

# Onderzoek naar effecten van twee tunnelventilatieconcepten

Een (Verkennd) haalbaarheidsonderzoek Definitief

projectnr. 169605

revisie 2a

6 januari 2010

## Opdrachtgever

Ministerie van Verkeer en Waterstaat  
Rijkswaterstaat  
Innovatieprogramma Luchtkwaliteit  
Van der Burghweg 1  
2600 GA Delft

datum vrijgave

6 januari 2010

beschrijving revisie 2a

Correcties op eindrapport

goedkeuring

R. Smolders

vrijgave

M. Pronk

	<b>Inhoud</b>	<b>Blz.</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>5</b>
1.1	Vraagstelling en aanpak op hoofdlijnen	5
1.1.1	<i>Welke concentraties zijn acceptabel</i>	6
1.1.2	<i>Welke concentraties kunnen met de (ventilatie- en zuiverings) technieken worden bereikt</i>	6
1.1.3	<i>Uitsluitingen in het onderzoek</i>	6
1.2	Beschrijving van de ventilatieconcepten op hoofdlijnen	7
1.2.1	<i>Basis van de tunnelventilatieconcepten</i>	7
1.2.1.1	Concept 1 C <sup>2</sup> O tegenstroom ventilatie	7
1.2.1.2	Concept 2 HD meestroom ventilatie concept	8
1.2.2	<i>Computersimulatie van het tegen- en meestroom ventilatiesysteem</i>	9
1.2.2.1	C <sup>2</sup> O concept	9
1.2.2.2	HD concept	9
1.3	Uitgangspunten en criteria	9
1.4	Leeswijzer	10
<b>2</b>	<b>Streef- en grenswaarde concentraties PM<sub>2,5</sub>-, PM<sub>10</sub>- ,NO<sub>2</sub> en andere accumulerende stoffen</b>	<b>12</b>
2.1	Inleiding	12
2.1.1	<i>Andere accumulerende stoffen</i>	12
2.2	Stikstofoxides	12
2.3	Fijnstof PM <sub>10</sub> en PM <sub>2,5</sub>	13
2.4	Koolmonoxide CO	14
1.1	Overige accumulerende stoffen	15
2.5	Samenvatting grenswaarden buitenlucht voor PM <sub>10</sub> en NO <sub>2</sub>	16
2.6	Samenvatting grenswaarden (buitenlucht) voor overige stoffen	16
2.7	Samenvatting streefwaarden (buitenlucht) voor overige stoffen	17
2.8	Normen voor toegestane kortdurende blootstelling in tunnels	17
<b>3</b>	<b>Risico's als gevolg van blootstelling aan NO<sub>2</sub> en PM<sub>10</sub></b>	<b>19</b>
3.1	Inschatting van het risico bij blootstelling aan zeer hoge concentraties NO <sub>2</sub> gedurende zeer korte tijd	19
3.2	Inschatting van de gevolgen van hoge concentraties PM <sub>10</sub> /PM <sub>2,5</sub> gedurende korte tijd.	21
3.3	Afschatting van het totaal maatschappelijk risico	21
<b>4</b>	<b>Risico's als gevolg van accumulatie van andere stoffen</b>	<b>23</b>
4.1	Toxische eigenschappen van PM <sub>2,5</sub> en PM <sub>0,1</sub>	23
4.2	Koolmonoxide (CO)	23
4.3	Benzeen (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	23
4.4	Zwavedioxide (SO <sub>2</sub> ) met daarin zwavelzuur	24
4.5	Benzo(a)pyreen (BaP)	24
4.6	PAK's	24
4.7	Lood (Pb)	25
4.8	Slijtage banden en opwaaiend stof (veelvoud van bronnen van fijnstof)	25
4.9	Ozon	26
4.10	Samenvatting risico's van andere accumulerende stoffen	26
<b>5</b>	<b>Maximaal "aanvaardbare" concentraties bij zeer kortdurende blootstelling en hoge concentraties</b>	<b>28</b>
5.1	Gemeten concentraties in tunnels	28

5.2	Berekende concentraties op snelwegen en rond tunnelmonden	28
5.3	Maximale emissieconcentraties in een tunnel	29
5.4	Waarborgen voor de veiligheid van tunnelpassanten	30
<b>6</b>	<b>Discussie</b>	<b>31</b>
6.1	Discussie 1: Schijnbare tegenstelling in grenswaarden, alarmdrempels en blootstellingsnormen voor stikstofdioxide bij kortdurende blootstelling	31
6.2	Discussie 2: Relatie tussen concentraties CO en NO <sub>2</sub>	31
6.3	Discussie 3: Risico's voor weggebruikers bij tunnelpassage	32
6.4	Discussie 4: Keuze van luchtbehandelingsdebieten bij tunnelventilatie	33
<b>7</b>	<b>Berekening van de concentraties van stoffen in een tunnel bij het C<sup>2</sup>O tunnelventilatie concept</b>	<b>34</b>
7.1	Eenvoudige berekeningsmethode voor het C <sup>2</sup> O systeem	34
7.2	Dynamische berekening van het C <sup>2</sup> O systeem met CFD	35
7.3	Berekeningen van ventilatiedebieten voor een 1000 meter, 80 km/uur tunnel	38
7.4	Varianten in filterrendement en debiet	39
<b>8</b>	<b>Berekeningen van de concentraties van stoffen in een tunnel bij het HD tunnelventilatie concept</b>	<b>40</b>
8.1	Dynamische berekening van het HD systeem met CFD	40
8.2	Berekeningen van ventilatiedebieten voor een 1000 meter, 80 km/uur tunnel	41
8.3	Varianten in filterrendement en filterdebiet	42
8.4	Overeenkomsten en verschillen in het HD en C <sup>2</sup> O model	42
8.5	Combinatie van beide modellen	43
8.6	Varianten in luchtdebiet en filterrendement bij het hybride model (vertraagd meestroom model)	44
<b>9</b>	<b>Behandelingsmogelijkheden van tunnellucht</b>	<b>45</b>
9.1	Overzicht van technieken voor PM <sub>10</sub> en NO <sub>x</sub> verwijdering	45
9.2	Beïnvloeding door andere accumulerende stoffen	46
<b>10</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>47</b>
10.1	Conclusies	47
10.2	Aanbevelingen	48
<b>11</b>	<b>Literatuurlijst</b>	<b>49</b>
	<b>Bijlagen</b>	
	<b>Bijlage 1</b> Luchtkwaliteitsnormen	
	<b>Bijlage 2</b> Mac waarden	
	<b>Bijlage 3</b> PIARC	
	<b>Bijlage 4</b> CFD Berekeningsresultaten van de concentraties in een tunnel a.g.v. het C <sup>2</sup> O en HD concept	
	<b>Bijlage 5</b> Notitie van TNO t.a.v. zeer kortdurende blootstelling aan stoffen in tunnels	

## Samenvatting

Het Innovatieprogramma luchtkwaliteit IPL van Rijkswaterstaat heeft onderzoek laten uitvoeren naar de haalbaarheid en de effecten van tunnelventilatieconcepten die zijn gebaseerd op het vasthouden van verontreinigde tunnellucht in de tunnel. Doel daarbij is de verontreinigingen rond de tunnelmonden te verminderen en daarmee de luchtkwaliteit rond tunnelmonden te verbeteren. De vraag daarbij staat centraal tot welke concentraties de verontreiniging in de tunnel zou mogen oplopen zonder dat daarbij gevaar voor gezondheid en veiligheid wordt gecreëerd. De geconcentreerde tunnellucht kan dan wellicht ook beter/efficiënter worden gereinigd. De beschikbare reinigingsprocessen worden daarbij ook in beeld gebracht.

Uit literatuuronderzoek is gebleken dat er geen effecten van kortdurende blootstelling van 1-2 minuten aan hoge concentraties verkeersgerelateerde luchtverontreiniging bekend zijn. Er zijn op dit moment geen wettelijke normen voor tunnels. Op grond van literatuurgegevens wordt een grenswaarde voor stikstofdioxide, de kritische parameter, in tunnels voorgesteld tussen 2.000 en 30.000 microgram/m<sup>3</sup>. Andere componenten in de tunnellucht zoals fijn stof en koolmonoxide zijn niet kritisch bij het ventilatieconcept en kunnen beneden de voorgestelde grenswaarden voor tunnels worden gehouden.

De tunnelventilatiesystemen zijn in staat om de lucht in de tunnel volledig vast te houden en te filteren. Er wordt uitgegaan van een 1000 meter lange 3-baans tunnel met gescheiden tunnelbuizen en 5.000 voertuigen per uur in beide richtingen. In dat geval ontstaat in de tunnel bij een filterrendement van 80% en een filterdebiet van 220.000 m<sup>3</sup>/h een maximum concentratie van ca. 30.000 microgram stikstofdioxide. Hogere filterdebieten en/of toelaten van enige lek uit de tunnelmonden leiden tot lagere concentraties in de tunnel.

Behandelsystemen voor fijn stof volgens het principe van electrostatische precipitatie zijn inmiddels operationeel. Voor stikstofdioxide verwijdering worden de eerste commerciële installaties, gebaseerd op ad- en absorptietechnieken, gebouwd. Enkele technieken, die zowel stikstofdioxide en fijn stof alsook koolmonoxide kunnen verwijderen, zijn gebaseerd op koude plasma technologie en bevinden zich in een doorontwikkelingsfase.

## Summary

The Ministry for Transport, Public Works and Water Management (RWS) have, via their Innovation Programme for Air Quality (IPL), asked for a study to be carried out. This study looks at the feasibility and the effects of tunnel ventilation concepts which retain contaminated air inside a traffic tunnel. The object of this is to reduce the pollution levels that can occur around either end of a tunnel and thus improve the air quality at these locations. By encouraging higher concentrations of air pollutants in the tunnel can possibly lead to the use of better or more efficient cleaning processes. Other more appropriate or available cleaning processes can then be discussed.

A question arising from this study is how high may pollution levels rise to before they begin to form a danger to the health and safety of those people in the tunnel? From studying the available literature on this subject, there does not seem to be any evidence that would suggest that short term exposure (1 or 2 minutes) to high levels of vehicle emissions has any health effects. At the moment there are no legal limits for air-pollution in tunnels. Based on the results of the literature study, a proposed limit for nitrogen dioxide (which is the critical parameter) in tunnels would be between 2,000 and 30,000 microgram/m<sup>3</sup>. Other parameters such as fine dust and carbon monoxide are not critical

within the ventilation concept and their limits can be retained at a level below the proposed limits.

The tunnel ventilation systems are capable of fully retaining and filtering the contaminated air. This on the assumption of a tunnel 1,000 meters long, with 2 tubes. Each tube has 3 lanes with a traffic volume of 5,000 vehicles per hour in both directions. Additionally, for the filter system, the following is assumed: a filter performance of 80%, a filter volume of 220,000 m<sup>3</sup>/h and a maximum concentration of nitrogen dioxide of 30,000 microgram/m<sup>3</sup>. Higher filter volumes and the leaking of contaminated air out of the tunnel will result in lower pollutant concentrations in the tunnel.

Systems for handling fine dust according to the principles of electro-static precipitation are already in use. For the extraction of nitrogen dioxide, the first commercial units based on adsorption and absorption techniques are under construction. A few techniques which can remove all three parameters (nitrogen dioxide, fine dust and carbon monoxide) are based on plasma technology and are still in the development phases.

## 1 Inleiding

Het wegverkeer in Nederland stoot aanzienlijke hoeveelheden verontreinigende stoffen uit. Met name fijnstof ( $PM_{10}$ ) en stikstofoxides ( $NO_x$ ) zijn daarbij van belang. De luchtkwaliteit langs (snel)wegen wordt door deze uitstoot aanzienlijk beïnvloed. Om de effecten van deze vorm van mobiliteit te beperken heeft Rijkswaterstaat een aantal jaren geleden het Innovatie Programma Luchtkwaliteit (IPL) ontwikkeld. Met dit IPL programma wordt beoogd onderzoek uit te voeren naar mogelijkheden om (de effecten van) de uitstoot te beperken.

De problematiek van de luchtkwaliteit rondom tunnelmonden en uitgangen van overkluisde weggedeelten is niet nieuw. Tot nu toe is daar echter niet op grote schaal aandacht aan gegeven. Binnen het IPL programma is wel een onderzoek uitgevoerd naar alle tunnels in de wereld waar iets aan luchtbehandeling wordt gedaan. In 2006 is door IPL een workshop georganiseerd waarbij het tunnelmond probleem centraal stond. Naar aanleiding van deze workshop zijn diverse bedrijven gaan nadenken over mogelijkheden om dit probleem aan te pakken.

Onafhankelijk van elkaar hebben UC Technologies (UCT) en Ingenieursbureau Oranjewoud een tunnelventilatieconcept ontwikkeld waarmee de beheersing van emissie bij tunnelmonden mogelijk zou kunnen worden. Daarbij geldt als uitgangspunt dat de beheersing van emissies uit tunnelmonden alleen kan plaatsvinden als de lucht in de tunnel wordt opgesloten.

IPL vindt deze concepten dermate interessant dat RWS begin 2009 opdracht heeft gegeven aan Oranjewoud om nader onderzoek uit te voeren naar de haalbaarheid van deze tunnelventilatieconcepten en de effecten die deze tunnelventilatieconcepten tot gevolg hebben. Daar gaat het dan met name over:

- de optredende concentraties verontreinigende stoffen in de tunnel,
- de haalbaarheid van het afsluiten van de tunnel voor uitstromende lucht en
- de mogelijkheden om deze stoffen middels filters e.d. te verwijderen.

Dit onderzoek is uitgevoerd in een samenwerkingsverband tussen Oranjewoud, TNO Bouw en Ondergrond en UC Technologies. UCT levert daarbij de kennis en ervaring met haar zogenaamde HD meestroom ventilatieconcept en kennis van ventilatiesystemen in algemene zin. Oranjewoud brengt het zogenaamde C<sup>2</sup> O tegenstroom ventilatieconcept in en TNO heeft voor beide concepten rekenmodellen opgesteld en doorgerekend en informatie verschaft over kortdurende blootstelling aan hoge concentraties verkeersgerelateerde luchtverontreiniging (in de tunnel). Oranjewoud is penvoerder in dit samenwerkingsverband.

### 1.1 Vraagstelling en aanpak op hoofdlijnen

De opdracht van IPL /RWS bestaat uit twee hoofdonderdelen.

1. Onderzoek naar acceptabele concentraties van stoffen in tunnelbuizen.
2. Nagaan welke concentraties bereikt worden met bepaalde ventilatieregimes in de tunnelbuis en vervolgens constateren of deze concentraties grenswaarden voor (kortdurende) blootstelling overschrijden en of de ventilatieconcepten in de praktijk realiseerbaar zijn.

### 1.1.1 **Welke concentraties zijn acceptabel**

De hoofdvraag die gesteld is met betrekking tot de haalbaarheid van de ventilatieconcepten luidt als volgt:

#### **Welke PM<sub>2,5</sub>-, PM<sub>10</sub>- en NO<sub>2</sub>-concentraties zijn acceptabel in de tunnelbuis?**

Achter- of onderliggende vragen zijn daarbij :

1. op grond van welke criteria wordt vastgesteld/ingeschat wat de maximale PM<sub>2,5</sub>-, PM<sub>10</sub>- en NO<sub>2</sub>-concentraties kunnen zijn?
2. welke verontreinigende stoffen accumuleren in een tunnelbuis nog meer als gevolg van het tunnelventilatieconcept?
3. welke stoffen (anders dan PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub> en NO<sub>2</sub>) vormen als gevolg van accumulatie een risico voor de weggebruiker, de veiligheid, de werking van het zuiveringssysteem, etc.

De hoofdvraag heeft vooral betrekking op de weggebruiker in de tunnel: waaraan mag deze in zijn voertuig worden blootgesteld?

### 1.1.2 **Welke concentraties kunnen met de (ventilatie- en zuiverings) technieken worden bereikt**

Met betrekking tot de technische invalshoeken van de ventilatieconcepten spelen de volgende vragen een rol:

#### **Welke PM<sub>2,5</sub>-, PM<sub>10</sub>- en NO<sub>2</sub>-concentraties treden op in de tunnel bij toepassing van het tunnelventilatie-concept?**

Achter- of onderliggende vragen zijn:

1. Zijn de concentraties in de tunnel acceptabel (zie hoofdvraag)?
2. Welk rendement van de zuivering (uitgedrukt in verwijdering PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub> en NO<sub>2</sub>) is noodzakelijk om een acceptabele tunnelmondgeving te bereiken?
3. Met welke zuiveringstechnieken is dit rendement mogelijk?
4. Welke inspanning (energie) is nodig om de vermindering te realiseren?
5. Is er, ondanks het streven een zoveel mogelijk gesloten systeem te realiseren, een uitstoot van PM<sub>2,5</sub>-, PM<sub>10</sub>- en NO<sub>2</sub>-concentraties te verwachten?

Tot slot is ook de vraag of deze concepten in bestaande tunnels inpasbaar zijn van belang.

### 1.1.3 **Uitsluitingen in het onderzoek**

Nader onderzoek ten aanzien van het specifiek energiegebruik van deze ventilatieconcepten kan in het korte tijdsbestek van dit verkennend haalbaarheidsonderzoek niet worden uitgevoerd. Wel worden algemene uitspraken ten aanzien van de factoren die uiteindelijk het energiegebruik van een gekozen (gecombineerd) concept bepalen, meegenomen in het onderzoek.

Er wordt uitgegaan van tunnels met een maximale lengte van ca. 1500 m. Langere tunnels dienen apart te worden beschouwd.

Technische aspecten van de uitvoering van de ventilatietechnieken worden niet verder onderzocht. Er wordt vanuit gegaan dat alle technische problemen oplosbaar zijn.

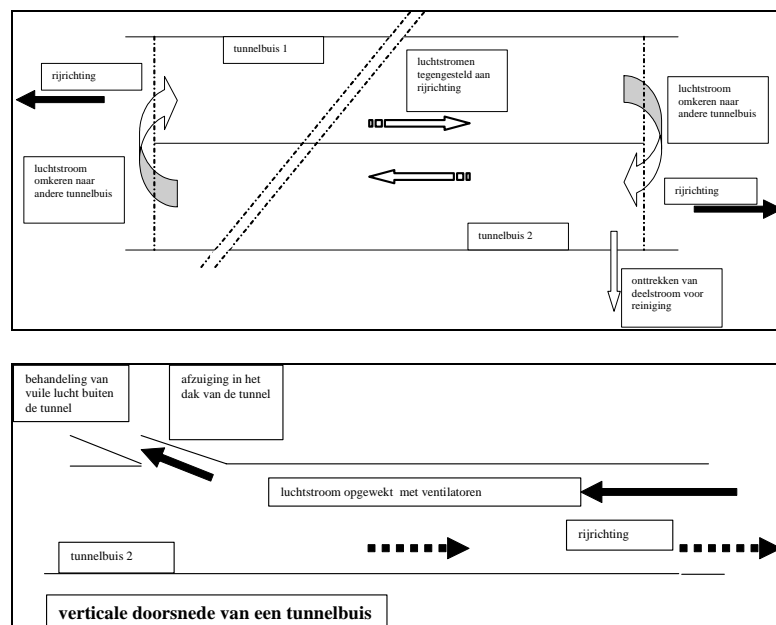
## 1.2 Beschrijving van de ventilatieconcepten op hoofdlijnen

### 1.2.1 Basis van de tunnelventilatieconcepten

Als basis van deze concepten geldt het opsluiten van de lucht in de tunnel door het in circulatie brengen van de tunnellucht in beide gescheiden tunnelbuizen. Dat kan meestrooms met de rijrichting van de voertuigen en tegenstrooms tegen de rijrichting in. Voor beide systemen heeft een eerste computersimulatie uitgewezen dat een daadwerkelijke concentratieverhoging voor (in dit geval) fijnstof plaatsvindt. In het tegenstroommodel worden hogere concentraties bereikt dan bij het meestroommodel bij dezelfde tunnallengte.

#### 1.2.1.1 Concept 1 C<sup>2</sup>O tegenstroom ventilatie

In concept 1 wordt tegen de rijrichting van de voertuigen in de tunnel een luchtstroom opgewekt, zodanig dat de netto luchtbeweging in de rijrichting vrijwel tot nul wordt gereduceerd. Zodra de lucht "stilstaat" kan er ook geen vervuiling meer uit de tunnelmond komen. Dat is de gedachtegang achter concept 1. Dit concept is door Oranjewoud ontwikkeld en geïmplementeerd.



Principeschets C<sup>2</sup>O tunnelventilatieconcept

Duidelijk is dat het stilzetten van de luchtstroom via tegenstroomventilatie bij lage voertuigsnelheid eenvoudiger is dan bij hoge voertuigsnelheden. Daarom zou in dit concept de snelheid van de voertuigen bij voorkeur tot 50 of 70 km beperkt moeten blijven.

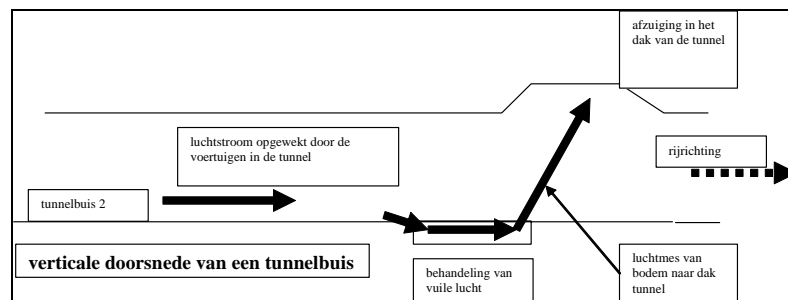
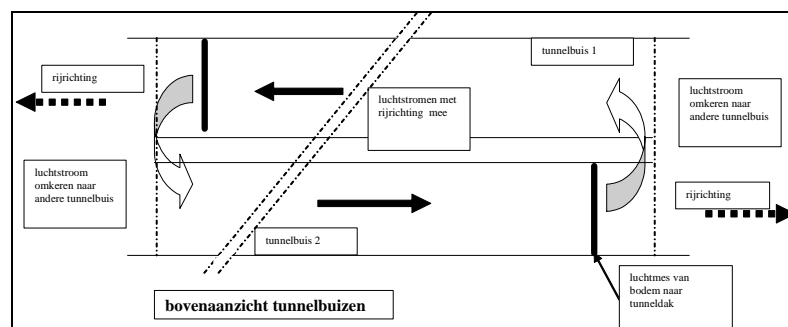
Zoals gezegd sluit je de lucht op door een dusdanige tegenstroom dat per saldo de luchtsnelheid nul wordt. Er gaat dus niets in of uit bij de tunnelingang, er komt ook geen lucht uit bij de uitgang van de auto's behalve wat de auto direct "meesleept". Daarmee zal de lucht overal ongeveer dezelfde concentratie krijgen. Wij stellen ons voor aan de ingang de lucht te onttrekken en te zuiveren. Door te onttrekken aan de ingang ontstaat er een netto luchtstroom naar die ingang (tenzij je de lucht vrijwel op dezelfde plaats weer terug blaast). Die netto luchtstroom wordt aan de uitgang gecompenseerd door verse lucht intrede. Dat doet zich voor als we praten over 1 tunnelbuis. De gedachte is daarom om bij tegenstroom voor compensatie van de intredende schone lucht bij de auto-uitgang van de tunnelbuis, lucht uit de andere tunnelbuis te gebruiken en daarmee de hoeveelheid lucht



op niveau te houden. Die koppeling van tunnelbuizen gaat dus alleen over het onttrekkingsdebiet dat je zuivert, niet meer. Dat kost dus relatief weinig energie. Over de twee tunnelbuizen komt dus een netto luchtdeficiet ter grootte van je onttrekking voor zuivering. Dat wordt aangevuld door lucht van buitenaf, bij voorkeur via de auto-uitgangen van de tunnels en daar stem je de ventilatie op af. Het is ook mogelijk om de gezuiverde lucht weer in de tunnel te blazen, dan wordt het een volledig gesloten systeem, behoudens de lek via de uitrijdende voertuigen. Het is niet zinvol om grote hoeveelheden lucht tegenstrooms van de ene naar de andere tunnelbuis te blazen. Daarom beperken wij ons tot alleen het zuiveringsdebiet.

### 1.2.1.2 Concept 2 HD meestroom ventilatie concept

In concept 2 is sprake van meestroomventilatie waarbij de voertuigen zelf de luchtstroom opwekken. Dat is het concept van UC Technologies.



Principeschets meestroom concept

Bij dit concept wordt aan het eind van de tunnelbuis nabij de uitrij-opening de -laag bij de grond en naar verwachting sterk verontreinigde- luchtlaag afgezogen aan de onderzijde van de tunnel en gereinigd. Via een luchtmes wordt deze lucht van onderuit met kracht naar boven geblazen en aan de bovenzijde van de tunnel wordt dan de totale luchtstroom opgevangen, afgezogen en in de ander tunnelbuis ingelaten. Daarmee neemt ook de concentratie in de tunnelbuizen toe. Op die wijze zorgt het luchtmes en de afzuiging aan de bovenkant voor de ontkoppeling van de tunnellucht in de tunnel met de luchtuitstroom uit de tunnelmond. Wellicht dat daar nog extra tegenstroom op de tunnelmond nodig is om de zaak helemaal gesloten te krijgen. Dat zou een verdere optimalisatie betekenen van dat "luchtmes".

Bij lange tunnels heeft dan het meestroom concept met op de einden tegenstroom duidelijk energie-voordelen ten opzichte van totaal tegenstroom. Bij korte tunnels ligt het anders omdat dan concentraties gaan meespelen. Tegenstroom genereert hogere concentraties dan meestroom. Dat is een belangrijk onderdeel van onderhavige studie omdat we daarin duidelijk maken onder welke omstandigheden de ventilatieconcepten optimaal functioneren en waar de grenzen liggen m.b.t. de concentraties.

## 1.2.2 **Computersimulatie van het tegen- en meestroom ventilatiesysteem**

### 1.2.2.1 **C<sup>2</sup>O concept**

Het tegenstroomprincipe is erop gebaseerd om een, tegengesteld aan de rijrichting opgewekte, luchtstroom in stand te houden waarbij de netto luchtsnelheid ongeveer nul bedraagt. De gemiddelde luchtsnelheid a.g.v. de autobewegingen bij 80 km/uur ligt op ca. 8 m/s in de rijrichting.

TNO heeft veel ervaring met het digitaal modelleren van tunnels en luchtstromingen in tunnels. Met behulp van het CFD pakket kan elke simulatie van verkeersbewegingen in tunnels worden uitgevoerd. Variabelen zijn daarbij o.a. verkeersintensiteit, snelheid, typen auto's en mix van vrachtwagens en personenauto's, wandruwheid etc. Het model bepaalt de luchtsnelheid als gevolg van de verkeersbewegingen en in detail de luchtstromingen en -circulaties die optreden in de gemodelleerde tunnelconfiguratie.

### 1.2.2.2 **HD concept**

Ook is met het model te simuleren hoe de afzuiging in meestroomse richting eruit zou zien. Er is dan minder energie nodig en bij het omkeren van de luchtstroom naar de andere tunnelbuis kan eveneens een concentratieverhogend effect worden bereikt. In hoeverre er dan een netto luchtstroom uit de tunnelbuis optreedt zal het model uitwijzen. In het model kan ook een luchtinlaat worden gesimuleerd aan het begin van de tunnel en kunnen luchtstromingen worden weergegeven. De configuratie van de kanalen kan worden gewijzigd en kan worden fijn getuned zodat er netto geen lucht uit de tunnelbuis komt.

M.a.w. beide tunnelventilatieconcepten kunnen volledig digitaal worden gesimuleerd voor een willekeurige tunnel qua afmetingen, lengte-breedte-hoogte.

In de onderhavige studie beperken wij ons tot een standaard configuratie waarbij alleen de lengte van de tunnel wordt gevarieerd (500, 1000 en 1500 m) teneinde inzicht te krijgen in de concentraties die op kunnen treden.

## 1.3 **Uitgangspunten en criteria**

### **Stoffen in het onderzoek**

Voor verkeersemissies zijn met name stikstofoxides (NO<sub>x</sub>), fijnstof (PM<sub>2,5</sub> en PM<sub>10</sub>) en koolmonoxide (CO) van belang. Bij fijnstof moet worden opgemerkt dat dit vrijkomt zowel uit de uitlaat als door slijtage van de banden en het wegdek.

NO<sub>x</sub> is de verzamelnaam van stikstofoxides en bestaat in hoofdzaak uit NO, stikstofmonoxide) en NO<sub>2</sub>(stikstofdioxide). De verhouding NO<sub>2</sub>/NO in de uitlaatgassen varieert, maar aangezien NO instabiel is en vrij snel (na enkele minuten) omgezet wordt in NO<sub>2</sub> gaat de studie verder uit van concentraties NO<sub>2</sub>. Bovendien kan NO<sub>2</sub> bij hogere concentraties schadelijk zijn, terwijl NO veel minder schadelijk is.

Fijnstof is de verzamelnaam voor zowel hele kleine deeltjes (PM<sub>2,5</sub> is de fractie kleiner dan 2,5 micron) als de wat grotere deeltjes (PM<sub>10</sub>, de fractie <10 micron). Tot voor kort was de aandacht op PM<sub>10</sub> gevestigd en in mindere mate op de deelfractie PM<sub>2,5</sub>, als onderdeel van PM<sub>10</sub> uiteraard. De aandacht gaat nu echter in toenemende mate uit naar PM<sub>2,5</sub> omdat wordt vermoed dat deze fractie schadelijker is voor de gezondheid dan de fractie PM<sub>2,5-10</sub>. Daarnaast is Oranjewoud van mening dat de concentratie koolmonoxide (CO) ook van belang is omdat hoge concentraties CO gevaarlijk kunnen zijn.

In deze studie wordt daarom gefocust op drie stoffen PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub> en CO. Waar mogelijk wordt ook naar PM<sub>2,5</sub> gekeken, maar daar is nog relatief weinig onderzoek naar gedaan.

### Criteria

- Het hoofdcriterium voor de vaststelling van max. concentraties vormt het risico voor de gezondheid van de weggebruiker.
- Het tweede criterium is de blootstellingsduur aan weggebruikers die van een tunnel gebruikmaken. Voor grenswaarden die in het kader van de Wet luchtkwaliteit voor de buitenlucht worden gehanteerd gelden veelal jaargemiddelde en uurgemiddelde waarden. Deze waarden gelden dan als (stedelijke) achtergrondwaarden. Voor blootstelling aan de mens in de werkomgeving is de MAC waarde een veelgebruikte norm en deze gaat uit van (continue) 8-uur gemiddelde blootstelling.
- Bij tunnelgebruik is de blootstellingsduur onder normale omstandigheden echter beperkt tot enkele minuten (afhankelijk van de lengte van de tunnel en de rijsnelheid). Bij filevorming en ongevallen kan deze oplopen en die omstandigheden vereisen dus een aparte benadering. Daarom kunnen de grenswaarden die als gemiddelde achtergrondwaarden gelden, niet zonder meer ook op tunnels van toepassing zijn.
- Derde criterium vormt de verkeersveiligheid, met name het doorzicht in een tunnel. Bij hoge concentraties fijnstof kan het doorzicht worden beperkt en ontstaat een soort mist en kan de verkeersveiligheid negatief worden beïnvloed. Hoge concentraties NO<sub>x</sub> of CO hebben op doorzicht geen invloed.

Omdat voor wegen en tunnelwegen geen wettelijke grens- of streefwaarden gelden (deze gebieden zijn expliciet uitgezonderd in de Wet luchtkwaliteit) zal deze studie alleen indicaties op kunnen leveren welke maximale concentraties in tunnels nog verantwoord kunnen zijn, gezien tegen de achtergrond van de normen voor buitenlucht en de blootstellingscriteria.

## 1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt met name gekeken naar maximum grens- en streefwaarden die de literatuur aangeeft voor PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub> en NO<sub>2</sub> en grenswaarden voor andere stoffen. Tevens wordt ingegaan op andere mogelijk accumulerende stoffen en daarbij behorende grenswaarden.

Hoofdstuk 3 en 4 behandelen de risico's die optreden als gevolg van de blootstelling aan diverse stoffen.

Hoofdstuk 5 behandelt informatie over (zeer) kortdurende blootstelling en geeft informatie over effecten van kortdurende blootstelling aan hoge concentraties, met name NO<sub>x</sub>. Hierbij wordt ook het specifiek onderzoek van TNO naar (zeer) kortdurende blootstelling aan NO<sub>x</sub> en PM<sub>10</sub> betrokken, dat in het kader van deze studie is uitgevoerd. In hoofdstuk 6 wordt de discussie gevoerd over mogelijke tegenstellingen in de gevonden informatie.

Hoofdstuk 7 en 8 gaan in op de te bereiken concentraties in tunnels bij de twee tunnelventilatieconcepten C<sup>2</sup>O en HD, resp. tegenstroom ventilatie en meestroom ventilatie.

Hoofdstuk 9 behandelt de mogelijke verwijderingstechnieken / -systemen en gaat in op de mogelijke invloed van andere accumulerende stoffen op de werking van deze systemen. Ook zullen hier openstaande vragen worden geformuleerd waarop op dit moment nog geen antwoord mogelijk is.

Hoofdstuk 10 geeft conclusies en aanbevelingen.

In bijlage 1 zijn de Europese luchtkwaliteitsnormen buitenlucht opgenomen alsmede uitgebreide achtergrondinformatie m.b.t. deze normen.

In bijlage 2 zijn van alle in de rapportage genoemde stoffen MAC-waarden opgenomen. MAC-waarden zijn in principe de maximale concentraties waaraan een mens gedurende een korte tijd (8-uur gemiddelde blootstelling) mag worden blootgesteld. Bijlage 3 geeft nadere informatie over PIARC. Bijlage 4 bevat de rekenresultaten van het door TNO gehanteerde CFD computermodel. Bijlage 5 bevat de deelnotitie van TNO t.a.v korte termijn blootstelling. In bijlage 6 is het literatuuroverzicht opgenomen.

## 2 Streef- en grenswaarde concentraties PM<sub>2,5</sub>-, PM<sub>10</sub>-, NO<sub>2</sub> en andere accumulerende stoffen

### 2.1 Inleiding

Teneinde de vraag te kunnen beantwoorden welke grenswaarden voor verkeersgerelateerde luchtverontreiniging in tunnels gehanteerd zouden moeten worden, wordt eerst een overzicht gegeven van de bestaande grens- en streefwaarden voor buitenlucht.

In onderstaande tabellen in hoofdstuk 2.2 e.v. zijn alle in de literatuur gevonden streef- en grenswaarden samengevat.

Stikstofoxide NO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> en fijnstof PM<sub>10</sub> (en PM<sub>2,5</sub>), zijn de belangrijkste stoffen die met wegverkeer samenhangen en waar bij de analyse van de tunnelventilatie concepten met name naar wordt gekeken.

De status van deze getallen verschilt van blootstelling (het maximum blootstellingsadvies of de in de praktijk gehanteerde maximum blootstellingswaarde) tot streefwaarde en grenswaarde.

De te behandelen andere accumulerende stoffen worden in hoofdstuk 2.1.1 benoemd.

#### 2.1.1 Andere accumulerende stoffen

Andere accumulerende stoffen die op de achtergrond een rol kunnen spelen bij de analyse van de tunnelventilatieconcepten zijn:

Koolmonoxide (CO);  
Lood (Pb);  
Benzeen (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>);  
Benzo(a)pyreen (BaP);  
Slijtage van banden;  
Opwaaiend stof.

Bron: <http://www.ipluchtkwaliteit.nl/data/publicatie-74/Luchtbehandeling/1-Achtergrond/A2-Maastricht.ppt>

Andere stoffen die nog een rol kunnen spelen zijn:

- Ozon;
- Smog (combinatie van O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> en PM<sub>10</sub>);
- Polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's)

Bron: <http://www.astmafonds.nl/downloads/eindrapport%20CE.pdf>

### 2.2 Stikstofoxides

Stof	Gericht op	Norm	Niveau	Status	Bron	Opmerking
Stikstofdioxide (NO <sub>2</sub> )	mens	1-2 min kortdurende blootstelling, geldt ook in tunnels	1880 µg/m <sup>3</sup> (1 ppm)	blootstelling	7a	
	mens	2-5 min kortdurende blootstelling, geldt ook in tunnels	1100 µg/m <sup>3</sup> (0,6 ppm)	blootstelling	7a	
	mens	5-10 min kortdurende	750	blootstelling	7a	

Stof	Gericht op	Norm	Niveau	Status	Bron	Opmerking
		blootstelling, geldt ook in tunnels	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0,4 ppm)			
	mens	uurgemiddelde; overschrijding is toegestaan op niet meer dan 18 uur per jaar.	290 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	grenswaarde	9a	geldig tot 2010
	mens	uurgemiddelde; overschrijding is toegestaan op niet meer dan 18 uur per jaar.	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	grenswaarde	9a	geldig vanaf 2010
	mens	jaargemiddelde	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	grenswaarde	9a	geldig vanaf 2010
	mens	jaargemiddelde	42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	plandrempel	9a	geldig tot 01-01-2010
		jaargemiddelde voor wegen	210 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	plandrempel	9a	geldig tot 01-01-2010
	mens	uurgemiddelde; waargenomen gedurende drie opeenvolgende uren in een gebied van minimaal 100 km <sup>2</sup> .	400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	alarm drempel	9a	
Stikstofoxiden (NO <sub>x</sub> )	natuur	jaargemiddelde	30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	grenswaarde	9a	

Uit een studie van de Amerikaanse Marine voor onderzeeboot evacuatiealarm bij hoge NO<sub>2</sub> concentraties zijn experimenten uitgevoerd met blootstelling aan 30.000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  gedurende 1-2 uur \*) en daarbij is aangetoond dat dan schadelijke effecten op kunnen treden, met name na het eerste uur blootstelling. Om die reden is een evacuatiernorm van 10.000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (10 mg/m<sup>3</sup>) voorgesteld voor duikboot situaties. Ook daar geldt dat deze normen voor langere perioden blootstelling gelden.

