiging door convectieve warmte. Bij een 5 MW brand (personenauto) bedraagt de ‘dodelijke’ afstand circa 6 m en de ‘hinderlijke’ afstand 10 m. Bij een 20 MW brand (kleine vrachtauto) bedragen deze afstanden circa 12 m en 20 m.
 - Als er stratificatie optreedt is dat het gunstigst voor de vluchtomstandigheden tussen 50 m en 100 m stroomafwaarts van de brand. In die zone speelt de straling uit de rooklaag een rol. Verder weg (vanaf circa 200 m) zorgt de daling van de rooklaag tot beneden zichhoogte voor slechtere omstandigheden. Vooral op 20 m en vanaf 200 m kunnen er dan vrijwel onmiddellijk na het passeren van het rookfront hinderlijke tot levensbedreigende omstandigheden ontstaan en is dus de rookfrontsnelheid van belang. En deze is altijd zó groot dat vluchtende personen worden ingehaald.
Er vindt geen terugstroming plaats van de op 200 m gedaalde rook. Dat zou hebben geleid tot een verslechtering van de omstandigheden tussen 50 m en 150 m.
 - Langsventilatie beperkt de vluchtmogelijkheden stroomafwaarts van de brand binnen korte tijd na ontsteking van de brand. Bij een personenautobrand treedt in beide gevallen lichte tot matige zichthinder op: het gunstige effect van het lagere vermogen wordt tenietgedaan door de verstoring van de stratificatie. Bij een brand van een lading onder een huif ontstaat zowel met als zonder ventilatie lichte tot matige zichthinder, maar bij ventileren:
 - strekt de zichthinder zich uit vanaf 20 m en verder stroomafwaarts van de brand (zonder ventilatie vanaf 200 m);
 - treedt de zichthinder circa 10 minuten eerder op, vanwege de snellere brandontwikkeling;
 - speelt het voordeel van de vermindering van de warmtestraling uit de rooklaag geen rol, omdat vluchtende personen onder normale omstandigheden voldoende tijd hebben om dit relatief kleine, gevaarlijke gebied (tot maximaal 50 m van de brand) te verlaten.
 Hierbij moet worden opgemerkt dat ook het (nog) rijdende verkeer een langsstroming opwekt die nog enige minuten in stand blijft nadat het verkeer tot stilstand is gekomen. Ook wind zal een langsstroming veroorzaken.
 - Bij alle branden bleef er stroomafwaarts een zone met een hoogte van 0,5 – 1 m vanaf het wegdek rookvrij.
 - Het optreden en voorkomen van backlayering stemt volledig overeen met uit recente literatuur bekende relaties voor de kritieke snelheid ter voorkoming van backlayering.
 - De overschrijding van de kritieke concentraties toxische stoffen is (zeer waarschijnlijk) van ondergeschikt belang ten opzichte van de bedreiging door convectieve warmte, stralingswarmte en vermindering van zicht.

Op basis hiervan kan worden geconcludeerd:

- Kleinere branden tot circa 20 MW:
 - De warmtestraling is alleen op korte afstand in korte tijd dodelijk. Beknelde personen op korte afstand zullen snel overlijden. Ventilatie kan hierbij geen rol van betekenis spelen.
 - Personen in de rookzone hebben enige tijd om te vluchten.
 - Bij langsventilatie is er stroomafwaarts nog een beperkte zone waarin het zicht voldoende is. In de rookzone neemt het zicht snel af.
- Branden groter dan 20 MW:
 - De warmtestraling is tot op grote afstand (meer dan 20 m) zo groot dat de brand – zonder beschermende middelen – niet kan worden benaderd. Beknelde personen binnen deze afstand zullen snel overlijden. Ventilatie kan hierbij geen rol van betekenis spelen.
 - Het zicht, de temperatuur, de straling en de toxiciteit in de rookzone is zo groot dat aanwezigen binnen korte tijd zullen overlijden.

11.2 Stuwdrukverhoging door een aanjaagventilator

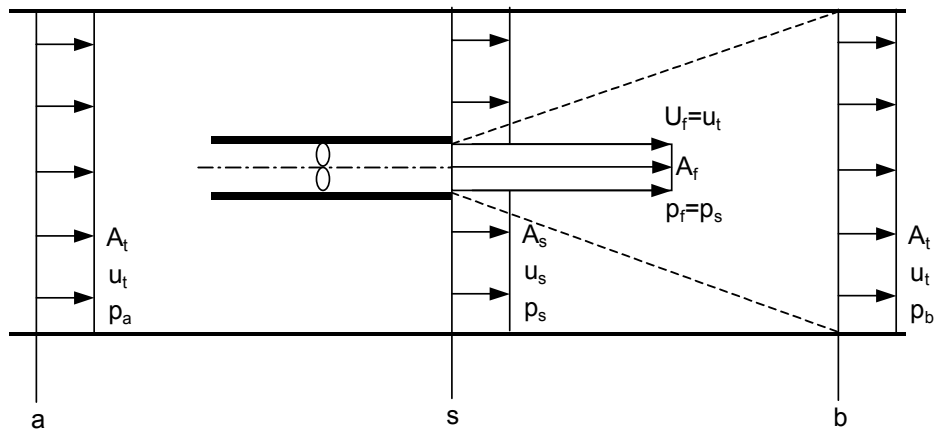
11.2.1 Theorie van stuwdrukverhoging door een aanjaagventilator

In dit hoofdstuk wordt een theoretische beschrijving gegeven van de werking van een enkele aanjaagventilator in een tunnel zonder wandwrijving. De drukverhoging door de aanjaagventilator wordt afgeleid uit:

- de continuïteitsvergelijking (behoud van massa)
- de momentumvergelijking (behoud van impuls)
- de wet van Bernoulli

De situatie is schematisch weergegeven in Figuur 11–4. Hierbij worden twee stappen onderscheiden:

- van doorsnede a naar doorsnede s, waarbij instroming in de aanjaagventilator plaatsvindt en nog geen impulsoverdracht op de luchtstroming in de tunnel;
- van doorsnede s naar doorsnede b, waarbij de drukverhoging plaatsvindt.



Figuur 11–4: Aanjaagventilator in een tunnel

In het gebied van doorsnede a tot doorsnede s geldt met toepassing van de continuïteitsvergelijking bij gelijkblijvende dichtheid:

$$Q_t = A_t u_t = A_f u_f + (A_t - A_f) u_s$$

en met de wet van Bernoulli:

$$p_{a,tot} = p_a + \frac{1}{2} \rho u_t^2$$

$$p_{s,tot} = p_s + \frac{1}{2} \rho u_s^2$$

$$p_{f,tot} = p_f + \frac{1}{2} \rho u_f^2$$

Omdat geldt dat de totale druk in doorsnede a en s gelijk is, kan worden geschreven:

$$p_{a,tot} = p_{s,tot} \Rightarrow p_s - p_a = \frac{1}{2} \rho (u_t^2 - u_s^2)$$

In het gebied van doorsnede s tot doorsnede b wordt verondersteld dat de straal van de aanjaagventilator geheel is uitgewerkt en dat in doorsnede b net als in doorsnede a de luchtsnelheid opnieuw gelijkmatig is verdeeld.

Op basis van de momentumvergelijking kan worden bepaald:

$$(p_b - p_s)A_t = \rho Q_f u_f + \rho Q_s u_s - \rho Q_t u_t$$

Hierbij wordt aangenomen dat tussen de doorsneden s en b geen andere invloeden gelden, zoals wandwrijving. Ook wordt aangenomen dat tussen doorsnede s en b geen temperatuurverandering optreedt en de drukverschillen niet leiden tot wezenlijke compressie van de lucht, zodat de dichtheid constant wordt verondersteld. Er is gebruik gemaakt van het gegeven dat de statische drukken p_s en p_f aan elkaar gelijk zijn omdat anders een stroming dwars op de uitblaasmond van de aanjaagventilator zou ontstaan die er in werkelijkheid niet is.

Met gebruikmaking van de eerder genoemde formules kan dit worden geschreven als:

$$p_b - p_a = \rho \frac{A_f}{A_t} u_f^2 + \rho \left(\frac{A_t - A_f}{A_t} \right) u_s^2 - \frac{1}{2} \rho (u_t^2 + u_s^2)$$

In deze formule kan u_s worden weggewerkt met behulp van de continuïteitsvergelijking. Het is echter handiger om te stellen dat

$$\psi = u_t / u_f \quad \text{en} \quad \alpha = A_j / A_t$$

waarmee

$$\frac{u_s}{u_j} = \frac{(\psi - \alpha)}{(1 - \alpha)}$$

en

$$p_b - p_a = \frac{2\alpha(1 - \psi)}{\psi^2} \cdot \frac{[1 - \frac{1}{2}\alpha(3 - \psi)]}{(1 - \alpha)^2} \cdot \frac{1}{2} \rho u_t^2$$

In de meeste gevallen is α zeer klein. Zelfs bij een cluster van 5 ventilatoren met elk een diameter van 710 mm, en een tunneldoorsnede van $5 \times 10 \text{ m}^2$ is α niet groter dan 0,04.

De waarde van ψ ligt tussen 0,05 en 0,1 bij veel voorkomende tunnelluchtsnelheden van circa 2 – 4 m/s en uitblaassnelheden van een aanjaagventilator van 30 – 40 m/s. Er kan worden aangetoond dat de termen α en ψ met behoud van voldoende nauwkeurigheid kunnen worden teruggebracht tot

$$p_b - p_a = \frac{2\alpha}{\psi^2} \cdot \frac{1}{2} \rho u_t^2$$

Hieruit kunnen de volgende gegevens worden afgeleid:

- De drukverhoging neemt kwadratisch toe met de uitblaassnelheid van de aanjaagventilator.
- De drukverhoging neemt lineair toe met de doorsnede van de aanjaagventilator.

- Een wijziging van de uitblaassnelheid moet gecompenseerd worden met het kwadraat van de doorsnede bij gelijkblijvende drukverhoging.

11.2.2 Keuze van de uitblaassnelheid en het vermogensverbruik

Het vermogen in de luchtstroom die de aanjaagventilator verlaat wordt slechts voor een deel op de luchtstroom in de tunnel overgedragen. Een groot deel van het vermogen gaat verloren in wrijving en werveling tussen de luchtstroom met hoge snelheid en de luchtstroom met lage snelheid. Deze wrijving en werveling wordt in principe omgezet in warmte. De temperatuurstijging is echter zo klein (0,05 – 0,1 °C) dat het nooit mogelijk is geweest deze in de praktijk te meten.

Het verlies aan vermogen kan worden uitgedrukt in een energierendement. Met behulp van de formule voor behoud van energie

$$P_{tot} = \dot{M} \left[\frac{P}{\rho} + \frac{1}{2} u^2 + c_v T \right] = constant$$

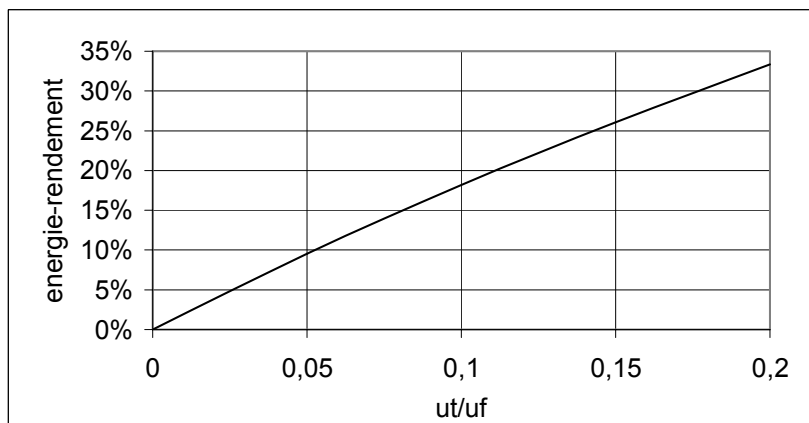
kan worden afgeleid dat

$$\eta_{mix} = \frac{P_b - P_a}{P_f} = \frac{2\psi [1 - \frac{1}{2}\alpha(3 - \psi)]}{[1 + \psi - 2\alpha]}$$

Omdat α en ψ in de praktijk klein zijn mag worden geschreven

$$\eta_{mix} = \frac{2\psi}{1 + \psi}$$

In Figuur 11-5 zijn waarden van η_{mix} gegeven voor enige verhoudingen van $\psi = u_t/u_f$.



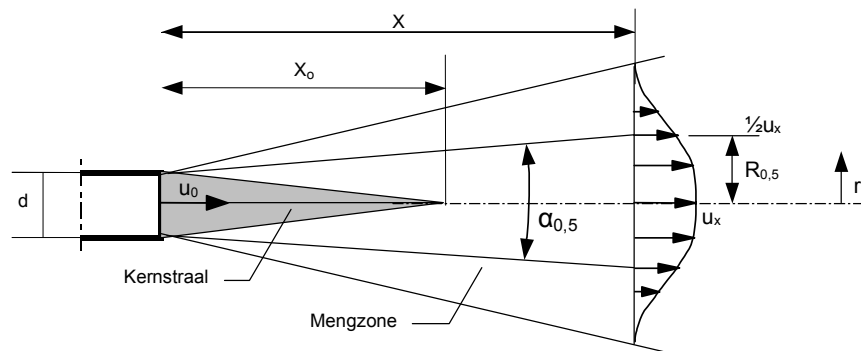
Figuur 11-5: η_{mix} als functie van $\psi = u_t/u_f$

Bij veel voorkomende verhoudingen van $\psi = 0,05 - 0,10$ blijkt dus dat veel energie verloren gaat in wrijving en werveling. Lagere uitblaassnelheden leiden tot een betere benutting van de door de aanjaagventilatoren geleverde energie. Daar staat tegenover dat een lagere uitblaassnelheid ook veel minder drukverhoging levert, waardoor meer aanjaagventilatoren nodig zijn.

Bij het ontwerp van een langsventilatiesysteem moet een optimum worden gevonden tussen enerzijds beperking van het aantal aanjaagventilatoren en dus hoge uitblaassnelheden, en anderzijds een beperking van de benodigde energie door niet al te hoge uitblaassnelheden, waarvoor meer ventilatoren nodig zijn.

11.2.3 Straaluitbreiding

In Figuur 11-6 is de straaluitbreiding van een aanjaagventilator weergegeven.



Figuur 11-6: Uitblaaspatroon aanjaagventilator

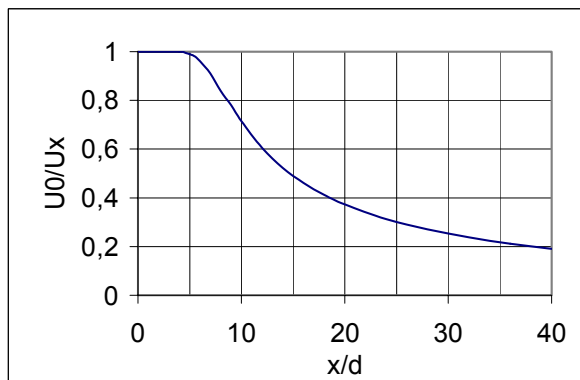
Gebaseerd op een isotherme situatie (zonder verandering van temperatuur) en een ronde, onbelemmerde uitlaat, blijft de snelheid u_0 in de hartlijn van de uitlaatopening nog over een zekere afstand x_0 constant.

Deze afstand bedraagt, afhankelijk van de mate van turbulentie,

$$x_0 = 4,25 \cdot d$$

met d als de diameter van de aanjaagventilator.

Verderaf van de aanjaagventilator wordt de primaire lucht met de tunnellucht gemengd en zal de snelheid afnemen. De afname van de snelheid op de lengteas van de uitblaasopening is weergegeven in Figuur 11-7.



Figuur 11-7: Afname van de snelheid op de lengteas

Vanaf $x/d = 10$ kan de grafiek in Figuur 11-7 benaderd worden door de volgende formule:

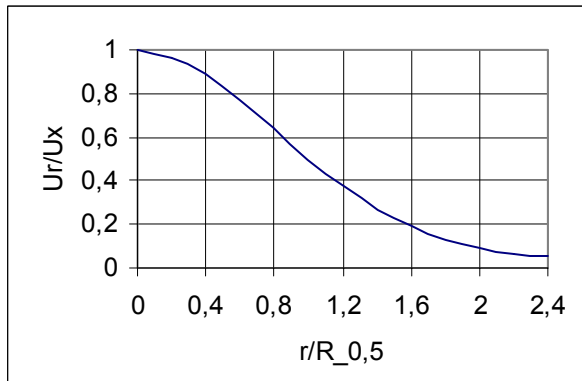
$$\frac{u_x}{u_o} = \frac{1}{0,128\left(\frac{x-x_0}{d}\right) + 0,663}$$

De uitblaaskegel van een jetstraal wordt vanaf $x/d = 10$ gedefinieerd door:

- de straal $R_{0,5}$ waar de snelheid de helft is van de snelheid u_x volgens

$$\frac{R_{0,5}}{d} = 0,08\left(\frac{x-x_0}{d}\right) + 0,39$$

- de snelheidsverdeling u_r als functie van de afstand r tot de lengteas volgens Figuur 11-8.



Figuur 11-8: De snelheidsverdeling als functie van de afstand r tot de lengteas

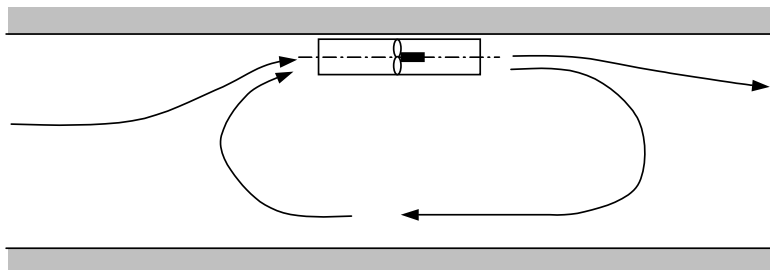
Op een afstand $2 \times b_{0,5}$ vanaf de lengteas is de snelheid nog maar 10% van de snelheid u_x .

Uit de formules en de grafieken kan worden afgeleid dat de tophoek $\alpha_{0,5}$ van de kegel, waarbij de uitblaassnelheid u_r de helft van de snelheid u_x op de lengteas is, circa 10° bedraagt. De tophoek van de kegel, waarbij de snelheid u_x 10% van de snelheid u_x is, bedraagt circa 20° .

Dit illustreert waarom afbuigspoepen een afbuighoek van maximaal 12° moeten realiseren.

11.2.4 Terugstroming en kortsluiting

Als de opbrengst van een aanjaagventilator of een groep van aanjaagventilatoren in een tunnelbuis groter is dan de luchtstroming in de tunnel, zal terugstroming optreden.



Figuur 11-9: Terugstroming onder een aanjaagventilator

De mate van terugstroming wordt gegeven door het zogenaamde getal van Craya-Curtet (oorspronkelijk afgeleid ten behoeve van optimale menging van vloeibare brandstof en lucht in een energiecentrale):

$$C_t = \frac{\psi - \alpha}{\sqrt{\alpha(1 - \psi)}}$$

Bij waarden van C_t groter dan 1 treedt geen terugstroming op. Bij waarden kleiner dan 0,7 treedt zeer waarschijnlijk terugstroming op.

Als een langsventilatiesysteem in een tunnel wordt opgestart terwijl de lucht in de tunnel nog stilstaat of instroomt tegen de ingestelde werkingsrichting, kan terugstroming in het begin nooit worden voorkomen. Door de werking van de aanjaagventilatoren zal de luchtstroom na enige tijd op gang komen waardoor in principe geen terugstroming meer mag optreden.

Opmerking: In de stationaire bedrijfssituatie mag geen terugstroming optreden. Bij brand zou dit immers betekenen dat rook over het wegdek terugstroomt op een niveau waar personen aanwezig kunnen zijn!

Voor aanjaagventilatoren bij het ingangsportaal geldt een andere benadering. Deze ventilatoren zuigen lucht uit de omgeving aan, en niet uit de luchtstroming door de tunnel. In de stationaire situatie moet worden voorkomen dat de totale luchtstroom door de aanjaagventilatoren groter is dan de luchtstroom in de tunnel, ofwel bij een aantal van N aanjaagventilatoren in de ingang moet gelden:

$$\sum_N Q_f < Q_t$$

11.3 Luchtkwaliteit

11.3.1 Soorten emissies

Ten behoeve van de beoordeling van de gezondheidsrisico's wordt over het algemeen gekeken naar de volgende, door motorvoertuigen uitgestoten stoffen:

- Stikstofdioxide (NO₂)
- Koolmonoxide (CO)
- Benzeen (C₆H₆)
- Benzapreen (BaP)
- Zwaveldioxide (SO₂)
- Ozon (O₃)
- Lood (Pb)
- Fijn stof (PM10)

Bij luchtverontreiniging wordt onderscheidt gemaakt tussen *acute* toxiciteit, dat wil zeggen effecten die binnen een beperkte tijdperiode optreden als gevolg van een kortdurende blootstelling, en *chronische* toxiciteit (waaronder kankerverwekkendheid) als gevolg van langdurige blootstelling aan betrekkelijk lage concentraties.

Een direct verband tussen de concentraties stoffen met chronische toxiciteit en de effecten op de mens is meestal moeilijk te vinden. De oorzaken van ziekten zijn zeer complex en vaak zijn er meer factoren bij betrokken. Omdat uitlaatgassen een groot aantal verbindingen bevatten, de effecten vaak a-specifiek zijn (niet terug te voeren op één enkele verbinding) en sommige stoffen elkaar's werking versterken of verzwakken, is het moeilijk de specifieke uitwerking van uitlaatgassen op de mens vast te stellen.

Van de onderstaande stoffen is de volgende werking bekend:

- NO₂ : bij langdurige blootstelling aan beperkte concentraties volgt toeneming van de ademweerstand, chronische bronchitis, verlies van longelasticiteit en afnemende weerstand tegen infecties van het longweefsel.
- CO : belemmert de opname van zuurstof in het bloed doordat het zich bindt aan hemoglobine. De werking is acuut en leidt bij hoge concentraties tot de dood.
- C₆H₆ : is kankerverwekkend en speelt een rol bij het ontstaan van leukemie. Hoge concentraties kunnen leiden tot chromosoomafwijkingen.
- BaP : is carcinogeen en veroorzaakt onder andere de vorming van longtumoren. Het wordt representatief geacht voor de polycyclisch aromatische koolwaterstoffen.
- SO₂ : kan in combinatie met fijn stof en water leiden tot afzetting van zeer fijne zwavelzuurdruppeltjes op de stofdeeltjes in de lucht. Dit prikkelt de slijmvliezen en tast het reinigend vermogen van de luchtwegen aan.
- Lood : remt in het algemeen aanmaak van hemoglobine en kan schade veroorzaken aan nieren en het centrale zenuwstelsel. Het kan bij jonge kinderen leiden tot hersenafwijkingen en kan bij ongeboren kinderen schadelijke effecten uitoeven op het zenuwstelsel en de bloedaanmaak.
- Ozon : bij langdurige blootstelling volgt afname van de longfunctie, wat gepaard gaat met ontstekingsreacties, hyperactiviteit en verandering in de zelfreinigende werking van de longen, toeneming van de frequentie en ernst van klachten bij personen met hart- en longaandoeningen, symptomen als oog-,

neus- en keelirritaties, hoesten, pijn op de borst, kortademigheid, hoofdpijn, misselijkheid en duizeligheid. Na afloop van een periode met verhoogde ozonconcentraties (zomersmog) treedt waarschijnlijk volledig herstel op. Bij herhaalde blootstelling moet in principe rekening worden gehouden met blijvende veranderingen in de longfunctie.

PM10 : bestaat uit een samenstel van verschillende stofdeeltjes met afmetingen tussen 1 en 10 micrometer, waarop andere stoffen zoals SO₂ en zouten in de lucht zich kunnen vastzetten. Het tast bij langdurige blootstelling de longfunctie aan. Roet – dat voornamelijk bestaat uit kleine koolstofdeeltjes – vormt een onderdeel van fijn stof.

In de praktijk blijken voor de luchtkwaliteit alleen de volgende stoffen van belang:

- Buiten de tunnel zijn alleen de concentraties NO_x en fijn stof (PM10) van belang. De andere stoffen worden in dusdanig kleine hoeveelheden uitgestoten dat de toelaatbare concentraties nooit worden overschreden.
Bij NO_x moet worden opgemerkt dat de schadelijke component NO₂ is. In uitlaatgassen is de hoeveelheid NO₂ 5-10% van de totale NO_x-uitstoot, maar onder invloed van ozon (O₃) wordt een deel van het aanwezige NO omgezet tot NO₂. De hoeveelheid NO₂ kan hierdoor meer dan verdubbelen. Bij het bepalen van de buitenluchtkwaliteit buiten de tunnel moet met deze omzetting rekening worden gehouden.
- Binnen de tunnel kan de emissie van CO en NO₂ in verband met gezondheidsrisico's van belang zijn. Fijn stof (PM10) levert binnen een tunnel geen gezondheidsrisico op, maar kan wel van belang zijn in verband met zichtcondities.

De andere voertuigemissies zijn onder de huidige Europese regelgeving voor automotoren zo laag dat ze bij het beoordelen van luchtverontreiniging door wegverkeer geen rol van betekenis spelen.

11.3.2 Grenswaarden

De grenswaarden voor de luchtkwaliteit in en buiten een tunnel zijn vastgesteld op grond van de volgende richtlijnen en regelgeving:

- Europese richtlijn 96/62/EG inzake de beoordeling en het beheer van luchtkwaliteit
- Europese dochterrichtlijn 1999/30/EG
- Nederlandse wetgeving afgeleid van de Europese richtlijnen
- De MAC-waarden geldig voor arbeidshygiëne (uitgegeven door Ministerie van VROM)
- PIARC-aanbeveling 1999, Werkgroep 2 Pollution, Ventilation and Environment
- Richtlijnen World Health Organisation (Wereld Gezondheidsorganisatie WHO)

De grenswaarden gelden veelal voor luchtkwaliteit buiten bouwconstructies en niet boven de rijbaan.

De MAC-waarden gelden op alle locaties waar arbeid wordt verricht, zowel binnen al buiten bouwconstructies.

Nederlandse wetgeving

stofsoort	Buitenlucht, niet boven de rijbaan van wegen	
NO ₂	Jaargemiddelde concentratie	40 µg/m ³
	Daggemiddelde concentratie	200 µg/m ³ overschrijding maximaal 18x/jaar
	Uurgemiddelde concentratie	350 µg/m ³ overschrijding maximaal 18x/jaar
	Alarmdrempel	400 µg/m ³ 3 uur achtereenvolgens op 100 km ² of binnen agglomeratie
PM10	Jaargemiddelde concentratie	40 µg/m ³
	Daggemiddelde concentratie	50 µg/m ³ overschrijding maximaal 35x/jaar
CO	Gemiddeld dagelijks maximum over 8 uur	10.000 µg/m ³

MAC-waarden

Stofsoort	concentraties bij een blootstelingsduur van 8 uur
NO ₂	3.760 µg/m ³ (2 ppm)
PM10	5.000 µg/m ³
CO	29.000 µg/m ³

De waarden gelden voor gemiddeld genomen gezonde werknemers en zijn niet geldig voor kinderen, zieken en oudere personen. Ook mogen de waarden niet worden toegepast op blootstelling gedurende 24 uur per dag.

