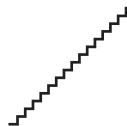


**Rijkswaterstaat
Dienst Weg- en Waterbouw**

**Opstellen beoordelingsmatrix met
configuraties overkappingen en
luchtbehandeling**

Witteveen+Bos
Alexanderstraat 21
postbus 85948
2508 CP Den Haag
telefoon 070 370 07 00
telefax 070 360 00 98

**Opstellen beoordelingsmatrix met
configuraties overkappingen en
luchtbehandeling**

referentie RW1649-1/akkr/014	projectcode RW1649-1	status definitief 02
projectleider ir. J.K. Muntinga	projectdirecteur ir. C.M. Sluis	datum 9 november 2007

autorisatie goedgekeurd	naam ir. M. Ludeking	paraaf
-----------------------------------	--------------------------------	---------------

INHOUDSOPGAVE	blz.
SAMENVATTING	
1. INLEIDING	1
2. OVERKAPPINGSCONFIGURATIES EN PROBLEEMSITUATIES	3
2.1. Basisprincipe van een overkapping	3
2.2. Onderscheidende overkappingconfiguraties	4
2.3. Verschillende uitvoeringsvarianten	8
2.4. Karakteristieke probleemsituaties	9
2.5. Koppeling configuraties en probleemsituaties	10
3. EFFECT OP DE LUCHTKWALITEIT	12
3.1. Aanpak effectbepaling	12
3.2. Uitgangspunten en aannames	13
3.2.1. Snelweg	13
3.2.2. Overkapping en tunnelmonden	15
3.2.3. Schoorstenen	17
3.2.4. Meteorologie, omgeving en achtergrondconcentraties	18
3.2.5. Representatief receptorpunt	19
3.3. Belangrijkste bevindingen luchtberekeningen	20
4. VEILIGHEID	22
4.1. Veiligheidsaspecten	22
4.2. Juridisch kader	23
4.3. Benodigde veiligheidsvoorzieningen bij lichte overkappingen	23
5. KOSTEN	27
5.1. Aanpak bepaling kosten	27
5.2. Kosten per onderdeel	27
5.2.1. De overkappingconstructie	28
5.2.2. De schoorsteen	28
5.2.3. Het afzuig- en ventilatiesysteem	29
5.2.4. Het emissiezuiveringssysteem	30
5.2.5. De veiligheidsvoorzieningen	30
5.3. Kosten per configuratie	31
6. BESLISBOOM EN BEOORDELINGSMATRIX	35
6.1. De beslisboom	35
6.1.1. Doel beslisboom	35
6.1.2. Toelichting op de beslisboom	35
6.2. De beoordelingsmatrix	36
6.2.1. Beoordelingscriteria	36
6.2.2. De beoordelingsmatrix	38
7. CONCLUSIES	40
7.1. Overkappingconfiguraties en knelpuntsituaties	40
7.2. Effect op de luchtkwaliteit	40
7.3. Kosten van de overkappingen	41
7.4. Kosteneffectiviteit	42
laatste bladzijde	43

bijlagen		aantal bladzijden
I	Methoden van luchtbehandeling	4
II	Onderbouwing luchteffecten	23
III	Veiligheidsvoorzieningen	1
IV	Kostenonderbouwing	16
V	Beslisboom	1
VI	Beoordelingsmatrix	1

SAMENVATTING

Binnen het Innovatieprogramma Luchtkwaliteit (IPL) worden verschillende maatregelen onderzocht die kunnen bijdragen aan de verbetering van de luchtkwaliteit op en rond snelwegen. Eén van die mogelijke maatregelen is het overkappen van snelwegen, al dan niet in combinatie met luchtbehandeling. Door delen van een snelweg te overkappen met een lichtgewicht constructie van kunststof of glas kan de luchtverontreiniging de directe omgeving alleen via de tunnelmonden bereiken. Voor de directe omgeving van de tunnel betekent dit een aanzienlijke verbetering van de luchtkwaliteit maar tegelijkertijd treedt er aan de tunnelmonden een verslechtering van de situatie op. Luchtbehandeling in de vorm van ventilatie en/of emissiezuivering kan mogelijk een oplossing voor dit probleem zijn.

doel van het project

Het doel van dit onderzoek is om na te gaan of overkappingen (al of niet in combinatie met luchtbehandelingsystemen) ingezet kunnen worden, om luchtkwaliteitsknelpunten op het snelwegennet te verbeteren dan wel op te lossen.

Met name moet dit onderzoek bijdragen aan het inzicht welk type overkapping (al of niet in combinatie met luchtbehandeling) op bepaalde karakteristieke knelpuntsituaties kan worden ingezet. Hiertoe wordt in dit rapport de zogenoemde beoordelingsmatrix gepresenteerd waarmee op gestructureerde wijze inzicht wordt gegeven in het effect en de kosten van een bepaalde type overkapping, in relatie tot de karakteristieke knelpuntsituatie. Tevens is nagegaan aan welke veiligheidseisen lichte overkappingen moeten voldoen en welke voorzieningen hiervoor getroffen moeten worden.

Een betere luchtkwaliteit heeft een positief effect op de volksgezondheid. Binnen de verschillende studies van het IPL wordt echter niet specifiek gekeken naar het aantal blootgestelden aan vervuilde lucht, maar wordt vooral de nadruk gelegd op de juridische aspecten met betrekking tot het Besluit Luchtkwaliteit. Op politiek niveau is immers gesteld dat de gezondheidseffecten worden gewaarborgd bij het voldoen aan de gestelde normen. Het IPL richt zich daarom dus primair op het behalen van de normen.

overkappingsconfiguraties en knelpuntsituaties

Een overkapping kan een bijdrage leveren aan de aanpak van een lokaal luchtkwaliteitsknelpunt door verplaatsing van de vervuilde lucht, vermindering van de vervuilde lucht en verspreiding van de vervuilde lucht. Met deze drie basisprincipes in het achterhoofd is een zestal verschillende overkappingsconfiguraties benoemd, te weten:

1. volledig gesloten overkapping;
2. overkapping met gaten en sleuven in het dak;
3. overkapping met in het midden een hoge schoorsteen;
4. overkapping met aan beide tunnelmonden een hoge schoorsteen;
5. overkapping met over de hele lengte een aantal lagere schoorstenen;
6. overkapping met een systeem voor het afvangen van NO₂ en PM10.

Met behulp van configuratie 1 tot en met 5 wordt de vuile lucht op verschillende manieren uitgestoten. Hiermee wordt de verdeling beïnvloed maar niet de totale emissie. De zesde configuratie heeft effect op de vermindering van de emissie. Om inzicht te krijgen in het effect van de combinatie van verspreiding en zuivering is configuratie 6 als uitvoeringsvariant meegenomen binnen de vijf andere configuraties.

Vanwege de onzekerheid over het daadwerkelijke effect van de emissiezuiveringssystemen is er uitgegaan van drie varianten te weten hoge afvang (95 %), gemiddelde afvang (80 %) en lage afvang (50 %). Daarnaast is er met het oog op het belang van de verdunning en de verspreiding

ook gevarieerd in de hoogte en de uitstroomsnelheid van de schoorstenen. Als alternatief voor de basishoogte van 20 meter boven maaiveld is er gekeken naar het effect van schoorstenen met een lengte van 10, 30 en 40 meter boven maaiveld. Als alternatief voor de basis uitstroomsnelheid van 10 m/s is er gekeken naar het effect van een uitstroomsnelheid van 5 m/s en 1 m/s.

Het effect van de verschillende overkappingconfiguraties op de luchtkwaliteit is bepaald voor vier karakteristieke probleemsituaties. Deze situaties zijn:

- binnenstedelijk (veel luchtstroom belemmerende objecten → matige verspreiding);
- buitenstedelijk (vrije veld → goede verspreiding);
- verdiepte ligging (slechte verspreiding);
- bestaande tunnelmond (sterk geconcentreerde concentratie).

Bij overkappingen met één of meer schoorstenen wordt verondersteld dat 50 % van de vuile lucht via de schoorstenen wordt uitgestoten en dat de overige 50 % onbehandeld de tunnelmond verlaat. Tevens wordt verondersteld dat een systeem voor emissieafvang 50 % van de totale emissievracht kan zuiveren. Indien de zuivering in de schoorsteen plaats vindt, komt dit er op neer dat alle door de schoorsteen stromende lucht wordt gezuiverd. Indien zuivering aan de tunnelmond plaatsvindt (alleen van toepassing bij een volledig gesloten overkapping) wordt 50 % van hoeveelheid lucht aan de tunnelmond gezuiverd en de overige 50 % wordt onbehandeld uitgestoten.

effect op de luchtkwaliteit

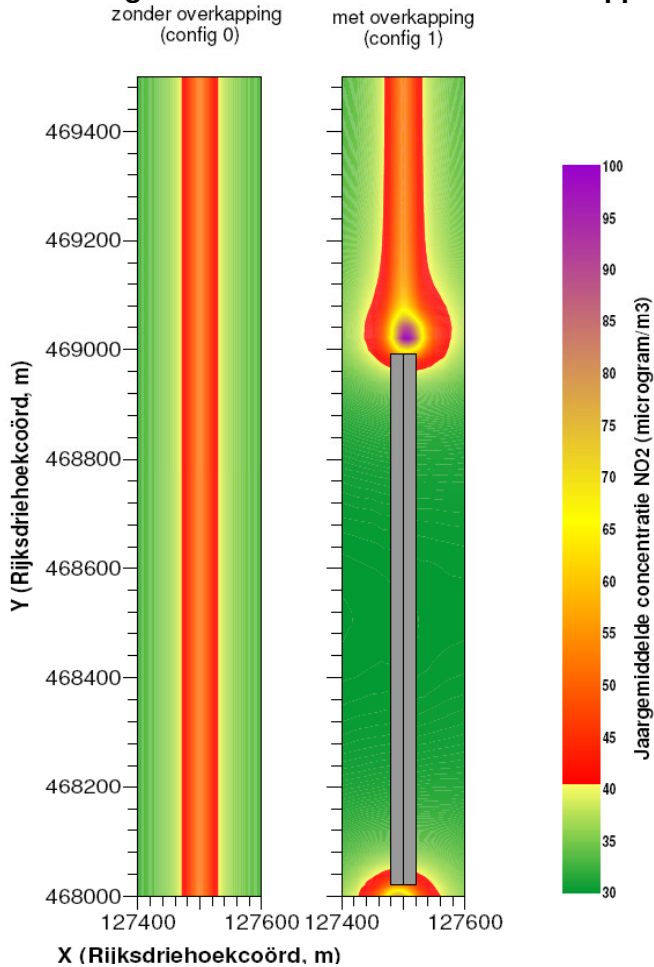
Uit de luchtkwaliteitberekeningen blijkt dat een overkapping een aanzienlijk effect heeft op de luchtkwaliteit. Ter plaatse van de overkapping nemen de concentraties NO₂ en PM10 in alle gevallen af tot ongeveer het niveau van de achtergrondconcentratie. Ter plaatse van de tunnelmond ontstaat echter een forse lokale concentratiepiek (zie afbeelding S.1.). Deze concentratiepiek kan worden beperkt door er voor te zorgen dat er minder vuile lucht door de tunnelmond wordt uitgestoten. Dit kan worden gerealiseerd door een deel van de vuile lucht via de bovenkant van de overkapping uit te stoten of door de lucht te zuiveren voor deze de tunnelmond verlaat.

De effecten van de verschillende combinaties van schoorsteenhoogtes en uitstroomsnelheden blijken min of meer gelijk te zijn. De verschillen tussen de configuraties zijn zo klein dat in feite kan worden volstaan met de overkapping met de laagste uitstroomsnelheid en de laagste schoorsteenhoogte. Binnen dit onderzoek is dat de overkapping waarbij de vuile lucht middels een sleuf in het dak op 7 meter hoogte wordt uitgestoten (configuratie 2).

Het zuiveren van het deel van de vuile lucht dat via de schoorstenen wordt uitgestoten (configuratie 3, 4, en 5), heeft in vergelijking tot de situatie zonder zuivering, geen aanvullend effect op de concentratiewaarden aan de tunnelmonden noch op de concentratiewaarden ter hoogte van de overkapping. Het zuiveren van het deel van de vuile lucht dat bij een volledig gesloten overkapping aan de tunnelmonden wordt uitgestoten (configuratie 1), zorgt wel voor een significante daling van de concentratiewaarden aan de tunnelmonden maar niet voor een daling van concentratiewaarden ter hoogte van de overkapping.

Indien bij een volledig gesloten overkapping een hoog percentage (95 %) van de emissie aan de tunnelmond wordt afgevangen is het effect op de concentratie aan de tunnelmond vergelijkbaar met het effect dat optreedt bij het uitstoten van vuile lucht op grotere hoogte (door een sleuf in dak of door een schoorsteen). Zodra minder dan 95 % van de emissie wordt afgevangen, is het effect op de concentratie aanzienlijk kleiner.

Afbeelding S.1. Situatie met en zonder overkapping (binnenstedelijke knelpuntsituatie)



kosten van de overkappingen

Bij het bepalen van de kosten van een overkappingconfiguratie is gestreefd naar inzicht in de 'gemiddelde kosten' van de verschillende configuraties. De diverse experts die zijn geraadpleegd gaven echter allemaal aan dat er niet zoiets bestaat als 'gemiddelde kosten'. Het realiseren van een overkapping of een tunnel is maatwerk en de uiteindelijke kosten zijn sterk afhankelijk van de concrete uitvoeringsvariant en de lokale omstandigheden. Desalniettemin zijn op basis van verschillende praktijkervaringen, kostenkennallen geformuleerd voor de verschillende onderdelen.

De kosten van een overkappingsconstructie op maaiveld bedragen circa 10 miljoen euro per kilometer overkapping. Indien de constructie wordt aangelegd over een verdiept liggende weg, moet worden uitgegaan van een investering van 5 miljoen euro per kilometer overkapping. Indien de overkapping wordt uitgerust met een schoorsteen dan nemen de constructiekosten met 2 tot 7 miljoen euro toe. Eén schoorsteen kost, afhankelijk van zijn omvang en de hoogte tussen de 1 en 5 miljoen euro.

Het afzuig- en ventilatiesysteem dat nodig is om de lucht af te zuigen kost ruim 6 miljoen euro per kilometer overkapping. Hier komen nog de jaarlijkse kosten voor onderhoud en energie bij à EUR 700.000 per kilometer overkapping per jaar.

De kosten voor emissiezuiveringssystemen lopen sterk uiteen en variëren van 7 tot 20 miljoen per kilometer overkapping. De jaarlijkse kosten voor reiniging en energie bedragen ruim een half miljoen euro per kilometer overkapping.

De kosten die nodig zijn om te voldoen aan de benodigde veiligheidseisen liggen, afhankelijk van de uitvoering van de overkapping en de karakteristieke knelpuntsituatie, tussen de 1,4 en 6,7 miljoen euro per kilometer overkapping.

De verschillende kostenposten worden samengevat in de zogenoemde life cycle kosten. Dit zijn de totale kosten gedurende de tijd dat een overkapping in gebruik is. Hierbij is uitgegaan van een levensduur van 10 jaar. In vergelijking met normale infrastructurele werken is dit een zeer korte periode. De levensduur is in dit geval echter niet gebaseerd op de levensduur van de constructie maar op het vermoeden dat over circa 10 jaar het merendeel van de luchtkwaliteitsknelpunten in grote lijnen is opgelost. Dit als gevolg van de steeds schoner wordende voertuigtechnieken in combinatie met aanvullende lokale maatregelen. Voor enkele overgebleven hotspots blijft een overkapping ook na een periode van 10 jaar nog nut hebben, maar naar verwachting geldt dat voor het merendeel van de knelpunten niet. Daarom wordt binnen dit verkennende onderzoek een levensduur van 10 jaar als uitgangspunt genomen.

In tabel S.1. is een overzicht gegeven van de life cycle costs van de verschillende configuraties. Het betreft hier de kosten per kilometer overkapping per 10 jaar.

Tabel S.1. Life cycle kosten per configuratie (per kilometer overkapping per 10 jaar)

life cycle kosten (mln €)	binnen- stedelijk	buiten- stedelijk	verdiepte ligging	bestaande tunnel
1. Volledig gesloten overkapping				
a zonder luchtbehandeling	12,2	11,6	9,7	x
b met hoog percentage afvang NO ₂ en PM10	33,2	32,6	30,7	37,7
c met midden percentage afvang NO ₂ en PM10	31,7	31,1	29,2	36,2
d met laag percentage afvang NO ₂ en PM10	30,2	29,6	27,7	34,7
2. Overkapping met een sleuf in het dak				
a zonder luchtbehandeling	12,1	11,4	x	x
3. Overkapping met in het midden een schoorsteen				
a basisvariant	14,0	13,4	11,5	x
b met hoog percentage afvang NO ₂ en PM10	49,4	48,8	46,9	x
c met midden percentage afvang NO ₂ en PM10	47,9	47,3	45,4	x
d met laag percentage afvang NO ₂ en PM10	46,4	45,8	43,9	x
e met een uitstroomsnelheid van 5 m/s	29,3	28,7	26,8	x
f met een uitstroomsnelheid van 1 m/s	31,1	30,5	28,6	x
g met een 10 meter lagere schoorsteen	28,1	27,5	25,6	x
h met een 10 meter hogere schoorsteen	28,7	28,1	26,2	x
i met een 20 meter hogere schoorsteen	29,1	28,5	26,6	x
4. Overkapping met aan beide tunnelmonden een schoorsteen				
a basisvariant	15,8	15,2	13,3	20,3
b met hoog percentage afvang NO ₂ en PM10	51,2	50,6	48,7	55,7
c met midden percentage afvang NO ₂ en PM10	49,7	49,1	47,2	54,2
d met laag percentage afvang NO ₂ en PM10	48,2	47,6	45,7	52,7
e met een uitstroomsnelheid van 5 m/s	30,2	29,6	27,7	34,7
f met een uitstroomsnelheid van 1 m/s	33,8	33,2	31,3	38,3
g met een 10 meter lagere schoorsteen	29,6	29,0	27,1	34,1
h met een 10 meter hogere schoorsteen	30,8	30,2	28,3	35,3
i met een 20 meter hogere schoorsteen	31,6	31,0	29,1	36,1
j hoogte 10 meter, uitstroomsnelheid 5 m/s	29,6	29,0	27,1	34,1
5. Overkapping met over de hele lengte een vijftal schoorstenen				
a basisvariant	16,0	15,4	13,5	20,5
b met hoog percentage afvang NO ₂ en PM10	51,4	50,8	48,9	55,9
c met midden percentage afvang NO ₂ en PM10	49,9	49,3	47,4	54,4
d met laag percentage afvang NO ₂ en PM10	48,4	47,8	45,9	52,9
e met een uitstroomsnelheid van 5 m/s	30,4	29,8	27,9	34,9
f met een uitstroomsnelheid van 1 m/s	34,1	33,5	31,6	38,6

Kosteneffectiviteit

De kosteneffectiviteit geeft inzicht in de verhouding tussen de kosten en het verkregen effect en kan worden gebruikt om de configuraties te vergelijken. De kosteneffectiviteit wordt bepaald door de relatieve verandering van de concentratie na realisatie van de overkapping (ten opzichte van de situatie zonder overkapping) te delen door de totale life cycle kosten ($\Delta\%$ / mln. €). De kosteneffectiviteit wordt bepaald ter plaatse van dwarsprofiel C (midden van de overkapping). Hoe hoger de kosteneffectiviteit, hoe meer effect er optreedt bij de besteding van 1 miljoen euro.

In tabel S.2. is een overzicht gegeven van de kosteneffectiviteit van de verschillende configuraties. Hieruit komt duidelijk naar voren dat de hoogste kosteneffectiviteit wordt gehaald bij de basisvarianten. Dit is goed verklaarbaar aangezien de effecten van de verschillende configuraties min of meer gelijk zijn terwijl de kosten van de verschillende configuraties aanzienlijke verschillen vertonen.

Tabel S.2. Kosteneffectiviteit per configuratie

Kosteneffectiviteit ($\Delta\%$ / mln €)	NO ₂				PM10			
	binnenstedelijk	buitenstedelijk	verdiepte ligging	bestaande tunnel	binnenstedelijk	buitenstedelijk	verdiepte ligging	bestaande tunnel
1. Volledig gesloten overkapping								
a basisvariant	2,4	2,6	2,9	x	1,3	1,5	1,6	x
b met hoog percentage afvang NO ₂ en PM10	0,9	0,9	0,9	0	0,5	0,6	0,5	0
c met midden percentage afvang NO ₂ en PM10	0,9	1,0	1,0	0	0,5	0,6	0,5	0
d met laag percentage afvang NO ₂ en PM10	1,0	1,0	1,0	0	0,5	0,6	0,6	0
2. Overkapping met een sleuf in het dak								
a basisvariant	2,5	2,6	x	x	1,3	1,6	x	x
3. Overkapping met in het midden een schoorsteen								
a basisvariant	2,1	2,3	2,5	x	1,1	1,3	1,4	x
b met hoog percentage afvang NO ₂ en PM10	0,6	0,6	0,6	x	0,3	0,4	0,3	x
c met midden percentage afvang NO ₂ en PM10	0,6	0,6	0,6	x	0,3	0,4	0,3	x
d met laag percentage afvang NO ₂ en PM10	0,6	0,7	0,7	x	0,3	0,4	0,4	x
e met een uitstroomsnelheid van 5 m/s	1,0	1,1	1,1	x	0,6	0,6	0,6	x
f met een uitstroomsnelheid van 1 m/s	1,0	1,4	1,0	x	0,5	0,8	0,6	x
g met een 10 meter lagere schoorsteen	1,1	1,1	1,1	x	0,6	0,6	0,6	x
h met een 10 meter hogere schoorsteen	1,0	1,1	1,1	x	0,6	0,6	0,6	x
i met een 20 meter hogere schoorsteen	1,0	1,1	1,1	x	0,6	0,6	0,6	x
4. Overkapping met aan beide tunnelmonden een schoorsteen								
a basisvariant	1,9	2,0	2,2	0	1,0	1,2	1,2	0
b met hoog percentage afvang NO ₂ en PM10	0,6	0,6	0,6	0	0,3	0,3	0,3	0
c met midden percentage afvang NO ₂ en PM10	0,6	0,6	0,6	0	0,3	0,4	0,3	0
d met laag percentage afvang NO ₂ en PM10	0,6	0,6	0,6	0	0,3	0,4	0,4	0
e met een uitstroomsnelheid van 5 m/s	1,0	1,0	1,0	0	0,5	0,6	0,6	0
f met een uitstroomsnelheid van 1 m/s	0,9	0,9	0,9	0	0,5	0,5	0,5	0
g met een 10 meter lagere schoorsteen	1,0	1,0	1,1	0	0,5	0,6	0,6	0
h met een 10 meter hogere schoorsteen	1,0	1,0	1,0	0	0,5	0,6	0,6	0
i met een 20 meter hogere schoorsteen	0,9	1,0	1,0	0	0,5	0,6	0,5	0
j hoogte 10 meter, uitstroomsnelheid 5 m/s	1,0	1,0	1,1	0	0,5	0,6	0,6	0
5. Overkapping met over de hele lengte een vijftal schoorstenen								
a basisvariant	1,8	2,0	2,1	0	1,0	1,1	1,1	0
b met hoog percentage afvang NO ₂ en PM10	0,6	0,6	0,6	0	0,3	0,3	0,3	0
c met midden percentage afvang NO ₂ en PM10	0,6	0,6	0,6	0	0,3	0,4	0,3	0
d met laag percentage afvang NO ₂ en PM10	0,6	0,6	0,6	0	0,3	0,4	0,3	0
e met een uitstroomsnelheid van 5 m/s	1,0	1,0	1,0	0	0,5	0,6	0,6	0
f met een uitstroomsnelheid van 1 m/s	0,8	0,9	0,9	0	0,4	0,5	0,5	0

Legenda

- >2 hoge kosteneffectiviteit
- 1 - 2 gemiddelde kosteneffectiviteit
- <1 lage kosteneffectiviteit

Overigens is het beeld voor de bestaande tunnelmond enigszins vertekenend. De kosteneffectiviteit van de overkapping is immers bepaald op basis van de verandering van de concentraties ter hoogte van het midden van de overkapping. In het geval van een bestaande overkapping verkeerde de luchtkwaliteit daar al ongeveer op het niveau van de achtergrondconcentratie waardoor er nauwelijks een verandering optreedt. Als gevolg hiervan krijgt de kosteneffectiviteit de waarde 0. Wanneer echter wordt gekeken naar de verandering van de concentraties aan de tunnelmond, dan blijkt dat de verbetering die daar optreedt vergelijkbaar is met het effect dat bij de andere karakteristieke knelpuntsituaties optreedt ter hoogte van het midden van de overkapping. In feite is de kosteneffectiviteit van een configuratie bij een bestaande tunnelmond dus vergelijkbaar met de kosteneffectiviteit van de configuraties bij de overige karakteristieke knelpuntsituaties.

de beoordelingsmatrix

De beoordelingsmatrix presenteert op gestructureerde wijze de belangrijkste resultaten van deze studie. Per probleemsituatie wordt inzicht gegeven in het effect van de verschillende configuraties op de luchtkwaliteit en de kosten die hiermee gemoeid zijn. Ook wordt inzicht gegeven in de kosteneffectiviteit en de moeite die het kost om aan de veiligheidsaspecten te voldoen.

Het effect op de luchtkwaliteit wordt weergegeven aan de hand van de relatieve verandering van de concentraties NO₂ en PM10 ter hoogte van het midden van de overkapping en aan de zuidelijke tunnelmond.

In afbeelding S.2 is een compacte versie van de beoordelingsmatrix opgenomen. Deze versie bevat alleen de resultaten voor de verschillende basisvarianten. In bijlage VI is de volledige versie van de maatregelenmix opgenomen met daarin ook alle subvarianten.