\*) bron Ref.16: Emergency and Continuous Exposure Guidance Levels for Selected Submarine Contaminants (2007) Board on Environmental Studies and Toxicology (BEST).

### 2.3 Fijnstof PM<sub>10</sub> en PM<sub>2,5</sub>

Stof	Gericht op	Norm	Niveau	Status	Bron	Opmerking
Fijnstof (PM <sub>10</sub> )	mens	1-5 min kortdurende blootstelling	geen eisen	blootstelling	7a	
	mens	5-10 min kortdurende blootstelling	5000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	blootstelling	7a	
	mens	daggemiddelde; overschrijding is toegestaan op niet meer dan 35 dagen per jaar.	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	grenswaarde	9a	
	mens	jaargemiddelde	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	grenswaarde	9a	
Fijnstof (PM <sub>2,5</sub> )	mens	jaargemiddelde	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	grenswaarde	8b	geldig van af 2015
	mens	jaargemiddelde	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	grenswaarde	3b 8b	geldig van af 2015

	mens	jaargemiddelde	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	streefwaarde	3b 8b	te bereiken in 2010
	mens	jaargemiddelde	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	streefwaarde	3b 8b	te bereiken in 2020
	mens	jaargemiddelde, gemiddelde bepaald over metingen op stedelijke achtergrondlocaties	15-20% vermind ering	blootstelling,	8b	te bereiken in 2020 ten opzichte van 2010

## 2.4 Koolmonoxide CO

Stof	Gericht op	Norm	Niveau	Status	Bron	Opmerking
Koolmonoxide (CO)	mens	hoogste voortschrijdend 8-uurgemiddelde	10.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	grenswaarde	9a	
	mens	1-2 uur kortdurende blootstelling	460.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (400 ppm)	blootstelling	12	Levensbedreigend na 2-3 uren
	mens	2-3 uur kortdurende blootstelling	230.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (200 ppm)	blootstelling	12	Hoofdpijn, vermoeidheid, misselijkheid en duizeligheid
	mens	8 uur kortdurende blootstelling	28.750 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (25 ppm)	blootstelling	12	In Nederland is 25 ppm de MAC waarde voor koolmonoxide
	mens	maximaal toelaatbare concentratie voor normaal verkeer	345.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (300 ppm)	blootstelling	6	
	mens	maximaal toelaatbare concentratie bij calamiteiten, verblijftijd <1 uur	172.500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (150 ppm)	blootstelling	6	
	mens	maximaal toelaatbare concentratie bij wegwerkzaamheden, verblijftijd >1 uur	57.500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (50 ppm)	blootstelling	6	

Voor CO worden in het buitenland limieten gehanteerd van 230.000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (200 ppm) gedurende 15 minuten:

*"Air quality standards can vary between countries: eg the Norwegian limit for carbon monoxide in side tunnels is 200 parts per million averaged over 15 minutes; the limit in tunnels in Sydney is 87 parts per million."*

Bron <http://www.epa.vic.gov.au/projects/docs/Annex%208%20-%20%20Technology%20Review.pdf> page 17

De concentraties die in Nederland worden gehanteerd zijn dus wat strenger dan die gelden in Noorwegen, ten opzichte van Australië is Nederland echter strenger.

## 1.1 Overige accumulerende stoffen

Stof	Gericht op	Norm	Niveau	Status	Bron	Opmerking
Roet	mens	voor roet geldt dat de veiligheidsdrempel gedurende 98% van dag niet mag worden overschreden jaargemiddelde	90 µg/m <sup>3</sup>	veiligheidsdrempel	6	
Zwavel dioxide (SO <sub>2</sub> )	mens	uurgemiddelde; overschrijding is toegestaan op niet meer dan 24 uur per jaar.	350 µg/m <sup>3</sup>	grenswaarde	9a	
	mens	daggemiddelde; overschrijding is toegestaan op niet meer dan 3 dagen per jaar.	125 µg/m <sup>3</sup>	grenswaarde	9a	
	mens	uurgemiddelde; waargenomen gedurende drie opeenvolgende uren in een gebied van minimaal 100 km <sup>2</sup> .	500 µg/m <sup>3</sup>	alarmdrempel	9a	
	natuur	jaargemiddelde en wintergemiddelde (van 1 oktober t/m 31 maart)	20 µg/m <sup>3</sup>	grenswaarde	9a	
	mens	jaargemiddelde	0,5 µg/m <sup>3</sup>	grenswaarde	9a	
Lood (Pb)	mens	jaargemiddelde	10 µg/m <sup>3</sup>	grenswaarde	9a	geldig tot 2010
Benzeen (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	mens	jaargemiddelde	5 µg/m <sup>3</sup>	grenswaarde	9a	geldig vanaf 2010
	mens	jaargemiddelde	6 µg/m <sup>3</sup>	plandrempel	9a	geldig tot 2010
	mens	hoogste voortschrijdende 8-uursgemiddelde per dag; overschrijding is toegestaan op niet meer dan 25 dagen per jaar.	120 µg/m <sup>3</sup>	streefwaarde	9a	te bereiken in 2010
Ozon (O <sub>3</sub> )	mens	uurgemiddelde	180 µg/m <sup>3</sup>	informatiedrempel	9a	
	mens	uurgemiddelde; waargenomen gedurende drie	240 µg/m <sup>3</sup>	alarmdrempel	9a	



		opeenvolgende uren in een gebied van minimaal 100 km <sup>2</sup> .				
	natuur	AOT40*), uurgemiddelde over 5 jaar	18.000 µg/m <sup>3</sup>	streefwaarde	9a	te bereiken in 2010
	natuur	AOT40*), uurgemiddelde over mei tot en met juli	6.000 µg/m <sup>3</sup>	streefwaarde	9a	te bereiken in: niet bepaald
Arseen (As)	mens	jaargemiddelde, gedefinieerd als het totale gehalte arseen in de PM <sub>10</sub> fractie	0.006 µg/m <sup>3</sup> (6 ng/m <sup>3</sup> )	streefwaarde	9a	geldig vanaf 2013
Cadmium (Cd)	mens	jaargemiddelde, gedefinieerd als het totale gehalte cadmium in de PM <sub>10</sub> fractie	0.005 µg/m <sup>3</sup> (5 ng/m <sup>3</sup> )	streefwaarde	9a	geldig vanaf 2013
Nikkel (Ni)	mens	jaargemiddelde, gedefinieerd als het totale gehalte nikkel in de PM <sub>10</sub> fractie	0.02 µg/m <sup>3</sup> (20 ng/m <sup>3</sup> )	streefwaarde	9a	geldig vanaf 2013
Benzo[a]pyreen (B[a]P)	mens	jaargemiddelde, gedefinieerd als het totale gehalte benzo(a)pyreen in de PM <sub>10</sub> fractie	0.001 µg/m <sup>3</sup> (1 ng/m <sup>3</sup> )	streefwaarde	9a	geldig vanaf 2013

\*) AOT40 – the parameter used to represent the accumulated dose of ozone; AOT40 (Accumulated dose over a threshold of 40 ppb) is the sum of the differences between the hourly mean ozone concentration (in ppb) and 40 ppb for each hour when the concentration exceeds 40 ppb, accumulated during daylight hours.

## 2.5 Samenvatting grenswaarden buitenlucht voor PM<sub>10</sub> en NO<sub>2</sub>

Voor NO<sub>2</sub> zijn grenswaarden voor buitenlucht op jaargemiddelde en uurgemiddelde basis (40 resp. 200 µg/m<sup>3</sup>) beschikbaar.

Voor PM<sub>10</sub> is een uurgemiddelde grenswaarde van 40 µg/m<sup>3</sup> en een daggemiddelde van 50 µg/m<sup>3</sup> met max. 35x overschrijdingen/jr.

Voor PM<sub>2,5</sub> liggen deze waarden op 20-25 µg/m<sup>3</sup> (algemeen resp. stedelijke achtergrondwaarde) als streefwaarde voor 2010 en grenswaarde voor 2015.

De grenswaarden voor buitenlucht gelden niet voor wegtracé's tot 10 meter buiten de kant van de weg en evenmin voor tunneltracé's.

Voorgestelde maximum blootstellingswaarden voor tunnels zijn in par. 2.9 opgenomen.

## 2.6 Samenvatting grenswaarden (buitenlucht) voor overige stoffen

Voor CO geldt een hoogste voortschrijdende 8 uur gemiddelde grenswaarde van 10.000 µg/m<sup>3</sup>.

SO<sub>2</sub> kent een dag- en uurgemiddelde grenswaarde van 125 resp 350 µg/m<sup>3</sup> met een toegelaten overschrijding van resp. 3 dagen/jaar resp. 24 uur /jr.

Benzeen en Lood kennen een jaargemiddelde grenswaarde van 10 (tot 2010) en 5 (na 2010) resp.  $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

## 2.7 Samenvatting streefwaarden (buitenlucht) voor overige stoffen

Ozon, Arseen, Nikkel Cadmium en Benzo[a]pyreen kennen alleen streefwaarden in buitenlucht.

O<sub>3</sub>: hoogste voortschrijdende 8-uursgemiddelde per dag;  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  te bereiken in 2010.

Jaargemiddelden, gedefinieerd als het totale gehalte van de stof in de PM<sub>10</sub> voor

Arseen:	$0,006 \mu\text{g}/\text{m}^3$
cadmium	$0,005 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Nikkel:	$0,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Benzo[a]pyreen:	$0,001 \mu\text{g}/\text{m}^3$

## 2.8 Normen voor toegestane kortdurende blootstelling in tunnels

De enige kortdurende blootstellingsnorm is van PRIARC met  $1880 \mu\text{g}/\text{m}^3$  gedurende 1-2 minuten specifiek voor tunnels voorgesteld. Dit betreft een adviesnorm.

PM<sub>10</sub> kent een blootstellingsadvies van PRIARC voor zeer kortdurende blootstelling van  $5000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  voor 5-10 minuten. Voor 1-2 minutenblootstelling is geen norm gesteld.

In detail zien deze adviesnormen er als volgt uit:

NO<sub>2</sub>:

- 1-2 min: max  $1880 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (1 ppm)
- 2-5 min: max  $1100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (0,6 ppm)
- 5-10 min: max  $750 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (0,4 ppm)

PM<sub>10</sub>

- 1-5 min: geen eisen (zie paragraaf 2.3)
- 5-10 min:  $5000 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Voor blootstelling bij normaal wegverkeer in een tunnel is voor CO  $345.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (300 ppm) als maximum waarde aangegeven. (bron ref.6)

Verder biedt een internet bron nog nadere Engelse normen voor (industriële) incidentele blootstelling. Daar is tot voor kort sprake van  $5640 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (3 ppm) NO<sub>2</sub> voor 8 uur durende blootstelling en  $9.900 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (5 ppm) NO<sub>2</sub> voor 15 minuten blootstelling. De norm voor langdurige blootstelling aan NO<sub>2</sub> is nadien bijgesteld tot  $1880 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (1 ppm). De norm voor incidentele 15 minuten blootstelling is niet gewijzigd.

"HSE Occupational Exposure Levels

NO<sub>2</sub> long term exposure limit (8 hr TWA reference period) 3 ppm

NO<sub>2</sub> short term exposure limit (15 min reference period) 5 ppm

NO long term exposure limit (8 hr TWA reference period) 25 ppm

NO short term exposure limit (15 min reference period) 35 ppm

Since the implementation of the COSHH Regulations in 1989, nitrogen dioxide has had Occupational Exposure Standards (OESs) of 3 ppm (8-hour time weighted average) and 5 ppm (short-term exposure limit). Since then, the Health and Safety Commissions Working Group on the Assessment of Toxic Chemicals (WATCH) has reviewed the evidence on the health effects of nitrogen dioxide. The conclusions from WATCH suggest that these OESs may not be adequate to protect occupational health. The Health and Safety Commission has therefore decided to withdraw them from EH40 as from April 2003. Based on the evidence available, WATCH concluded that to protect workers against the development of emphysema, **long-term (8-hour TWA) exposures to nitrogen dioxide should not exceed 1 ppm.**

Since the implementation of the COSHH Regulations in 1989, nitrogen monoxide has had Occupational Exposure Standards (OESs) of 25 ppm (8-hour time weighted average) and 35 ppm (short-term exposure limit). Since then, the Health and Safety Commission's Working Group on the Assessment of Toxic Chemicals (WATCH) has reviewed the evidence on the health effects of nitrogen monoxide. The conclusions from WATCH suggest that

these OESs may not be adequate to protect occupational health. The Health and Safety Commission has therefore decided to withdraw them from EH40 as from April 2003. Based on the evidence available, WATCH concluded that to protect workers against the development of emphysema, long-term (8-hour TWA) exposures to nitrogen monoxide should not exceed 1 ppm."

bron: ref. 15

bron t.a.v. TWA reference period: <http://www.hse.gov.uk/cosHH/calcmethods.pdf>

### 3 Risico's als gevolg van blootstelling aan NO<sub>2</sub> en PM<sub>10</sub>

Voor een inventarisatie van de risico's van (zeer) kortdurende humane blootstelling aan (hoge) concentraties verkeersgerelateerde luchtverontreiniging van PM<sub>10</sub> en NO<sub>2</sub> is TNO gevraagd een kort literatuuronderzoek uit te voeren. Dit onderzoek is in de vorm van een notitie opgenomen in bijlage 5 van dit rapport.

Conclusie van deze notitie is dat over blootstelling korter dan 30 minuten geen informatie beschikbaar is. Voor PM<sub>10</sub> is wel een norm van 5000 µg NO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> voor 10-15 minuten blootstelling, voor NO<sub>2</sub> ontbreekt een dergelijke norm.

Voor zeer kortdurende blootstelling 1-2 minuten (aan hogere concentraties) is derhalve geen onderzoek voorhanden en dus is er ook geen informatie beschikbaar die de effecten van zeer korte blootstelling van 1-2 minuten in tunnels beschrijft.

Het vertalen van experimenteel onderzoek naar de situatie in tunnels dient met de nodige voorzichtigheid te gebeuren.

De gezondheidsrisico's liggen niet zozeer bij gezonde volwassenen maar met name bij ouderen, kinderen en astmatici.

Daarnaast is het van belang te constateren dat NO<sub>2</sub> als indicator wordt gebruikt voor de gezondheidseffecten van verkeersgerelateerde emissies. dus ook de effecten van PM<sub>10</sub> worden daarin meegenomen. Juist de stoffen die samen met NO<sub>2</sub> via verkeersemissies in de buitenlucht voorkomen kunnen oorzaak zijn van de effecten die in epidemiologische studies worden gevonden.

Hoewel van de effecten van zeer kortstondige blootstelling aan hoge concentraties verkeersgerelateerde luchtverontreiniging niets bekend is, geeft onderzoek wel aan dat bij blootstelling van proefpersonen aan concentraties van 200-300 µg NO<sub>2</sub> /m<sup>3</sup> in stadstunnels (in Stockholm) gedurende 1-2 uur direct effecten merkbaar zijn. Deze personen verbleven echter buiten de auto in de tunnel en waren dus direct aan de tunnelomgeving blootgesteld. Directe blootstelling moet dus waar het enigszins kan, tot een minimum worden beperkt. Dit kan o.a. door richtlijnen op te nemen die het passeren van een tunnel in een gesloten cabine aanbeveelt. (uitgezonderd cabrio's en motorrijders). Voor meer informatie over de Stockholm e.a. experimenten wordt verwezen naar bijlage 3 PIARC.

#### 3.1 Inschatting van het risico bij blootstelling aan zeer hoge concentraties NO<sub>2</sub> gedurende zeer korte tijd

Van zeer kortdurende blootstelling aan hoge concentraties verkeersgerelateerde luchtverontreiniging zijn geen gegevens bekend en hieraan zijn nooit laboratorium proeven uitgevoerd. Dat maakt het onvoorspelbaar hoe het menselijk lichaam op deze blootstelling zou kunnen reageren. Experimenten van de Amerikaanse marine met blootstelling aan 30.000 µg NO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>, gedurende 1-2 uur leveren wel duidelijk waarneembare effecten op.

(bron ref. 16: Review of Submarine Escape Action Levels for Selected Chemicals (2002)  
Board on Environmental Studies and Toxicology (BEST)

Of deze effecten in die mate ook waarneembaar zijn bij zeer kortstondige blootstelling gedurende enkele minuten is niet zeker en ook niet waarschijnlijk. Er bestaat echter geen zekerheid dat er geen effecten worden waargenomen over die korte blootstellingsperiode.

Om de gedachte toch enigszins te bepalen kan worden bepaald wat teruggerekend het effect is bij 2 minuten blootstelling in een tunnel met een gemiddelde concentratie  $\text{NO}_2$  als gevolg van het tunnelventilatieconcept van in dit geval  $15.000 \mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$  onder de aanname dat er de rest van de tijd geen blootstelling aan  $\text{NO}_2$  plaatsvindt. Dit zou neerkomen op een 24-uursgemiddelde blootstelling van  $21 \mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$  (tabel 3.1) bij een enkele doorgang door een tunnel met die momentane hoge concentraties en ervan uitgaande dat de verdere blootstelling aan  $\text{NO}_2$  in de buitenlucht minimaal is.

Indien dagelijks op werkdagen twee keer van die tunnel gebruik wordt gemaakt, zou de jaargemiddelde blootstelling op  $26 \mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$  (tabel 3.1) uitkomen. De jaargemiddelde streefwaarde voor wegen ligt op  $210 \mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$ . Daaraan worden automobilisten dagelijks gedurende enkele uren (indirect) blootgesteld.

De blootstelling is echter niet alleen afhankelijk van de concentratie en de tijdsduur maar ook van de ventilatiesituatie in de cabine van het voertuig. Bij een gesloten cabine en interne luchtcirculatie in de cabine zal de blootstelling vele malen lager zijn dan bij open verblijf in de tunnel of bij raampjes open en/of buitenluchtventilatie.

Volgens deze redenering zouden de effecten bij zeer kortdurende blootstelling aan hoge concentraties in de tunnel vergelijkbaar zijn met de situatie op wegen wat betreft de jaargemiddelde blootstelling.

Het effect van gesloten interne circulatie in de cabine waarbij de facto geen blootstelling aan de omgevingslucht plaatsvindt, is hier niet meegerekend.

Het aspect van de evacuatie tijd die bij tunnelevacuatie noodzakelijk is, is in deze berekeningen niet meegenomen.

Vanuit tunnelveiligheid worden eisen gesteld aan de tijdsduur waarbinnen een tunnel of tunnelsectie moet zijn ontruimd bij brand of ander calamiteit. Bij het ventilatieconcept wordt ervan uitgegaan dat, indien er vertragingen in de tunnel ontstaan, het ventilatiesysteem op "veilig" wordt geschakeld en de verontreinigingen zo snel mogelijk (enkele minuten na omschakeling) naar buiten worden afgevoerd. De blootstelling aan hoge concentraties zou dan maximaal kunnen verviervoudigen (van 1 minuut bij normale passage tot ca. 5 minuten, nodig om de tunnel te verversen).

<b>bij één tunneldoorgang/dag</b>			
minuten	uren	$\text{NO}_2$ blootstelling	
2	0,033333	15.000	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ gedurende 2 minuten
		500	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ als 1 uurgemiddelde
		21	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ als 24 uursgemiddelde
<b>bij twee maal daags door de tunnel ( bij dagelijks woon werk verkeer)</b>			
4	0,066667	15.000	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ gedurende 4 minuten
		1.000	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ als 1 uurgemiddelde
		42	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ als 24 uursgemiddelde
		blootstelling op werkdagen dagelijks; weekeind/vakanties niet; dus 220 op 365 dagen betekent	
		0,63	% blootstelling aan 24 uursgem. per jaar
		26	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ als jaargemiddelde blootstelling

Tabel 3.1 Berekening van uur- en jaargemiddelde (TWA ref. period) blootstelling als gevolg van zeer kortdurende blootstelling aan hoge concentraties  $\text{NO}_2$  als indicator van verkeersgerelateerde luchtverontreiniging.

### 3.2 Inschatting van de gevolgen van hoge concentraties $PM_{10}/PM_{2,5}$ gedurende korte tijd.

Zoals bekend lijken de gevolgen van  $PM_{2,5}$  op de menselijk gestel belangrijker dan die van de grovere fractie in  $PM_{10}$ . De blootstelling aan  $5.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$   $PM_{10}$  gedurende 5-15 minuten lijkt voor een tunnel acceptabele de risico's als gevolg van deze blootstelling zijn laag (lees acceptabel).

De verhouding in concentratie  $NO_2$  t.o.v.  $PM_{10}$ , uitgedrukt in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  bedraagt voor onze voorbeeldtunnels (hoofdstuk 7 en 8) ca. factor 20. Daarmee wordt wel duidelijk dat de  $NO_2$  concentratie veruit bepalend is voor het risico dat tunnelpassanten lopen bij hoge concentraties  $NO_2$ , bijvoorbeeld  $10.000-30.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Immers de hoeveelheid  $PM_{10}$  in de lucht is bij die concentratie een factor 20 lager en daarmee ver beneden de gestelde norm van  $5000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

### 3.3 Afschatting van het totaal maatschappelijk risico

Het tunnelventilatieconcept heeft tot doel de burgers die om de tunnelmond leven, te beschermen tegen hoge verkeersgerelateerde luchtverontreiniging. Dat geldt zowel voor tunnels als overkluisde weggedeelten, dus overal waar van geconcentreerde verkeersgerelateerde luchtverontreiniging sprake is.

Daarbij moet in het oog worden gehouden dat ook de burgers die gebruik maken van de tunnel beschermd worden tegen verkeersgerelateerde luchtverontreiniging.

De burgers die er wonen worden onvrijwillig aan verkeersgerelateerde luchtverontreiniging blootgesteld. De tunnelpassanten kiezen zelf voor het passeren van de tunnel en worden dus min of meer vrijwillig aan verkeersgerelateerde luchtverontreiniging blootgesteld.

Vanuit deze optiek heeft de bescherming van de burgers rond de tunnelmonden en langs drukke stads- en snelwegen prioriteit boven een vergelijkbaar beschermingsniveau van tunnelpassanten. Voor tunnels en op snelwegen zijn ook geen grenswaarden gesteld door de overheid.

De vraag doet zich nu voor of het terugbrengen van de concentraties verkeersgerelateerde luchtverontreiniging rond tunnelmonden tot (ver) onder de grenswaarde voor buitenlucht een ingreep in (verslechtering van) de kwaliteit van de lucht in de tunnels rechtvaardigt.

Naar verwachting zullen alle voertuigzittenden in gesloten cabines, tijdens de passage van de tunnel slechts in beperkte mate worden blootgesteld aan de hoge concentraties verkeersgerelateerde luchtverontreiniging die daar bij toepassing van een van beide tunnelventilatie concepten zouden heersen.

Voor cabrio bestuurders of motorrijders is de situatie beheersbaar; de jaargemiddelde blootstelling bij 2x daagse passage van de tunnel ( $26 \mu\text{g} NO_2/\text{m}^3$ ) is beperkt en vergelijkbaar met de gemiddelde blootstelling op snelwegen waar niveaus van rond  $60 \mu\text{g} NO_2/\text{m}^3$  heel normaal zijn.

Voor dichte voertuigen is de situatie beter en wordt nog beter indien ook het advies om ramen te sluiten bij tunnelpassage en de interne voertuigluchtcirculatie aan te zetten, wordt opgevolgd.

Mits nader onderzoek naar de effecten van zeer hoge concentraties verkeersgerelateerde luchtverontreiniging bij zeer kortdurende indirecte blootstelling aantoont, dat daar geen bovenmatig risico aan verbonden is, zou het toepassen van tunnelventilatie concepten die erop gericht zijn de tunnellucht te blokkeren, toelaatbaar geacht moeten kunnen worden. De risico's voor de tunnelpassanten wegen dan niet op tegen de risico's die omwonenden lopen als gevolg van aanleg van wegen en tunnels in de directe woonomgeving.

## 4 Risico's als gevolg van accumulatie van andere stoffen

### 4.1 Toxische eigenschappen van PM<sub>2,5</sub> en PM<sub>0,1</sub>

Hoewel veel nog onbekend is over de specifieke toxische eigenschappen van fijnstof, is het RIVM van mening dat er bewijs is dat zeer fijn stof per gram massa als toxischer gezien kan worden dan de grotere deeltjes.

Over de toxiciteit van de zeer kleine deeltjes is echter relatief weinig bekend. Zowel de fysische als chemische eigenschappen spelen een rol in de toxiciteit. Voor de goede orde, we spreken hier over de toxiciteit in de mens, en niet over potentiële toxiciteit zoals de buiten het lichaam is in (in vitro) testsystemen bepaald kan worden. Ook al zijn de stoffen die uit de uitlaat komen zeer toxisch, dan nog is het mogelijk dat ze door veranderingen in de lucht hun toxiciteit verliezen en op het moment dat ze worden ingeademd al veel van hun schadelijke potentie hebben verloren. De specifieke mechanismen die tot gezondheidseffecten leiden door fijnstof zijn nog maar beperkt begrepen. Oxidatieve stress, ontstekingsreacties, immunologische reactie en directe interacties met hersenen en hart zijn enkele voorbeelden waarvan bekend is dat die kunnen optreden na blootstelling aan veelal zeer hoge kortdurende blootstellingen. Kankerverwekkende eigenschappen lijken maar een beperkte rol te spelen, al laten die zich moeilijk adequaat onderzoeken in de mens.

*Bron: ref. 13*

### 4.2 Koolmonoxide (CO)

Koolmonoxide (CO) ontstaat bij onvolledige verbranding. Koolmonoxide kan de zuurstofvoorziening in het lichaam negatief beïnvloeden en daardoor bij hoge concentraties een risico vormen voor mensen met hart- en vaatziekten. Bij de huidige concentraties koolmonoxide in het verkeer zijn de gezondheidsrisico's gering. Er wordt niet nader ingegaan op de betreffende concentraties koolmonoxide.

*Bron: Ref. 3a*

Koolmonoxide ontstaat bij onvolledige verbranding. Het verkeer levert het grootste aandeel in de Nederlandse emissie. De concentraties in de buitenlucht dalen langzaam door emissiebeperkende maatregelen. Koolmonoxide kan de zuurstofvoorziening in het lichaam negatief beïnvloeden en daardoor bij hoge concentraties een risico vormen voor mensen met hart- en vaatziekten.

*Bron: Ref. 4*

Koolmonoxide reageert met hemoglobine in het bloed. Koolmonoxide vermindert hierdoor de transportcapaciteit van zuurstof in het bloed. Bij hoge niveaus van koolmonoxide in het bloed bestaat er een risico voor oudere mensen met hartklachten en zwangere vrouwen.

*Bron: Ref. 8a*

### 4.3 Benzeen (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)

Benzeen is een vluchtig bestanddeel van benzine en diesel. Benzeen heeft een giftige (toxische) werking op het bloed en bloedvormende weefsels en is ook kankerverwekkend: blootstelling kan leiden tot leukemie (bloedkanker). Bij de huidige concentraties van benzeen in de buitenlucht is de kans op kanker zeer klein.



Benzeen is een van de beruchtste VOS. Het is een vluchtig bestanddeel van benzine en diesel en kan leiden tot leukemie. Bij de huidige concentraties van benzeen in de buitenlucht is het risico op kanker zeer klein. VOS reageren onder invloed van zonlicht met onder andere stikstofoxiden. Daarbij komt het voor mens, plant en dier zeer schadelijke ozon (O<sub>3</sub>) vrij. Bij zonnig en windstil weer leidt dit tot smog.

*Bron: Ref. 5; 8a,*

Benzeen is een vluchtig bestanddeel van benzine en dieselbrandstoffen. Het wegverkeer vormt de belangrijkste bron. Sinds het begin van de jaren negentig daalt de benzeenconcentratie geleidelijk. Benzeen heeft een giftige (toxische) werking op het bloed en de bloedvormende weefsels. Benzeen is ook kankerverwekkend: blootstelling kan leiden tot leukemie (bloedkanker).

*Bron: Ref. 4*

#### 4.4 Zwaveldioxide (SO<sub>2</sub>) met daarin zwavelzuur

Zwaveldioxide veroorzaakt lokaal problemen na uitstoot, onder andere ademhalingsmoeilijkheden oogirritatie, longproblemen, en zelfs overlijden van mensen. Bij concentraties vanaf 7.800 µg/m<sup>3</sup>. (3 ppm) kan iemand al na 30 seconden overlijden. Zwaveldioxide kan ook de gewasgroei verminderen. Gewasschade zich kan vaak wel meer dan 80 km van de bron voordoen. De verspreiding is daarbij erg afhankelijk van de wind en van de hoogte van de bron. Korstmossen zijn erg gevoelig voor zwaveldioxide en de aan- of afwezigheid van bepaalde soorten kan daarom als biologische meetmethode voor de mate van luchtvervuiling worden gebruikt.

*(Bron: <http://www.lenntech.com/schadelijke-stoffen/zwaveldioxide.htm>)*

Buitenlandse bronnen (België en Duitsland) leveren de grootste bijdrage aan de huidige zwaveldioxideconcentraties. Zwaveldioxide hoort met stikstofoxiden en ammoniak tot de verzurende gassen, waaruit ook weer fijnstof kan ontstaan. De concentraties zijn tegenwoordig zo laag, dat directe gezondheidseffecten niet langer waarneembaar zijn.

*Bron: Ref. 4*

#### 4.5 Benzo(a)pyreen (BaP)

Benzo(a)pyreen (BaP) is de belangrijkste indicatorstof van de groep polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's). De stof komt vrij bij allerlei verbrandingsprocessen, vooral bij onvolledige verbranding. Van het gemotoriseerde verkeer zijn dieselmotoren een belangrijke bron. De concentratie benzo(a)pyreen is de laatste 10 jaar vrijwel gelijk gebleven. Veel PAK's zijn kankerverwekkende stoffen (longkanker), maar de kans op daadwerkelijk optreden van kanker door blootstelling aan PAK's is klein (roken uitgezonderd).

*Bron: Ref. 3a*

Benzo(a)pyreen is de belangrijkste indicatorstof van de groep PAK's. Het gemotoriseerde verkeer is belangrijkste bron. De concentratie benzo(a)pyreen is de laatste 10 jaar vrijwel gelijk gebleven. Gezondheidsrisico: veel PAK's zijn kankerverwekkende stoffen (vooral longkanker), maar de kans op daadwerkelijk optreden van kanker door blootstelling aan PAK is klein (uitgezonderd roken).

*Bron: Ref. 4*

#### 4.6 PAK's

PAK's staat voor polycyclische aromatische koolwaterstoffen. Zoals alle koolwaterstoffen

bestaan ze uit koolstof (C) en waterstof (H). PAK's zijn teerachtige stoffen die ontstaan bij onvolledige verbranding van koolstofhoudende stoffen zoals fossiele brandstoffen, hout, tabak en voedsel. De belangrijkste bronnen zijn de industrie, de consumenten (onder andere via openhaarden), het verkeer en de landbouw.

Er zijn honderden PAK's. De meeste PAK's zijn giftig en kankerverwekkend, al is de kans op kanker door blootstelling aan PAK's klein (roken uitgezonderd). PAK's zijn persistent: ze worden in de natuur slechts langzaam afgebroken. Ongeveer 90 procent van de PAK's ontstaat door menselijk handelen. Vooral bij de productie van cokes en aluminium komen PAK's vrij.

*Bron: Ref. 3a*

PAK's maken deel uit van 'fijnstof'. Er komen allerlei verschillende PAK's in de lucht voor, waarbij benzo(a)pyreen meestal wordt gezien als een van de meest kankerverwekkende. Gezondheidsevaluaties en normering richten zich dan ook meestal op benzo(a)pyreen. De meeste kennis over kankerverwekkendheid van PAK's voor mensen is afkomstig uit studies onder aan PAK's blootgestelde werknemers in bijvoorbeeld cokesfabrieken.

*Bron: Ref. 5*

#### 4.7 Lood (Pb)

In de lucht zijn de concentraties van alle zware metalen duidelijk aan het dalen. Met name de loodconcentratie is na de invoering van loodvrije benzine spectaculair afgenomen: meer dan 92% sinds 1984. De kans op mogelijke schadelijke effecten van lood, met name voor kinderen (effecten op het centraal zenuwstelsel en vermindering van intellectuele prestaties), is dan ook klein geworden.

*Bron: Ref. 3a*

De metalen zijn meestal gebonden aan stofdeeltjes. In de lucht zijn de concentraties van alle zware metalen duidelijk aan het dalen. Met name de loodconcentratie is sinds 1984 spectaculair afgenomen: meer dan 92%. De kans op mogelijke schadelijke effecten van lood, met name voor kinderen (effecten op centraal zenuwstelsel en vermindering van intellectuele prestaties), is dan ook klein geworden.

*Bron: Ref. 4*

#### 4.8 Slijtage banden en opwaaiend stof (veelvoud van bronnen van fijnstof)

Luchtverontreiniging bestaat uit gassen en deeltjes. Deeltjesvormige luchtverontreiniging bestaat uit grove deeltjes (grov stof) en fijne deeltjes (fijn stof). De deeltjes van fijn stof zijn zo klein dat zij tot in de kleine luchtwegen en longen kunnen doordringen.

Fijn stof als gevolg van verkeer wordt gevormd bij verbrandingsprocessen, bijvoorbeeld het roet van dieselloortuigen en door bandenslijtage en opwaaiend stof door het verkeer. Ook is er een aantal natuurlijke bronnen zoals zeezout. De deeltjes zijn zo klein dat zij blijven zweven in de lucht (meestal onzichtbaar voor het oog).

Luchtverontreiniging door fijn stof afkomstig van grote industriële en stedelijke gebieden kan zich over grote afstanden verplaatsen. Fijn stof in Nederland is daarom voor een groot deel afkomstig uit het buitenland. Op zijn beurt exporteert Nederland fijn stof naar andere landen. Van de vormen van luchtverontreiniging die zich in Nederland voordoen, geeft fijn stof de meeste effecten op de gezondheid. Het betreft vooral (verergering van) hart- en vaatziekten en longaandoeningen.

Over het exacte mechanisme waardoor fijn stof gezondheidseffecten kan veroorzaken, is nog niet heel veel bekend. Ook is nog lang niet alles bekend over de samenstelling van fijn stof en welke componenten welke gezondheidseffecten kunnen geven.

Wel is redelijk goed bekend hoeveel gezondheidseffecten te verwachten zijn bij een bepaald concentratieniveau van fijn stof.

Sinds de jaren 80 van de vorige eeuw is wereldwijd heel veel (epidemiologisch) onderzoek

gedaan bij de bevolking naar het verband tussen de gezondheid en de blootstelling aan fijnstof. Ook in Nederland is een aantal studies verricht. Het blijkt dat er geen veilige grenzen zijn aan de concentraties van fijnstof waar beneden geen effecten optreden. Al vanaf geringe niveaus zijn er gezondheidseffecten. De volgende effecten zijn gevonden in al deze onderzoeken:

- voortijdige sterfte aan hart- en vaatziekten en longaandoeningen. Het betreft vooral oudere mensen die deze ziekten al onder de leden hadden en ongeveer 1-2 jaar eerder zijn overleden als gevolg van de blootstelling aan fijnstof;
- extra opnamen in ziekenhuizen voor hart- en vaatziekten en longaandoeningen;
- verhoogd medicijngebruik voor deze aandoeningen;
- verergering van klachten bij mensen met astma en cara.

Bij deze effecten kan onderscheid worden gemaakt tussen acute effecten veroorzaakt door kortdurende (enkele dagen) verhoogde blootstelling zoals bij wintersmog, en laattijdige effecten als gevolg van langdurige blootstelling aan gemiddeld hogere concentraties. Kwetsbare groepen zijn kinderen met astmatische klachten, en volwassenen en ouderen met hart- en vaatziekten en longaandoeningen.

Het kan zinvol zijn om te proberen om de ernst van de gezondheidseffecten van fijn stof te vergelijken met andere oorzaken van ziekte en sterfte, zoals de gevolgen van verkeersongevallen en van roken. Daarbij moet er rekening mee worden gehouden dat elke oorzaak van ziekte en sterfte leidt tot naar aard en omvang verschillende soorten gezondheidseffecten.

Na weging van deze verschillen blijkt de totale luchtverontreiniging door fijn stof in Nederland (alle bronnen bij elkaar opgeteld) te leiden tot gezondheidseffecten die in dezelfde orde van grootte zijn als de gevolgen van verkeersongevallen, en ongeveer een tiende zijn van de gezondheidseffecten van roken.

Elke plaatselijke verhoging van de concentratie van fijn stof leidt in principe tot *extra* gezondheidseffecten. Deze extra gezondheidseffecten zijn dus naar rato vergelijkbaar met de gevolgen van de extra verkeersongevallen die zouden ontstaan door – theoretische - extra verkeersdrukke.