PIARC

Door Werkgroep 2 Pollution, Ventilation and Environment van de PIARC-commissie C5 Tunnels is in 1999 een maximale waarde voor de concentratie van NO₂ in tunnels voorgesteld en internationaal aanvaard als richtlijn. Deze waarde is 1 ppm ofwel maximaal circa 1.880 microgram/m³ op elke plaats in de tunnel.

Opmerking: Deze waarde is vastgesteld met in gedachten tunnels met dwarsventilatie zoals deze met name in de alpenlanden voorkomen. In tunnels met langsventilatie kan bij een gemiddelde concentratie van 1 ppm de concentratie bij het uiteinde van de tunnel gemakkelijk 2 ppm bedragen.

Opmerking: In de meeste lange alpentunnels, waarvan de ventilatie vanwege de reeds lange levensduur niet is uitgelegd op de huidige verkeersintensiteit, komen de gemeten concentraties NO₂ zelden uit boven de 500 µg/m³.

Door Werkgroep 2 Pollution, Ventilation and Environment van de PIARC-commissie C5 Tunnels is in 2003 een nieuwe aanbeveling uitgegeven met de maximale concentraties voor CO en zicht volgens de hierna volgende tabel.

Verkeerssituatie	CO-concentratie		Zicht	
	Ontwerpjaar		lichtextinctie k	Transmissie (referentie lengte:100 m)
	1995	2010		
	ppm	ppm	$10^{-3} \cdot m^{-1}$	%
Rijdend verkeer 50 – 100 km/h	100	70	5	60
Dagelijks fileverkeer met stilstand op alle rijstroken	100	70	7	50
Exceptioneel fileverkeer met stilstand op alle rijstroken	150	100	9	40
Werkzaamheden in de tun- nel met rijdend verkeer	30	20	3	75
Tunnelsluiting	250	200	12	30

World Health Organisation

Maximale concentraties:

NO ₂	Gedurende 1 uur	200 µg/m ³
CO	Gedurende 15 minuten	100.000 µg/m ³
	Gedurende 30 minuten	60.000 µg/m ³
	Gedurende 1 uur	30.000 µg/m ³
	Gedurende 8 uur	10.000 µg/m ³

Analyse van de gegevens

Voor situaties binnen de tunnel zijn voor weggebruikers geen directe richtlijnen gegeven. De Europese wetgeving en ook het Besluit Luchtkwaliteit zijn hier niet van toepassing. Wel moeten de arbeidsomstandigheden voor hulpverleners in een tunnel voldoen aan de MAC-waarden.

Voor weggebruikers geldt in principe de waarde zoals deze door PIARC is geadviseerd, maar voor zeer kortstondige blootstelling bij normaal rijdend verkeer kan in de tunnelbuis de dubbele waarde worden toegelaten. Daarbij geldt de redenering dat kortstondige concentratieverhogingen in de tunnel binnen de auto niet of nauwelijks worden opgemerkt.

Voor NO₂ bij arbeidsomstandigheden geldt dat bij een concentratie van 1 ppm de werkzaamheden in principe moeten worden gestaakt, en dat bij 2 ppm gevaar voor de gezondheid ontstaat. Aangezien weggebruikers in de auto niets merken van kortstondige piekwaarden, lijkt het redelijk om in de tunnel hoge concentraties toe te laten wanneer weggebruikers daar zeer kort verblijven. Conform de aanbeveling van PIARC wordt aanbevolen een waarde van 1880 µg/m³ ofwel 1 ppm te hanteren.

Uit onderzoek blijkt dat bij een blootstelling van 15 – 30 minuten aan verhoogde concentraties NO₂ (tot circa 300 microgram/m³), bij personen met een allergische of astmatische aanleg na enkele uren reacties optreden. Deze reacties bestaan uit hoesten, het gevoel “minder lucht te hebben” en hoofdpijn.

Aan de hand van kengetallen voor voertuigemissies blijkt dat wanneer de tunnelventilatie wordt uitgelegd op de concentratie NO₂ zoals voorgesteld door PIARC, de concentraties CO en PM10 altijd beneden de grenswaarden liggen die door MAC en WHO worden gehanteerd.

Ter completering worden de waarden voor CO en PM10 gegenereerd op basis van MAC en WHO:

CO: Voor weggebruikers kan vanwege de verblijfsduur voor rijdend verkeer geen waarde worden gegeven. Als weggebruikers vanwege stagnatie slechts enkele minuten in de tunnel verblijven is ook geen waarde te geven, maar als de verblijfsduur meer dan 5 minuten wordt, lijkt de waarde volgens de WHO voor 15 minuten ($100.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$) redelijk. Omdat binnen de auto meestal een hogere concentratie wordt waargenomen, is de waarde echter van 100.000 tot $40.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ verlaagd.

Voor hulpverleners stelt de MAC-lijst dat gedurende 8 uur de gemiddelde waarde niet hoger dan $29.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mag zijn. Volgens de WHO mag gedurende 15 minuten de concentratie niet hoger dan $100.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zijn. Volgens het Besluit Luchtkwaliteit mag gedurende een willekeurige periode van 8 uur de concentratie niet hoger zijn dan $10.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Het lijkt niet onredelijk om incidenteel gedurende een uur $40.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ toe te laten voor de gemiddelde bevolking.

PM10: Voor weggebruikers kan vanwege de korte verblijfsduur voor rijdend verkeer geen waarde worden gegeven. Indien weggebruikers vanwege stagnatie slechts enkele minuten in de tunnel verblijven is ook geen waarde te geven, maar als de verblijfsduur meer dan 5 minuten wordt, lijkt de waarde volgens de MAC-lijst ($5.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$) redelijk. Deze waarde geldt weliswaar voor een periode van 8 uur, maar het is niet bekend of de concentratie fijn stof evenredig met de blootstellingsduur mag worden gevarieerd. Hetzelfde geldt voor hulpverleners, zodat ook voor hen de MAC-waarde is aangehouden ongeacht de blootstellingsduur. (In Kivi-1991 werden andere waarden genoemd zonder dat daarvoor een onderbouwing werd gegeven).

11.3.3 Datasets kengetallen voor uitlaatgasemissies

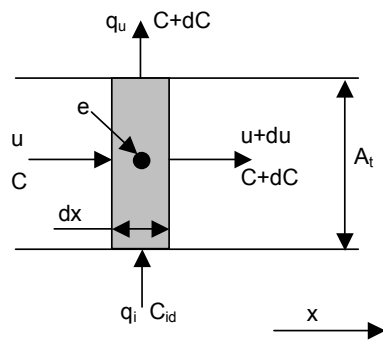
Voor deze Aanbevelingen is een studie verricht waarbij in Europa beschikbare datasets van de emissieproductie door voertuigen met elkaar zijn vergeleken. Afgezien van de grootte van de emissiekengetallen hebben de datasets – die worden gebruikt voor open wegen – een structuur die niet geschikt is voor het berekenen van de emissieconcentratie in tunnels of in de directe nabijheid daarvan.

Voor tunnels is de meest recente en bruikbare dataset voor de stoffen CO, NO_x en PM10 gepubliceerd door PIARC in 2004 (PIARC Road Tunnels: Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation (2004)). In deze dataset wordt gebruik gemaakt van tabellen met emissiefactoren en invloedsfactoren. De basisgegevens hiervoor zijn ontleend aan gezamenlijk onderzoek op Europees niveau en aan onderzoeksresultaten uit onder meer Oostenrijk, Zwitserland en Nederland.

11.3.4 Bepaling van de emissieconcentratie in de tunnel

Opstelling differentiaalvergelijking

Veronderstel een element met lengte dx in de tunneldoorsnede zoals aangegeven in Figuur 11-10.



Figuur 11–10: Opstellen emissiebalans

In deze figuur is:

- x = plaats in lengte richting
- u = de luchtsnelheid in de tunnel (als functie van x)
- C = de concentratie in de tunnel (als functie van x)
- q_i = met dwarsventilatie ingeblazen hoeveelheid lucht per lengte [$m^3/s.m$]
- q_u = met dwarsventilatie afgezogen hoeveelheid lucht per lengte [$m^3/s.m$]
- e = toevoeging emissie aan de luchtstroom per lengte [$gr/s.m$]
(e wordt constant verondersteld over de beschouwde lengte)
- C_{id} = de concentratie reeds aanwezig in de ingeblazen lucht [gr/m^3]

Uit de volumebalans volgt:

$$A_t \frac{du}{dx} = q_i - q_u$$

Uit de emissiemassabalans volgt:

$$A_t u \frac{dC}{dx} + q_i C = e + q_i C_{id}$$

Oplossing van de volumebalans leidt tot:

$$u(x) = \frac{q_i - q_u}{A_t} x + u(0) \text{ met } u(0) = \text{luchtsnelheid voor } x = 0$$

Hiermee gaat de emissiemassabalans over in de algemene differentiaal vergelijking voor de concentratie:

$$\left[(q_i - q_u)x + Q_0 \right] \frac{dC}{dx} + q_i C = e + q_i C_{id} \quad \text{waarbij} \quad Q_0 = u(0) \cdot A_t$$

Hierin is:

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

De oplossing van de differentiaalvergelijking hangt af van de situatie. De volgende situaties kunnen optreden.

Situatie 1: Uitsluitend langsventilatie

In dat geval is $q_i = q_u = 0$.

Er wordt aangenomen dat er langsventilatie optreedt in de rijrichting door rijwind of door mechanische ventilatie.

De vergelijking gaat over in:

$$Q_0 \frac{dC}{dx} = e$$

De oplossing is:

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

waarbij:

C_a = de achtergrondconcentratie buiten de tunnel

De maximale concentratie treedt op aan het einde van de tunnel voor $x = L$.

Opmerking: Door windinvloed kan de stroming tegengesteld aan de rijrichting zijn. In dat geval moet $x = 0$ aan het einde van de tunnel worden genomen en neemt x toe van het uitgangsportaal naar het ingangsportaal.

Situatie 2: dwarsventilatie met $q_u = q_i$

Wanneer wordt aangenomen dat er geen langsventilatie optreedt in de rijrichting door rijdend verkeer of windinvloeden op de tunnelportalen is $Q_0 = 0$. In dat geval gaat de differentiaalvergelijking over in:

$$C = \frac{e}{q_i} + C_{id}$$

De concentratie is dan constant over de hele tunnellenkte.

Wanneer er wel een stroming optreedt in de rijrichting vanwege rijdend verkeer of windinvloeden op de tunnelportalen is $Q_0 > 0$. In dat geval gaat de differentiaalvergelijking over in:

$$Q_0 \frac{dC}{dx} + q_i C = e + q_i C_{id}$$

De oplossing is:

$$C(x) = \left(\frac{e}{q_i} + C_{id} - C_a \right) \left[1 - e^{-\frac{q_i}{Q_0} x} \right] + C_a$$

Als C_{id} en C_a als verwaarloosbaar worden beschouwd, gaat de vergelijking over in:

$$C(x) = \frac{e}{q_i} \left[1 - e^{-\frac{q_i}{Q_0} x} \right]$$

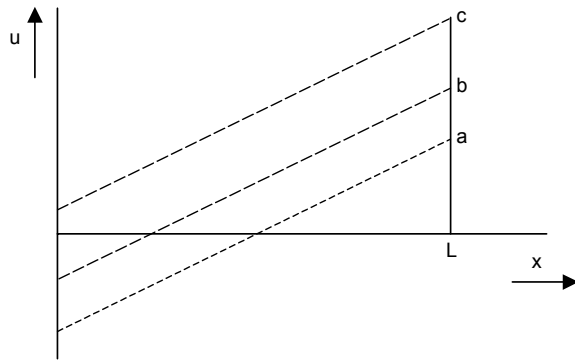
De maximale concentratie wordt gevonden voor $x = L$.

Opmerking: Net als bij situatie 1 kan door windinvloed de stroming tegengesteld aan de rijrichting zijn. In dat geval moet $x = 0$ aan het einde van de tunnel worden genomen en neemt x toe van het uitgangsportaal naar het ingangsportaal.

Situatie 3: dwarsventilatie met $q_u < q_i$

In deze situatie wordt minder afgezogen dan ingeblazen, dus in principe moet er lucht bij het ingangs- en uitgangsportaal naar buiten stromen. Het verloop van de luchtsnelheid in de langsrichting van de tunnel is weergegeven in Figuur 11–11:

- Als er geen extra stroming in langsrichting optreedt, ligt het nulpunt precies op de helft van de tunnallengte L (situatie 3a).
- Is er wel een extra langsstroming, dan verschuift de grafiek omhoog (situatie 3b).
- Bij relatief korte tunnels kan de situatie ontstaan dat bij het ingangsportaal lucht naar binnen stroomt in plaats van naar buiten (situatie 3c).



Figuur 11–11: Snelheid in langsrichting bij dwarsventilatie met $q_u < q_i$

In de situaties 3a en 3b wordt de concentratie in de tunnel in het geheel niet bepaald door de achtergrondconcentratie C_a . In situatie 3c moet wel rekening worden gehouden met C_a .

De differentiaalvergelijking kan worden geschreven als:

$$(Ax + B) \frac{dC}{dx} + C = K$$

met $A = \frac{q_i - q_u}{q_i}$ $B = \frac{Q_0}{q_i}$ $K = \frac{e}{q_i} + C_{id}$

De oplossing is dan:

$$C(x) = \frac{Z}{(Ax + B)^{\frac{1}{A}}} + K$$

De waarde van de constante Z is afhankelijk van de randvoorwaarden.

Voor situatie 3a en 3b geldt dat $u(0) < 0$ m/s. Er zijn dan twee mogelijkheden:

- Er stroomt zowel bij het ingangs- als het uitgangsportaal lucht naar buiten. De minimum concentratie wordt dan gevonden op het punt waar $u(x) = 0$, ofwel voor die x is $dC/dx = 0$.
Uitgewerkt leidt dit tot:

$$\frac{dC}{dx} = ZA(Ax + B)^{\frac{1}{A}-1} = 0 \quad \text{ofwel} \quad Z = 0$$

De concentratie is dus in de hele tunnel constant en gelijk aan:

$$C = \frac{e}{q_i} + C_{id}$$

- Er stroomt bij het uitgangsportaal lucht naar binnen, ofwel $C(L) = C_a$. Dat is dezelfde situatie als 3c echter de oorsprong met $x = 0$ ligt dan bij het uitgangsportaal.

In situatie 3c is $u(0) > 0$ m/s waardoor $C(0) = C_a$. De oplossing van de vergelijking is dan:

$$C(x) = K - (K - C_a) \left[\frac{Ax + B}{B} \right]^{\frac{1}{A}}$$

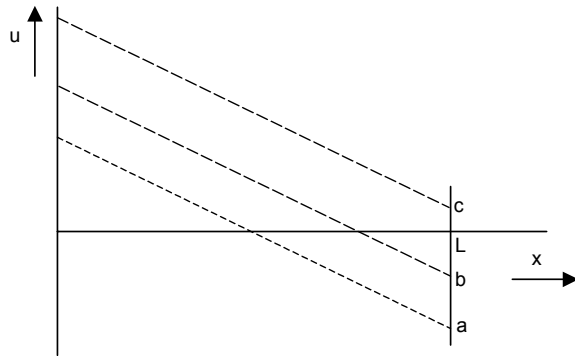
Dit kan worden geschreven als:

$$C(x) = \left(\frac{e}{q_i} + C_{id} - C_a \right) \left[1 - \left\{ \frac{Q_0}{(q_i - q_u)x + Q_0} \right\}^{\frac{q_i}{q_i - q_u}} \right] + C_a$$

Situatie 4: dwarsventilatie met $q_u > q_i$

In deze situatie wordt meer afgezogen dan ingeblazen, dus in principe moet er lucht bij het ingangs- en uitgangsportaal naar binnen stromen. Het verloop van de luchtsnelheid in langsrichting in de tunnel is weergegeven in Figuur 11-12:

- Als er geen extra stroming in langsrichting optreedt, ligt het nulpunt precies op de helft van de tunnallengte L (situatie 4a).
- Is er wel een extra stroming in langsrichting, dan verschuift de grafiek omhoog (situatie 4b).
- Bij relatief korte tunnels kan de situatie ontstaan dat bij het uitgangsportaal lucht naar buiten stroomt in plaats van naar binnen (situatie 4c).



Figuur 11-12: Snelheid in langsrichting bij dwarsventilatie met $q_u > q_i$

Net als in situatie 3 kan de differentiaalvergelijking worden geschreven als:

$$(Ax + B) \frac{dC}{dx} + C = K$$

met $A = \frac{q_i - q_u}{q_i}$ en $B = \frac{Q_0}{q_i}$ en $K = \frac{e}{q_i} + C_{id}$

De oplossing is dan:

$$C(x) = \frac{Z}{(Ax + B)^{\frac{1}{A}}} + K$$

De waarde van de constante Z is afhankelijk van de randvoorwaarden.

In alle gevallen geldt dat voor $x = 0$ de concentratie $C(0) = C_a$. Die situatie is identiek aan situatie 3c, maar alleen in het gebied met $u(x) > 0$. In het gebied met $u(x) < 0$ moet de oorsprong bij het uitgangsportaal worden gelegd en loopt x de tunnel in.

Het concentratieverloop is:

$$C(x) = \left(\frac{e}{q_i} + C_{id} - C_a \right) \left[1 - \left\{ \frac{Q_0}{(q_i - q_u)x + Q_0} \right\}^{\frac{q_i}{q_i - q_u}} \right] + C_a$$

Wanneer u_{ini} is de snelheid in de tunnel zonder dwarsventilatie dan wordt de plaats waar $u(x) = 0$ gegeven door:

$$x(u = 0) = \frac{1}{2} L - \frac{u_{ini} A_t}{q_i - q_u}$$

Op die positie is de maximale concentratie:

$$C_{\max} = \frac{e}{q_i} + C_{id}$$

11.4 Aërodynamische kortsluiting bij tunnelportalen

In de loop der jaren is een aantal onderzoeken uitgevoerd naar aërodynamische kortsluiting bij tunnelportalen. In dit hoofdstuk worden de resultaten per onderzoek samengevat.

11.4.1 Buitenlands onderzoek in de jaren 1958, 1967 en 1979

Experimentelle Untersuchung des Strömungskurzschlusses zwischern einem Strassentunnel-Portal und einer Frischluft-Ansauhöffnung (1958)

Deze tunnel is voorzien van semi-dwarsventilatie, waarbij alleen lucht wordt ingeblazen, die vervolgens via de tunnelportalen ontwijkt. Het onderzoek betrof de eventuele kortsluiting tussen het tunnelportaal en een aanzuigrooster van het ventilatiesysteem boven het tunnelportaal. Zowel het tunnelportaal als het aanzuigrooster zijn gesitueerd in een bergwand, en bij het tunnelportaal zijn geen wanden aangebracht.

In een schaalmodel is de mate van kortsluiting onderzocht bij verschillende afstanden tussen aanzuigrooster en portaal, bij verschillende lichtsnelheden vanuit het portaal en bij toepassing van een luifel tussen tunnelportaal en het aanzuigrooster.

Vanzelfsprekend neemt de mate van kortsluiting af als afstand tussen portaal en aanzuigrooster toeneemt. Dit effect treedt vooral op als de aanzuigsnelheid groter is dan de uitstroomsnelheid. Is de uitstroomsnelheid uit het portaal groter dan de aanzuigsnelheid, dan heeft de afstand weinig invloed. Als de afstand groter is dan de hoogte van het portaal, is de kortsluiting te verwaarlozen, ongeacht de verhouding tussen aanzuigsnelheid en uitstroomsnelheid. Plaatsing van een luifel die langer is dan de hoogte van het tunnelportaal voorkomt kortsluiting bijna volledig.

De bovenstaande resultaten zijn gevonden zonder windinvloed. Vervolgens is de mate van kortsluiting onderzocht met windinvloed, waarbij de lucht verticaal opstijgt (te vergelijken met dwarswind bij 2 tunnelportalen naast elkaar en horizontale dwarswind). Een afstand van 10 – 20 meter tussen rooster en tunnelportaal, in combinatie met windsnelheden groter dan de uitstroomsnelheid uit het portaal, resulteert in een kortsluiting van 40 – 50% .

Uit dit onderzoek kan worden geconcludeerd dat aërodynamische kortsluiting zeker niet verwaarloosbaar is en dat afscherpende maatregelen effectief kunnen zijn.

Untersuchung des Kurzschluß-Luftstromes bei der Längsbelüftung von Straßentunneln (1967)

Doel van het onderzoek was het vaststellen van de invloed van een scheidingswand tussen twee naast elkaar gelegen tunnelbuizen op de mate van kortsluiting. In het onderzoek is een proef gedaan met een model met schaal 1:50 met 2 rechthoekige tunnelbuizen naast elkaar. De tunnelbuizen hebben elk 2 rijstroken. De tunnelportalen liggen naast elkaar. De afstand tussen de tunnelbuizen (hart op hart) is gevarieerd.

Er zijn 3 varianten onderzocht:

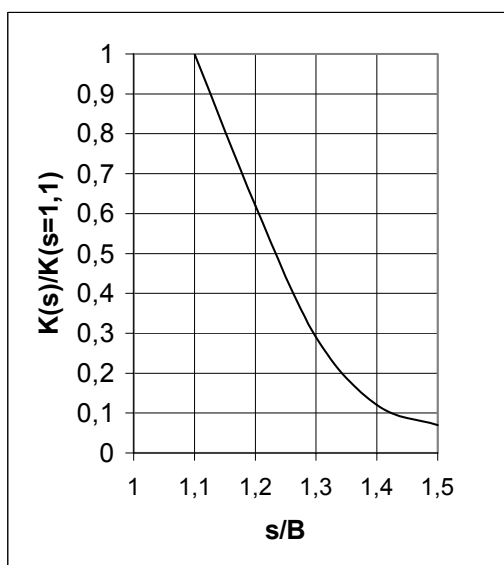
- Variant 1: een hellende toerit met rechte zijwanden tot op maaiveldniveau en het plafond van de tunnelbuizen op maaiveldniveau;
- Variant 2: een hellende toerit met rechte zijwanden tot 1,2x de tunnelhoogte boven maaiveldniveau en het plafond van de tunnelbuizen op maaiveldniveau;
- Variant 3: de tunnelportalen liggen op maaiveld niveau en er zijn geen zijwanden.

Hierbij zijn 3 typen scheidingswanden tussen de tunnelportalen beproefd: een driehoek en een rechthoek in verschillende afmetingen en een ronde vorm met een diameter iets groter dan de tunnelhoogte. De hoeveelheid stromende lucht bij in- en uitgangsportaal waren aan

elkaar gelijk en de temperatuur van de uitstromende lucht was 50 – 60 °C warmer dan de omgevingslucht en de instromende lucht.

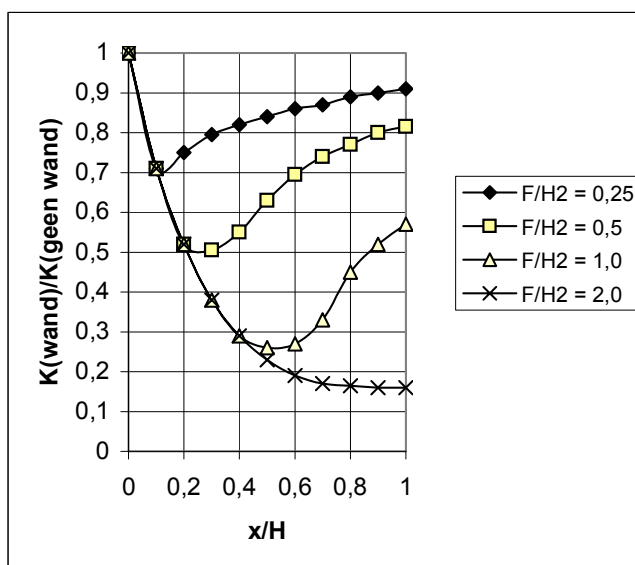
Uit de resultaten blijkt:

- Zonder een scheidingswand leidt variatie van de afstand hart op hart tussen de tunnelbuizen tot het resultaat als aangegeven in Figuur 11–13.
- Bij scheidingswanden lijkt niet zozeer de vorm maar meer het totale oppervlak en lengte van de scheidingswand van belang. Dit is te zien in Figuur 11–14, waarbij de afstand hart op hart tussen de tunnelportalen 1,1x de breedte van de tunnelbuis was.



Figuur 11–13 Invloed h.o.h. afstand tunnelbuizen op mate van kortsluiting

S = h.o.h. afstand tussen tunnelbuizen
K = mate van kortsluiting
B = tunnelbuisbreedte B



Figuur 11–14 Invloed van oppervlak scheidingswand met:

H = hoogte tunnelbuis
X = afstand zwaartepunt wand tot portaal
F = oppervlak scheidingswand
K = mate van kortsluiting

In het onderzoek is het volgende onderscheid gevonden tussen een verdiepte ligging en een maaiveldligging van tunnelportalen:

- Variant 1: kortsluitpercentage K = 16 – 18% zonder tussenwand en 17 – 19% met tussenwand
- Variant 2: kortsluitpercentage K = 18 – 21% ongeacht tussenwand
- Variant 3: kortsluitpercentage K = 13 – 15% met tussenwand

Zijwaartse afscherming lijkt volgens dit onderzoek een grotere invloed op kortsluiting te hebben dan de aanwezigheid van een tussenwand.

Air recirculation between tunnel portals (1979)

Doel van het onderzoek was het vaststellen van de mate van kortsluiting tussen twee naast elkaar gelegen tunnelbuizen. In het onderzoek is een proef gedaan met een model met schaal 1:50 met 2 hoefijzervormige tunnelbuizen naast elkaar. De tunnelbuizen hebben elk 2 rijstroken. De afstand hart op hart tussen de tunnelbuizen is 1,805 maal de hydraulische diameter. De tunnelportalen zijn opgenomen in een tamelijk groot terughellend vlak dat overeenkomt met een bergwand. Er zijn geen zijwanden langs de toerit.

Er zijn 3 varianten onderzocht:

- Variant 1: de tunnelportalen liggen naast elkaar;
- Variant 2: het ingangsportaal steekt over een lengte van 1,6x de hydraulische diameter uit ten opzichte van het uitgangsportaal;
- Variant 3: het ingangsportaal steekt over een lengte van 3,2x de hydraulische diameter uit ten opzichte van het uitgangsportaal.

Er is gemeten zonder wind en met dwarswind van uitgangs- naar ingangsportaal onder de hoeken 30°, 60° en 90°. De windsnelheid is gevarieerd tussen 0 en 3,5x de uitblaassnelheid uit het uitgangsportaal. De luchtstromingen bij in- en uitgangsportaal zijn onderling gevarieerd met een verhouding van q_{in}/q_{uit} tussen 0,4 en 2,6.

Uit de resultaten blijkt:

- Zonder wind is het recirculatiepercentage bij gelijke tunnelportalen circa 1% en wanneer het ingangsportaal uitsteekt ten opzichte van het uitgangsportaal circa 3%.
- Bij aanwezigheid van dwarswind van uitgangs- naar ingangsportaal is er altijd een aanzienlijke mate van kortsluiting, bij windsnelheden groter dan 0,5x de uitblaassnelheid uit de tunnel is het kortsluitpercentage steeds 30 – 40%, ongeacht de ligging van in- en uitgangsportaal ten opzichte van elkaar.
- Het kortsluitpercentage is niet afhankelijk van de verhouding q_{in}/q_{uit} .
- De grootste mate van kortsluiting treedt op bij een windhoek van 60° en niet bij 90°. Bij 0° is het kortsluitpercentage circa 7%, bij 30° circa 30%, bij 60° circa 50% en bij 90° circa 40%.