Afbeelding S.2. De beoordelingsmatrix (compacte versie)

	Binnenstedelijk				Buitenstedelijk			
	Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid	Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
1. Volledig gesloten overkapping: geen luchtbehandeling	-29%	-16%	12	0	-30%	-17%	12	0
	63%	58%	0		33%	33%	0	
	2,4	1,3	12		2,6	1,5	12	
2. Overkapping met een sleuf in het dak: geen luchtbehandeling	-30%	-16%	12	0	-30%	-18%	11	0
	25%	26%	0		10%	13%	0	
	2,5	1,3	12		2,6	1,6	11	
3. Overkapping met in het midden een schoorsteen: 20 meter boven maaiveld, uitstroomsnelheid 10 m/s, geen luchtbehandeling	-30%	-16%	14	-	-31%	-18%	13	-
	26%	26%	0		10%	13%	0	
	2,1	1,1	14		2,3	1,3	13	
4. Overkapping met aan beide tunnelmonden een schoorsteen: 20 meter boven maaiveld, uitstroomsnelheid 10 m/s, geen luchtbehandeling	-30%	-16%	16	-	-30%	-18%	15	-
	26%	26%	0		10%	13%	0	
	1,9	1,0	16		2,0	1,2	15	
5. Overkapping met over de hele lengte een vijftal schoorstenen: 10 meter boven maaiveld, uitstroomsnelheid 10 m/s, geen luchtbehandeling	-29%	-16%	16	-	-30%	-17%	15	-
	26%	26%	0		10%	13%	0	
	1,8	1,0	16		2,0	1,1	15	

	Verdiepte ligging				Bestaande tunnelmond			
	Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid	Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
1. Volledig gesloten overkapping: geen luchtbehandeling	-29%	-16%	10	-	Basisvariant niet van toepassing			
	141%	125%	0		Configuratie niet van toepassing			
	2,9	1,6	10		Configuratie niet van toepassing			
2. Overkapping met een sleuf in het dak: geen luchtbehandeling	Configuratie niet van toepassing							
3. Overkapping met in het midden een schoorsteen: 20 meter boven maaiveld, uitstroomsnelheid 10 m/s, geen luchtbehandeling	-29%	-16%	12	-	-1%	0%	20	-
	66%	59%	0		-31%	-29%	0	
	2,5	1,4	12		0,0	0,0	20	
4. Overkapping met aan beide tunnelmonden een schoorsteen: 20 meter boven maaiveld, uitstroomsnelheid 10 m/s, geen luchtbehandeling	-29%	-16%	13	-	1%	1%	21	-
	66%	59%	0		-31%	-29%	0	
	2,2	1,2	13		0,0	0,0	21	
5. Overkapping met over de hele lengte een vijftal schoorstenen: 10 meter boven maaiveld, uitstroomsnelheid 10 m/s, geen luchtbehandeling	-28%	-15%	14	-	1%	1%	21	-
	67%	59%	0		-31%	-29%	0	
	2,1	1,1	14		0,0	0,0	21	

Legenda				Kosteneffectiviteit		Veiligheid	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid	>2	hoge kosteneffectiviteit	- -	veel moeite
ter hoogte van overkapping	ter hoogte van overkapping	investering	moelte	1 - 2	gemiddelde kosteneffectiviteit	-	weinig moeite
aan zuidelijke tunnelmond	aan zuidelijke tunnelmond	onderhoud		<1	lage kosteneffectiviteit	0	geen moeite
kosteneffectiviteit	kosteneffectiviteit	Life Cycle					

Er dient opgemerkt te worden dat de beoordelingsmatrix een enigszins vertekend beeld geeft van het effect dat optreedt bij een bestaande tunnelmond. Omdat bij een bestaande tunnel de concentratie ter hoogte van het midden van deze tunnel reeds op het niveau van de achtergrondconcentratie ligt, zal de luchtkwaliteit als gevolg van overkapping hier nauwelijks voor een verandering zorgen.

1. INLEIDING

kader

De Europese Commissie heeft normen voor de luchtkwaliteit vastgesteld ter bescherming van de volksgezondheid. Luchtverontreiniging heeft namelijk vergaande gevolgen. Naar schatting overlijden alleen al in Nederland jaarlijks circa vijfduizend mensen vervroegd door luchtvervuiling in hun woon- en werkomgeving. Sinds 1 januari 2005 moet de luchtkwaliteit voldoen aan de norm voor fijn stof (PM10) en vanaf 2010 moet worden voldaan aan de norm voor stikstofdioxide (NO₂).

In Nederland wordt niet overal aan de gestelde Europese normen voldaan en daarom moeten er maatregelen worden genomen om de luchtkwaliteit te verbeteren. Hierbij zijn tal van partijen en instanties betrokken. Zo wordt er binnen het Innovatieprogramma Luchtkwaliteit (IPL) gewerkt aan innovatieve oplossingen die bijdragen aan verbetering van de luchtkwaliteit op en rond snelwegen. Beproefde maatregelen uit het IPL worden opgenomen in het Nationaal Samenwerkingsprogramma Luchtkwaliteit (NSL). Het NSL is een bundeling van alle gebiedsgerichte programma's in combinatie met alle Rijksmaatregelen.

Eén van de maatregelen binnen het IPL is het overkappen van snelwegen. Door delen van een snelweg te overkappen met een lichtgewicht constructie van kunststof of glas kan de luchtverontreiniging de directe omgeving alleen via de tunnelmonden bereiken. Voor de directe omgeving van de tunnel betekent dit een aanzienlijke verbetering van de luchtkwaliteit maar tegelijkertijd treedt er aan de tunnelmonden een verslechtering van de situatie op. Luchtbehandeling in de vorm van ventilatie en/of emissiezuivering kan mogelijk een oplossing voor dit probleem zijn.

Vanuit deze veronderstelling startte het IPL in de tweede helft van 2005 een pilot waarin wordt onderzocht in hoeverre een lichtgewicht constructie op een rijksweg kan worden geplaatst om ter plekke het luchtkwaliteitsprobleem voor de directe omgeving op te lossen.

In fase 1 van het project overkappen en luchtbehandeling is onderzocht welke vormen van luchtbehandeling er zijn. De verschillende systemen die reeds worden toegepast in traditionele tunnels en parkeergarages zijn in kaart gebracht en er is een overzicht gegeven van de state-of-the-art technologieën. Tevens zijn er door verschillende private partijen ontwerpen gemaakt van (mogelijke vormen van) lichtgewicht overkappingen.

doel en afbakening

Een overkapping kan een bijdrage leveren aan de verbetering van de luchtkwaliteit maar het is wel een zeer kostbare maatregel. De aanleg van een overkapping dient dan ook goed afgewogen te worden. Daartoe wordt in dit rapport de zogenoemde beoordelingsmatrix gepresenteerd. Met behulp van deze beoordelingsmatrix wordt onder andere inzicht gegeven in het effect van een bepaald type overkapping op een bepaald type luchtkwaliteitsknelpunt. Op basis van deze informatie kan Rijkswaterstaat beoordelen wanneer een overkapping haalbaar is en hoe deze kan worden toegepast. Hierbij is Rijkswaterstaat vooral geïnteresseerd in het voldoen aan de gestelde normen zoals vermeld in het Besluit Luchtkwaliteit. Rijkswaterstaat is in mindere mate geïnteresseerd in het aantal blootgestelden aan vervuilde lucht. De (politieke) gedachte is dat gezondheidseffecten voldoende worden gewaarborgd bij het voldoen aan de normen. Binnen dit onderzoek wordt de effectiviteit van een overkapping daarom alleen beschreven aan de hand van de verandering van de concentraties NO₂ en PM10 in de lucht.

Een ander neveneffect waarbinnen dit onderzoek geen verdere aandacht aan wordt besteed, is geluid. Een overkapping heeft in potentie weliswaar een geluidsreducerende werking maar deze geluidsreductie wordt voornamelijk bepaald door het type bouw materiaal en niet zozeer door het type overkapping. De keuze voor een bepaald type materiaal valt buiten de scope van dit project.

leeswijzer

Centraal binnen dit onderzoek staat de ontwikkeling van de beoordelingsmatrix. In deze matrix komt aan bod welk type overkapping geschikt is voor welke probleemsituatie. Hiertoe worden in hoofdstuk 2 de verschillende uitvoeringsvormen van een overkapping (de zogenoemde overkappingconfiguraties) benoemd en worden er verschillende karakteristieke probleemsituaties gedefinieerd. In hoofdstuk 3 wordt beschreven welk effect de verschillende overkappingconfiguraties hebben op de luchtkwaliteit. De veiligheidsaspecten staan centraal in hoofdstuk 4 en de kosten van de verschillende overkappingconfiguraties worden benoemd in hoofdstuk 5. In hoofdstuk 6 wordt de beoordelingsmatrix gepresenteerd waarmee kan worden beoordeeld welke overkappingconfiguraties in welke situatie een geschikte oplossing kunnen zijn. Hoofdstuk 7 sluit af met de belangrijkste conclusies van het onderzoek.

2. OVERKAPPINGSCONFIGURATIES EN PROBLEEMSITUATIES

In dit hoofdstuk worden de verschillende typen overkappingen (de zogenoemde overkappingconfiguraties) en de verschillende probleemsituaties gedefinieerd.

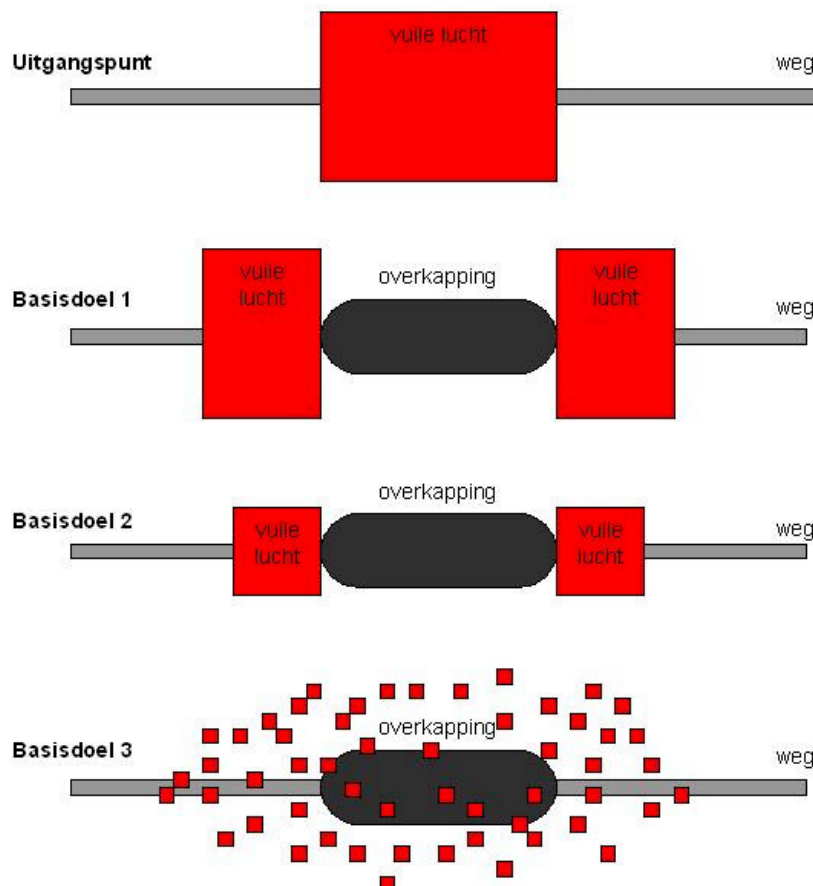
2.1. Basisprincipe van een overkapping

Een overkapping kan op drie manieren een bijdrage leveren aan de aanpak van een lokaal luchtkwaliteitsknoelpunt. Deze drie basisprincipes zijn:

1. verplaatsing van de vervuilde lucht;
2. vermindering van de vervuilde lucht;
3. verspreiding van de vervuilde lucht.

In afbeelding 2.1. zijn het uitgangspunt en de werking van de drie basisprincipes op schematische wijze weergegeven. Het spreekt voor zich dat een combinatie van de verschillende basisprincipes ook tot de mogelijkheden behoort.

Afbeelding 2.1. Basisprincipes overkapping (bovenaanzicht)



Basisprincipe 1 gaat uit van een overkapping die er alleen voor zorgt dat de vervuilde lucht vrijkomt op de een plek waar minder mensen last hebben van de vervuilde lucht. Zo kan bijvoorbeeld de emissie die in de stad wordt uitgestoten met behulp van een overkapping worden verplaatst naar een minder dichtbevolkt gebied. De hoeveelheid emissie die eerst verspreid langs de weg werd uitgestoten, wordt nu op twee andere locaties (de twee tunnelmonden) uitgestoten. Hierbij dient echter te worden opgemerkt dat overal aan de gestelde normen moet worden voldaan. Veelal zijn dus nog aanvullende maatregelen nodig.

In afbeelding 2.1. is de situatie weergegeven waarin de vervuilde lucht gelijkmatig over de beide tunnelmonden is verdeeld. Het is ook mogelijk om de vervuilde lucht met behulp van afzuig- en ventilatiesystemen aan één tunnelmond te laten vrijkomen. Met behulp van een ventilatiesysteem kan deze verdeling worden beïnvloed. Voor meer informatie over ventilatiesystemen wordt verwezen naar bijlage I.

Basisprincipe 2 gaat uit van een overkapping die er voor zorgt dat (een deel van) de vervuilende stoffen worden weggenomen zodat er minder vuile stoffen in de lucht komen. Dit kan worden gerealiseerd door de overkapping uit te rusten met een systeem voor emissiebehandeling. Voor meer informatie over de verschillende systemen voor emissiebehandeling wordt verwezen naar bijlage I.

Basisprincipe 3 gaat uit van een overkapping die er voor zorgt dat de vervuilde lucht zich beter kan mengen met de buitenlucht waardoor er in de directe omgeving een minder sterke piekbelasting ontstaat. Dit kan worden gerealiseerd door ventilatieopeningen te maken in het dak van de overkapping. Doordat de vervuilde lucht op grotere hoogte wordt uitgestoten, kan deze zich beter mengen met de schone lucht. Hierdoor wordt de concentratie verlaagd. Dit effect kan worden versterkt door de vervuilde lucht met behulp van schoorstenen op nog grotere hoogte uit te stoten. Voor meer informatie over het gebruik van schoorstenen wordt verwezen naar bijlage I.

Zowel basisprincipe 2 als basisprincipe 3 zorgen voor een verminderde concentratie in de buurt van de overkapping. Indien echter wordt gekeken naar het effect op de achtergrondconcentratie dan is er sprake van een principiële verschil. Bij het verspreiden van de vervuilde lucht blijft de totale hoeveelheid schadelijke stoffen namelijk gelijk. Een afname van de lokale concentratie wordt in dit geval gecompenseerd door een toename van de achtergrondconcentratie. Bij het reinigen van vervuilde lucht neemt de hoeveelheid schadelijke stoffen af en dalen zowel de lokale concentratie als de achtergrondconcentratie.

2.2. Onderscheidende overkappingconfiguraties

Een overkappingconfiguratie is een bouwtechnische constructie die, al dan niet in combinatie met een systeem voor ventilatie en/of emissiebehandeling, in staat is de verspreiding en/of uitstoot van schadelijke emissies in die mate te beïnvloeden dat daarmee de luchtkwaliteit op een specifieke probleemsituatie langs of op een rijksweg, aan de gestelde Europese kwaliteitsnormen zal gaan voldoen.

In theorie zijn er vele tientallen verschillende overkappingconfiguraties te benoemen. Het doel van dit onderzoek is echter om met behulp van een beperkt aantal configuraties een zo compleet mogelijk beeld te schetsen van de mogelijkheden (en onmogelijkheden) van overkappingen. Het is daarom van belang om configuraties met een onderscheidend karakter te benoemen. Bij het benoemen van onderscheidende overkappingconfiguraties zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- de onderscheidendheid van een overkappingconfiguratie wordt primair ingegeven door het (te verwachten) effect op de luchtkwaliteit en niet door de kosten of de uitvoeringsvorm;
- de hoogte waarop en de snelheid waarmee de vuile lucht wordt uitgestoten zijn van grote invloed op de verdunning en de verspreiding van vuile lucht (zie ook bijlage I);
- een overkappingconfiguratie wordt beschreven aan de hand van algemene kenmerken en niet aan de hand van beschikbare systemen van leveranciers of ontwerpen van private partijen.

Op basis van bovengenoemde uitgangspunten zijn een zestal kansrijke overkappingconfiguraties benoemd:

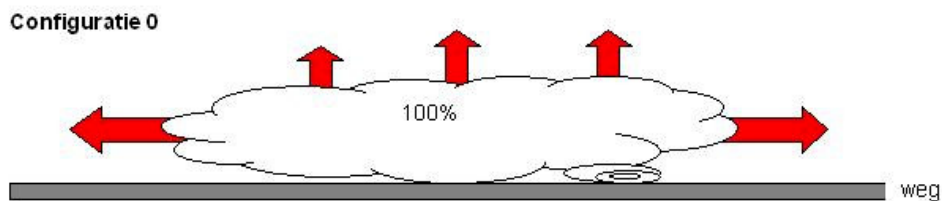
1. volledig gesloten overkapping;
2. overkapping met een sleuf in het dak;
3. overkapping met in het midden een hoge schoorsteen;
4. overkapping met aan beide tunnelmonden een hoge schoorsteen;
5. overkapping met over de hele lengte een aantal lagere schoorstenen;
6. overkapping met een systeem voor het afvangen van NO₂ en PM10.

Per overkappingconfiguratie is van tevoren bepaald welk percentage van de emissie van de vuile lucht via de tunnelopeningen - en indien van toepassing via het dak – wordt uitgestoten. Bij configuraties met ventilatieopeningen en schoorstenen is verondersteld, dat via het dak 50 % van de vuile lucht wordt uitgestoten. Dit uitgangspunt is gekozen om de resultaten van de berekeningen beter vergelijkbaar te maken.

referentiesituatie: weg zonder overkapping

De verschillende configuraties worden vergeleken met een 'normale' situatie waarbij er geen sprake is van een wegvak zonder overkapping. In deze referentiesituatie wordt de emissie gelijk over het wegvak verdeeld. Deze situatie is schematisch weergegeven in afbeelding 2.2.

Afbeelding 2.2. Weg zonder overkapping



configuratie 1: volledig gesloten overkapping

In configuratie 1 wordt er een volledig gesloten overkapping over de weg geplaatst. In deze situatie wordt aan elke tunnelmond 50 % van de totale emissie uitgestoten. Deze situatie is schematisch weergegeven in afbeelding 2.3.

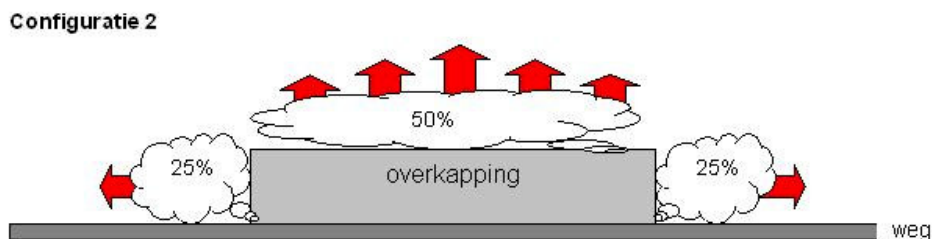
Afbeelding 2.3. Volledig gesloten overkapping



configuratie 2: overkapping een sleuf in het dak

Het dak van de overkapping van configuratie 2 bevat een sleuf die er voor zorgen dat 50 % van de totale emissie gelijkmatig via het dak van de overkapping wordt uitgestoten. De beide tunnelmonden stoten ieder 25 % van de totale emissie uit. Deze situatie is schematisch weergegeven in afbeelding 2.4.

Afbeelding 2.4. Overkapping met een sleuf in het dak

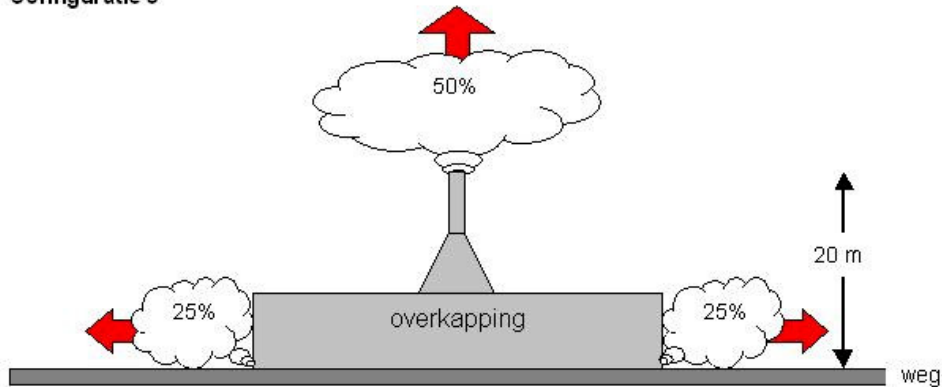


configuratie 3: overkapping met in het midden een hoge schoorsteen

Bij configuratie 3 wordt er in het midden een schoorsteen geplaatst die er voor zorgt dat 50 % van de emissie met een uitstroomsnelheid van 10 m/s op een hoogte van 20 meter boven maaiveld wordt uitgestoten. De overige 50 % wordt door beide tunnelmonden uitgestoten. Deze situatie is schematisch weergegeven in afbeelding 2.5.

Afbeelding 2.5. Overkapping in het midden een hoge schoorsteen

Configuratie 3

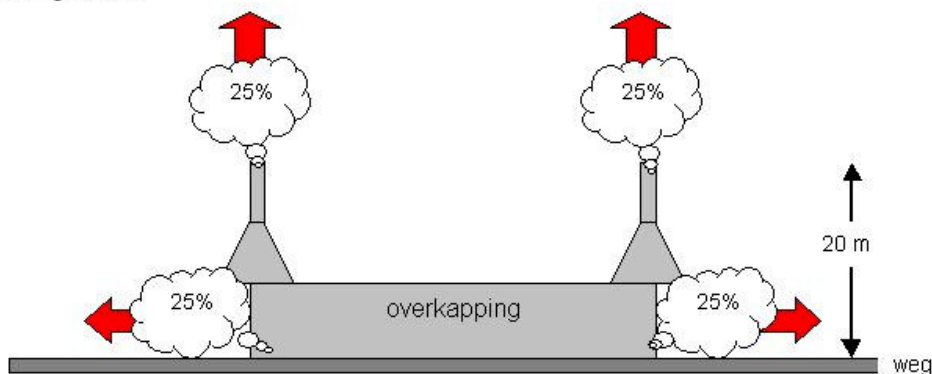


configuratie 4: overkapping met aan beide tunnelmonden een hoge schoorsteen

Bij configuratie 4 worden er aan beide tunnelmonden schoorstenen geplaatst die er voor zorgen dat de 50 % van de emissie (25 % per tunnelmond) met een uitstroomsnelheid van 10 m/s op een hoogte van 20 meter boven maaiveld wordt uitgestoten. De beide tunnelmonden stoten ieder nog 25 % uit. Deze situatie is schematisch weergegeven in afbeelding 2.6.

Afbeelding 2.6. Overkapping met aan beide tunnelmonden een hoge schoorsteen

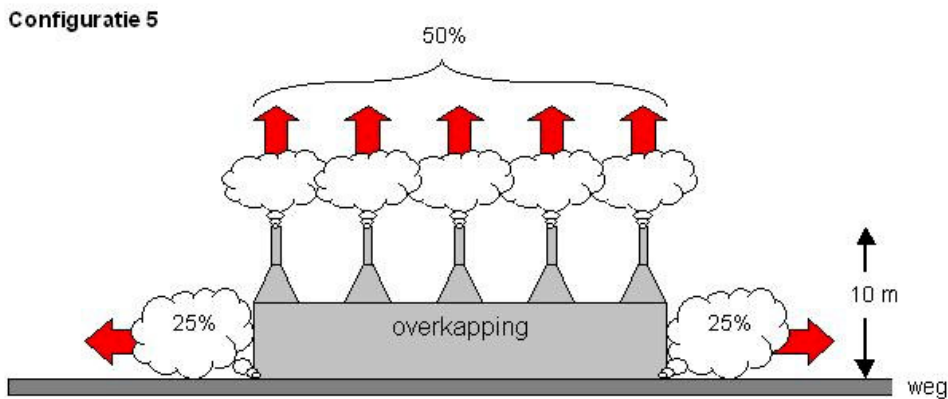
Configuratie 4



configuratie 5: overkapping met over de hele lengte een aantal lagere schoorstenen

Bij configuratie 5 worden er over de hele lengte van de overkapping vijf schoorstenen geplaatst die er gezamenlijk voor zorgen dat 50 % van de emissie met een uitstroomsnelheid van 10 m/s wordt uitgestoten op een hoogte van 10 meter boven maaiveld. Aan elke tunnelmond wordt 25 % van de totale emissie uitgestoten. Deze situatie is schematisch weergegeven in afbeelding 2.7.

Afbeelding 2.7. Overkapping met over de hele lengte een aantal lagere schoorstenen



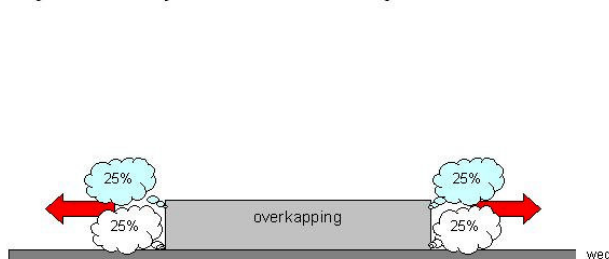
configuratie 6: overkapping met een systeem voor het afvangen van NO₂ en PM₁₀

Bij deze configuratie wordt een overkapping voorzien van een systeem voor emissiebehandeling waarmee een bepaald deel van de lucht kan worden gezuiverd. Een dergelijk systeem kan worden geïnstalleerd binnen overkappingconfiguraties 1, 3, 4 en 5. Er wordt van uitgegaan dat het systeem in staat is om 50 % van de emissievracht te behandelen. Bij configuratie 3, 4 en 5 betreft dit het deel dat door de schoorstenen wordt afgevoerd. In dit geval is de lucht die aan de tunnelmond wordt uitgestoten ongezuiverd. Bij configuratie 1 is de helft van de uitstoot aan de tunnelmonden wel gezuiverd en de andere helft niet. In paragraaf 2.3 wordt aangegeven hoe efficiënt de vuile lucht kan worden gezuiverd.

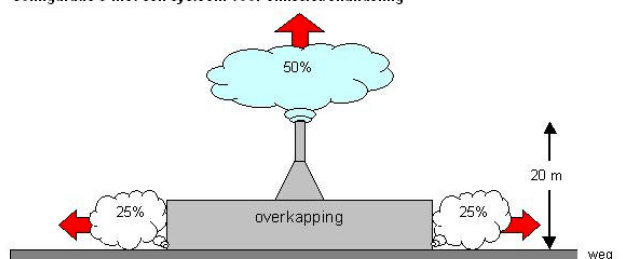
Ter illustratie is in afbeelding 2.8. schematisch weergegeven hoe configuratie 6 er in alle gevallen uit komt te zien. Het blauwe wolkje in deze afbeelding geeft weer welk deel van de lucht gezuiverd wordt.

Afbeelding 2.8. Configuratie 1, 3, 4 en 5 uitgerust met een systeem voor emissiebehandeling

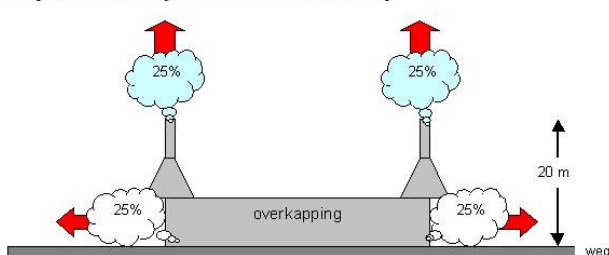
Configuratie 1 met een systeem voor emissiebehandeling



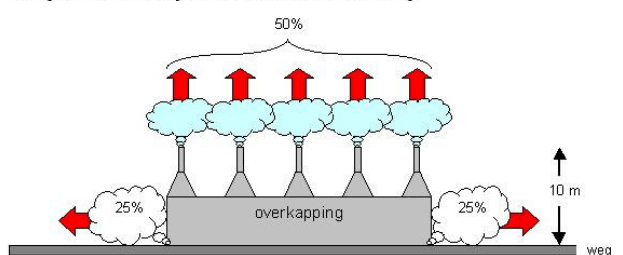
Configuratie 3 met een systeem voor emissiebehandeling



Configuratie 4 met een systeem voor emissiebehandeling



Configuratie 5 met een systeem voor emissiebehandeling



2.3. Verschillende uitvoeringsvarianten

In paragraaf 2.2. is een zestal configuraties benoemd met een (in potentie) onderscheidend effect op de luchtkwaliteit. Vijf van deze configuraties hebben een onderscheidend effect op de verspreiding van de emissie. De zesde configuratie heeft geen onderscheidend effect op de verspreiding van de emissie maar heeft invloed op de hoeveelheid emissie die wordt uitgestoten. Deze zesde configuratie is daarom als uitvoeringsvariant meegenomen binnen de andere vijf configuraties. Vanwege de onzekerheid omtrent het daadwerkelijke effect van de systemen van emissiezuivering (zie ook bijlage 1) wordt er hierbij uitgegaan van drie varianten te weten hoge afvang (95 %), gemiddelde afvang (80 %) en lage afvang (50 %).