*Bron: Ref. 10*

## 4.9 Ozon

Ozon is een zeer reactieve stof die in de atmosfeer wordt gevormd onder invloed van zonlicht en hoge temperatuur. Belangrijk hierbij is aanwezigheid van NO<sub>2</sub> en koolwaterstoffen, die beide (onder andere) door het gemotoriseerd verkeer worden uitgestoten. Omdat ozon in de atmosfeer wordt gevormd, is de concentratie niet zelden het hoogst op enige afstand van gebieden met de meeste uitstoot van stikstofoxiden en koolwaterstoffen. Juist vanwege de grote reactiviteit is de concentratie van ozon nabij drukke verkeerswegen vaak wat lager dan op enige afstand: er zijn dicht bij de weg sterk verhoogde concentraties van met name NO waarmee het ozon reageert.

*Bron: Ref. 5*

Ozon is de belangrijkste component van smog in het zomerseizoen. Ozon wordt niet als zodanig uitgestoten, maar wordt gevormd onder invloed van zonlicht uit stikstofoxiden en koolwaterstoffen. De concentraties zijn het hoogst in de zomer. In de nacht is de concentratie het laagst en aan het einde van de middag het hoogst. Hoge concentraties ozon hebben vooral gezondheidseffecten op de longen: de longfunctie kan verminderen en mensen kunnen luchtwegklachten ondervinden.

*Bron: Ref. 4*

## 4.10 Samenvatting risico's van andere accumulerende stoffen

Van de eerder genoemde stoffen zijn de concentraties in tunnellucht niet bepaald omdat van de productie per km door voertuigen geen gegevens bekend zijn. Kwalitatief hebben

deze stoffen allemaal effecten bij hoge concentraties. In de buitenlucht hebben deze stoffen op dit moment een verwaarloosbaar risico. Hoe groot deze risico's zijn bij geconcentreerde verkeersgerelateerde luchtverontreiniging is niet duidelijk. Wel zullen hogere concentraties de risico's doen toenemen bij directe blootstelling.

Ook voor deze stoffen geldt dat directe blootstelling in tunnels vermeden moet worden. Voor zover deze stoffen in verkeersgerelateerde luchtverontreiniging aanwezig zijn, met name benzeen, benzo(a)pyreen, bandenslijpsel(=PM<sub>2,5</sub>) en CO, zullen die ook worden geconcentreerd in de tunnellucht.

Voor CO zijn berekeningen uitgevoerd omdat daarvan de productie redelijk bekend is. Daar wordt in hfdst. 7 en 8 nader op ingegaan.

Sporenstoffen als benzeen en benzo(a)pyreen komen ook in kleine hoeveelheden vrij. Benzeen komt met name vrij in benzinedamp, dus bij tankstations en als gevolg van lekkage van brandstof op de weg.

Benzo(a)pyreen is een component in de uitlaatgassen, met name van slecht afgestelde dieselmotoren. De jaargemiddelde streefwaarde voor benzo(a)pyreen van 1 ng/m<sup>3</sup> wordt uitgedrukt als het totale gehalte in de PM<sub>10</sub> fractie. Derhalve mag in 40 µg/m<sup>3</sup> PM<sub>10</sub> (jaargemiddelde grenswaarde buitenlucht) 0,001 µg BaP voorkomen, een gehalte van 1/40 promille. Omdat de concentraties PM<sub>10</sub> in geventileerde tunnels volgens de tunnelventilatieconcepten ongeveer op de blootstellingswaarde voor kortdurende blootstelling liggen (5000 µg/m<sup>3</sup> gedurende 5-10 minuten), ligt de BaP waarde dan op ca. 0,125 µg/m<sup>3</sup> of 125 ng/m<sup>3</sup>. Daarmee zal van benzo(a)pyreen vanwege de zeer kortdurende blootstelling in een tunnel, geen extra gevaar uitgaan.

## 5 Maximaal "aanvaardbare" concentraties bij zeer kortdurende blootstelling en hoge concentraties

Met het inschatten van de risico's van verkeersgerelateerde emissies in hoofdstuk 3 en 4 is nu de vraag aan de orde welke concentraties in een tunnel aanvaardbaar zouden kunnen zijn onder bepaalde omstandigheden. Daartoe wordt eerst een beeld geschetst van optredende concentraties op dit moment. Hierbij wordt NO<sub>2</sub> als gidsparameter gehanteerd. De PM<sub>10</sub>- en CO concentraties zijn daarbij niet kritisch.

### 5.1 Gemeten concentraties in tunnels

In de Leopold II stadstunnel met een lengte van 2,7 km in Brussel worden NO<sub>2</sub> concentraties gemeten van gemiddeld 350 µg/m<sup>3</sup> met uitschieters naar 600 µg/m<sup>3</sup>. De NO<sub>x</sub> concentraties liggen daar rond de 1000 µg/m<sup>3</sup> met uitschieters naar 1500 µg/m<sup>3</sup>.  
bron: IRCEL-BIM

In tunnels in het buitenland worden concentraties NO<sub>x</sub> gemeten van 1.000 tot 1.500 µg/m<sup>3</sup> zonder dat daarbij de lucht wordt behandeld. Alleen longitudinale ventilatie speelt daarbij een rol. Deze waarden liggen dus rond de grenswaarden die in 1991 door PIARC zijn voorgesteld.

Experimental Sites	Maximum in ppb	Maximum in µg/m <sup>3</sup>	Average Concentration in ppb
SÖDERLEDSTUNNEL (S)			
1st test 1993	273	513	103
2nd test 1996	256	481	80
TINGSTADSTUNNEL (S)	413	776	52
GNISTANGSTUNNEL (S)	708	1331	47
AMBROISE PARÉ TUNNEL (F)	181 (153) <sup>*)</sup> 452 (365)	340 850	63 81
SAINT-CLOUD TUNNEL (F)			
CROIX-ROUSSE TUNNEL (F)	590 (562)	1109	290
MONT-BLANC TUNNEL (F/I)	1280 (1070)	2406	500

Tabel 5.1 NO<sub>2</sub> concentration levels measured in a number of tunnels

<sup>\*)</sup>tussen haakjes het aantal uren/jaar waarin het maximum optreedt

Bron [http://publications.piarc.org/ressources/publications\\_files/2/909,05-09-e.pdf](http://publications.piarc.org/ressources/publications_files/2/909,05-09-e.pdf)

Bij tabel 5.1 kan de opmerking worden geplaatst dat de verblijftijd in met name de Mont Blanc tunnel vele malen langer is (deze tunnel is 11,6 km lang, bij 80 km /uur is de verblijftijd ca. 9 minuten) dan bij tunnels van 1000-1500 meter waar in Nederland sprake van is.

### 5.2 Berekende concentraties op snelwegen en rond tunnelmonden

Binnen een aantal luchtkwaliteitsonderzoeken zijn diverse situaties langs snelwegen en bij tunnelmonden doorgerekend.

Buiten de tunnelmond van de Zeeburgertunnel zijn concentraties berekend van 57,6 µg/m<sup>3</sup> NO<sub>2</sub> bij een verkeersintensiteit van 160.000 voertuigen /etmaal. Deze tunnel met 3 rijstroken is qua uur verkeersintensiteit vergelijkbaar met de modeltunnel waar met 3 rijstroken en 5000 voertuigen/uur. 80.000 voertuigen per etmaal in een richting verdeeld

over gemiddeld 13 uur. Dit levert gemiddeld zo'n 5300 voertuigen per uur in één richting op.

Voor de Schipholtunnel met 2x (2+4) rijstroken en een verkeerstintensiteit van 260.000 voertuigen per etmaal is op de middenberm een concentratie NO<sub>2</sub> berekend van ca. 80 µg/m<sup>3</sup>.

Op het nieuwe snelwegtracé van de A2 rond Eindhoven worden concentraties NO<sub>2</sub> op de rijweg berekend tot 60 µg/m<sup>3</sup>.

Duidelijk is dat de concentraties op de rijweg hoger zijn dan de grenswaarden die buiten het rijwegtracé gelden voor de luchtkwaliteit.

### 5.3 Maximale emissieconcentraties in een tunnel

De wijze waarop de maximale concentraties in een standaardtunnel dienen te worden berekend is in de literatuur aangegeven:

"In een tunnelbuis waarin het verkeer naar één kant rijdt wekt het verkeer een luchtstroming op in de rijrichting. De grootte van de luchtstroming is afhankelijk van de verkeersintensiteit en snelheid, maar ook van windinvloeden.

Terwijl de lucht door de tunnelbuis stroomt wordt er door het verkeer emissie aan toegevoegd. De concentratie aan het einde van de tunnel wordt bepaald door:

- lengte van de tunnel;
- luchtsnelheid door de tunnel (afhankelijk van verkeer en wind);
- verkeersemisatie (afhankelijk van verkeer).

NO<sub>2</sub> is als stofsoort bepalend en moet in ieder geval aan de grenswaarde voor die stofsoort voldoen. Door de internationale organisatie PIARC is de grenswaarde in 1991 op 1 ppm (ofwel 1880 microgram/m<sup>3</sup>) gesteld. Bij deze grenswaarde wordt ook altijd ruimschoots voldaan aan de grenswaarden voor koolmonoxide. Voor meer informatie over Piarc zie bijlage 3.

De werkelijk optredende concentratie NO<sub>2</sub> wordt berekend door de verkeersemisatie te delen door de volumestroom.

De verkeersemisatie wordt berekend op basis van de verkeersintensiteit- en samenstelling, de emissie per voertuigcategorie, de verkeerssnelheid en de langshelling. De optredende volumestroom is afhankelijk van de langssnelheid die wordt berekend op basis van de verkeersinvloed, de stromingsweerstand van de tunnel en de windinvloed op de tunnelportalen. Voor een uitgebreide behandeling van deze berekeningen wordt verwezen naar het Handboek Ventilatie van Autotunnels, in 1990 uitgegeven door het Kivi, thans in bewerking bij het Steunpunt Tunnelveiligheid Bouwdienst Rijkswaterstaat." *Bron: [http://www.rws.nl/rws/bwd/home/pdf/Syll\\_VOV\\_013a\\_Huijben.pdf](http://www.rws.nl/rws/bwd/home/pdf/Syll_VOV_013a_Huijben.pdf) (PAO cursus 2004 Tunnels voor wegverkeer)*

De maximale concentraties worden verder bepaald door het ventilatiesysteem dat in de tunnel wordt gehanteerd. Daarin wijken de concepten in dit onderzoek af van hetgeen de literatuur daarover zegt.

De in deze studie te onderzoeken ventilatieconcepten hebben beide tot doel de uitstroom van verontreinigde lucht uit de tunnel te beperken/blokken en tegelijk de geproduceerde luchtverontreiniging eruit te halen middels filters of andere behandelmethoden.

Uiteindelijk leidt dat tot een schone tunnelmond omgeving.  
Het concept kan ook op overkluisde stads- en snelwegen worden toegepast.

De maximale concentraties die met deze tunnelventilatieconcepten worden bereikt zijn hoog, hoger dan tot nu toe gebruikelijk is in tunnels. Deze worden in hoofdstuk 7 en 8 in detail besproken.

Het grote voordeel van deze hoge concentraties is de relatief goedkope behandeling van de tunnellucht en de beperkte debieten die daarbij moeten worden behandeld.

Nadeel is het grotere risico dat tunnelpassanten kunnen lopen wanneer zij met hun voertuig door de tunnel passeren. Inschatting van deze risico's is vooralsnog moeilijk omdat er geen gegevens bestaan over de effecten van (indirecte) blootstelling aan hoge concentraties gedurende enkele minuten.

Directe blootstelling aan deze hoge concentraties moet worden afgeraden.

Bij indirecte blootstelling is het effect echter niet nader te bepalen omdat het effect van de bescherming van de autocabine tegen de blootstelling aan de buiten het voertuig in de tunnel heersende hoge concentraties niet bekend is.

Gesteld kan worden dat de MAC waarde in dit concept geen relevante waarde is waarop maximum concentraties in tunnels moeten worden gebaseerd. MAC waarde gaat uit van dagelijks 8 uur directe blootstelling aan stoffen.

Als hypothese kan gelden dat indien de bescherming van de cabine een factor 20 bedraagt, de door Priac gehanteerde grenswaarde van  $1.880 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$  (1 ppm), de grenswaarde voor niet te voet toegankelijke tunnels op  $40.000 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$  zou kunnen liggen.

#### 5.4 Waarborgen voor de veiligheid van tunnelpassanten

Om de veiligheid van tunnelpassanten te waarborgen zal een veiligheidssysteem erop moeten toezien dat bij filevorming en/of verkeersongevallen in de tunnel, het ventilatiesysteem direct op doorventileren wordt geschakeld. Daarmee worden de aanwezige hoge concentraties direct verlaagd naar normale in tunnels heersende concentraties.

Bij de Westerschelde oeververbinding (met ca. 7 km de langste tunnel in Nederland) wordt bij een verkeerssnelheid lager dan 15 km per uur het ventilatiesysteem automatisch gestart en brengt dit systeem de verkeersgerelateerde luchtverontreiniging snel naar de uitgang van de tunnel.

In geval van brand en rookontwikkeling zal het ventilatiesysteem ook snel op een calamiteitenstand moeten overschakelen om de rook zo snel mogelijk uit de tunnel te verwijderen en een rookvrije ontsnapping van tunnelpassanten te waarborgen. Met de afvoer van de rook worden dan tegelijk de hoge concentraties luchtverontreiniging afgevoerd.

In tegenstelling tot een standaard geventileerde tunnel waar alleen calamiteiten als brand een rol spelen zal bij een geforceerd tunnelventilatieconcept, gericht op het in de tunnel houden van verontreinigend stoffen, veel vaker een beroep op de calamiteiten situatie wordt gedaan, namelijk bij filevorming en ongevallen zonder brand omdat dan de verblijftijd en dus de (indirecte) blootstelling aan de verontreinigde tunnellucht te groot wordt en daarmee de gezondheidsrisico's te groot worden. Dit vereist meer inzet van meet- en controlesystemen en verhoogde paraatheid van de wegbeheerder. Mogelijk zal dat ook kostenverhogend kunnen werken hoewel er geen ploegen hoeven uit te rukken om assistentie in de tunnel te verlenen.



## 6 Discussie

### 6.1 Discussie 1: Schijnbare tegenstelling in grenswaarden, alarmdrempels en blootstellingsnormen voor stikstofdioxide bij kortdurende blootstelling

Er is schijnbare tegenstelling in grenswaarden, alarmdrempels en blootstellingsnormen voor stikstofdioxide bij kortdurende blootstelling:

- Als  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  als uurgemiddelde grenswaarde geldt die 18x/jr mag worden overschreden (par. 2.2, Wm voorschrift 2.1)
- en  $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$  als uurgemiddelde (alarmdrempel) bij 3 achtereenvolgende uren geldt (par.2.2, Wm voorschrift 2.4)

dan lijkt  $750 \mu\text{g}/\text{m}^3$  voor 5-10 minuten blootstelling (par. 2.1) daarmee niet in lijn te zijn.

Als we de lijn van een uurgemiddelde maximum van  $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$  gedurende 3 uur doorzetten zou  $1200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  als uurgemiddelde gedurende 1 uur blootstelling nog tot dezelfde absolute blootstelling leiden (het principe van TWA, time weight average). Het effect daarvan zou echter anders kunnen zijn dan bij  $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$  gedurende 3 uur. Zie hoofdstuk 3 waarin de proeven met proefpersonen in stadstunnels worden gememoreerd. De verwachting is dat 1 uur blootstelling aan  $1200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  andere (ernstiger) effecten oplevert dan 3 uur aan  $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Een 1 op 1 doorvertaling van lage concentraties gedurende lange tijd naar hoge concentraties gedurende veel kortere tijd is derhalve niet in lijn met de te verwachten effecten.

#### Minuten blootstelling

De vraag is of en zo ja in welke mate hoge zeer kortstondige (ordegrootte minuten) blootstellingen schadelijk kunnen zijn voor de gezondheid.

Ten aanzien van zeer kortdurende blootstelling in ordegrootte van minuten, is nader onderzoek gedaan door TNO waarbij met name gekeken is naar laboratoriumonderzoeken in deze. Gebleken is dat over korte duur blootstellingen van enkele minuten aan concentraties die zeer hoog zijn in ordegrootte van  $10.000\text{-}30.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $10\text{-}30 \text{mg}/\text{m}^3$ ) geen gegevens bestaan (zie par. 2.2). Extrapolatie van lagere concentraties gedurende langere tijd naar hoge concentraties gedurende extreem korte tijd zijn echter niet zonder meer toegestaan omdat de effecten van zeer kortstondige blootstelling aan zeer hoge concentraties niet bekend zijn.

### 6.2 Discussie 2: Relatie tussen concentraties CO en NO<sub>2</sub>

De grenswaarde voor NO<sub>2</sub> die PIARC in 1991 heeft vastgesteld is  $1880 \mu\text{g}/\text{m}^3$  gedurende 1-2 minuten. Dit is gebaseerd op de uitstoot van de op dat moment rondrijdende voertuigen. Inmiddels voldoen veel voertuigen al aan de Euro IV of V normen en zijn deze op NO<sub>2</sub> emissie aanzienlijk schoner. Of bij die grenswaarde op dit moment nog wordt voldaan aan de emissiegrenswaarde van CO is niet duidelijk. Wel is duidelijk dat de gemiddelde uitstoot van CO in g/km ruim een factor 30 hoger ligt dan die van NO<sub>2</sub>. Voor personenauto's is de uitstoot  $4,45 \text{g CO}/\text{km}$  in de stad tegen een emissie van  $0,130 \text{g NO}_2/\text{km}$ ; (bron emissiefactoren VROM)

De maximum 8 uur gemiddelde waarde voor CO ligt op  $10.000 \text{microgram}/\text{m}^3$  (EU grenswaarde voor het hoogste voortschrijdend 8-uurgemiddelde). De MAC waarden ligt



op  $28.750 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Daarom is een overschrijding daarvan op enig moment in een tunnel waarschijnlijk binnen te stellen grenswaarden voor  $\text{NO}_2$  van bijvoorbeeld  $1880 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . (de CO-waarde ligt in dat geval rond  $55.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

De aangenomen maximum waarde voor CO in een tunnel bij normaal verkeer (Westerschelde oeververbinding) blijkt uit bovenstaande niet de maatgevende beperkende factor zijn.

Voor blootstelling bij normaal wegverkeer in een tunnel is voor CO  $345.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (300 ppm) als maximum waarde aangegeven. (ref.6, zie hfdst 2.4).

Met de productiecijfers van  $\text{NO}_2$  voor personenauto's zou daarbij een corresponderende  $\text{NO}_2$  concentratie optreden van ca.  $10.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $10 \text{ mg}/\text{m}^3$ ). Dit zou betekenen dat in de Westerscheldetunnel bij intensief en langzaam verkeer (bv  $20 \text{ km}/\text{uur}$  tijdens vakantieperioden) geen alarmering zou volgen totdat de  $\text{NO}_2$  concentratie aan het uiteinde tot  $10.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  zou zijn opgelopen. Deze tunnel heeft immers geen continue langsventilatie en de concentraties kunnen bij voldoende verkeersaanbod en lange verblijftijden van het verkeer in de tunnel snel oplopen.

In Sydney wordt een maximum van  $87.000 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{CO}$  gehanteerd voor de dimensionering van tunnelventilatie (zie hfdst 5.1). Daar is geen norm gesteld voor  $\text{NO}_2$ . Als de productie van  $\text{NO}_2$  een factor 30 lager is dan die van CO, zou een niveau van  $2.500 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$  in Sydney worden bereikt in de tunnel.

In tegenstelling tot verschillende bronnen lijkt de concentratie koolmonoxide (CO) toch van belang mede omdat er een bepaalde verhouding bestaat tussen de CO concentratie en de  $\text{NO}_2$  (en  $\text{PM}_{10}$ ) concentratie.

Het in deze studie betrokken tunnelventilatiesysteem zorgt ervoor dat stofconcentraties hoog oplopen. In normale situaties is het CO-gehalte niet van belang, maar door dit tunnelventilatie systeem is het wel belangrijk om te weten wat de maximaal aanvaardbare concentratie en blootstelling aan CO is. De berekeningsresultaten van de te verwachten concentraties in tunnels bij toe te passen ventilatiesystemen kunnen worden getoetst aan de in dit rapport opgenomen grenswaarden voor CO.

Voor de verdere ontwikkeling van het tunnelventilatieconcept is een toetsingscriterium voor CO noodzakelijk. Daarbij zou een grenswaarde voor tunnels van  $300.000$ - $450.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  kunnen worden gehanteerd conform ref.6. Voor  $\text{NO}_2$  zou dan een grenswaarde van  $10.000$ - $15.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  kunnen gelden voor kortstondige blootstelling van 1-2 minuten. De grenswaarde voor  $\text{PM}_{10}$  voor kortdurende blootstelling in een tunnel ligt op  $5000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (bron ref.6) De  $\text{PM}_{10}$  waarde ligt globaal een factor 15 lager dan  $\text{NO}_2$ .  $\text{PM}_{10}$  is daardoor bij een  $\text{NO}_2$  grenswaarde van  $10.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  geen kritische factor omdat  $\text{PM}_{10}$  in dat geval op ca.  $700$ - $1.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  uitkomt.

### 6.3 Discussie 3: Risico's voor weggebruikers bij tunnelpassage

Welke risico's lopen weggebruikers werkelijk bij een tunnelpassage waarbij hoge concentraties buiten het voertuig aanwezig zijn?

Uit de gegevens met betrekking tot blootstelling aan  $\text{NO}_2$  en  $\text{PM}_{10}$  blijkt dat directe blootstelling aan concentraties boven de PIARC norm schadelijk kunnen zijn. Daarom zal bij langdurige aanwezigheid in een tunnel bij file of ongeval, het ventilatiesysteem direct moeten overschakelen naar maximale doorstroming naar buiten. PIARC heeft voor zowel  $\text{NO}_2$  als  $\text{PM}_{10}$  normen opgesteld:  $1880$  resp.  $5000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Voor de  $\text{PM}_{10}$  geldt dat nanodeeltjes in de tunnel de neiging zullen hebben om te gaan

agglomereren bij verhoging van de concentratie. Het tunnelventilatieconcept heeft dus een gunstige werking op de aanwezigheid van nanodeeltjes in de buitenlucht rond tunnelmonden.

Voor bestuurders van cabrio's en motoren is directe blootstelling in een tunnel onvermijdelijk. Met de in par 6.2 voorgestelde grenswaarden voor CO, NO<sub>2</sub> en PM<sub>10</sub> is het risico bij kortdurende blootstelling echter beperkt. Een weggebruiker die in een gesloten cabine door een tunnel rijdt, zal slechts zeer beperkt last hebben van hoge concentraties die buiten het voertuig in de tunnel aanwezig kunnen zijn. Voor die weggebruiker is het risico nog aanzienlijk lager. De luchtverversing in een voertuigcabine is van dien aard dat in de periode van tunnelpassage, gewoonlijk slechts 1-2 minuten, slechts een klein gedeelte van de cabine-inhoud wordt verversd met buitenlucht. Tijdens passage door een tunnel met hoge concentraties verkeersgerelateerde luchtverontreiniging zal de kwaliteit van de cabinelucht tijdelijk verslechteren. Dit probleem kan worden beperkt door de airco op interne circulatie te schakelen. Omdat tegenwoordig vrijwel alle voertuigen over dit systeem beschikken zal een tunnelpassage voor het overgrote deel van de voertuigen geen probleem op hoeven te leveren. Bij voertuigen die geen airco bezitten kan het uitschakelen van het voertuigventilatiesysteem bij passage door de tunnel en het gesloten houden van de ramen voorkomen dat lucht van buiten in het voertuig terecht komt. Door deze maatregelen is het risico bij passage door een tunnel met hoge concentraties verkeersgerelateerde luchtverontreiniging verwaarloosbaar.

De vraag blijft echter wel of het maatschappelijk aanvaardbaar is dat een automobilist bij passage door een tunnel deze maatregelen bewust moet nemen om gevrijwaard te blijven van blootstelling aan hoge concentraties verkeersgerelateerde luchtverontreiniging.

#### **6.4 Discussie 4: Keuze van luchtbehandelingsdebieten bij tunnelventilatie**

Er zal een afweging moeten plaatsvinden tussen de positieve effecten die optreden bij de tunnelmond en de consequenties die dat heeft voor de concentraties in de tunnel zelf.

Het beoogde tunnelventilatie concept heeft tot doel de lucht in de tunnel te houden en daardoor te voorkomen dat in de omgeving van de tunnelmond grenswaarden voor verkeersgerelateerde luchtverontreiniging worden overschreden. Met het opsluiten van de lucht in de tunnel nemen de concentraties verkeersgerelateerde luchtverontreiniging in de tunnel daarentegen toe.

Door het variëren van het luchtbehandelingsdebiet van deze tunnellucht kunnen de concentraties in de tunnel worden gestuurd. Relatief lage debieten door de luchtbehandeling leiden tot hoge concentraties in de tunnel maar tevens tot efficiënte en relatief goedkope luchtbehandeling. Hoge debieten door de luchtbehandeling beperken de concentraties in de tunnel maar maken de luchtbehandeling zeer kostbaar.

## 7 Berekening van de concentraties van stoffen in een tunnel bij het C<sup>2</sup>O tunnelventilatie concept

Voor het berekenen van de optredende concentraties in de tunnel bij het hanteren van het C<sup>2</sup>O tegenstroom ventilatiesysteem kan op twee manieren het effect zichtbaar worden gemaakt. De eenvoudige methode rekent direct concentraties door op basis van verblijftijd van auto's (productie van luchtverontreinigende stoffen) in de tunnel en de tunnelinhoud.

De tweede methode modelleert de tunnel en rekent dynamisch de situatie met continue emissies door. Daarbij wordt rekening gehouden met een onttrekkingsdebiet door een behandelstelsel.

### 7.1 Eenvoudige berekeningsmethode voor het C<sup>2</sup>O systeem

De eenvoudige berekening van concentraties bij het C<sup>2</sup>O systeem is gebaseerd op een situatie waarbij de lucht min of meer tot stilstand komt door tegenventilatie in de tunnel waarbij de netto luchtstroming door de tunnel ongeveer nul is.

De eenvoudige benadering om concentraties te berekenen is gebaseerd op de gemiddelde productie in de tunnel gedeeld door de tunnelinhoud.

Er wordt uitgegaan van 5000 auto's verdeeld naar licht, middelzwaar en zwaar in de verhouding 80-5-15. Deze voertuigen kennen een bepaalde uitstoot per km, vastgelegd in de standaardwaarden die RIVM hanteert. Hieruit volgt na 1 uur in een 1 km lange tunnel met een inhoud van 50.000 m<sup>3</sup> de productie aan verontreinigende stoffen welke in onderstaande tabel 7.1 is weergegeven.

Kentallen Min VROM 2009		Emissies per voertuig			
		g /km/	g/km	g/km	
		CO	NOx	PM	
<b>snelweg</b>					
	licht	2,06	0,235	0,036	
	middelzwaar	1,28	4,29	0,179	
	zwaar	0,79	4,57	0,161	
<b>stadsweg</b>					
	licht	4,45	0,471	0,065	
	middelzwaar	2,21	8,85	0,38	
	zwaar	1,24	9,02	0,307	
<b>Berekeningen voor een tunneltrace van 1 km</b>					
	<b>Percentages</b>		<b>Aantal voertuigen /uur</b>	<b>Emissie per uur</b>	
				<b>CO</b>	<b>NO<sub>x</sub></b>
				<b>in g/h</b>	<b>in g/h</b>
	<b>snelweg</b>		5000		
	licht	80%	4000	8240	940
	middelzwaar	15%	750	960	3218
	zwaar	5%	250	198	1143
				<b>9398</b>	<b>5300</b>
	<b>stadsweg</b>		5000		
	licht	80%	4000	17800	1884
	middelzwaar	15%	750	1658	6638
	zwaar	5%	250	310	2255
				<b>19768</b>	<b>10777</b>
					<b>622</b>

Tabel 7.1 Emissies in g/km en g/h bij 5000 voertuigen/uur (bron RIVM)

Bij een ventilatie-debiet van 50.000 m<sup>3</sup>/h kan vervolgens de gemiddelde concentratie worden berekend.

De gemiddelde concentratie voor een snelwegtunnel (80 km/h) van 1 km lengte wordt:

CO: 9398/50000 = 187.000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ;  
NO<sub>x</sub>: 5300/50000 = 106.000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ;  
PM<sub>10</sub>: 319/50000 = 6.380  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Voor een 1 km lange stadstunnel (50 km/h) volgt op dezelfde manier:

CO: 19768/50000 = 395.400  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ;  
NO<sub>x</sub>: 10777/50000 = 215.500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ;  
PM<sub>10</sub>: 622/50000 = 12.400  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Merk op dat rondpompen en filteren deze waarden nog iets beïnvloeden. Bovendien zal altijd sprake zijn van een zekere lek aan de tunnelmonden. Daardoor daalt de concentratie nog wat.

Grofweg komen bovenstaande waarden wel overeen met de gevonden waarden in de CFD berekeningen. Alle genoemde concentraties in de CFD plaatjes (hfdst 6.2) zijn in  $\text{g}/\text{m}^3$  c.q.  $\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot 10^{-6}$ .

Voor tunnallengten van 500 m en 1500 m werkt de berekening op een zelfde manier, waarbij de productie wordt gedeeld door 2 of vermenigvuldigd met 1,5.

## 7.2 Dynamische berekening van het C<sup>2</sup>O systeem met CFD

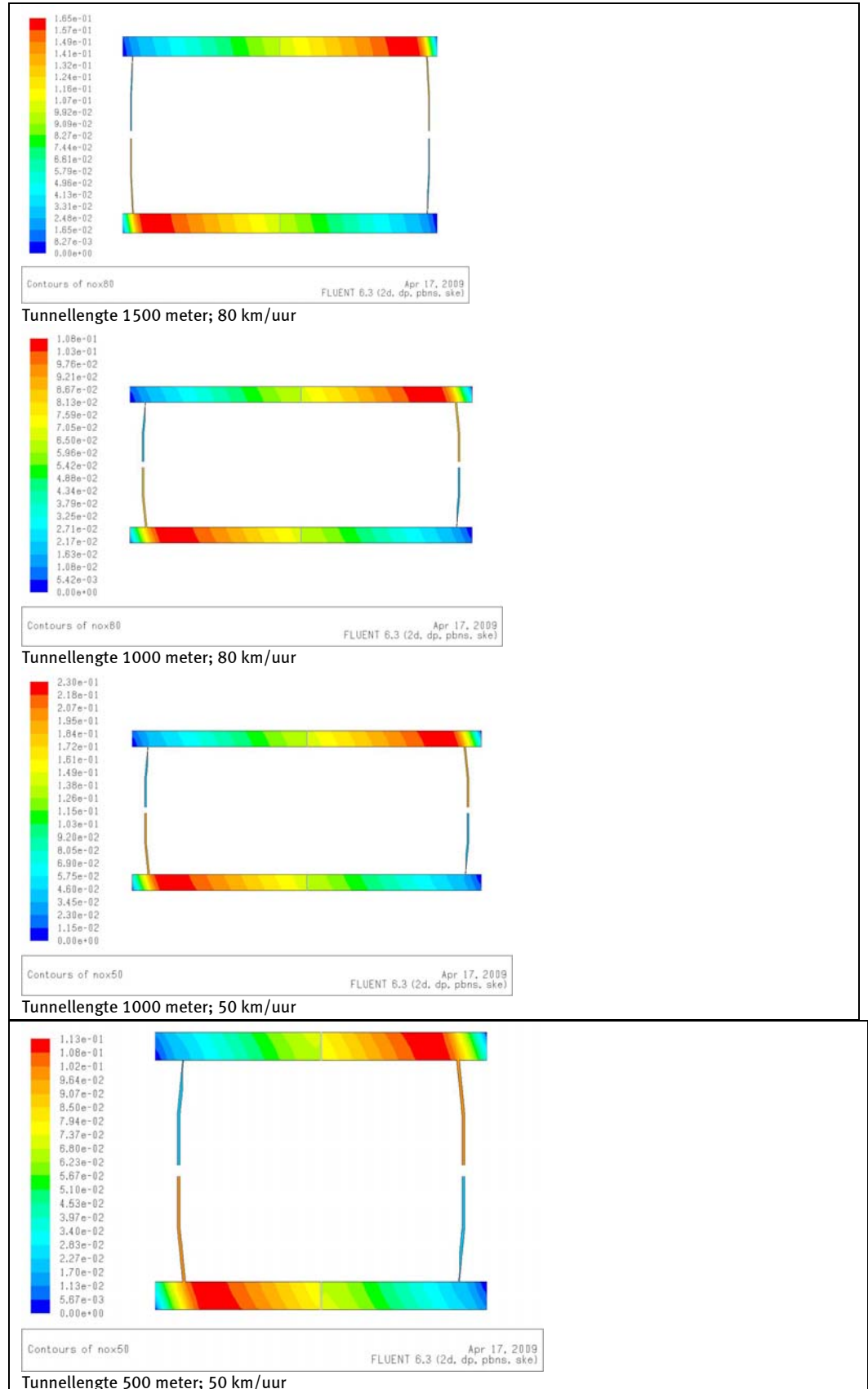
De efficiency van het C<sup>2</sup>O systeem blijkt uit de volgende overzichten op basis van de productie die in bovenstaande tabel is aangegeven.

Bij een tegenstroomdebiet van 50.000 m<sup>3</sup>/uur met rondpompen over een behandelstelsel met een rendement van 80% (zowel op PM<sub>10</sub> als NO<sub>x</sub> en CO), blijkt dat er aan de ingang nog een aanzienlijke hoeveelheid naar buiten verdwijnt. Dit heeft te maken met de wijze van modelleren en kan in de praktijk worden gereduceerd door optimalisatie van het model en de positie van het afzuigpunt.

	500m tunnel (+50m extra aan beide portalen); 50km/h	1000m tunnel (+50m extra aan beide portalen); 50km/h	1000m tunnel (+50m extra aan beide portalen); 80km/h	1500m tunnel (+50m extra aan beide portalen); 80km/h
PRODUCTIE	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
FILTER	60.71%	64.32%	58.56%	59.96%
TUNNELUITGANG	12.04%	8.65%	9.58%	8.03%
TUNNELINGANG	27.05%	26.94%	31.77%	31.93%

Tabel 7.2 Overzicht van de efficiëntie van het C<sup>2</sup>O ventilatie systeem

Bij deze productie van verontreinigingen horen concentratieplaatjes die het concentratieverloop over de lengte van de tunnel weergeven. De voertuigen rijden in de onderste tunnelbuis van links naar rechts, in de bovenste van rechts naar links. Weergegeven zijn de plaatjes voor NO<sub>x</sub>. In de bijlage 4 zijn ook voor PM<sub>10</sub> en CO de berekeningsresultaten toegevoegd.



Figuur 7.1 Plaatjes van concentratieverdelingen van NO<sub>x</sub> in g/m<sup>3</sup> bij verschillende tunnellenlengtes en rijsnelheden; tegenstroom en afzuiging van 50.000 m<sup>3</sup>/uur;

Zoals de plaatjes laten zien concentreert de verontreiniging zich nabij de tunnelmond aan de ingangszijde van de tunnel en wordt daar afgezogen om te worden behandeld. Door optimalisatie kan de afzuiging in het rode gedeelte plaatsvinden en neemt de efficiency daarmee toe. De concentraties kunnen omlaag worden gebracht door het onttrekkingsdebiet te verhogen. Dat zal ook de efficiëntie van het systeem verder verhogen. Deze optimalisatieslagen zijn in het beperkte kader van deze studie niet uitgevoerd.

Het principe van tegenstroomventilatie en het effect is wel duidelijk waarneembaar. In bijlage 4 worden alle berekende concentraties in de tunnelbuizen voor de verschillende tunnelconfiguraties grafisch weergegeven.

De concentraties lopen aanzienlijk op bij tegenstroomventilatie met en beperkt afzuigdedebiet van 50.000 m<sup>3</sup>/h. Tabel 7.3 laat zien welke minimum en maximum waarden dan optreden in een tunnelbuis. De afstand waarover deze maximale concentraties heersen zijn echter beperkt tot ca. 100 meter (bij een tunnellenge van 1000 meter) waardoor de blootstelling daaraan slechts ordegrrootte van seconden bedraagt.

Tunnelomgeving	CO max in µg/m <sup>3</sup>	CO min µg/m <sup>3</sup>	NO <sub>2</sub> max µg/m <sup>3</sup>	NO <sub>2</sub> min µg/m <sup>3</sup>	PM <sub>10</sub> max µg/m <sup>3</sup>	PM <sub>10</sub> min µg/m <sup>3</sup>
lengte 1500 v=80	294.000	44.000	165000	24.800	9.960	1,490
lengte 1000 v=80	192.000	28.900	108.000	21.700	6.530	0980
<i>lengte 1000 *) v=50</i>	<i>422.000</i>	<i>63.300</i>	<i>230.000</i>	<i>34.500</i>	<i>13.300</i>	<i>2.000</i>
lengte 500 v=50	208.000	41.600	113.000	22.700	6.560	1.300

\*) de cursief gedrukte regel geeft de meest kritische situatie weer, met de hoogste waarden

Tabel 7.3 Overzicht van te verwachten max. en min. concentraties in de tunnel bij tegenstroom met 50.000 m<sup>3</sup>/uur afzuiging. (zie bijlage 5)

De NO<sub>2</sub> waarden liggen ver boven de tot nu toe gehanteerde grenswaarde van 1880 µg/m<sup>3</sup> voor een tunnel. De PM<sub>10</sub> waarden liggen in ordegrrootte van de blootstellingslimiet van 5.000 µg/m<sup>3</sup> voor blootstelling gedurende 5-10 minuten (zie hfdst. 2.3).