11.4.2 Onderzoek aan de Botlektunnel (1989 – 1990)

Kortsluitproblemen in de Botlektunnel – een voorstel tot nader onderzoek (1989)

In deze studie worden de resultaten van bovengenoemde onderzoeken besproken, en van twee andere onderzoeken uit Japan en Zwitserland. Het Japanse onderzoek uit 1965 betreft een soortgelijke proef als de 'Untersuchung des Kurzschluß-Luftstromes bei der Längsbelüftung von Straßentunneln' (zie hiervoor) en levert nagenoeg dezelfde resultaten op. Wel stellen de Japanners dat een hogere rookmuur meer effect heeft dan verondersteld in het Duitstalige onderzoek. Het Zwitserse onderzoek uit 1967 geeft aan dat uitritverlenging de mate van kortsluiting aanzienlijk vermindert. Als er ook zijwanden aanwezig zijn, is dit bij windstil niet het geval, maar zelfs bij een klein beetje wind is er al een gunstig effect.

De conclusies van deze studie zijn:

- Er is een typisch verschil tussen in- en uitstroming: bij instroming treden op korte afstand van de aanzuigopening grote dwarssnelheden op terwijl dat bij uitstroming juist niet het geval is.
- Recirculatie lijkt sterk te worden bepaald door geometrische details, zoals de ligging van in- en uitrit ten opzichte van elkaar, vormgeving van tunnelportalen, aanwezigheid van bouwkundige constructies en door een sterke wisselwerking tussen deze geometrische karakteristieken en de wind, waarbij de windrichting een hoofdrol speelt.
- Het lijkt niet moeilijk recirculatie bij windstil weer tot een verwaarloosbaar niveau te beperken: met vrij eenvoudige maatregelen, zoals een scheidingswand, kunnen al verbeteringen worden bereikt.
- De recirculatie onder invloed van wind is veel moeilijker te voorkomen, hetgeen verklaarbaar is gezien de eerder genoemde samenhang tussen geometrische details en optredende stroming rond de portalen.
- Verlenging van de uitrit ten opzicht van de inrit lijkt in ieder geval een effectieve remedie, maar het omgekeerde bleek bij de Schipholtunnel ook goed te werken.

Opmerking: Bij deze laatste conclusie moet worden opgemerkt dat bij de Schipholtunnel (in de oude situatie) de inrit meer dan 100 m uitstak ten opzichte van de uitrit vanwege het lichtrooster voor de inrit. Uit onderzoek blijkt juist dat een kleinere verspringing nauwelijks invloed heeft en zelfs negatief kan werken.

In de studie wordt verslag gedaan van metingen aan bestaande tunnels. Er zijn slechts sporadisch metingen gedaan en in de verslaglegging is de vorm en situatie van het tunnelportaal niet aangegeven. De gerapporteerde kortsluitpercentages variëren van 4 – 10%.

Windtunnelonderzoek naar aërodynamische kortsluiting nabij de portalen van een verkeerstunnel (1990)

Naar aanleiding van geconstateerde kortsluitproblemen bij de Botlektunnel is een modelonderzoek uitgevoerd met als doel oplossingen te vinden voor deze problemen. Bij het onderzoek zijn echter ook andere vormen van tunnelportalen onderzocht. Het onderzoek richtte zich vooral op kortsluiting tijdens de normale situatie, omdat de emissieconcentratie onacceptabele vormen aannam. Bij de modelproeven is daarom de temperatuur van de luchtstromen gelijk gehouden. Er is geen rekening gehouden met temperatuurverhoging door warme uitlaatgassen (dit is gezien de korte tunnallengte te verwaarlozen) en de invloed van opgewekte turbulentie door rijdend verkeer (dit zal kortsluiting enigszins verhogen). De atmosferische grenslaag komt overeen met een vrij glad aardoppervlak.

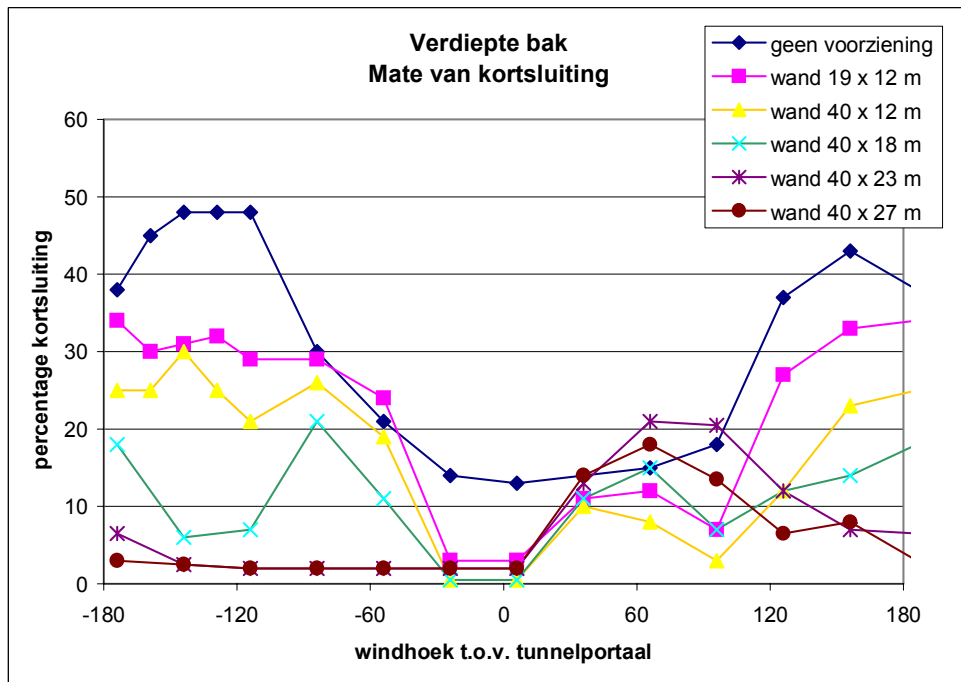
Er is gemeten aan een schaalmodel met schaal 1:200, waarbij 5 hoofdvormen zijn gebruikt:

- verzonken ligging t.o.v. maaiveld, loodrechte wanden langs de toerit van maximaal 17 m hoog
- verzonken ligging t.o.v. maaiveld, taluds langs de toerit
- half-verzonken ligging t.o.v. maaiveld, loodrechte wanden langs de toerit van maximaal 10 m hoog
- half-verzonken ligging t.o.v. maaiveld, taluds langs de toerit
- niet-verzonken ligging t.o.v. maaiveld, geen wanden of taluds

Bij de 5 hoofdvormen zijn verschillende scheidingswanden tussen in- en uitgangsportaal getest, evenals versprongen in- en uitgangsportalen. Ook is de invloed gemeten van een bedieningsgebouw op het tunnelportaal (in feite een extra hoge wand boven het tunnelportaal). De windrichting is in stappen van 30° over de windroos gevarieerd, en de windsnelheid en de luchtstroming in- en uit de tunnelportalen zijn gevarieerd.

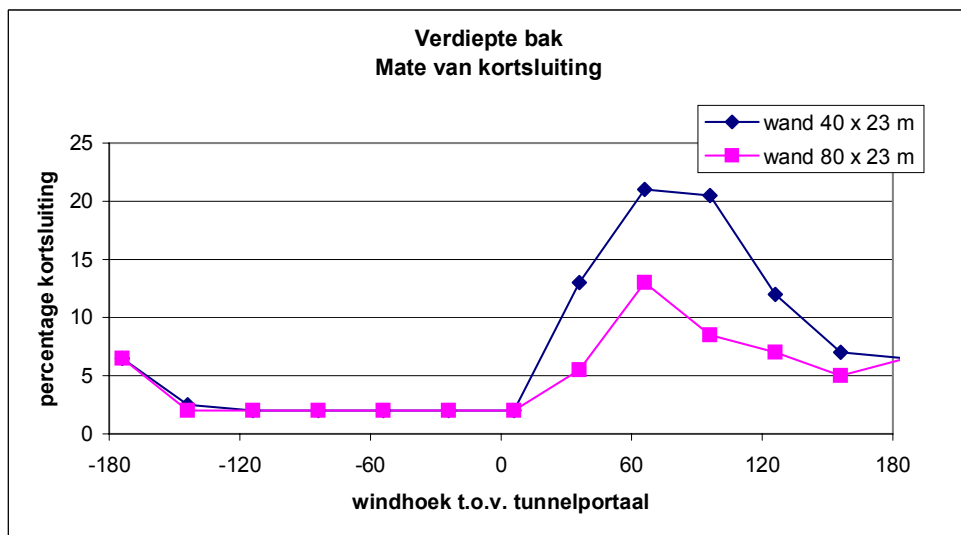
De resultaten van de metingen zijn in onderstaande grafieken weergegeven.

Onderzoeksresultaten 1990 voor een verdiepte bak met loodrechte zijwanden



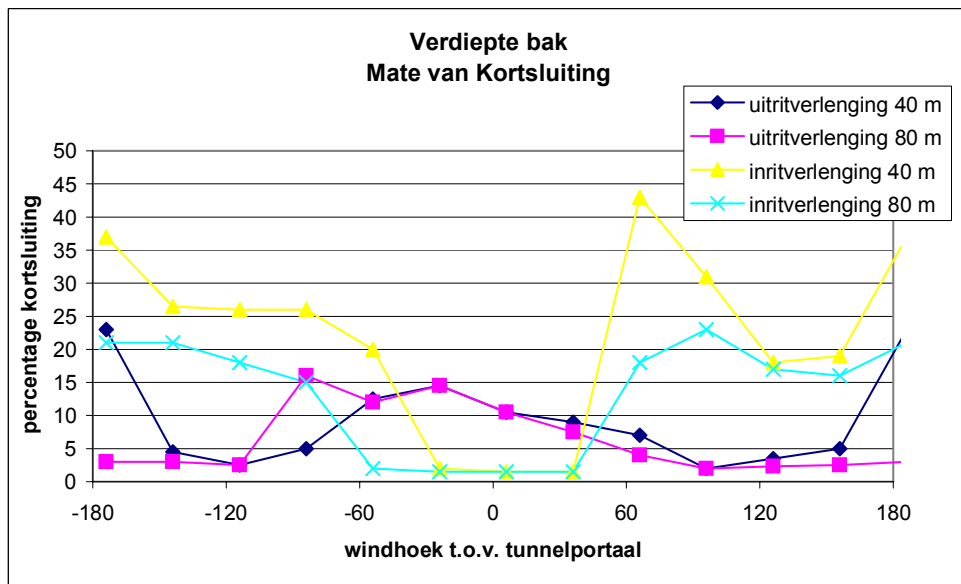
Figuur 11-15: Invloed van scheidingsmuur-afmetingen

Uit Figuur 11-15 blijkt dat een scheidingswand die lager is dan de diepte van bak, weinig effect heeft, ongeacht de lengte van de wand (de tunnelbak is hier 17 m diep). Een scheidingswand even hoog als de diepte van de bak heeft wel een goed resultaat. Wanden hoger dan de bak diep is, verbeteren de situatie nog iets meer.



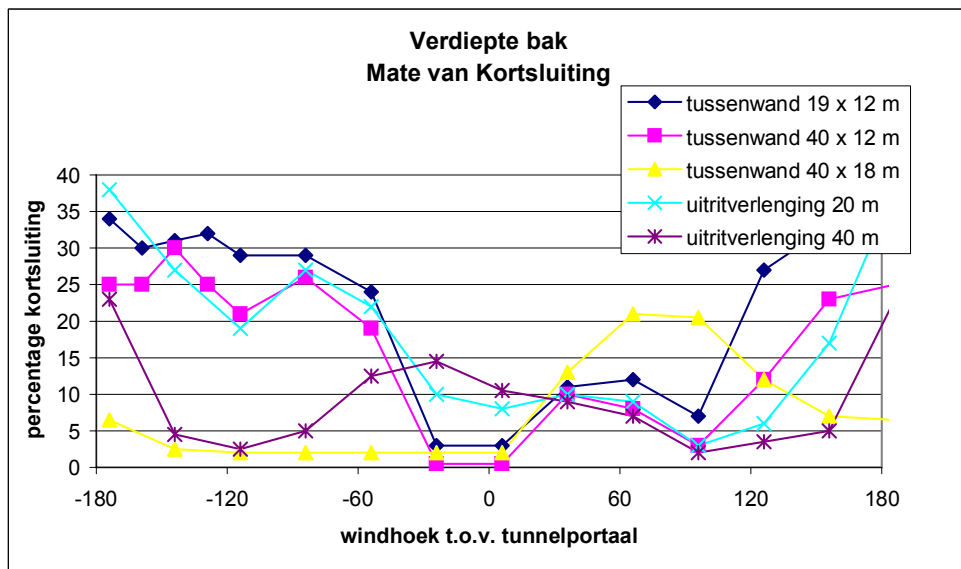
Figuur 11-16: Invloed lengte van de scheidingswand

Uit Figuur 11-16 blijkt dat verlengen van een scheidingswand wel enige invloed heeft, maar dat die invloed eigenlijk verwaarloosbaar is.



Figuur 11-17: Vergelijking invloed inritverlenging t.o.v. uitritverlenging

Uit Figuur 11-17 blijkt dat inritverlenging (de inrit steekt uit ten opzichte van de uitrit) veel minder effectief is dan uitritverlenging. Dit stemt overeen met het onderzoek uit 1979.

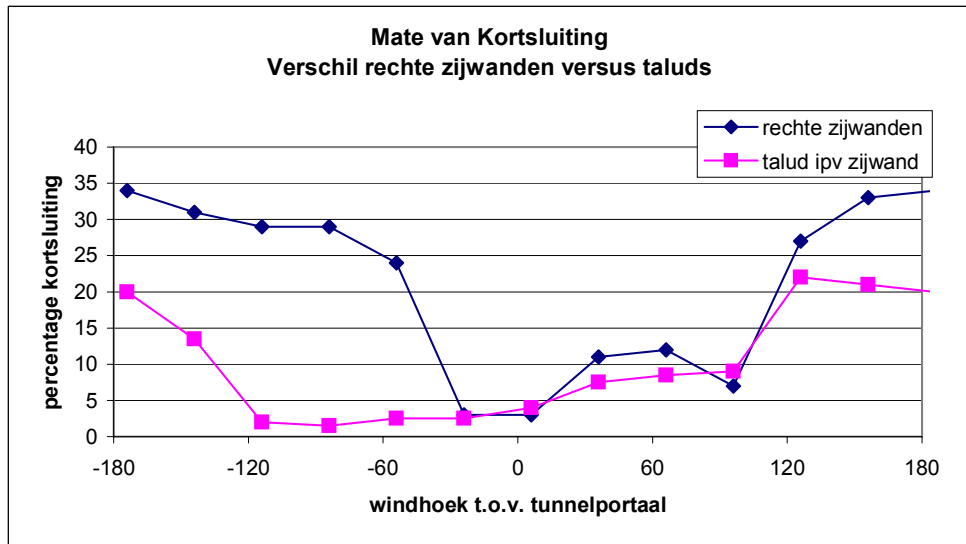


Figuur 11-18: Vergelijking invloed tussenwand t.o.v. uitritverlenging

Figuur 11-18 toont de effecten van een scheidingswand en een uitritverlenging met gelijke lengte:

- Bij een lengte van 20 m is er niet veel verschil in aërodynamische kortsluiting. Dit komt doordat de lucht uit de uitrit zo dicht bij de inrit vrijkomt dat er vanwege de diepe ligging altijd kortsluiting zal optreden.
- Bij een lengte van 40 m en plaatsing van een hoge tussenwand is er niet veel verschil in aërodynamische kortsluiting tussen beide voorzieningen, maar de mate van kortsluiting is wel veel minder dan bij een lengte van 20 m. Een lage tussenwand van 40 m is ongunstig en geeft geen verbetering ten opzichte van een lage tussenwand van 20 m.

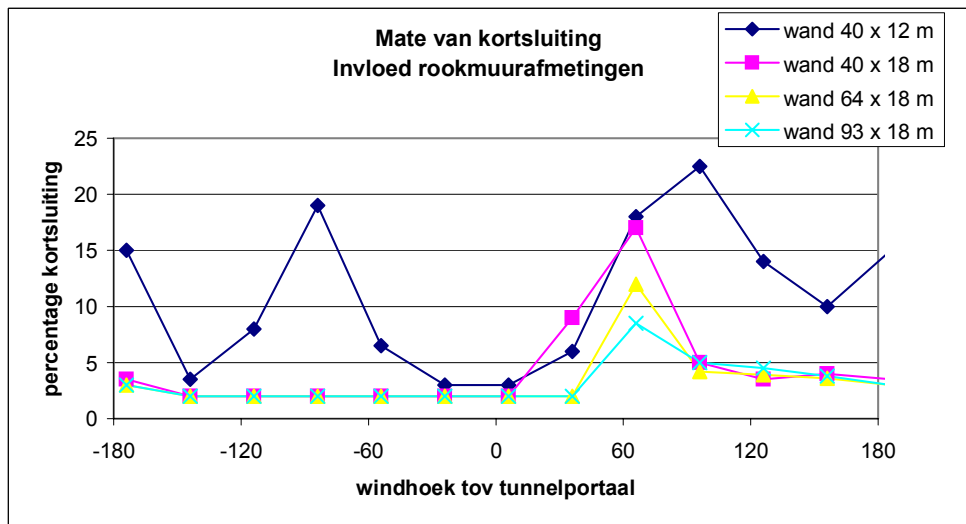
Onderzoeksresultaten 1990 voor een verdiepte bak met taluds aan beide zijden versus rechte zijwanden



Figuur 11-19: Vergelijking verdiepte bak met taluds versus rechte zijwanden.

Uit Figuur 11-19 blijkt dat bij taluds de wind meer vrij spel heeft, waardoor de emissie beter wordt weggeblazen.

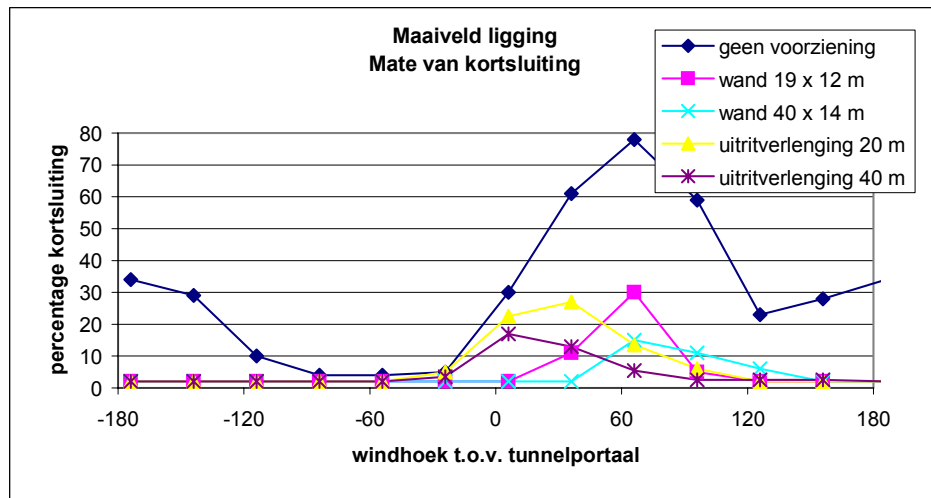
Onderzoeksresultaten 1990 voor een half verdiepte bak met loodrechte zijwanden tot op maaiveld



Figuur 11-20: Invloed rookmuur afmetingen

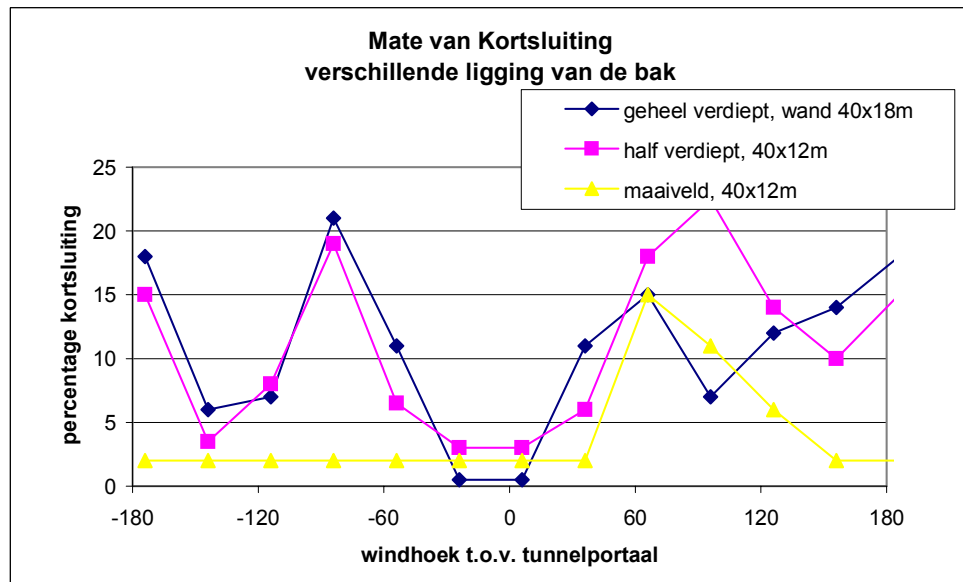
Figuur 11-20 laat zien dat net als bij een geheel verdiepte bak vooral het verhogen van de rookmuur tot verbetering leidt.

Onderzoekresultaten 1990 voor een tunnel op maaiveld



Figuur 11-21: Invloed scheidingswand resp. uitritverlenging

Uit Figuur 11-21 blijkt dat de invloed van een scheidingswand en een uitritverlenging bij gelijke lengte ongeveer even groot is. Het maakt dus niet uit of een scheidingswand of een uitritverlenging wordt aangebracht. De lengte van de voorziening is wel van invloed, maar of deze verdere verlaging van de kortsluiting noodzakelijk is, hangt van de specifieke omstandigheden van de tunnel af.



Figuur 11-22: Vergelijking van 3 verschillende configuraties met wanden tot of tot boven maaiveld

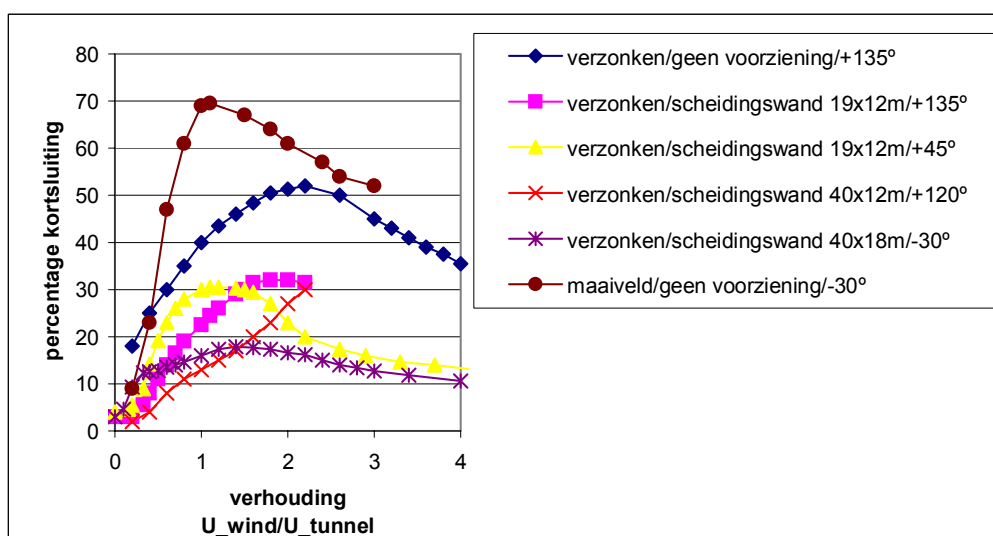
Uit Figuur 11-22 blijkt dat wanneer bij een verdiepte bak de scheidingswand tot even boven maaiveld wordt opgetrokken en bovendien lang genoeg is, de mate van kortsluiting steeds even groot is, ongeacht de diepte van de bak.

Uit Figuur 11-21 en Figuur 11-22 blijkt verder dat bij ligging op maaiveldniveau nog steeds een scheidingswand van voldoende lengte en hoogte noodzakelijk is. In sommige gevallen

kan worden volstaan met een scheidingswand van circa 20 m, in andere gevallen zal een langere scheidingswand noodzakelijk zijn.

Invloed van de verhouding tussen de windsnelheid U_w en de luchtsnelheid in de tunnel U_t .

Voor de verschillende varianten van de portalen is bij een aantal ongunstige windhoeken nagegaan in hoeverre kortsluiting wordt beïnvloed door de windsnelheid. Dit is bekeken door de verhouding U_w/U_t te variëren. In Figuur 11–23 is aangegeven welke invloed de windsnelheid heeft op de mate van kortsluiting.



Figuur 11–23: Invloed windsnelheid op de mate van kortsluiting

De luchtsnelheid in een tunnel als gevolg van rijdend verkeer is onder normale omstandigheden circa 5 m/s. Aangezien in Nederland de meest voorkomende windsnelheden tussen 5 en 10 m/s liggen, variëren de meest voorkomende verhoudingen U_w/U_t tussen 1 en 2. Uit Figuur 11–23 blijkt dat in deze bandbreedte van U_w/U_t de mate van kortsluiting geen grote variatie kent.

Conclusies

De conclusies uit dit onderzoek zijn:

- Bij verdiepte ligging levert een lage scheidingswand met een lengte van circa 20 m een aanzienlijke mate van kortsluiting op. Ook een uitritverlenging van circa 20 m leidt tot een aanzienlijke kortsluiting. Of deze kortsluiting aanvaardbaar is moet per project worden bezien, maar vaak zal dit niet het geval zijn.
- Het laten uitsteken van de inrit ten opzichte van de uitrit leidt tot veel minder goede resultaten dan het laten uitsteken van de uitrit ten opzichte van de inrit.
- Bij toepassing van een scheidingswand moet de bovenzijde gelijk liggen of hoger zijn dan het maaiveld. Een scheidingswand moet minstens 40 m lang zijn.
- Toepassing van een scheidingswand met een lengte van 40 m en een uitritverlenging met 40 m leiden tot ongeveer gelijke resultaten, hoewel de scheidingswand iets beter functioneert (mits de hoogte gelijk of hoger is dan de randen van de bak).
- Bij een tunnel op maaiveldniveau is een uitritverlenging van 20 m of een scheidingswand van 20 m lengte vaak al voldoende. In extreme situaties moet de lengte 40 m zijn.

11.4.3 Onderzoek aan de Leidse Rijn tunnel (2004)

In verband met te verwachten kortsluitproblemen bij de Leidse Rijn tunnel in de A2 bij Utrecht is een modelonderzoek uitgevoerd naar de kans op kortsluiting. Hierbij is zowel gekeken naar de situatie in normaal bedrijf als naar een situatie met brand bij het noordelijke portaal.