Daarnaast wordt er met het oog op het belang van de verdunning en de verspreiding (zie ook bijlage 1) ook gevarieerd in de hoogte en de uitstroomsnelheid van de schoorstenen. Als alternatief voor de basishoogte van 20 meter is er voor configuratie 3 en 4 gekeken naar het effect van een schoorsteen van 10, 30 en 40 meter boven maaiveld. Als alternatief voor de basis uitstroomsnelheid van 10 m/s is er voor configuratie 3, 4 en 5 ook gekeken naar het effect van een uitstroomsnelheid van 5 m/s en 1 m/s. Daarnaast is er voor configuratie 4 ook gekeken naar het effect van een 10 meter lagere schoorsteen in combinatie met een uitstroomsnelheid van 5 m/s.

In tabel 2.1. zijn alle uitvoeringsvarianten weergegeven.

Tabel 2.1. Overzicht overkappingsconfiguraties en uitvoeringsvarianten

0 Weg zonder overkapping

1 Volledige gesloten overkapping

- a basisvariant: geen luchtbehandeling
- b met hoog percentage afvang NO₂ en PM10
- c met midden percentage afvang NO₂ en PM10
- d met laag percentage afvang NO₂ en PM10

2 Overkapping met een sleuf in het dak

- a basisvariant: geen luchtbehandeling

3 Overkapping met in het midden een schoorsteen

- a basisvariant: 20 meter boven maaiveld, uitstroomsnelheid 10 m/s, geen luchtbehandeling
- b met hoog percentage afvang NO₂ en PM10
- c met midden percentage afvang NO₂ en PM10
- d met laag percentage afvang NO₂ en PM10
- e met een uitstroomsnelheid van 5 m/s
- f met een uitstroomsnelheid van 1 m/s
- g met een 10 meter lagere schoorsteen
- h met een 10 meter hogere schoorsteen
- i met een 20 meter hogere schoorsteen

4 Overkapping met aan beide tunnelmonden een schoorsteen

- a basisvariant: 20 meter boven maaiveld, uitstroomsnelheid 10 m/s, geen luchtbehandeling
- b met hoog percentage afvang NO₂ en PM10
- c met midden percentage afvang NO₂ en PM10
- d met laag percentage afvang NO₂ en PM10
- e met een uitstroomsnelheid van 5 m/s
- f met een uitstroomsnelheid van 1 m/s
- g met een 10 meter lagere schoorsteen
- h met een 10 meter hogere schoorsteen
- i met een 20 meter hogere schoorsteen
- j met een 10 meter lagere schoorsteen icm met een uitstroomsnelheid van 5 m/s

5 Overkapping met over de hele lengte een vijftal schoorstenen

- a basisvariant: 10 meter boven maaiveld, uitstroomsnelheid 10 m/s, geen luchtbehandeling
- b met hoog percentage afvang NO₂ en PM10
- c met midden percentage afvang NO₂ en PM10
- d met laag percentage afvang NO₂ en PM10
- e met een uitstroomsnelheid van 5 m/s
- f met een uitstroomsnelheid van 1 m/s

2.4. Karakteristieke probleemsituaties

Een knelpuntsituatie is een locatie waar de luchtkwaliteitsnormen worden overschreden. De te hoge lokale concentratie is het gevolg van een substantiële bijdrage van het verkeer (emissie van schadelijke stoffen) en/of het gevolg van onvoldoende verspreiding/verdunding van de schadelijke stoffen door de lucht.

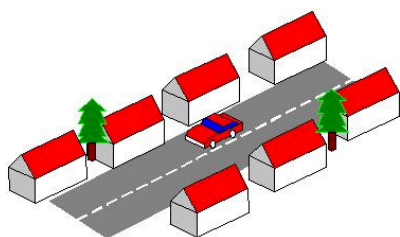
In de praktijk kunnen tal van specifieke knelpuntsituaties worden benoemd. Binnen dit project worden echter slechts vier karakteristieke situaties gedefinieerd. Met deze vier zogenoemde 'karakteristieke probleemsituaties' kan een groot deel van de werkelijke situaties worden afgedekt. De karakteristieke probleemsituaties zijn:

- binnenstedelijk (veel luchtstroombemmerende objecten → matige verspreiding);
- buitenstedelijk (vrije veld → goede verspreiding);
- verdiepte ligging (slechte verspreiding);
- bestaande tunnelmond (hoge concentratie).

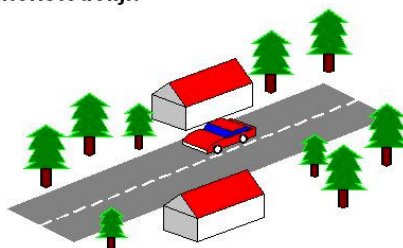
In afbeelding 2.9. zijn deze vier karakteristieke probleemsituaties schematische weergegeven. In afbeelding 2.10. zijn bestaande wegsituaties weergegeven die de probleemsituaties illustreren. Deze wegsituaties zijn niet noodzakelijkerwijs ook echte knelpuntsituaties waar op dit moment de normen worden overschreden. De dwarsdoorsneden van (mogelijke) overkappingconfiguraties zijn weergegeven in afbeelding 2.11.

Afbeelding 2.9. Schematische weergave van probleemsituaties

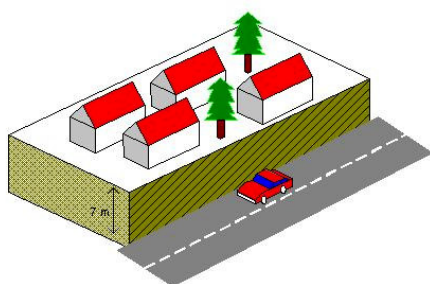
Binnenstedelijk



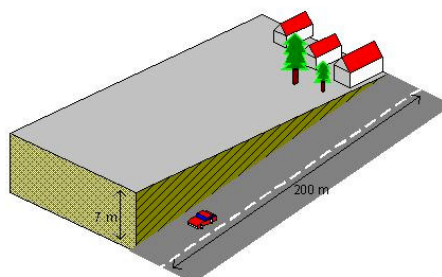
Buitenstedelijk



Verdiepte ligging



Bestaande tunnelmond



Afbeelding 2.10. Praktijkvoorbeelden van (mogelijke) probleemsituaties

Binnenstedelijk



Buitenstedelijk



Verdiepte ligging

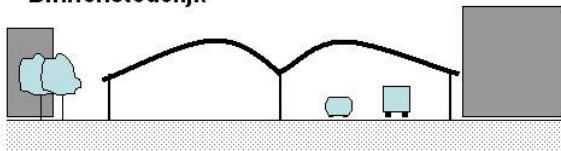


Bestaande tunnelmond

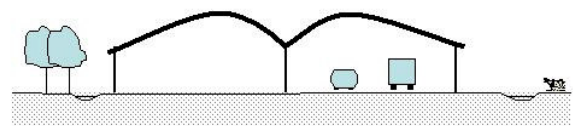


Afbeelding 2.11. Dwarsdoorsneden knelpuntsituaties

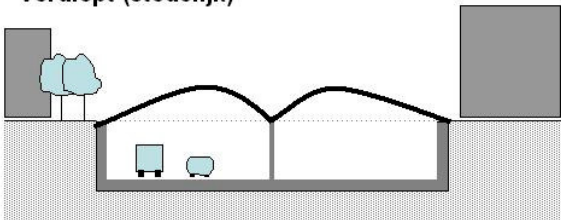
Binnenstedelijk



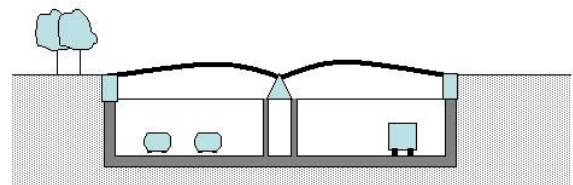
Buitenstedelijk



Verdiept (stedelijk)



Tunnelmond



2.5. Koppeling configuraties en probleemsituaties

In theorie kunnen alle overkappingconfiguraties worden toegepast op de vier verschillende knelpuntsituaties, maar van een aantal combinaties is op voorhand al aan te geven dat deze niet erg waarschijnlijk zijn. Zo is het bijvoorbeeld niet waarschijnlijk dat een bestaande tunnel wordt uitgerust met een schoorsteen in het midden. Indien sprake is van een tunnel onder water is dit sowieso niet mogelijk

maar ook indien de tunnel niet onder water is gesitueerd zal het aanbrengen van een schoorsteen voor complexe situaties zorgen.

Ook is het niet erg waarschijnlijk dat een verdiept liggende weg wordt voorzien van een dakconstructie waarin over de hele lengte een sleuf is aangebracht. De emissies worden dan immers nog steeds op maaiveldniveau uitgestoten. Ditzelfde geldt ook voor een bestaande tunnelmond. De sterke concentratiepiek aan de tunnelmond komt door de spleet alsnog op maaiveld terecht.

Een andere combinatie die niet logisch is, is het verlengen van een bestaande tunnel met een volledig gesloten overkapping zonder luchtbehandeling (basisvariant configuratie 1). Hiermee wordt het probleem namelijk alleen maar verplaatst. De kans dat er in Nederland een plek is, waar de hoge concentratiepiek uit een tunnelmond zonder problemen naar toe kan worden verplaatst, is verwaarloosbaar klein. Overigens is het verlengen van een bestaande tunnelmond in combinatie met luchtbehandeling wel een mogelijkheid (variant 1b, 1c en 1d)

Op basis van voortschrijdend inzicht en bovenstaande argumentatie is uiteindelijk besloten om in dit onderzoek geen specifieke aandacht te besteden aan de combinaties 'sleuf in dak/verdiepte ligging', 'sleuf in dak/bestaande tunnelmond' en 'schoorsteen in het midden/bestaande tunnelmond'. Deze combinaties zullen in de beoordelingsmatrix (hoofdstuk 6 en bijlage VI) dan ook niet worden ingevuld.

3. EFFECT OP DE LUCHTKWALITEIT

In hoofdstuk 2 zijn verschillende overkappingconfiguraties en probleemsituaties benoemd. In dit hoofdstuk wordt per probleemsituatie aangegeven welk effect de verschillende overkappingconfiguraties hebben op de luchtkwaliteit. Alvorens in paragraaf 3.3. de belangrijkste conclusies worden gepresenteerd, wordt in paragraaf 3.1. de aanpak toegelicht en in paragraaf 3.2. worden alle uitgangspunten en aannames vermeld. De resultaten van de luchtkwaliteitberekeningen zijn opgenomen in bijlage II.

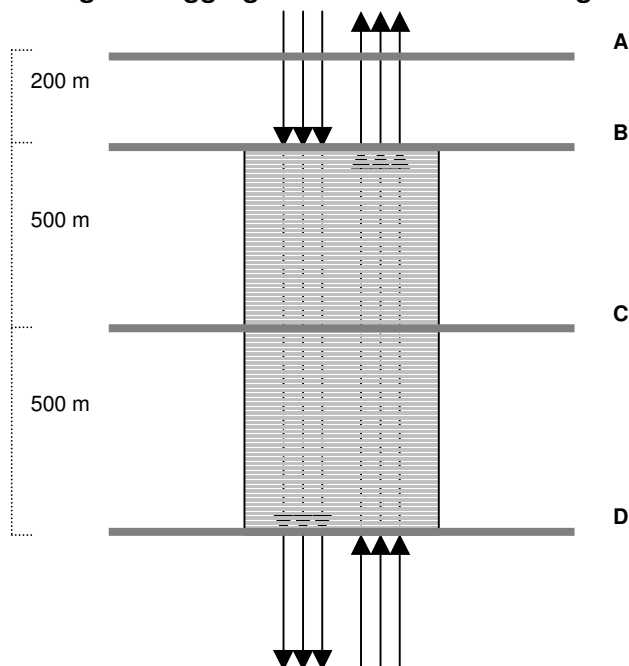
3.1. Aanpak effectbepaling

Voor het berekenen van de luchtkwaliteit is gebruik gemaakt van het verspreidingsmodel ADMS-Urban. ADMS-Urban is ontwikkeld door CERC (Cambridge Environmental Research Consultants) in Engeland en geldt in Europa als een toonaangevend model voor de berekening van verspreiding van (onder andere verkeers-)emissies in het kader van de Europese richtlijnen. ADMS-Urban is één van de modellen die zijn onderzocht in de modelvergelijking door VROM in 2006. Het model is goedgekeurd door de Minister van VROM voor het toepassingsbereik SRM1, SRM2, NNM en voor situaties die buiten het toepassingsbereik SRM1, SRM2 en NNM vallen (conform het Meet- en rekenvoorschrift bevoegdheden luchtkwaliteit). Hiermee is het model uitermate geschikt voor luchtkwaliteitonderzoeken voor situaties met zowel lijnbronnen (wegen), puntbronnen (schoorstenen), als volumebronnen (tunnelmonden). Uit validatie-studies voor een groot aantal verschillende situaties blijkt het model, in vergelijking met andere modellen uit Europa en de Verenigde Staten, uitmuntend te scoren.

De berekeningen zijn uitgevoerd ter hoogte van 4 dwarsprofielen met receptorpunten om de 5 meter tot een afstand van 100 meter van de wegas. In paragraaf 3.2.5. wordt nader ingegaan op het receptorpunt waarop de effectbepaling plaatsvindt.

In afbeelding 3.1. zijn de ligging en oriëntatie van de weg en dwarsprofielen schematisch weergegeven. De weg is noord-zuid georiënteerd en alle dwarsprofielen zijn oost-west georiënteerd (loodrecht op de weg). Door de gekozen ligging van de dwarsprofielen wordt eveneens de asymmetrische verspreiding als gevolg van winden met een zuidwestelijke component zichtbaar. Winden met een zuidwestelijke component komen relatief vaak voor en hebben bovendien doorgaans een hogere windsnelheid.

Afbeelding 3.1. Ligging en oriëntatie van de weg en de dwarsprofielen



In tabel 3.1. wordt een overzicht gegeven van de verschillende dwarsprofielen en hun ligging. Tevens wordt kort beschreven welk effect er aan de tunnelmond optreedt. Dwarsprofielen B en D hebben in principe dezelfde ligging, waarmee behalve het effect van de tunnelmond, ook het effect van de afwezigheid van emissies ter hoogte van de overkapping van belang is. Verschillen als gevolg van de meteorologie (met name de windrichting en snelheid) zullen hierdoor tot uitdrukking komen.

Tabel 3.1. Toelichting op de vier dwarsprofielen

A. 200 meter ten noorden van de noordelijke tunnelmond	dwarsprofiel A geeft de invloed van de overkapping op relatief grote afstand ten noorden van de overkapping. Gezien deze grote afstand kan dit dwarsprofiel worden gezien als referentiedwarsprofiel.
B. ter hoogte van de noordelijke tunnelmond	dwarsprofiel B geeft behalve het plaatselijke effect van de noordelijke tunnelmond, ook het effect van de afwezigheid van emissies ter hoogte van de overkapping. Als gevolg van de afwezigheid van deze emissies is de hier vandaan aangevoerde lucht relatief schoon in vergelijking met de situatie zonder overkapping.
C. ter hoogte van het midden van de overkapping	dwarsprofiel C geeft het effect ter plaatse (midden) van de overkapping.
D. ter hoogte van de zuidelijke tunnelmond	dwarsprofiel D geeft het behalve plaatselijke effect van de zuidelijke tunnelmond, ook het effect van de afwezigheid van emissies ter hoogte van de overkapping. Als gevolg van de overheersende zuidwestelijke wind wordt hier vuile lucht van zuidelijke rijbanen extra aangevoerd. Bij dwarsprofiel D zijn de concentraties van de vervuilde lucht daarom veelal iets hoger dan bij dwarsprofiel C.

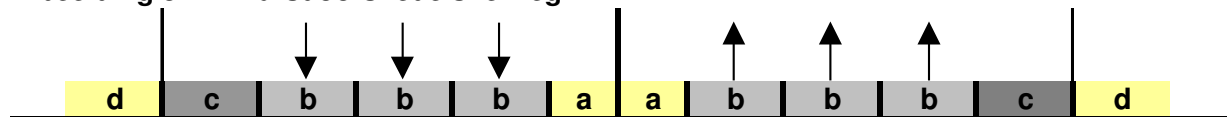
3.2. Uitgangspunten en aannames

In deze paragraaf zijn de belangrijkste uitgangspunten weergegeven die zijn gehanteerd bij de modellering van de luchtkwaliteit en de effecten van de overkapping. In het algemeen zijn de uitgangspunten ofwel bepaald op basis van ervaring met vergelijkbare luchtkwaliteitonderzoeken, ofwel in overeenstemming met literatuurkentallen.

3.2.1. Snelweg

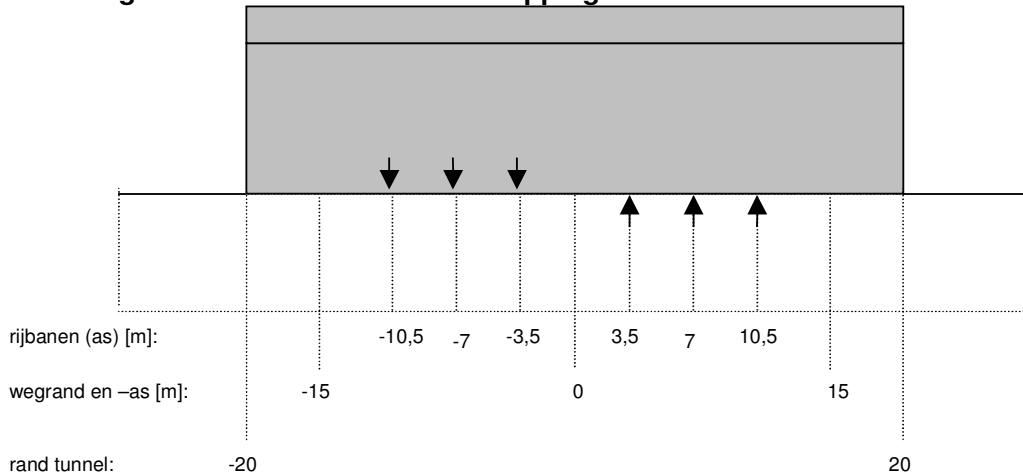
Uitgangspunt bij dit project is dat de overkapping geplaatst kan worden over een 'gemiddelde autosnelweg'. Deze 'gemiddelde autosnelweg' is gedefinieerd als een weg met twee rijbanen van elk 3 rijstroken en een vluchtstrook (zie afbeelding 3.2.). Een dergelijke weg is gemiddeld ruim 30 meter breed. Voor de modellering van de effecten op de luchtkwaliteit is met name de ligging van de rijbanen (as = lijnbron), ten opzichte van het midden van de snelweg relevant. Afbeelding 3.3 illustreert hoe de weg is gemodelleerd. Hierbij is de weg over de gehele lengte noord – zuid georiënteerd.

Afbeelding 3.2. Dwarsdoorsnede snelweg



- a middenberm
- b rijstrook (3,5 m)
- c vluchtstrook (3,5 m)
- d vrije ruimte

Afbeelding 3.3. Dwarsdoorsnede overkapping



De volgende verkeersgegevens zijn gehanteerd:

- verkeersintensiteit: 120.000 motorvoertuigen per etmaal;
- percentage vrachtverkeer: 8% zwaar en 4% middelzwaar;
- géén specifieke categorie bussen;
- geen onderscheid in de afzonderlijke rijbanen.

De gehanteerde emissiefactoren zijn representatief voor een gemiddelde snelheid 100 km/u waarbij geen sprake is van file (TNO, 2006). De emissiefactoren vallen in de categorie 'o100', waarbij gekozen is voor het jaar 2010. In tabel 3.2. zijn de emissiefactoren weergegeven.

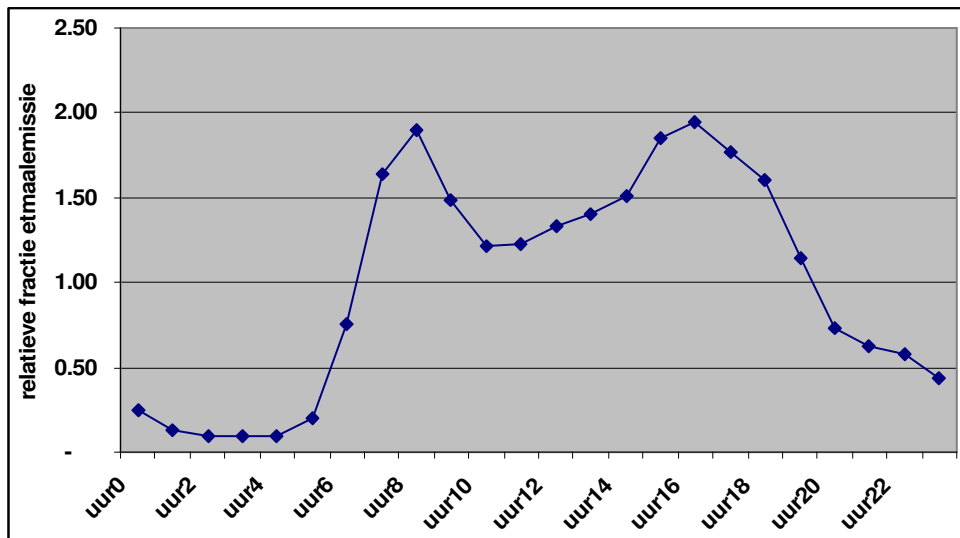
Tabel 3.2. Emissiefactoren 2010 "o100" [g/km/voertuig]

voertuigcategorie	NO _x	direct NO ₂	PM10
licht	0,172	0,064	0,035
middelzwaar vrachtverkeer	4,348	0,294	0,198
zwaar vrachtverkeer	4,658	0,315	0,189

De variatie gedurende de dag is gemodelleerd door middel van time varying emission factors (schaalfactoren). In afbeelding 3.4. is het etmaalprofiel weergegeven dat representatief is voor een randstedelijke situatie.

Er is een modelmatig verschil tussen enerzijds de onverdiepte knelpuntsituaties (binnen- en buitenstedelijk) en anderzijds de knelpuntsituaties waarbij de snelweg of de tunnelmond verdiept ligt. Onverdiept wordt de snelweg als lijnbron (per rij-as) gemodelleerd. In de knelpuntsituaties met verdiepte ligging wordt de snelweg niet als lijnbron gemodelleerd. De verspreiding van de verkeersemissies vindt op een andere wijze plaats. De verkeersemissies worden verondersteld goed te worden gemengd over de breedte van de tunnelbak, voordat de geëmitteerde stoffen worden verspreid. Daarnaast is verondersteld dat de luchtwervelingen door het verkeer niet of nauwelijks boven de tunnelbak uitkomen. Derhalve is de verdiepte weg als volumebron gemodelleerd met een veronderstelde volume van lengte (variabel) x wegbreedte (40 meter) x dikte (0,5 meter) op een hoogte vanaf 0 meter tot +0,5 meter.

Afbeelding 3.4. Etmaalprofiel time varying emission factors



3.2.2. Overkapping en tunnelmonden

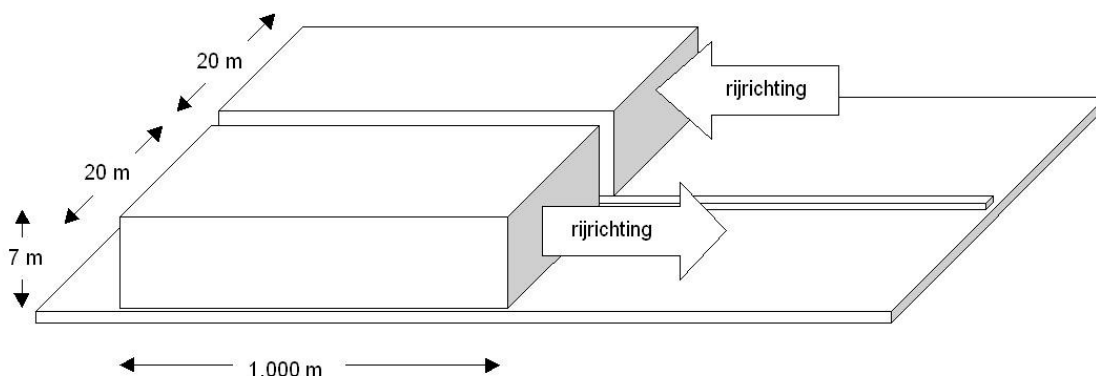
De overkapping verhindert de verspreiding van de verkeersemissies die plaatsvinden onder de overkapping. De overkapping heeft dus effect op de locatie waar de verkeersemissies uiteindelijk vrijkomen. Deze emissieverplaatsing is gemodelleerd door de totale emissievracht van het overkapte stuk snelweg te verdelen over de mogelijke emissiepunten. Het eenvoudigste geval is configuratie 1, waarbij de totale emissievracht verdeeld wordt over de twee tunnelmonden. In geval van sleuven in het dak (configuratie 2) of schoorstenen (configuratie 3, 4 en 5) wordt het betreffende (veronderstelde) deel van de emissievracht verder onderverdeeld over beide tunnelbakken.

De afmeting van de overkapping is in alle configuraties gelijk. De breedte van een gemiddelde snelweg (zie paragraaf 3.2.1.) is ruim 30 meter. Inclusief de benodigde ruimte voor de constructie van de overkapping, neemt de gehele overkapping 40 meter in beslag (zie afbeelding 3.4.). In verband met de gewenste luchtstroming wordt de overkapping uitgevoerd met twee aparte overkappingen ('tunnelbuizen'). Dit is in afbeelding 3.5. schematisch weergegeven.

De overkapping heeft de volgende afmetingen:

- lengte: 1000 meter;
- hoogte: 7 meter (doorrijhoogte 5m + 2m constructiehoogte);
- breedte volledige overkapping: 40 meter;
- breedte overkapping van één rijbaan: 20 meter.