De lengte van een tunnelsectie met max. en min. concentraties varieert met de lengte van de tunnel en bedraagt bij een 50 meter tunnel ca. 25 meter en een 1500 meter tunnel ca. 75 meter. De concentraties lopen lineair af met de lengte van de tunnel van maximaal naar minimale concentraties.

Uit het overzicht blijkt dat door tegenstroom ook bij de uitgang nog concentratieverhogingen optreden, echter een factor 50-100 lager dan de hoogste concentraties die op het punt van afzuiging optreden. Dit als gevolg van lek doordat de luchtstroom niet volledig wordt afgezogen aan de bovenzijde van de tunnel en deze lekstroom wel de hoogste concentraties stoffen bevat.

Door een andere configuratie van de afzuiging kan dit lekverlies in een optimalisatieslag nog worden beperkt tot ca. 10 %.

Daarnaast is het berekend effect bij korte tunnels anders dan bij lange tunnels. Het effect van de 50 meter tunnelbuis voor de afzuiging is bij een korte tunnel sterker dan bij 50 meter bij een lange tunnel. Wil sprake zijn van dezelfde effectiviteit dan zou bij een 1500 meter lange tunnel een buislengte van 150 meter voor het afzuigpunt moeten worden gehanteerd.

### 7.3 Berekeningen van ventilatiedebieten voor een 1000 meter, 80 km/uur tunnel

Bij het gekozen ventilatiedebiet van 50.000 m<sup>3</sup>/uur ontstaan aanzienlijke concentraties CO, NO<sub>2</sub> en PM<sub>10</sub> in de tunnelbuis, weliswaar over korte afstanden.

Uitgaande van een te hanteren maximum concentratie is voor NO<sub>2</sub> als gidsparameter uitgerekend wat het ventilatievoud wordt. Vooralsnog worden de maxima gesteld op 5.000, 10.000 en 30.000 µg/m<sup>3</sup> NO<sub>2</sub>, als te hanteren gemiddelde maximumwaarde in de tunnel. Voor de volledigheid is ook het effect bij C<sub>max</sub> van 50.000 en 80.000 µg/m<sup>3</sup> weergegeven in cursief.

C <sub>max</sub> in µg NO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	debiet over filter <sup>*)</sup> in m <sup>3</sup> /uur	lekverlies in % debiet	V gem. in m/sec <sup>**)</sup>	lekverlies in % vracht
5.000	1.325.000	0	-7,4	0
5.000	799.000	29,5	-4,4	40
10.000	662.000	0	-3,7	0
10.000	482.500	10	-2,68	27,2
10.000	398.000	14,7	-2,2	40
30.000	221.000	0	-1,2	0
30.000	160.000	3,4	-0,88	27,2
30.000	130.000	4,9	-0,7	40
<i>50.000</i>	<i>96.500</i>	<i>2</i>	<i>-0,54</i>	<i>27,2</i>
<i>80.000</i>	<i>82.813</i>	<i>0</i>	<i>-0,46</i>	<i>0</i>
<i>80.000</i>	<i>62.113</i>	<i>1,25</i>	<i>-0,33</i>	<i>27,2</i>
<i>80.000</i>	<i>49.000</i>	<i>1,8</i>	<i>-0,27</i>	<i>40</i>

<sup>\*)</sup> filterefficiëntie =80%; lekverlies over ingang en uitgang zoals uit tabel 7.2 blijkt.

<sup>\*\*)</sup> negatieve snelheid betekent dat de lucht tegen de rijrichting in stroomt.

Tabel 7.4 Ventilatiedebieten bij beperking van c<sub>max</sub>

De berekeningen in tabel 7.4 zijn gebaseerd op een eenvoudig massabalans model. De uitkomsten zijn in lijn met de 2D computersimulatie, uitgaande van ca. 40% lekverlies over ingang en uitgang. Bij een gemiddelde aangenomen max. concentratie van 80.000 µg/m<sup>3</sup> is ca. 50.000 m<sup>3</sup> filterdebiet nodig. Dit correspondeert met het model van een 1000 meter tunnel met 80 km/uur met een gemiddelde concentratie van ca. 65.000 µg/m<sup>3</sup> (max. 108.000 µg/m<sup>3</sup>, min. 21.700 µg/m<sup>3</sup> in tabel 7.3).

De verblijftijden in de tunnel bij normaal doorstromend verkeer zijn:

lengte tunnel in m.	snelheid in km/uur	verblijftijd in sec.
500	50	36
<i>1000*)</i>	<i>50</i>	<i>72</i>
1000	80	45
1500	80	67,5

<sup>\*)</sup> de meest kritische tunnallengte/snelheidscombinatie

Tabel 7.5 Verblijftijden in de tunnel bij bepaalde snelheid

Voor een tunnel van 1000 meter en lage snelheid is de verblijftijd het langst en is bij gelijkblijvend onttrekkingsregime de concentratie stoffen het hoogst (zie tabel 7.3). Dit is dus de meest kritische situatie.

Het energieverbruik is bij een tegenstroom met een snelheid van 0,7 m/s (C<sub>max</sub> =30.000 µg/m<sup>3</sup>; lekverlies 40%) het laagst. Zodra de concentratie c<sub>max</sub> wordt verlaagd naar 5.000 µg/m<sup>3</sup>, stijgt het energieverbruik aanzienlijk door de snelheid van -4,4 m/s die moet worden opgewekt met het tegenstrooms langs-ventilatievermogen in de tunnel.

Aangezien het energiegebruik toeneemt met de derde macht van de snelheid is er bij het C<sup>2</sup>O concept alles aangelegd om:



- de snelheid van de auto's in de tunnel te beperken tot 50 km/h (luchtsnelheid 5 m/s) en;
- de snelheid van de tunnellucht op -0,1 tot -0,5 m/s te beperken (een minimale tegenstroomse snelheid is nodig om te kunnen afzuigen en filteren aan de ingangszijde van de tunnelmond).

Zou de meestroomse snelheid van ca. + 0,1 tot 0,5 m/s zijn (ook opgewekt met tegenstroom ventileren) dan moet de afzuiging aan de uitgangszijde plaatsvinden en praten we over een structureel ander systeem. Dit zou nog een optimalisatieslag voor het C<sup>2</sup>O systeem kunnen betekenen omdat daarmee de energiebehoefte voor het tegenstrooms ventileren beperkt wordt.

#### 7.4 Varianten in filterrendement en debiet

Bij een aangenomen  $C_{max}$  kan het zuiveringsdebiet omlaag indien het rendement van de zuivering omhoog gaat. Aangenomen was een rendement van 80% op verwijdering van NO<sub>2</sub> en PM<sub>10</sub>.

In de volgende tabel wordt daarvan voor een tunnel van 1000 meter en een verkeerssnelheid van 80 km/uur en aantal voorbeelden gegeven.

C2O concept C max in µg/m3 NO2	debiet over filter in m3/h			V gem in m/sec			lekverlies	
	80% rend.	95% rend.	98% rend.	80% rend.	95% rend.	98% rend.	% vracht	% debiet
5.000	1.325.000	1.116.000	1.081.500	-7,4	-6,1	-6,0	0	0
5.000	965.000	812.500	788.000	-5,3	-4,5	-4,3	27,2	20
5.000	794.000	668.500	648.000	-4,4	-3,7	-3,6	40	29,5
10.000	662.000	558.000	541.000	-3,7	-3,1	-3,0	0	0
10.000	482.500	406.000	394.000	-2,7	-2,2	-2,1	27,2	10
10.000	398.000	335.000	325.000	-2,2	-1,9	-1,8	40	14,7
30.000	221.000	186.000	180.000	-1,2	-1,0	-1,0	0	0
30.000	161.000	136.000	132.000	-0,9	-0,8	-0,7	27,2	3,3
30.000	130.000	112.000	108.000	-0,7	-0,6	-0,6	40	4,9

Tabel 7.6 Varianten in filterrendement en filterdebieten

Tabel 7.6 laat zien dat bij een verhoogd filterrendement het benodigde debiet en daarmee de hoeveelheid energie om de ventilatiestroom op te wekken, afneemt. Hier is alleen voor NO<sub>2</sub> de berekening uitgevoerd. Voor PM<sub>10</sub> en CO zijn vergelijkbare berekeningen mogelijk.



## 8 Berekeningen van de concentraties van stoffen in een tunnel bij het HD tunnelventilatie concept

De berekeningen aan het HD meestroomventilatiesysteem zijn gebaseerd op de systematiek die UC Technologies heeft ontwikkeld. Bij dit systeem wordt aan het eind van de tunnelbuis de lucht met behulp van een soort luchtmes gedwongen om af te buigen naar boven waar het in een vergrote afzuigruimte wordt afgezogen en in de andere tunnelbuis weer wordt ingeblazen, met de rijrichting van de voertuigen mee. Het luchtmes blaast vanaf de bodem van de tunnel lucht met grote kracht schuin omhoog. De lucht wordt aangezogen vanaf de bodem van de tunnelbuis en onder de vloer van de tunnel gereinigd in filters. Het luchtvolume dat door de tunnelbuis stroomt is afhankelijk van het aantal voertuigen en de gemiddelde snelheid van deze voertuigen. Voor 50 en 80 km /uur gelden dus verschillende luchtdebiet die door de tunnelbuis stromen. De afzuiging neemt ca. 30% van dit debiet op.

### 8.1 Dynamische berekening van het HD systeem met CFD

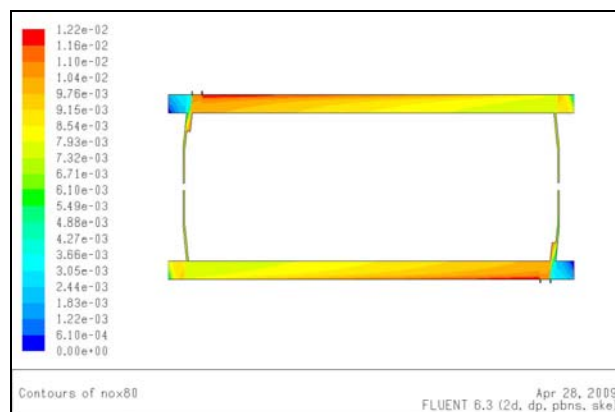
Bij het HD concept wordt de lucht aan het eind van de tunnelbuis afgezogen aan de bovenzijde. Tevens vindt aan de onderzijde een filtering plaats van de luchtlaag die met de voertuigen over de bodem van de tunnelbuis beweegt. Dit heeft tot gevolg dat aan de uitgang van de tunnelbuis vrijwel geen verontreinigende stoffen ontsnappen.

Hieronder wordt de efficiency van het systeem weergegeven voor alle berekende meeventilatie modellen. In alle gevallen is het systeem erop gedimensioneerd om 30% van de hoofdstroom af te tappen, dit met een efficiency van 80% (CO, NO<sub>x</sub>) of 100% (PM<sub>10</sub>) te filteren en weer in te blazen.

De dimensionering heeft a-priori plaatsgevonden op basis van gegevens over de invloed van de verkeersstroom op de uiteindelijke luchtsnelheid.

	500 m tunnel (+50m extra aan beide portalen); 50km/h		1000 m tunnel (+50m extra aan beide portalen); 50km/h		1000 m tunnel (+50m extra aan beide portalen); 80km/h		1500 m tunnel (+50m extra aan beide portalen); 80km/h	
filterefficiency	80% (NO <sub>x</sub> , CO)	100% (PM)	80% (NO <sub>x</sub> , CO)	100% (PM)	80% (NO <sub>x</sub> , CO)	100% (PM)	80% (NO <sub>x</sub> , CO)	100% (PM)
PRODUCTIE	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
FILTER	85.96%	87.43%	83.05%	85.85%	76.96%	84.42%	78.88%	86.23%
TUNNELUITGANG	10.73%	9.42%	1.71%	1.68%	23.04%	15.58%	21.12%	13.77%
TUNNELINGANG	3.34%	3.16%	15.25%	12.47%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Tabel 8.1 Efficiëntie van het ventilatiesysteem bij het HD concept



Figuur 8.1 Concentratieverdeling van NO<sub>x</sub> in µg/m<sup>3</sup> · 10<sup>-6</sup> bij een 1000 meter lengte tunnel; snelheid 80 km /uur; meestroom en afzuiging op 30% van de hoofdstroom die door de tunnelbuis stroomt.

Alle CFD berekeningen voor het HD concept zijn opgenomen in bijlage 6. In tabel 8.2 zijn de minimale en maximale concentraties in de tunnelbuis samengevat.

Tunnelomgeving	CO max <sup>*)</sup> µg/m <sup>3</sup>	CO min <sup>*)</sup> µg/m <sup>3</sup>	NO <sub>x</sub> max µg/m <sup>3</sup>	NO <sub>x</sub> min µg/m <sup>3</sup>	PM <sub>10</sub> max µg/m <sup>3</sup>	PM <sub>10</sub> min µg/m <sup>3</sup>
HD concept						
lengte 1500 v=80	29.400	17.700	16.600	9.900	840	460
lengte 1000 v=80	21.700	13.000	12.200	7.300	600	360
<i>lengte 1000<sup>**)</sup></i> v=50	<i>67.100</i>	<i>40.200</i>	<i>36.500</i>	<i>21.900</i>	<i>770</i>	<i>970</i>
lengte 500 v=50	39.700	23.800	21.600	13.000	105	570

\*) deze CO waarden zijn aanzienlijk lager dan in het C<sup>2</sup>O concept omdat er met 80% verwijdering is gerekend.

\*\*\*) de cursief gedrukte regel geeft de meest kritische situatie weer, met de hoogste waarden.

Tabel 8.2 Minimum en maximum concentraties bij het HD concept (zie bijlage 4)

De maximale waarden treden in dit model op aan de bodem van de tunnel nabij het afzuigpunt, ervan uitgaande dat er sprake is van stratificatie. De minimum en maximum waarden bij dit concept zijn minder extreem dan bij het C<sup>2</sup>O model. Indien uit nader onderzoek naar het werkelijke effect van stratificatie zou blijken dat deze effecten in tunnels verwaarloosbaar zijn en dat uitgegaan moet worden van een volledig gemengd systeem, nemen de concentraties in het HD model af.

Het HD model is erop gericht om aan de bodem van de tunnel de afzuiging en de filtering te realiseren omdat wordt aangenomen dat daarmee de hoogste concentraties in het meestroommodel worden onttrokken.

## 8.2 Berekeningen van ventilatiedebieten voor een 1000 meter, 80 km/uur tunnel

Het gekozen ventilatiedebiet bij de CFD berekeningen is ca 30% van het tunneldebiet ofwel 437.000 m<sup>3</sup>/uur (bij 80 km/uur). Dat resulteert in een gemiddelde concentratie van ca. 10.000 µg/m<sup>3</sup> NO<sub>2</sub> in de tunnel en een lekdebiet van 12,5%. Het % vrachtlek bedraagt dan volgens de CFD berekeningen ca. 25%, volgens de massabalans berekeningen ca. 34%.

In onderstaande tabel zijn de concentraties bepaald bij variërend debiet door het filter, uitgaande van een debietlekverlies van 10% van het debiet door de uitgang. Uitgaande van een te hanteren maximum concentratie is voor NO<sub>2</sub> uitgerekend wat het ventilatievoud

wordt. Vooral nog worden de maxima gesteld op 5.000, 10.000 en 30.000  $\mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$ , als te hanteren gemiddelde maximumwaarden in de tunnel.

$C_{\text{max}}$	debiet over filter*) in $\text{m}^3/\text{h}$	lekverlies in % van de tunnelstroom	V gem. in m/sec	% van totaal luchtdebiet door tunnel	lekverlies in % vracht (zonder correctie op stratificatie)
5	1.325.000	0	8	92	0
5	1.145.000	10	8	79	13,5
10	662.500	0	8	46	0
10	482.500	10	8	33,5	27,2
30	220.833	0	8	15	0
30	40.833	10	8	15	81,5

\*) filterefficiëntie = 80%; lekverlies over ingang en uitgang zoals uit tabel 8.1 blijkt.

Tabel 8.3 Ventilatie debieten bij beperking van  $C_{\text{max}}$

Deze berekeningen zijn gebaseerd op een eenvoudig massabalans model. De uitkomsten zijn in lijn met de 2D computersimulatie. Bij een gemiddelde aangenomen maximum concentratie van  $C_{\text{max}} 10.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  is ca. 482.000  $\text{m}^3$  filterdebiet nodig. Dit correspondeert met het CFD model van een 1000 meter tunnel met 80 km/uur met een gemiddelde concentratie van ca. 10.000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (max. 12.200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , min. 7.300  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  in tabel 8.2).

### 8.3 Varianten in filterrendement en filterdebiet

Bij een aangenomen  $C_{\text{max}}$  kan het zuiveringsdebiet omlaag indien het rendement van de zuivering omhoog gaat. Aangenomen was een filterrendement van 80% op verwijdering van  $\text{NO}_2$ , CO en  $\text{PM}_{10}$ .

In de volgende tabel wordt een aantal voorbeelden gegeven voor een tunnel van 1000 meter en een verkeerssnelheid van 80 km/uur.

HD concept	debiet over filter in $\text{m}^3/\text{h}$			lekverlies		% filterdebiet t.o.v. debiet door tunnel		
	bij bepaald filterrendement			in % van de vracht*)	in % van het tunneldebiet	V gem. in m/sec bij bepaald filterrendement		
$C_{\text{max}}$ in $\mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$	80% rend.	95% rend.	98% rend.			80% rend.	95% rend.	98% rend.
5.000	1.325.000	1.116.000	1.081.000	0	0	8	92	77
5.000	965.000	812.000	788.000	27,2	20	8	67	56
10.000	662.500	558.000	540.000	0	0	8	46	39
10.000	482.500	406.000	394.000	27,2	10	8	34	28
30.000	221.000	186.000	180.000	0	0	8	15	13
30.000	161.000	136.000	132.000	27,2	3,3	8	11	9

\*) zonder correctie op stratificatie

Tabel 7.6 Varianten in filterrendement en filterdebieten

Tabel 7.6 laat zien dat bij een verhoogd filterrendement het benodigde debiet afneemt. Ook het filterdebiet ten opzichte van het (vaste) debiet door de tunnel a.g.v. de verkeersstroom) verandert met het rendement van het filter. Hier is alleen voor  $\text{NO}_2$  de berekening uitgevoerd. Voor  $\text{PM}_{10}$  en CO zijn vergelijkbare berekeningen mogelijk.

### 8.4 Overeenkomsten en verschillen in het HD en $\text{C}^2\text{O}$ model

Om een inschatting te kunnen maken van de performance en de effecten van de beide ventilatieconcepten wordt aan de hand van een capaciteitsvoorbeeld een vergelijking gemaakt tussen beide systemen.

Als voorbeeld wordt uitgegaan van een vrachtlekverlies over de ingang/uitgang van de tunnel van 27,2 %.

Voor HD betekent dit een filterdebiet van 482.000  $\text{m}^3/\text{uur}$  bij een  $C_{\text{max}}$  van 10.000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (zie tabel 8.3).

Voor C<sup>2</sup>O wordt bij een C<sub>max</sub> van 80.000 µg/m<sup>3</sup> en een filterdebiet van ca. 62.000 m<sup>3</sup>/uur ook een vrachtlekverlies van 27,2 % bereikt. De daarbij optredende luchtsnelheid in de tunnel tegen het verkeer in van -0,33 m/s vereist wel extra energie, maar daar staat een sterk verminderd debiet over de behandelssystemen tegenover.

Zouden dezelfde omgevingscondities voor HD en C<sup>2</sup>O gelden (c<sub>max</sub> = 10.000 µg/m<sup>3</sup>; vrachtlekverlies 27,2 %, dan heeft het C<sup>2</sup>O systeem een tegenstroomsnelheid van -2,68 te overbruggen.

Het HD systeem zou in theorie ook bij een C<sub>max</sub> van 80.000 µg/m<sup>3</sup> en een filterdebiet van 62.000 m<sup>3</sup>/h kunnen werken maar dan wordt de tunnelstroom deels via een bypass om het filter geleid om toch in voldoende mate het luchtmes effect te bereiken. Het lekverlies in vracht neemt dan ook toe.

Het is overigens de vraag of de hoge concentraties van het C<sup>2</sup>O systeem acceptabel zijn. Verlaging van deze concentraties levert direct een grotere volumestroom door het filter op en een hogere tegenstroomse snelheid die extra energie kost.

Daarom zal bij korte tunnels het C<sup>2</sup>O systeem bij lagere concentraties eerder haalbaar zijn qua energiegebruik dan bij langere tunnels. Ook is een lagere verkeerssnelheid gunstig voor het C<sup>2</sup>O model omdat dan het energiegebruik afneemt.

In hoeverre de balans naar de een of de andere methode doorslaat is op dit moment nog niet te zeggen. Daarvoor moet in detail de engineering van het tegenstrooms ventileren versus de sterkte van een luchtmes voor afbuiging van 482.000 m<sup>3</sup>/uur nader worden uitgelegd en is de dimensionering van een behandelstelsel op 482.000 m<sup>3</sup>/h versus 62.000 m<sup>3</sup>/h noodzakelijk.

Voor beide situaties wordt de tunnelmondbelasting met ca. 73 % verminderd in belasting vanuit de tunnel. In het algemeen zal dit voldoende zijn om daar de grenswaarde voor buitenlucht te onderschrijden.

## 8.5 Combinatie van beide modellen

Door combinatie van het HD en het C<sup>2</sup>O model kan een optimaal tunnelventilatieconcept worden ontwikkeld. Dit zou het **vertraagd meestroom model** (hybride model) kunnen worden genoemd. Op hoofdlijnen ziet dat er als volgt uit;

Het concept sluit nog steeds de lucht grotendeels op in de tunnel. Er is echter sprake van een vertraagde luchtstroom naar de uitgang door deels tegenstroomse beweging via tegenventilatie in gang te zetten. De netto luchtstroom naar de uitgang van de tunnel, die normaal (bij een verkeerssnelheid van 80 km/uur) 8 m/s bedraagt zou in dat geval tot 3-5 m/s worden teruggebracht door de tegenstroomse ventilatiebeweging (C<sup>2</sup>O) effect) in de tunnel. Bij de uitgang wordt de lucht via het luchtmes afgebogen naar de bovenzijden van de tunnel (HD effect) waar het wordt afgezogen naar de andere tunnelbuis. De luchtstroom over het luchtmes hoeft vanwege de vertraagde hoofdstroom geen 30% meer te bedragen maar kan veel minder zijn, hetgeen weer energie bespaart. De concentraties zijn door de vertraging (langere verblijftijd van de lucht in de tunnelbuis) sterk toegenomen en daardoor kan de filter/behandelcapaciteit relatief laag blijven. Ook het vrachtverlies door de tunneluitgang wordt door het luchtmes en de vertraagde luchtsnelheid geminimaliseerd.

De concentraties verontreinigende stoffen zullen niet zo ver oplopen als bij het C<sup>2</sup>O model het geval is maar tegelijk wat hoger liggen dan de gemiddelde maxima in het HD model. De risico's voor tunnelpassanten wordt daarmee beperkt en tegelijk neemt de economische haalbaarheid van behandeling van de tunnellucht toe. Daarmee wordt de acceptatie van beperkt hogere tunnelconcentraties ten opzichte van de huidige gehanteerde maxima verder onderbouwd.

Een extra voordeel van deze combinatie van modellen is dat bij calamiteiten er al een meestroomse snelheid is en de extra noodventilatie snel op gang kan worden gebracht. De risico's nemen daardoor af.

Het is binnen de scope van dit verkennende haalbaarheidsonderzoek niet mogelijk om een extra nauwkeurige modellering voor een gecombineerd model op te zetten. In een vervolg studie aan de hand van een concreet voorbeeldproject kan dat wel tot een optimaal resultaat leiden.

## 8.6 Varianten in luchtdebiet en filterrendement bij het hybride model (vertraagd meestroom model)

Het voordeel van het hybridemodel komt tot uitdrukking in de sterk verlaagde filterdebieten en hogere concentraties ten opzichte van het HD model bij gelijkblijvende lekverliezen. Het luchtmes zal in het hybridemodel mogelijk ook een lage debiet kennen.

Hybride concept	Cmax in µg/m3 NO2	debiet over filter in m3/h			lekverlies		V gem. in m/sec	% filterdebiet t.o.v. debiet door tunnel		
		80% rend.	95% rend.	98% rend.	% vracht	% van de tunnelstroom		80% rend.	95% rend.	98% rend.
HD	5.000	965.000	812.000	788.000	27,2	20	8	67	56	55
Hybride	10.000	482.000	406.000	394.000	27,2	20	4	67	56	55
HD	10.000	482.500	406.000	394.000	27,2	10	8	34	28	27
Hybride	20.000	241.000	203.000	197.000	27,2	10	4	34	28	27
HD	20.000	241.000	203.000	197.000	27,2	5	8	17	14	14
Hybride	40.000	121.000	102.000	98.000	27,2	5	4	17	14	14
HD	30.000	161.000	136.000	132.000	27,2	3,3	8	11	9	9
Hybride	60.000	81.000	68.000	66.000	27,2	3,3	4	11	9	9

Tabel 7.7 Varianten in filterdebiet en filterrendement voor het hybride model

In tabel 7.7. is aangenomen dat de snelheid van de lucht in de tunnel halveert als gevolg van het vertraagde meestroomse effect. Bij het hybride concept neemt door een beperkte (50%) vertraging van de lucht in de tunnel het debiet over de filters met 50 % af. Dat geeft grote besparingen in de kosten van zuivering. Daarbij wordt aangenomen dat de lek via de uitgang een vast percentage van de productie van verontreiniging en een vast percentage van het tunneldebiet bedraagt.

## 9 Behandelingsmogelijkheden van tunnellucht

### 9.1 Overzicht van technieken voor PM<sub>10</sub> en NO<sub>x</sub> verwijdering

"De (tot nu toe gehanteerde) tunnelventilatieconcepten hebben tot doel verontreinigde lucht uit de tunnelbuizen te verwijderen en vervolgens te behandelen. Behandeling vindt plaats middels filters of (bio)wassers.

Er zijn reeds diverse systemen operationeel in tunnels in het buitenland."

(bron: MANAGING AIR OUTSIDE OF TUNNELS: CONTRACT NO. 6400/300 REPORT FOR THE RIJKSWATERSTAAT DEPARTMENT OF ROAD AND HYDRAULIC ENGINEERING, THE NETHERLANDS- 1 MARCH 2006 BY ARNOLD DIX)

Bij de in deze studie betrokken tunnelventilatieconcepten die beogen de lucht juist in de tunnel vast te houden, zijn dezelfde behandelmethoden in beeld.

Voor PM<sub>10</sub> is Elektrostatisch Precipitatie ESP de alom gebruikte techniek.

Voor NO<sub>x</sub> is een tweetal technieken in ontwikkeling. Van deze technieken is recent besloten dat die ook in de praktijk toegepast gaan worden in Spanje (M30 ringweg rond Madrid) en Japan (de rondweg rond Tokyo).

Onderstaand fragment geeft de ins en outs van deze technieken voor NO<sub>x</sub> verwijdering die gebaseerd zijn op absorptie en adsorptie:

#### "Nitrogen oxides removal technology - overview

NOx removal technologies are complex and by comparison with ESP technology relatively immature. It is clear that there is a limited application of NOx removal technology to road tunnels worldwide. However, Japan's decision to install three competing NO2 removal technologies in tunnels along the new Tokyo Ring Road, and Spain's decision to include two NO2 removal plants in the M30 Madrid Ring Road Project suggests the technology is maturing. NOx removal technologies require cleaning of particulates from the air prior to NOx removal. Recent improvements to ESP technologies (primarily higher removal and aerodynamic efficiencies, and the production of solid rather than liquid waste streams), have allowed the further development of the NOx removal technologies. If it were not for the improvements in the ESP technologies it would not be possible to further refine the NOx cleaning equipment because the particles would compromise the longevity of the NOx removal process."

"The NOx removal system based on the absorption method removes NO2 by chemically converting it into KNO2 and KNO3, using KOH on the absorbent material.

The NOx removal system based on the adsorption method uses pellets soaked in a solution of Na2SO4, which adsorb NO2 physically into the pores of the pellets.

Early trials of the technology indicate that the efficiency of both types of system is likely to decrease with operating time, and the systems therefore require "regeneration". The removal efficiency of the absorption based system is expected to fall to less than 90% at 8 to 10 months after the start of operation. The absorbent materials need to be washed with water, dried, dunked in a solution of KOH, and dried again before being reinstalled in the NOx removal system. The removal efficiency of the adsorbent pellet is expected to decrease at 12 days after the start of operation. Therefore, it is necessary to frequently regenerate the pellets by dunking them in a Na2SO4 solution before returning them to the NOx removal system.

Monitoring of the operational performance of the NOx removal systems to be installed in Tokyo will form part of the Tunnels Environment Improvement Plan (TEIP)."

BRON: ANNEXURE 8 TUNNEL VENTILATION SYSTEM TECHNOLOGY REVIEW AND BEST PRACTICE

<http://www.epa.vic.gov.au/projects/docs/Annex%208%20-%20%20Technology%20Review.pdf>

In Nederland zijn twee ontwikkelingen gaande:

1. Het HD concept van UC Technologies is gebaseerd op een ESP filter in combinatie met DEB technologie (di-electric barrier, koude plasma techniek) van de firma Circlair. Deze technologie heeft nog niet bewezen NO<sub>x</sub> te verwijderen. Wel worden deze DEB modules al veelvuldig toegepast voor VOS- en geurverwijdering uit industriële gasvormige emissies.

2. De Corona technologie die door TU/e en Oranjewoud wordt ontwikkeld gaat uit van gepulste corona en is eveneens een koude plasma techniek, echter met een veel krachtiger plasma dan opgewekt kan worden met DEB (di-electric barrier) modules. Ook Corona technologie heeft in de praktijk nog niet bewezen  $\text{NO}_2$  in hoge mate te verwijderen. Wel is een pilotproef op NO succesvol uitgevoerd. Literatuur geeft aan dat met diverse laboratoriumonderzoeken en pilotplants een efficiënte verwijdering van  $\text{NO}_2$  met koude plasmatechnologie is gerealiseerd.

bronnen:

**Nonthermal Plasma Processing for Air-Pollution Control: A Historical Review, Current Issues and Future Prospects**; Hyun-Ha Kim; National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, AIST Tsukuba West, 16-1 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8569, Japan; Received: May 25, 2004; Accepted: July 19, 2004; DOI: 10.1002/ppap.200400028

**Oxidation and Reduction Processes During  $\text{NO}_x$  Removal with Corona-Induced Nonthermal Plasma**

K. Yan,<sup>1,2</sup> S. Kanazawa,<sup>1</sup> T. Ohkubo,<sup>1</sup> and Y. Nomoto<sup>1</sup> *Received June 17, 1998; revised October 20, 1998*

## 9.2 Beïnvloeding door andere accumulerende stoffen

Voor zover bekend is de verwijdering van  $\text{PM}_{10}$  met ESP systemen vrijwel ongevoelig voor gasvormige verontreiniging in de lucht. De concentraties  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  of  $\text{C}_x\text{H}_y$  hebben geen invloed op de werking van ESP systemen.

Andersom is er wel sprake van beïnvloeding. Een  $\text{NO}_x$  ad-of absorptie systeem zoals deze in het buitenland zijn ontwikkeld, hebben een voorgeschakeld ESP systeem nodig om de fijnstof deeltjes uit de lucht te verwijderen. Anders lopen de filters met ad- en adsorbens materiaal snel dicht. Bovendien loopt de efficiëncy van het ab-/adsorbensmateriaal na verloop van tijd terug en moet deze geregenereerd worden. Daarbij wordt na de desorptiestap het vrijgekomen  $\text{NO}_2$  onder hoge temperatuur met het katalytische SCR proces omgezet in  $\text{N}_2$ . Ook di-electric barrier modules hebben door hun opbouw last van fijnstof. De lucht moet erg dicht langs de di-electric barrier modules worden geleid om effectief te kunnen worden behandeld. Vandaar dat bij het UCT HD systeem deze ESP is geïntegreerd in het verwerkingssysteem voor tunnellucht.

Voor Corona technologie is geen voorgeschakelde ESP vereist. De werking van dit systeem laat toe dat fijnstof deeltjes samen met de gasvormige componenten simultaan worden behandeld en in de demister-fase van het proces worden verwijderd met de waterfase. Corona wordt daarbij nat bedreven in de zin dat via een fijne waternevel in de aanstromende lucht voldoende water wordt ingebracht om het ionisatieproces van waterdeeltjes tot OH radicalen in de koude plasma optimaal te laten plaatsvinden. Bij droge lucht is te weinig waterdamp aanwezig om een adequate hoeveelheid OH radicalen te vormen. Een pilotonderzoek met de ontwikkelde demonstrator moet voor  $\text{NO}_x$  en  $\text{PM}_{10}$  verwijdering uitwijzen onder welke omstandigheden deze verwijdering substantieel is. Een verdere optimalisatie van het systeem en afstemming op de situatie in de praktijk is daarbij in een fase 2 vervolgonderzoek weggelegd.



## 10 Conclusies en aanbevelingen

### 10.1 Conclusies

1. Er bestaan geen wettelijke grenswaarden voor concentraties verkeersgerelateerde luchtverontreiniging in tunnels.
2. De (verwachte) criteria waaraan in een tunnel moet worden voldaan bij directe en zeer kortdurende (1-2 minuten) blootstelling aan verkeersgerelateerde luchtverontreiniging zien er als volgt uit:
  - Voor NO<sub>2</sub> kan van een grenswaarde tussen 2.000 en 30.000 µg/m<sup>3</sup> worden uitgegaan.
  - Voor PM<sub>10</sub> zal van een grenswaarde tussen 5.000 en 10.000 µg/m<sup>3</sup> kunnen worden uitgegaan.
  - Voor CO concentraties in een tunnel kan van concentraties tussen 60.000 en 450.000 µg/m<sup>3</sup> worden uitgegaan.
3. De gevolgen van 1-2 minuten blootstelling aan deze hoge concentraties zijn (nog) niet bekend.
4. Bij indirecte (1-2 minuten) blootstelling in een gesloten voertuigcabine zouden de concentraties buiten de cabine hoger kunnen zijn maar daarover bestaat geen zekerheid.
5. Met tunnelventilatie concepten gericht op het opsluiten en reinigen van tunnellucht, kunnen hoge concentraties verkeersgerelateerde luchtverontreiniging worden bereikt in ordegrootte van 10.000 tot 100.000 µg NO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.
6. NO<sub>2</sub> is de kritische component in de verkeersgerelateerde voertuigemissies. Voor PM<sub>10</sub> en CO worden de voorgestelde grenswaarden niet bereikt indien de concentratie NO<sub>2</sub> onder de grenswaarde blijft.
7. De modelleringen van de tunnelventilatieconcepten (bij 5000 voertuigen/uur per tunnelbuis; tunnel van 1 km lang, 3 baans; voertuigverhoudingen licht:middel: zwaar=80:15:5; voertuigemissiekentallen conform Min. VROM; 80 % zuiveringsrendement op NO<sub>2</sub>) wijzen uit dat met een ventilatiedebiet over de zuiveringsfilters van ca. 220.000 m<sup>3</sup>/uur een lekverlies van nagenoeg nul kan worden bereikt en de grenswaarde in de tunnel van 30.000 µg NO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> niet wordt overschreden.
8. Wordt een lekverlies op vracht op de tunnelmonden van 27% acceptabel geacht, dan neemt het debiet over de filters aanzienlijk af tot 160.000 m<sup>3</sup>/h.
9. Indien van een lager grenswaarde criterium van 10.000 µg NO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> wordt uitgegaan, dan neemt het filterdebiet toe tot 662.000 resp. 482.000 m<sup>3</sup>/uur bij 0% resp 27 % lekverlies aan de tunnelmonden.
10. Bovengenoemde waarden gelden globaal voor beide tunnelventilatiemodellen en gebaseerd op massabalansen bij een gesloten systeem waarbij de tunnellucht dus wordt opgesloten in de tunnelbuizen.
11. Het is waarschijnlijk dat een beperkt lekverlies van ca. 25 % van de verontreiniging in de tunnel de luchtkwaliteit bij de tunnelmonden tot beneden de grenswaarde voor buitenlucht zal verbeteren (75% verbetering van de situatie zonder ventilatiesysteem en filtering). Daarmee zou een tunnelventilatiedebiet van minimaal 160.000 m<sup>3</sup>/uur garant kunnen staan dat de luchtkwaliteit in de tunnel niet ontoelaatbaar verslechtert. Hoe hoger het filterdebiet, desto beter wordt dan de luchtkwaliteit in de tunnelbuis.
12. Voor situaties bij file of calamiteiten of indien de verkeerssnelheid < 15 km/uur bedraagt zal het tunnelventilatiesysteem in staat moeten zijn om snel alle



- verontreinigde lucht in de tunnel naar buiten te brengen, via langsventilatie naar de tunneluitgang.
13. Er bestaat geen duidelijke voorkeur voor het HD of het C<sup>2</sup>O concept. Beide systemen hebben voordelen en nadelen. Voor korte tunnels lijkt het C<sup>2</sup>O concept in het voordeel; Voor langere tunnels is in verband met energiegebruik het HD concept aantrekkelijker.
  14. In de praktijk zal voor bestaande tunnels het HD concept moeilijker inpasbaar zijn dan het C<sup>2</sup>O concept vanwege de afzuigsystematiek onder de tunnelvloer in het HD concept.
  15. Een combinatie van beide concepten kan leiden tot een optimaal systeem met beperkte verhoogde concentraties, minimaal energiegebruik en maximale beperking van de emissie uit de tunnel gecombineerd met beheerste veiligheid in de tunnel.
  16. Voor de behandeling van NO<sub>2</sub> en PM<sub>10</sub> in tunnellucht zijn in principe voldoende technieken beschikbaar; Voor NO<sub>2</sub> verwijdering zijn deze echter nog niet grootschalig in de praktijk bewezen.
  17. De behandelssystemen worden niet beïnvloed door andere accumulerende stoffen in tunnellucht bij toepassing van tunnelventilatieconcepten; Voor sommige NO<sub>2</sub> behandelssystemen is vooraf verwijdering van PM<sub>10</sub> echter noodzakelijk.
  18. Nieuw in ontwikkeling zijnde behandelssystemen voor NO<sub>2</sub> verwijdering zijn opgenomen in het HD resp. C<sup>2</sup>O concept: DEP (NO<sub>2</sub> verwijdering via koude plasma voorafgaand door ESP systemen) en Corona (simultane verwijdering van NO<sub>2</sub> en PM<sub>10</sub> met natte Corona met koude plasma en nageschakelde demister).