De tunnel bestaat uit 4 buizen naast elkaar, waardoor de breedte van toerit circa 70 m bedraagt. De noordelijke toerit van de tunnel is helemaal omsloten met hoge geluidsschermen, waardoor een 'tunnelbak' ontstaat. Daarbij is sprake van een zekere inritverlenging. Tijdens het onderzoek is gekeken naar verschillende varianten van rookmuren tussen de hoofdrijbanen.

De uitkomsten komen zowel qua tendens als kwantitatief overeen met de meetresultaten van de proeven voor de Botlektunnel, ondanks het tamelijk grote verschil in vorm van beide tunnels. Kennelijk is de wijze van omsluiting van het totale tunnelportaal met hoge wanden hier van belang, waardoor de windinvloed vergelijkbaar is.

11.5 Winddruk op tunnelportalen

11.5.1 Inleiding

Bij het berekenen van ventilatiesystemen voor tunnels moet rekening worden gehouden met windinvloed. In de Aanbevelingen voor Autotunnels van het Kivi (1991) werd hiervoor een methode beschreven. Er werd hierbij echter meteen aangegeven dat de gepresenteerde methode beperkt is en dat bij elke tunnel de werkelijke windinvloed via modelonderzoek moet worden bepaald.

Voor de aanpassing van de Schipholtunnel eind jaren '80 is in 1988 modelonderzoek gedaan, onder andere om de windinvloed op de geplande tunnelportalen te bepalen. De resultaten van dit onderzoek zijn voor de Aanbevelingen voor Autotunnels van het Kivi (1991) gebruikt om via benaderingsformules de windinvloed in rekening te kunnen brengen.

Begin jaren '90 is voor de bouw van de Wijkertunnel opnieuw modelonderzoek gedaan naar de winddruk op de tunnelportalen. Bij dit onderzoek, dat in 1991-1992 bij het NLR is uitgevoerd, zijn allerlei configuraties onderzocht, waardoor de resultaten van het onderzoek algemeen toepasbaar zijn. Deze onderzoeksresultaten zijn eind jaren '90 door de Bouwdienst van Rijkswaterstaat omgezet in bruikbare gegevens voor het maken van ontwerpberoeeningen. Daarbij zijn de resultaten vergeleken met het onderzoek dat eerder voor de Schipholtunnel was verricht. Voor een uitvoerige beschrijving wordt verwezen naar 'Wind-effecten op Tunnelportalen', Rijkswaterstaat Bouwdienst, Utrecht, 21 september 1998.

11.5.2 Beschrijving modelonderzoek Wijkertunnel

Het model bestond uit een schaalmodel 1:200 van een ingangs- en uitgangsportaal naast elkaar, met aansluitend een stukje tunnelbuis. De hoogte boven het maaiveld en de vorm van het ingangs- en uitgangsportaal is gevarieerd, zoals aangegeven in Tabel 11-6. Hoewel het NLR-rapport spreekt over 5 hoofdvormen, blijken deze na bestudering van het onderzoek tot 3 hoofdvormen te kunnen worden herleid:

- Tunnelportalen onder maaiveld
- Half ondergronds/half bovengronds gelegen tunnelportalen
- Geheel bovengronds gelegen tunnelportalen

Op de 3 hoofdvormen zijn verschillende variaties aangebracht:

- Bij tunnelportalen die onder maaiveld liggen zijn de zijwanden van de toerit meestal recht, maar ook een talud kan voorkomen.
- Als tunnelportalen onder maaiveld liggen, is vaak een bedieningsgebouw boven het tunnelportaal gesitueerd.
- Vaak steekt het uitgangsportaal uit ten opzichte van het ingangsportaal, waarbij een verspringing van circa 20 m wordt aangehouden.
- Aansluitend op de versprongen tunnelportalen wordt soms een extra scheidingswand aangebracht met een lengte van circa 20 m.
- Bij de oudere Nederlandse tunnels in Rijkswegen is voor de ingang een lichtrooster over circa 100 m aangebracht. Bij enkele tunnels is wel de scheidingswand (met een lengte van circa 100 m) tussen de beide rijbanen aangebracht waarop het lichtrooster moet rusten, maar is bij nader inzien het lichtrooster achterwege gelaten.

Op basis van deze variaties zijn de configuraties zoals vermeld in Tabel 11–6 op schaal beproefd.

	Hoofdvorm	zijwanden toerit	gebouw boven tunnelportaal	scheidingswand tussen inrit en uitrit	lichtrooster boven inrit	uitritverlenging t.o.v. inrit
1	Verzonken	recht	aanwezig	100 x 13 m	100 m	20 m
2				100 x 13 m	100 m	geen
3				100 x 13 m	geen	20 m
4				100 x 13 m	geen	geen
5				geen	geen	20 m
6				20 x 13 m	geen	geen
7				talud	aanwezig	20 x 13 m
8	Half verzonken	recht	aanwezig	100 x 8 m	100 m	20 m
9			aanwezig	geen	geen	20 m
10			geen	geen	geen	20 m
11			geen	20 x 8 m	geen	geen
12			talud	aanwezig	20 x 8 m	geen
13	Boven-gronds	Geen	n.v.t.	100 x 6 m	100 m	20 m
14			geen	geen	20 m	
15			100 x 6 m	geen	20 m	
16			20 x 8 m	geen	geen	

Tabel 11–6: Tunnelconfiguraties

Er zijn drukverschilmetingen uitgevoerd over zowel het ingangs- als het uitgangsportaal, waarbij er al dan niet een luchtstroming in de tunnelbuizen was in combinatie met een luchtstroming (wind) over het model. Het model stond op een draaibaar plateau waar door de windrichting in stappen van 30° kon worden gevarieerd.

De omgeving van het model in de windtunnel kwam overeen met een vlakke omgeving met weinig terreinruwheid. Andere omgevingsinvloeden dienen bij berekeningen apart te worden verdisconteerd.

Omgevingsinvloeden bestaan onder andere uit terreinaccidentatie, begroeiing en gebouwen in de omgeving. Met name gebouwen of andere bouwconstructies in de directe omgeving van tunnelportalen kunnen voor bepaalde windrichtingen grote invloed hebben.

Uit metingen in juni 1998 op locatie bij de nieuwe Schiphol tunnel is gebleken dat lokale invloeden ook veranderingen in windrichting kunnen veroorzaken. Deze veranderingen kunnen ook worden opgevat als een vermindering in de ene en een toename in een andere windrichting, zodat dit kan worden opgevangen met de factoren voor windsnelheid.

Deze projectafhankelijke variabelen moeten steeds opnieuw in de berekeningen worden betrokken, bijvoorbeeld door correctiefactoren in te voeren voor de windrichtingen waarvoor berekeningen worden uitgevoerd.

Bij het model is rekening gehouden met de windsnelheid v_{10} op 10 m hoogte boven maai-veld. Dat betekent dat de windgegevens zoals deze over het algemeen beschikbaar zijn via metingen door o.a. het KNMI, direct toepasbaar zijn.

11.5.3 Winddruk en tunnelventilatie

Uit onderzoek blijkt dat wind en tunnelventilatie elkaar onderling beïnvloeden, zodat de totale verschuldruk over een tunnelportaal als gevolg van wind en ventilatie kan worden geschreven als:

$$p = p_{vt=0} + \delta p' + p_{v10=0}$$

waarbij:

- $\delta p'$ = de interferentie tussen ventilatie en wind
- $p_{vt=0}$ = het drukverschil zonder tunnelventilatie maar met wind
- $p_{v10=0}$ = het drukverschil zonder wind en met tunnelventilatie.

Aangezien $p_{v10=0}$ in rekening wordt gebracht door de in- en uitgangsweerstand kan deze hier worden weggelaten. De formule kan vervolgens worden omgezet in dimensieloze grootheden door te delen door $\frac{1}{2}\rho v_{10}^2$:

$$CP10 = (CP10)_{vt=0} + \delta CP10$$

waarbij:

- CP10 = de totale winddrukfactor
- $(CP10)_{vt=0}$ = de winddrukfactor waarbij er geen tunnelventilatie is ($u_t = 0$)
- $\delta CP10$ = de winddrukfactor die de interferentie tussen wind en tunnelstroming weergeeft

Bij het modelonderzoek is de windrichting in stappen van 30° gevarieerd. Bij de metingen is de verhouding tussen de luchtsnelheid in de tunnel en de windsnelheid gevarieerd, waarbij $u_t/u_{10} = -1, -\frac{1}{2}, 0, +\frac{1}{2}$ en $+1$. Bij een positieve verhouding stroomt de lucht bij het ingangsportaal de tunnel in en bij het uitgangsportaal eruit. Bij een negatieve verhouding stroomt lucht bij het uitgangsportaal de tunnel in en bij het ingangsportaal weer uit.

Gemeten is de waarde van $p = p_{v10=0} + p_{vt=0} + \delta p'$. Door de meetresultaten bij $u_t=0$ en $u_{10}=0$ af te trekken van de andere metingen kon de waarde van $\delta p'$ worden gevonden. Deling door $\frac{1}{2}\rho u_{10}^2$ levert de factoren $(CP10)_{vt=0}$ en $\delta CP10$.

De metingen zijn niet voor alle configuraties compleet verricht omdat sommige configuraties qua meetresultaten zeer veel op elkaar leken. Daarom zijn de uiteindelijke resultaten van de windfactoren van sommige configuraties deels gebaseerd op andere configuraties.

11.5.4 Formulebenadering resultaten van de modelmetingen

De gemeten waarden zijn in de rapportages weergegeven in grafieken, waarbij de winddrukfactor CP10 voor discrete hoeken in stappen van 30° is gemeten. De grafieken kunnen worden benaderd door formules die gebruik maken van Fourier-analyse.

Voor het ingangsportaal geldt:

$$CP10_{in} = A_0 + A_1 \cos \gamma + A_2 \cos 2\gamma + A_3 \cos 3\gamma + A_4 \sin \gamma + A_5 \sin 2\gamma + A_6 \sin 3\gamma$$

Voor het uitgangsportaal geldt:

$$CP10_{uit} = B_0 + B_1 \cos \gamma + B_2 \cos 2\gamma + B_3 \cos 3\gamma + B_4 \sin \gamma + B_5 \sin 2\gamma + B_6 \sin 3\gamma$$

waarbij :

γ = de hoek tussen orientatie van het portaal en de windrichting

De factoren A en B zijn opgenomen in bijlage C.

Bij de uitgevoerde Fourier-analyse zijn ook zijn de gemiddelde standaarddeviaties bepaald. Hieruit blijkt dat de gemiddelde afwijking ten opzichte van de meetwaarden 3 – 5% is, en in enkele gevallen circa 10%. De benadering is dus redelijk tot goed.

11.5.5 Verhouding tunnellsnelheid / windsnelheid u_t / u_{10}

De modelmetingen zijn verricht bij de verhoudingen $u_t/u_{10} = \pm 1/2$ en ± 1 . Voor het benaderen van andere verhoudingen van u_t/u_{10} dan $\pm 1/2$ en ± 1 zijn de volgende methoden het meest bruikbaar:

- $0 < u_t/u_{10} < 1/2$: lineaire interpolatie tussen waarden voor $u_t/u_{10} = 0$ en $u_t/u_{10} = 1/2$
- $1/2 < u_t/u_{10} < 1$: lineaire interpolatie tussen waarden voor $u_t/u_{10} = 1/2$ en $u_t/u_{10} = 1$
- $1 < u_t/u_{10}$: lineaire extrapolatie op basis waarden voor $u_t/u_{10} = 1/2$ en $u_t/u_{10} = 1$
- $-1/2 < u_t/u_{10} < 0$: lineaire interpolatie tussen waarden voor $u_t/u_{10} = 0$ en $u_t/u_{10} = -1/2$
- $-1 < u_t/u_{10} < -1/2$: lineaire interpolatie tussen waarden voor $u_t/u_{10} = -1/2$ en $u_t/u_{10} = -1$
- $u_t/u_{10} < -1$: lineaire extrapolatie op basis waarden voor $u_t/u_{10} = -1/2$ en $u_t/u_{10} = -1$

Interpoleren veroorzaakt fouten in de berekening, en extrapoleren kan zeker aanzienlijke afwijkingen opleveren. Hierbij kunnen echter de hierna volgende punten worden bedacht.

De kans op falen van het ventilatiesysteem is het grootst als er een sterke tegenwind op het uitgangsportaal staat, waarbij de windsnelheid 8 – 10 m/s of meer is. De ontwerp-luchtsnelheid in de tunnel is meestal 3 – 6 m/s. In dat geval ligt de verhouding v_t/v_{10} dus altijd lager dan +/-1 en valt binnen het gemeten gebied. Wel ontstaat door interpolatie dan een inschattingfout voor de interferentiedruk, naar schatting zal deze niet meer dan circa 25% (fout1) bedragen. De interferentiedruk is volgens de grafieken in grootte maximaal gelijk aan de pure winddruk (fout2 = 0,5). Aangezien de totale winddruk in het gehele krachtenspel meestal circa 25% (fout3a) en maximaal 50% (fout3b) bijdraagt, is de totale geschatte fout in de berekening meestal $fout1 * fout2 * fout3a = 0,25 * 0,50 * 0,25 \approx 3\%$ en maximaal $fout1 * fout2 * fout3b = 6\%$. Gezien de nauwkeurigheid van de andere ingevoerde variabelen in de berekening is dit zeker aanvaardbaar.

De verhouding $|u_t/u_{10}| > 1$ komt voor bij lage windsnelheden, dus wanneer de tunnelont-werpsnelheid 3 – 6 m/s is, geldt dat bij windsnelheden van minder dan circa 3 – 6 m/s. Volgens de windtabellen komen windsnelheden van circa 3 – 6 m/s ($u_t/u_{10} \approx 1 \text{ à } 2$) circa 30% van de tijd voor, en windsnelheden minder dan 3 m/s ($u_t/u_{10} > \pm 2$) circa 20% van de tijd. Op basis van de gekozen methode voor extrapolatie kan worden verwacht dat de rekenfout tot $u_t/u_{10} = 2$ (wind 3 m/s, tunnel 6 m/s) niet heel groot is: de fout in winddruk is geschat op circa 25% (fout1). De windinvloed is dan echter laag en zeker niet meer dan 25% (w3), zodat de totale rekenfout circa $fout1 * fout2 * w3 = 3\%$ is. Voor verhoudingen van $u_t/u_{10} > 2$ zal de fout in winddruk wel groot zijn: deze is geschat op 100%, maar de windinvloed is dan zeer laag geworden en gesteld op ca 10% (w3), waardoor de totale

rekenfout niet meer dan $f_{out1} \cdot f_{out2} \cdot w_3 = 5\%$ bedraagt. Lage windsnelheden spelen alleen bij probabilistische berekeningen een rol, en bij deze berekeningen gaat het alleen om wel of niet falen. Hiervoor zijn lage windsnelheden nooit bepalend, zodat de rekenfouten door inter- of extrapolatie niet ernstig zijn.

11.6 Faalkansen van een langsventilatiesysteem bij brand

11.6.1 Inleiding

In de 'Aanbevelingen voor het ventileren van autotunnels', uitgegeven door het Kivi in 1990, wordt in hoofdzaak gesproken over een minimale luchtstroom van $88 \text{ m}^3/\text{s}$ bij een brandgrootte van 300 MW. De kans op te lage luchtsnelheid mag niet groter zijn dan 1:200.

Die eis was gebaseerd op het vermijden van onverbrande benzinedampen die, zodra ze in contact komen met verse lucht, tot ontbranding of zelfs ontploffing zouden komen. Er is voetstoots aangenomen het ontstaan van onverbrande restproducten altijd leid tot een explosie met veel doden tot gevolg, door de explosie zelf of door bezwijken van de tunnel.

De brandgrootte is destijds bepaald aan de hand van de redenering dat de grootste brand ontstaat door een plasbrand van benzine. Daarbij is uitgegaan van een tankwagen met een inhoud van 50 m^3 benzine en een dusdanige lekkage dat een brandgrootte ontstaat van 300 MW gebaseerd op de onderste theoretische verbrandingswaarde van benzine (45 MJ/kg). Hiermee verbrandt de gehele tankinhoud in 2 uur.

Gebaseerd op kansgegevens uit de jaren '80 is een faalkans van 1:200 gedefinieerd. De vaststelling van de faalkans is echter arbitrair en zou verder onderbouwd moeten worden.

Na de publicatie van genoemde Aanbevelingen is het inzicht ontstaan dat backlayering een belangrijk criterium is. Gebaseerd op onderzoeken wereldwijd is in Nederland in de dagelijkse ontwerppraktijk de eis ontstaan dat bij een brandgrootte van 300 MW een minimale luchtsnelheid van $2,0 \text{ m/s}$ met een faalkans van 1:200 moet worden gehaald. Later is op basis van literatuuronderzoek de vereiste luchtsnelheid verhoogd tot $2,5 \text{ m/s}$. De faalkans is zonder verdere motivering rechtstreeks overgenomen van de bovengenoemde eis aan het minimale debiet.

11.6.2 Overwegingen om de eisen aan te passen

Bij de bovenstaande eisen kunnen een aantal kanttekeningen worden gemaakt.

Het is onjuist alleen rekening te houden met benzinebranden. Er moet ook rekening worden gehouden met 'normale' vrachtwagenbranden. Deze hebben doorgaans een brandgrootte van 50 tot 200 MW.

Bij plasbranden is het brandvermogen gerelateerd aan de mate en snelheid van uitstroming uit een tank. Door TNO (rapport B-79-120, Branden op bruggen) is aangegeven dat volgens proeven bij een plasbrand groter dan 1 m^2 de afbrandsnelheid 4 liter per minuut en per m^2 is. Bij een reële gatgrootte in de tank van 6 cm diameter bedraagt het vloeistofoppervlak tussen 75 en 100 m^2 , waarmee er 300 – 400 liter per minuut verbrandt. De inhoud van de grootste tankauto is circa 50.000 liter. De beladingsgraad van tankauto's is veelal 80 – 90% zodat de maximale beladingsgraad 45.000 liter is. Daarmee kan voor de totale tankinhoud een gemiddelde brandduur van circa 2 uur worden berekend. Het brandvermogen kan als volgt worden bepaald:

- In het geval van benzine is de onderste theoretische verbrandingswaarde 45 MJ/kg (in de literatuur worden waarden van 43 – 47 MJ/kg opgegeven). Uit proeven bij plasbran-

den blijkt de werkelijk optredende verbrandingswaarde door onvolledige verbranding in de buurt van 38 MJ/kg te liggen. Rekening houdend met de soortelijke massa van benzine (0,72 kg/liter) is de werkelijke verbrandingswaarde dan 27,4 MJ/liter. Met een tankinhoud van maximaal 45.000 liter is er voor benzine circa 1.200.000 MJ beschikbaar voor verbranding. Daarmee bedraagt het gemiddelde brandvermogen voor een plasbrand van benzine 155 MW.

- In het geval van dieselolie is de onderste theoretische verbrandingswaarde 42 MJ/kg. Uit proeven bij plasbranden blijkt de werkelijk optredende verbrandingswaarde door onvolledige verbranding in de buurt van 37 MJ/kg te liggen. Rekening houdend met de soortelijke massa van dieselolie (0,88 kg/liter) is de werkelijke verbrandingswaarde dan 33,3 MJ/liter. Met een tankinhoud van maximaal 45.000 liter is er voor dieselolie circa 1.500.000 MJ beschikbaar voor verbranding. Daarmee bedraagt het gemiddelde brandvermogen voor een plasbrand van dieselolie 210 MW. Deze waarden wijken aanzienlijk af van de eerder aangenomen brandgrootte van 300 MW. Het is realistischer uit te gaan van een brandvermogen van 200 MW. Er kunnen wel kortstondige piekvermogens optreden van 300 MW.

Het is niet waarschijnlijk dat onverbrande producten elders tot ontploffing zullen komen: het is veel waarschijnlijker dat er ofwel onvolledige verbranding optreedt, met veel roet en CO tot gevolg, ofwel dat dampen elders tot normale (langzame) verbranding overgaan. Aangezien de dampen stroomafwaarts door een meestal al lege tunnel worden gedreven, zal het verkeer niet door de tweede ontbranding in gevaar worden gebracht.

De bepaling van de faalkans van 1:200 is op beperkte gegevens gebaseerd. In Kivi 1990 wordt al aangegeven dat deze faalkans nader vastgesteld moet worden.

11.6.3 Doel van ventilatie

Met ventilatie moet in eerste instantie bescherming worden geboden aan weggebruikers door zoveel mogelijk te voorkomen dat zij in de rook komen te staan en door te zorgen dat de vluchtwegen rookvrij worden gehouden.

Vervolgens kan ook de constructie worden beschermd door de rook naar één zijde weg te blazen waardoor de brandweer bij de brand kan komen om deze te blussen. Zo kan worden gezorgd dat een vrachtwagenbrand niet zo lang duurt dat (ondanks eventueel brandwerende bekleding van de tunnelwand) onherstelbare schade aan de tunnelconstructie ontstaat.

Ook blijven door het wegblazen van de rook de temperaturen aanzienlijk lager, vooral aan het tunnelplafond, waardoor de tunnelconstructie wordt beschermd.

Het door ventilatie voorkomen dat de tunnel bezwijkt door een explosie van onverbrande dampen wordt van minder belang geacht, omdat deze gebeurtenis onwaarschijnlijk is. Dit kan als volgt worden verklaard:

- Voor 1 kg benzine is 12,5 m³ verbrandingslucht nodig, voor 1 kg diesel circa 15 m³. Wanneer er 300 – 400 liter per minuut verbrandt (zie 11.6.2) is de hoeveelheid benodigde verbrandingslucht voor benzine 60 m³/s en voor diesel 88 m³/s.
- Aangezien de tunneldoorsnede bij 2 rijstroken meestal 50 - 60 m² is, is dus minimaal een snelheid van 1 – 1,5 m/s noodzakelijk. Deze snelheid is vrijwel altijd al aanwezig door natuurlijke trek, schoorsteenwerking bij tunnels met hellingen en windinvloeden. Daarnaast is een hogere snelheid nodig om backlayering te voorkomen, zodat altijd aan de eis van voldoende verbrandingslucht wordt voldaan, ongeacht of die eis relevant is.

Er kan dus worden geconcludeerd dat de voornaamste eis aan een langsventilatiesysteem is dat zo'n systeem bij een gegeven brandgrootte een zodanige minimale langssnelheid moet veroorzaken dat de rook naar één zijde wordt weggeblazen, zonder dat rook langs het plafond tegen de stromingsrichting in beweegt (voorkomen van backlayering).

11.6.4 Grenswaarden: de brandgrootte

De minimale snelheid om backlayering te voorkomen is gerelateerd aan de brandgrootte.

De grootte van vrachtwagenbranden zijn maximaal 100 – 150 MW en plasbranden zijn meestal circa 200 MW. Uitschieters tot 300 MW kunnen worden verwacht maar zijn kortstondig. Het lijkt niet realistisch een ventilatiesysteem op die uitschieters te ontwerpen, ook al omdat deze kortstondige piekvermogens de luchtstroming nauwelijks beïnvloeden vanwege grote hoeveelheid lucht die al in beweging is. Daarnaast is het de vraag of het bij 300 MW nog nodig is om backlayering te voorkomen: de straling is namelijk zo hoog dat ook de brandweer de plasbrand niet meer kan benaderen en gewoon beheerst zal laten uitbranden. Daarom hoeft slechts rekening te worden gehouden met brandgrootten tot maximaal 200 MW.

11.6.5 Grenswaarden: kans op te lage ventilatiesnelheid

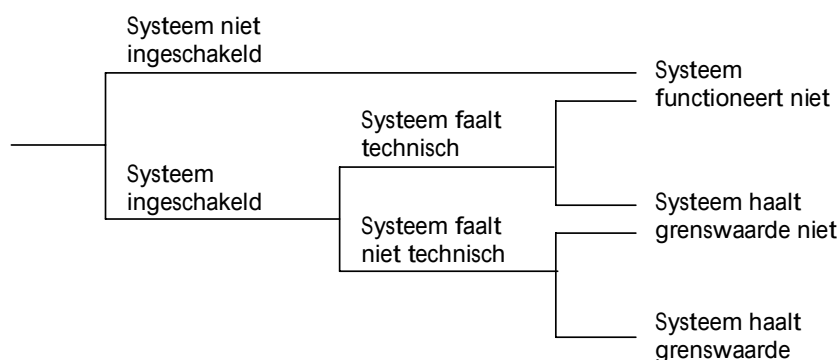
Een te lage ventilatiesnelheid leidt niet automatisch tot gevaarlijke situaties. Beperkte terugstroming van rook tegen de ventilatierichting in leidt tot een rooklaag tegen het plafond. Afhankelijk van de temperatuur kunnen onbeschermden weggebruikers enige tijd onder deze rooklaag verblijven. De situatie wordt pas echt gevaarlijk wanneer de rook ongecontroleerd tegen de ventilatierichting in begint te stromen en wanneer de rook zich door afkoeling gaat vermengen met de luchtstroom.

Kleine branden komen vaker voor dan grote of zeer grote branden. Daarom moet aan de kansen op een te lage ventilatiesnelheid (faalkansen) voor kleinere branden strengere eisen worden gesteld dan voor grote branden.

De algemene eis voor een langsventilatiesysteem bij brand is het realiseren van een minimale langssnelheid om terugstroming (backlayering) te voorkomen. Er zijn een aantal oorzaken die het realiseren van de minimale grenswaarde van de backlayeringssnelheid kunnen belemmeren:

- een technische storing (technisch falen);
- een te zware belasting van het ventilatiesysteem door teveel weerstand vanwege windbelasting of brand, of vanwege uitval van ventilatoren door te hoge temperatuur (systeemfalen);
- niet inschakelen van het systeem door de operator of bewust uitschakelen na automatische inschakeling.

Dit is schematisch weergegeven in Figuur 11–24.



Figuur 11–24: Schematische weergave falen van ventilatie

Het is te verwachten dat de faalkans van een operator in principe hoog is. Met deze faalkans wordt hier verder geen rekening gehouden omdat er altijd systemen zijn te bedenken waarbij wordt voorkomen dat de operator handelingen moet verrichten.

Zoals hiervoor besproken, is de kans op het niet halen van de backlayeringssnelheid afhankelijk gesteld van de brandgrootte. Bij het formuleren van een voorstel voor kansen op systeemfalen zijn deze kansen afgewogen tegen de kans op technisch falen.

De kans op technisch falen is circa 5×10^{-3} als alleen de elektrische voeding in ogenschouw wordt genomen. Wordt ook de besturing en noodstroomvoeding erbij betrokken, dan loopt deze kans op tot circa 15×10^{-3} . Voor een realistische technische faalkans kan daarom 15×10^{-3} worden aangehouden.

Voor een brand van 100 MW is het niet realistisch de eis voor de kans op het niet halen van de backlayeringssnelheid strenger te stellen dan de faalkans voor technisch falen. Daarom zijn deze kansen aan elkaar gelijk gesteld. Kleinere branden komen vaker voor zodat de kans dat de snelheid niet gehaald wordt lager moet zijn. Deze kans is zo gekozen dat de faalkans van het systeem voor 20 MW vrijwel geheel is toe te schrijven aan technisch falen en ook bij 50 MW de technische faalkans overheerst.