Afbeelding 3.5. Schematische weergave overkapping op maaiveld (niet op schaal)



Er is verondersteld dat de emissie vrijkomt bij de tunnelmonden waar het verkeer de overkapping uit rijdt (aangezien de lucht in de overkapping met het verkeer wordt meegezogen). Verder is verondersteld dat de lucht in de overkapping goed wordt opgemengd door het verkeer dat de emissie, als gevolg van opwerveling, de overkapping verlaat op een hoogte van minimaal 3 meter en dat het verkeer een luchtstroom genereert die de vrijkomende 'tunnellucht' over een lengte van 40 meter (onverdund) meevoert. Samengevat zal de tunnellucht (met de veronderstelde emissievracht) naar verwachting geëmitteerd worden als een volumebron met de volgende kenmerken:

- lengte: 40 meter;
- breedte: 20 meter;
- dikte: 4 meter (hoogte vanaf 3 meter tot 7 meter);
- temperatuur: omgeving;
- emissievracht omgerekend naar massa per volume per tijdseenheid;
- initiële verticale en horizontale snelheid: 0 m/s.

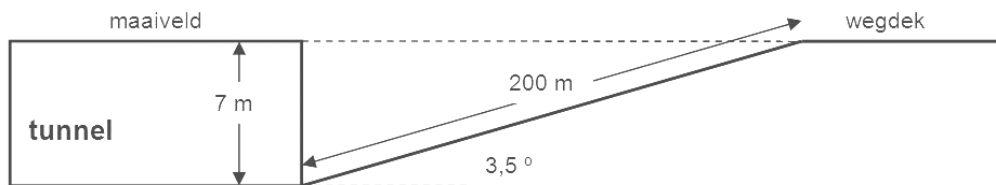
Het emissiepatroon van de tunnelmonden gedurende de dag (etmaal) correspondeert met de time varying emission factors zoals ook voor de verkeersemisies zijn gehanteerd.

specifieke uitgangspunten bij de verschillende knelpuntsituaties

Bij de verdiepte knelpuntsituatie ligt het wegdek op 7 meter onder maaiveld. In dit geval is de hoogte van de volumebron aangepast vanaf 0 meter tot 4 meter.

Bij een bestaande tunnelmond met verdiepte ligging wordt uitgegaan van een helling van 3,5 % voor de in- en uitrit. De lengte van de in- en uitrit komt daarmee op 200 meter. In afbeelding 3.6. is dit schematisch weergegeven.

Afbeelding 3.6. Schematische weergave van een bestaande tunnelmond (niet op schaal)



Voor overkappingconfiguratie 1 zijn aanvullende berekeningen uitgevoerd met emissiereducerende maatregelen, zoals is beschreven in hoofdstuk 2. Verondersteld is dat de maatregelen in totaal 50 % van de lucht onder de overkapping kunnen behandelen, en dat deze maatregelen de hoeveelheid luchtverontreinigende stoffen in de behandelde lucht reduceren met respectievelijk 50, 80 en 95 %. Hiermee bedraagt het effectieve rendement van de maatregelen respectievelijk 25, 40 en 47,5 % (van de totale emissie uit de tunnelmonden).

De modellering van overkappingconfiguratie 2 wijkt af van de overige configuraties. De sleuven in het dak van de overkapping zijn gemodelleerd als een serie kleine puntbronnen, met een totaal emitterend oppervlak van 2,5 % van de overkapping (ter vergelijking, dit komt overeen met een sleuf van 1 meter breed over de volle lengte van de overkapping). De overige kenmerken zijn weergegeven in tabel 3.3.

In geval van configuratie 2 bij snelwegen met een onverdiepte ligging, is het zeer waarschijnlijk dat de overkapping invloed heeft op de verspreiding van de emissies. De overkapping is in deze gevallen gemodelleerd als een gebouw met de afmetingen van de overkapping. Het ADMS-Urban model houdt alleen bij puntbronnen rekening met deze gebouwinvloed.

Tabel 3.3. Kenmerken configuratie 2 – modellering van de overkapping met sleuven in het dak

kenmerk		configuratie 2
aantal 'schoorstenen'		50
percentage emissievracht	[%]	50 x 1
totale schoorsteen hoogte	[m]	7
basis uitstroomsnelheid	[m/s]	0,6
schoorsteendiameter	[m]	5,0
volumeflux per schoorsteen	[m ³ /s]	11,1
temperatuur	[°C]	20

3.2.3. Schoorstenen

Bij de overkappingconfiguraties 3, 4 en 5 wordt een deel van de lucht onder de overkapping afgezogen en via één of meerdere schoorstenen op grotere hoogte geëmitteerd. De schoorstenen zijn gemodelleerd als puntbron, waarbij is verondersteld dat de schoorstenen een evenredig aandeel van de emissievracht emitteren (dus geen onderlinge verschillen in de schoorstenen per configuratie). Bij het vaststellen van de uitgangspunten bij de schoorsteenemissies is gebruik gemaakt van bestaande ervaring met (industriële) schoorsteenkenmerken.

Naast de vastgestelde schoorsteenhoogte is met name de uitstroomsnelheid van groot belang voor de verspreiding van de emissies. Als 'basis uitstroomsnelheid' is een gebruikelijke snelheid van 10 meter per seconde gehanteerd¹. Een dergelijke uitstroomsnelheid is zonder warmte-emissie niet te realiseren op basis van alleen natuurlijke ventilatie. Er zijn derhalve ook berekeningen uitgevoerd met lagere uitstroomsnelheden, waarbij de schoorsteendiameter als sluitpost is gehanteerd om het afgezogen volume gelijk te houden. Hierbij geldt dat hoe lager de uitstroomsnelheid is, hoe groter het oppervlak van de schoorsteen moet zijn om het gewenste volume af te kunnen zuigen. De schoorsteendiameter varieert dus per configuratie en is afhankelijk van het aantal schoorstenen en van de hoeveelheid af te zuigen lucht. De hoeveelheid af te zuigen lucht is afhankelijk van het volume onder de overkapping. Als gevolg van het relatief grote volume onder de overkapping (in vergelijking tot het volume bij normale tunnels), zijn er relatief brede schoorstenen nodig.

In tabel 3.4. zijn per configuratie de basiskenmerken van de schoorstenen weergegeven. Hierin komt onder andere naar voren dat er bij lage uitstroomsnelheden zeer brede schoorstenen nodig zijn. In het meest extreme geval kan de diameter van de schoorsteen oplopen tot ruim 26 meter. Het is maar zeer de vraag of het wenselijk is om zulke brede schoorstenen te realiseren. Zeker ook omdat de hoogte van de schoorsteen ook nog eens kan oplopen tot 40 meter boven maaiveld.

Bij de verdiepte ligging, ligt het wegdek op 7 meter onder maaiveld. De schoorsteen 'zakt' in dit geval 7 meter mee. De top van de schoorsteen ligt dan niet meer op 20 meter boven maaiveld, maar 13 meter boven maaiveld.

Het emissiepatroon gedurende de dag (etmaal) correspondeert met de time varying emission factors zoals ook voor de verkeersemissies zijn gehanteerd.

¹ Een dergelijke snelheid is ook het uitgangspunt in Maatregelen luchtkwaliteit Coentunnel (RWS Bouwdienst, 2006) en Eindrapport Coencompagnie (2006).

Tabel 3.4. Kenmerken schoorstenen per configuratie

kenmerk		configuratie 3	configuratie 4	configuratie 5
aantal schoorstenen		1	2	5
percentage emissievracht	[%]	1 x 50	2 x 25	5 x 10
totale schoorsteen hoogte *	[m]	20	20	10
basis uitstroomsnelheid	[m/s]	10	10	10
schoorsteendiameter	[m]	8,40	5,95	3,78
volumeflux per schoorsteen	[m ³ /s]	555	278	112
temperatuur	[°C]	20	20	20
alternatieven				
emissiereducerende maatregelen,	[%]	95/80/50	95/80/50	95/80/50
percentage afvang (hoog/midden/laag)				
schoorsteenhoogte	[m]	-10 / +10 / +20	-10 / +10 / +20	-10 / +10 / +20
uitstroomsnelheid	[m/s]	5 / 1	5 / 1	5 / 1
(corresponderende schoorsteendiameter)	[m]	(11,9 / 26,6)	(8,4 / 18,8)	(5,3 / 11,9)

* Bij knelpuntsituatie met verdiepte ligging is de totale schoorsteenhoogte met 7 meter verlaagd.

3.2.4. Meteorologie, omgeving en achtergrondconcentraties

De meteorologische meetstations Eindhoven en Schiphol worden representatief geacht voor respectievelijk het westelijk deel (kustprovincies) en het oostelijk deel (binnenland) van Nederland. Er is gebruik gemaakt van de meteorologie van meetstation Schiphol van het jaar 2002. Dit jaar is representatief voor een jaar met een gemiddelde meteorologie. Voor de luchtkwaliteitberekeningen voor het studiegebied worden de volgende uur tot uur meteorologische gegevens gebruikt:

- windsnelheid;
- windrichting;
- temperatuur;
- bewolgingsgraad.

Voor een correctie van de gemeten uur tot uur windsnelheid voor meetstation Schiphol naar de uur tot uur windsnelheid ter hoogte van het studiegebied is de ruwheid van het studiegebied een belangrijk gegeven. De ruwheid is afhankelijk van de aanwezigheid van bijvoorbeeld gebouwen en bomen. Een hoge ruwheid (bijvoorbeeld in een stedelijke omgeving of bos) resulteert in een ongunstigere verspreiding van emissies dan een lage ruwheid (bijvoorbeeld in een gebied met weilanden). Voor de binnenstedelijke knelpuntsituaties is een ruwheid gehanteerd van $z_0 = 1,3$ meter en voor de binnenstedelijke knelpuntsituatie is een ruwheid gehanteerd van $z_0 = 0,25$ meter.

De achtergrondconcentratie draagt in het algemeen voor een belangrijk deel bij aan de totale concentratie in het gebied. De achtergrondconcentratie bepaald feitelijk het effect van de overkapping. In de eerste plaats doordat een overkapping geen invloed heeft op de achtergrondconcentratie. Bovendien hangt de aanwezigheid van een knelpuntsituatie en de kans op nieuwe knelpunten (bijvoorbeeld bij de tunnelmond) sterk af van de achtergrondconcentratie, hetgeen weer de juridische haalbaarheid bepaalt in het kader van het Besluit Luchtkwaliteit 2005.

In de luchtkwaliteitberekeningen is uitgegaan van relatief hoge achtergrondconcentraties van de stoffen die relevant zijn voor de concentraties NO₂ en PM10. In onderstaande tabel 3.5. zijn de achtergrondconcentraties weergegeven. De concentraties zijn vergelijkbaar met de prognoses voor Amsterdam in 2010.

Tabel 3.5. Achtergrondconcentraties

stof	2006		opmerking
PM10	26,4	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	exclusief zeezoutcorrectie
PM10	21,4	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	inclusief zeezoutcorrectie
NO ₂	27,3	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	
NO	20,8	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	
O ₃	41,0	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	
SO ₂	2,8	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	van belang voor secundair fijn stof

3.2.5. Representatief receptorpunt

Een afstand van 10 meter vanaf de wegrand is representatief verondersteld, met een receptorhoogte van 1,5 meter boven maaiveld. Bij het bepalen van het representatieve receptorpunt zijn drie overwegingen relevant, waarop nader wordt ingegaan in de volgende subparagrafen.

toetsingsafstand

Bij juridische toetsing van projecten is het van belang om de resultaten ter hoogte van de toetsingsafstand te beschouwen. De grenswaarden uit het Besluit Luchtkwaliteit zijn in principe overal van toepassing. Uit jurisprudentie blijkt dat de minimale toetsingsafstand 4 meter vanaf het midden van de buitenste rijbaan bedraagt. Het Meet- en rekenvoorschrift schrijft onder voorwaarden een maximale toetsingsafstand voor van 5 meter vanaf de wegrand voor NO₂ en 10 meter vanaf de wegrand voor PM10. In geval van afscherpende maatregelen mag een ruimere afstand worden genomen. Met het plaatsen van een overkapping verandert derhalve de toetsingsafstand. Het is derhalve lastig om het effect van de overkapping te beschouwen op toetsingsafstand, aangezien dan het werkelijke effect op de concentraties NO₂ en PM10 wordt vertekend.

Er is voor gekozen om het effect te bepalen op immissieniveau, waarbij geen rekening is gehouden met eventuele veranderingen in de toetsingsafstand. De afstand van 10 meter van de wegrand (25 meter van de wegas) komt in de situatie met overkapping overeen met een afstand van 5 meter tot de rand van de overkapping.

ruimtelijk effect

Wanneer het effect van de overkapping op slechts één receptorpunt wordt beoordeeld, bestaat het risico dat een vertekend beeld ontstaat vanwege ruimtelijke verschillen in het concentratieverloop. Voor een deel is hierin voorzien door op enkele locaties het concentratieverloop langs een dwarsprofiel te berekenen. Door het concentratieverloop langs de verschillende dwarsprofielen weer te geven in grafieken, wordt inzicht verkregen in ruimtelijke effecten van de ligging van de verschillende bronnen en van de meteorologische omstandigheden. Deze grafieken vormen een belangrijke nuancering op de effectbepaling.

planmatig risico

Het effect van de overkapping op de concentraties NO₂ en PM10 is op voorhand in hoofdlijnen te beschrijven. Voor de directe omgeving van de tunnel betekent dit een aanzienlijke verbetering van de luchtkwaliteit maar tegelijkertijd treedt er aan de tunnelmonden een verslechtering van de situatie op.

Het is echter onmogelijk om op voorhand iets te zeggen over de juridische haalbaarheid van het plaatsen van de overkapping ten aanzien van de wetgeving. Het is dan ook onmogelijk om met de in deze studie uitgevoerde berekeningsvarianten algemene conclusies te trekken met betrekking tot de juridische haalbaarheid van een overkapping. Hiervoor is en blijft het noodzakelijk om per situatie specifieke berekeningen uit te voeren waarmee inzicht wordt verkregen in de omvang van overschrijdingsgebieden en of deze gebieden in omvang toe- of afnemen.

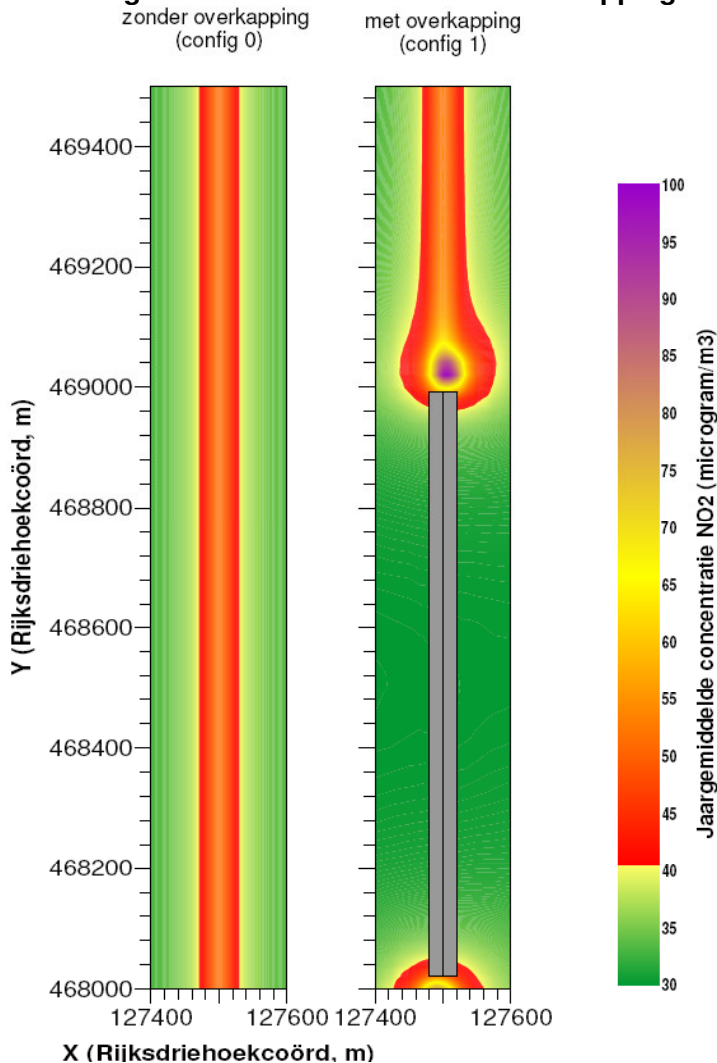
3.3. Belangrijkste bevindingen luchtberekeningen

In bijlage II worden de resultaten gepresenteerd van alle uitgevoerde luchtkwaliteitsberekeningen. Voor een deel zijn deze waarden ook terug te vinden in de uiteindelijke beoordelingsmatrix (zie hoofdstuk 6 en bijlage VI). In deze paragraaf worden de belangrijkste algemene conclusies gepresenteerd.

Uit de resultaten van de luchtkwaliteitsberekeningen blijkt dat een overkapping inderdaad een aanzienlijk effect heeft op de luchtkwaliteit. Ter plaatse van de overkapping (dwarsprofiel C) nemen de concentraties NO_2 en PM_{10} in alle gevallen af tot ongeveer het niveau van de achtergrondconcentratie. Het effect van de verschillende configuraties blijkt per situatie echter nauwelijks te verschillen. Alleen bij de toepassing van 5 schoorstenen met een hoogte van 10 meter en een uitstroomsnelheid van 1 m/s (configuratie 5f) blijkt de concentratie ter hoogte van dwarsprofiel C iets minder sterk te dalen dan bij de andere configuraties het geval is.

Aan de tunnelmonden (dwarsprofiel B en D) ontstaat een forse lokale piek in de concentraties NO_2 en PM_{10} (zie afbeelding 3.7.). Dit effect treedt het sterkst op in binnenstedelijke situaties met verdiepte ligging. Deze concentratiepiek kan worden beperkt door er voor te zorgen dat er minder vuile lucht door de tunnelmond wordt uitgestoten. Dit kan worden gerealiseerd door een deel van de vuile lucht via de bovenkant van de overkapping uit te stoten (configuratie 2, 3, 4 en 5) of door de lucht te zuiveren voor deze de tunnelmond verlaat (configuratie 1b, 1c en 1d).

Afbeelding 3.7. Situatie met en zonder overkapping voor een binnenstedelijke knelpuntsituatie



De effecten van de verschillende combinaties van schoorsteenhoogtes en uitstroomsnelheden blijken per situatie min of meer gelijk te zijn. De verschillen tussen de configuraties zijn zo klein dat in feite kan worden volstaan met de overkapping met de laagste uitstroomsnelheid en de laagste schoorsteenhoogte. Binnen dit onderzoek is dat de overkapping waarbij de vuile lucht middels een sleuf in het dak op 7 meter hoogte wordt uitgestoten (configuratie 2).

Het zuiveren van het deel van de vuile lucht dat via de schoorstenen wordt uitgestoten (configuratie 3, 4 en 5), heeft in vergelijking tot de situatie zonder zuivering, geen aanvullend effect op de concentratiewaarden aan de tunnelmonden (dwarsprofiel D) noch op de concentratiewaarden ter hoogte van de overkapping (dwarsprofiel C). Het zuiveren van het deel van de vuile lucht dat bij een volledig gesloten overkapping aan de tunnelmonden wordt uitgestoten (configuratie 1), zorgt wel voor een significante daling van de concentratiewaarden aan de tunnelmonden (dwarsprofiel D) maar niet voor een daling van concentratiewaarden ter hoogte van de overkapping (dwarsprofiel C).

Indien bij een volledig gesloten overkapping een hoog percentage (95 %) van de emissie aan de tunnelmond wordt afgevangen is het effect op de concentratie aan de tunnelmond vergelijkbaar met het effect dat optreedt bij het uitstoten van vuile lucht op grotere hoogte (door een sleuf in dak of door een schoorsteen). Zodra minder dan 95 % van de emissie wordt afgevangen, is het effect op de concentratie aanzienlijk kleiner.

4. VEILIGHEID

In fase 1 van het project overkappingen en luchtbehandeling heeft een aantal private partijen op verzoek van het IPL een ontwerp gemaakt van een lichtgewicht overkapping die aan alle constructieve eisen en veiligheidseisen voldoet². Al gauw werd echter duidelijk dat er extra aandacht besteed moest worden aan het aspect veiligheid. Strikt genomen moet een lichte overkapping voldoen aan de eisen uit de Tunnelwet, maar deze Tunnelwet is niet toegespitst op de toepassing van lichte overkappingen.

(Extra) voorzieningen die bij de inrichting van een lichte overkapping getroffen moeten worden om de veiligheid van de weggebruiker en de omgeving te garanderen, kunnen bepalend zijn voor de kosten van realisatie (en onderhoud) van de overkapping. Vooruitlopend op de beschrijving van de kosten in hoofdstuk 5, wordt in dit hoofdstuk aandacht besteed aan de benodigde veiligheidsvoorzieningen voor lichte overkappingen en de kosten die dit met zich meebrengt. In dit hoofdstuk wordt een antwoord gezocht op de volgende vragen:

- is een lichte overkapping juridisch gezien een tunnel en is het genoemde voorzieningenpakket ten behoeve van de veiligheid dus ook voor lichte overkappingen van toepassing?
- welke voorzieningen zijn noodzakelijk om een minimale veilige situatie te garanderen, omschreven naar inrichtingsvariant en omgevingstype?

4.1. Veiligheidsaspecten

Veiligheid speelt een bepalende rol bij de inrichting van een weg, zeker wanneer deze weg over grotere lengte overkluisd is (een tunnel of een overkapping). De voorzieningen die nodig zijn om de veiligheid in een tunnel te kunnen waarborgen zijn bij wet vastgelegd in de Tunnelwet.

Bij veiligheid in tunnels gaat het niet alleen om de veiligheid van de weggebruiker, maar ook de veiligheid van omwonenden en de veiligheid van de hulpverleners die optreden bij calamiteiten. De volgende aspecten spelen hierbij een rol (en kennen ook een bepaalde volgorde):

- hoe groot is de kans op een verkeersongeval;
- wat zijn de gevolgen bij een verkeersongeval;
- wat is de temperatuurstijging als gevolg van brand;
- wat is de rookontwikkeling als gevolg van brand;
- wat zijn de vluchtmogelijkheden bij een lichte overkapping;
- wat gebeurt er bij een explosie;
- wanneer bezwijkt een constructie als gevolg van temperatuurstijging;
- hoe is de bereikbaarheid van hulpdiensten gewaarborgd;
- wat is het risico op langdurige stremming als gevolg van bezwijken van de constructie?

In de Tunnelwet zijn voorzieningen voorgeschreven om alle omwonenden en gebruikers van een tunnel een bepaalde zekerheid te dienen bij incidenten, ongevallen, branden en explosies in een tunnel. Relevante veiligheidseisen uit de Tunnelwet zijn:

- de hoofdconstructie heeft een brandwerendheid van minimaal 60 minuten;
- vanaf 500 meter gesloten lengte is een tunnel altijd voorzien van mechanische ventilatie;
- er zijn geen op- en afritten aanwezig in een tunnel;
- vanwege rookverspreiding wordt in tunnels (in Nederland) altijd uitgegaan van gescheiden rijrichtingen;
- aan beide zijden is een slagboom aanwezig zodat ingaand verkeer geweerd kan worden in geval van een calamiteit;
- cameratoezicht, verkeersregelinstantie, toespreekinstallatie en matrixsignalering is noodzakelijk om de verkeer in reguliere situaties, bij congestie en incidenten veilig af te wikkelen;

² IPL (2007); Overkappen van wegen en luchtbehandeling – Een maatregel voor de luchtkwaliteit langs hoofdwegen; rapport fase 1; juni 2007.

- voor hulpdiensten zijn doorsteekmogelijkheden beschikbaar om calamiteiten goed en snel te kunnen benaderen.

Deze eisen gelden onverkort voor lichte overkappingen, maar de uitvoeringsvorm kan verschillen met tunnels onder de grond en/of onder water. In paragraaf 4.3. wordt hier nader op ingegaan. Hiervoor wordt in paragraaf 4.2. eerst het juridisch kader besproken.

4.2. Juridisch kader

De Tunnelwet is van toepassing als een weg over een lengte van meer dan 250m overkapt is. Dit betekent dat aan een lichte overkapping in principe dezelfde veiligheidseisen worden gesteld als aan een tunnel. Juridisch is de status van een lichte overkapping nog niet vastgelegd. De inhoud van de Tunnelwet geeft hierover ook geen uitsluitel. De commissie Tunnelveiligheid kan bij navraag ook niet op voorhand criteria en/of situaties benoemen, waarbij de Tunnelwet wel of niet van toepassing is voor lichte overkappingen.

In de Tunnelwet is een groot aantal voorzieningen en inrichtingseisen voorgeschreven, die volgen uit het krappe profiel van een tunnel. Uit kostenoverwegingen hebben tunnels namelijk minimale afmetingen, waarbinnen het verkeer nog wel veilig en goed afgewikkeld kan worden. Een lichte overkapping is echter niet krap gedimensioneerd en heeft mede daardoor een ander risicoprofiel dan een tunnel. Ook de omgeving van een overkapping resulteert in een ander risicoprofiel dan voor de meeste tunnel (vergelijk een vrij liggende in het buitengebied met een tunnel onder water). Het risicoprofiel bepaald uiteindelijk de kosten van de benodigde veiligheidsvoorzieningen.

Het valt ook te bediscussiëren in hoeverre de inrichting en vormgeving van een lichte overkapping niet meer weg heeft van een atrium of een verblijfsruimte met een overdekte kap (denk aan winkelcentra, busstations e.d.). In dat geval is het ook waardevol om de eisen in het Bouwbesluit na te lopen. Een vergelijking tussen de Tunnelwet en het Bouwbesluit leert dat beide documenten eisen stellen aan de vluchtroutes en vluchttijd van groepen personen die zich in het vertrek bevinden. Verder mag de hoofdconstructie niet binnen een bepaalde tijd bezwijken.

In algemene zin wordt aangenomen dat de Commissie Tunnelveiligheid een verlenging van een tunnel met een lichte overkapping zal zien als integrale opgave, waarbij de Tunnelwet op de gehele constructie van toepassing wordt verklaard. In dergelijke gevallen ligt het voor de hand om de vereiste voorzieningen voor vluchtroutes, ventilatie, beveiliging, pompinstallaties en andere voorzieningen zoals beschreven in de Tunnelwet, ook van toepassing te verklaren op de lichte overkapping. Belangrijk aandachtspunt hierbij is de sterkte van de constructie en de mogelijkheden om hier voorzieningen aan op te hangen.

De Commissie Tunnelveiligheid biedt de ruimte om onderbouwd af te wijken van het gestelde voorzieningenniveau uit de Tunnelwet. Dit kan door:

- de noodzaak van de gekozen oplossingen aan te geven, waarbij aangetoond wordt dat de gekozen oplossing gelijkwaardig of beter is dan hetgeen de Tunnelwet beschrijft en/of voorschrijft;
- het overgebleven risico te beschrijven en een onderbouwing te geven waarom dit risico acceptabel is.

In de volgende paragraaf wordt een voorzet gegeven, welk voorzieningenniveau noodzakelijk en wenselijk is bij lichte overkappingen, onderverdeeld naar omgevingstype en het al dan niet beschikbaar zijn van een ruim profiel. Dit voorzieningenniveau vormt een goed uitgangspunt voor toetsing bij de Commissie Tunnelveiligheid. De Commissie toetst echter alleen concrete situaties.