## 10.2 Aanbevelingen

1. In verband met de onbekende effecten bij zeer kortdurende indirecte blootstelling van enkele minuten aan hoge concentraties NO<sub>2</sub> zou een daarop gericht nader onderzoek nodig zijn.
2. Pas nadat een dergelijk onderzoek is afgerond kan met zekerheid worden beslist welke grenswaarden voor verkeersgerelateerde luchtverontreiniging dienen te worden vastgesteld in tunnels met tunnelventilatieconcepten.
3. Het energiegebruik van beide (of combinatie van) ventilatieconcepten dient nader te worden onderzocht aan de hand van een concreet praktijkvoorbeeld. Voor met name de financiële haalbaarheid is dit van belang.
4. Het fenomeen van stratificatie van luchtstromen met verschillende mate van verontreiniging in een tunnel dient nader te worden onderzocht.
5. Een pilotproject gericht op de detailed engineering van (een combinatie van) beide tunnelconcepten aan de hand van een concreet nieuw tunnelproject kan antwoord geven op aanvullende vragen als energiegebruik, regelsystematiek, alarmeringen en omschakelmogelijkheden naar langsventilatie bij filevorming en ongevallen. Ook aspecten als brandvoorzieningen spelen daarbij een belangrijke rol.
6. Het verdient aanbeveling de alarminstellingen in de Westerscheldetunnel (WOV Westerschelde oeververbinding) niet te baseren op CO gehalte maar op het gehalte NO<sub>2</sub> dat in de tunnel kan ontstaan als gevolg van veel langzaam verkeer.

## 11 Literatuurlijst

### *Onderzoeksrapporten*

- 1) Rijkswaterstaat  
Lichte overkapping snelwegen, Dienst Weg- en Waterbouw Rijkswaterstaat, Mei 2006
- 2) Piarc  
Road Tunnels: Emissions, Ventilation, Environment, Piarc, 1999

### *Rapporten en publicaties met verwijzing naar Internetsites*

- 3) Astmafonds
  - a) Luchtkwaliteit in Nederland: gezondheidseffecten en hun maatschappelijke kosten; CE, september 2005;  
<http://www.astmafonds.nl/downloads/eindrapport%20CE.pdf>
  - b) Luchtkwaliteit in Nederland: enkele brandende vragen; CE, oktober 2005;  
<http://www.astmafonds.nl/zorgverleners/downloads/brandende%20vragen.pdf>
- 4) Informatieblad luchtkwaliteit  
Informatieblad luchtkwaliteit; Ministerie VROM; November 2001; [http://www.avconsulting.nl/artikelen/lucht/informatieblad\\_lucht\\_gezondheid.pdf](http://www.avconsulting.nl/artikelen/lucht/informatieblad_lucht_gezondheid.pdf)
- 5) GGD  
Verkeersgerelateerde luchtverontreiniging en gezondheid - een kennisoverzicht -; Institute for Risk Assessment Sciences Environmental and Occupational Health Division Universiteit Utrecht en TNO Milieu, Energie en Procesinnovatie; september 2002;  
[http://www.ggd.nl/ggdnl/uploaddb/downl\\_object.asp?atoom=18990&VolgNr=1](http://www.ggd.nl/ggdnl/uploaddb/downl_object.asp?atoom=18990&VolgNr=1)
- 6) Kamervragen Tweede Kamer; Vragen van het lid Van Bommel (SP) aan de minister van Verkeer en Waterstaat over de Westerschelde Oever Verbinding. (Ingezonden 11 mei 1999); Antwoord;  
<http://www.ikregeer.nl/document/KVR9553>
- 7) RWS IPL; Innovatieprogramma luchtkwaliteit
  - a) Publicatie 74; Tunnels en Luchtkwaliteit; Tunnel A2 Maastricht; ir. J.W. Huijben;  
<http://www.ipluchtkwaliteit.nl/data/publicatie-74/Luchtbehandeling/1-Achtergrond/A2-Maastricht.ppt>
  - b) Publicatie 74; Lichte overkapping voor autosnelwegen, conceptueel ontwerp; DHV/NIO; mei 2006; <http://www.ipluchtkwaliteit.nl/data/publicatie-74/Overkappen/1-DHV-Nio-Architecten/rapport.pdf>
- 8) Milieu en Natuur Compendium
  - a) Koolmonoxideconcentratie, 1986-2007;  
<http://www.milieuennatuurcompendium.nl/indicatoren/nl0465-Koolmonoxide-concentratie.html?i=14-66>
  - b) Nationale Luchtkwaliteit, overzicht van normen;  
<http://www.milieuennatuurcompendium.nl/indicatoren/nl0237-Nationale-luchtkwaliteit%3A-overzicht-normen.html?i=14-6>
- 9) Overheid
  - a) Bijlage 2 bij de Wet Milieubeheer;  
[http://wetten.overheid.nl/BWBR0003245/Bijlage2/geldigheidsdatum\\_16-02-2009](http://wetten.overheid.nl/BWBR0003245/Bijlage2/geldigheidsdatum_16-02-2009)

- b) Regeling beoordeling luchtkwaliteit 2007;  
[http://wetten.overheid.nl/BWBR0022817/Hoofdstuk2/Artikel2/geldigheidsdatum\\_16-02-2009](http://wetten.overheid.nl/BWBR0022817/Hoofdstuk2/Artikel2/geldigheidsdatum_16-02-2009)
- 10) Provincie Noord-Holland  
GEZONDHEIDSEFFECTEN VAN LUCHTVERONTREINIGING DOOR FIJN STOF IN DE IJMOND;  
GGD Kennemerland; juni 2004; [http://www.noord-holland.nl/Images/65\\_125999.pdf](http://www.noord-holland.nl/Images/65_125999.pdf)
- 11) Rijkswaterstaat  
PAO cursus 2004 Tunnels voor wegverkeer; Ventilatie van autotunnels; bijdrage ir.  
J.W. Huijben; [http://www.rws.nl/rws/bwd/home/pdf/Syll\\_VOV\\_013a\\_Huijben.pdf](http://www.rws.nl/rws/bwd/home/pdf/Syll_VOV_013a_Huijben.pdf)
- 12) Van Egmond Van Hirtum  
Alles over de gevaren van koolmonoxide; Arwin van der Zande, Hulpverlenings-regio  
Haaglanden; Wim Zwart Voorspuij, GGD Den Haag, November 2004;  
<http://www.ruimteomteleven.nl/downloads/Alles%20over%20de%20gevaaren%20van%20koolmonoxide.doc>
- 13) RIVM  
Briefrapport: Verwachte gezondheidseffecten roetfilters per salo positief; van RIVM  
aan Ministerie VROM; april 2007;  
<http://www.rivm.nl/bibliotheek/digitaaldepot/briefrapportroetfilters.pdf>
- 14) PIARC  
POLLUTION BY NITROGEN DIOXIDE IN ROAD TUNNELS; PIARC . 05.09.B - 2000  
[http://publications.piarc.org/ressources/publications\\_files/2/909,05-09-e.pdf](http://publications.piarc.org/ressources/publications_files/2/909,05-09-e.pdf)
- 15 Location of flues to prevent ingress of gas and oil firing flue gases under all weather  
conditions; 14 February 2006; pg 21;  
<http://www.communities.gov.uk/documents/planningandbuilding/pdf/143945.pdf>
- 16 [Review of Submarine Escape Action Levels for Selected Chemicals](#) (2002); Board on  
Environmental Studies and Toxicology (BEST)  
[http://www.nap.edu/catalog.php?record\\_id=10242](http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=10242)

## Bijlage 1 : Luchtkwaliteitsnormen

### Overzicht EU luchtkwaliteitsregelgeving

De onderstaande tabel bevat een overzicht van de belangrijkste normen uit de EU-richtlijnen. In de tabel is aangegeven of de norm gericht is op bescherming van de gezondheid van mensen of bescherming van de natuur. Ook de juridische status van de norm is aangegeven. Voor grenswaarden geldt een resultaatverplichting om eraan te voldoen, voor streefwaarden geldt een inspanningsverplichting. In de tabel vindt u ook links naar webpagina's in het Milieucompendium met actuele cijfers over de betreffende norm. Ontbreekt een link, dan zijn er in het Milieucompendium verder geen gegevens opgenomen.

#### Europese luchtkwaliteitsnormen

Stof	Gericht op	Norm	Niveau	Status
Zwavel dioxide (SO <sub>2</sub> )	mens	daggemiddelde; overschrijding is toegestaan op niet meer dan 3 dagen per jaar.	125 µg/m <sup>3</sup>	grenswaarde
	mens	uurgemiddelde; overschrijding is toegestaan op niet meer dan 24 uur per jaar.	350 µg/m <sup>3</sup>	grenswaarde
	mens	uurgemiddelde; waargenomen gedurende drie opeenvolgende uren in een gebied van minimaal 100 km <sup>2</sup> .	500 µg/m <sup>3</sup>	alarmdrempel
	natuur	jaargemiddelde en wintergemiddelde (van 1 oktober t/m 31 maart)	20 µg/m <sup>3</sup>	grenswaarde
Stikstofdioxide (NO <sub>2</sub> )	mens	<u>jaargemiddelde</u>	40 µg/m <sup>3</sup>	grenswaarde geldig vanaf 2010 <sup>1)</sup>
	mens	uurgemiddelde; overschrijding is toegestaan op niet meer dan 18 uur per jaar.	200 µg/m <sup>3</sup>	grenswaarde geldig vanaf 2010 <sup>1)</sup>
	mens	uurgemiddelde; waargenomen gedurende drie opeenvolgende uren in een gebied van minimaal 100 km <sup>2</sup> .	400 µg/m <sup>3</sup>	alarmdrempel
Stikstofoxiden (NO <sub>x</sub> )	natuur	<u>jaargemiddelde</u>	30 µg/m <sup>3</sup>	grenswaarde

Fijnstof (PM <sub>10</sub> )	mens	<u>jaargemiddelde</u>	40 µg/m <sup>3</sup>	grenswaarde <sup>2)</sup>
		<u>daggemiddelde;</u> <u>overschrijding is</u>		
	mens	<u>toegestaan op niet meer</u> <u>dan 35 dagen per jaar.</u>	50 µg/m <sup>3</sup>	grenswaarde <sup>2)</sup>
Fijnstof <sup>3)</sup> (PM <sub>2,5</sub> )	mens	jaargemiddelde	25 µg/m <sup>3</sup>	grenswaarde, geldig van af 2015
		jaargemiddelde, gemiddelde bepaald over		
	mens	metingen op stedelijke achtergrondlocaties	20 µg/m <sup>3</sup>	grenswaarde, geldig van af 2015
		jaargemiddelde, gemiddelde bepaald over		
	mens	metingen op stedelijke achtergrondlocaties	15-20% <sup>3)</sup> vermindering	streefwaarde, te bereiken in 2020 ten opzichte van 2010
	mens	jaargemiddelde	25 µg/m <sup>3</sup>	streefwaarde, te bereiken in 2010
		jaargemiddelde, gemiddelde bepaald over		
mens	metingen op stedelijke achtergrondlocaties	20 µg/m <sup>3</sup>	streefwaarde, te bereiken in 2020	
Lood (Pb)	mens	<u>jaargemiddelde</u>	0,5 µg/m <sup>3</sup>	grenswaarde
Benzeen (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	mens	<u>jaargemiddelde</u>	5 µg/m <sup>3</sup>	grenswaarde vanaf 2010
Koolmonoxide (CO)	mens	hoogste voortschrijdend 8- uurgemiddelde	10.000 µg/m <sup>3</sup>	grenswaarde
		<u>hoogste voortschrijdend 8- uurgemiddelde per dag;</u> <u>overschrijding is</u>		
Ozon <sup>4)</sup> (O <sub>3</sub> )	mens	<u>toegestaan op niet meer</u> <u>dan 25 dagen per jaar.</u>	120 µg/m <sup>3</sup>	Streefwaarde, te bereiken in 2010
		uurgemiddelde		
	mens	uurgemiddelde: waargenomen gedurende drie opeenvolgende uren in een gebied van minimaal 100 km <sup>2</sup> .	180 µg/m <sup>3</sup>	informatiedrempel
		AOT40, gemiddeld over 5 jaar	18.000 µg/m <sup>3</sup> .h	Streefwaarde, te bereiken in 2010
	natuur	AOT40, gemiddeld over mei tot en met juli	6.000 µg/m <sup>3</sup> .h	Streefwaarde, te bereiken in: niet bepaald
Arseen (As)	mens	<u>jaargemiddelde</u>	6 ng/m <sup>3</sup>	streefwaarde geldig vanaf 2013
Cadmium	mens	<u>jaargemiddelde</u>	5 ng/m <sup>3</sup>	streefwaarde

(Cd)				geldig vanaf 2013
Nikkel (Ni)	mens	<u>jaargemiddelde</u>	20 ng/m <sup>3</sup>	streefwaarde geldig vanaf 2013
Benzo[a]pyreen (B[a]P)	mens	<u>jaargemiddelde</u>	1 ng/m <sup>3</sup>	streefwaarde geldig vanaf 2013

1) Uitstel mogelijk - onder voorwaarden - tot maximaal 2015.

2) Uitstel mogelijk - onder voorwaarden - tot maximaal 2011.

3) Zie 'Toelichting normen PM<sub>2,5</sub> hieronder in 10.4.

4) Zie 'Toelichting normen ozon hieronder in 10.10.

## Grenswaarden, plandrempels en alarmdrempel voor stikstofdioxide

### Wm voorschrift 2.1

1. Voor stikstofdioxide gelden de volgende grenswaarden voor de bescherming van de gezondheid van de mens:

- 200 microgram per m<sup>3</sup> als uurgemiddelde concentratie, waarbij geldt dat deze maximaal achttien maal per kalenderjaar mag worden overschreden, en
- 40 microgram per m<sup>3</sup> als jaargemiddelde concentratie, uiterlijk op 1 januari 2010.

2. Het eerste lid, onder a, is met ingang van 1 januari 2010 van toepassing bij wegen waarvan ten minste 40 000 motorvoertuigen per etmaal gebruik maken. Voor de toepassing van de eerste volzin wordt verstaan onder motorvoertuig: motorvoertuig als bedoeld in de krachtens de Wegenverkeerswet 1994 gestelde regels.

3. Tot 1 januari 2010 geldt bij de wegen, bedoeld in het tweede lid, voor stikstofdioxide een grenswaarde voor de bescherming van de gezondheid van de mens van 290 microgram per m<sup>3</sup> als uurgemiddelde concentratie, waarbij geldt dat deze maximaal achttien maal per kalenderjaar mag worden overschreden.

4. Indien ten gevolge van maatregelen die door één of meer bestuursorganen zijn genomen met het oog op het voorkomen of beperken van luchtverontreiniging bij de wegen, bedoeld in het tweede lid, in een kalenderjaar voor het jaar 2010 de grenswaarde wordt bereikt van 200 microgram per m<sup>3</sup> als uurgemiddelde concentratie, met maximaal achttien overschrijdingen per kalenderjaar, geldt, in afwijking van het tweede en derde lid, deze grenswaarde met ingang van het jaar volgend op het jaar waarin de grenswaarde, bedoeld in de eerste volzin is bereikt

### Wm voorschrift 2.2

Voor stikstofdioxide gelden de volgende plandrempels voor de bescherming van de gezondheid van de mens, gedefinieerd als jaargemiddelde concentraties:

- in 2005, 50 microgram per m<sup>3</sup>;
- in 2006, 48 microgram per m<sup>3</sup>;
- in 2007, 46 microgram per m<sup>3</sup>;
- in 2008, 44 microgram per m<sup>3</sup>;
- in 2009, 42 microgram per m<sup>3</sup>.

### Wm voorschrift 2.3

Voor stikstofdioxide gelden bij de wegen, bedoeld in voorschrift 2.1, onder 2, de volgende plandrempels voor de bescherming van de gezondheid van de mens, gedefinieerd als uurgemiddelde concentraties waarbij geldt dat deze maximaal achttien maal per kalenderjaar mogen worden overschreden:

- in 2005, 250 microgram per m<sup>3</sup>;
- in 2006, 240 microgram per m<sup>3</sup>;
- in 2007, 230 microgram per m<sup>3</sup>;

- d. in 2008, 220 microgram per m<sup>3</sup>;
- e. in 2009, 210 microgram per m<sup>3</sup>.

#### Wm voorschrift 2.4

Voor stikstofdioxide geldt 400 microgram per m<sup>3</sup> als uurgemiddelde concentratie gedurende drie achtereenvolgende uren, in gebieden met een oppervlakte van ten minste 100 km<sup>2</sup>, als alarmdrempel.

Bron: [http://wetten.overheid.nl/BWBR0003245/Bijlage2/geldigheidsdatum\\_16-02-2009](http://wetten.overheid.nl/BWBR0003245/Bijlage2/geldigheidsdatum_16-02-2009)

### Grenswaarde voor stikstofdioxiden

#### Wm voorschrift 3.1

Voor stikstofdioxiden geldt 30 microgram per m<sup>3</sup> als jaargemiddelde concentratie als grenswaarde voor de bescherming van vegetatie, in gebieden met een oppervlakte van ten minste 1000 km<sup>2</sup> die gelegen zijn op een afstand van ten minste 20 km van agglomeraties of op een afstand van ten minste 5 km van andere gebieden met bebouwing, van inrichtingen of van autosnelwegen, waar de vegetatie naar het oordeel van het bevoegde bestuursorgaan bijzondere bescherming behoeft.

Bron: [http://wetten.overheid.nl/BWBR0003245/Bijlage2/geldigheidsdatum\\_16-02-2009](http://wetten.overheid.nl/BWBR0003245/Bijlage2/geldigheidsdatum_16-02-2009)

### Grenswaarden voor zwevende deeltjes (PM<sub>10</sub>)

#### Wm voorschrift 4.1

Voor zwevende deeltjes (PM<sub>10</sub>) gelden de volgende grenswaarden voor de bescherming van de gezondheid van de mens:

- a. 40 microgram per m<sup>3</sup> als jaargemiddelde concentratie;
- b. 50 microgram per m<sup>3</sup> als vierentwintig-uurgemiddelde concentratie, waarbij geldt dat deze maximaal vijfendertig maal per kalenderjaar mag worden overschreden.

Bron: [http://wetten.overheid.nl/BWBR0003245/Bijlage2/geldigheidsdatum\\_16-02-2009](http://wetten.overheid.nl/BWBR0003245/Bijlage2/geldigheidsdatum_16-02-2009)

*Er gelden geen eisen ten aanzien van de concentratie fijnstof in tunnels of onder overkappingen.*

Bron: *Lichte overkapping snelwegen, Dienst Weg- en Waterbouw Rijkswaterstaat, Mei 2006*

Bron: <http://www.ipluchtkwaliteit.nl/data/publicatie-74/Overkappen/1-DHV-Nio-Architecten/rapport.pdf>

Beide bovenstaande bronnen verwijzen naar dezelfde rapportage. Buiten dit document zijn er tijdens de literatuurstudie geen documenten gevonden die eisen stellen aan fijnstof concentraties in tunnels. Tevens zijn er geen andere bronnen gevonden die de bewering ondersteunen.

### Grenswaarden voor fijne zwevende deeltjes (PM<sub>2,5</sub> en PM<sub>0,1</sub>)

PM<sub>10</sub>, fijnstof met een diameter van 10µm of kleiner, is thans de EU standaard. Ook in Nederland zijn de metingen hierop gebaseerd.

Onlangs is voorgesteld om niet alleen voor PM<sub>10</sub>, maar ook voor PM<sub>2,5</sub> Europese normen vast te stellen.

Voor PM<sub>0,1</sub> worden (nog) geen normen voorgesteld Deze nog kleinere fractie van fijnstof zou verantwoordelijk zijn voor de gezondheidseffecten. Recent toxicologisch en epidemiologisch onderzoek geeft aanleiding om onderscheid te (blijven) maken tussen PM<sub>10-2,5</sub> (coarse), PM<sub>2,5-0,1</sub> (fine) en <PM<sub>0,1</sub> (ultrafijne).

Voor PM<sub>2,5</sub> is een grenswaarde van 25 µg/m<sup>3</sup> voorgesteld die overal geldt vanaf 2015, Daarnaast is er een streefwaarde van 25 µg/m<sup>3</sup>, te bereiken in 2010, en een streefwaarde van 20 µg/m<sup>3</sup>, te bereiken in 2020. Zodoende wordt getracht om, ook in de vervuilde gebieden, een minimumbescherming van de gezondheid te kunnen waarborgen (hiervoor is uitstel aan te vragen met 5 jaar). Op korte termijn komt de EU Commissie met wettelijke maatregelen om de grensoverschrijdende component van stedelijke achtergrond-

concentratie van  $PM_{2,5}$  te verminderen. Deze maatregelen hebben onder andere betrekking op de toegestane emissies van vrachtauto's.

Bron: <http://www.astmafonds.nl/zorgverleners/downloads/brandende%20vragen.pdf>

Bron: <http://www.milieuennatuurcompendium.nl/indicatoren/nl0237-Nationale-luchtkwaliteit%3A-overzicht-normen.html?i=14-65>

Daarnaast zijn er doelstellingen vastgesteld ten aanzien van de 'gemiddelde blootstellingsindex' (GBI). De gemiddelde blootstellingsindex (GBI) wordt gebaseerd op een gemiddelde van metingen op stedelijke achtergrondlocaties, en wordt bepaald als gemiddelde over drie jaar. De GBI voor 2010 wordt bepaald over de jaren 2009-2011. De GBI voor andere jaren wordt bepaald als gemiddelde over de laatste 3 jaren. Dus de GBI voor 2015 wordt bepaald als gemiddelde over de jaren 2013-2015, en de GBI voor 2020 over de jaren 2018-2020.

Er is een grenswaarde van  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  voor de GBI, waaraan vanaf 2015 moet worden voldaan.

Bron: <http://www.milieuennatuurcompendium.nl/indicatoren/nl0237-Nationale-luchtkwaliteit%3A-overzicht-normen.html?i=14-65>

#### **Toelichting normen $PM_{2,5}$**

Er is een grenswaarde voor  $PM_{2,5}$  van  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  die overal geldt vanaf 2015. Daarnaast is er een streefwaarde van  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , te bereiken in 2010, en een streefwaarde van  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , te bereiken in 2020.

Daarnaast zijn er doelstellingen vastgesteld ten aanzien van de 'gemiddelde blootstellingsindex' (GBI). De gemiddelde blootstellingsindex (GBI) wordt gebaseerd op een gemiddelde van metingen op stedelijke achtergrondlocaties, en wordt bepaald als gemiddelde over drie jaar. De GBI voor 2010 wordt bepaald over de jaren 2009-2011. De GBI voor andere jaren wordt bepaald als gemiddelde over de laatste 3 jaren. Dus de GBI voor 2015 wordt bepaald als gemiddelde over de jaren 2013-2015, en de GBI voor 2020 over de jaren 2018-2020.

Er is een grenswaarde van  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  voor de GBI, waaraan vanaf 2015 moet worden voldaan.

Er is een streefwaarde om de GBI met 15%-20% te laten dalen tussen 2010 en 2020 (de blootstellingsverminderingdoelstelling, BVD). De hoogte van de blootstellingsverminderingdoelstelling is nog niet bekend. Een BVD van 15% geldt bij een GBI tussen 13 en  $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in 2010. Als de GBI in 2010  $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$  of hoger is, geldt een BVD van 20%. In 2013 zal de Europese Commissie deze streefwaarde evalueren en mogelijk omzetten in juridisch bindende grenswaarden.

#### **Toelichting normen ozon**

De Europese norm voor blootstelling van de bevolking aan hoge ozonconcentraties betreft een streefwaarde van  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  voor de hoogste 8-uursgemiddelde ozonconcentratie per dag. Deze streefwaarde mag in 2010 op niet meer dan 25 dagen per kalenderjaar worden overschreden, gemiddeld over drie jaar. Middeling vindt plaats over het betreffende jaar en de twee voorafgaande jaren.

Het hoogste 8-uursgemiddelde van de ozonconcentratie van een dag wordt bepaald door onderzoek van de voortschrijdende gemiddelden over perioden van acht uur, die uit uurwaarden berekend en ieder uur bijgewerkt worden. Elk aldus berekend gemiddelde over acht uur geldt voor de dag waarop de periode van acht uur eindigt, dat wil zeggen dat de eerste berekeningsperiode voor een bepaalde dag loopt van 17.00 uur op de dag daarvoor tot 01.00 uur op die dag, en de laatste berekeningsperiode van 16.00 uur tot 24.00 uur.

De AOT40 (Accumulated Ozone exposure over a Threshold of 40 ppb) is een voor de natuur relevante maat om ozonconcentraties in uit te drukken. De AOT40 houdt rekening met zowel de mate van overschrijding van de drempelwaarde van  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (= 40 ppb bij  $20^\circ\text{C}$  en  $1,10^5$  hPa) als met de tijdsduur van die overschrijding. De berekening van deze



norm vindt alleen plaats in de drie zomermaanden mei - juli, van 08:00h tot 20:00h (Midden Europese Tijd).

Voor bescherming van de vegetatie is een streefwaarde vastgesteld van 18.000 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) x uur, gemiddeld over 5 jaar. Middeling vindt plaats over het betreffende jaar en de vier voorafgaande jaren. Er is een langetermijn-doelstelling vastgesteld van 6.000 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) x uur.

Bron: <http://www.milieuennatuurcompendium.nl/indicatoren/nl0237-Nationale-luchtkwaliteit%3A-overzicht-normen.html?i=14-65>

## Artikel 2 Regeling beoordeling luchtkwaliteit 2007

1. Het vaststellen van het kwaliteitsniveau ten behoeve van het bepalen van de mate waarin de kwaliteitsniveaus van zwaveldioxide, stikstofdioxide, zwevende deeltjes ( $\text{PM}_{10}$ ), lood, benzeen en koolmonoxide voldoen aan de desbetreffende luchtkwaliteitseisen voor de bescherming van de gezondheid van de mens, opgenomen in bijlage 2 van de wet, vindt overeenkomstig deze regeling plaats in alle agglomeraties en zones, aangewezen krachtens artikel 5.22, eerste lid, van de wet.

2. Het vaststellen van het kwaliteitsniveau ten behoeve van het bepalen van de mate waarin de kwaliteitsniveaus van arseen, cadmium, nikkel en benzo(a)pyreen voldoen aan de luchtkwaliteitseisen, opgenomen in de voorschriften 9.1, 10.1, 11.1 en 12.1 van bijlage 2 van de wet, vindt overeenkomstig deze regeling plaats op het gehele grondgebied van Nederland.

3. Op de volgende locaties vindt geen vaststelling plaats van het kwaliteitsniveau als bedoeld in het eerste lid en vindt geen berekening plaats van effecten als bedoeld in de artikelen 5.12, tweede en derde lid, en 5.16, eerste lid, van de wet, voor zover het betreft de in het eerste lid bedoelde kwaliteitsniveaus en luchtkwaliteitseisen:

- a. locaties die zich bevinden in gebieden waartoe leden van het publiek geen toegang hebben en waar geen vaste bewoning is;
- b. terreinen waarop een of meer inrichtingen zijn gelegen, waar bepalingen betreffende gezondheid en veiligheid op arbeidsplaatsen als bedoeld in artikel 5.6, tweede lid, van de wet, van toepassing zijn;
- c. de rijbaan van wegen en de middenberm van wegen, tenzij voetgangers normaliter toegang tot de middenberm hebben.

Bron: [http://wetten.overheid.nl/BWBR0022817/Hoofdstuk2/Artikel2/geldigheidsdatum\\_16-02-2009](http://wetten.overheid.nl/BWBR0022817/Hoofdstuk2/Artikel2/geldigheidsdatum_16-02-2009)

## Grenswaarden en alarmdrempel voor zwaveldioxide

### Wm voorschrift 1.1

Voor zwaveldioxide gelden de volgende grenswaarden voor de bescherming van de gezondheid van de mens:

- a. 350 microgram per  $\text{m}^3$  als uurgemiddelde concentratie, waarbij geldt dat deze maximaal vierentwintig maal per kalenderjaar mag worden overschreden;
- b. 125 microgram per  $\text{m}^3$  als vierentwintig-uurgemiddelde concentratie, waarbij geldt dat deze maximaal drie maal per kalenderjaar mag worden overschreden.

### Voorschrift 1.3

Voor zwaveldioxide geldt 500 microgram per  $\text{m}^3$  als uurgemiddelde concentratie gedurende drie achtereenvolgende uren, in gebieden van ten minste 100  $\text{km}^2$ , als alarmdrempel.

Bron: [http://wetten.overheid.nl/BWBR0003245/Bijlage2/geldigheidsdatum\\_16-02-2009](http://wetten.overheid.nl/BWBR0003245/Bijlage2/geldigheidsdatum_16-02-2009)

## Grenswaarde voor lood

### Wm voorschrift 5.1

Voor lood geldt 0,5 microgram per  $\text{m}^3$  als jaargemiddelde concentratie als grenswaarde voor de bescherming van de gezondheid van de mens.

Bron: [http://wetten.overheid.nl/BWBR0003245/Bijlage2/geldigheidsdatum\\_16-02-2009](http://wetten.overheid.nl/BWBR0003245/Bijlage2/geldigheidsdatum_16-02-2009)

### Grenswaarde voor koolmonoxide

#### Wm voorschrift 6.1

Voor koolmonoxide geldt 10.000 microgram per m<sup>3</sup> als acht-uurgemiddelde concentratie als grenswaarde voor de bescherming van de gezondheid van de mens.

Bron: [http://wetten.overheid.nl/BWBR0003245/Bijlage2/geldigheidsdatum\\_16-02-2009](http://wetten.overheid.nl/BWBR0003245/Bijlage2/geldigheidsdatum_16-02-2009)

De maximaal toelaatbare CO-concentraties zijn bij normaal verkeer: 300 ppm (parts per million), bij calamiteiten (verblijftijd <1 uur) 150 ppm en bij werkzaamheden (verblijftijd >1 uur) 50 ppm

Voor roet (zwarte rook) in omgevingslucht geldt als algemene richtlijn, dat een waarde van 90 microgram/m<sup>3</sup> gedurende 98% van de etmaalduur niet mag worden overschreden. Hoewel kortdurende blootstelling aan roet geen verhoogd gezondheidsrisico met zich meebrengt is roet in een tunnel wel van belang in verband met zichtverslechtering.

Bron: <http://ikregeer.nl/static/pdf/KVR9553.pdf> (Kamervragen 9553 tav Westerscheldetunnel 11 juni 1999  
<http://209.85.229.132/search?q=cache:zshsaw22Vnk:ikregeer.nl/static/pdf/KVR9553.pdf+KVR9553.pdf&cd=1&hl=nl&ct=clnk&gl=nl>)

De grenswaarden voor koolmonoxideconcentraties hebben als doel de volksgezondheid te beschermen. In de Europese richtlijn voor koolmonoxide en benzeen is een grenswaarde vastgelegd van 10.000 µg/m<sup>3</sup> voor de glijdende 8-uurgemiddelde concentratie van koolmonoxide. Deze waarde mag niet worden overschreden. De Europese grenswaarde is sinds 2005 van kracht. Via de Wet Milieubeheer uit 2007 is de Europese grenswaarde voor koolmonoxide vastgelegd in de Nederlandse wetgeving.

Bron: <http://www.milieuennatuurcompendium.nl/indicatoren/nl0465-Koolmonoxideconcentratie.html?i=14-66>

Koolmonoxide PPM	Blootstellingstijd	Symptomen
25	8 uur	In Nederland is 25 ppm de Maximale Aanvaarde Concentratie (MAC waarde) voor koolmonoxide.
200	2-3 uur	Hoofdpijn, vermoeidheid, misselijkheid en duizeligheid.
400	1-2 uur	Levensbedreigend na 3 uren.
800	45 minuten	Bewusteloos binnen 2 uren. Dood binnen 2-3 uren.
1600	20 minuten	Dood binnen 1 uur.
3200	5-10 minuten	Dood binnen 1 uur
6400	1-2 minuten	Dood binnen 25-30 minuten.
12800	1-3 minuten	Dood.

bron: ref.12

### Grenswaarden en plandrempels voor benzeen

#### Wm voorschrift 7.1

Voor benzeen gelden de volgende grenswaarden voor de bescherming van de gezondheid van de mens, gedefinieerd als jaargemiddelde concentraties:

- tot 1 januari 2010, 10 microgram per m<sup>3</sup>;
- met ingang van 1 januari 2010, 5 microgram per m<sup>3</sup>.

#### Wm voorschrift 7.2

Voor benzeen gelden de volgende plandrempels voor de bescherming van de gezondheid van de mens, gedefinieerd als jaargemiddelde concentraties:

- a. in 2006, 9 microgram per m<sup>3</sup>;
- b. in 2007, 8 microgram per m<sup>3</sup>;
- c. in 2008, 7 microgram per m<sup>3</sup>;
- d. in 2009, 6 microgram per m<sup>3</sup>.

Bron: [http://wetten.overheid.nl/BWBR0003245/Bijlage2/geldigheidsdatum\\_16-02-2009](http://wetten.overheid.nl/BWBR0003245/Bijlage2/geldigheidsdatum_16-02-2009)

### Richtwaarden, informatiedrempel en alarmprempel voor ozon

#### Wm voorschrift 8.1

- a. Voor ozon geldt de volgende richtwaarde voor de bescherming van de gezondheid van de mens, die op 1 januari 2010 zoveel mogelijk is bereikt: 120 microgram per m<sup>3</sup> als hoogste acht-uurgemiddelde concentratie van een dag, waarbij geldt dat deze gemiddeld over drie jaar op maximaal vijftientig dagen per kalenderjaar mag worden overschreden.
- b. Voor ozon geldt de volgende richtwaarde voor de bescherming van de gezondheid van de mens, die op 1 januari 2020 zoveel mogelijk is bereikt: 120 microgram per m<sup>3</sup> als hoogste acht-uurgemiddelde concentratie van een dag, gedurende een kalenderjaar.

#### Wm voorschrift 8.2

- a. Voor ozon geldt 18 000 (microgram per m<sup>3</sup>) • uur als AOT40-waarde voor de periode van 1 mei tot en met 31 juli, gemiddeld over vijf jaar, als richtwaarde die op 1 januari 2010 zoveel mogelijk is bereikt, ter bescherming van de vegetatie.
- b. Voor ozon geldt 6 000 (microgram per m<sup>3</sup>) • uur als AOT40-waarde voor de periode van 1 mei tot en met 31 juli van een kalenderjaar als richtwaarde die op 1 januari 2020 zoveel mogelijk is bereikt, ter bescherming van de vegetatie.

#### Wm voorschrift 8.3

Voor ozon geldt een informatiedrempel van 180 microgram per m<sup>3</sup> als uurgemiddelde concentratie.

#### Voorschrift 8.4

Voor ozon geldt een alarmprempel van 240 microgram per m<sup>3</sup> als uurgemiddelde concentratie.

Bron: [http://wetten.overheid.nl/BWBR0003245/Bijlage2/geldigheidsdatum\\_16-02-2009](http://wetten.overheid.nl/BWBR0003245/Bijlage2/geldigheidsdatum_16-02-2009)

### Richtwaarde voor arseen

#### Wm voorschrift 9.1

Voor arseen geldt 6 nanogram per m<sup>3</sup> als jaargemiddelde concentratie, gedefinieerd als het totale gehalte arseen in de PM<sub>10</sub> fractie, als richtwaarde die op 1 januari 2013 zo veel mogelijk is bereikt, voor de bescherming van de gezondheid van de mens en het milieu.

Bron: [http://wetten.overheid.nl/BWBR0003245/Bijlage2/geldigheidsdatum\\_16-02-2009](http://wetten.overheid.nl/BWBR0003245/Bijlage2/geldigheidsdatum_16-02-2009)

### Richtwaarde voor cadmium

#### Wm voorschrift 10.1

Voor cadmium geldt 5 nanogram per m<sup>3</sup> als jaargemiddelde concentratie, gedefinieerd als het totale gehalte cadmium in de PM<sub>10</sub> fractie, als richtwaarde die op 1 januari 2013 zo veel mogelijk is bereikt, voor de bescherming van de gezondheid van de mens en het milieu.