Branden van 200 MW komen zeer incidenteel voor. Voor zulke branden zou op basis van de kans op brand een 100x hogere faalkans mogen worden toegelaten. Hiermee wordt niet bedoeld dat het systeem bij elke brand van 200 MW zou mogen falen; er is gekozen voor een faalkans van 1 op elke 20 branden van 200 MW.

Daarmee zijn de volgende maximale faalkansen voor het ventilatiesysteem als volgt gekozen:

Brandvermogen	Minimale snelheid om backlayering te voorkomen	Relatieve kans op brand	Kans op niet halen van de kritische snelheid voor backlayering	Gecombineerde kans technisch falen + niet halen van de backlayeringssnelheid
5 MW	1,5 m/s	100%	-	-
20 MW	1,8 m/s	20%	1×10^{-3}	16×10^{-3}
50 MW	2,25 m/s	5%	5×10^{-3}	20×10^{-3}
100 MW	2,5 m/s	1%	15×10^{-3}	30×10^{-3}
200 MW	2,5 m/s	0,01%	50×10^{-3}	65×10^{-3}

Tabel 11–7: Maximale faalkansen

De maximaal mogelijke brandgrootte moet worden bepaald aan de hand van het verkeer dat gebruik zal maken van de tunnel. Het langsventilatiesysteem moet vervolgens bij de maximaal mogelijke brandgrootte en elke in de tabel genoemde brandgrootte kleiner dan

de maximaal mogelijke brandgrootte voldoen aan de gestelde eis voor de kans op niet halen van de kritische backlayeringsnelheid.

Opmerking: Grotere branden hoeven niet alleen afzonderlijke voertuigen te betreffen, maar kunnen ook bestaan uit meerdere brandende voertuigen die vlakbij of tegen elkaar staan.

Tot slot moet worden opgemerkt dat de faalkansen gelden voor de stationaire toestand, ofwel de toestand waarbij (groepen) ventilatoren al zijn uitgevallen vanwege te hoge werktemperaturen of waarbij ventilatoren een kleinere pulskracht leveren vanwege de hoge temperatuur van rookgassen.

In de fase van zelfredzaamheid zullen de faalkansen aanzienlijk lager zijn dan aangegeven omdat in die fase de brand nog niet tot maximale grootte is uitgegroeid, ventilatoren nog niet zijn uitgevallen en de ventilatoren nog hun maximale bijdrage aan het ventilatiesysteem kunnen leveren.

12 LITERATUUR

Literatuurlijst algemeen

- Ventilatie van Autotunnels – Aanbevelingen 1991, Koninklijk Instituut van Ingenieurs & Ministerie van Verkeer en Waterstaat – Bouwdienst Rijkswaterstaat, 1991
- PIARC Road Tunnels, Fire and smoke control in road tunnels, 1999
- PIARC Road Tunnels, Systems and equipment for fire and smoke control in road tunnels, 2005
- Maarsingh, R.A., De luchtweerstand van stilstaande auto's in een verkeerstunnel, Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, rapportnr. AX-9006, 1990

Literatuurlijst basisgegevens verkeer

- Handboek Wegontwerp, CROW, 2002
- PIARC – Report of the Technical Committee on Road Tunnels, 1983
- Studie naar de relatie tussen snelheid en dichtheid in autotunnels, BVA, Raalte, 1988
- Toorenburg, J.A.C. van, Relatie snelheid-verkeersdichtheid in tunnels, Transpute, Gouda, 1989
- Toorenburg, J.A.C. van, Meting voertuigdichtheid bij stilstaand verkeer, Transpute, Gouda, 1990

Literatuurlijst verkeersemissie

- Europese richtlijn 96/62/EG
- Europese dochterrichtlijn 1999/30/EG
- Europese dochterrichtlijn 2000/69/EG
- Europese dochterrichtlijn 2002/3/EG
- Besluit Luchtkwaliteit
- Meetregeling Luchtkwaliteit 2005, Ministerie van VROM, 2005
- Richtlijnen World Health Organisation
- De Nationale MAC-lijst, Ministerie van VROM, 2004
- PIARC Road Tunnels: Pollution, Ventilation and Environment , 1976
- PIARC Road Tunnels: Pollution, Ventilation and Environment , 1995
- PIARC Pollution by Nitrogen Dioxide in Road Tunnels, 2000
- PIARC Road Tunnels : Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation, 2004
- Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory, Volume 3, Inventory Reference Manual, Revised 1996 Bracknell (UK): IPCC WGI Technical Support Unit, IPCC, 1996
- Le Traitement de l'Air des Tunnels – Etat des Connaissances sur les etudes et sur les Realisations, CETU, Lyon, France, 1999
- Methoden voor de berekening van de emissies door mobiele bronnen in Nederland, CBS, RIVM, RIZA, TNO, Taakgroep Verkeer en Vervoer, Rapportagereeks Milieumonitor Nr. 4, januari 2002
- Public Health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment, The Lancet, Volume 356, September 2., 2000
- Results from Research done in Norway to Determine the Possibility of Cleaning Polluted Tunnel Air – Soot, Dust and Gas, Directorate of Public Roads, Norway, 1994
- Road User Exposure to Air Pollution", Environmental Transport Association, in opdracht van het Engelse Department of Environment, Transport and the Regions, 1997
- Road User Exposure to Air Pollution: a literature review, Institute for European Environmental Policy, London, 1998
- Bjornback, M. et al, Impact of NO₂ on health: exposure in road tunnels, Piarc WG2 Pollution, environment and ventilation, Paris, 1999
- Brouse, B. et al, Measurement of pollution levels in three alpine road tunnels, CETU, Bron Lyon, published by BHR Group, 2003
- Henning, E.J., Cleaning of polluted air in combination with longitudinal ventilation, Norwegian Public Roads Administration, Oslo, 1999

-
- Jacques, E., Ventilation control based on directly measured traffic characteristics, Université Catholique de Louvain, Piarc WG2 Pollution, environment and ventilation, Paris, 1999
 - Rijkeboer, R.C. and Elst, D.A.M.M., Emission factors for road tunnels: update 1998, TNO report 98.OR.VM.064.1/RR/DE, TNO Road-Vehicles Research Institute, 1998
 - Zumsteg, F. and Huijben, J.W., Methodology for the Evaluation of the Impact of Pollutants around Portals, PIARC Committee C5, Working Group 2, Pollution - Environment - Ventilation, 1999
 - 21st Nato/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application, American Meteorological Society, Massachusetts USA, November 6-10, 1995

Literatuurlijst brand in tunnels

- Amundsen, F.H., Data on large tunnel fires, Norwegian Public Roads Administration, 2000
- Bedeke, K., Technical Management, Luchtstroming bij brand in een tunnel, Referentie FDR/KBE, project Rijkswaterstaat, nr. 10.0194.002, 1996
- Bedeke, K., Technical Management, Referentie RMV-194.KBE, project RWS Tunnelbranden, nr. 10.0194.004, 1997
- Carvel, R.O., et al, A method for estimating the heat release rate of a fire in a tunnel, Proc. 3rd Conf. on Tunnelfires, Gaithersburg, Maryland, 2001
- Carvel, R.O., et al, Variation of heat release rate with forced longitudinal ventilation for vehicle fires in tunnels, Fire Safety Journal, Volume 36, 2001
- Carvel, R.O., et al, How does the shape of a tunnel affect the heat release rate of a fire, Proc. 9th Int. Fire Science & Engineering Conf. (Interflam 2001), Edinburg, Scotland, 2001
- Gajadhar, R. and Huijben, J.W., Tunnelbranden - Een literatuurstudie naar brandproeven en echte branden in tunnels, Bouwdienst Rijkswaterstaat, Utrecht, 2000
- Giuli, G., Giorgiantoni, G. and Zampeti, P., Fire test measurements in an experimental tunnel; Tunnel Management International, vol. 6, number 3, 2003
- Huijben, J.W. et al, Project Safety Proef – Rapportage Brandproeven, Bouwdienst Rijkswaterstaat, Utrecht, 2002
- Kennedy, W.D., Critical Velocity, Past, Present and Future (Revision 6 June 1997 of the SES Critical Velocity Equations; ASHRAE Journal, summer 1996), Parsons Brinckerhoff, 1997
- Kennedy, W.D., Tunnel fire modelling comparing CFD and the Froude numbermethod, BHR-symposium, Luzern, 2003
- Leur, P.H.E. van de, Tunnelbrand simulaties voor Rijkswaterstaat, TNO-rapport B-91-0043, Centrum voor Brandveiligheid TNO-Bouw, 1992
- Rigter, B.P., One dimensional theory for changes in air speed as a result of fires in tunnels with longitudinal ventilation; Third international conference on tunnel fires and escape from tunnels, 9-11 October 2001, Washington DC, USA, 2001
- Rigter, B.P., One dimensional theory for changes in air speed as a result of fires in tunnels with longitudinal ventilation; Third international conference on tunnel fires and escape from tunnels, 9-11 October 2001, Washington DC, USA, 2001
- Rigter, B.P., Two-layer theory applied to the phenomenon of backlayering, BHR-symposium, Luzern, 2003
- Wu, Y. and Abu Bakar, M.Z., Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilationsystems –a study of the critical velocity, Sheffield University, UK. BHR-symposium, Boston, 2000
- Wu, Y., Smoke control in tunnels with slope using longitudinal ventilation effect of tunnelslope on critical velocity, Sheffield University, UK. BHR-symposium, Luzern, 2003

literatuurlijst natuurlijke ventilatie

- Landeshauptstadt Stuttgart Bericht nr. 83-38-01 Lärmschutztunnel Kleiner Ostring Stuttgart Schindler Haerter AG, 1986

-
- Thomas, P.H., Hinkley, P.L., Theobald, C.R. and Simms, D.L. Investigations into the flow of hot gases in roof venting. Fire Research Technical Paper No. 7, Dept. of Scientific and Industrial Research and Fire Offices' Committee, London, 1963
 - Chiyoda Engineering Consultants Co., Ltd.; Air Quality Prediction for Half-Submerged Road Structure in Roermond, 2000

Literatuurlijst langsventilatie

- Bruin, A.C. de, The Efficiency of Longitudinal Ventilation in Road Traffic Tunnels, Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, rapportnr. NLR-CR-2001-147, 2001
- Huijben, J.W., Wijkertunnel – beperking geluidsoverlast, Bouwdienst Rijkswaterstaat, 1998
- Jansen, P.J.M., Proeven met ingangsventilatie bij de Calandtunnel, Arcadis Infra BV, Rotterdam, 2005
- Maarsingh, R.A., Windtunnel-onderzoek naar de instroomproblematiek van de openinjector in de Wijkertunnel, Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, rapportnr. NLR CR 97099L, 1997
- Maarsingh, R.A. en Kamp, A. van der (NLR), Aerodynamic measurements in the Wijkertunnel, Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, rapportnr. NLR CR 96664 L, Amsterdam, 1996
- Matthews, R. et al, The Saccardo injector – an economic solution for the emergency ventilation of vehicle tunnels, South Bank University, 2001
- Moret, C. en Huijben, J.W., Longitudinal jetfan systems, PIARC, 2003
- Rohne, Dr.Ing. E., The friction losses on walls caused by the jet flows of booster fans, BHRA Symposium at Sheffield University, Sheffield, England, 1979
- Rohne, Dr.Ing. E., Experimental results in the determination of losses in the momentum due to wall friction and niche installation in the use of jet fans, Voith Research and construction, Volume 29, septemer 1982, Heidenheim, 1982
- Rohne, Dr.Ing. E., The friction losses on walls caused by a row of four parallel jet flows, BHRA Symposium at Durham, England, 1988
- Roo, F. de, Uitwerking en Analyse van Aërodynamische metingen in de Schipholtunnel in 1998, Rhenen, S&T Engineering, 1998
- Überprüfung der Bemessungsgrundlagen für die Be- und Entlüftung von städtischen Straßentunneln im Hinblick auf die Verringerung der Schadstoffemissionen bei den Kraftfahrzeugen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, heft 638, 1993

Literatuurlijst Dwarsventilatie

- CETU, “Dossier Pilote des tunnels équipements: section 4.1 Ventilation”, Lyon, France, 2003
- Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program, Test Report, Bechtel/Parsons Brinckerhoff, USA, 1995
- NFPA 502, USA, 2005
- Brouse, B, Model study of pressure losses in tunnel ventilation ducts, CETU, Lyon Bron, France, published by Elsevier Publishers Ltd in Aerodynamics and ventilation of vehicle tunnels, 1991
- Steinert, Dr.Ing. C., Dimensioning semi-cross ventilation systems for cases of emergency, “Tunnel, Heft 2/1999”, 1999
- Vauquelin, O. et al, Experimental study of exhaust trap efficiency, University de Valenciennes, 2001

Literatuurlijst Controlemetingen

- Maarsingh, R.A., Analyse van meetmethoden bij garantiemetingen in Nederlandse tunnels en voorstellen ter verbetering, Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, rapportnr. NLR CR 94208 L, Amsterdam, 1994
- Maarsingh, R.A., Evaluatie van Garantiemetingen in Verkeerstunnels, Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, rapportnr. NLR CR 92312 L, Amsterdam, 1992

-
- Richter, W., Volumenstromungsmessung in Leitungen mit Rechteckquerschnitt, Keizung Lüftung Haustechnik 21, nr. 4, April 1970, p. 119-125
 - Woods Practical Guide to Noise Control – 5th Edition, 7th Impression, 1998, Woods of Colchester Limited

Literatuurlijst winddruk op tunnelportalen

- Bedeke, K, Windeffecten op in- en uitritten, BV Technical Management [TM], rapportnr. 0194, Rijswijk, 1994
- Maarsingh, R.A., Windtunnelonderzoek naar winddrukken op tunnelportalen, uitgaande van een model van de Wijkertunnel, Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, rapportnr. NLR CR 92037 L, Amsterdam, 1992
- Maarsingh, R.A., Addendum d.d. 1998 op het rapport Windtunnelonderzoek naar winddrukken op tunnelportalen, uitgaande van een model van de Wijkertunnel, Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, rapportnr. NLR CR 92037 L, Amsterdam, 1992
- Maarsingh, R.A., Aerodynamic aspects of the ventilation system of de the modified Schiphol tunnel, Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, Memorandum AI-88-015 L, Amsterdam, 1988

Literatuurlijst CFD

- Hedelin, H.S. et al, CFD approaches for modelling smoke movement, Health and Safety Laboratory, UK, Tunnel Management International volume 6 number 3, 2003
- Kashef, A. et al, Application of CFD Techniques for modelling fire tests in road tunnels, Ministère des Transports du Québec, Canada, 2004
- Kashef, A. et al, Simulations CFD des écoulements d'air mesurés dans le tunnel Louis/Hippolyte/La Fontaine, Ministère des Transports du Québec, Canada, 2004
- Miles, S. et al, CFD Methodology for predicting sprinkler-smoke ventilation effects, Tunnel Management International Volume 6 number 3, 2003
- Rhodes, N., CFD Modelling of tunnel fires, Mott MacDonald, UK, 1999
- Rhodes, N., Smoke and critical velocity in tunnels, Mott MacDonald, UK, 1996
- Wolsink, ir. G.M. en Huijben, ir. J.W., Rapportage CFD Predictie- en postdictieberekeningen Brandproeven 2e Beneluxtunnel, Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2003

Literatuurlijst geluid in tunnels

- Handboek Installatietechniek, ISSO Novem, 2003
- Anderson, J.S., et al, The acoustics of a large space with a repetitive pattern of coupled rooms, Sound & Vibrations 208, 1997
- Arends, Ing. W.J., Rapport Geluidsmetingen in de Wijkertunnel, BV Technical Management, Amersfoort, 1997
- Bruggeman, dr.ir. J.C. et al, Voorspellingsmodel voor geluid en spraakverstaanbaarheid in verkeerstunnels, TNO Technisch Fysische Dienst TU Delft, 1999
- Timmermans, N.S., Application of coupled interior space noise prediction to compact shipboard power plants, Internoise '80, Miami, 1980

13 Trefwoordenregister

- Aanjaagventilator
 - aërodynamische meting, 125
 - buiten bedrijf stellen, 142
 - clusteren, 36, 111
 - debiet meten, 125
 - energierendement, 153
 - geluid, 44
 - in tunnelingang, 112
 - invloed temperatuur, 114
 - kortsluiting, 156
 - koude lucht, 47
 - motorprestaties, 46
 - ophanging, 45
 - opstelling, 34
 - opstellingsrendement, 110
 - samenstelling, 41
 - stof, 44
 - straaluitbreiding, 154
 - stuwdruk, 108
 - stuwdrukverhoging, 151
 - stuwkracht meten, 126
 - stuwkracht, specifiek, 114
 - stuwkrachtrendement, 109
 - temperatuurbestandheid, 134
 - temperatuurbestendigheid, 39
 - terugstroming, 156
 - uitblaaspatroon, 109
 - uitblaassnelheid, 38
 - uitblaasstraal, 37
 - vocht, 44
- Aanloopverliezen, 47
- Aanzuigconus, 43
- Aanzuiggebied
 - aërodynamische kortsluiting, 52
- Achtergrondconcentraties, 25, 76
- Aërodynamische kortsluiting, 51, 167
 - aanzuiggebied, 52
 - brand, 57
 - emissieconcentraties, 53
 - emissieconcentraties berekenen, 57
 - verminderen, 53
 - windinvloed, 52
- Afbuigschoepen, 44
- Backlayering, 19
 - kritische ventilatiesnelheid, 20, 67
- BaP, 157
- Barometrische drukverschillen, 98
- Beheer, 141
- Beperken emissieconcentraties, 27
- Beperken temperatuurstijging, 31
- Berekenen
 - dwarsventilatie, 116
 - geluidsdrukniveau, 119
 - windinvloed, 98
- Besturing
 - bij brand, 139
 - normaal bedrijf, 137
- Brand
 - aanbevolen ventilatietype, 23
 - aërodynamische kortsluiting, 57
 - automatische besturing, 139
 - besturing overdrukventilatie, 140
 - dimensioneren op, 67
 - doel ventilatie, 17
 - handmatige besturing, 139
 - incident-scenario, 145
 - invloed hellingen, 106
 - langsventilatie, 67
 - mengzone, 102
 - overlevingscondities, 148
 - probabilistische berekeningen, 86
 - risicoanalyse, 147
 - rol tunneloperator, 139
 - rookbeweging, 18
 - ventilatierichting omkeren, 140
 - verandering volume, 104
 - verloop temperatuur, 102
 - vluchtwegen, 58
- Brandgrootte
 - en tijdsduur, 22
 - invloed ventilatie, 21
- Brandlengte, 102
- Brandontwikkeling
 - invloed ventilatie, 22
 - voertuigen, 22
- Brandvermogen, 103
- C_6H_6 , 157
- Calamiteit, 2
- Calamiteitenbedrijf, 2
- CFD. *Zie* Computational Fluid Dynamics
- Clusteren, 36, 111
- CO, 157
- Computational Fluid Dynamics
 - definitie, 83
- Controle
 - aanjaagventilator, 125
 - langsventilatie, 127
 - ventilatiesysteem algemeen, 126
- Conus
 - aanzuig-, 43
 - inwendig, 44
- CP10, winddrukfactor, 100
- Debiet meten, 125
- Deterministische berekeningen, 85
- Diameter, hydraulisch, 94
- Dichtheid verkeer, 63
- Direct geluidsveld, 120
- Direct Numerical Simulation, 84
- DNS, 84
- Draaistroommotor, 41

Drukval over brandhaard, 104
Drukverschil
 barometrisch, 98
 langsventilatie, 93
Dwarsventilatie
 afvoer, 50
 algemeen, 9
 berekenen, 116
 besturing bij brand, 140
 concentraties bepalen, 163
 controlemetingen, 132
 dimensioneren afvoerinstallatie, 115
 dimensioneren op brand, 69
 dimensioneren toevoerinstallatie, 115
 geluid, 51
 inblaassnelheid, 49
 kosten, 51
 normaal bedrijf, 138
 onderdelen, 50
 ontwerpeisen, 49
 semi-, 11
 temperatuur, 30
 toevoer, 49
Elektrisch vermogen, 126
Emissie
 bepaling productie, 76
 soorten, 24
Emissieconcentraties, 25
 achtergrond-, 25
 aërodynamische kortsluiting, 53, 57
 bepaling emissieproductie, 76
 beperken, 24, 27
 berekenen, 72, 161
 berekenen (buiten tunnel), 76
 buiten tunnel, 72
 grenswaarden, 158
 MAC-waarden, 71, 158
 meting in normaal bedrijf, 137
 monitoren, 28
 PIARC, 159
 probabilistische berekeningen, 86
 toelaatbaar, 71
 verhoging toestaan?, 26
 verloop binnen tunnel, 73
 wettelijke normen, 25
 WHO, 160
Energierendement ventilator, 153
Evenwichtsvergelijking langsventilatie, 93
Explosie, 145
f/N kromme, 147
Faalkans langsventilatie, 180
Fijn stof
 definitie, 24
 filteren, 16
 zichtcondities, 78
Galmveld, 119, 122
 luchtdemping, 124
Gassen, heet, 148
Gehoorschade, 117
Geluid
 absorptie, 119
 controlemetingen, 133
 dwarsventilatie, 51
 galmveld, 119, 122
 geluidsdrukkniveau berekenen, 119
 grenswaarden, 117
 langsventilatie, 44
 luidsprekerinstallaties, 118
 overdrukinstallatie, 62
 reflecties in tunnel, 119
 spiegelbronmethode, 120
 spraakverstaanbaarheid, 118
 verkeer, 118
 Wet Geluidshinder, 118
 wet van Sabine, 119
Geluiddemper, 42
Giftige stoffen, 145
Helling
 invloed bij brand, 106
Hete gassen, 148
Hydraulische diameter, 94
Incident, 1
Incident-scenario's, 144
Ingangventilatoren, 112
Isolatie, 81
Kappa-Epsilon-model, 84
Kerndemper, 44
Kipkoppel, 46
Kooianker draaistroommotoren, 46
Kortsluiting, aërodynamisch, 51, 167
Kosten
 vergelijking, 51
Koude lucht, 47
Kritische ventilatiesnelheid, 20, 67, 182
Ladingbranden, 22
Langshelling, 77
Langsventilatie
 algemeen, 7
 barometrische druk, 97
 besturing bij brand, 139
 brandlengte, 102
 concentraties bepalen, 163
 controlemetingen, 127
 dimensioneren op brand, 67
 drukverschil, 93
 evenwichtsvergelijking, 93
 faalkans bij brand, 180
 geluid, 44
 giftige stoffen, 146
 meteorologische invloeden, 97
 normaal bedrijf, 138
 ontwerpeisen, 33
 opstellingsrendement, 110
 Saccardo-injector, 8
 stromingsverlies, 93
Large Eddy Simulation, 84

Leeftijdsklasse voertuigen, 66
Leidschoepen, 42
LES, 84
Lood, 157
Loslatingsverschijnselen, 43, 44
Luchtdemping geluidsreflecties, 124
Luchtkwaliteit, 24
 achtergrondconcentratie, 76
 aërodynamische kortsluiting, 53
 bepaling emissieproductie, 76
 buiten tunnel, 72, 76
 concentraties berekenen, 72
 dimensioneren op, 69
 grenswaarden, 158
 MAC-waarden, 158
 monitoren, 28
 PIARC, 159
 soorten emissies, 157
 toelaatbare concentraties, 71
 verloop binnen tunnel, 73
 wettelijke normen, 25
 WHO, 160
Luchtstroming door verkeer, 95
Luidsprekerinstallaties, 118
MAC-waarden, 71
Meetraster, 129
Mengzone, 102
Natuurlijke ventilatie
 algemeen, 3
 geheel gesloten tunnel, 4
 met openingen in het dak, 5
 met spleten in het dak, 4
 ontwerpeisen, 33
 rookafvoer, 91
 temperatuur, 30
 virtuele spleetbreedte, 88
 warmteafvoer, 91
NO₂, 157
Normaal bedrijf, 2
 besturing, 137
Normale situatie, 2
Onderhoud, 141
Ontwerpeisen
 dwarsventilatie, 49
 langsventilatie, 33
 natuurlijke ventilatie, 33
Ophanging ventilator, 45
Opstelling ventilatoren, 34
Opstellingsrendement, 110
Overdrukventilatie, 60
 besturing bij brand, 140
Overlevingscondities, 148
 giftige gassen, 149
 hete gassen, 148
 warmtestraling, 149
 zicht, 149
Ozon, 157
Plasbrand, 21
Plug-effect, stratificatie, 115
PM10, 24, 158
Portaalafzuiging, 12
Portalen
 aërodynamische kortsluiting, 167
 winddruk, 176
Probabilistische berekeningen, 85
 brand, 86
 emissieconcentratie, 86
RANS, 84
Reinigen tunnellucht, 15
Reynolds Averaged Navier Stokes, 84
Risico
 giftige gassen, 149
 hete gassen, 148
 warmtestraling, 149
 zicht, 149
Risicoanalyse
 deterministisch, 148
 kwantitatief, 147
Rook
 bepalen hoeveelheid, 143
Rookafvoer
 natuurlijke ventilatie, 91
 openingen, 13
Rookontwikkeling
 dwarsventilatie, 19
 langsventilatie, 19
 natuurlijke ventilatie, 18
 vluchtwegen, 58
Saccardo-injector, 8, 34
Schaduw effect, 96
Schoep
 afbuig, 44
 leid-, 42
 steun-, 42
Semi-dwarsventilatie, 11
 temperatuur, 31
Snelheidsmeting in tunnel
 meetinterval, 132
 meetraster, 129
SO₂, 157
Specifieke stuwkracht, 114
Spiegelbronmethode, 120
Sprakverstaanbaarheid, 118
Steunschoepen, 42
Straaluitbreiding, 154
Stratificatie, 18
 plug-effect, 115
Stromingsverlies
 door constructies, 95
 portalen, 93
 wandwrijving, 94
Stuwdruk, 108, 151
Stuwkracht
 invloed temperatuur, 114
 invloed tunnelluchtsnelheid, 113
 meten, 126

rendement, 109
specifiek, 114
Temperatuur, 29
 berekenen in tunnel, 79
 -bestandheid ventilatoren, 134
 en ventilatoropstelling, 40
 invloed ventilatie, 30
 laagst toelaatbaar, 48
 rookgassen, 103
 roosters en kleppen, 135
 stijging beperken, 31
 verloop bij brand, 102
 warmteoverdracht, 105
Temperatuurbestendigheid, 39
terreinaccidentatie
 correctiefactor, 99
Terugstroming, 156
Tunneloperator, 139
Turbulentie
 modelleren, 84
 voorkomen, 45
Uitblaasopening, 38
Uitblaaspatroon, 109
Uitblaassnelheid, 38
 invloed op vermogen, 153
Uitblaasstraal, 37
 verstoring, 38
Ventilatie­richting omkeren, 140
Ventilatiesnelheid
 en backlayering, 20
Ventilator. *Zie* Aanjaagventilator
Ventilatorhuis, 42
Ventilatoropstelling
 clusteren, 36
 en temperatuurbestendigheid, 40
 langsventilatie, 34
 plafondnis, 38
 uitblaasstraal, 37
Verkeer
 categoriën, 66
 dichtheid, 63
 geluid, 118
 invloed op luchtstroming, 95
 leeftijdsklasse, 66
 meting intensiteit in normaal bedrijf,
 138
 samenstelling, 66
 schaduw­effect, 96
 zogeffect, 96
Vluchtwegen
 drukverhoudingen, 59
 overdrukinstallatie, 60
 rookvrij houden, 58
 zicht, 149
Voertuigcategoriën, 66
Volume
 verandering bij brand, 104
Von Karman wervels, 44
Wandwrijving, 94
Warmteafvoer
 natuurlijke ventilatie, 91
Warmtebuffering, 81
Warmteoverdracht, 105, 143
Wet Geluidshinder, 118
Winddruk
 berekenen, 100, 178
 en tunnelventilatie, 178
 factor CP10, 100
 op tunnelportalen, 176
Windhoek, 98
Windinvloed, 87
 aërodynamische kortsluiting, 52
 berekenen, 98
Windsnelheid, 99
Zichtcondities, 78
 berekenen, 79
 vereist, 78
Zogeeffect, 96

Bijlage A

Voorschriften, normen en richtlijnen

De beantwoording van de vraag of mechanische ventilatie in een tunnel moet worden aangebracht alsmede welk type en de vereiste dimensionering van de ventilatie nodig zijn moet worden beantwoord aan de hand van:

- Het Bouwbesluit
- Nederlandse wetgeving voor tunnels
- Europese Richtlijn Tunnelveiligheid, EU 884/2004/EG, Publicatieblad L167
- UNECE – Richtlijn Trans-AC7-9, d.d. 10 december 2001, Recommendations of the group of experts on safety in road tunnels, Final Report
- Veiligheids Richtlijnen – deel C, uitgegeven door Steunpunt Tunnelveiligheid, Bouwdienst, Rijkswaterstaat, 1 januari 2004 met de bijbehorende aanvullingen

Voor aanbevelingen, achtergronden en ervaringen met tunnelventilatie wordt verwezen naar de uitgaven door PIARC – World Road Association, gevestigd in Frankrijk. Genoemd worden:

- PIARC Road Tunnels: Pollution, Ventilation and Environment , 1976
- PIARC Report of the Technical Committee on Road Tunnels, 1983
- PIARC Road Tunnels: Pollution, Ventilation and Environment , 1995
- PIARC Road Tunnels: Fire and smoke control in road tunnels, 1999
- PIARC Pollution by Nitrogen Dioxide in Road Tunnels, 2000
- PIARC Road Tunnels : Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation, 2004
- PIARC Road Tunnels: Fire and smoke control in road tunnels, 2005

In verband met het milieu zijn van toepassing:

- Wet Geluidshinder
- Besluit Luchtkwaliteit
- Europese Richtlijn Luchtkwaliteit 96/62/EG, Publicatieblad L196
- Europese Dochterrichtlijn Luchtkwaliteit 1999/30/EG
- Europese Dochterrichtlijn Luchtkwaliteit 2000/69/EG
- Europese Dochterrichtlijn Luchtkwaliteit 2002/3/EG
- Meetregeling Luchtkwaliteit 2005, Ministerie van VROM, 2005

Elektromechanische systemen voldoen aan de richtlijnen en eisen die zowel in Europees als in nationaal verband zijn gesteld.