4.3. Benodigde veiligheidsvoorzieningen bij lichte overkappingen

In samenspraak met de Bouwdienst (de heer Huyben) is nagedacht over de condities en argumenten waarbij veiligheidsvoorzieningen in een tunnel nuttig dan wel noodzakelijk zijn. Hieruit volgt ook een

onderbouwd kader wanneer de Tunnelwet (naar verwachting) van toepassing wordt verklaard door de Commissie Tunnelveiligheid. Deze commissie toetst een tunnelontwerp op veiligheidsaspecten en hanteert daarbij de eisen uit de Tunnelwet als kader. De commissie heeft geen adviserende taak.

Om te komen tot een lijst met minimum voorzieningen bij lichte overkappingen om het veiligheidsniveau te waarborgen, is het gestelde kader uit de Tunnelwet het vertrekpunt geweest.

Omdat bij de inrichting en vormgeving van een lichte overkapping met name rookberging en vluchtroutes bepalend zijn, wordt onderscheid gemaakt naar een ruime en hoge inrichtingsvariant en een krappe, minimale inrichtingsvariant. Het benodigde minimale niveau aan veiligheidsvoorzieningen wordt daarmee voor de volgende varianten vastgesteld:

Binnenstedelijk (zijdelingse ruimtelijke beperkingen)

- ruim en hoog dwarsprofiel;
- regulier minimaal dwarsprofiel;
- variant met sleuven/openingen in het dak (naar elkaar gebogen geluidsschermen met opening);

Buitenstedelijk (vrij toegankelijke omgeving)

- ruim en hoog dwarsprofiel;
- regulier minimaal dwarsprofiel;
- variant met sleuven/openingen in het dak (naar elkaar gebogen geluidsschermen met opening);

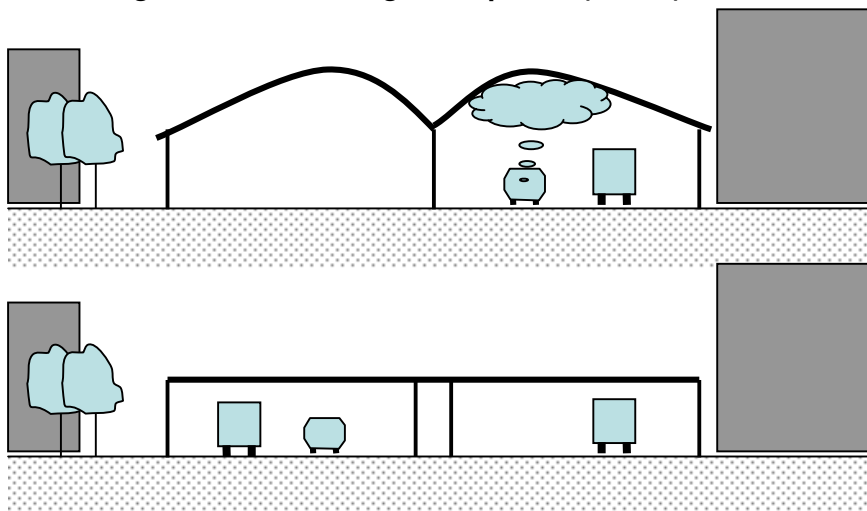
Verdiepte ligging (zijdelingse en niveau belemmeringen)

- ruim en hoog dwarsprofiel;
- regulier minimaal dwarsprofiel;

Verlenging tunnelmond (onderdeel van tunnel)

- regulier minimaal dwarsprofiel;
- variant met sleuven/openingen in het dak (naar elkaar gebogen geluidsschermen met opening).

Afbeelding 4.1. Ruim en hoog dwarsprofiel (boven) en minimaal dwarsprofiel (onder)



Voor elk van de vier omgevingstypen zijn aspecten benoemd die van invloed zijn op het benodigde voorzieningenniveau bij lichte overkappingen:

- veiligheid en vluchten gebruikers;
- hulpverlening en repressie;
- veiligheid omwonenden (externe veiligheid);
- doorstroming/economische schadebeheersing;

Bij de beoordeling van het veiligheidsniveau is het mogelijk om per locatie en omgevingstype het voorzieningenniveau te benoemen. Het voorzieningenniveau kan worden benoemd op basis van:

- basis voorzieningen;
- zelfredzaamheid vluchten;
- compartimentering en rookbeheersing;
- hulpverlening en brandstrijdig;
- brandwerendheid;
- Tunnel Technische Installaties (TTI) (onder andere luidspreker- en intercominstallatie);
- detectie;
- verlichting;
- verkeersafwikkeling.

In de bijlage III is een overzicht met noodzakelijke (X in tabel) en wenselijke (O in tabel) voorzieningen opgenomen om lichte overkappingen veilig vorm te geven. Door kostenexperts zijn per voorziening en naar omgevingstype, kostenkennallen toegekend per strekkende kilometer tunnel op basis van een benchmark met recent ontworpen en aangelegde tunnels in Nederland. Hierbij is aangenomen dat de referentiesituatie reeds beschikt over een aantal basisvoorzieningen zoals een verkeerssignalering met signaleringsportalen, een CCTV-systeem en openbare verlichting. De kosten van deze voorzieningen worden niet meegenomen binnen de kosten van een overkapping. In de praktijk blijkt overigens dat de rijkswegen in grote delen van het dichtstedelijke gebied in de Randstad inderdaad over deze basisvoorzieningen beschikken.

Zoals eerder opgemerkt zijn de Tunnelwet en de hierin voorgeschreven voorzieningen en veiligheidseisen niet geschreven met het oog op lichte overkappingen. Analyse van de eisen uit de Tunnelwet op basis van bovengenoemde aspecten leidt dit tot de hieronder genoemde inzichten.

zelfredzaamheid vluchten

Om in geval van een calamiteit een tunnel binnen een bepaald tijdsbestek te kunnen verlaten zijn vluchtroutes noodzakelijk. In de praktijk blijkt de realisatie van een middenkanaal tussen twee tunnelbuizen/bakken een kosteneffectieve oplossing. Bij lichte overkappingen zijn de afmetingen van een overkapping echter minder kostenbepalend en komen (afhankelijk van omgeving) andere oplossingen in beeld om de veiligheid van weggebruikers te garanderen. Vluchtroutes kunnen namelijk op maaiveld eenvoudig naar buiten ingericht worden. Hiermee wordt een scheiding tussen rijbanen en de aanleg van een middenkanaal om een vluchtroute te organiseren overbodig. Verder kan bij de vormgeving van een lichte overkapping rekening worden gehouden met extra rookberging. Hierdoor worden voorzieningen als het scheiden van rijbanen en het gebruik van ventilatie in de langsrichting om weggebruikers voldoende vluchtijd te geven, overbodig.

De kosten van vluchtwegen zijn waarschijnlijk zeer beperkt bij overkappingen op maaiveld. Het is daarom denkbaar dat er voor kortere afstanden tussen vluchtdeuren gekozen wordt dan bij tunnels. Hierdoor wordt het ook mogelijk de tijd tot bezwijken van de constructie te verkleinen, mits er een oplossing wordt gevonden voor beknelden in voertuigen. Ook de manier van bezwijken speelt hier een rol, het maakt voor de veiligheid nogal uit of de constructie instort of doorbuigt.

compartimentering en rookbeheersing

De Tunnelwet vermeldt dat bij overkappingen van meer dan 250 meter een ventilatiesysteem noodzakelijk is. Bij een lengte van meer dan 500 meter moet dit zelfs een mechanisch ventilatiesysteem zijn. Anders dan bij een tunnel onder de grond of onder water, zou je bij lichte overkappingen op maaiveld eenvoudigweg ventilatie creëren door 'ramen open te zetten'. Rookontwikkeling en stijging van de temperatuur kunnen hierdoor worden vertraagd of zelfs tot onschadelijke proporties worden beperkt.

Het verdient aanbeveling om in onderling overleg met de Commissie Tunnelveiligheid te verkennen in hoeverre een fysieke onderbreking met verticale dan wel dwarsventilatie en een vluchtroute voldoende onderscheid biedt om een aangepast (lees: passend maar minimaal) voorzieningenniveau voor de lichte overkapping van toepassing te verklaren.

Uit oogpunt van veiligheid is het wenselijk om extra rookberging boven het verkeer te creëren door een hoger dak te realiseren. Bij tunnels kosten dit teveel ruimte en dat maakt deze voorzieningen te duur. Bij lichte overkappingen is deze oplossing haalbaar en mogelijk kosteneffectiever dan dure mechanische ventilatiesystemen. Een hoog dak heeft als voordeel dat de vluchtmogelijkheden hierdoor in de tijd worden vergroot (minder rook op maaiveld). Daarnaast stijgt de temperatuur minder snel hetgeen het bezwijken van de constructie vertraagd.

brandwerendheid

De Tunnelwet schrijft voor dat de hoofddraagconstructie een brandwerendheid moet hebben van minimaal 60 minuten. Dit dient verschillende doelen, namelijk:

- voldoende tijd voor mensen om te vluchten, dan wel gered te worden door hulpdiensten;
- beperken economische schade aan constructie;
- het blijven functioneren van een belangrijke verbindingsweg; de herstelwerkzaamheden bij tunnels kunnen weken zo niet maanden vergen, met alle economische schade van dien.

De afwijkende constructie van een lichte overkappingen en de omgeving van een overkapping leidt mogelijk tot andere eisen dan bij (ondergrondse) tunnels. Het is de vraag in hoeverre verbindingsspannen en andere materialen tot de hoofddraagconstructie behoren en het al dan niet bezwijken leidt tot gevaarlijke situaties voor gebruikers van de tunnel. Belangrijke constatering is dat de economische schade aan de constructie en de benodigde tijd voor herstelwerkzaamheden bij lichte overkappingen wezenlijk anders zijn dan bij tunnels onder de grond of het water.

Het voorzieningenniveau bij brandwerendheid dient zich dan ook met name te richten op onveilige situaties als gevolg van branden en explosies. Wanneer een lichte overkapping ruim gedimensioneerd is, biedt dit mogelijkheden om temperatuurstijging bij branden te vertragen.

bereikbaarheid voor hulpdiensten

Een geheel vrijliggende weg is voor hulpdiensten beter bereikbaar dan een weg onder een lichte overkapping. Dankzij de aanwezigheid van vluchtstroken is de bereikbaarheid echter goed gewaarborgd. Hierdoor kunnen hulpdiensten ongestoord de overkapping inrijden om een calamiteit of pechgeval te bereiken. Bij tunnels nemen vluchtstroken teveel ruimte in beslag en zijn daardoor te duur. De Tunnelwet stelt vluchtstroken dan ook niet verplicht. In tunnels moeten de hulpdiensten het incident of de brand vanuit de tegenovergestelde richting of vanuit de andere tunnelbuis benaderen. Concrete ontwerpen worden in onderling overleg met brandweer, politie en ambulancediensten uitgewerkt.

5. KOSTEN

Een overkapping is een kostbare maatregel. Naast een grote investering voor de aanleg van een overkapping zijn er ook nog de nodige operationele kosten voor het onderhoud en reiniging. De kosten spelen dan ook, samen met het effect op de luchtkwaliteit, een belangrijke rol bij de afweging tussen verschillende maatregelen. In dit hoofdstuk worden de verschillende kostenposten benoemd en wordt een indicatie gegeven van de kosten van de verschillende overkappingconfiguraties. Een uitgebreidere onderbouwing van de kosten is opgenomen in bijlage IV.

5.1. Aanpak bepaling kosten

Bij de bepaling van de kosten is onderscheid gemaakt tussen investeringskosten, jaarlijkse kosten en life cycle kosten. Onder investeringskosten vallen de kosten voor de bouw van een overkapping en de kosten voor de aanleg van een eventueel te plaatsen systeem voor emissiebehandeling. Ook de realisatie van de verschillende veiligheidsvoorzieningen valt onder de investeringskosten. Kosten voor energie, beheer en onderhoud vallen onder de jaarlijkse kosten. De verschillende kostenposten worden samengevat in de zogenoemde life cycle kosten. Dit zijn de totale kosten gedurende de tijd dat de overkapping in gebruik is. Hierbij is uitgegaan van een levensduur van 10 jaar. In vergelijking met normale infrastructurele werken is dit een zeer korte periode. De levensduur is in dit geval echter niet gebaseerd op de levensduur van de constructie maar op het vermoeden dat over circa 10 jaar het merendeel van de luchtkwaliteitsknelpunten in grote lijnen is opgelost. Dit als gevolg van de steeds schoner wordende voertuigtechnieken in combinatie met aanvullende lokale maatregelen. Voor enkele overgebleven hotspots blijft een overkapping ook na een periode van 10 jaar nog nut hebben, maar naar verwachting geldt dat voor het merendeel van de knelpunten niet. Daarom wordt binnen dit verkennende onderzoek een levensduur van 10 jaar als uitgangspunt genomen.

De totale kosten van een overkappingconfiguratie (paragraaf 5.3.) zijn verkregen door de kosten van de verschillende onderdelen van de overkappingconfiguratie bij elkaar op te tellen (paragraaf 5.2.). Bij het bepalen van de kosten van de verschillende onderdelen werd gestreefd naar inzicht in de 'gemiddelde kosten' (kostenkentalen) van de verschillende voorzieningen. De diverse experts die hiervoor zijn geraadpleegd gaven echter allemaal aan dat er niet zoiets bestaat als 'gemiddelde kosten'. Het realiseren van een overkapping of een tunnel is maatwerk en de uiteindelijke kosten zijn sterk afhankelijk van de concrete uitvoeringsvariant en de lokale omstandigheden. Desalniettemin is getracht om kostenkentalen te formuleren waarmee het mogelijk is om enig inzicht te verkrijgen in de orde van grootte van de kosten van een overkapping.

uitgangspunten en aannames

Bij de bepaling van kosten zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- afmeting overkapping ($l \times b \times h$)
 - 1000 x 40 x 7 meter (zie ook paragraaf 3.2);
- uitstroomsnelheid schoorsteen:
 - 10 m/s (tenzij anders vermeld in omschrijving variant);
- luchtsnelheid onder overkapping:
 - 4 m/s;
- luchtdebiet:
 - één tunnelbuis: $560 \text{ m}^3/\text{s}$ (=oppervlakte tunnelmond (140 m^2) x luchtsnelheid in tunnel)
 - complete overkapping: $1.120 \text{ m}^3/\text{s}$ (circa $4.000.000 \text{ m}^3/\text{h}$).

5.2. Kosten per onderdeel

Bij het benoemen van de kosten van een overkappingconfiguratie worden de volgende onderdelen onderscheiden:

- de overkappingconstructie (tabel 5.1.);
- de schoorsteen/schoorstenen (tabel 5.2.);
- het afzuig- en ventilatiesysteem (tabel 5.3.);

- het emissiezuiveringssysteem (tabel 5.4.);
- de veiligheidsvoorzieningen (tabel 5.6.).

De kosten zijn weergegeven in de vorm van kentallen. Deze kostenkentallen zijn primair bedoeld om inzicht te geven in de orde van grootte van de kosten ('gemiddelde kosten') en kunnen niet worden gebruikt voor het opstellen van begrotingen en/of budgetreserveringen.

Deze paragraaf beperkt zich tot het presenteren van de verschillende kosten. In bijlage IV wordt een uitgebreide onderbouwing gegeven van de kosten van de verschillende onderdelen van een overkapping.

5.2.1. De overkappingconstructie

De kosten van de realisatie van een 'kale' overkapping zijn afhankelijk van het ontwerp van de overkapping en van de gebruikte materialen. Verschillende ontwerpers/leveranciers hebben verschillende ontwerpen gemaakt en de kosten hiervan variëren van 6 tot 65 miljoen per kilometer overkapping. De gemiddelde kosten voor een overkapping op maaiveld zijn bepaald op 10 miljoen euro per kilometer.

Indien een overkapping wordt geplaatst over een weg welke verdiept is aangelegd, kan er worden bespaard op wanden van de constructie. In het gunstigste geval hoeft alleen de dakconstructie te worden gerealiseerd. Naar schatting kost een overkapping over een verdiept liggende weg rond de 5 miljoen euro per kilometer.

Bij een constructie die aansluit op een bestaande tunnelmond kan eveneens worden bespaard op de wanden van de constructie. Daar staat echter tegenover dat er aanpassingen gemaakt moeten worden om de overkapping op de tunnel te laten aansluiten. Naar verwachting zal een overkapping die aansluit op een bestaande tunnelmond in prijs niet veel afwijken van een overkapping op maaiveld.

In tabel 5.1. worden de kosten voor de verschillende constructies gepresenteerd.

Tabel 5.1. Kosten voor de overkappingconstructie

	kosten (mln €)
constructie op maaiveld	10
constructie over een verdiept liggende weg	5
constructie aansluitend op bestaande tunnelmond	10

5.2.2. De schoorsteen

De kosten van een schoorsteen worden bepaald door de hoeveelheid benodigd materiaal voor zowel de fundering als voor de schoorsteen zelf. De hoeveelheid benodigd materiaal wordt bepaald door de hoogte en het oppervlak van de schoorsteen. De hoogte van de schoorsteen is reeds per configuratie vastgesteld en de doorsnede wordt bepaald aan de hand van de hoeveelheid af te zuigen lucht in combinatie met de snelheid waarmee de lucht de schoorsteen moet verlaten (uitstroomsnelheid). Het blijkt dat de benodigde diameter van de schoorsteen per situatie sterk verschilt. De kleinste benodigde diameter is 4 meter en de grootste 35 meter (zie bijlage IV).

De voorgestelde lichte overkappingconstructies zijn niet in staat om het gewicht van een schoorsteen te dragen. De schoorsteen zal daarom rechtstreeks op het maaiveld worden geplaatst. Hierdoor is er wat betreft de lengte geen verschil tussen de schoorstenen die geplaatst moeten worden op verdiept aangelegde overkappingen en schoorstenen die geplaatst moeten worden op overkappingen op maaiveld. De kosten zijn dus niet afhankelijk van de karakteristieke knelpuntsituatie.

Op basis van de kenmerken en de kostenramingen van de schoorstenen binnen de projecten Zuidas en A6/A9 is bepaald wat de kosten zijn van één schoorsteen bij verschillende schoorsteenlengte en di-

ameter (zie ook bijlage IV). Aan de hand van dit kostenoverzicht is per configuraties bepaald wat de kosten zijn voor de benodigde schoorstenen. In tabel 5.2. wordt een overzicht gegeven van de totale kosten van de verschillende schoorstenen die nodig zijn bij de verschillende configuraties.

Tabel 5.2. Kosten voor de schoorsteen/schoorstenen

aantal schoorstenen	hoogte (m)	uitstroom-snelheid (m/s)	totale kosten (mln €)
1	10	10	1,5
	20	10	1,8
	30	10	2,1
	40	10	2,5
	20	5	2,7
	20	1	4,5
	10	10	3,0
	20	10	3,6
2	30	10	4,2
	40	10	5,0
	10	5	3,0
	20	5	3,6
	20	1	7,2
5	10	10	3,8
	10	5	3,8
	10	1	7,5

5.2.3. Het afzuig- en ventilatiesysteem

De kosten van een afzuig- en ventilatiesysteem worden gevormd door de kosten van de ventilatoren, de geluidsdempers, de besturingsinstallatie, de techniekruimte en het energiegebruik. Veruit de grootste kostenpost bij een afzuig- en ventilatiesysteem zijn de benodigde ventilatoren. De hoeveelheid lucht die de ventilatoren moeten verplaatsen (m^3/s) en de drukverschillen die overbrugt moeten worden, zijn bepalend voor de uiteindelijke kosten. De kosten voor afzuiging zijn dus niet afhankelijk van de hoeveelheid schoorstenen, noch van de karakteristieke knelpuntsituatie.

Aan de hand van de kosten voor de afzuig- en ventilatiesystemen zoals benoemd binnen de projecten Zuidas en A6/A9 (bijlage IV) is bepaald dat de benodigde gemiddelde investeringskosten voor de afzuiging van $1 m^3/s$ circa 5.700 euro per kilometer overkapping bedraagt. De gemiddelde energiekosten voor de afzuiging van $1 m^3/s$ bedragen circa 630 euro per jaar per kilometer overkapping. Deze kosten per m^3/s zijn verkregen door de investeringskosten en jaarlijkse kosten te delen door de lengte van de tunnel. Dit resulteert in de kosten per kilometer overkapping. Dit bedrag is vervolgens gedeeld door het af te zuigen debiet per kilometer overkapping.

Door de kosten voor de afzuiging van $1 m^3/s$ te vermenigvuldigen met het optredende luchtdebiet bij een luchtsnelheid van 4 m/s (debiet: $1120 m^3/s$) kunnen de kosten voor de basisoverkapping worden bepaald. De investeringskosten en de jaarlijkse kosten voor de overkappingsconfiguratie staan weer gegeven in tabel 5.3.

Tabel 5.3. Kosten voor het afzuig- en ventilatiesysteem

	kosten (mln €)
aanschaf afzuig- en ventilatiesysteem	6,4
energiegebruik (per jaar)	0,7

5.2.4. Het emissiezuiveringssysteem

De investeringskosten en de energiekosten van een emissiezuiveringssysteem worden bepaald door de hoeveelheid te behandelen lucht. De hoeveelheid af te vangen emissie is bepalend voor de onderhoudskosten (reiniging).

Bij het vaststellen van de kosten voor een emissiezuiveringssysteem is gebruik gemaakt van de beschikbare kostenramingen van de doekenfilters van Camfill (PM10 en NO₂), het filtersysteem Ecco van Aigner (PM10), het Fujita plantenfilter (PM10 en NO₂) en van de fotokatalytische verf van het consortium Vogel-BAM. Ook is gebruik gemaakt van de kostenraming van het systeem Ecco (Aigner) en het CLAIR Filter systeem (FILTRONtec) zoals behandeld binnen de projecten Zuidas en A6/A9 (zie ook bijlage IV).

Met behulp van een schalingsfactor worden de kosten van de verschillende systemen vertaald naar de situatie waarin een luchtdebiet heeft van 1120 m³/s moet worden verwerkt. Hierbij is verondersteld dat zowel de kosten voor aanschaf, energiegebruik en onderhoud lineair afhankelijk zijn van het te verwerken luchtdebiet

Bij het benoemen van de verschillende overkappingsconfiguraties is er uitgegaan van een systeem dat in staat is zowel NO₂ als PM10 af te vangen. Dit betekent dat er twee mogelijkheden zijn:

- de overkapping wordt uitgerust een systeem dat in staat is beide stoffen af te vangen;
- de overkapping wordt uitgerust met twee aparte systemen die elk één van de twee stoffen kunnen afvangen.

Er blijken grote verschillen te bestaan tussen de verschillende systemen, zowel voor de investeringskosten als voor de jaarlijkse kosten. Als echter wordt gekeken naar de life cycle kosten voor een periode van 10 jaar, dan blijkt dat de kosten dezelfde orde van grootte hebben. Uiteindelijk is besloten om de 'gemiddelde' investeringskosten voor een emissiezuiveringssysteem vast te stellen op 13 miljoen euro en de jaarlijkse kosten op 0,8 miljoen euro. Deze kosten hebben betrekking op een hoog afvangpercentage (95 %) voor emissies. De kosten voor de systemen met een gemiddeld afvangpercentage (80 %) en een laag afvangpercentage (50 %) liggen lager dan die van een systeem met een hoog afvangpercentage. Tabel 5.5. geeft een overzicht van de verschillende kosten. Een uitgebreidere toelichting op deze kostenraming is beschreven in bijlage IV.

Tabel 5.5. Kosten voor het emissiezuiveringssysteem

	hoog afvangpercentage	gemiddeld afvangpercentage	laag afvangpercentage
investeringskosten	13	12,5	12
jaarlijkse kosten	0,8	0,7	0,6

5.2.5. De veiligheidsvoorzieningen

In hoofdstuk vier is aandacht besteed aan de veiligheidsvoorzieningen bij lichte overkappingen. Omdat de constructie van een overkapping sterk afwijkt van die van een tunnel, is het lastig om uitspraken te doen over de vormgeving van de verschillende veiligheidsvoorzieningen en de bijbehorende kosten. Omdat bij de inrichting en vormgeving van een lichte overkapping met name rookberging en vluchtroutes bepalend zijn, wordt onderscheid gemaakt naar een ruime en hoge inrichtingsvariant en een krappe, minimale inrichtingsvariant. De karakteristieke knelpuntsituatie speelt hierbij een belangrijke rol.

In bijlage III is een overzicht gegeven van de noodzakelijke en wenselijke voorzieningen en de kosten die daarmee samenhangen. Deze kosten zijn eveneens terug te vinden in tabel 5.7. Een overkapping die aansluit op de bestaande tunnelmond zal het profiel van de tunnel blijven volgen en aangezien bestaande tunnels geen profiel hebben groter dan 7 meter, komt deze variant niet voor. Alle overkappingen die aansluiten op een bestaande tunnel hebben een krap profiel.

Tabel 5.7. Kosten voor de veiligheidsvoorzieningen

kosten (mln €)	binnen stedelijk	buiten stedelijk	verdiepte ligging	bestaande tunnel
volledig gesloten overkapping met ruim profiel (hoogte > 7 meter)	2,2	1,6	4,7	n.v.t.
volledig gesloten overkapping met krap profiel (hoogte < 7 meter)	4,1	2,6	6,8	6,7
overkapping met openingen in dak	2,1	1,4	3,2	3

5.3. Kosten per configuratie

In paragraaf 5.2. zijn de kosten van de verschillende onderdelen van een overkapping gepresenteerd. Door per configuratie de kosten van de onderdelen, die op de betreffende configuratie van toepassing zijn, bij elkaar op te tellen, wordt inzicht verkregen in de totale kosten van een configuratie. Bij het bepalen van de totale kosten wordt onderscheid gemaakt naar investeringskosten (tabel 5.8.), jaarlijkse kosten (tabel 5.9.) en life cycle kosten (tabel 5.10.).

Bij het bepalen van de life cycle kosten is uitgegaan van een periode van 10 jaar. Deze termijn is gebaseerd op het vermoeden dat over circa 10 jaar het merendeel van de luchtkwaliteitsknelpunten, als gevolg van de steeds schoner wordende voertuigtechnieken en aanvullende maatregelen, in grote lijnen is opgelost. Voor het merendeel van de knelpunten verliest een overkapping na 10 jaar zijn oorspronkelijke functie. Dit wil overigens niet zeggen dat er na 10 jaar geen enkel knelpunt meer is waarvoor een overkapping niet alsnog een toegevoegde waarde heeft.