Bron: [http://wetten.overheid.nl/BWBR0003245/Bijlage2/geldigheidsdatum\\_16-02-2009](http://wetten.overheid.nl/BWBR0003245/Bijlage2/geldigheidsdatum_16-02-2009)

### Richtwaarde voor nikkel

#### Wm voorschrift 11.1

Voor nikkel geldt 20 nanogram per m<sup>3</sup> als jaargemiddelde concentratie, gedefinieerd als het totale gehalte nikkel in de PM<sub>10</sub> fractie, als richtwaarde die op 1 januari 2013 zo veel mogelijk is bereikt, voor de bescherming van de gezondheid van de mens en het milieu.

*Bron: [http://wetten.overheid.nl/BWBR0003245/Bijlage2/geldigheidsdatum\\_16-02-2009](http://wetten.overheid.nl/BWBR0003245/Bijlage2/geldigheidsdatum_16-02-2009)*

### **Richtwaarde voor benzo(a)pyreen**

Wm voorschrift 12.1

Voor benzo(a)pyreen geldt 1 nanogram per m<sup>3</sup> als jaargemiddelde concentratie, gedefinieerd als het totale gehalte benzo(a)pyreen in de PM<sub>10</sub> fractie, als richtwaarde die op 1 januari 2013 zo veel mogelijk is bereikt, voor de bescherming van de gezondheid van de mens en het milieu.

*Bron: [http://wetten.overheid.nl/BWBR0003245/Bijlage2/geldigheidsdatum\\_16-02-2009](http://wetten.overheid.nl/BWBR0003245/Bijlage2/geldigheidsdatum_16-02-2009)*

## Bijlage 2 : Mac waarden

### **Benzeen**

ISO-naam van de stof	Benzeen (B2)
CAS-nummer	71-43-2
TGG 8 uur	3.250 µg/m <sup>3</sup>
B2	Met ingang van 1 oktober 2008: geplaatst op de lijst met wettelijke grenswaarden voor kankerverwekkende stoffen, vastgesteld volgens de risicobenadering

### **Benzo(A)pyreen**

ISO-naam van de stof	Benzo(a)pyreen (B2)
CAS-nummer	50-32-8
TGG 8 uur	550 ng/m <sup>3</sup> (1)
B2	Met ingang van 1 oktober 2008: geplaatst op de lijst met wettelijke grenswaarden voor kankerverwekkende stoffen, vastgesteld volgens de risicobenadering
(1)	Grenswaarde treedt in werking met ingang van 1 oktober 2008

### **Koolmonoxide**

ISO-naam van de stof	Koolmonoxide
CAS-nummer	630-08-0
TGG 8 uur	29000 µg/m <sup>3</sup>

### **Lood**

ISO-naam van de stof	Loodchromaat (als Cr) (B2)
CAS-nummer	7758-97-6
TGG 15 min	25 µg/m <sup>3</sup>

### **Ozon**

ISO-naam van de stof	Ozon
CAS-nummer	10028-15-6
TGG 8 uur	120 µg/m <sup>3</sup> (TGG 1 uur)

### **PM<sub>10</sub> & PM<sub>2,5</sub>**

	<b>Fase 1 &gt;1 januari 2005</b>	<b>Fase 2 &gt;1 januari 2010</b>
<b>Jaargemiddelde</b>	40 µg/m <sup>3</sup>	20 µg/m <sup>3</sup>
<b>Daggemiddelde (24uur)</b>	50 µg/m <sup>3</sup>	50 µg/m <sup>3</sup>
<b>Maximum aantal overschrijdingen per jaar</b>	35	7

***Stikstofdioxide***

ISO-naam van de stof	Stikstofdioxide
CAS-nummer	10102-44-0
TGG 8 uur	400 µg/m <sup>3</sup>
TGG 15 min	1.000 µg/m <sup>3</sup>

***Zwavedioxide***

ISO-naam van de stof	Zwavedioxide
CAS-nummer	7446-09-5
TGG 8 uur	1.300 µg/m <sup>3</sup>
TGG 15 min	2.600 µg/m <sup>3</sup>

### Bijlage 3 : PIARC

*"PIARC will be the world leader in the exchange of knowledge on roads and road transport policy and practices within an integrated sustainable transport context."*

PIARC (The World Road Association) is een niet politieke non profit organisatie. De primaire doelstelling van deze organisatie is het uitwisselen van kennis op het vlak van wegen en transport. De organisatie kent onder meer een aantal technische comités,. In deze comités worden specifiek aspecten van het totale spectrum behandeld. Eén van die comités betreft Tunneloperation. In dit comité wordt door een groot aantal landen deelgenomen, waaronder Nederland.

<http://www.piarc.org/>

Enkele doelstelling van Piarc zijn:

- Piarc wil een leidend internationaal analyse en discussie forum zijn m.b.t. het vraagstukken die gerelateerd zijn aan wegen en wegtransport
- Piarc wil oplossingen op gebied van wegen en wegtransport ontdekken, ontwikkelen en verspreiden.
- Piarc wil efficiënte hulpmiddelen, voor het nemen van beslissingen, inzake wegen en wegtransport ontwikkelen en promoten

Het Piarc rapport *"Road Tunnels: Emissions, Ventilation, Environment (1999)"* geeft uitwerking aan maximale grenswaarden van fijnstof en stikstofdioxide in tunnels. Deze waarden worden in meerdere onderzoeken als leidraad gebruikt. Er zijn geen tegenonderzoeken bekend die de resultaten van Piarc in twijfel trekken. Tevens zijn er geen aansluitende of op het rapport verdergaande onderzoeken uit de literatuurstudie voortgekomen waardoor de Piarc rapportage vooralsnog de basis is voor maximale grenswaarden in tunnels.

**Enkele tekstfragmenten uit een relevante PIARC study:**

#### **Tests in an Environmental Chamber**

The findings on exposure to NO<sub>2</sub> (about 500 µg/m<sup>3</sup> during 30 minutes) from the four studies in the environmental chamber show that:

- there is a significant effect of a single exposure to NO<sub>2</sub> and histamine (non-specific stimulus) on the respiratory response.
- exposure to NO<sub>2</sub> increases the respiratory response to allergens (specific stimulus).
- exposure to NO<sub>2</sub> followed by a low dose of allergen causes an increase in the early asthmatic reaction. The allergen dose was so low that it could not by itself cause any change in the lung function measured.
- exposure to NO<sub>2</sub> causes an increase in the respiratory response during the late phase after an allergic stimulation with a high dose of allergen, but not after a low dose.
- there is a small but significant intensification of both the early and late phase asthmatic responses to daily exposure to NO<sub>2</sub> and low doses of allergen.
- there is an influence on lung function after exposure to NO<sub>2</sub> and a second stimulus, either histamine or allergen.
- there are small changes on blood cells and mediators reflecting inflammatory reactions of the respiratory tract. Interpretation of these small changes is difficult.

The studies have shown that a short exposure to an ambient concentration of NO<sub>2</sub> enhances respiratory tract responses to histamine and allergens. In these studies histamine reflects exposure to non-specific stimuli like cold air, exercise, etc.

**Health Effects of 30-minute Exposure to Air Pollutants in a Road Tunnel Tests Carried out**

Twenty volunteers with allergic asthma were exposed for 30 minutes in a Stockholm city road tunnel. The subjects were exposed on two separate occasions at least four weeks apart during December 1996 to February 1997.

The tunnel has a length of about 1,500 m and is used by about 35,000 vehicles per day. The car was placed 1,000 m from the entrance, in the northbound tunnel tube. The median NO<sub>2</sub> level during exposure was 313 µg/m<sup>3</sup> (range 203-462). Median PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> were 170 (103-613) and 95 (61-218) µg/m<sup>3</sup>.

Four hours after the exposure, the persons inhaled a low dose of allergen. These tests highlighted the following points:

- during the stay in the tunnel the effects related to the airways, such as irritation with increased tendency to cough, breathing discomfort and chest tightness, were small or moderate. The lung function measured as forced expiratory volume in one second was not influenced during the stay in the tunnel, and there was no clear association between levels of NO<sub>2</sub> or PM<sub>2.5</sub> and lung function during the following morning hours. However, it must be taken into account that all subjects had a bronchial asthma of a mild type with normal lung function.

- the asthmatic reaction induced by allergen inhalation four hours after the stay in the tunnel was significantly enhanced, measured both as fall in lung function immediately after stimulation (early phase reaction), and an increase in symptoms of asthma during the following evening and night during the late phase. The enhancement of the asthmatic reaction during the early phase was related both to high NO<sub>2</sub> (> 300 µg/m<sup>3</sup>) and PM<sub>2.5</sub> (> 100 µg/m<sup>3</sup>) levels. It is thus reasonable to assume that exposure to air pollutants during half an hour in a road tunnel can increase the bronchial response to allergens several hours after the exposure in people with allergic asthma.

#### **Discussion**

In conclusion, short-term exposure to air polluted at a median level of 0.17ppm in a road tunnel during rush hours enhanced the asthmatic response to an allergen inhaled several hours later, although lung function during the exposure was not affected. The adverse effect was related to exposure levels of NO<sub>2</sub> and to some extent to particles, without being able to separate their effects. Exposure time in tunnels varies normally from a couple of minutes up to 20 - 30 minutes in longer tunnels, over 3-4 km, during rush hour with congested traffic. It is, however, possible that the exposure during the trips to and from the test site of the subjects in the tunnel exposure study above, could have influenced the results. At present, studies on cumulative effects of NO<sub>2</sub> are not available and should be carried out to clear this important point. It would also be advisable to conduct "blind" tests in an environmental chamber to avoid subjective bias.

## **V. CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS**

**Yves DARPAS (France)**

### **Existing Situation**

Until now, ventilation systems were designed so as to dilute CO and reduce opacity due to soot emissions by Diesel engines. The air flows required for the dilution of CO also ensured dilution of the other gaseous pollutants, in particular nitrogen oxides.

### **New Data and Trends**

CO emissions from vehicles have been significantly reduced owing to engine improvements and the significant increase in the proportion of Diesel engines in the vehicle fleet. The role of CO as a tracer of vehicle induced pollution for the design and control of tunnel ventilation systems is continuously decreasing, and taking into account a number of other noxious gaseous pollutants such as nitrogen oxides, in particular NO<sub>2</sub>, becomes necessary. NO<sub>2</sub> exposure studies carried out on humans show that NO<sub>2</sub> can affect healthy people for levels in the range of 4,000 µg/m<sup>3</sup> but that under 2,000 µg/m<sup>3</sup> no effect on lung function has been noted. These values apply to healthy people. The studies described in Chapter 2 of this paper show that for persons with allergies or asthmatic predisposition, values in the range of 500 µg/m<sup>3</sup> (0.27 ppm), without having direct effects, increase the sensitivity to allergic stimuli. It is not now possible to define harmless threshold levels for this sensitive population; moreover, the effect of exposure



time has not yet been quantified. It should also be emphasised that allergic reactions are not only limited to sensitive people and to their exposure to NO<sub>2</sub> in tunnels, but also to dust, pollen, and other allergenic elements to which they could be exposed elsewhere. The results of measurements carried out in tunnels show that the mean levels of NO<sub>2</sub> are much lower than the maximum levels acceptable for healthy people, but the decrease of emissions from vehicles is leading to a decrease in the ventilation capacity in new tunnels where the design criteria are referenced to CO and opacity levels.

#### **Consequences**

The consequences of the points outlined above are :

- “tracers” pollutants have to be reviewed taking into account new trends;
- NO<sub>2</sub> must be taken into account in the calculation of ventilation flows;
- acceptable threshold levels for “tracer” pollutants and especially NO<sub>2</sub> must be fixed on the basis of specific medical studies;

PIARC . 39 . 05.09.B - 2000

- existing studies concerning NO<sub>2</sub> are to be completed for sensitive people, investigating the influence of levels, exposure time and the consequences of the cumulative levels.

Blind tests should be carried out to remove subjectivity from these considerations;

- precise, reliable, easily maintained and inexpensive devices should be sought to measure tracer pollutants in tunnels;
- when these systems do not exist (NO<sub>2</sub> being a case in point) alternative approaches should be taken.

#### **Recommendations**

- It is necessary to take into account NO<sub>2</sub> in sizing and operating tunnel ventilation systems.

- The threshold limit recommended for healthy people is 2,000 µg/m<sup>3</sup> (1 ppm) for NO<sub>2</sub>; this threshold value leads to ventilation systems reasonably sized and coherent when compared with the needs of opacity criteria.

- In order to avoid oversizing ventilation systems, and by reference to environment regulations expressed in centiles, it is acknowledged that the recommended threshold levels should not be exceeded more than 2% of the time. Finally, for clarification, it should be noted that the design values given correspond to the average concentration levels throughout the length of a tunnel.

- In the absence of precise conclusions concerning sensitive people, it is up to each country to define its own policy, taking into account that the adoption of an excessively onerous design standard could increase tunnel construction costs to an unacceptable level in the face of public health concerns.

- The results of measurements carried out in tunnels and described in this report show that, for values in the range of acceptable threshold levels, the ratio NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> = 0.1 (volume) may be retained in order to evaluate NO<sub>2</sub> flows in tunnel.

- The calculation of air flows to dilute NO<sub>2</sub> can be done using the emission factors of NO<sub>x</sub> by vehicles issued in 1995 in the PIARC (05.06.B, 1996) report “Road tunnels, emissions, ventilation, environment” on the occasion of the Montreal Congress and the ratio NO<sub>2</sub> / NO<sub>x</sub> = 0.1 (in volume).

- Taking into account the lack of industrial equipment capable of measuring NO<sub>2</sub> levels within the required range, the permanent control of NO<sub>2</sub> is not necessary to appreciate the NO<sub>2</sub> levels and it is possible to assess NO<sub>x</sub> using the ratio NO<sub>2</sub> / NO<sub>x</sub> = 0.1 (in volume)

- Ventilation control based on traffic figures can be considered a valid alternative to control based on pollution measurement.

Bron [http://publications.piarc.org/ressources/publications\\_files/2/909,05-09-e.pdf](http://publications.piarc.org/ressources/publications_files/2/909,05-09-e.pdf)

## **Bijlage 4 : CFD Berekeningsresultaten van de concentraties in een tunnel a.g.v. het C2O en HD concept**

### **CFD Berekeningsresultaten van de concentraties in een tunnel a.g.v. het C<sup>2</sup>O concept**

Op de afbeeldingen van het concentratieverloop is linksonder aangegeven voor welke lengte tunnel 50-1000-1500 en bij welke snelheid 50-80 de berekening is uitgevoerd. Op ieder plaatje is links aangegeven welke stof het betreft CO, NO<sub>x</sub> of PM bij welke snelheid en staan de concentraties met kleuren in de legenda, uitgedrukt in g/m<sup>3</sup>.

Achtereenvolgens wordt het concentratieverloop in de tunnel bij de volgende tunnelconfiguraties in beeld gebracht:

500 meter; 50 km/h;

CO

NO<sub>x</sub>

PM

1000 meter; 50km/uur

CO

NO<sub>x</sub>

PM

1000 meter; 80km/uur

CO

NO<sub>x</sub>

PM

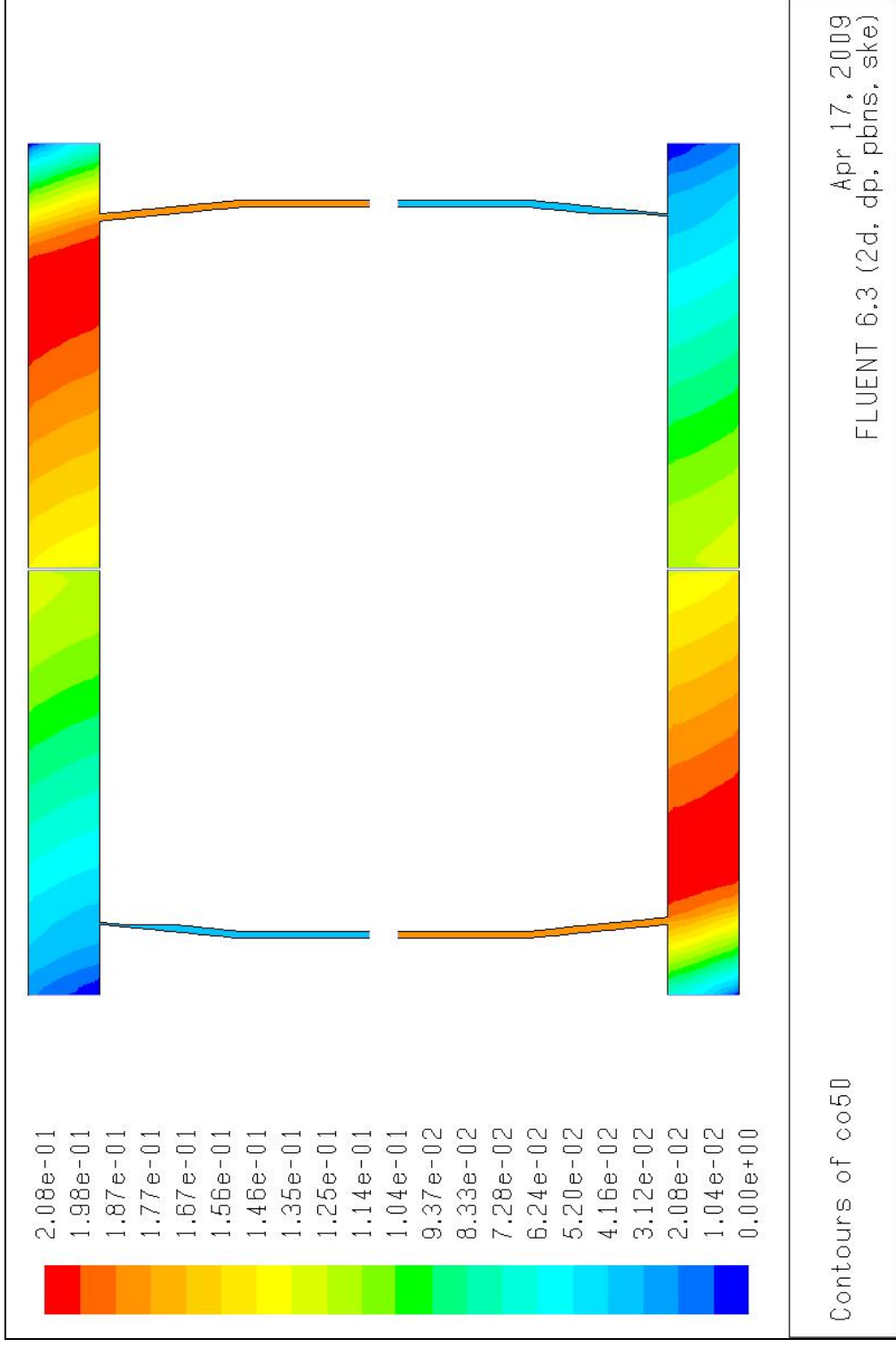
1500 meter; 80km/uur

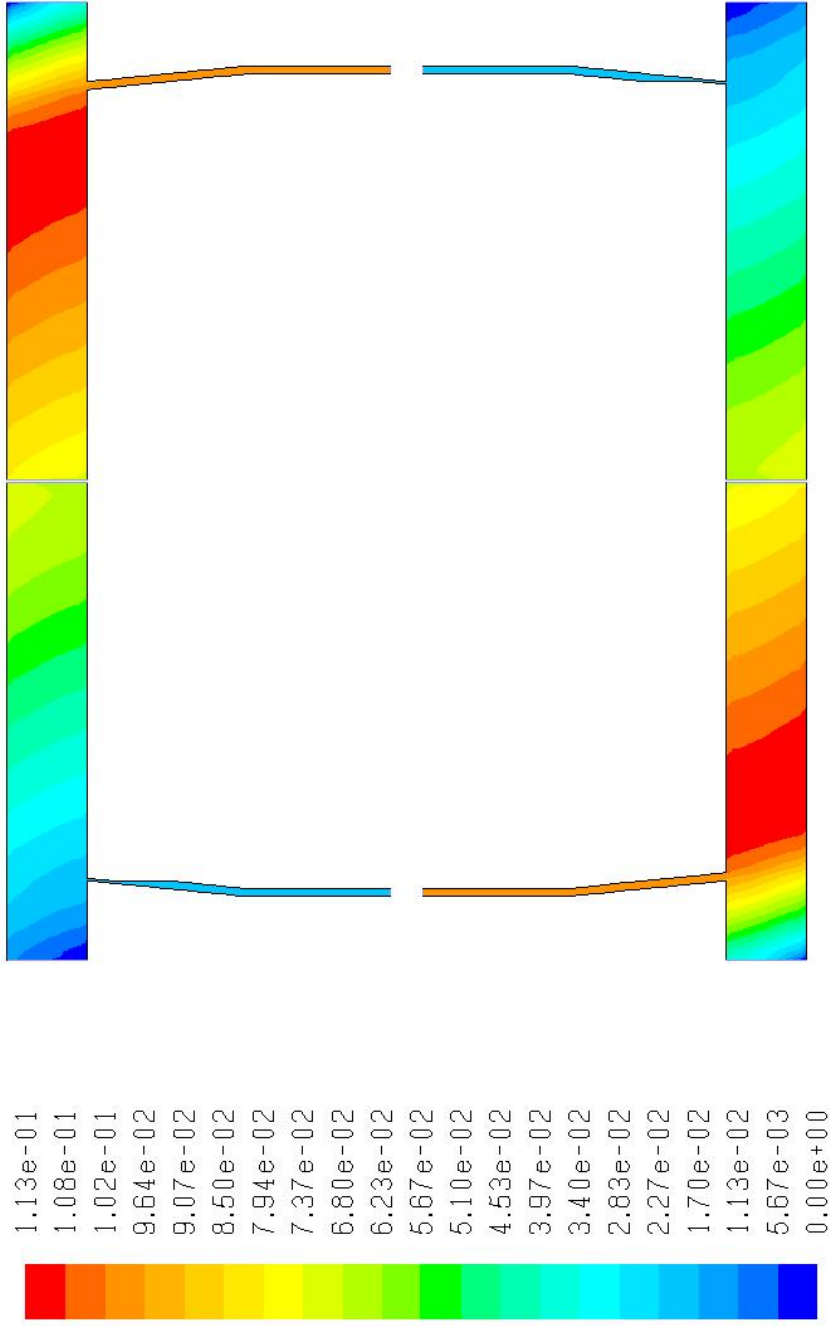
CO

NO<sub>x</sub>

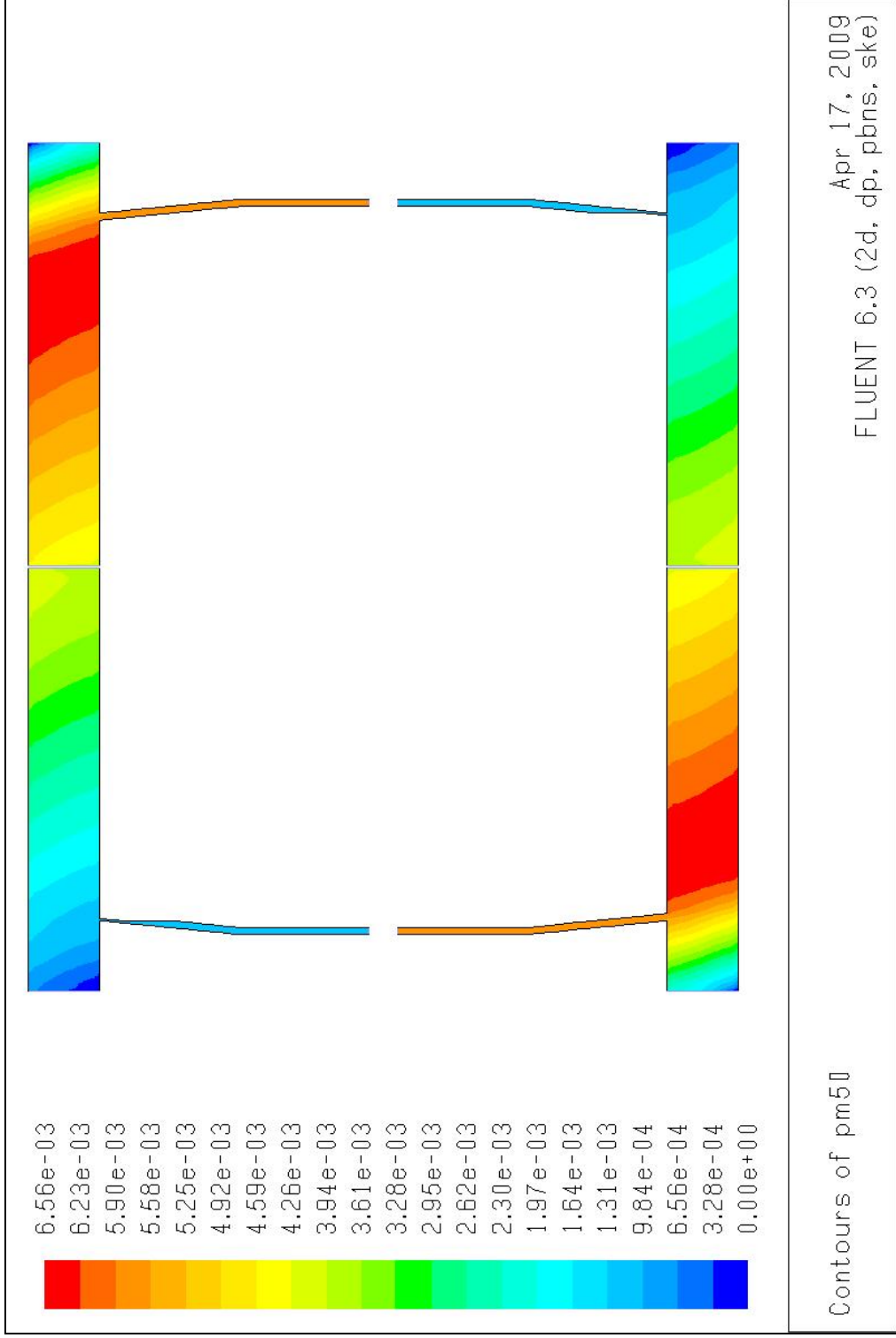
PM

500 meter; 50 km/h;

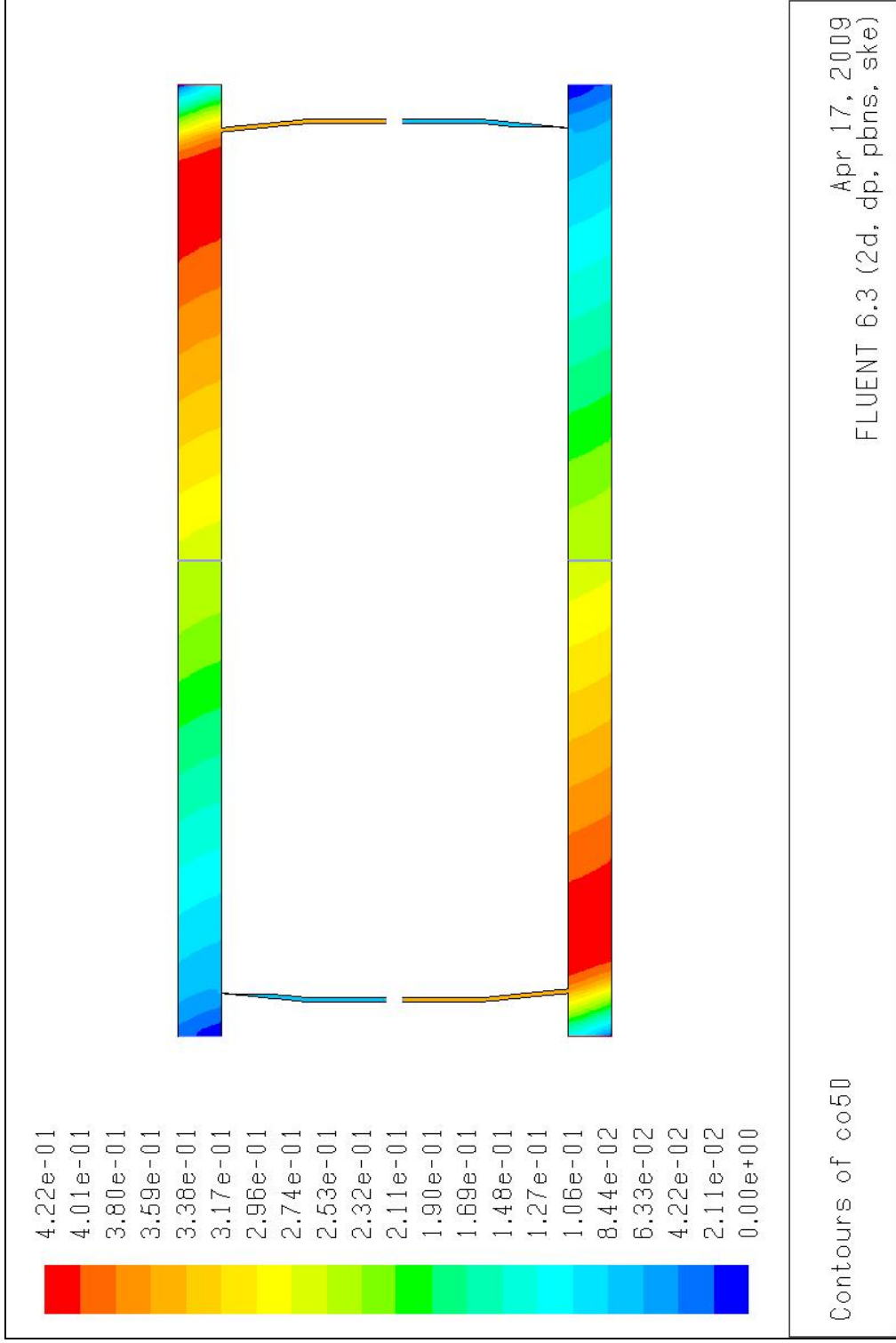


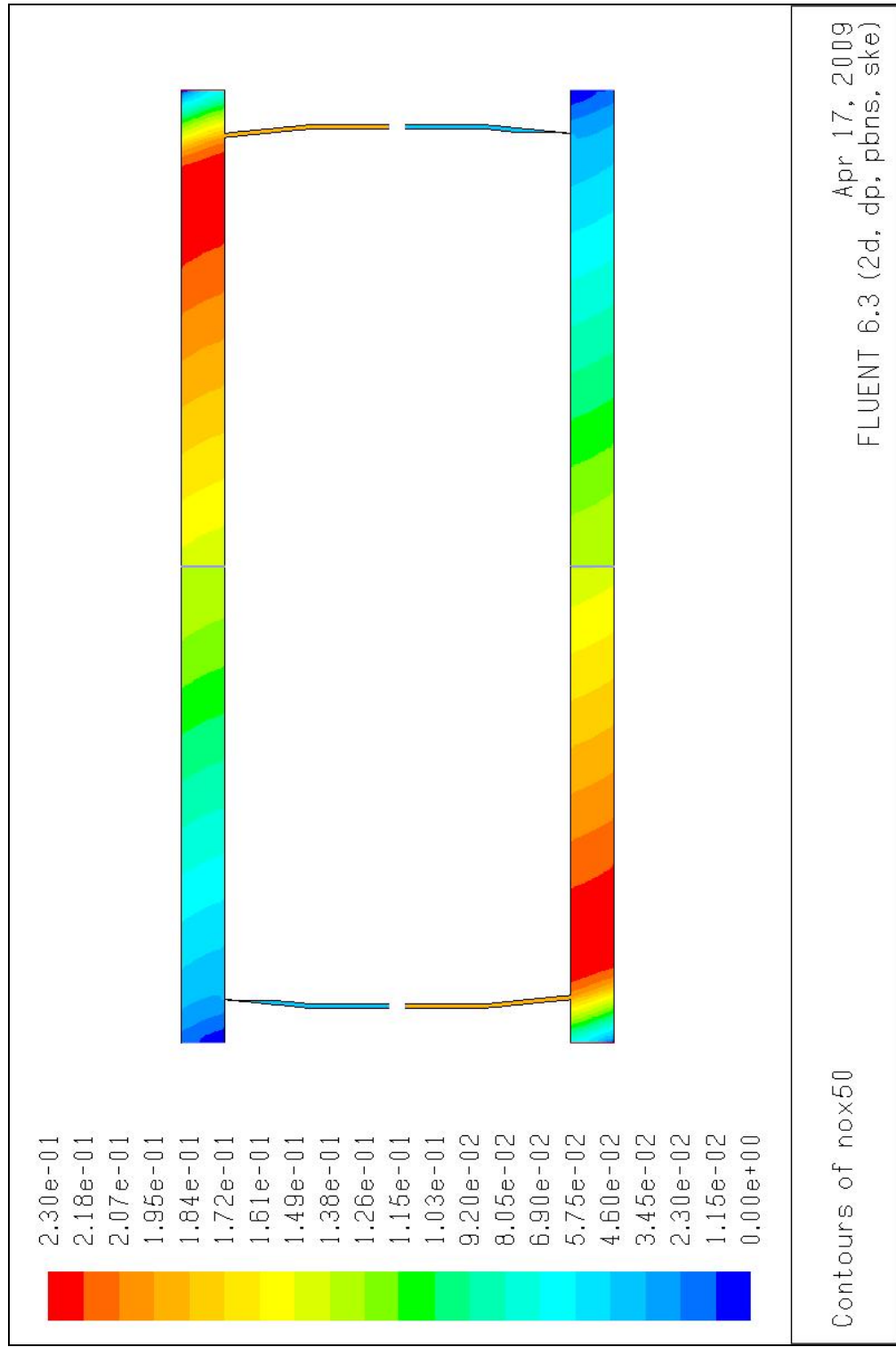


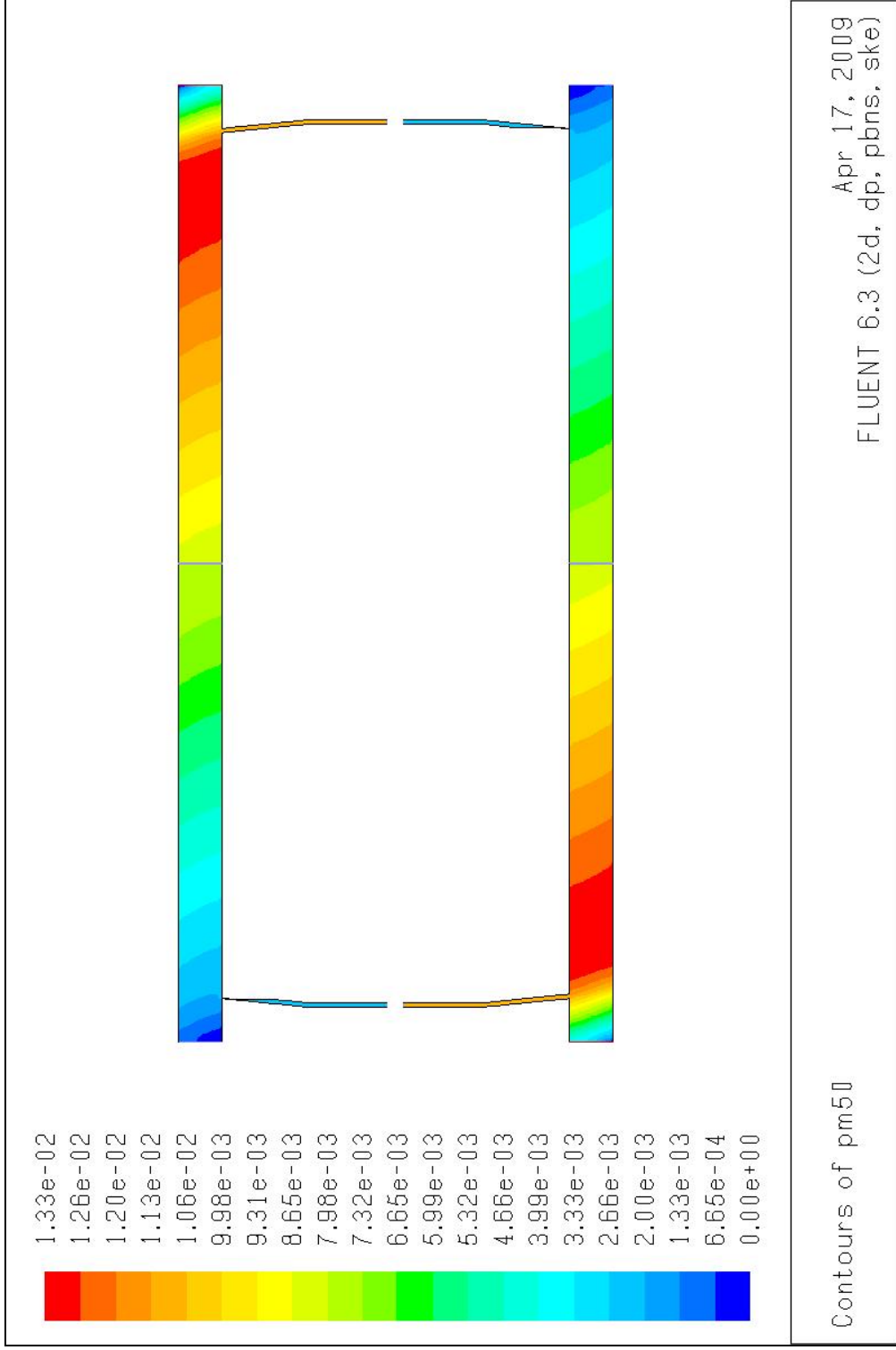
Contours of nox50  
500 meter; 50 km/h;  
Apr 17, 2009  
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, ske)