Er zijn bij uitgave van deze Aanbevelingen geen normen en voorschriften beschikbaar die expliciet gelden voor de technische uitvoering van ventilatiesystemen in tunnels. Wel zijn er normen voor rook- en warmteafvoer bij brand (veelal bedoeld voor gebouwen), voor ventilatoren en voor onderdelen van tunnelventilatiesystemen.

Onderstaand is een overzicht gegeven van toepasbare normen. Er zij opgemerkt dat normen in de loop der tijd worden gewijzigd, aangevuld, ingetrokken of dat er nieuwe normen worden gepubliceerd. Opdrachtgevers en ontwerpers moeten zich altijd op de hoogste stellen van beschikbare en toepasselijke normen.

Ventilatoren

- NEN-ISO 13350:1999 - Industriële ventilatoren - Prestatiebeproeving van straalventilatoren

Installaties voor rook- en warmtebeheersing

- NEN 6093 Brandveiligheid van Gebouwen – Beoordelingsmethode van rook- en warmteafvoerinstallaties
- NPR 6095-1 Praktijkrichtlijn : Rook- en warmteafvoersystemen – Deel 1 : Richtlijnen voor het ontwerpen en en beoordelen van rook- en warmteafvoerinstallaties
- NPR 6095-2 Praktijkrichtlijn : Rook- en warmteafvoersystemen – Deel 2 : Richtlijnen voor het ontwerpen en installeren van overdrukinstallaties
- NEN-EN 12101-1 tot en met NEN-EN 120101- 10
- NEN-EN 12101-3 voor de beproeving van tunnelventilatoren

Voorkomen explosiegevaar

- Richtlijn Atex 94/9/EG: Besluit explosieveilig materieel
- NEN-EN 50014 tot en met NEN-EN 50020
- NEN-EN-IEC 60079-14

Geluid in tunnels

- AMCA Standaard 300-85
- NEN-ISO 13347-1 tot en met NEN-ISO 13347-4
- ISO 9613/1, Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere, 1993

Bijlage B

Kansverdeling wind naar richting en snelheid

De wind wordt in Nederland door het KNMI op meer dan 20 locaties gemeten. Voor de lokale windomstandigheden wordt verwezen naar de meteogegevens van het KNMI. (website in 2005: www.knmi.nl/samenw/hydra/cgi-bin/freqtab.cgi)

In deze bijlage zijn zes windfrequentietabellen (bron: KNMI) opgenomen die voor berekeningen aan tunnelventilatie als tamelijk representatief kunnen worden beschouwd.

Procentuele verdeling windfrequentie													SCHIPHOL	
snelheid (m/s)	veranderlijk tot stil	windrichting in graden t.o.v. het noorden											cumulatief	
		350-010	020-040	050-070	080-100	110-130	140-160	170-190	200-220	230-250	260-280	290-310		320-340
0,0 - 0,9	0,73	0,05	0,05	0,04	0,04	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06	0,05	0,04	0,05	1,33
1,0 - 1,9	1,91	0,58	0,39	0,35	0,39	0,52	0,45	0,5	0,58	0,5	0,42	0,38	0,52	7,49
2,0 - 2,9	0,64	1,39	0,86	0,72	0,93	1,03	1	1,24	1,49	1,04	0,97	0,8	1,05	13,15
3,0 - 3,9	0,05	1,35	1,09	1	1,26	1,25	1,28	1,71	2,08	1,17	1,26	1,07	1,11	15,69
4,0 - 4,9	0,01	0,96	1,07	1,14	1,18	1,06	1,13	1,7	2,01	1,32	1,36	1,04	0,98	14,96
5,0 - 5,9	0	0,6	0,88	1,03	0,82	0,71	0,88	1,33	1,54	1,09	1,23	0,66	0,65	11,42
6,0 - 6,9	0	0,55	0,68	0,93	0,66	0,48	0,67	1,13	1,45	1,29	1,24	0,88	0,76	10,72
7,0 - 7,9	-	0,36	0,43	0,72	0,47	0,25	0,41	0,77	1,28	1,22	1,01	0,71	0,61	8,23
8,0 - 8,9	-	0,22	0,29	0,45	0,24	0,1	0,24	0,46	0,92	1,21	0,79	0,51	0,41	5,84
9,0 - 9,9	-	0,1	0,17	0,26	0,11	0,04	0,12	0,27	0,7	0,79	0,49	0,31	0,22	3,58
10,0 - 10,9	-	0,05	0,1	0,17	0,07	0,01	0,05	0,19	0,47	0,79	0,45	0,24	0,16	2,76
11,0 - 11,9	-	0,04	0,04	0,11	0,03	0	0,02	0,11	0,32	0,62	0,33	0,15	0,07	1,85
12,0 - 12,9	-	0,02	0,02	0,04	0,01	0	0,01	0,06	0,19	0,46	0,24	0,13	0,06	1,24
13,0 - 13,9	-	0,01	0,01	0,02	0	0	0,01	0,02	0,11	0,29	0,15	0,07	0,03	0,71
14,0 - 14,9	-	0,01	0,01	0,01	-	-	0	0,01	0,06	0,23	0,11	0,04	0,02	0,48
15,0 - 15,9	-	0	0	0	-	-	-	0,01	0,04	0,13	0,04	0,02	0,01	0,25
16,0 - 16,9	-	0	-	-	-	-	-	0	0,02	0,08	0,02	0,01	0,01	0,14
17,0 - 17,9	-	0	-	-	-	-	-	0	0,01	0,04	0,02	0,01	0	0,08
18,0 - 18,9	-	-	-	-	-	-	-	0	0,01	0,03	0,01	0,01	0	0,05
19,0 - 19,9	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0,01	0,01	0	0	0,02
20,0 - 20,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	-	0,01
21,0 - 21,9	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0
22,0 - 22,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	-	0
23,0 - 23,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0
24,0 - 24,9	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0
> 25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	0
cumulatief	3,34	6,3	6,09	6,99	6,2	5,52	6,32	9,56	13,31	12,37	10,2	7,05	6,74	100

Procentuele verdeling windfrequentie													ZESTIENHOVEN	
snelheid (m/s)	windrichting in graden t.o.v. het noorden													cumulatief
	veranderlijk tot stil	350-010	020-040	050-070	080-100	110-130	140-160	170-190	200-220	230-250	260-280	290-310	320-340	
0,0 - 0,9	1,92	0,12	0,14	0,07	0,06	0,09	0,1	0,1	0,08	0,07	0,11	0,1	0,11	3,08
1,0 - 1,9	2,71	0,67	0,99	0,64	0,52	0,5	0,56	0,79	0,45	0,51	0,63	0,45	0,5	9,92
2,0 - 2,9	0,71	0,99	1,31	1,27	0,96	1,05	0,89	1,49	0,83	0,95	1,17	0,66	0,72	13,01
3,0 - 3,9	0,06	1,07	1,01	1,27	1,15	0,99	0,8	1,68	1,17	1,41	1,28	0,86	0,9	13,64
4,0 - 4,9	0,01	0,9	0,88	1,31	1,12	0,87	0,78	1,86	1,43	1,47	1,33	0,9	0,84	13,69
5,0 - 5,9	0	0,64	0,72	0,86	0,79	0,59	0,63	1,3	1,12	1,34	1,27	0,75	0,71	10,74
6,0 - 6,9	0	0,54	0,61	0,71	0,57	0,37	0,41	1,2	1,61	1,49	1,08	0,69	0,67	9,96
7,0 - 7,9	-	0,35	0,39	0,38	0,36	0,24	0,3	0,86	1,5	1,48	0,98	0,53	0,55	7,92
8,0 - 8,9	-	0,21	0,29	0,27	0,21	0,12	0,22	0,63	1,29	1,26	0,74	0,45	0,34	6,02
9,0 - 9,9	-	0,08	0,12	0,13	0,08	0,04	0,09	0,4	1,04	1,04	0,46	0,27	0,24	3,99
10,0 - 10,9	-	0,07	0,08	0,05	0,05	0,01	0,04	0,24	0,7	0,93	0,41	0,23	0,13	2,93
11,0 - 11,9	-	0,04	0,05	0,01	0,01	0	0,02	0,17	0,51	0,65	0,35	0,16	0,08	2,05
12,0 - 12,9	-	0,02	0,03	0,01	0	0	0,01	0,1	0,34	0,44	0,23	0,12	0,06	1,35
13,0 - 13,9	-	0,01	0,01	-	0	0	0	0,04	0,17	0,28	0,15	0,07	0,04	0,77
14,0 - 14,9	-	0	0	-	-	-	0	0,02	0,09	0,2	0,08	0,05	0,02	0,46
15,0 - 15,9	-	0	-	-	-	-	-	0,01	0,04	0,11	0,06	0,02	0,01	0,25
16,0 - 16,9	-	0	-	-	-	-	-	0	0,02	0,04	0,03	0,01	0	0,11
17,0 - 17,9	-	-	-	-	-	-	-	0	0,01	0,03	0,02	0,01	0	0,06
18,0 - 18,9	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0,01	0,01	0	0	0,03
19,0 - 19,9	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0,01	0	0	0	0,01
20,0 - 20,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	-	0,01
21,0 - 21,9	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	-	0
22,0 - 22,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	-	0
23,0 - 23,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	-	-	0
24,0 - 24,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	0
> 25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	-	0
cumulatief	5,41	5,71	6,64	6,97	5,9	4,87	4,85	10,9	12,4	13,72	10,39	6,34	5,9	100

Procentuele verdeling windfrequentie													DE BILT	
Snelheid (m/s)	windrichting in graden t.o.v. het noorden													cumulatief
	veranderlijk tot stil	350-010	020-040	050-070	080-100	110-130	140-160	170-190	200-220	230-250	260-280	290-310	320-340	
0,0 - 0,9	2,48	0,1	0,18	0,24	0,37	0,35	0,36	0,28	0,18	0,11	0,13	0,19	0,18	5,15
1,0 - 1,9	2,16	0,75	1,17	1,27	1,2	1,15	2,13	1,64	1,34	1,07	0,72	0,77	0,95	16,32
2,0 - 2,9	0,57	0,67	1,06	1,04	0,97	0,87	1,5	1,31	1,23	1,2	1,62	1,61	1,61	15,25
3,0 - 3,9	0,03	0,91	1,94	1,37	1,1	0,95	1,78	1,93	2,45	2,23	1,27	1,04	1,27	18,29
4,0 - 4,9	0	0,76	1,41	1	0,81	0,7	1,28	1,48	2,09	1,94	1,38	1	0,87	14,71
5,0 - 5,9	0	0,6	0,84	0,68	0,59	0,44	0,68	0,96	2,09	1,94	1,15	0,88	0,61	11,45
6,0 - 6,9	-	0,26	0,59	0,38	0,31	0,25	0,29	0,64	1,35	1,34	0,95	0,45	0,31	7,13
7,0 - 7,9	0	0,18	0,35	0,28	0,23	0,16	0,19	0,41	1,06	1,18	0,58	0,3	0,18	5,1
8,0 - 8,9	-	0,08	0,14	0,16	0,11	0,07	0,07	0,22	0,61	0,87	0,42	0,15	0,07	2,97
9,0 - 9,9	-	0,04	0,08	0,08	0,04	0,02	0,04	0,12	0,4	0,56	0,22	0,07	0,05	1,74
10,0 - 10,9	-	0,01	0,03	0,03	0,02	0	0,01	0,06	0,23	0,28	0,17	0,07	0,03	0,94
11,0 - 11,9	-	0	0,01	0,01	0	0	0	0,02	0,12	0,15	0,07	0,02	0,02	0,42
12,0 - 12,9	-	0	0,01	0	-	0	0	0,01	0,07	0,1	0,05	0,01	0,01	0,27
13,0 - 13,9	-	0	0	0	-	-	0	0,01	0,03	0,05	0,02	0,01	0	0,12
14,0 - 14,9	-	-	-	-	-	0	-	0	0,01	0,03	0,01	0	0	0,07
15,0 - 15,9	-	-	-	-	-	-	-	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0	0,03
16,0 - 16,9	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0,01	0	0	0	0,01
17,0 - 17,9	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	-	-	0,01
18,0 - 18,9	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0
19,0 - 19,9	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	-	0
20,0 - 20,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0
21,0 - 21,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	0
22,0 - 22,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	0
23,0 - 23,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24,0 - 24,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
> 25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
cumulatief	5,24	4,39	7,81	6,55	5,75	4,97	8,33	9,09	13,28	13,08	8,78	6,58	6,15	100

Procentuele verdeling windfrequentie													HOOGVEEEN	
snelheid (m/s)	windrichting in graden t.o.v. het noorden													cumulatief
	veranderlijk tot stil	350-010	020-040	050-070	080-100	110-130	140-160	170-190	200-220	230-250	260-280	290-310	320-340	
0,0 - 0,9	0,55	0,16	0,14	0,2	0,22	0,21	0,17	0,2	0,14	0,1	0,13	0,2	0,18	2,6
1,0 - 1,9	0,66	1,03	1,01	1,15	1,36	1	1,07	1,35	0,99	0,63	0,82	1,16	1,05	13,28
2,0 - 2,9	0,12	0,88	1,13	1,5	1,84	1,36	1,32	2,04	1,92	1,37	1,58	1,26	0,71	17,02
3,0 - 3,9	0,01	0,8	1	1,3	1,56	1,16	0,92	1,89	2,34	1,88	1,76	1,53	0,93	17,07
4,0 - 4,9	0	0,68	0,83	1,02	1,37	0,84	0,67	1,46	2,31	1,95	1,53	1,4	0,7	14,75
5,0 - 5,9	0	0,36	0,52	0,72	0,89	0,45	0,4	1,22	2,25	1,86	1,24	0,91	0,43	11,23
6,0 - 6,9	-	0,17	0,33	0,49	0,72	0,27	0,24	0,81	1,52	1,67	1,1	0,45	0,3	8,06
7,0 - 7,9	-	0,13	0,2	0,3	0,54	0,15	0,11	0,52	1,17	1,44	1,01	0,55	0,2	6,33
8,0 - 8,9	-	0,05	0,08	0,16	0,33	0,07	0,05	0,31	0,83	1,02	0,73	0,34	0,1	4,07
9,0 - 9,9	-	0,02	0,02	0,05	0,15	0,02	0,01	0,12	0,37	0,65	0,44	0,18	0,06	2,08
10,0 - 10,9	-	0,01	0,02	0,04	0,08	0,01	0,01	0,1	0,28	0,58	0,35	0,11	0,04	1,63
11,0 - 11,9	-	0	0	0,01	0,03	0,01	0,01	0,04	0,14	0,33	0,24	0,05	0,02	0,87
12,0 - 12,9	-	0	-	0	0,01	0	0	0,02	0,06	0,22	0,15	0,03	0,01	0,51
13,0 - 13,9	-	-	-	-	-	-	-	0,01	0,02	0,07	0,07	0,02	0	0,2
14,0 - 14,9	-	-	-	-	-	-	-	0,01	0,02	0,06	0,04	0,01	0	0,14
15,0 - 15,9	-	-	-	-	-	-	-	0	0,01	0,04	0,02	0	-	0,08
16,0 - 16,9	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0,02	0,02	0	-	0,04
17,0 - 17,9	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0,01	0,01	0	-	0,02
18,0 - 18,9	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	-	-	0,01
19,0 - 19,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	-	-	0
20,0 - 20,9	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	-	-	0
21,0 - 21,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22,0 - 22,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23,0 - 23,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24,0 - 24,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
> 25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
cumulatief	1,34	4,3	5,27	6,94	9,1	5,54	4,97	10,1	14,39	13,9	11,25	8,19	4,7	100

Procentuele verdeling windfrequentie													EINDHOVEN	
snelheid (m/s)	veranderlijk tot stil	windrichting in graden t.o.v. het noorden											cumulatief	
		350-010	020-040	050-070	080-100	110-130	140-160	170-190	200-220	230-250	260-280	290-310		320-340
0,0 - 0,9	2,2	0,12	0,11	0,07	0,07	0,11	0,19	0,13	0,15	0,16	0,13	0,14	0,15	3,74
1,0 - 1,9	1,54	0,72	0,85	0,66	0,58	0,79	1,12	0,93	1,02	0,81	0,8	0,76	0,69	11,29
2,0 - 2,9	0,34	0,92	1,37	1,35	0,92	1,37	1,56	1,41	1,76	1,52	1,39	0,98	0,93	15,82
3,0 - 3,9	0,03	0,98	1,42	1,21	0,92	1,25	1,46	1,57	2,21	2	1,4	1	0,88	16,32
4,0 - 4,9	0	0,79	1,1	1,34	0,84	1,05	1,05	1,44	2,09	2,06	1,34	0,89	0,74	14,73
5,0 - 5,9	0	0,4	0,66	0,99	0,57	0,63	0,46	1,02	1,82	1,69	1,02	0,53	0,46	10,27
6,0 - 6,9	0	0,39	0,6	0,84	0,44	0,4	0,26	0,84	2,18	2,35	0,98	0,62	0,47	10,37
7,0 - 7,9	0	0,25	0,36	0,56	0,27	0,21	0,13	0,57	1,72	1,76	0,87	0,56	0,37	7,61
8,0 - 8,9	-	0,1	0,15	0,2	0,1	0,08	0,04	0,29	0,97	1,2	0,58	0,28	0,18	4,16
9,0 - 9,9	-	0,05	0,07	0,11	0,04	0,04	0,02	0,13	0,68	0,7	0,37	0,19	0,09	2,47
10,0 - 10,9	-	0,03	0,02	0,05	0,02	0,02	0,01	0,08	0,44	0,48	0,23	0,1	0,04	1,52
11,0 - 11,9	-	0,01	0,01	0,02	0	0	0	0,03	0,21	0,28	0,12	0,05	0,02	0,75
12,0 - 12,9	-	0	0	0	0	0	-	0,01	0,15	0,16	0,11	0,05	0,01	0,5
13,0 - 13,9	-	0	0	0	-	-	-	0	0,06	0,08	0,06	0,02	0	0,22
14,0 - 14,9	-	-	-	-	-	-	-	0	0,03	0,04	0,03	0,02	0	0,12
15,0 - 15,9	-	-	-	-	-	-	-	0	0,02	0,02	0,02	0	0	0,06
16,0 - 16,9	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0,01	0,01	0	-	0,02
17,0 - 17,9	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0,01	0	-	0,01
18,0 - 18,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	-	0
19,0 - 19,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	-	0
20,0 - 20,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	-	-	0
21,0 - 21,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	-	0
22,0 - 22,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	-	-	0
23,0 - 23,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	0
24,0 - 24,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
> 25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
cumulatief	4,12	4,77	6,72	7,4	4,76	5,95	6,3	8,46	15,51	15,31	9,47	6,19	5,04	100

Procentuele verdeling windfrequentie													BEEK	
snelheid (m/s)	windrichting in graden t.o.v. het noorden													cumulatief
	veranderlijk tot stil	350-010	020-040	050-070	080-100	110-130	140-160	170-190	200-220	230-250	260-280	290-310	320-340	
0,0 - 0,9	0,62	0,06	0,05	0,05	0,07	0,07	0,07	0,09	0,08	0,05	0,05	0,05	0,04	1,35
1,0 - 1,9	2,19	0,42	0,6	0,75	0,79	0,72	0,79	1,08	1,1	0,75	0,58	0,47	0,47	10,71
2,0 - 2,9	0,67	0,81	1,37	1,96	1,6	1,11	1,02	1,99	2,4	1,47	0,97	0,57	0,75	16,67
3,0 - 3,9	0,06	0,8	1,56	1,99	1,43	0,73	0,7	1,94	2,98	2,34	1,54	0,97	0,77	17,81
4,0 - 4,9	0,01	0,68	1,38	1,32	0,97	0,32	0,44	1,54	3,2	2,42	1,23	0,75	0,66	14,92
5,0 - 5,9	0	0,28	0,7	0,71	0,62	0,11	0,21	1	2,38	2,39	1,01	0,41	0,4	10,23
6,0 - 6,9	-	0,3	0,56	0,58	0,5	0,07	0,14	0,91	2,69	2,33	0,66	0,32	0,2	9,27
7,0 - 7,9	-	0,17	0,36	0,29	0,3	0,03	0,05	0,52	2,31	1,91	0,52	0,25	0,16	6,88
8,0 - 8,9	-	0,09	0,2	0,14	0,16	0,01	0,04	0,33	1,78	1,57	0,32	0,14	0,08	4,87
9,0 - 9,9	-	0,04	0,08	0,06	0,07	0	0,01	0,13	1,22	1,01	0,18	0,08	0,03	2,91
10,0 - 10,9	-	0,02	0,02	0,02	0,04	0	0,01	0,1	0,83	0,7	0,14	0,03	0,02	1,93
11,0 - 11,9	-	0	0,01	0,01	0,01	0	0	0,05	0,52	0,45	0,09	0,01	0,01	1,17
12,0 - 12,9	-	0	0	0	0	-	0	0,02	0,29	0,25	0,05	0,01	0	0,63
13,0 - 13,9	-	-	0	-	0	0	0	0,01	0,14	0,11	0,02	0,01	0	0,3
14,0 - 14,9	-	-	-	-	-	-	-	0,01	0,09	0,07	0,01	0	-	0,19
15,0 - 15,9	-	-	-	-	0	-	-	0	0,04	0,03	0,01	0	0	0,09
16,0 - 16,9	-	-	-	-	-	-	-	-	0,02	0,02	0	-	-	0,04
17,0 - 17,9	-	-	-	-	-	-	-	-	0,01	0,01	0	-	-	0,02
18,0 - 18,9	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0,01	0	-	-	0,01
19,0 - 19,9	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0,01	0	0	-	0,01
20,0 - 20,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	-	-	0
21,0 - 21,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	0
22,0 - 22,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23,0 - 23,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	0
24,0 - 24,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
> 25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
cumulatief	3,54	3,68	6,87	7,87	6,57	3,18	3,5	9,73	22,08	17,9	7,4	4,07	3,59	100

Bijlage C

Coëfficiënten benaderingsformules windinvloed CP10

Stap 1: Bepaal de configuratie

Hierbij moet worden opgemerkt dat hoewel uitgangsportalen zelden of nooit bijvoorbeeld een lichtrooster hebben, moet bij het uitgangsportaal in de configuratiekeuze de configuratie 'met lichtrooster' worden gekozen indien het ingangsportaal een lichtrooster heeft. In de metingen is namelijk de invloed van het lichtrooster boven het ingangsportaal op het uitgangsportaal gemeten.

Stap 2: Bepaal de verhouding tussen de lichtsnelheid in de tunnel en de windsnelheid (u_t/u_w)

Daarbij geldt dat in de formule voor CP10 is de verhouding van u_t/u_w positief 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 bij 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. extrapolatie tussen waarden voor $u_t/u_w = \frac{1}{2}$ en $u_t/u_w = 1$
- $-\frac{1}{2} < u_t/u_w < 0$: lin. interpolatie tussen waarden voor $u_t/u_w = 0$ en $u_t/u_w = -\frac{1}{2}$
- $-1 < u_t/u_w < -\frac{1}{2}$: lin. interpolatie tussen waarden voor $u_t/u_w = -\frac{1}{2}$ en $u_t/u_w = -1$
- $u_t/u_w < -1$: lin. extrapolatie tussen waarden voor $u_t/u_w = -\frac{1}{2}$ en $u_t/u_w = -1$

Stap 3: Lees in de tabel de coëfficiënten af voor de benaderingsformules van CP10.