Tabel 5.8. Investeringskosten per configuratie

investeringskosten (mln €)	binnen- stedelijk	buiten- stedelijk	verdiepte ligging	bestaande tunnel
1. Volledig gesloten overkapping				
a basisvariant	12,2	11,6	9,7	x
b met hoog percentage afvang NO ₂ en PM10	25,2	24,6	22,7	29,7
c met midden percentage afvang NO ₂ en PM10	24,7	24,1	22,2	29,2
d met laag percentage afvang NO ₂ en PM10	24,2	23,6	21,7	28,7
2. Overkapping met een sleuf in het dak				
a basisvariant	12,1	11,4	x	x
3. Overkapping met in het midden een schoorsteen				
a basisvariant	14,0	13,4	11,5	x
b met hoog percentage afvang NO ₂ en PM10	33,4	32,8	30,9	x
c met midden percentage afvang NO ₂ en PM10	32,9	32,3	30,4	x
d met laag percentage afvang NO ₂ en PM10	32,4	31,8	29,9	x
e met een uitstroomsnelheid van 5 m/s	21,3	20,7	18,8	x
f met een uitstroomsnelheid van 1 m/s	23,1	22,5	20,6	x
g met een 10 meter lagere schoorsteen	20,1	19,5	17,6	x
h met een 10 meter hogere schoorsteen	20,7	20,1	18,2	x
i met een 20 meter hogere schoorsteen	21,1	20,5	18,6	x
4. Overkapping met aan beide tunnelmonden een schoorsteen				
a basisvariant	15,8	15,2	13,3	20,3
b met hoog percentage afvang NO ₂ en PM10	35,2	34,6	32,7	39,7
c met midden percentage afvang NO ₂ en PM10	34,7	34,1	32,2	39,2
d met laag percentage afvang NO ₂ en PM10	34,2	33,6	31,7	38,7
e met een uitstroomsnelheid van 5 m/s	22,2	21,6	19,7	26,7
f met een uitstroomsnelheid van 1 m/s	25,8	25,2	23,3	30,3
g met een 10 meter lagere schoorsteen	21,6	21,0	19,1	26,1
h met een 10 meter hogere schoorsteen	22,8	22,2	20,3	27,3
i met een 20 meter hogere schoorsteen	23,6	23,0	21,1	28,1
j hoogte 10 meter, uitstroomsnelheid 5 m/s	21,6	21,0	19,1	26,1
5. Overkapping met over de hele lengte een vijftal schoorstenen				
a basisvariant	16,0	15,4	13,5	20,5
b met hoog percentage afvang NO ₂ en PM10	35,4	34,8	32,9	39,9
c met midden percentage afvang NO ₂ en PM10	34,9	34,3	32,4	39,4
d met laag percentage afvang NO ₂ en PM10	34,4	33,8	31,9	38,9
e met een uitstroomsnelheid van 5 m/s	22,4	21,8	19,9	26,9
f met een uitstroomsnelheid van 1 m/s	26,1	25,5	23,6	30,6

Tabel 5.9. Jaarlijkse kosten per configuratie

jaarlijkse kosten (mln € / jaar)	binnen- stedelijk	buiten- stedelijk	verdiepte ligging	bestaande tunnel
1. Volledig gesloten overkapping				
a basisvariant	0,0	0,0	0,0	x
b met hoog percentage afvang NO ₂ en PM10	0,8	0,8	0,8	0,8
c met midden percentage afvang NO ₂ en PM10	0,7	0,7	0,7	0,7
d met laag percentage afvang NO ₂ en PM10	0,6	0,6	0,6	0,6
2. Overkapping met een sleuf in het dak				
a basisvariant	0,0	0,0	x	x
3. Overkapping met in het midden een schoorsteen				
a basisvariant	0,0	0,0	0,0	x
b met hoog percentage afvang NO ₂ en PM10	1,6	1,6	1,6	x
c met midden percentage afvang NO ₂ en PM10	1,5	1,5	1,5	x
d met laag percentage afvang NO ₂ en PM10	1,4	1,4	1,4	x
e met een uitstroomsnelheid van 5 m/s	0,8	0,8	0,8	x
f met een uitstroomsnelheid van 1 m/s	0,8	0,8	0,8	x
g met een 10 meter lagere schoorsteen	0,8	0,8	0,8	x
h met een 10 meter hogere schoorsteen	0,8	0,8	0,8	x
i met een 20 meter hogere schoorsteen	0,8	0,8	0,8	x
4. Overkapping met aan beide tunnelmonden een schoorsteen				
a basisvariant	0,0	0,0	0,0	0,0
b met hoog percentage afvang NO ₂ en PM10	1,6	1,6	1,6	1,6
c met midden percentage afvang NO ₂ en PM10	1,5	1,5	1,5	1,5
d met laag percentage afvang NO ₂ en PM10	1,4	1,4	1,4	1,4
e met een uitstroomsnelheid van 5 m/s	0,8	0,8	0,8	0,8
f met een uitstroomsnelheid van 1 m/s	0,8	0,8	0,8	0,8
g met een 10 meter lagere schoorsteen	0,8	0,8	0,8	0,8
h met een 10 meter hogere schoorsteen	0,8	0,8	0,8	0,8
i met een 20 meter hogere schoorsteen	0,8	0,8	0,8	0,8
j hoogte 10 meter, uitstroomsnelheid 5 m/s	0,8	0,8	0,8	0,8
5. Overkapping met over de hele lengte een vijftal schoorstenen				
a basisvariant	0,0	0,0	0,0	0,0
b met hoog percentage afvang NO ₂ en PM10	1,6	1,6	1,6	1,6
c met midden percentage afvang NO ₂ en PM10	1,5	1,5	1,5	1,5
d met laag percentage afvang NO ₂ en PM10	1,4	1,4	1,4	1,4
e met een uitstroomsnelheid van 5 m/s	0,8	0,8	0,8	0,8
f met een uitstroomsnelheid van 1 m/s	0,8	0,8	0,8	0,8

Tabel 5.10. Life cycle kosten (10 jaar) per configuratie

life cycle kosten (mln €)	binnen- stedelijk	buiten- stedelijk	verdiepte ligging	bestaande tunnel
1. Volledig gesloten overkapping				
a zonder luchtbehandeling	12,2	11,6	9,7	x
b met hoog percentage afvang NO ₂ en PM10	33,2	32,6	30,7	37,7
c met midden percentage afvang NO ₂ en PM10	31,7	31,1	29,2	36,2
d met laag percentage afvang NO ₂ en PM10	30,2	29,6	27,7	34,7
2. Overkapping met een sleuf in het dak				
a zonder luchtbehandeling	12,1	11,4	x	x
3. Overkapping met in het midden een schoorsteen				
a basisvariant	14,0	13,4	11,5	x
b met hoog percentage afvang NO ₂ en PM10	49,4	48,8	46,9	x
c met midden percentage afvang NO ₂ en PM10	47,9	47,3	45,4	x
d met laag percentage afvang NO ₂ en PM10	46,4	45,8	43,9	x
e met een uitstroomsnelheid van 5 m/s	29,3	28,7	26,8	x
f met een uitstroomsnelheid van 1 m/s	31,1	30,5	28,6	x
g met een 10 meter lagere schoorsteen	28,1	27,5	25,6	x
h met een 10 meter hogere schoorsteen	28,7	28,1	26,2	x
i met een 20 meter hogere schoorsteen	29,1	28,5	26,6	x
4. Overkapping met aan beide tunnelmonden een schoorsteen				
a basisvariant	15,8	15,2	13,3	20,3
b met hoog percentage afvang NO ₂ en PM10	51,2	50,6	48,7	55,7
c met midden percentage afvang NO ₂ en PM10	49,7	49,1	47,2	54,2
d met laag percentage afvang NO ₂ en PM10	48,2	47,6	45,7	52,7
e met een uitstroomsnelheid van 5 m/s	30,2	29,6	27,7	34,7
f met een uitstroomsnelheid van 1 m/s	33,8	33,2	31,3	38,3
g met een 10 meter lagere schoorsteen	29,6	29,0	27,1	34,1
h met een 10 meter hogere schoorsteen	30,8	30,2	28,3	35,3
i met een 20 meter hogere schoorsteen	31,6	31,0	29,1	36,1
j hoogte 10 meter, uitstroomsnelheid 5 m/s	29,6	29,0	27,1	34,1
5. Overkapping met over de hele lengte een vijftal schoorstenen				
a basisvariant	16,0	15,4	13,5	20,5
b met hoog percentage afvang NO ₂ en PM10	51,4	50,8	48,9	55,9
c met midden percentage afvang NO ₂ en PM10	49,9	49,3	47,4	54,4
d met laag percentage afvang NO ₂ en PM10	48,4	47,8	45,9	52,9
e met een uitstroomsnelheid van 5 m/s	30,4	29,8	27,9	34,9
f met een uitstroomsnelheid van 1 m/s	34,1	33,5	31,6	38,6

6. BESLISBOOM EN BEOORDELINGSMATRIX

Binnen dit onderzoek staat de ontwikkeling van de beoordelingsmatrix centraal. De beoordelingsmatrix geeft per overkappingconfiguratie inzicht in het effect op de luchtkwaliteit, de kosten en de veiligheidsaspecten in relatie tot de verschillende karakteristieke probleemsituaties en geeft zo op gestructureerde wijze, inzicht in de belangrijkste resultaten van deze verkennende studie. Met behulp van deze matrix kan Rijkswaterstaat beoordelen wanneer een overkapping haalbaar is en hoe deze kan worden toegepast. In dit hoofdstuk wordt niet alleen de beoordelingsmatrix gepresenteerd maar ook de beslisboom. De beslisboom kan een probleemeigenaar ondersteunen bij het zoeken naar de meest geschikte oplossing voor zijn probleem.

6.1. De beslisboom

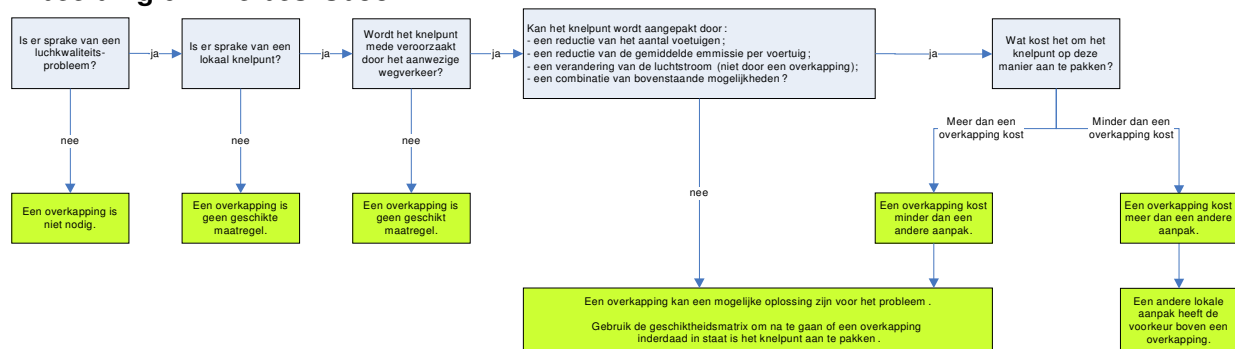
6.1.1. Doel beslisboom

De beslisboom is ontwikkeld om een probleemeigenaar te ondersteunen in het proces dat hij moet doorlopen om tot de meest geschikte oplossing van zijn probleem te komen. Door het beantwoorden van een aantal vragen kan worden bepaald of de aanleg van een overkapping noodzakelijk is en of deze kosteneffectief is. Het is immers ook goed mogelijk dat het betreffende luchtkwaliteitsknoelpunt helemaal niet met een overkapping aangepakt hoeft te worden omdat er andere, minder ingrijpende, maatregelen mogelijk zijn. De oorzaak van het probleem en de mate van overschrijding spelen hierbij een belangrijke rol.

6.1.2. Toelichting op de beslisboom

In afbeelding 6.1. is een verkleinde versie van de beslisboom weergegeven. In bijlage V is een beter leesbare versie van de beslisboom opgenomen.

Afbeelding 6.1. De beslisboom



De lichtblauwe vakken in de boom zijn vragen die beantwoord moeten worden. Afhankelijk van de antwoorden krijgt de gebruiker inzicht in de vraag of een overkapping een kosteneffectieve oplossing is voor het betreffende probleem. Deze (deel)inzichten zijn weergegeven in de groene vakken.

Binnen de beslisboom dienen de volgende vragen te worden beantwoord:

- is er sprake van een luchtkwaliteitsprobleem;
- is er sprake van een lokaal knelpunt;
- wordt het knelpunt mede veroorzaakt door het aanwezige wegverkeer;
- kan het knelpunt worden aangepakt door een reductie van het aantal voertuigen, door een reductie van de gemiddelde emissie per voertuig en/of door verandering van de luchtstroom;
- wat kost het om het knelpunt op deze manier aan te pakken?

Afhankelijk van de situatie kunnen de volgende inzichten worden verkregen:

- een overkapping is niet nodig;
- een overkapping is geen geschikte maatregel;
- een andere lokale aanpak heeft de voorkeur boven een overkapping;
- een overkapping kan een mogelijke oplossing zijn voor het probleem.

6.2. De beoordelingsmatrix

De beoordelingsmatrix geeft per probleemsituatie inzicht in het effect van de verschillende configuraties op de luchtkwaliteit en de kosten die hiermee gemoeid zijn. Ook wordt inzicht gegeven in de kosteneffectiviteit en de moeite die het kost om aan de veiligheidsaspecten te voldoen. De beoordelingsmatrix presenteert dus in feite op gestructureerde wijze de belangrijkste resultaten van deze verkennende studie.

De wijze waarop de beoordelingscriteria worden meegenomen staat beschreven in paragraaf 6.2.1. In paragraaf 6.2.2. wordt een compacte versie van de matrix gepresenteerd. Deze compacte versie bevat alleen de resultaten voor de verschillende basisvarianten. In bijlage VI is een volledige versie van de maatregelenmix opgenomen. Deze versie geeft de resultaten voor alle mogelijke configuraties weer.

6.2.1. Beoordelingscriteria

Elke kruisvak in de matrix heeft betrekking op een specifieke combinatie van een overkappingconfiguratie en een karakteristieke knelpuntsituatie. Elk kruisvak bestaat op zijn beurt uit een aantal cellen waarin de verschillende beoordelingscriteria zijn terug te vinden. In afbeelding 6.2. is te zien waar in het kruisvak de verschillende beoordelingscriteria zijn terug te vinden.

Tabel 6.2. Locatie van de verschillende beoordelingscriteria.

Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
dwarsprofiel C	dwarsprofiel C	investering	moeite
dwarsprofiel D	dwarsprofiel D	onderhoud	
kosteneffectiviteit	kosteneffectiviteit	Life Cycle	

De beoordelingsmatrix geeft dus inzicht in de volgende beoordelingscriteria:

- effect op de luchtkwaliteit ($\Delta\%$);
- kosten (mln €);
- kosteneffectiviteit:
 - >2;
 - 1 - 2;
 - <1);
- benodigde moeite om te voldoen aan het veiligheidsniveau:
 - - -;
 - -;
 - 0.

Deze beoordelingscriteria staan hieronder nader toegelicht.

effect op de luchtkwaliteit

Het effect op de luchtkwaliteit wordt weergegeven aan de hand van de relatieve verandering van de concentraties NO₂ en PM10 ter hoogte van het midden van de overkapping (dwarsdoorsnede C). Daarnaast wordt, met het oog op een mogelijke verslechtering van de luchtkwaliteit aan de tunnelmond, ook de relatieve verandering op dwarsdoorsnede D gegeven. De effecten op de luchtkwaliteit worden toegelicht in hoofdstuk 3 en bijlage II. Hierbij dient te worden opgemerkt dat de concentraties voor de varianten 3e, 3f en 3g (schoorsteen in het midden met respectievelijk een uitstroomsnelheid van 5 m/s, een uitstroomsnelheid van 1 m/s en een 10 meter lagere schoorsteen) niet apart zijn berekend. Deze waarden zijn ingeschat op basis van de resultaten van de andere berekeningen.

kosten

Omdat de uiteindelijke kosten van een overkapping afhankelijk zijn van tal van factoren, wordt er binnen dit project gebruik gemaakt van kostenkentalen. Deze kostenkentalen geven de orde van grootte van de kosten weer.

De totale kosten worden bepaald door investeringskosten en onderhoudskosten. Onder de investeringskosten vallen de kosten voor de bouw van een overkapping en de kosten voor de aanleg van een eventueel te plaatsen systeem voor emissiebehandeling. Ook de realisatie van de verschillende veiligheidsvoorzieningen valt onder de investeringskosten. Jaarlijkse kosten voor energie, beheer en onderhoud vallen onder de jaarlijkse kosten.

De verschillende kosten worden samengevat in de zogenoemde life cycle kosten. Dit zijn de totale kosten gedurende de tijd dat de overkapping in gebruik is. Hierbij wordt uitgegaan van een levensduur van 10 jaar. De life cycle kosten worden dus bepaald door investeringskosten + 10 x jaarlijkse kosten.

De kosten worden weergegeven in miljoenen euro's. Een toelichting op de gehanteerde kosten wordt gegeven in hoofdstuk 5 en bijlage IV.

kosteneffectiviteit

De kosteneffectiviteit geeft inzicht in de verhouding tussen de kosten en het verkregen effect. De eenheid van kosteneffectiviteit is de relatieve verandering luchtkwaliteit per miljoen euro ($\Delta\%$ / mln.€). Hoe hoger de kosteneffectiviteit, hoe meer effect er optreedt bij de besteding van 1 miljoen euro. De kosteneffectiviteit wordt bepaald door de relatieve verandering van zowel NO₂ als PM10 op dwarsdoorsnede C te delen door de life cycle kosten.

De kosteneffectiviteit wordt ingedeeld in drie klassen. In de matrix wordt aangegeven in welke klasse de configuratie valt. Hierbij wordt de volgende klassenverdeling gehanteerd.

kosteneffectiviteit

>2	hoge kosteneffectiviteit
1 - 2	gemiddelde kosteneffectiviteit
<1	lage kosteneffectiviteit

benodigde moeite om te voldoen aan het veiligheidseisen

Uitgangspunt bij de lichtgewicht overkappingen is dat deze voldoen aan de wettelijke veiligheidseisen. In de beoordelingsmatrix zal kwalitatief worden aangegeven hoeveel moeite het kost om aan deze veiligheidseisen te voldoen. 'Moeite' is hierbij gedefinieerd als de hoeveelheid benodigde aanvullende veiligheidsvoorzieningen in combinatie met de omvang van deze voorzieningen en de bijbehorende kosten. De inschatting van de moeite wordt niet expliciet onderbouwd maar is gebaseerd op de kennis en inzichten zoals benoemd in hoofdstuk 4.

De benodigde moeite om te voldoen aan het veiligheidseisen wordt ingedeeld in drie klassen. In de matrix wordt aangegeven in welke klasse de configuratie valt. Hierbij wordt de volgende klassenverdeling gehanteerd.

veiligheid

--	veel moeite
-	weinig moeite
0	geen moeite

6.2.2. De beoordelingsmatrix

In afbeelding 6.3. is de compacte versie van de beoordelingsmatrix weergegeven. Deze versie bevat alleen de resultaten voor de verschillende basisvarianten. In bijlage VI is de volledige versie van de maatregelenmix opgenomen met daarin ook alle subvarianten.

Uit de luchtkwaliteitsberekeningen is gebleken dat nagenoeg alle mogelijke varianten van een overkapping, zowel ter hoogte van de overkapping als aan de tunnelmond, min of meer hetzelfde effect hebben. Een uitzondering hierop vormt de volledig gesloten overkapping (configuratie 1). Bij deze configuratie is er als gevolg van de verschillende mate van zuivering aan de tunnelmond, wel verschil in effect aan de tunnelmond.

De kosten van de diverse varianten verschillen wel degelijk. De basisvariant is per configuratie de goedkoopste variant en daarmee ook de meest kosteneffectieve variant. Het heeft kortom weinig zin om de overkapping uit te rusten met tal van aanvullende voorzieningen. De kosten stijgen immers wel, maar het effect verandert niet. Om deze reden bevat de compacte versie van de beoordelingsmatrix alleen de basisvarianten.

Afbeelding 6.3. De beoordelingsmatrix (compacte versie)

	Binnenstedelijk				Buitenstedelijk			
	Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid	Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
1. Volledig gesloten overkapping: geen luchtbehandeling	-29%	-16%	12	0	-30%	-17%	12	0
	63%	58%	0		33%	33%	0	
	2,4	1,3	12		2,6	1,5	12	
2. Overkapping met een sleuf in het dak: geen luchtbehandeling	-30%	-16%	12	0	-30%	-18%	11	0
	25%	26%	0		10%	13%	0	
	2,5	1,3	12		2,6	1,6	11	
3. Overkapping met in het midden een schoorsteen: 20 meter boven maaiveld, uitstroomsnelheid 10 m/s, geen luchtbehandeling	-30%	-16%	14	-	-31%	-18%	13	-
	26%	26%	0		10%	13%	0	
	2,1	1,1	14		2,3	1,3	13	
4. Overkapping met aan beide tunnelmonden een schoorsteen: 20 meter boven maaiveld, uitstroomsnelheid 10 m/s, geen luchtbehandeling	-30%	-16%	16	-	-30%	-18%	15	-
	26%	26%	0		10%	13%	0	
	1,9	1,0	16		2,0	1,2	15	
5. Overkapping met over de hele lengte een vijftal schoorstenen: 10 meter boven maaiveld, uitstroomsnelheid 10 m/s, geen luchtbehandeling	-29%	-16%	16	-	-30%	-17%	15	-
	26%	26%	0		10%	13%	0	
	1,8	1,0	16		2,0	1,1	15	
	Verdiepte ligging				Bestaande tunnelmond			
	Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid	Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
1. Volledig gesloten overkapping: geen luchtbehandeling	-29%	-16%	10	-	Basisvariant niet van toepassing			
	141%	125%	0		Configuratie niet van toepassing			
	2,9	1,6	10		Configuratie niet van toepassing			
2. Overkapping met een sleuf in het dak: geen luchtbehandeling	Configuratie niet van toepassing							
3. Overkapping met in het midden een schoorsteen: 20 meter boven maaiveld, uitstroomsnelheid 10 m/s, geen luchtbehandeling	-29%	-16%	12	-	-1%	0%	20	-
	66%	59%	0		-31%	-29%	0	
	2,5	1,4	12		0,0	0,0	20	
4. Overkapping met aan beide tunnelmonden een schoorsteen: 20 meter boven maaiveld, uitstroomsnelheid 10 m/s, geen luchtbehandeling	-29%	-16%	13	-	1%	1%	21	-
	66%	59%	0		-31%	-29%	0	
	2,2	1,2	13		0,0	0,0	21	
5. Overkapping met over de hele lengte een vijftal schoorstenen: 10 meter boven maaiveld, uitstroomsnelheid 10 m/s, geen luchtbehandeling	-28%	-15%	14	-				
	67%	59%	0					
	2,1	1,1	14					

Legenda				Kosteneffectiviteit			Veiligheid		
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid	>2	1 - 2	<1	- -	-	0
ter hoogte van overkapping	ter hoogte van overkapping	investering	moeite	hoge kosteneffectiviteit	gemiddelde kosteneffectiviteit	lage kosteneffectiviteit	veel moeite	weinig moeite	geen moeite
aan zuidelijke tunnelmond	aan zuidelijke tunnelmond	onderhoud							
kosteneffectiviteit	kosteneffectiviteit	Life Cycle							

Er dient opgemerkt te worden dat de beoordelingsmatrix een enigszins vertekend beeld geeft van het effect dat optreedt bij een bestaande tunnelmond. Dit heeft ook gevolgen voor de berekende kosteneffectiviteit. Omdat bij een bestaande tunnel de concentratie ter hoogte van het midden van deze tunnel (dwarsprofiel C) reeds op het niveau van de achtergrondconcentratie ligt, zal de luchtkwaliteit als gevolg van overkapping hier nauwelijks veranderen. Aangezien de kosteneffectiviteit wordt bepaald aan de hand van de verandering van de concentratie ter hoogte van dwarsprofiel C, resulteert dit in een kosteneffectiviteit van 0. Wanneer echter wordt gekeken naar de verandering van de concentraties aan de tunnelmond (dwarsprofiel D), dan blijkt dat de verbetering die daar optreedt vergelijkbaar is met het

effect dat bij de andere karakteristieke knelpuntsituaties optreedt ter hoogte van het midden van de overkapping (dwarsprofiel C). In feite is de kosteneffectiviteit van een configuratie bij een bestaande tunnelmond echter vergelijkbaar met de kosteneffectiviteit van de configuraties bij de overige karakteristieke knelpuntsituaties.

7. CONCLUSIES

Een overkapping, al dan niet in combinatie met luchtbehandeling, kan een bijdrage leveren aan de verbetering van de luchtkwaliteit op en langs snelwegen. Ter plaatse van de overkapping dalen de concentraties NO₂ en PM10 tot ongeveer het niveau van de achtergrondconcentratie. Er is echter een forse investering nodig om dit effect te verkrijgen en in sommige gevallen kunnen ook de jaarlijkse kosten sterk oplopen. Dit maakt dat een overkapping een kostbare maatregel is. Om in te kunnen schatten wanneer een overkapping haalbaar is en hoe deze kan worden toegepast is binnen dit onderzoek de zogenoemde beoordelingsmatrix ontwikkeld. In deze matrix komt aan bod welk type overkapping geschikt is voor welke probleemsituatie. De kosten en het effect op de luchtkwaliteit spelen hierbij een belangrijke rol.

7.1. Overkappingconfiguraties en knelpuntsituaties

Een overkapping kan een bijdrage leveren aan de aanpak van een lokaal luchtkwaliteitsknelpunt door verplaatsing van de vervuilde lucht, vermindering van de vervuilde lucht en verspreiding van de vervuilde lucht. Met deze drie basisprincipes in het achterhoofd is een zestal verschillende overkappingconfiguraties benoemd, te weten:

1. volledig gesloten overkapping;
2. overkapping met een sleuf in het dak;
3. overkapping met in het midden een hoge schoorsteen;
4. overkapping met aan beide tunnelmonden een hoge schoorsteen;
5. overkapping met over de hele lengte een aantal lagere schoorstenen;
6. overkapping met een systeem voor het afvangen van NO₂ en PM10.

Configuratie 1 tot en met 5 hebben een onderscheidend effect op de verspreiding van de emissie. De zesde configuratie heeft dit niet, maar heeft een onderscheidend effect op de vermindering van de emissie. Deze zesde configuratie is daarom als uitvoeringsvariant meegenomen binnen de andere vijf configuraties. Vanwege de onzekerheid over het daadwerkelijke effect van de emissiezuiveringssystemen is er hierbij uitgegaan van drie varianten te weten hoge afvang (95 %), gemiddelde afvang (80 %) en lage afvang (50 %). Daarnaast is er met het oog op het belang van de verdunning en de verspreiding ook gevarieerd in de hoogte en de uitstroomsnelheid van de schoorstenen. Als alternatief voor de basishoogte van 20 meter is er gekeken naar het effect van een schoorsteen van 10, 30 en 40 meter boven maaiveld en als alternatief voor de basis uitstroomsnelheid van 10 m/s is er gekeken naar het effect van een uitstroomsnelheid van 5 m/s en 1 m/s.

Er zijn vier karakteristieke situaties benoemd waarvoor is nagegaan welk effect de verschillende uitvoeringsvarianten hebben op de luchtkwaliteit. Het gaat hierbij om de volgende situaties:

- binnenstedelijk (veel luchtstroom belemmerende objecten → matige verspreiding);
- buitenstedelijk (vrije veld → goede verspreiding);
- verdiepte ligging (slechte verspreiding);
- bestaande tunnelmond (sterk geconcentreerde concentratie).