1000 meter; 50 km/h;

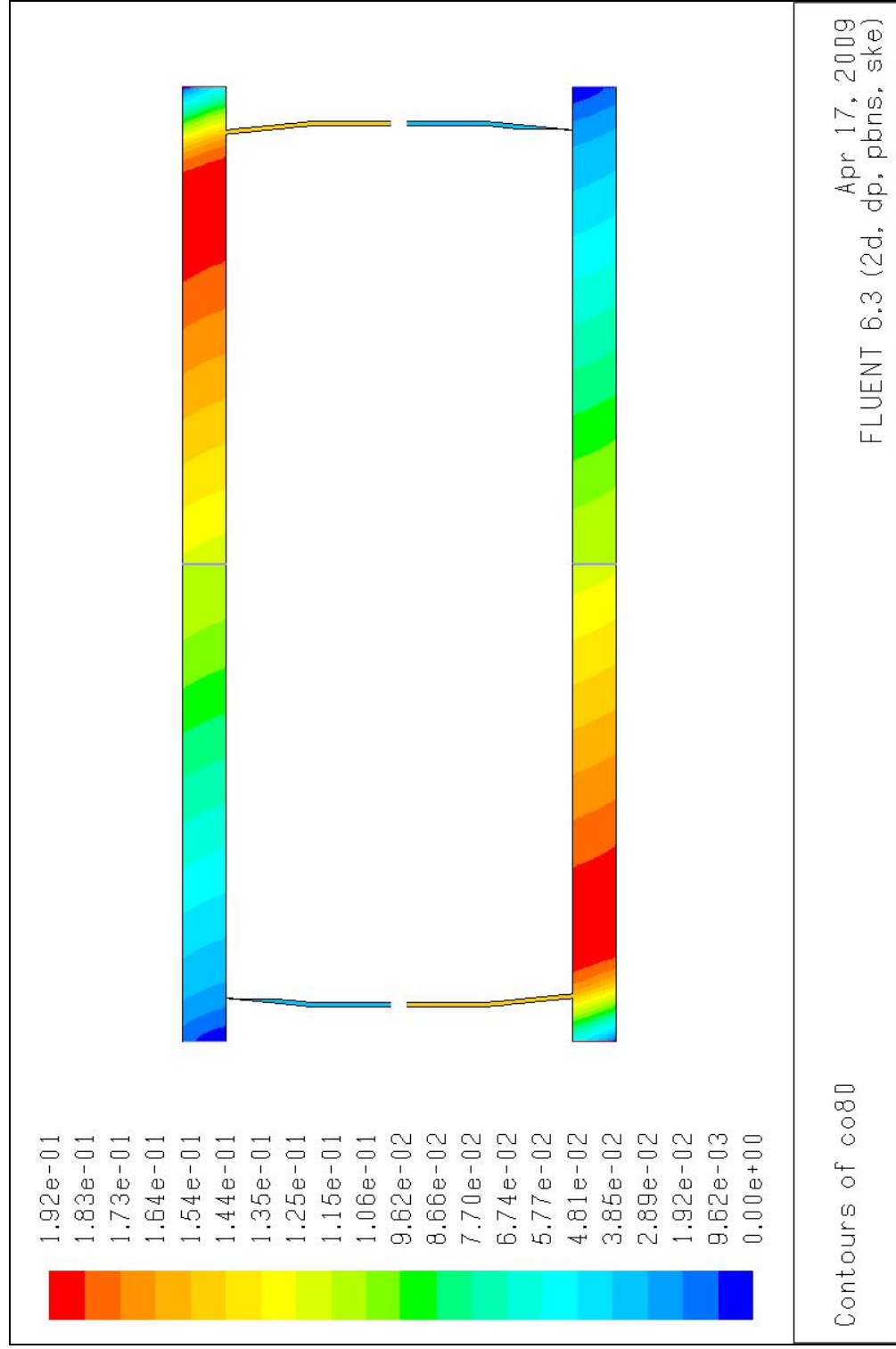


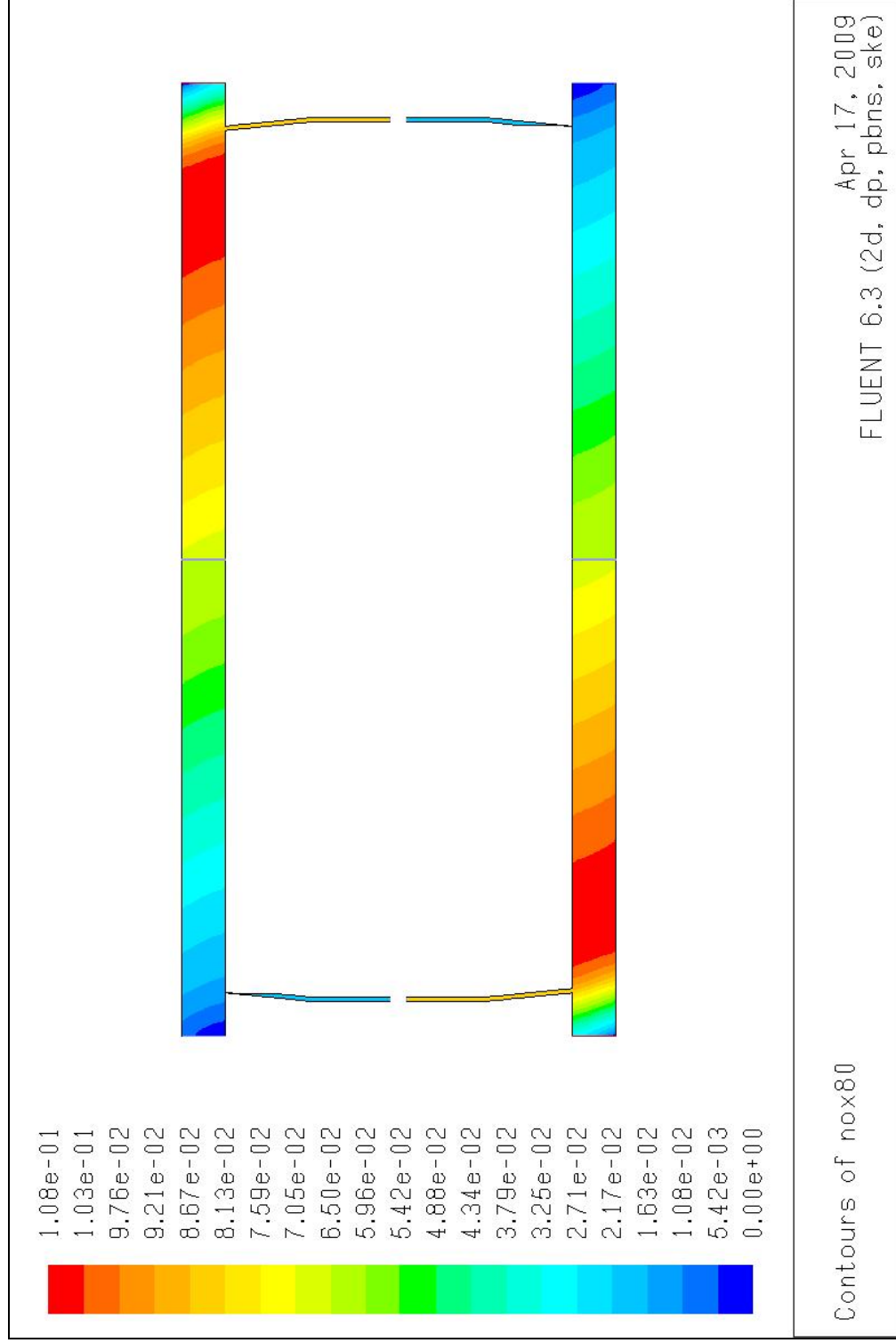


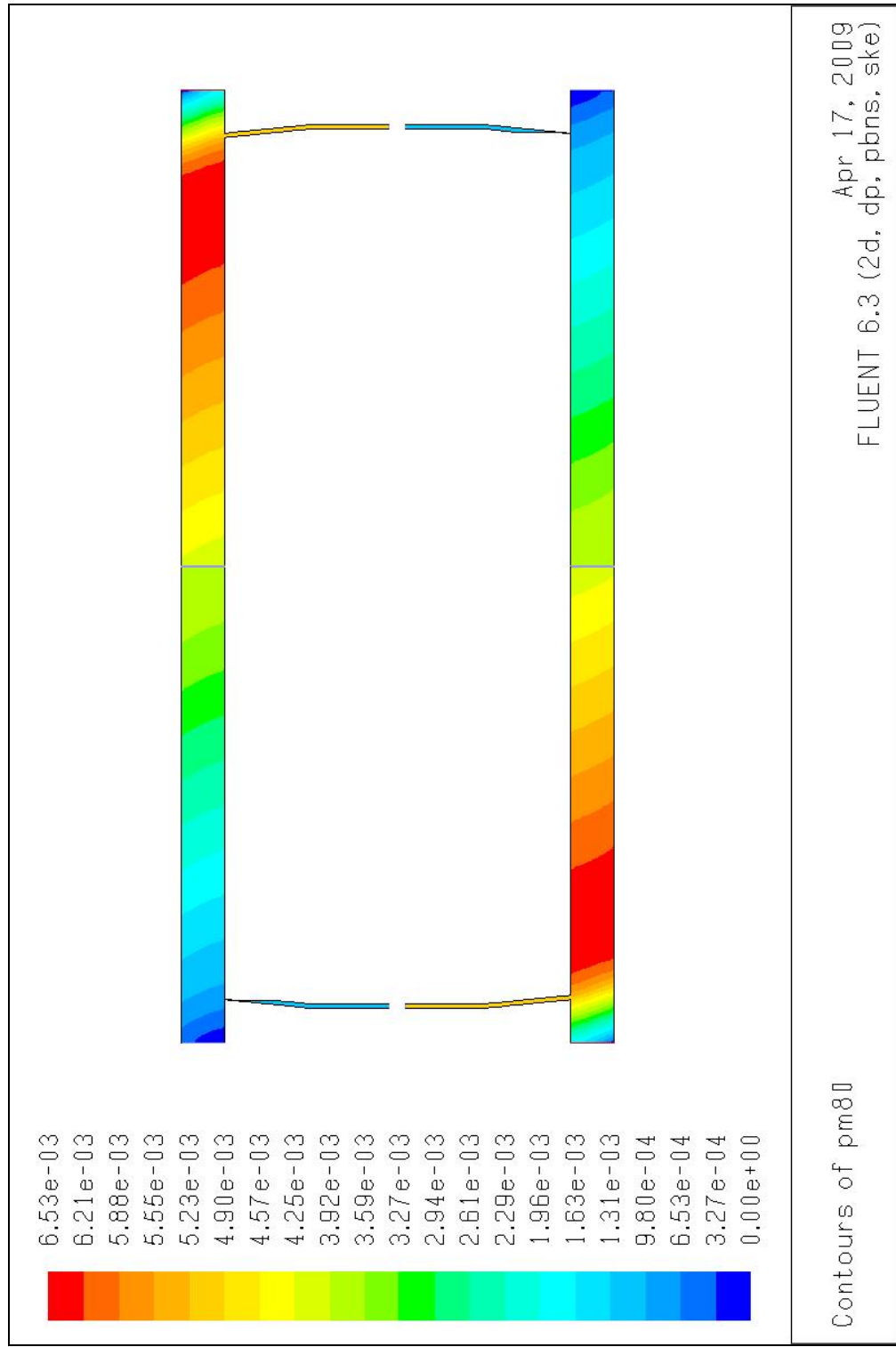




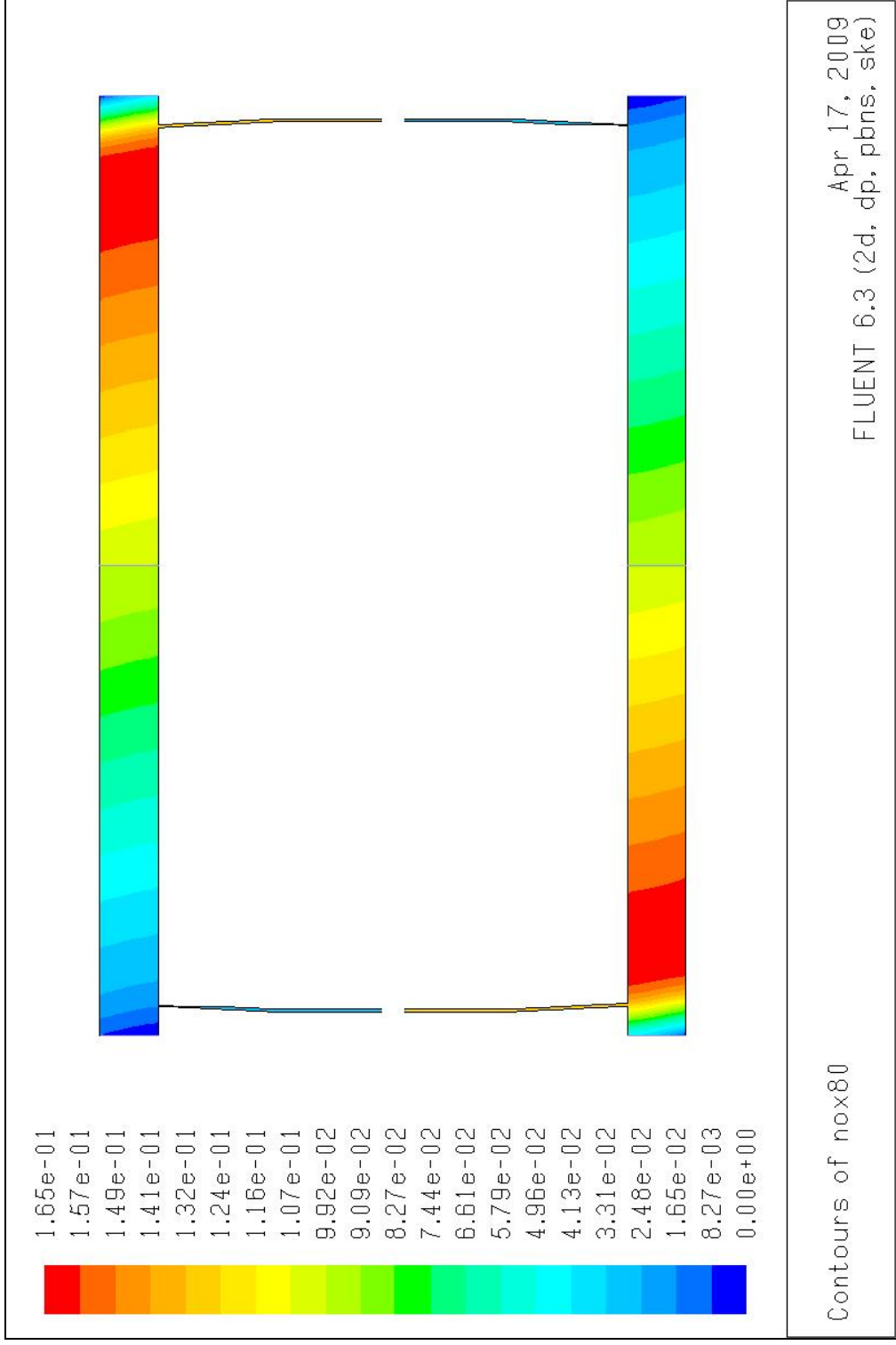
1000 meter; 80 km/h;



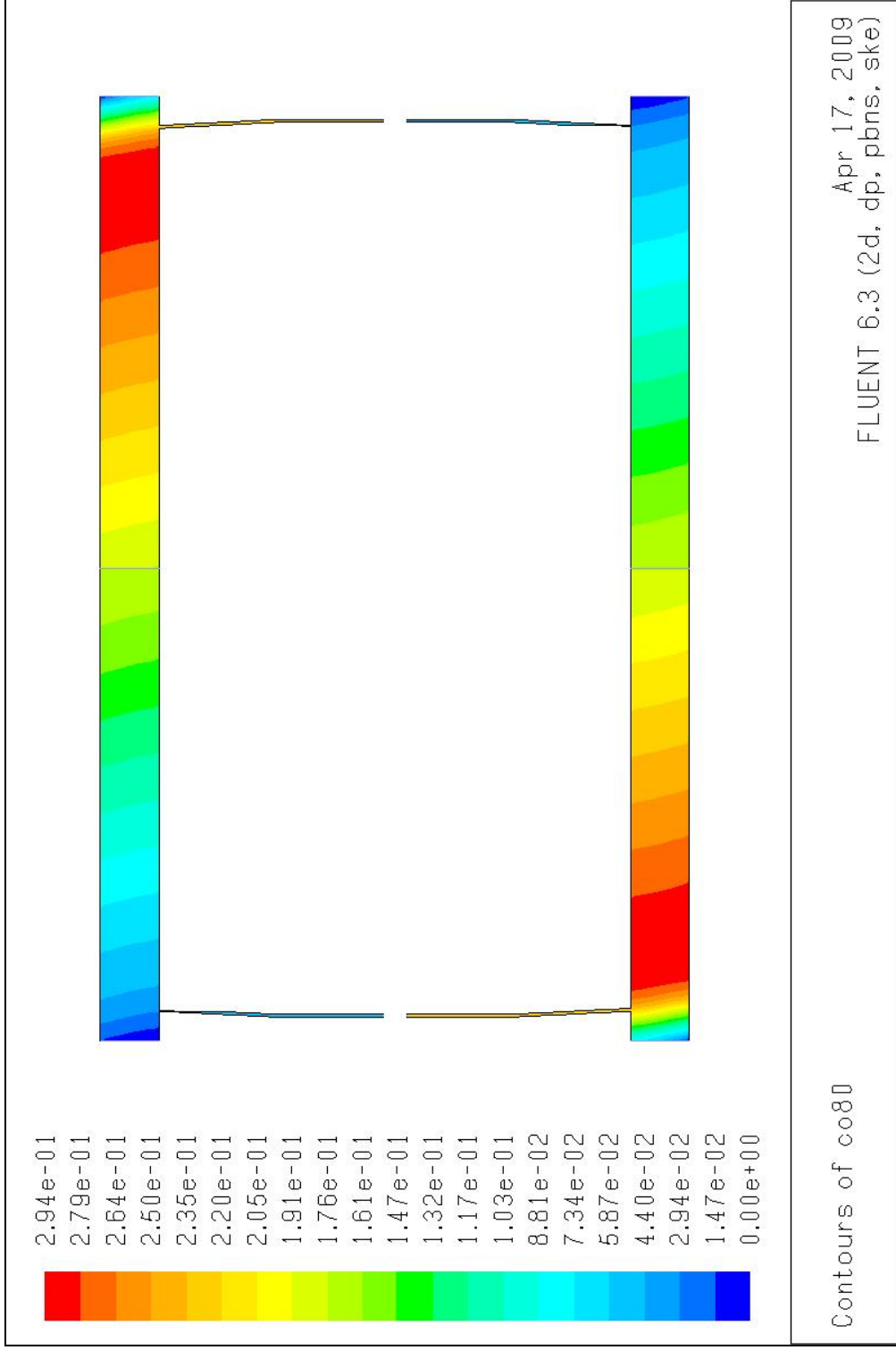


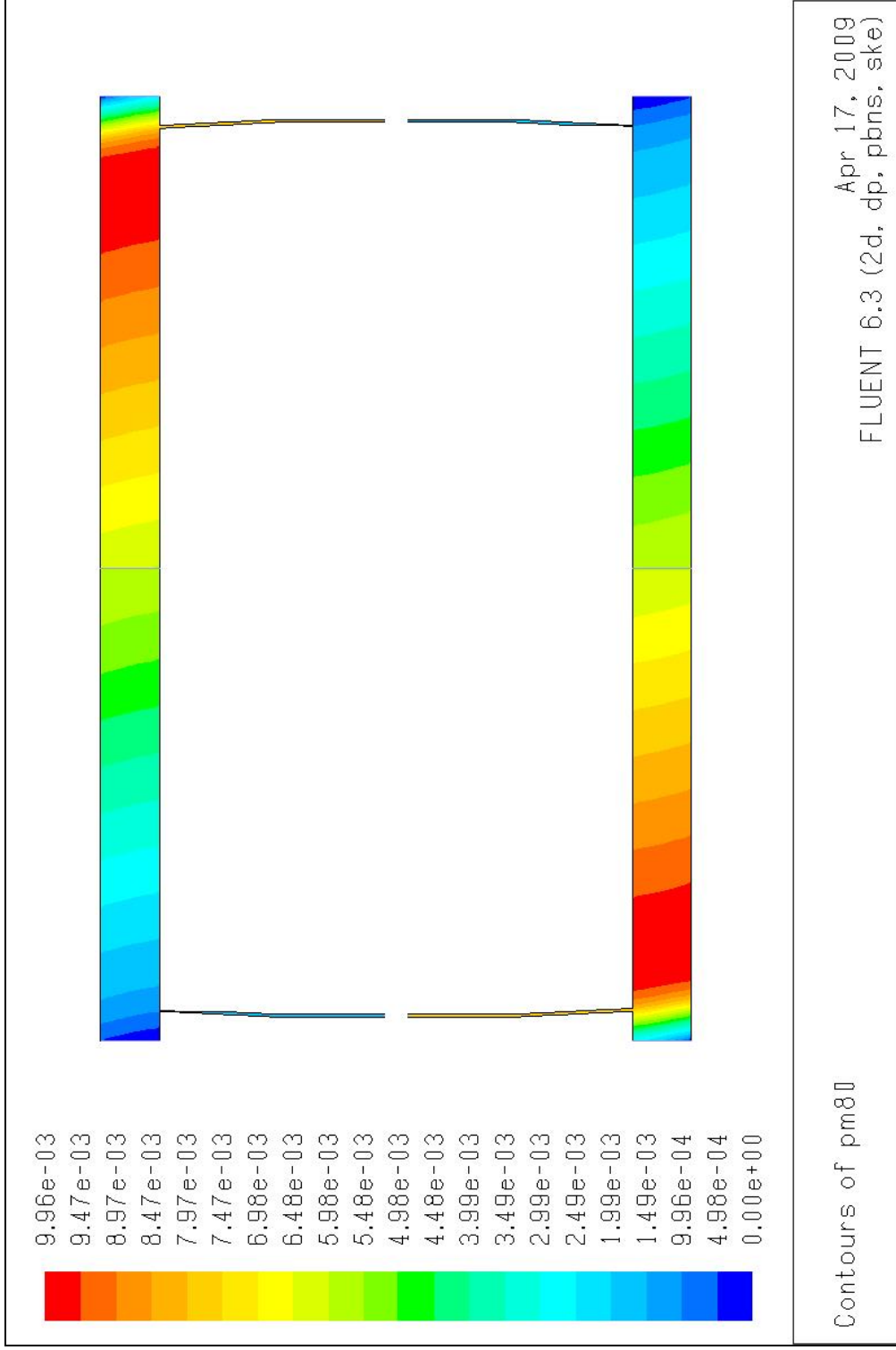


**1500 meter; 80 km/h**



**1500 meter; 80 km/h;**





## Bijlage 4.2 CFD Berekeningsresultaten van de concentraties in een tunnel a.g.v. het HD concept

Op de afbeeldingen van het concentratieverloop is rechtsonder aangegeven voor welke lengte tunnel 50-1000-1500 en bij welke snelheid 50-80 de berekening is uitgevoerd.

Op ieder plaatje is links is aangegeven welke stof het betreft CO, NOx of fijn stof PM bij welke snelheid en staan de concentraties met kleuren in de legenda, uitgedrukt in  $g/m^3$ .

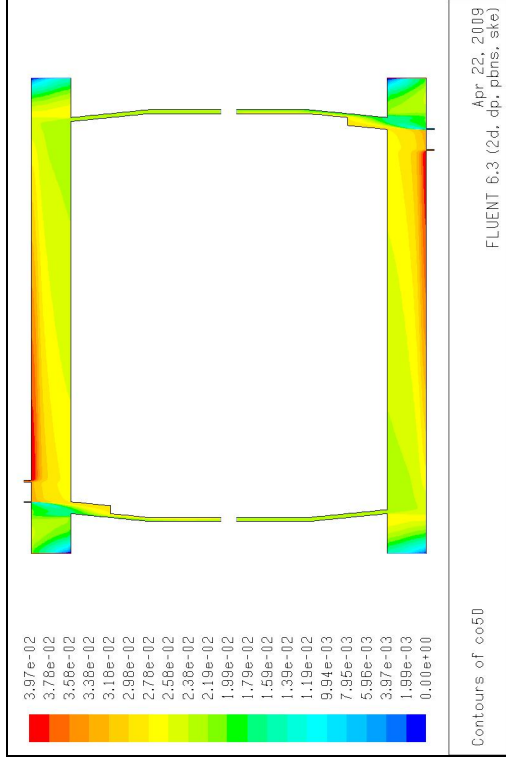
De toevoeging sc geeft aan dat deze afbeelding op dezelfde schaal is geprint als de afbeeldingen van het C<sup>2</sup>O concept.

Voor fijn stof PM is voor iedere tunnelconfiguratie een detail van de tunnelmond weergegeven met de effecten die het luchtmes op de luchtstromingen en de concentraties heeft.

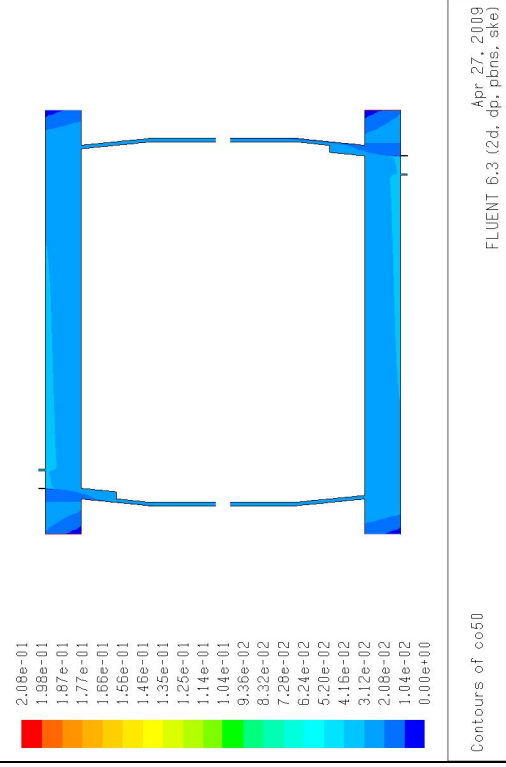
Achtereenvolgens worden de volgende tunnelconfiguraties in beeld gebracht:

500 meter; 50 km/h;	1000 meter; 50 km/uur	1000 meter; 80 km/uur	1500 meter; 80 km/uur
CO	CO	CO	CO
CO-sc	CO-sc	CO-sc	CO-sc
NOx	NOx	NOx	NOx
NOx-sc	NOx-sc	NOx-sc	NOx-sc
PM	PM	PM	PM
PM-sc	PM-sc	PM-sc	PM-sc
detail PM	detail PM	detail PM	detail PM