Tabel windfactoren verzonken tunnelportaal

Configuratie		Factoren							Factoren						
		Ingangsportaal							Uitgangsportaal						
1	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	0,00	-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	0,00	0,24	0,06	0,01	-0,01	0,00	0,00	0,10	0,34	0,10	-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	0,00
+1	-0,10	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	
2	ut/uw	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
	-1	-0,13	0,10	-0,06	0,00	-0,02	-0,03	0,01	-0,08	0,62	0,15	0,06	0,04	0,02	-0,05
	-0,5	-0,03	0,20	0,02	0,04	0,00	0,00	0,02	-0,01	0,47	0,12	0,03	0,02	0,00	-0,03
	0	0,00	0,25	0,06	0,02	0,01	-0,01	0,00	0,07	0,34	0,08	0,03	0,01	-0,02	-0,01
	+0,5	-0,01	0,34	0,14	0,00	-0,01	-0,02	-0,01	0,09	0,24	0,07	0,04	-0,02	0,01	-0,02
+1	-0,10	0,42	0,19	-0,02	-0,04	-0,03	-0,01	0,04	0,15	0,03	0,05	-0,08	0,02	0,00	
3	ut/uw	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
	-1	-0,10	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	0,00	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	0,10	0,00	0,00	0,01	0,00	0,11	0,35	0,10	-0,04	-0,05	0,01	0,00
	+0,5	0,02	0,45	0,18	-0,02	-0,02	0,00	-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	
4	ut/uw	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
	-1	-0,08	0,20	-0,02	0,00	0,00	-0,02	0,02	-0,03	0,64	0,15	0,06	0,03	0,01	-0,05
	-0,5	0,02	0,30	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	0,10	0,02	0,03	0,00	0,01	0,12	0,36	0,08	0,03	0,00	-0,03	-0,01
	+0,5	0,04	0,44	0,18	0,00	0,01	-0,01	0,00	0,14	0,26	0,07	0,04	-0,03	0,00	-0,02
+1	-0,05	0,52	0,23	-0,02	-0,02	-0,02	0,00	0,09	0,17	0,03	0,05	-0,09	0,01	0,00	
5	ut/uw	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
	-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	0,10	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	0,10	0,03	0,08	0,13	0,25	0,08	-0,06	-0,11	0,01	-0,08
+1	-0,26	0,50	0,14	-0,16	0,19	0,00	0,02	0,09	0,14	0,03	-0,02	-0,25	0,01	-0,01	
6	ut/uw	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
	-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	0,40	0,05	0,00	0,05	-0,05	0,06	0,10	0,42	0,05	-0,01	-0,03	0,01	-0,10
	+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	0,00	-0,09
+1	-0,13	0,41	0,20	-0,09	0,03	-0,14	0,00	-0,01	0,29	-0,13	0,04	0,04	0,06	0,02	
7	ut/uw	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
	-1	0,01	0,20	-0,09	0,01	-0,14	-0,10	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	0,40	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	0,00	

Tabel windfactoren half-verzonken tunnelportaal

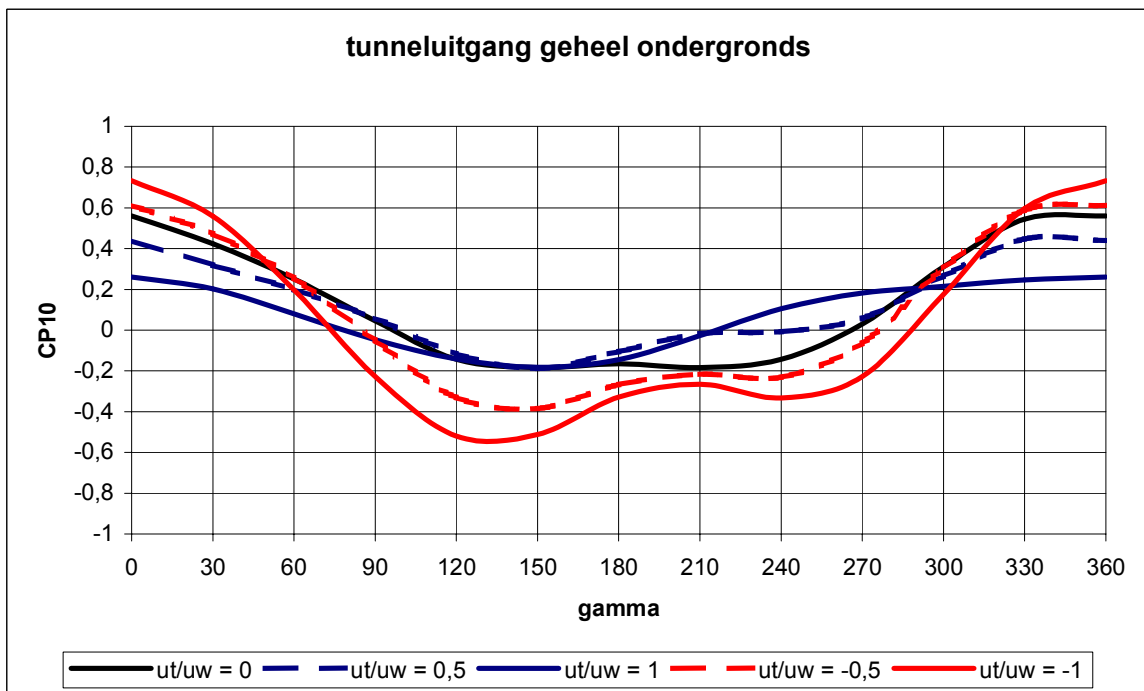
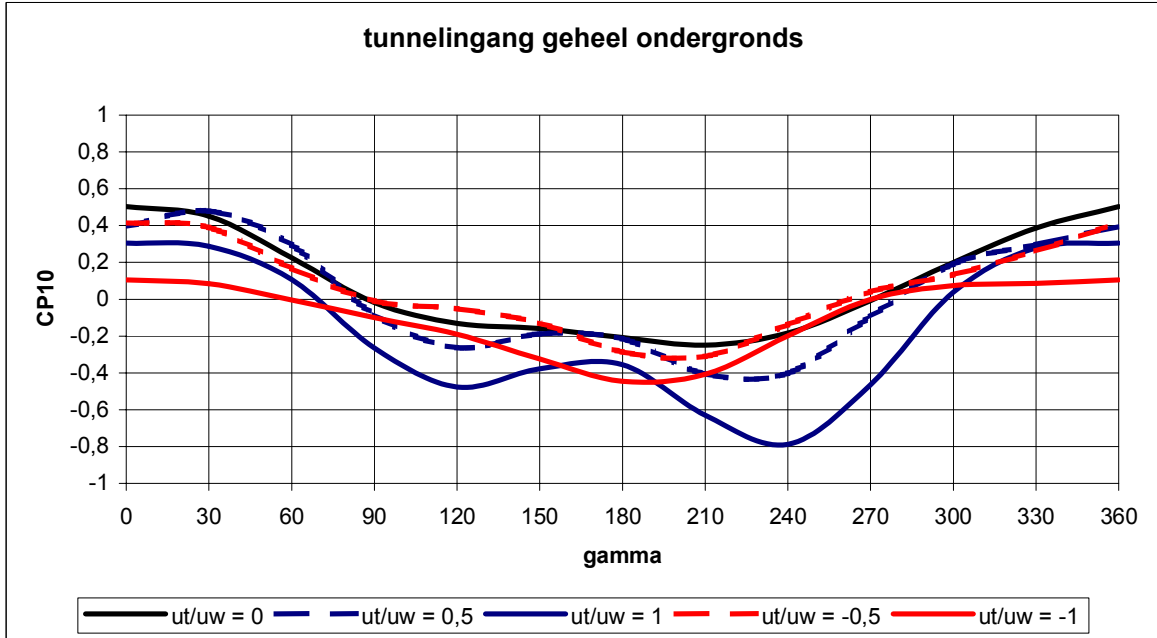
Configuratie	ut/uw	Factoren Ingangsportaal							Factoren Uitgangsportaal						
		A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6
8	-1	-0,17	0,10	-0,05	-0,02	0,01	-0,04	0,03	-0,08	0,63	0,22	0,00	-0,08	0,09	-0,02
	-0,5	-0,06	0,20	0,03	0,02	0,03	-0,02	0,02	-0,01	0,49	0,18	-0,04	-0,10	0,05	-0,01
	0	-0,03	0,26	0,08	0,00	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	0,20	-0,04	0,02	-0,02	0,04	0,08	0,25	0,10	0,00	-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
9	-1	-0,18	0,25	-0,01	0,03	0,02	-0,06	0,08	0,12	0,57	0,29	-0,04	-0,20	0,22	-0,08
	-0,5	-0,02	0,32	0,08	0,00	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	0,00	-0,13	0,06	-0,05
	+0,5	-0,04	0,43	0,19	-0,12	0,10	-0,02	0,08	0,11	0,29	0,10	0,00	-0,17	0,08	-0,05
	+1	-0,20	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
10	-1	-0,16	0,22	0,02	0,00	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	0,00	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	0,10	-0,01	-0,14	0,04	-0,02
	+1	-0,38	0,87	0,10	-0,13	0,09	-0,07	0,01	0,10	0,20	0,08	0,01	-0,23	0,03	0,07
11	-1	-0,03	0,13	0,03	-0,02	-0,12	-0,08	0,04	0,10	0,32	0,13	0,06	0,12	-0,01	-0,03
	-0,5	0,08	0,24	0,10	0,00	-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	0,00	0,06	0,13	0,32	0,14	0,00	-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	0,10	0,01	-0,04	-0,03	-0,02
	+1	-0,24	1,04	0,30	-0,11	0,05	0,00	0,11	0,02	0,03	0,00	0,03	-0,07	-0,02	-0,01
12	-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	0,00
	-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	0,00	-0,12	-0,05	0,06	0,22	0,34	0,04	-0,01	0,11	0,03	-0,06
	+0,5	0,12	0,50	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	0,00	0,10	0,09	0,07	0,05

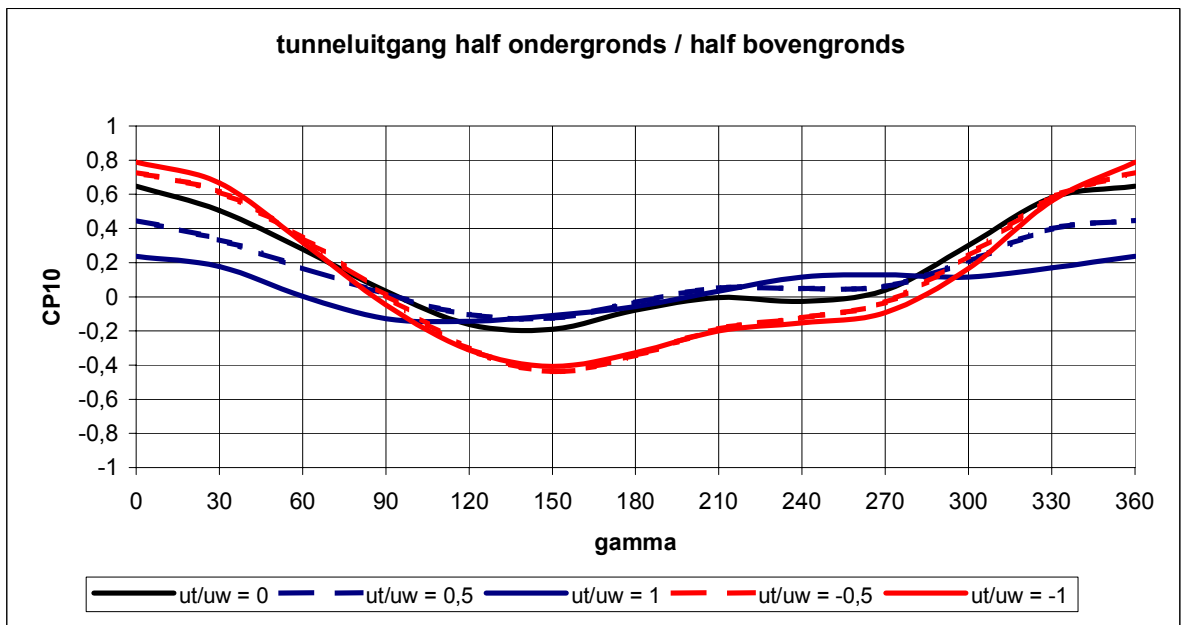
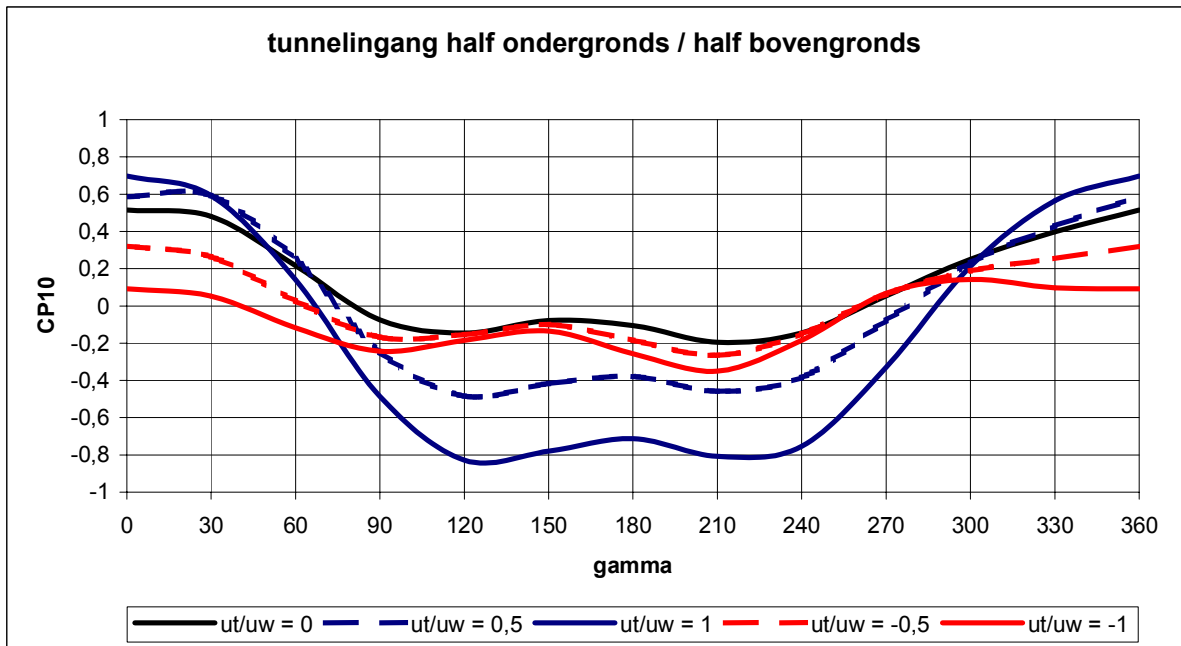
Tabel windfactoren bovengronds tunnelportaal

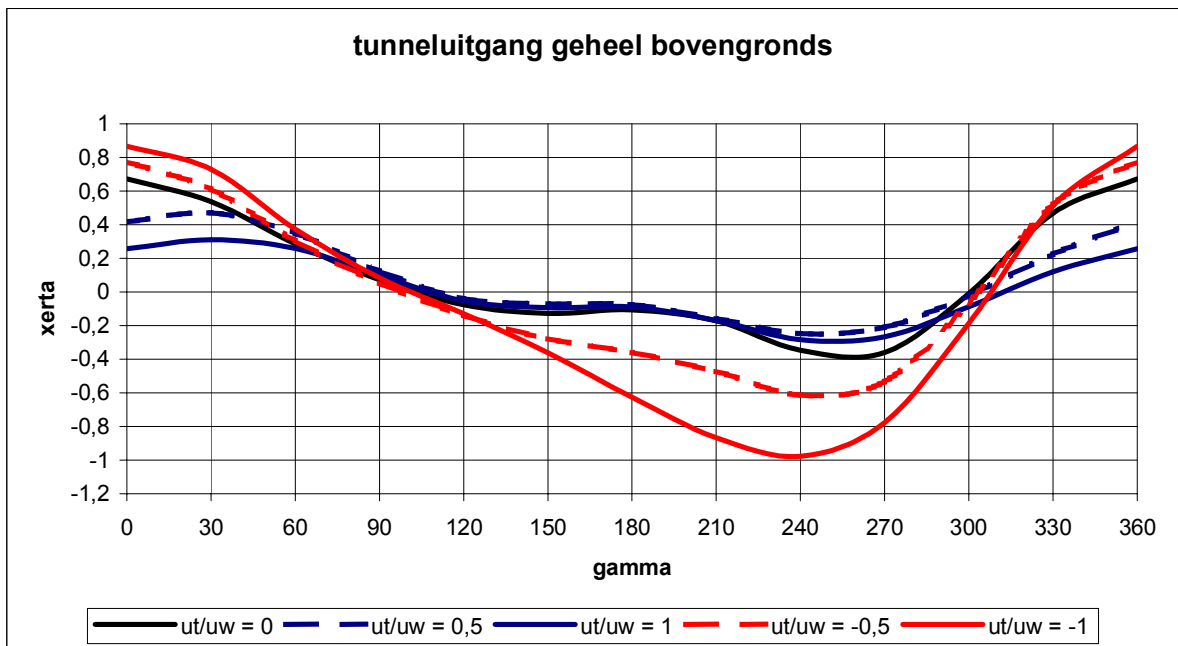
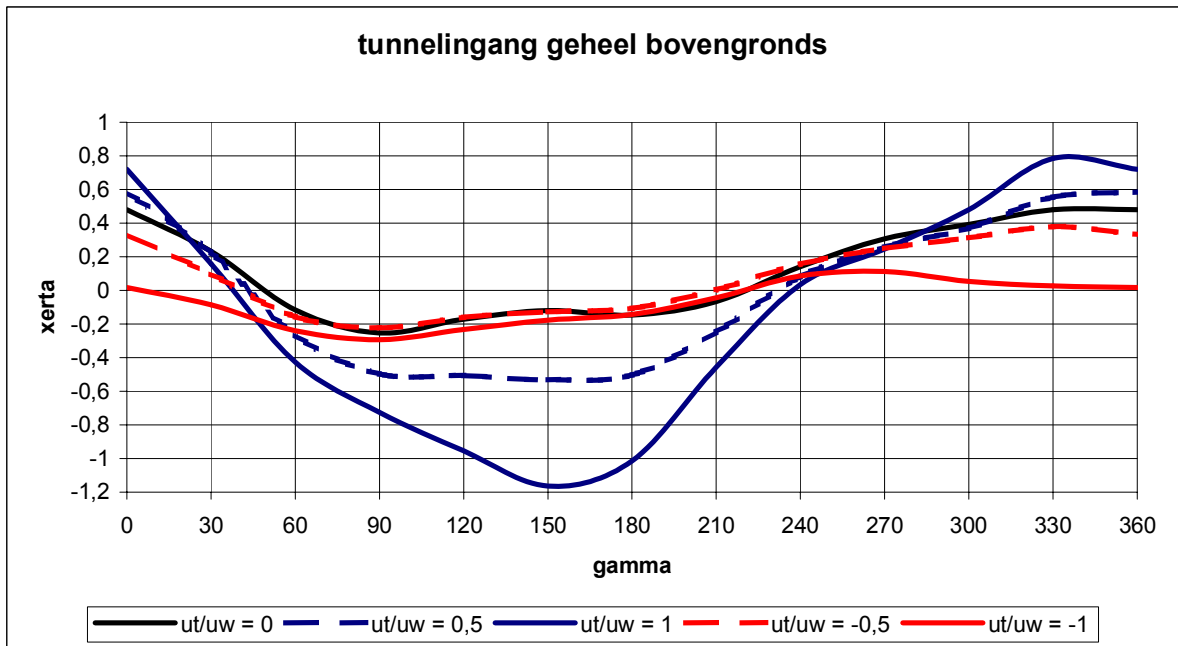
Configuratie		Factoren						Factoren							
		Ingangsportaal						Uitgangsportaal							
13	ut/uw	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6
	-1	-0,18	-0,06	0,07	0,01	0,11	0,06	-0,02	-0,06	0,59	0,16	0,01	0,41	-0,04	0,07
	-0,5	-0,06	0,07	0,17	0,03	0,08	0,00	-0,07	0,03	0,48	0,14	0,01	0,28	-0,01	0,00
	0	-0,06	0,15	0,21	0,03	0,06	-0,03	-0,07	0,10	0,34	0,16	0,02	0,24	0,01	0,01
	+0,5	-0,20	0,43	0,22	0,06	0,03	-0,04	-0,06	0,09	0,27	0,09	-0,01	0,20	0,04	0,01
	+1	-0,30	0,78	0,14	0,06	-0,03	-0,07	-0,12	0,05	0,22	0,03	-0,05	0,20	0,06	0,01
14	ut/uw	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
	-1	-0,10	0,08	0,02	0,03	-0,14	-0,03	-0,04	-0,08	0,66	0,32	0,00	0,20	0,00	-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	0,00	0,03	0,44	0,28	-0,02	-0,02	0,00	-0,02
	+0,5	-0,07	0,32	0,01	0,09	-0,40	-0,09	-0,08	0,12	0,36	0,13	-0,07	-0,01	-0,01	0,00
	+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
15	ut/uw	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
	-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	0,20	0,01	0,31	-0,03	-0,05
	0	0,11	0,23	0,05	0,04	-0,24	0,00	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	0,30	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
16	ut/uw	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
	-1	-0,12	0,04	0,11	0,05	-0,20	-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	0,10	0,31	0,14	0,06	-0,25	-0,06	0,10	0,10	0,32	0,14	0,04	0,24	0,03	-0,10
	+0,5	-0,02	0,52	0,17	0,12	-0,39	0,06	0,11	0,00	0,14	0,04	0,02	0,28	0,13	0,04
	+1	-0,17	0,80	0,17	0,17	-0,65	0,14	0,00	-0,11	0,09	0,12	0,05	0,23	0,05	-0,02

Bijlage D

Grafische weergave windfactor CP10







Bijlage E

Omrekenfactoren voor emissies

Omrekenfactoren

In deze Aanbevelingen worden voor emissies de eenheid gram/uur (g/h) gebruikt en voor concentraties de eenheid microgram/m³ (µg/m³). Bij grote concentraties kan ook milligram/m³ (mg/m³) worden gebruikt.

Voor emissie en concentraties worden ook wel de eenheden l/min en ppm (parts per million) gebruikt. In de onderstaande tabellen worden omrekeningsfactoren gegeven.

Emissies		
Verbinding	1 g/h → l/min	1 l/min → g/h
Koolmonoxide (CO)	0,0133	75
Stikstofdioxide (NO ₂)	0,00813	123
Benzeen (C ₆ H ₆)	0,00478	209
Benzapreen (BaP)	0,00148	675
Zwaveldioxide (SO ₂)	0,00569	176
Ozon (O ₃)	0,00788	128

Concentraties		
Verbinding	1 µg/m ³ → ppm	1 ppm → µg/m ³
Koolmonoxide (CO)	850 x 10 ⁻⁶	1160
Stikstofdioxide (NO ₂)	524 x 10 ⁻⁶	1880
Benzeen (C ₆ H ₆)	308 x 10 ⁻⁶	3250
Benzapreen (BaP)	95 x 10 ⁻⁶	10500
Zwaveldioxide (SO ₂)	367 x 10 ⁻⁶	2730
Ozon (O ₃)	501 x 10 ⁻⁶	1990

Kengetallen voor licht verkeer (personenauto's)

PM10, 2005							
[g/h]	Helling [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
5	1,9	2	2	2,1	2,2	2,5	2,9
10	2,2	2,2	2,4	2,4	2,7	3,2	4,1
20	2,6	2,8	2,9	3,1	3,8	4,8	6,6
30	3,6	3,7	3,9	4,2	5,3	7,1	10,2
40	4,7	5	5,3	5,6	7,4	10,4	15,3
50	6,1	6,5	6,9	7,4	9,9	15	22,4
60	6,9	7,7	8,2	9	12,2	16,8	25,4
70	6,2	6,9	7,6	8,4	11,5	14,8	22,5
80	4,7	5,5	6,1	6,9	9,7	13,9	21,4
90	6,7	7,7	8,7	9,8	13,8	20,4	31,7
100	10,1	11,7	13	14,7	20,8	31	48,2
110	14,2	16,4	18,3	20,8	29,5	44,6	69,4
120	18,1	20,8	23,3	26,4	37,6	56,9	88,6
130	18	20,4	23,2	26,4	37,7	56,9	88,6

PM10, 2010							
[g/h]	Helling [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
5	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1	1,2
10	0,9	0,9	1	1	1,1	1,3	1,7
20	1	1,1	1,2	1,2	1,5	1,9	2,6
30	1,4	1,5	1,5	1,6	2	2,7	3,8
40	1,9	2	2,1	2,2	2,9	4,1	6,1
50	2,4	2,6	2,7	2,9	3,8	6	8,9
60	2,8	3	3,2	3,5	4,7	6,5	9,8
70	2,5	2,7	3	3,3	4,6	5,7	8,6
80	1,9	2,2	2,5	2,8	3,9	5,6	8,6
90	2,8	3,2	3,6	4,1	5,8	8,6	13,3
100	4,2	4,8	5,4	6,2	8,7	12,9	20,1
110	5,8	6,6	7,4	8,5	12	18,3	28,4
120	7,4	8,5	9,7	11	15,7	23,7	36,5
130	9,3	10,5	12	13,6	19,4	29,3	45,7

PM10 2015							
[g/h]	Helling [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9
10	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1	1,3
20	0,8	0,9	0,9	0,9	1,1	1,5	2,1
30	1,1	1,1	1,2	1,2	1,5	2,1	3
40	1,5	1,5	1,6	1,7	2,3	3,2	4,7
50	1,8	2	2,1	2,2	3	4,6	6,9
60	2,1	2,3	2,5	2,7	3,6	5,1	7,6
70	1,9	2,1	2,3	2,6	3,5	4,4	6,6
80	1,4	1,7	1,9	2,2	3	4,3	6,6
90	2,2	2,5	2,8	3,2	4,5	6,7	10,3
100	3,2	3,7	4,2	4,8	6,7	10	15,6
110	4,5	5,1	5,7	6,6	9,3	14,1	21,9
120	5,7	6,6	7,5	8,5	12,1	18,3	28
130	7,2	8,1	9,3	10,5	15	22,6	35,3

Kengetallen voor zwaar verkeer

CO, 2005							
[g/h]	Helling [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5
5	21	22,2	23,3	26,5	28,1	29,8	31,7
10	26,4	27,6	28,7	32,1	36	40,5	47,3
20	36,3	37,4	38,5	42,3	51,7	62,4	78,3
30	39,8	42,2	44,7	50,3	63,6	78,6	101,4
40	43,4	47,1	50,8	57,9	75,4	95	124,6
50	44,3	49	53,7	61,7	83,3	107,1	143,1
60	45,6	51,4	57,2	66,5	92,6	121,4	165
70	48,4	54,6	60,9	70,9	101,9	136,1	
80	53,2	61,5	69,9	82	121	163,9	
90		71,2	84	96,5	149		
100		91,4	107,7	121,3			

NOx, 2005							
[g/h]	Helling [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	62,8	62,8	62,8	62,8	62,8	62,8	62,8
5	67,8	71,4	77,8	101,2	111,8	124,2	138,3
10	74	78,9	87,9	119,6	146,4	179,8	224,9
20	87,4	95,6	110,5	160,7	221,7	293,8	406,9
30	102,7	115	137,1	209,9	306,2	425,3	619,1
40	120,1	135,8	164,2	256,1	397,3	584,1	859,8
50	139,7	158,2	191,7	299,3	494,3	765	1134,3
60	163,2	184,5	222,7	345,9	610,4	969,4	1466,5
70	190,5	215,1	259,2	401	742,5	1218,3	
80	221,9	251,5	304,5	473,1	902,4	1572,1	
90		268,3	332,2	507,1	1022,1		
100		314	388,2	591,2			