7.2. Effect op de luchtkwaliteit

Uit de luchtkwaliteitsberekeningen blijkt dat een overkapping een aanzienlijk effect heeft op de luchtkwaliteit. Ter plaatse van de overkapping nemen de concentraties NO₂ en PM10 in alle gevallen af tot ongeveer het niveau van de achtergrondconcentratie. Ter plaatse van de tunnelmond ontstaat echter een forse lokale concentratiepiek. Deze concentratiepiek kan worden beperkt door er voor te zorgen dat er minder vuile lucht door de tunnelmond wordt uitgestoten. Dit kan worden gerealiseerd door een deel van de vuile lucht via de bovenkant van de overkapping uit te stoten of door de lucht te zuiveren voor deze de tunnelmond verlaat.

De effecten van de verschillende combinaties van schoorsteenhoogtes en uitstroomsnelheden blijken min of meer gelijk te zijn. De verschillen tussen de configuraties zijn zo klein dat in feite kan worden

volstaan met de overkapping met de laagste uitstroomsnelheid en de laagste schoorsteenhoogte. Binnen dit onderzoek is dat de overkapping waarbij de vuile lucht middels een sleuf in het dak op 7 meter hoogte wordt uitgestoten (configuratie 2).

Het zuiveren van het deel van de vuile lucht dat via de schoorstenen wordt uitgestoten (configuratie 3, 4 en 5), heeft in vergelijking tot de situatie zonder zuivering, geen aanvullend effect op de concentratiewaarden aan de tunnelmonden noch op de concentratiewaarden ter hoogte van de overkapping. Het zuiveren van het deel van de vuile lucht dat bij een volledig gesloten overkapping aan de tunnelmonden wordt uitgestoten (configuratie 1), zorgt wel voor een significante daling van de concentratiewaarden aan de tunnelmonden maar niet voor een daling van concentratiewaarden ter hoogte van de overkapping.

Indien bij een volledig gesloten overkapping een hoog percentage (95 %) van de emissie aan de tunnelmond wordt afgevangen is het effect op de concentratie aan de tunnelmond vergelijkbaar met het effect dat optreedt bij het uitstoten van vuile lucht op grotere hoogte (door een sleuf in dak of door een schoorsteen). Zodra minder dan 95 % van de emissie wordt afgevangen, is het effect op de concentratie aanzienlijk kleiner.

7.3. Kosten van de overkappingen

Bij het bepalen van de kosten van een overkappingconfiguratie is gestreefd naar inzicht in de 'gemiddelde kosten' van de verschillende configuraties. De diverse experts die zijn geraadpleegd gaven echter allemaal aan dat er niet zoiets bestaat als 'gemiddelde kosten'. Het realiseren van een overkapping of een tunnel is maatwerk en de uiteindelijke kosten zijn sterk afhankelijk van de concrete uitvoeringsvariant en de lokale omstandigheden. Desalniettemin zijn op basis van verschillende praktijkervaringen kostenkennallen geformuleerd voor de verschillende onderdelen.

De kosten van een overkappingsconstructie op maaiveld bedragen circa 10 miljoen euro per kilometer overkapping. Indien de constructie wordt aangelegd over een verdiept liggende weg, moet worden uitgegaan van een investering van 5 miljoen euro per kilometer. Indien de overkapping wordt uitgerust met een schoorsteen dan nemen de constructiekosten met 2 tot 7 miljoen euro toe. Eén schoorsteen kost, afhankelijk van zijn omvang en de hoogte, tussen de 1 en 5 miljoen euro.

Het afzuig- en ventilatiesysteem dat nodig is om de lucht af te zuigen kost ruim 6 miljoen euro per kilometer overkapping. Hier komen nog de jaarlijkse kosten voor onderhoud en energie bij à 700.000 euro per kilometer overkapping per jaar.

De kosten voor emissiezuiveringssystemen lopen sterk uiteen en variëren van 7 tot 20 miljoen per kilometer overkapping. De jaarlijkse kosten voor reiniging en energie bedragen ruim een half miljoen euro per kilometer overkapping.

De kosten die nodig zijn om te voldoen aan de benodigde veiligheidseisen liggen, afhankelijk van de uitvoering van de overkapping en de karakteristieke knelpuntsituatie, tussen de 1,4 en 6,7 miljoen euro per kilometer overkapping.

De verschillende kostenposten worden samengevat in de zogenoemde life cycle kosten. Dit zijn de totale kosten gedurende de tijd dat een overkapping in gebruik is. Hierbij is uitgegaan van een levensduur van 10 jaar. In vergelijking met normale infrastructurele werken is dit een zeer korte periode. De levensduur is in dit geval echter niet gebaseerd op de levensduur van de constructie maar op het vermoeden dat over circa 10 jaar het merendeel van de luchtkwaliteitsknelpunten in grote lijnen is opgelost. Dit als gevolg van de steeds schoner wordende voertuigtechnieken in combinatie met aanvullende lokale maatregelen. Voor enkele overgebleven hotspots blijft een overkapping ook na een periode van 10 jaar nog nut hebben, maar naar verwachting geldt dat voor het merendeel van de knelpunten niet.

Daarom wordt binnen dit verkennende onderzoek een levensduur van 10 jaar als uitgangspunt genomen.

7.4. Kosteneffectiviteit

De kosteneffectiviteit geeft inzicht in de verhouding tussen de kosten en het verkregen effect en kan worden gebruikt om de configuraties te vergelijken. De kosteneffectiviteit wordt bepaald door de relatieve verandering van de concentratie na realisatie van de overkapping (ten opzichte van de situatie zonder overkapping) te delen door de totale life cycle kosten ($\Delta\%$ / mln €). Hoe hoger de kosteneffectiviteit, hoe meer effect er optreedt bij de besteding van 1 miljoen euro.

In tabel 7.1. is een overzicht gegeven van de kosteneffectiviteit van de verschillende configuraties. Hieruit komt duidelijk naar voren dat de hoogste kosteneffectiviteit wordt gehaald bij de basisvarianten. Dit is goed verklaarbaar aangezien de effecten van de verschillende configuraties min of meer gelijk zijn terwijl de kosten van de verschillende configuraties aanzienlijke verschillen vertonen.

Tabel 7.1. Kosteneffectiviteit per configuratie

Kosteneffectiviteit ($\Delta\%$ / mln €)	NO ₂				PM10			
	binnen-stedelijk	buiten-stedelijk	verdiepte ligging	bestaande tunnel	binnen-stedelijk	buiten-stedelijk	verdiepte ligging	bestaande tunnel
1. Volledig gesloten overkapping								
a basisvariant	2,4	2,6	2,9	x	1,3	1,5	1,6	x
b met hoog percentage afvang NO ₂ en PM10	0,9	0,9	0,9	0	0,5	0,6	0,5	0
c met midden percentage afvang NO ₂ en PM10	0,9	1,0	1,0	0	0,5	0,6	0,5	0
d met laag percentage afvang NO ₂ en PM10	1,0	1,0	1,0	0	0,5	0,6	0,6	0
2. Overkapping met een sleuf in het dak								
a basisvariant	2,5	2,6	x	x	1,3	1,6	x	x
3. Overkapping met in het midden een schoorsteen								
a basisvariant	2,1	2,3	2,5	x	1,1	1,3	1,4	x
b met hoog percentage afvang NO ₂ en PM10	0,6	0,6	0,6	x	0,3	0,4	0,3	x
c met midden percentage afvang NO ₂ en PM10	0,6	0,6	0,6	x	0,3	0,4	0,3	x
d met laag percentage afvang NO ₂ en PM10	0,6	0,7	0,7	x	0,3	0,4	0,4	x
e met een uitstroomsnelheid van 5 m/s	1,0	1,1	1,1	x	0,6	0,6	0,6	x
f met een uitstroomsnelheid van 1 m/s	1,0	1,4	1,0	x	0,5	0,8	0,6	x
g met een 10 meter lagere schoorsteen	1,1	1,1	1,1	x	0,6	0,6	0,6	x
h met een 10 meter hogere schoorsteen	1,0	1,1	1,1	x	0,6	0,6	0,6	x
i met een 20 meter hogere schoorsteen	1,0	1,1	1,1	x	0,6	0,6	0,6	x
4. Overkapping met aan beide tunnelmonden een schoorsteen								
a basisvariant	1,9	2,0	2,2	0	1,0	1,2	1,2	0
b met hoog percentage afvang NO ₂ en PM10	0,6	0,6	0,6	0	0,3	0,3	0,3	0
c met midden percentage afvang NO ₂ en PM10	0,6	0,6	0,6	0	0,3	0,4	0,3	0
d met laag percentage afvang NO ₂ en PM10	0,6	0,6	0,6	0	0,3	0,4	0,4	0
e met een uitstroomsnelheid van 5 m/s	1,0	1,0	1,0	0	0,5	0,6	0,6	0
f met een uitstroomsnelheid van 1 m/s	0,9	0,9	0,9	0	0,5	0,5	0,5	0
g met een 10 meter lagere schoorsteen	1,0	1,0	1,1	0	0,5	0,6	0,6	0
h met een 10 meter hogere schoorsteen	1,0	1,0	1,0	0	0,5	0,6	0,6	0
i met een 20 meter hogere schoorsteen	0,9	1,0	1,0	0	0,5	0,6	0,5	0
j hoogte 10 meter, uitstroomsnelheid 5 m/s	1,0	1,0	1,1	0	0,5	0,6	0,6	0
5. Overkapping met over de hele lengte een vijftal schoorstenen								
a basisvariant	1,8	2,0	2,1	0	1,0	1,1	1,1	0
b met hoog percentage afvang NO ₂ en PM10	0,6	0,6	0,6	0	0,3	0,3	0,3	0
c met midden percentage afvang NO ₂ en PM10	0,6	0,6	0,6	0	0,3	0,4	0,3	0
d met laag percentage afvang NO ₂ en PM10	0,6	0,6	0,6	0	0,3	0,4	0,3	0
e met een uitstroomsnelheid van 5 m/s	1,0	1,0	1,0	0	0,5	0,6	0,6	0
f met een uitstroomsnelheid van 1 m/s	0,8	0,9	0,9	0	0,4	0,5	0,5	0

Legenda

>2	hoge kosteneffectiviteit
1 - 2	gemiddelde kosteneffectiviteit
<1	lage kosteneffectiviteit

Overigens is het beeld voor de bestaande tunnelmond enigszins vertekenend. De kosteneffectiviteit van de overkapping is immers bepaald op basis van de verandering van de concentraties ter hoogte van het midden van de overkapping. In het geval van een bestaande overkapping verkeerde de luchtkwaliteit daar echter al op het niveau van de achtergrondconcentratie waardoor er nauwelijks een verandering optreedt. Als gevolg hiervan krijgt de kosteneffectiviteit de waarde 0. Wanneer echter wordt gekeken naar de verandering van de concentraties aan de tunnelmond, dan blijkt dat de verbetering die daar optreedt vergelijkbaar is met het effect dat bij de andere karakteristieke knelpuntsituaties optreedt ter hoogte van het midden van de overkapping. In feite is de kosteneffectiviteit van een configuratie bij

een bestaande tunnelmond dus vergelijkbaar met de kosteneffectiviteit van de configuraties bij de overige karakteristieke knelpuntsituaties.

BIJLAGE I Methoden van luchtbehandeling

I.1 Methoden van luchtbehandeling

Wat betreft luchtbehandeling kan er onderscheid gemaakt worden tussen ventilatie en emissiebehandeling.

ventilatie

- dwarsventilatie;
- semi-dwarsventilatie;
- langsventilatie.

Natuurlijke ventilatie \leftrightarrow mechanische ventilatie:

- met aanjagers (lucht sneller stromen);
- met injectors (verse lucht naar binnen);
- combinatie van injectors en aanjagers.

emissiebehandeling

- elektrostatisch filtertechnieken (EP of EPS):
 - 'droog';
 - 'nat';
- 'gewone' filtratietechnieken (doekenfilter);
- denitrificatie (deNO_x):
 - chemische absorptie;
 - katalytisch proces (omzetting);
- absorptie (actieve koolstof/zeoliet);
- biofiltratie (micro-organismen);
- agglomeratie (binden kleine deeltjes);
- scrubbing (passeren vloeistof);
- gasturbinetechnologie.

Een overzicht van de kenmerken van de verschillende systemen en methoden van ventilatie en emissiebehandeling is weergegeven in onderstaande tabel.

Een overkapping kan op drie manieren een bijdrage leveren aan de aanpak van een lokaal luchtkwaliteitsknelpunt. Deze drie basisprincipes zijn:

1. verplaatsing van de vervuilde lucht;
2. vermindering van de vervuilde lucht;
3. verspreiding van de vervuilde lucht.

Basisdoel 1 kan worden gerealiseerd door het plaatsen van:

- een afscherpende constructie. De hoeveelheid emissie die eerst verspreid langs de weg werd uitgestoten, wordt nu op twee andere locaties (twee tunnelmonden) uitgestoten (methode B in combinatie met C);
- een afscherpende constructie die wordt uitgerust met een systeem van langsventilatie (overigens voornamelijk in verband met de veiligheid in de tunnel). De hoeveelheid emissie die eerst op één locatie werd uitgestoten, wordt nu op twee andere locaties (twee tunnelmonden) uitgestoten (methode E);
- een afscherpende constructie die wordt uitgerust met een systeem waarbij de luchtstroom van de ene naar de andere tunnelbuis wordt gezogen. De hoeveelheid emissie die eerst op één locatie werd uitgestoten, wordt nu op een andere locatie (één tunnelmond) uitgestoten (methode I).

Tabel I.1. Onderscheidende methoden ten behoeve van overkappingconfiguraties

	METHODE	SYSTEEM
Bouwconstructie		
A	eenzijdige afscherming (van kap naar scherm)	afschermende constructies
B	verplaatsen van de "bron"	verplaatsing tunnelmond (locatie van een tunnelmond)
Natuurlijke ventilatie (= vorm van bouwconstructie)		
C	opwekking luchtstroom door verkeer en wind	geheel gesloten overkapping
D	uitwisseling verontreinigde tunnellucht met "schone" buitenlucht	overkapping met schoorstenen/ spleten/ openingen in het dak (vormgeving tunnelmond)
Mechanische ventilatie		
E	mechanisch opwekken van een luchtstroom in de lengte richting	langsventilatie met aanjaag en/of injectieventilatoren
F	toevoeren verse lucht en afvoeren verontreinigde lucht op dwarsrichting	volledige dwarsventilatie
G	toevoeren verse lucht op dwarsrichting	semi dwarsventilatie
H	afzuigen verontreinigde lucht nabij tunnelmond	portaal afzuiging
I	luchtstroom van ene naar andere buis zuigen	omkering van luchtstroom
Emissiebehandeling		
J	stof blijft "plakken" aan doeken en/of aan elektrisch geladen platen	doekenfilter; electrostatische filter; droge en natte filters (plafond, by-pass, schoorsteen)
K	een chemische stof die in staat is een andere stof aan zich te binden	chemische absorbtie
L	veranderen van de chemische samenstelling van een stof	katalitisch proces - Denitrificatie (DeNOx)
M	microorganismen breken schadelijke stof af/ zetten stof om in andere stof	biofiltratie (micro-organismen)
N	kleine stofdeeltjes laten samenklonteren en vervolgens filteren	agglomeratie (binden kleine deeltjes)
O	vervuiling laten neerslaan met behulp van een waternevel	scrubbing (passeren vloeistof)
P	onder hoge temperatuur stoffen verbranden zodat andere stoffen ontstaan	gasturbinetechnologie

Basisdoel 2 kan worden gerealiseerd door het plaatsen van:

- een afschermende constructie die wordt uitgerust met een elektrostatisch filtersysteem. De hoeveelheid NO₂ blijft gelijk en de hoeveelheid PM10 neemt af. De emissies die eerst op één locatie werden uitgestoten, worden nu op twee andere locaties (twee tunnelmonden) uitgestoten (methode J);
- een afschermende constructie die wordt uitgerust met één of meer chemische stoffen met absorptieve werking. Afhankelijk van de gekozen stoffen zal de emissie kunnen afnemen. De emissies die eerst op één locatie werden uitgestoten, worden nu in mindere mate op twee andere locaties (twee tunnelmonden) uitgestoten (methode K);
- een afschermende constructie die wordt uitgerust met een katalytische stof. De hoeveelheid NO₂ neemt af en de hoeveelheid PM10 blijft gelijk. De emissies die eerst op één locatie werden uitgestoten, worden nu op twee andere locaties (twee tunnelmonden) uitgestoten (methode L);
- een afschermende constructie die wordt uitgerust met een systeem van biofiltratie. De hoeveelheid NO₂ en de hoeveelheid PM10 nemen af. De emissies die eerst op één locatie werden uitgestoten, worden nu in mindere mate op twee andere locaties (twee tunnelmonden) uitgestoten (methode M);
- een afschermende constructie die wordt uitgerust met een systeem voor agglomeratie waardoor kleine stofdeeltjes samenklonteren. De hoeveelheid NO₂ blijft gelijk en de hoeveelheid PM10 neemt af. De emissies die eerst op één locatie werden uitgestoten, worden nu in mindere mate op twee andere locaties (twee tunnelmonden) uitgestoten (methode N);
- een afschermende constructie die wordt uitgerust met een watervernevelaar die de vervuiling laat neerslaan. De hoeveelheid NO₂ en de hoeveelheid PM10 nemen af. De emissies die eerst op één locatie werden uitgestoten, worden nu in mindere mate op twee andere locaties (twee tunnelmonden) uitgestoten (methode M);

- een afschermdende constructie die wordt uitgerust met gasturbinetechnologie. De hoeveelheid NO₂ en de hoeveelheid PM10 nemen af. De emissies die eerst op één locatie werden uitgestoten, worden nu in mindere mate op twee andere locaties (twee tunnelmonden) uitgestoten (methode P).

De configuraties voor basisdoel 2 kunnen ook uitgerust worden met een systeem dat de vuile lucht afzuigt (methode F en H) zodat de filtersystemen een hogere concentratie vuile stoffen krijgen te verwerken. Naar alle waarschijnlijkheid kunnen filters/absorptie/katalytische lagen hun werk beter doen als zij worden blootgesteld aan hogere concentraties schadelijke stoffen. Bovendien is het dan niet nodig om de hele tunnel te voorzien van een filtersysteem/katalytische laag. Bij methode F wordt echter ook schone lucht aangevoerd, hetgeen het effect dus weer deels tenietdoet.

Net als basisdoel 1 kan basisdoel 2 worden versterkt/beïnvloed door methode E en I.

Basisdoel 3 kan worden gerealiseerd door het plaatsen van:

- een afschermdende constructie waarbij de tunnelmond wordt voorzien van eenzijdige schermen zodat de verspreiding van de lucht een bepaalde richting op wordt gedwongen. De emissies die eerst op één locatie werden uitgestoten, worden nu geleidelijk verspreid over twee andere locaties (twee tunnelmonden) (methode A);
- een afschermdende constructie waarbij de tunnelmond wordt voorzien van een geleidelijk toenemende hoeveelheid openingen zodat de vuile lucht zich gelijkmatig kan mengen met de schone lucht. De emissies die eerst op één locatie werden uitgestoten, worden nu geleidelijk verspreid over twee andere locaties (twee tunnelmonden) (methode D);
- een afschermdende constructie die wordt uitgerust met een systeem waarmee verse lucht in de tunnel (dwarsrichting) wordt geblazen. De concentratie in de tunnel zal hierdoor verminderen waardoor ook de concentratie aan de beide tunnelmonden zal verminderen (methoden G en F).

Net als basisdoel 1, kan basisdoel 2 worden versterkt/beïnvloed door methode E en I.

I.2 Rendement van emissiebehandelingssystemen

Er zijn verschillende systemen op de markt en in ontwikkeling. In onderstaande tabel staan verschillende systemen benoemd. In deze tabel is ook aangegeven welk rendement de systemen kunnen halen. De weergegeven rendementen zijn de maximaal haalbare rendementen die worden geclaimd door de fabrikanten. Het blijft goed mogelijk dat in de praktijk lagere waarden zullen worden behaald. Dit zal voornamelijk het gevolg zijn van een onregelmatig aandeel emissie in de buitenlucht, terwijl systemen optimaal werken als er een gelijkmatige toevoer is. Tevens is in de tabel aangegeven of de systemen ook zijn getest en of ze in gebruik zijn.

Tabel I.2. Leveranciers en rendementen van emissiezuiveringssystemen

producent	naam product	werking	percentage afvang				Getest	In bedrijf
			NO ₂	NO _x	PM10	PM2,5		
Aigner	Ecco Air Filtration System	EP + filter			86	74	ja	nee
Alstom Power	NO2 Gas Cleaning Systems	Katalitisch + absorbtie		85-90			ja	ja
Camfil	www.zakkenfilter.nl	filter en actief kool	90		97		ja	ja
Clean Teq		diverse technieken					nee	nee
Columbus (KGD)		Fysisch filter					nee	nee
CTA International		EP			85-95		ja	ja
Deus Energie	Wandlung System	EP + biologisch filter			95		ja	nee
Dynamic filter		EP + filter					nee	nee
Ecoquest		EP					nee	nee
FILTRONtec	CLAIR Filter system	EP + absorptie	90	60	80-95		ja	nee
Flosep		Centrifugaal					nee	nee
Fujita		Biologisch filter	91		95		ja	ja
Habitat Solutions BV	Proactive Photocatalytic System TM	katalytische laag		35-67			ja	ja
Hyder	exiGEN	Gasturbine		17	99	80	nee	nee
Indigo		Agglomeratie + EP			91	74	nee	nee
ION Blast		EP					nee	nee
Jord		EP + scrubbing		47		99	nee	nee
Kawasaki		Absorptie	90		80		ja	nee
Lloyd Energie		Absorptie					nee	nee
Matsushita		EP + absorptie	90		80		ja	nee
Mtasushita + Panasonic		diverse technieken					ja	ja
Matsushita Itochu		EP			90		ja	nee
Mitsubishi		EP			90		ja	ja
Purified water		Absorptie + oxidatie					nee	nee
SMS Gasturbine		Gasturbine		(+) 86	96		nee	nee
TRG Biofilter		Biologisch filter			90		nee	nee
UK Euro		Scrubbing					nee	nee
USC Biofiltration		Biologisch filter					nee	nee
Xtor EP		EP			99		ja	ja

I.3 Schoorsteenhoogte en verticale snelheid

Verreweg de belangrijkste factor bij de verdunning (en de verspreiding) van vuile lucht is de hoogte en de verticale snelheid waarop deze vuile lucht wordt uitgestoten. De luchtkwaliteitsnormen worden vastgesteld op 1,5 meter boven maaiveld (het zogenoemde receptorpunt). Hoe hoger de vervuilde lucht wordt uitgestoten, hoe langer de vervuiling er over doet om dit punt te bereiken. Zodoende heeft de vuile lucht meer gelegenheid om te mengen met de schonere lucht dan wanneer de vuile lucht wordt uitgestoten in de buurt van het receptorpunt. Dit is ook de reden dat de industrie altijd gebruik maakt van (hoge) schoorstenen.

In tegenstelling tot de uitstoot in verticale richting, heeft de uitstoot in horizontale richting niet of nauwelijks invloed op de verdunning. Horizontale ventilatie heeft dan ook alleen invloed op de verplaatsing van de emissie en zal dan ook niet bijdragen aan de verbetering van de luchtkwaliteit.

Door vervuilde lucht af te zuigen en via een schoorsteen hoog in de lucht te brengen, kunnen op maaiveldniveau hoge concentraties worden voorkomen. Hoger in de lucht is de gemiddelde windsnelheid groter en treedt door turbulentie snel verdunning op.

De emissie uit de schoorsteen gaat op in de achtergrondconcentratie en is te verwaarlozen ten opzichte van alle andere bronnen in het gebied rondom de tunnel.

De uitblaassnelheid is meestal minimaal 10 m/s om het 'down wash' effect te minimaliseren.

BIJLAGE II Onderbouwing luchtkwaliteitseffecten

In deze bijlage wordt nader ingegaan op de resultaten van de luchtkwaliteitsberekeningen. De analyse is uitgevoerd op de volgende aspecten:

- initiële verschillen tussen de karakteristieke knelpuntsituaties (paragraaf II.1);
- effect van de basisconfiguraties (paragraaf II.2);
- effect van de aanvullende maatregelen (paragraaf II.3).

De belangrijkste bevindingen en conclusies komen terug in hoofdstuk 3 en in de beoordelingsmatrix (hoofdstuk 6 en bijlage VI). In hoofdstuk drie wordt ook uitgebreid aandacht besteed aan de gehanteerde aanpak van de effectberekening en de gehanteerde uitgangspunten en aannames. De belangrijkste uitgangspunten en aannames staan hieronder kort vermeld.

De berekeningen zijn uitgevoerd ter hoogte van 4 dwarsprofielen (A, B, C, D) met receptorpunten om de 5 meter tot een afstand van 100 meter van de weg (zie ook paragraaf 3.1.). De weg is noord-zuid georiënteerd en alle dwarsprofielen zijn oost-west georiënteerd (loodrecht op de weg). Door deze ligging komt de invloed van de snelweg inclusief de eventuele overkapping op verschillende manieren naar voren. Dit heeft vooral te maken met de heersende windrichting en windsnelheid. Deze invloed komt met name tot uitdrukking in het verschil tussen de dwarsprofielen B en D (respectievelijk de noordelijke en de zuidelijke tunnelmond). Dwarsprofiel C geeft inzicht in de situatie ter hoogte van het midden van de overkapping en dwarsprofiel A geeft inzicht in de situatie op 200 meter afstand van de noordelijke tunnelmond.

Voor het berekenen van de luchtkwaliteit is gebruik gemaakt van het verspreidingsmodel ADMS-Urban. Het model is goedgekeurd door de Minister van VROM voor het toepassingsbereik SRM1, SRM2, NNM, en voor situaties die buiten het toepassingsbereik SRM1, SRM2 en NNM vallen (conform het Meet- en rekenvoorschrift bevoegdheden luchtkwaliteit). In artikel 27 van het Besluit Luchtkwaliteit is vastgelegd dat indien bij de vaststelling van stikstofdioxide gebruik wordt gemaakt van verspreidingsmodellen, de uitkomst van deze modelberekening niet meer dan 30 % mag afwijken van de jaargemiddelde concentratie. Voor PM10 geldt een maximum van 50 %.

Uit validatie-studies voor een groot aantal verschillende situaties blijkt het model, in vergelijking met andere modellen uit Europa en de Verenigde Staten, uitmuntend te scoren. De nauwkeurigheid van het model wordt hoofdzakelijk bepaald door de nauwkeurigheid van de gebruikte input. Met name rond deze input zijn er binnen deze verkennende studie de nodige aannames gedaan. Bij wijziging van de inputwaarden kunnen andere effecten optreden. Het is daarom noodzakelijk om aanvullende effectberekeningen uit te voeren zodra wordt overwogen om daadwerkelijk een overkapping te realiseren.