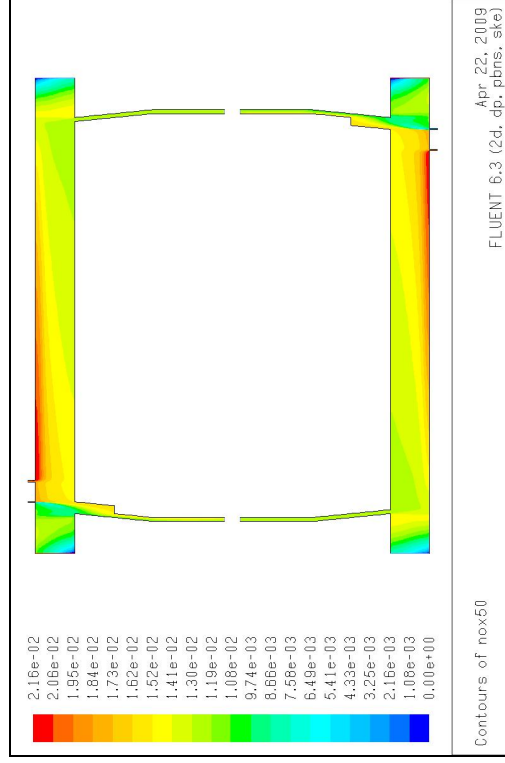
**500 meter; 50 km/h;**



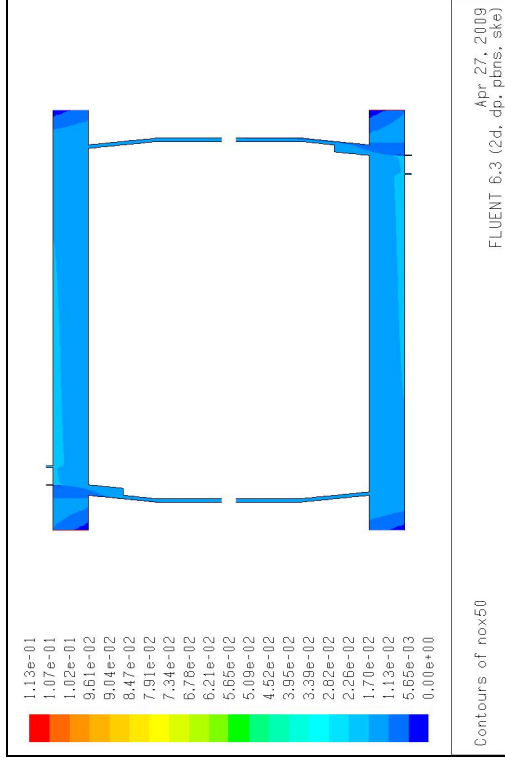
**500 meter; 50 km/h;** CO



**500 meter; 50 km/h;** CO-sc

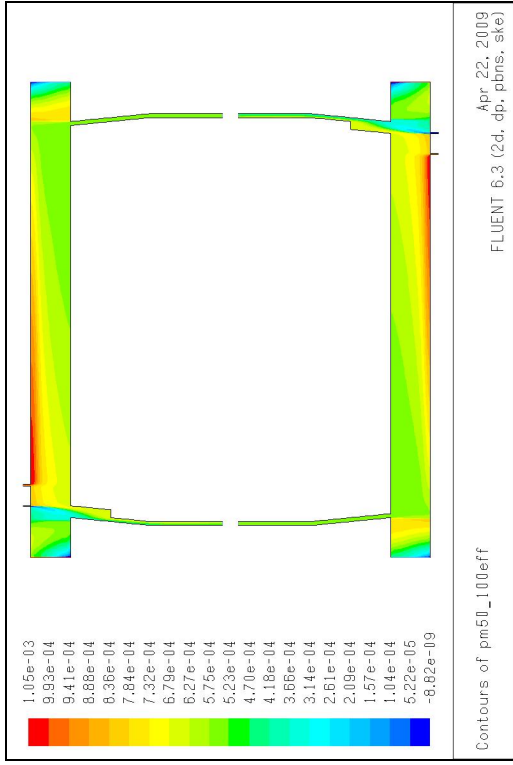


**500 meter; 50 km/h;** NOx

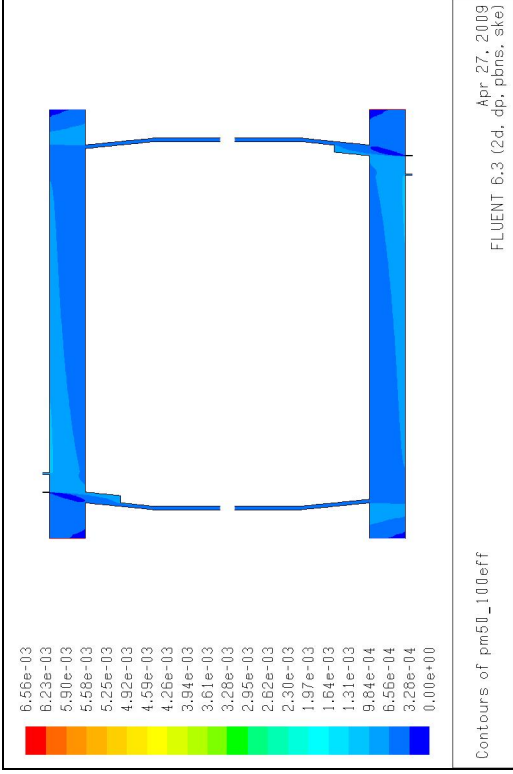


**500 meter; 50 km/h;** NOx-sc

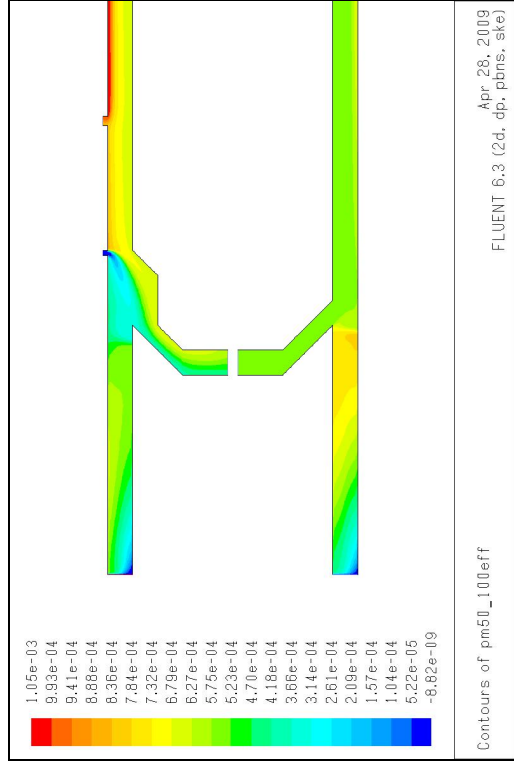




500 meter; 50 km/h; PM

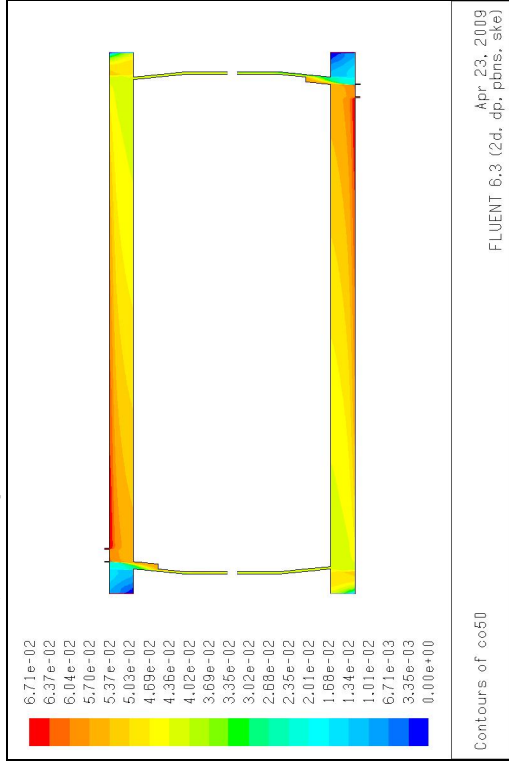


500 meter; 50 km/h; PM-sc

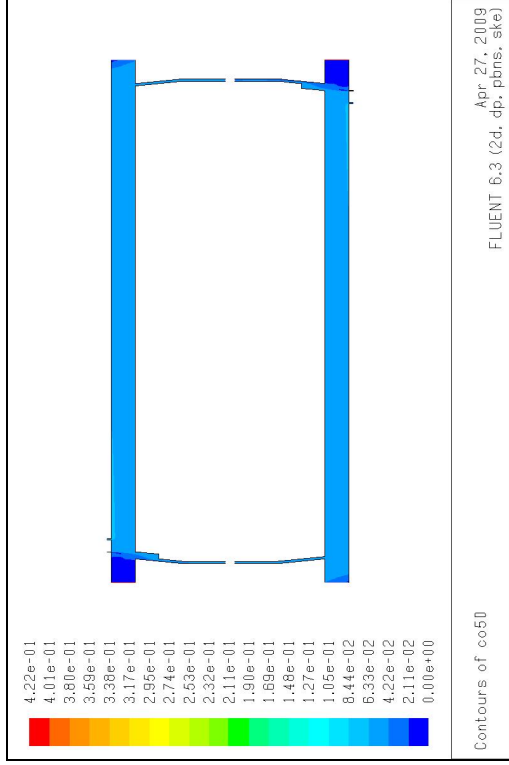


500 meter; 50 km/h; PM detail

**1000 meter; 50 km/uur**



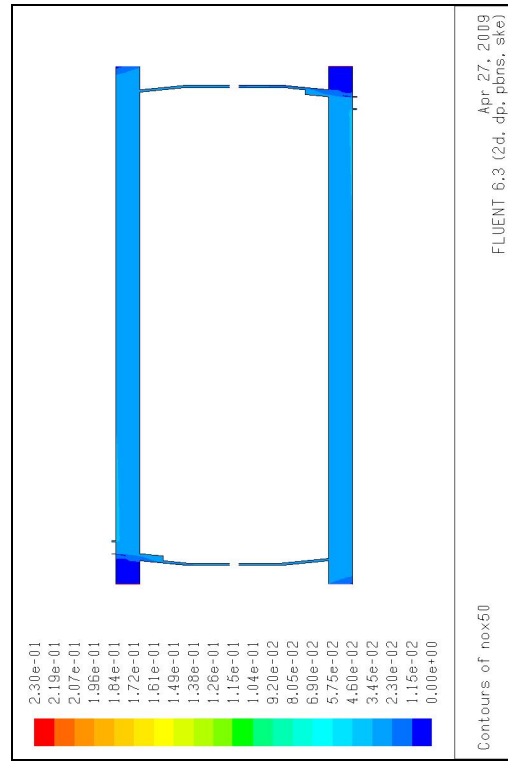
**1000 meter; 50 km/uur CO**



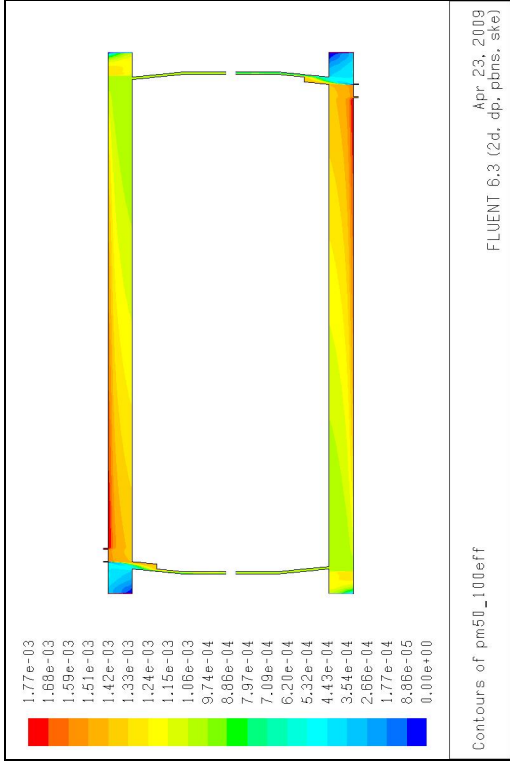
**1000 meter; 50 km/uur CO-sc**



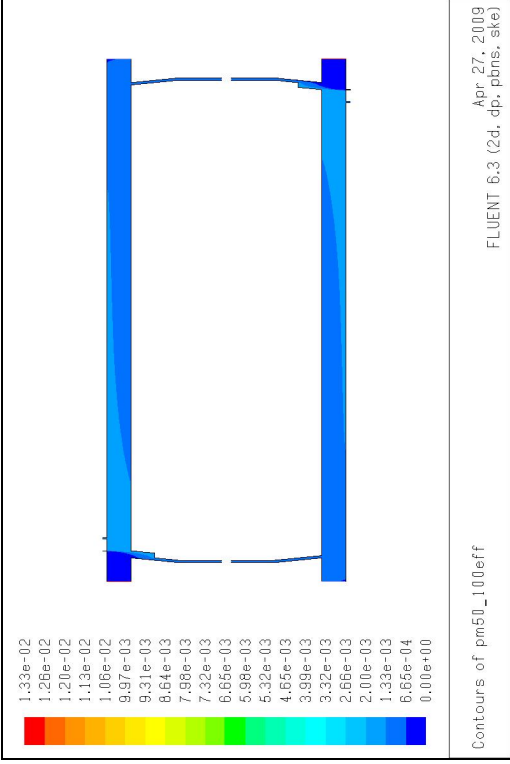
**1000 meter; 50 km/uur NOx**



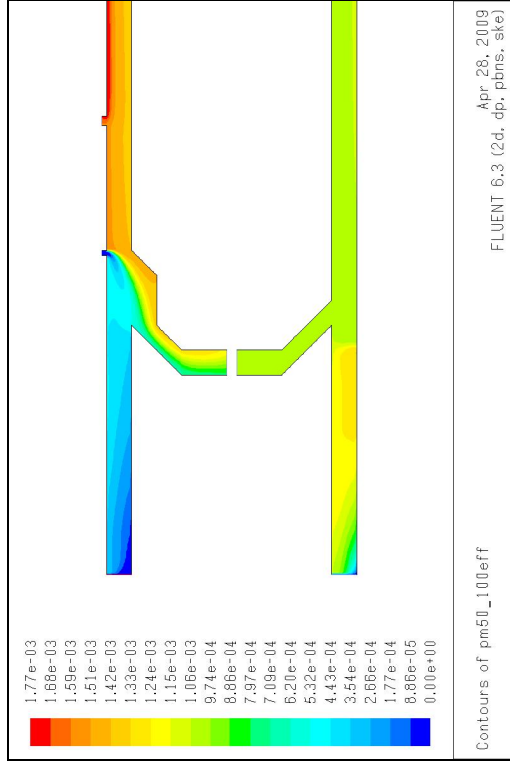
**1000 meter; 50 km/uur NOx-sc**



1000 meter; 50 km/uur PM

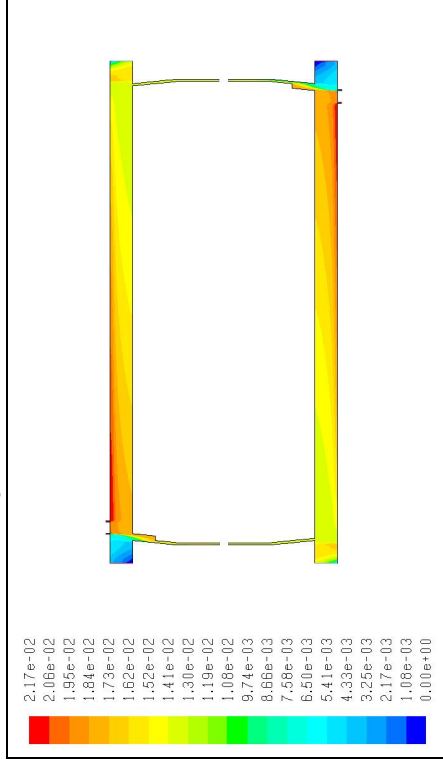


1000 meter; 50 km/uur PM-sc

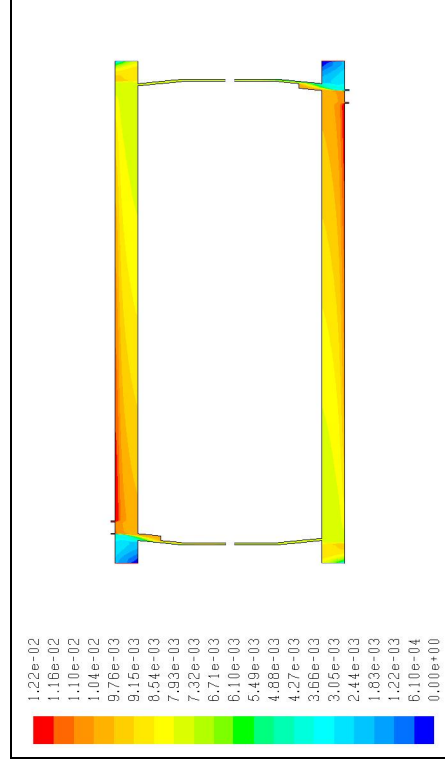


1000 meter; 50 km/uur PM detail

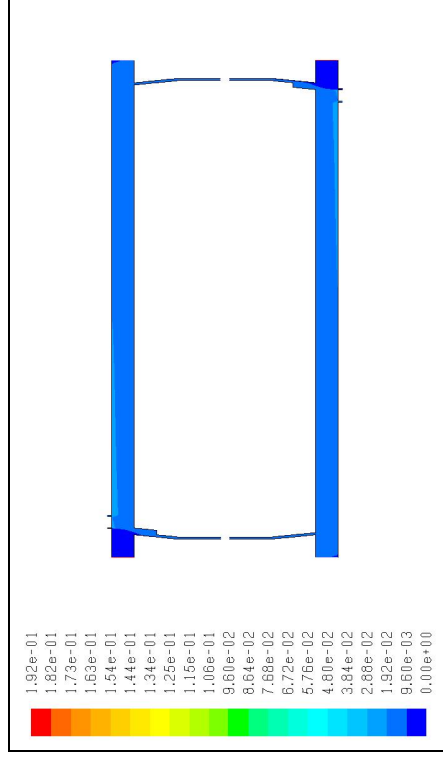
**1000 meter; 80 km/uur**



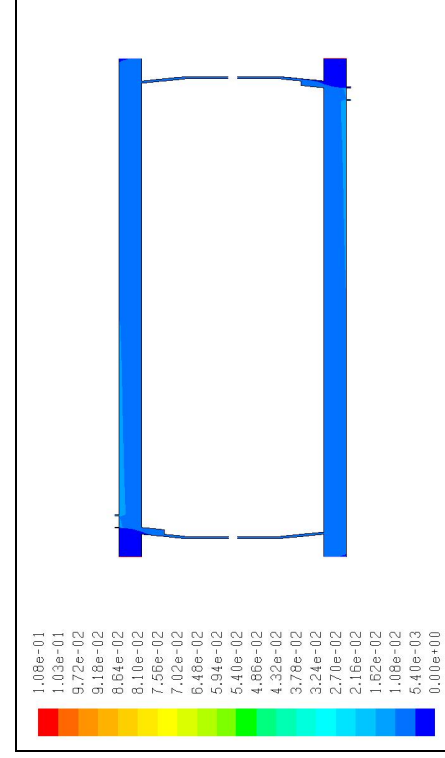
**1000 meter; 80 km/uur CO**



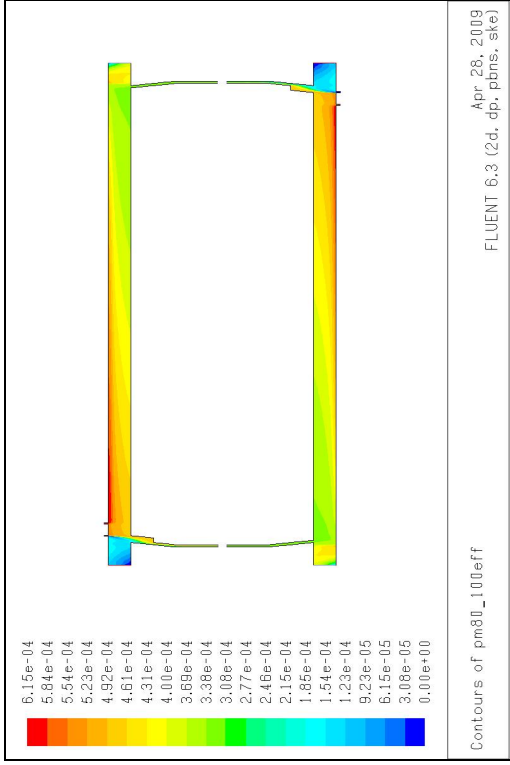
**1000 meter; 80 km/uur NOx**



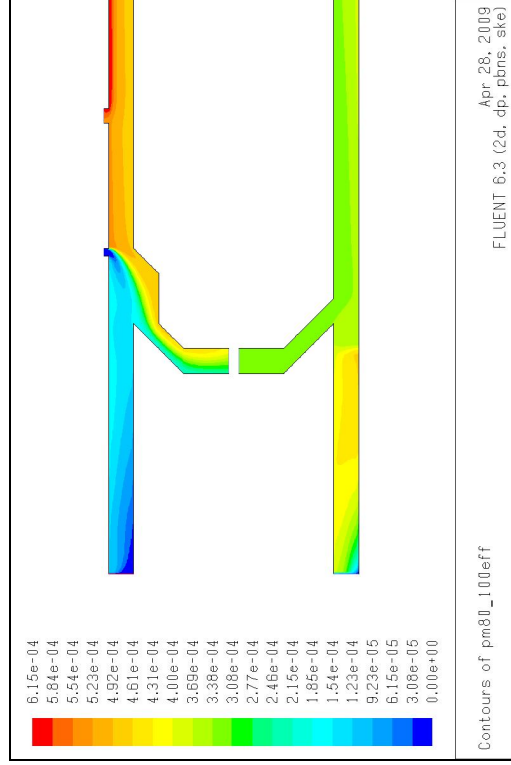
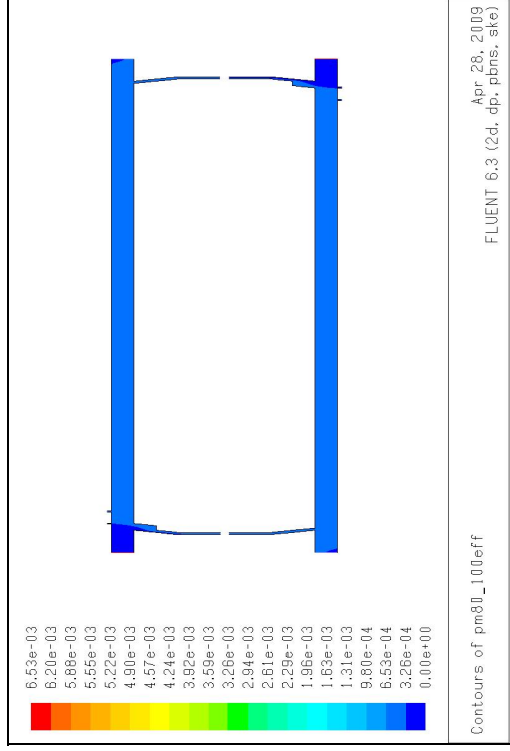
**1000 meter; 80 km/uur CO-sc**



**1000 meter; 80 km/uur NOx-sc**

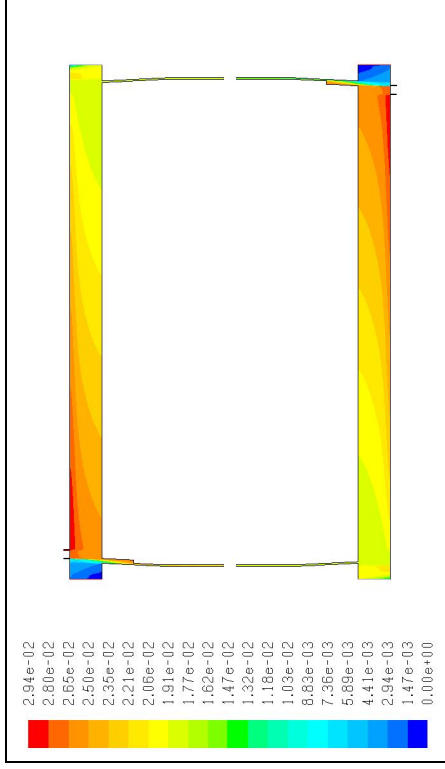


**1000 meter; 80 km/uur PM 1000 meter; 80 km/uur PM-sc**



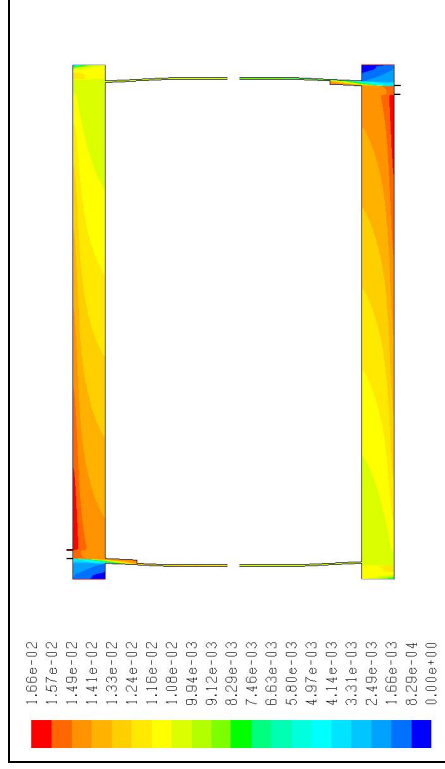
**1000 meter; 80 km/uur PM detail**

### 1500 meter; 80 km/uur



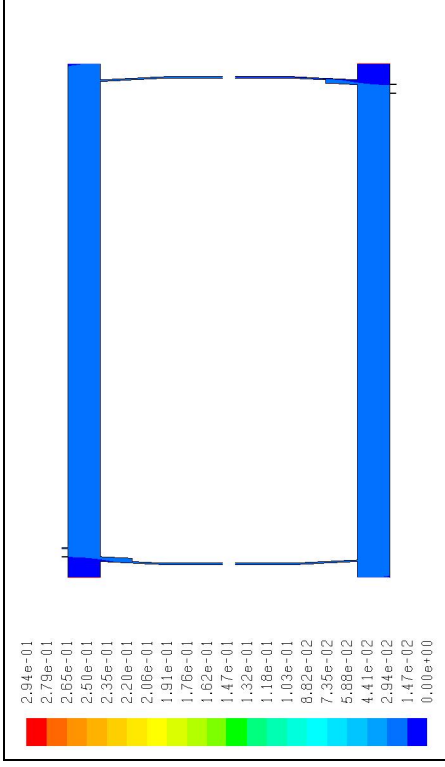
Contours of co80  
Apr 28, 2009  
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbms, ske)

### 1500 meter; 80 km/uur CO



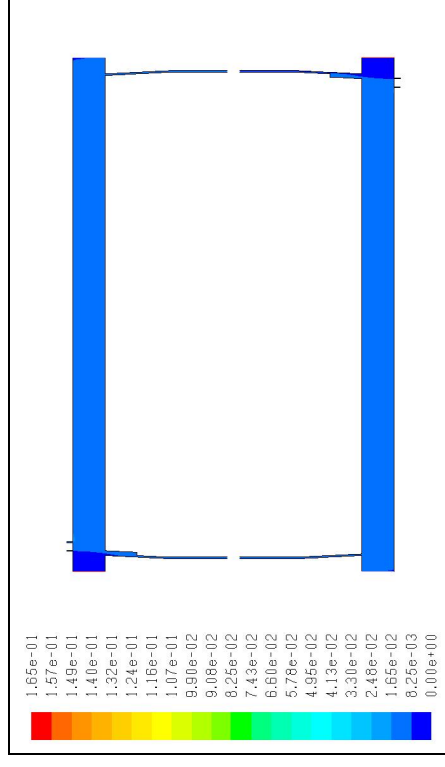
Contours of nox80  
Apr 28, 2009  
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbms, ske)

### 1500 meter; 80 km/uur NOx



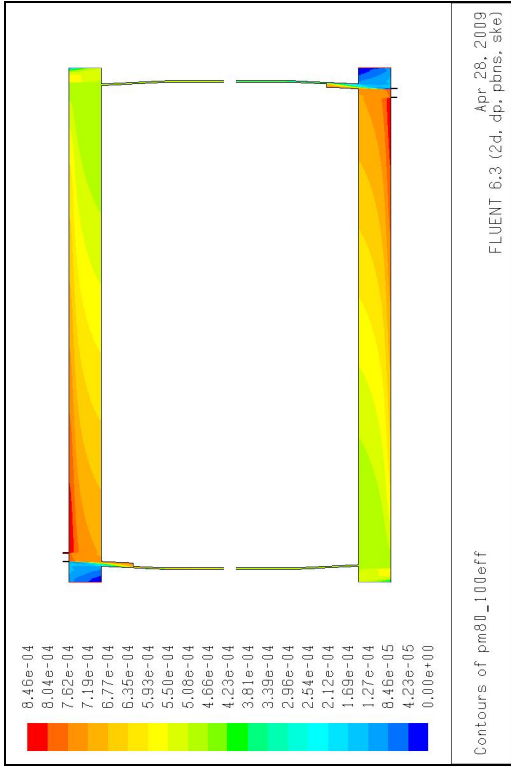
Contours of co80  
Apr 28, 2009  
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbms, ske)

### 1500 meter; 80 km/uur CO-sc

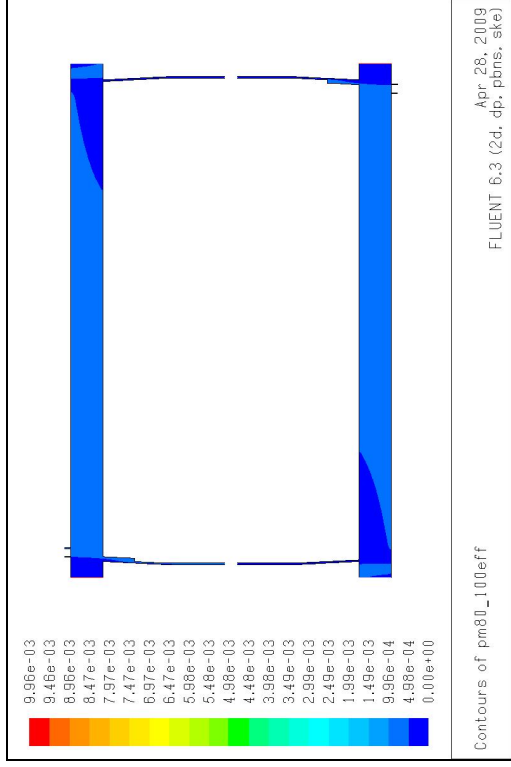


Contours of nox80  
Apr 28, 2009  
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbms, ske)

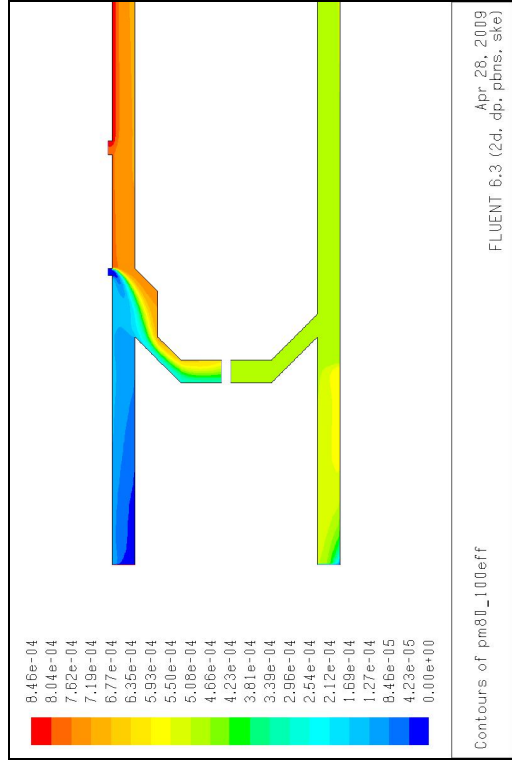
### 1500 meter; 80 km/uur NOx-sc



1500 meter; 80 km/uur PM



1500 meter; 80 km/uur PM-sc



1500 meter; 80 km/uur PM detail

**Bijlage 5 : Notitie van TNO t.a.v. zeer kortdurende blootstelling aan stoffen in tunnels**





**Aan**

Ir. R.W.J. Smulders  
Ingenieursbureau 'Oranjewoud' BV  
Postbus 8590  
3009 AN ROTTERDAM

**Van**

Ir. Y. de Kluizenaar

**Onderwerp**

Gezondheidseffecten luchtverontreiniging van korte termijn blootstelling

Ingenieursbureau Oranjewoud heeft TNO gevraagd om een beknopte notitie over gezondheidseffecten van (zeer) korte termijn humane blootstelling aan luchtverontreiniging. De aandacht gaat hierbij specifiek uit naar twee componenten van verkeersgerelateerde luchtverontreiniging: PM<sub>10</sub> en NO<sub>2</sub>. Uitgebreid literatuuronderzoek naar de gezondheidseffecten van verkeersgerelateerde luchtverontreiniging viel buiten de scope van deze opdracht. Deze notitie beperkt zich tot het beschrijven van de bevindingen gerapporteerd in een selectie van recente publicaties over experimenteel onderzoek naar gezondheidseffecten van korte termijn humane blootstelling aan twee belangrijke componenten van wegverkeersgerelateerde luchtverontreiniging: fijn stof (PM) en stikstofdioxide (NO<sub>2</sub>). Er is niet beoogd een uitputtend overzicht te geven van de literatuur op dit vakgebied, maar een algemeen beeld te schetsen op basis van een aantal representatieve empirische studies.

**Introductie**

*Onderzoek naar luchtverontreiniging en gezondheid*

De laatste decennia is veel onderzoek uitgevoerd en gepubliceerd op het gebied van luchtverontreiniging en gezondheid. Effecten van PM en NO<sub>2</sub> zijn zowel in epidemiologische studies als in toxicologische studies onderzocht. In epidemiologische studies zijn onder meer de effecten van dagelijkse fluctuaties en de effecten van lange termijn blootstelling bestudeerd. Voorbeelden van grote onderzoeken naar de effecten van dagelijkse fluctuatie zijn de NMMAPS studie en de APHEA studie. In de NMMAPS studie is de relatie tussen PM<sub>10</sub> en mortaliteit onderzocht in een populatie van 50 miljoen mensen verspreid over de 20 grootste steden van de Verenigde Staten. In de APHEA-2 studie is deze relatie onderzocht in een populatie van 43 miljoen mensen verspreid over 29 steden in Europa. De geschatte toename in dagelijkse sterfte per 10 µg m<sup>-3</sup> verandering in PM<sub>10</sub> lag in de range van 0.2% – 0.6%. De geschatte effecten in beide studies waren groter voor sterfte door hart- en vaatziekten (Review: Brook et al., 2004; Samoli et al., 2008).

**Milieu en leefomgeving**

Van Mourik Broekmanweg 6  
Postbus 49  
2600 AA Delft

www.tno.nl

T +31 15 269 68 02

F +31 15 276 36 21

info-BenO@tno.nl

**Datum**

13 mei 2009

**Onze referentie**

TNO-034-DTM-2009-01964

Projectnr. 21242.01.99

**E-mail**

yvonne.dekluizenaar@tno.nl

**Doorkiesnummer**

+31 15 269 47 44

**Doorkiesfax**

+31 15 276 36 21



**Datum**  
13 mei 2009

**Onze referentie**  
TNO-034-DTM-2009-01964

**Blad**  
2/5

## **Experimentele studies naar effecten van korte termijn humane blootstelling**

In humane experimentele studies zijn onder meer de effecten van kort durende blootstelling (vaak in de orde van uren) onderzocht. Hieronder volgt een korte beschrijving van resultaten van een selectie van deze studies.

### *Fijn stof en stikstofdioxide (NO<sub>2</sub>)*

In verschillende gecontroleerde laboratorium studies zijn de effecten van blootstelling aan componenten van fijn stof op proefpersonen onderzocht. Relatief veel onderzoek is gericht op de effecten van humane blootstelling aan dieselmotoruitlaatgassen (o.a. Behndig et al., 2006; Lucking et al., 2008; Mills et al., 2005; Mills et al., 2007; Nightingale et al., 2000; Salvi et al., 2004; Stenfors et al., 2004). In deze studies zijn tussen de 10 en 30 proefpersonen in een speciaal daarvoor ontworpen ruimte blootgesteld aan (verdunde) dieselmotoruitlaatgassen. De concentratie lag in de range van  $100 \mu\text{g m}^{-3}$  –  $350 \mu\text{g m}^{-3}$  (PM). De blootstellingsduur varieerde van 1 uur tot 2 uur. Verschillende fysiologische parameters zijn voor en na blootstelling aan verontreinigde lucht of gefilterde lucht (referentie) onderzocht. Hierbij is zowel gekeken naar aspecten die samenhangen met het hart-vaatsysteem, als met de luchtwegen. In bovengenoemde studies werden bij deze concentraties fysiologische reacties gevonden die het inzicht vergroten in de potentiële mechanismen die ten grondslag liggen aan associaties gevonden in epidemiologische studies.

Stikstofdioxide (NO<sub>2</sub>) wordt in het algemeen beschouwd als een redelijke indicator voor verkeersgerelateerde luchtverontreiniging. In epidemiologische studies wordt NO<sub>2</sub> daarom regelmatig gebruikt als indicator voor het mengsel van verkeersgerelateerde luchtverontreiniging. Toxicologische studies gericht op korte termijn humane blootstelling, laten in het algemeen geen directe effecten zien bij NO<sub>2</sub> concentratieniveaus in de orde van grootte waarin die normaalgesproken voorkomen in de buitenlucht (WHO, 2006). In een overzicht rapporteerde de WHO dat uit gecontroleerde humane klinische studies naar effecten van kortdurende blootstelling het beeld naar voren komt dat in gezonde volwassenen zonder luchtwegklachten effecten op longfunctie veelal pas optreden bij NO<sub>2</sub> concentraties boven de  $1880 \mu\text{g m}^{-3}$ . Bij personen met respiratoire aandoeningen lag dit niveau lager: in een aantal studies zijn veranderingen in de longfunctie waargenomen bij een NO<sub>2</sub> concentratie van  $560 \mu\text{g m}^{-3}$  (WHO, 2000; WHO, 2006). Studies naar bronchiale gevoeligheid in astmatici suggereren een toename in gevoeligheid bij NO<sub>2</sub> concentratie niveaus vanaf  $200 \mu\text{g m}^{-3}$  (WHO, 2006). De WHO Air Quality Guideline voor korte termijn NO<sub>2</sub> concentratie komt hiermee overeen ( $200 \mu\text{g m}^{-3}$ ; 1 uurgemiddelde) (WHO, 2006).

### *Luchtverontreiniging in tunnels*

In humane studies is ook onderzoek uitgevoerd specifiek naar effecten van blootstelling aan luchtverontreiniging in tunnels (Svartgren et al., 2000; Larsson et al., 2007). Svartgren et al. (2000) onderzocht effecten van kortdurende blootstelling (30 minuten) aan luchtverontreiniging in een tunnel in Stockholm (mediaan PM<sub>10</sub>:  $170 \mu\text{g m}^{-3}$  (range  $103 - 613 \mu\text{g m}^{-3}$ ); mediaan NO<sub>2</sub>:  $313 \mu\text{g m}^{-3}$  (range  $203 - 462 \mu\text{g m}^{-3}$ )), in een groep van 20 vrijwillige proefpersonen met licht allergische astma. Korte termijn blootstelling tijdens de spits verhoogde de astmatische respons op blootstelling aan allergenen in de periode na blootstelling. Larsson et al (2007) onderzochten effecten



**Datum**  
13 mei 2009

**Onze referentie**  
TNO-034-DTM-2009-01964

**Blad**  
3/5

op de luchtwegen van blootstelling (2 uur) aan luchtverontreiniging (mediaan  $PM_{10}$ :  $176 \mu\text{g m}^{-3}$ ; mediaan  $NO_2$ :  $230 \mu\text{g m}^{-3}$ ) in een tunnel (lengte 1500 m) gedurende de spits (16:00 – 18:00), in een groep van 16 gezonde proefpersonen. Blootstelling aan de tunnellucht veroorzaakte ontstekingsreactie in de luchtwegen.

### **Enkele aandachtspunten bij vertaling van experimenteel onderzoek naar de situatie in tunnels.**

- De concentratie van componenten van wegverkeergelateerde luchtverontreiniging, waaronder PM en  $NO_2$  in verkeerstunnels, kan oplopen tot vele malen hogere niveaus dan de concentratie in de buitenlucht. De individuele blootstelling van de gebruikers is zowel afhankelijk van de concentratie als van de verblijfstijd en de ventilatie van het voertuig.
- Experimentele studies beperken zich wat betreft blootstelling veelal tot enkele bestanddelen. De samenstelling van het mengsel van luchtverontreiniging in een tunnel wordt bepaald door uitlaatemissies, niet-uitlaatemissies (o.a. slijtage) en resuspensie van deeltjes. Accumulatie van deze deeltjes in een tunnel is mogelijk van invloed op de samenstelling. Studies waarin de samenstelling van het mengsel van luchtverontreiniging in tunnels is onderzocht, laten zien dat deze sterk kan verschillen van die van andere verkeersmilieus (WHO, 2005).
- Voor gezondheidseffecten van luchtverontreiniging is niet alleen de concentratie van afzonderlijke componenten, maar ook de samenstelling van het mengsel van de verschillende stoffen en deeltjes in de buitenlucht van belang (e.g. Samoli et al., 2005). Daarnaast moet rekening worden gehouden met individuele verschillen in gevoeligheid. Onder potentieel gevoelige groepen vallen onder meer astmatici, kinderen en ouderen.
- $NO_2$  normen voor de buitenlucht zijn — anders dan voor de arbeidssituatie — opgesteld rekening houdend met de rol van  $NO_2$  als *indicator* voor het mengsel van verkeersgerelateerde luchtverontreiniging. Algemeen wordt aangenomen dat de associaties tussen  $NO_2$  en gezondheidseffecten die worden gevonden in epidemiologische studies grotendeels kunnen worden toegeschreven aan stoffen die samen met  $NO_2$  in de buitenlucht voorkomen.



**Datum**  
13 mei 2009

**Onze referentie**  
TNO-034-DTM-2009-01964

**Blad**  
4/5

## Referenties

A. F. Behndig, I. S. Mudway, J. L. Brown, N. Stenfors, R. Helleday, S. T. Duggan, S. J. Wilson, C. Boman, F. R. Cassee, A. J. Frew, F. J. Kelly, T. Sandstrom, and A. Blomberg. Airway antioxidant and inflammatory responses to diesel exhaust exposure in healthy humans. *Eur.Respir.J.* 2006; 27 (2):359-365.

R. D. Brook, B. Franklin, W. Cascio, Y. Hong, G. Howard, M. Lipsett, R. Luepker, M. Mittleman, J. Samet, S. C. Smith, Jr., and I. Tager. Air pollution and cardiovascular disease: a statement for healthcare professionals from the Expert Panel on Population and Prevention Science of the American Heart Association. *Circulation* 2004; 109 (21):2655-2671.

J. D. Hackney, W. S. Linn, and E. L. Avol. Acid fog: effects on respiratory function and symptoms in healthy and asthmatic volunteers. *Environ.Health Perspect.* 1989; 79:159-162.

U. Latza, S. Gerdes, and X. Baur. Effects of nitrogen dioxide on human health: systematic review of experimental and epidemiological studies conducted between 2002 and 2006. *Int.J.Hyg.Environ.Health* 2009; 212 (3):271-287.

N. L. Mills, H. Tornqvist, M. C. Gonzalez, E. Vink, S. D. Robinson, S. Soderberg, N. A. Boon, K. Donaldson, T. Sandstrom, A. Blomberg, and D. E. Newby. Ischemic and thrombotic effects of dilute diesel-exhaust inhalation in men with coronary heart disease. *N.Engl.J.Med.* 2007; 357 (11):1075-1082.

N. L. Mills, H. Tornqvist, S. D. Robinson, M. Gonzalez, K. Darnley, W. MacNee, N. A. Boon, K. Donaldson, A. Blomberg, T. Sandstrom, and D. E. Newby. Diesel exhaust inhalation causes vascular dysfunction and impaired endogenous fibrinolysis. *Circulation* 2005; 112 (25):3930-3936.

J. A. Nightingale, R. Maggs, P. Cullinan, L. E. Donnelly, D. F. Rogers, R. Kinnersley, K. F. Chung, P. J. Barnes, M. Ashmore, and A. Newman-Taylor. Airway inflammation after controlled exposure to diesel exhaust particulates. *Am.J.Respir.Crit Care Med.* 2000; 162 (1):161-166.

J. Pekkanen, A. Peters, G. Hoek, P. Tiittanen, B. Brunekreef, J. J. de Hartog, J. Heinrich, A. Ibalduerra, W. G. Kreyling, T. Lanki, K. L. Timonen, and E. Vanninen. Particulate air pollution and risk of ST-segment depression during repeated submaximal exercise tests among subjects with coronary heart disease: the Exposure and Risk Assessment for Fine and Ultrafine Particles in Ambient Air (ULTRA) study. *Circulation* 2002; 106 (8):933-938.

S. Salvi, A. Blomberg, B. Rudell, F. J. Kelly, Th. Sandström, S. T. Holgate, and A. J. Frew. Acute inflammatory responses in the airways and peripheral blood after short-term exposure to diesel exhaust in healthy human volunteers. *Am J Respir Crit Care Med* 1999; 159:702-709.

J. M. Samet. Air pollution risk estimates: determinants of heterogeneity. *J.Toxicol.Environ.Health A* 2008; 71 (9-10):578-582.

E. Samoli, R. Peng, T. Ramsay, M. Pipikou, G. Touloumi, F. Dominici, R. Burnett, A. Cohen, D. Krewski, J. Samet, and K. Katsouyanni. Acute effects of ambient particulate matter on mortality in



**Datum**  
13 mei 2009

**Onze referentie**  
TNO-034-DTM-2009-01964

**Blad**  
5/5

Europe and North America: results from the APHENA study. *Environ.Health Perspect.* 2008; 116 (11):1480-1486.

E. Samoli, A. Analitis, G. Touloumi, J. Schwartz, H. R. Anderson, J. Sunyer, L. Bisanti, D. Zmirou, J. M. Vonk, J. Pekkanen, P. Goodman, A. Paldy, C. Schindler, and K. Katsouyanni. Estimating the exposure-response relationships between particulate matter and mortality within the APHEA multicity project. *Environ.Health Perspect.* 2005; 113 (1):88-95.

Th. Sandström, F. R. Cassee, R. Salonen, and E. Dybing. Recent outcomes in European multicentre projects on ambient particulate air pollution. *Toxicol.Appl.Pharmacol.* 2005; 207 (2 Suppl):261-268.

N. Stenfors, C. Nordenhall, S. S. Salvi, I. Mudway, M. Soderberg, A. Blomberg, R. Helleday, J. O. Levin, S. T. Holgate, F. J. Kelly, A. J. Frew, and T. Sandstrom. Different airway inflammatory responses in asthmatic and healthy humans exposed to diesel. *Eur.Respir.J.* 2004; 23 (1):82-86.

M. Svartengren, V. Strand, G. Bylin, L. Jarup, and G. Pershagen. Short-term exposure to air pollution in a road tunnel enhances the asthmatic response to allergen. *Eur.Respir.J.* 2000; 15 (4):716-724.

World Health Organisation. *Air Quality Guidelines – Second Edition*. Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark, 2000.

World Health Organisation. *Health effects of transport-related air pollution*. Edited by M. Krzyzanowski [et al.] WHO, Denmark, 2005.

World Health Organisation. *Air quality guidelines: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulphur dioxide*. Global update 2005. ISBN 9289021926. WHO, 2006.