CO, 2010							
[g/h]	Helling [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4
5	16	16,3	16,6	17	18,7	20,4	22,3
10	20,2	20,7	21,1	21,4	24,7	28,6	33,8
20	28,1	28,8	29,4	30,2	37,2	45,7	57
30	30,6	32,4	34,3	36,2	45,9	57,6	73,4
40	33,1	36,1	39	42	54,7	69,8	89,9
50	33,6	37,5	41,4	45,2	60,5	78,6	102,9
60	34,5	39,3	44,2	49	67,4	89,2	118,6
70	37,1	42,3	47,4	52,6	74,3	100,3	
80	42,6	48,7	55	61,1	88,2	120,5	
90		60,5	69,4	78,4	116,9		
100		76,2	87,8	97,5			

NOx, 2010							
[g/h]	Helling [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	44,2	44,2	44,2	44,2	44,2	44,2	44,2
5	46,9	48,8	53	64,6	71,9	79,9	88,8
10	49,9	52,4	58,4	74,8	92,4	113,6	138,9
20	56,2	60,6	70,6	98	136,7	181,8	240,5
30	63,4	69,9	84,8	125,7	184,9	253,5	347,5
40	71,7	79,7	98,6	150	233,8	332,8	461,7
50	81,1	90,5	112,4	172	283,8	419,4	588,2
60	92	102,6	127,3	194,7	340,4	513,6	740,7
70	104,5	116,6	144,6	221,8	402	624,1	
80	118,7	133	166,7	258,6	476,2	780	
90		152,3	192,8	303,4	572,3		
100		174,1	221,5	350,6			

CO, 2015							
[g/h]	Helling [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6
5	15	15	15	15	16,9	18,7	20,7
10	18,9	19,1	19,3	19,3	22,5	26,4	31,2
20	26,3	26,9	27,3	27,9	34,4	42,7	52,6
30	28,6	30,2	31,9	33,6	42,5	53,8	67,6
40	30,9	33,7	36,3	39	50,6	65,2	82,6
50	31,3	34,9	38,5	42,1	56,1	73,4	94,4
60	32,1	36,6	41,2	45,7	62,4	83,3	108,5
70	35,1	39,7	44,4	49,1	68,7	93,7	
80	41,4	46,5	51,8	56,9	81,2	111,9	
90		58	65,2	72,6	106,6		
100		72,4	82	90,1			

NOx, 2015							
[g/h]	Helling [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	39,8	39,8	39,8	39,8	39,8	39,8	39,8
5	41,8	43,4	46,9	56,3	62,7	69,5	77,3
10	44	46	51,1	64,5	79,6	97,5	117,3
20	48,5	52,1	60,7	83,2	115,8	153,7	196,2
30	53,5	58,8	71,6	105,2	154,1	208,6	272,4
40	59,1	65,5	81,7	123,7	191,3	264,6	349,8
50	65,2	72,7	91,4	139,6	227,8	322,9	433,3
60	72	80,4	101,5	156	267,3	383,8	533,3
70	79,7	89,2	113	175,4	308	451,7	
80	87,9	99,2	127,8	202,1	356,7	545,2	
90		110,8	145,1	234,7	420,2		
100		123,5	164,1	269,4			

Kengetallen voor zwaar verkeer

PM10, 2005							
[g/h]	Helling [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	62,7	62,7	62,7	62,7	62,7	62,7	62,7
5	68,6	69,4	69,6	80	86,2	94,7	104,9
10	74	75,1	75,9	86,8	99,8	115,8	135,7
20	85	86,9	88,8	102,3	126,9	158,7	196,6
30	92,7	97,8	102,8	120,5	156,2	201,2	254,8
40	98,1	106,8	115,7	138,6	184,4	242,3	311,2
50	101,9	114,4	126,6	154,1	211,7	283,3	368
60	105,3	122	138,4	170,7	241,4	328,6	432,4
70	114,6	133,2	151,4	187,4	272	376,9	
80	132,5	153,7	174,3	215,5	324,5	458,1	
90		161,2	188,2	215,2	348,7		
100		199,9	232,9	261,1			

PM10, 2010							
[g/h]	Helling [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	35,7	35,7	35,7	35,7	35,7	35,7	35,7
5	39,3	39,5	39,5	40,6	44,4	49,5	55
10	42,1	43,1	43,3	43,6	52,1	61,2	72,9
20	48,4	49,7	51	52,3	67,4	85,6	108,4
30	52,5	56,1	59,7	62,5	83,9	109,8	141,5
40	55	61,2	67,3	72,7	99,4	132,8	173,3
50	57,4	65,2	73,7	81,6	114,7	156,5	205,4
60	58,6	69,9	80,3	90,5	131,3	182	242,3
70	63,7	76,3	87,9	99,4	147,8	208,9	
80	75	88,2	102	116	178,6	257,3	
90		106,8	123,9	141,7	231,7		
100		132,3	154	172,1			

PM10, 2015							
[g/h]	Helling [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	29,6	29,6	29,6	29,6	29,6	29,6	29,6
5	32,8	32,8	32,8	33,8	37	41,2	45,5
10	34,9	35,9	35,9	36	43,3	50,7	60,3
20	40,2	41,2	42,3	43,3	56	70,8	89,9
30	43,4	46,5	49,7	51,8	69,8	90,9	117,4
40	45,5	50,7	56	60,3	82,5	110	143,8
50	47,6	53,9	61,3	67,7	95,1	130	170,2
60	48,6	58,1	66,6	75,1	108,9	151,2	200,9
70	52,9	63,4	72,9	82,5	122,6	173,4	
80	62,4	73	84,6	96,2	148	213,6	
90		88,8	102,6	117,4	192,4		
100		109,9	127,9	142,7			

Bijlage G

Bepalingsmethode emissieverspreiding bij tunnelportalen

De rekenmethode is gebaseerd op een Japans model voor emissieverspreiding bij tunnelportalen, gepubliceerd door de Japanse overheid in oktober 2000

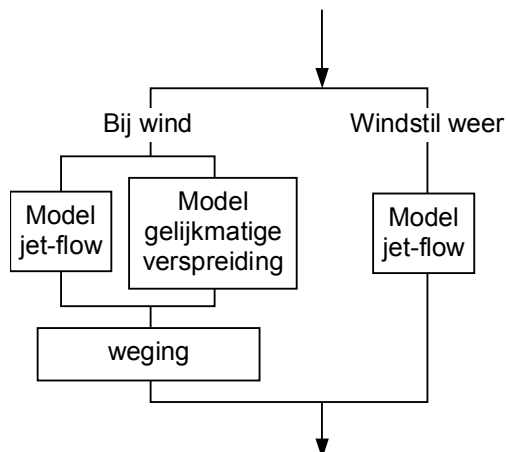
1 Emissieverspreiding uit tunnelportalen

1.1 Inleiding

De concentratie van emissies nabij tunnelportalen wordt bepaald door de optelling van de emissie afkomstig uit de tunnel en de emissie geproduceerd door bronnen buiten de tunnel. Deze methode gaat in op de verspreiding van emissies afkomstig uit een tunnelportaal zonder verstoring door omliggende gebouwen of beplanting.

De verspreiding wordt beschreven door twee modellen (zie figuur G-1):

- Het model “jet-flow”
- Het model “gelijkmatige verspreiding”



Figuur G-1 Berekeningsmodel emissieverspreiding bij een tunnelportaal

Bij windstil weer wordt alleen het “jet-flow” model gebruikt. Wanneer er wind aanwezig is (meer dan 1 m/s) worden zowel het “jet-flow” model als het model “gelijkmatige verspreiding” in rekening gebracht.

Bij het model “jet flow” hangt de verspreiding af de aanvangssnelheid van de luchtstroom uit de tunnel bij het tunnelportaal. Bij het model “gelijkmatige verspreiding” wordt de emissie, afkomstig uit het tunnelportaal, verdeeld over een aantal denkbeeldige emissiebronnen op de aansluitende weg buiten de tunnel. Naarmate de afstand tot het tunnelportaal groter is, is de hoeveelheid emissie van de denkbeeldige bron kleiner.

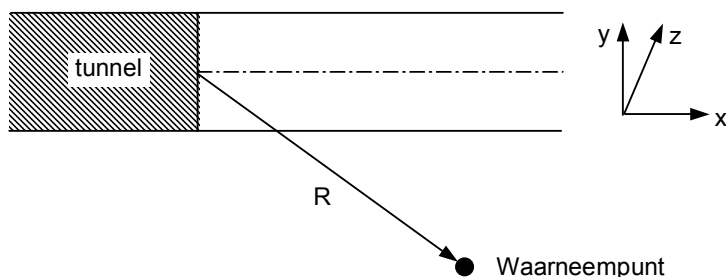
De mate waarin bij wind de uitkomsten van het model “jet-flow” als het model “gelijkmatige-verspreiding” worden meegerekend, hangt af van de afstand R van het waarneempunt tot het tunnelportaal:

Als $R < 200$ meter dan is de verhouding:

$$\text{model Jet flow} : \text{model gelijkmatige verspreiding} = \frac{200 - R}{200} : \frac{200}{R}$$

Als $R > 200$ meter dan wordt alleen de uitkomst van het model “gelijkmatige verspreiding” in rekening gebracht.

De afstand R wordt bepaald zoals weergegeven in figuur G-2.



Figuur G-2 Afstand R tussen waarneempunt en tunnelportaal

1.2 Beschrijving van het model “Jet-flow”

De verspreiding van de emissie vanaf het tunnelportaal wordt berekend met de volgende formules:

$$C_j(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_{jy}\sigma_{jz}U_T(x)} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_{jy}^2}\right) \left[\exp\left\{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_{jz}^2}\right\} + \exp\left\{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_{jz}^2}\right\} \right]$$

$$Q = AC_0U_{T0} \quad (2)$$

$$U_T(x) = U_{T0} \exp(kx) \quad (3)$$

$$\sigma_{jy} = \frac{W}{\sqrt{\pi}} = \alpha x^\omega \quad (4)$$

$$\sigma_{jz} = \frac{A}{W\sqrt{\pi}} + \beta x^\omega \quad (5)$$

Hierin zijn:

- $C_j(x, y, z)$: emissieconcentratie op het waarneempunt volgens Jet-flow (g/m^3)
- C_0 : emissieconcentratie in de tunnellucht bij het tunnelportaal (g/m^3)
- U_{T0} : tunnelluchtsnelheid bij het uitgangsportaal (m/s)
- $U_T(x)$: snelheid van de lucht op een afstand x van het tunnelportaal (m/s)
- Q : emissiestroom uit het tunnelportaal (g/s)
- A : oppervlak van de dwarsdoorsnede van de tunnel (m^2)
- W : breedte van het tunnelportaal (m)

- k : verzwakkingsfactor voor de tunnelluchtsnelheid
 σ_{Jy} : verspreidingsbreedte van de emissie in horizontale richting y (m)
 σ_{Jz} : verspreidingshoogte van de emissie in verticale richting z (m)
 α, β, ω : verspreidingsfactoren
 H : hoogte van de emissiebron t.o.v. een gekozen referentievlak (m)
 x : afstand tussen waarneempunt en het tunnelportaal (m)
 x wordt gerekend in de richting van de luchtstroom uit het tunnelportaal

Luchtsnelheid op afstand x van het tunnelportaal

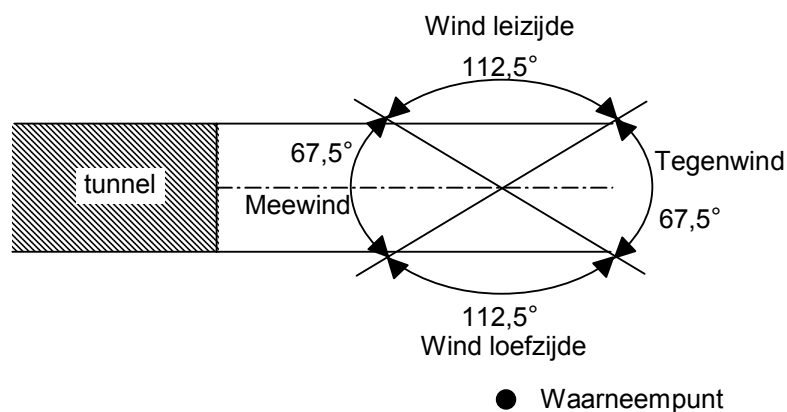
$U_T(x)$ wordt berekend met behulp van de verzwakkingsfactor k voor de luchtsnelheid. De factor k wordt bepaald op basis van tabel G-1.

Equivalenten verkeersintensiteit ¹	Luchtsnelheid in de tunnel	Classificatie windrichting ²			
		Wind aan lezijde	Tegenwind	Meewind	Wind aan loefzijde
< 1.000 vtg/h	0 – 1 m/s	0,013			
	1 – 2 m/s	0,013	0,013	0,013	0,027
	> 2 m/s	0,027	0,029	0,027	0,05
> 1.000 vtg/h	0 – 1 m/s	0,0076			
	1 – 2 m/s	0,0078	0,0078	0,0078	0,013
	2 – 3 m/s	0,013	0,013	0,013	0,027
	> 3 m/s	0,027	0,029	0,027	0,05

Tabel G-1 Verzwakkingsfactor k voor de luchtsnelheid

1): De equivalente verkeersintensiteit is hier bepaald als het aantal personenauto's waarbij vrachtwagens worden gerekend als 3 personenauto's.

2): De classificatie van de windrichting is gedefinieerd in relatie tot de weg-as en het waarneempunt, zoals aangegeven in figuur G-3.



Figuur G-3 Classificatie van de windrichting

Verspreidingsparameters

De verspreidingsparameters α , β en ω in de vergelijkingen (4) en (5) worden bij wind bepaald overeenkomstig tabel G-2.

Equivalente verkeers-intensiteit	Lucht-snelheid in de tunnel	α	β	ω			
				Wind aan leizijde	Tegen-wind	Mee-wind	Wind aan loef-zijde
< 1.000 vtg/h	1 – 2 m/s	0,00076	0,00047	2,18	2,32	2,25	2,50
	> 2 m/s	0,00040	0,00062	2,58	2,65	2,64	2,84
> 1.000 vtg/h	1 – 2 m/s	0,00137	0,00039	2,03	2,03	2,03	2,18
	2 – 3 m/s	0,00076	0,00047	2,18	2,32	2,25	2,50
	> 3 m/s	0,00040	0,00062	2,58	2,65	2,64	2,84

Tabel G-2 Verspreidingsparameters voor het model "Jet-flow" bij wind

De verspreidingsparameters α , β en ω in de vergelijkingen (4) en (5) worden bij windstil weer bepaald overeenkomstig tabel G-3.

Equivalente verkeers- intensiteit	Parameter		
	α	β	ω
< 1.000 vtg/h	0,00137	0,00039	2,18
> 1.000 vtg/h	0,00092	0,00026	2,03

Tabel G-3 Verspreidingsparameters voor het model "Jet-flow" bij windstil weer

1.3 Beschrijving van het model "gelijkmatige-verspreiding"

De verspreiding van de emissie vanaf punten buiten het tunnelportaal volgens het model "Gelijkmatige-verspreiding" wordt berekend met de volgende formules:

$$C_E(x_w, y_w, z_w) = \frac{q_p}{2\pi\sigma_{Ey}\sigma_{Ez}U_w} \exp\left(-\frac{y_w^2}{2\sigma_{Ey}^2}\right) \left[\exp\left\{-\frac{(z_w - H)^2}{2\sigma_{Ez}^2}\right\} + \exp\left\{-\frac{(z_w + H)^2}{2\sigma_{Ez}^2}\right\} \right]$$

$$\sigma_{Ey} = \frac{W}{\sqrt{\pi}} + \alpha x_L^\omega + 0,46x_w^{0,81} \quad (7)$$

$$\sigma_{Ez} = \frac{A}{W\sqrt{\pi}} + \beta x_L^\omega + 0,31x_w^{0,83} \quad (8)$$

Hierin zijn

$C_E(x_w, y_w, z_w)$: emissieconcentratie op het waarneempunt volgens gelijkmatige verspreiding (g/m³)

q_p : emissie van een denkbeeldige emissiebron op een afstand x_{Lp} van het tunnelportaal (g/s)

A : oppervlak van de dwarsdoorsnede van de tunnel (m²)

W : breedte van het tunnelportaal (m)

U_w : lichtsnelheid ter plaatse van het waarneempunt (m/s)

σ_{Ey} : verspreidingsbreedte van de emissie in horizontale richting y (m)

σ_{Ez} : verspreidingshoogte van de emissie in verticale richting z (m)

α, β, ω : verspreidingsfactoren

H : hoogte van de vervuilingbron t.o.v. een gekozen referentievlak (m)

x_L : afstand tussen het tunnelportaal en de emissiebron (m)

x : afstand tussen de denkbeeldige emissiebron en het waarneempunt (m)
 x hoeft niet in dezelfde richting te worden gemeten als x_L

Emissieproductie van de denkbeeldige bronnen

De emissie q_p van de denkbeeldige emissiebronnen wordt als volgt berekend:

De verdeling van de bronsterkte over de beschouwde lengte L wordt gegeven door:

$$f(x) = \frac{A}{\pi \sigma_{Jy} \sigma_{Jz}} \cdot \frac{U_{T0}}{U_T(x)} \quad (9)$$

De waarden van σ_{Jy} en σ_{Jz} moeten worden bepaald zoals bij het model "Jet-flow" is aangegeven.

De totale dimensieloze bronsterkte B_{tot} wordt gegeven door het oppervlak onder de kromme $f(x)$ tussen $x = 0$ tot $x = L$.

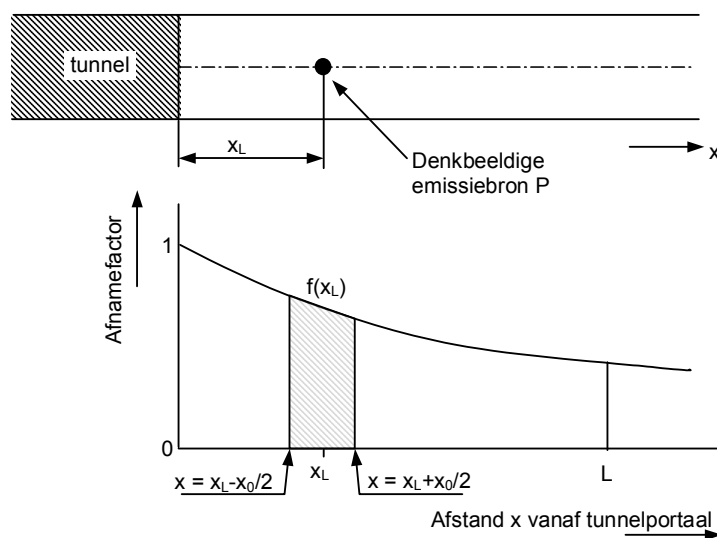
Bij een afstand x_0 (in meter) tussen de denkbeeldige bronnen is de dimensieloze bronsterkte B_p van een denkbeeldige bron het oppervlak onder de kromme $f(x)$ tussen $x = x_L - \frac{1}{2}x_0$ en tot $x = x_L + \frac{1}{2}x_0$.

In formulevorm:

$$B_{tot} = \int_0^L f(x) dx \quad \text{en} \quad B_p = \int_{x_L - \frac{1}{2}x_0}^{x_L + \frac{1}{2}x_0} f(x) dx \quad (10)$$

Daarmee is de werkelijke bronsterkte van een denkbeeldige bron:

$$q_p = Q \cdot \frac{B_p}{B_{tot}} \quad (11)$$



Figuur G-4 Afname van de emissie van denkbeeldige bronnen op een afstand x_L vanaf het tunnelportaal

Aanbevolen wordt de afstand L op 100m en de intervalafstand x_0 tussen de denkbeeldige bronnen op 10m te stellen. Daarbij liggen de denkbeeldige bronnen dan op de afstanden 5 – 15 – 25 – 35 – 45 – 55 – 65 – 75 – 85 – 95 m vanaf het tunnelportaal.

Luchtsnelheid $U_T(x)$ op afstand $x = x_L$ van het tunnelportaal

De waarde van $U_T(x)$ moet worden bepaald zoals bij het model "Jet-flow" is aangegeven.

Verspreidingsparameters

De verspreidingsparameters α , β en ω in de vergelijkingen (7) en (8) worden bepaald overeenkomstig tabel 2.

Luchtsnelheid U_w ter plaatse van het waarneempunt

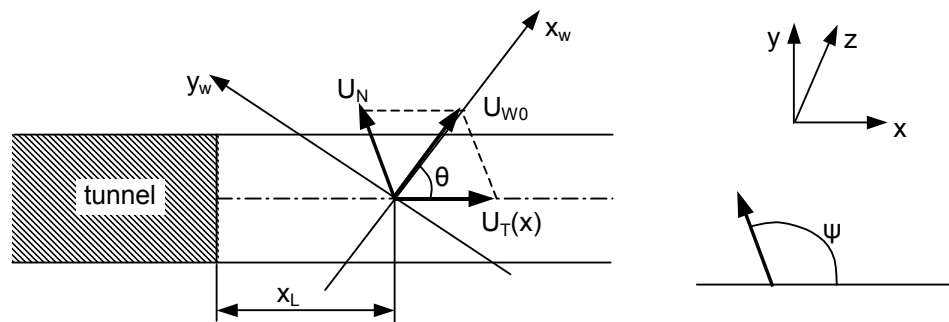
De luchtsnelheid U_w ter plaatse van het waarneempunt is de resultante van de windsnelheid U_N en de snelheid van de tunnellucht U_T . De berekening vindt plaats door eerst de luchtsnelheid U_{w0} ten gevolge van de wind en de luchtsnelheid ten gevolge van de initiële tunnellsnelheid ter plaatse van de denkbeeldige emissiebron te bepalen.

De luchtsnelheid U_w wordt vervolgens berekend met formule (12):

$$U_w = U_{w0} \exp(-kx_w) \text{ als } U_{w0} > U_N \text{ and } U_w > U_N \text{ en } U_w = U_N \text{ als } U_w < U_N \quad (12)$$

De verzwakkingsfactor k wordt bepaald op basis van tabel 2.

De grootte en richting van de resulterende luchtsnelheid U_{w0} ten gevolge van de natuurlijke windsnelheid U_N en de tunnellsnelheid $U_T(x)$ zijn gedefinieerd volgens figuur G-5.



Figuur G-5 Resulterende vector van de natuurlijke wind en de tunnellsnelheid nabij het tunnelportaal

De waarden van U_{w0} en θ worden berekend met:

$$U_{w0} = \sqrt{(U_T(x_L) + U_N \cos \psi)^2 + (U_N \sin \psi)^2} \quad (13)$$

waarbij:

$$U_{w0} = U_T(x_L) \text{ als } U_{w0} > U_T(x_L) > U_w \text{ en } U_{w0} = U_w \text{ als } U_{w0} < U_w \quad (14)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{U_N \sin \psi}{U_T(x_L) + U_N \cos \psi}\right) \quad (15)$$

Hierin zijn:

- $U_T(x_L)$: tunnellsnelheid op de plaats van de emissiebron (m/s)
- U_{T0} : snelheid van de tunnellucht bij het uitgangsportaal (m/s)
- x_L : afstand tussen het tunnelportaal en de denkbeeldige emissiebron (m)
- k : verzwakkingsfactor voor de tunnellsnelheid

U_N	: aangepaste snelheid van de natuurlijke wind (m/s) $U_N = U_{N0} * x_L / L$ als $x_L \leq L$ en $U_N = U_{N0}$ als $x_L > L$ $L = 10r$ met r als equivalente straal (m) en $r = \sqrt{A/\pi}$
Ψ	: hoek tussen de richting van de natuurlijke en wind en de tunnellsnelheid
A	: oppervlak van de dwarsdoorsnede van de tunnel (m ²)

2 Emissieverspreiding van bronnen buiten de tunnel

Van bronnen buiten de tunnel, maar in de nabijheid van het tunnelportaal, wordt de emissieverspreiding beïnvloed door de luchtstroming vanuit de tunnel.

2.1 Bij wind

Wanneer er wind is (windsnelheid meer dan 1 m/s) wordt de verspreiding berekend volgens het pluim-model. De daarbij te gebruiken windsnelheid en windrichting moet worden bepaald zoals aangegeven bij het model “gelijkmatige verspreiding”. De diffusie wordt verder berekend zoals bij open wegen.

2.2 Bij windstil weer

Bij windstil weer wordt de verspreiding berekend volgens de “puff”-vergelijking.

Rond het tunnelportaal kan een gebied worden gedefinieerd waar de luchtsnelheid ten gevolge van de stroming uit het tunnelportaal groter is dan 1 m/s. De invloed van de tunnel-luchtstroming wordt in rekening gebracht door de emissie van elke “puff” binnen dit gedefinieerde gebied zich onder invloed van de tunnellsnelheid te laten verplaatsen terwijl de “puff” zich uitbreidt. Er wordt aangenomen dat de verplaatsing ten gevolge van de tunnellsnelheid langs de as van de weg plaatsvindt.

Bijlage H

Keuze van het ventilatiesysteem

Ontwerpen geschiedt op 2 onderwerpen : Emissie en Brand

Opmerking: Het beheersen van temperatuur is een criterium voor de capaciteit, niet voor het type ventilatiesysteem.

Emissieconcentratie – binnen de tunnel

Als <verkeer, tunnellengte> **niet** tot te hoge concentraties leiden dan

Natuurlijke ventilatie

Anders

Mechanische ventilatie

Als de concentratie kan worden beheerst met een langssnelheid kleiner dan $v = 10$ m/s

Langsventilatie

Anders

Dwarsventilatie

N.B. soms volstaat (semi)dwarsventilatie in slechts een deel van de tunnel

De dimensionering volgt uit <verkeer, windklimaat, tunnelconstructie>

Emissieconcentratie – buiten de tunnel

Als <verkeer, tunnelconstructie, ruimtelijke ordening, buitenklimaat> zonder extra maatregelen buiten de tunnel tot te hoge concentraties leiden

Kies uit het volgende pakket aan maatregelen:

1. Beïnvloeding verkeer: toelatingsbeleid, snelheidsreductie, toewijzing alternatieve routes, etc. (beheersing alle soorten emissies)
 2. Stimuleren verdunning door extra ventilatiecapaciteit en/of “schoorstenen” (beheersing alle soorten emissies)
 3. Periodiek reinigen van de tunnel (beheersing fijn stof)
 4. Filterinstallaties (beheersing fijn stof, mogelijk NO_2)
- N.B. Filterinstallaties worden afgeraden

Brandveiligheid – binnen de tunnel

Als <tunnellengte> kleiner dan 250m

in principe natuurlijke ventilatie

Als <tunnellengte> 250 – 500m

toepassing mechanische ventilatie indien risicoanalyse daartoe aanleiding geeft, anders natuurlijke ventilatie

Als <tunnellengte> groter dan 500m

altijd mechanische ventilatie

Indien gekozen voor mechanische ventilatie

Bij 1 richting verkeer

Langsventilatie

Bij regulier 2 richting verkeer

Dwarsventilatie

Langsstroming beheersen door aanvullende langsventilatie of schakeling in secties van de dwarsventilatie

Bij incidenteel 2 richting verkeer

Indien volgens risicoanalyse acceptabel

Langsventilatie

Anders

Dwarsventilatie

De dimensionering volgt uit <brandgrootte, verkeer, windklimaat, tunnelconstructie>