Een belangrijke opmerking bij de weergegeven concentraties voor dwarsprofiel C is dat de concentraties representatief zijn voor de buitenlucht en niet voor de lucht in de overkapping. In meer algemene zin moet worden opgemerkt dat alle weergegeven of besproken resultaten voor PM10 zijn gecorrigeerd voor zeezout.

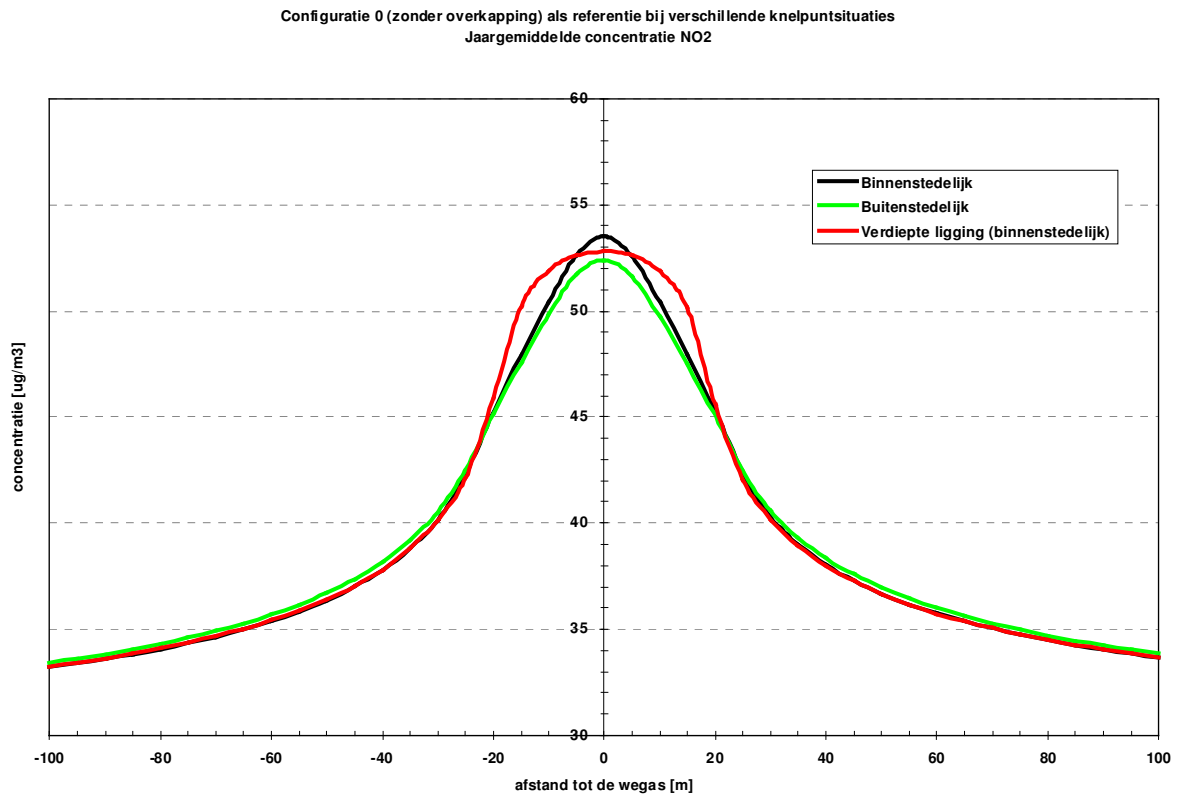
II.1 Initiële verschillen tussen de karakteristieke knelpuntsituaties

De verspreiding van de emissies verschilt per knelpuntsituatie. Dit wordt in afbeelding II.1. geïllustreerd aan de hand van het concentratieverloop van de jaargemiddeldeconcentratie NO₂ voor de referentiesituatie (configuratie 0). Hieruit komt duidelijk naar voren dat het concentratieverloop van een verdiepte ligging een ander verloop vertoont dan de onverdiepte knelpuntsituaties. Tevens komt duidelijk naar voren dat de binnenstedelijke knelpuntsituatie een hogere concentratiepiek kent dan de buitenstedelijke knelpuntsituatie.

Bij de situatie met verdiepte ligging is de weg gemodelleerd als volumebron, waardoor de concentratie beter (initieel) gemengd is. Hierdoor ontstaat een lagere concentratiepiek midden op de weg, en een hogere concentratie aan beide zijden van de weg, met vanaf circa 25 meter een normaal concentratieverloop zoals bij de binnenstedelijke situatie. De lagere ruwheid in de buitenstedelijke situatie in verge-

lijking tot de binnenstedelijke situatie, resulteert in een betere verspreiding van de emissies, met als gevolg een lagere concentratiepiek boven de weg en een geringe concentratietoename verder van de weg af.

Afbeelding II.1. Jaargemiddelde concentratie NO₂ configuratie 0 (referentiesituatie)



II.2 Effect van de basisconfiguraties

In deze paragraaf wordt per knelpuntsituatie aangegeven wat de effecten van de verschillende configuraties zijn. Ook wordt aangegeven wat de verschillen tussen de verschillende configuraties zijn.

II.2.1 Binnenstedelijke knelpuntsituaties

In tabel II.1. en II.2. zijn de berekende jaargemiddelde concentraties NO₂ en PM10 weergegeven op 25 meter van de weg (als representatief receptorpunt). Voor dwarsprofielen A, B en C bevindt het receptorpunt zich ten oosten van de weg; voor dwarsprofiel D ten westen.

Tabel II.1. Jaargemiddelde concentratie NO₂ op 25 meter van de weg

configuratie	DP. A	verschil %		DP. B	verschil %		DP. C	verschil %		DP. D	verschil %	
		t.o.v. config 0			t.o.v. config 0			t.o.v. config 0			t.o.v. config 0	
0	42,4	-		42,3	-		42,5	-		42,3	-	
1	43,9	+3,7		60,8	+43,8		30,2	-29,0		68,9	+62,9	
2	43,0	+1,5		48,8	+15,3		29,8	-29,7		53,1	+25,5	
3	43,1	+1,7		48,8	+15,5		29,8	-29,9		53,1	+25,6	
4	43,1	+1,7		48,8	+15,4		29,9	-29,5		53,1	+25,6	
5	43,2	+1,9		49,0	+15,7		30,0	-29,3		53,2	+25,9	

Tabel II.2. Jaargemiddelde concentratie PM10 op 25 meter van de weg

configuratie	verschil %		verschil %		verschil %		verschil %	
	DP. A	t.o.v. config 0	DP. B	t.o.v. config 0	DP. C	t.o.v. config 0	DP. D	t.o.v. config 0
0	25,8	-	25,7	-	25,8	-	26,1	-
1	26,3	+2,2	35,4	+37,7	21,7	-15,9	41,2	+58,3
2	26,0	+1,0	29,4	+14,2	21,6	-16,2	32,7	+25,6
3	26,0	+1,1	29,4	+14,2	21,6	-16,2	32,7	+25,6
4	26,1	+1,1	29,4	+14,2	21,6	-16,1	32,7	+25,6
5	26,1	+1,2	29,4	+14,4	21,7	-16,0	32,7	+25,7

In afbeelding II.2. en II.3. (volgende pagina's) zijn de resultaten weergegeven voor de vier dwarsprofielen van respectievelijk NO₂ en PM10 (jaargemiddeld).

effect van de overkapping (dwarsprofiel C)

De concentratieafname is aanzienlijk, namelijk circa 3 á 4 µg NO₂ /m³ (en circa 1 µg PM10 /m³) op 100 meter afstand en circa 12 á 13 µg NO₂ /m³ (en circa 4 µg PM10 /m³) op 25 meter afstand van de weg. Bij alle configuraties worden de concentraties gereduceerd tot ongeveer de achtergrondwaarden.

effect aan de tunnelmonden (dwarsprofielen B en D)

Zoals verwacht, vindt bij de tunnelmonden een verhoging van de concentraties NO₂ en PM10 plaats als gevolg van de relatief geconcentreerde wolk uitlaatgassen die de overkapping verlaat. Deze wolk komt vrij ter hoogte van de rechter rijbaan (rijrichting), hetgeen resulteert in een concentratiepiek die is verschoven naar het oosten (dwarsprofiel B) en westen (dwarsprofiel D).

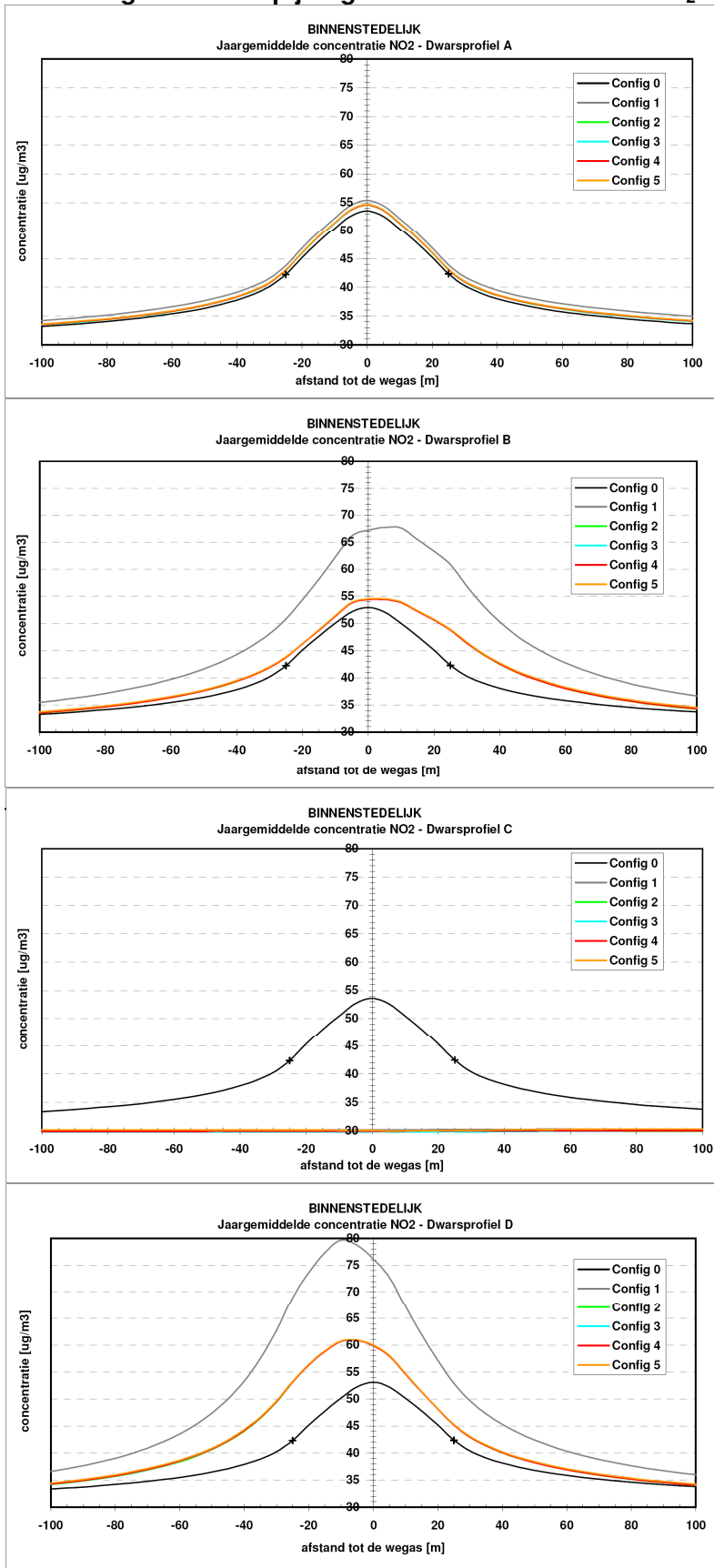
Wat opvalt in afbeeldingen II.2 en II. 3 is dat met name configuratie 1 sterk afwijkt van de overige configuraties met overkapping en dat de verschillen tussen de overige configuraties relatief klein zijn. Dit is het directe gevolg van de veronderstelde percentages lucht (en emissievracht) die bij de tunnelmond naar buiten komen. Bij configuratie 1 is dit 50 % en bij de overige configuraties met overkapping 25 %. De manier waarop dit percentage tot stand is gekomen, dus ofwel één grote schoorsteen, ofwel 2 kleinere, ofwel 5 kleinere, maakt weinig verschil.

Tevens valt op dat de zuidelijke piek (dwarsprofiel D) fors hoger is dan de noordelijke piek (dwarsprofiel B). Dit heeft te maken met de heersende windrichting en –snelheden. Bij dwarsprofiel B wordt relatief vaak, met zuidwestelijke winden, schone lucht ter plaatse van de overkapping aangevoerd, in tegenstelling tot dwarsprofiel D.

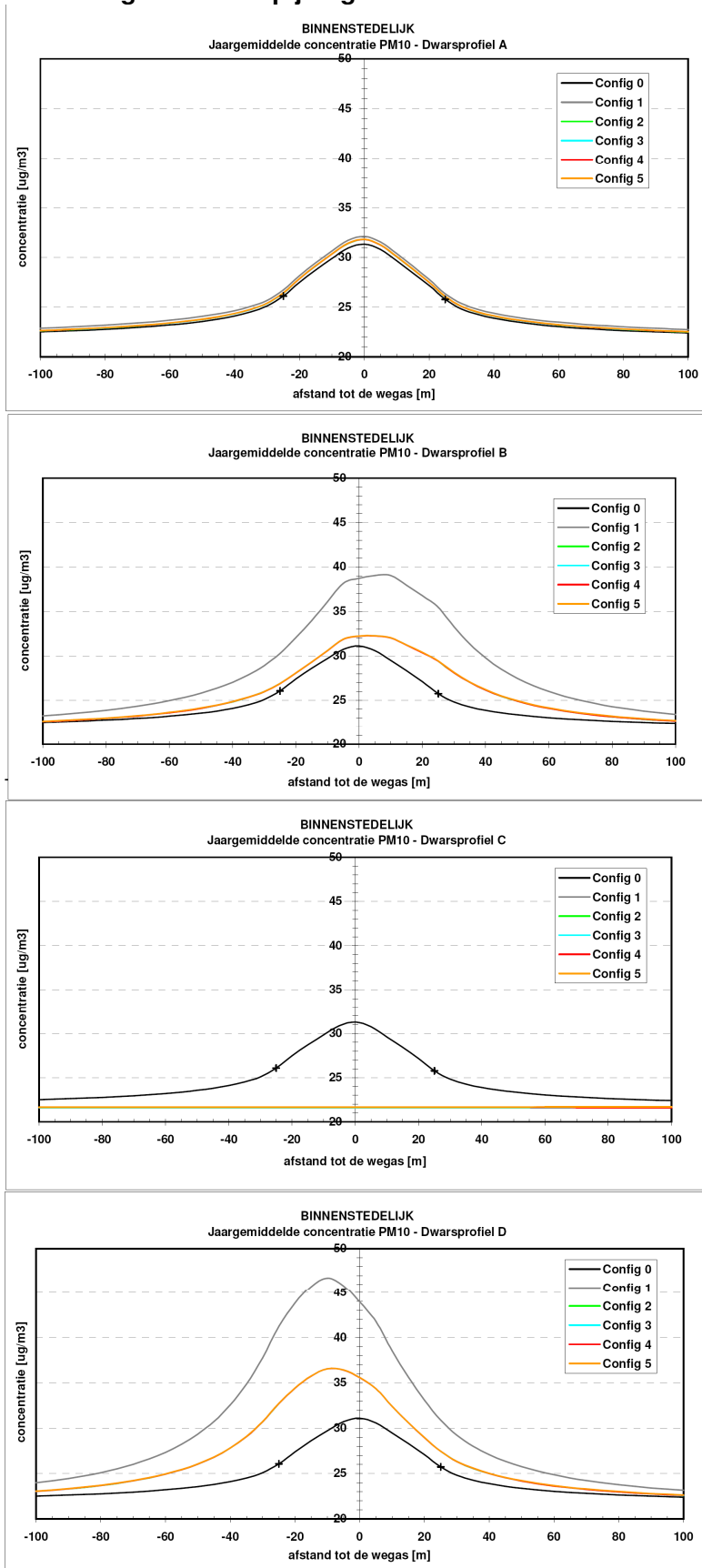
effect op grotere afstand van de overkapping (dwarsprofiel A)

Alle overkappingconfiguraties zorgen op 200 meter van de tunnelmond voor een toename van de concentratie. Bij configuratie 1 is de toename groter dan bij de overige configuraties, hetgeen volgt uit de veronderstelde percentages van de lucht en emissievracht die onder de overkapping vandaan komt.

Abbeelding II.2. Verloop jaargemiddelde concentratie NO₂ bij binnenstedelijke knelpunten



Afbeelding II.3. Verloop jaargemiddelde concentratie PM10 bij binnenstedelijke knelpunten



II.2.2 Buitenstedelijke knelpuntsituaties

In tabel II.3. en II.4. zijn de berekende jaargemiddelde concentraties NO₂ en PM10 weergegeven op 25 meter van de weg (als representatief receptorpunt). Voor dwarsprofielen A, B en C bevindt het receptorpunt zich ten oosten van de weg; voor dwarsprofiel D ten westen.

Tabel II.3. Jaargemiddelde concentratie NO₂ op 25 meter van de weg

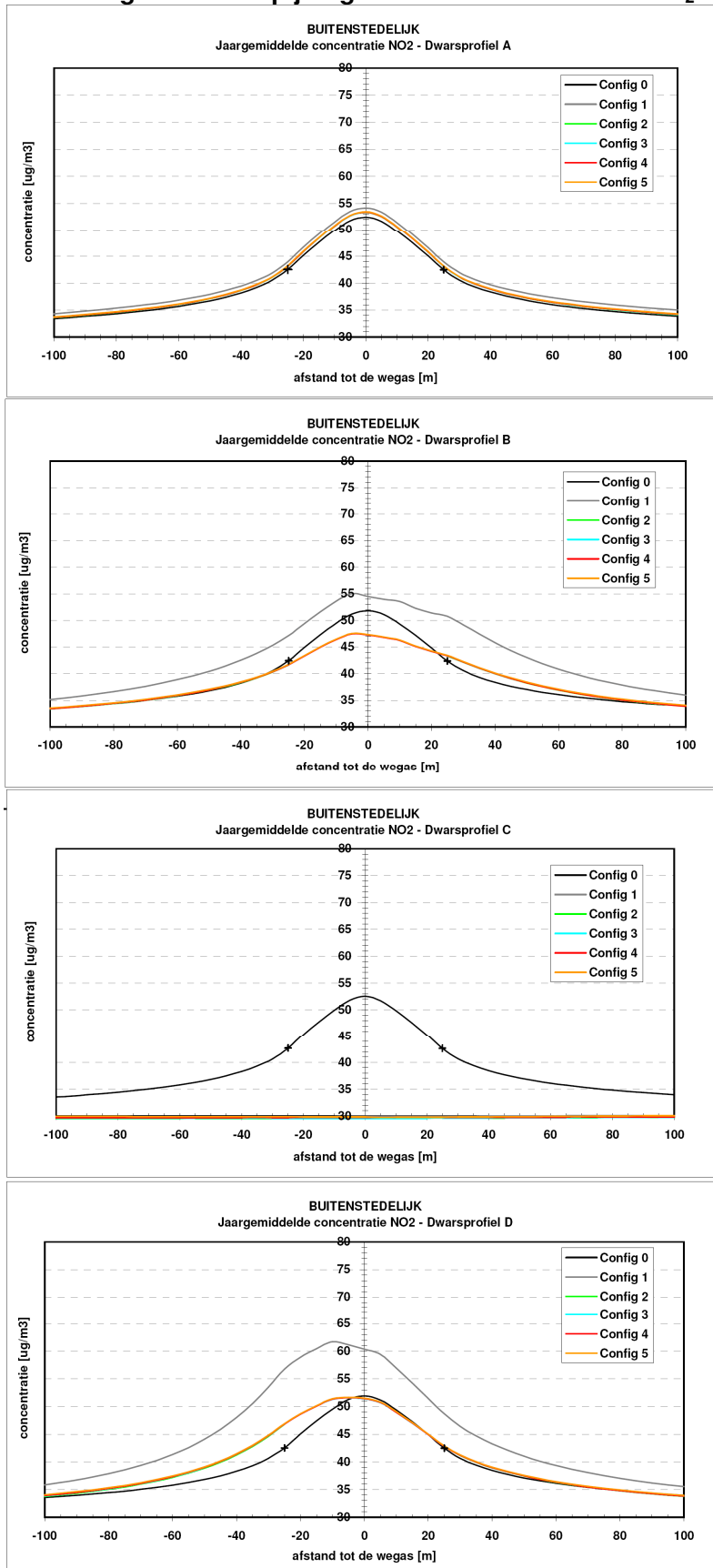
configuratie	DP. A	verschil %		verschil %		verschil %		verschil %	
		t.o.v. config 0	DP. B	t.o.v. config 0	DP. C	t.o.v. config 0	DP. D	t.o.v. config 0	
0	42,5	-	42,4	-	42,6	-	42,5	-	
1	43,9	+3,4	50,8	+19,9	30,0	-29,7	56,7	+33,5	
2	43,0	+1,3	43,3	+2,2	29,6	-30,5	46,8	+10,0	
3	43,1	+1,4	43,4	+2,4	29,6	-30,5	46,8	+10,1	
4	43,1	+1,5	43,3	+2,3	29,8	-30,2	46,8	+10,1	
5	43,2	+1,7	43,4	+2,6	29,8	-30,0	46,9	+10,4	

Tabel II.4. Jaargemiddelde concentratie PM10 op 25 meter van de weg

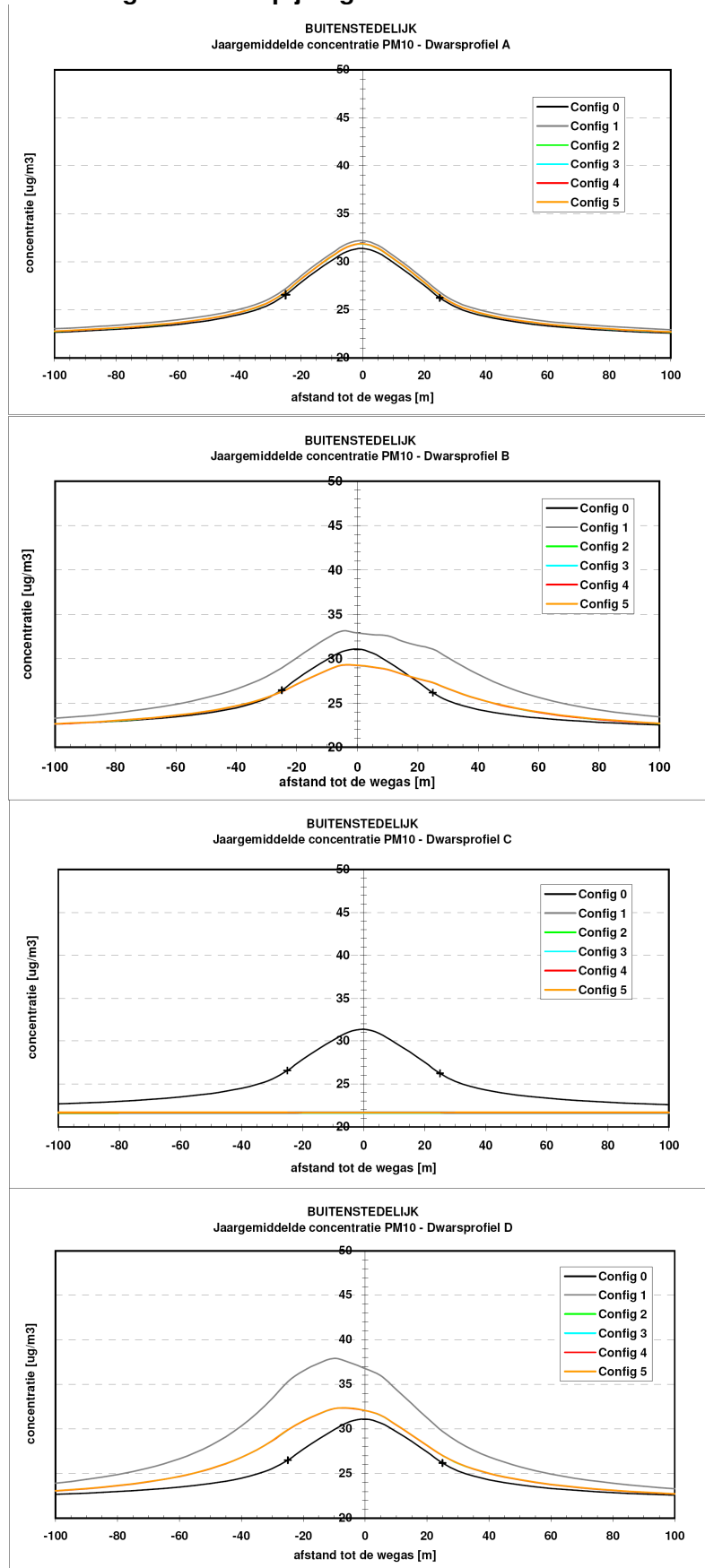
configuratie	DP. A	verschil %		verschil %		verschil %		verschil %	
		t.o.v. config 0	DP. B	t.o.v. config 0	DP. C	t.o.v. config 0	DP. D	t.o.v. config 0	
0	26,2	-	26,2	-	26,2	-	26,2	-	
1	26,8	+2,3	31,1	+18,8	21,7	-17,4	35,3	+33,2	
2	26,5	+1,0	27,3	+4,3	21,6	-17,6	29,9	+12,9	
3	26,5	+1,0	27,3	+4,4	21,6	-17,6	29,9	+12,9	
4	26,5	+1,1	27,3	+4,3	21,6	-17,6	29,9	+12,9	
5	26,5	+1,2	27,3	+4,4	21,7	-17,5	29,9	+12,9	

In afbeelding II.4. en II.5. (volgende pagina's) zijn de resultaten weergegeven voor de vier dwarsprofielen van respectievelijk NO₂ en PM10 (jaargemiddeld).

Abbeelding II.4. Verloop jaargemiddelde concentratie NO₂ bij buitenstedelijke knelpunten



Abbeelding II.5. Verloop jaargemiddelde concentratie PM10 bij buitenstedelijke knelpunten



effect van de overkapping (dwarsprofiel C)

De concentratieafname is aanzienlijk, namelijk circa 3 á 4 $\mu\text{g NO}_2 / \text{m}^3$ (en circa 1 $\mu\text{g PM}_{10} / \text{m}^3$) op 100 meter afstand en circa 12 á 13 $\mu\text{g NO}_2 / \text{m}^3$ (en circa 4 á 5 $\mu\text{g PM}_{10} / \text{m}^3$) op 25 meter afstand van de weg. Bij alle configuraties worden de concentraties gereduceerd tot ongeveer het niveau van de achtergrondconcentratie.

In de binnenstedelijke en buitenstedelijke knelpuntsituatie is het effect van de overkapping ter hoogte van dwarsprofiel C nagenoeg ongeveer gelijk, aangezien het concentratieverloop zonder overkapping vanaf 25 meter afstand weinig verschilt (zie afbeelding II.1.).

effect aan de tunnelmonden (dwarsprofielen B en D)

Zoals verwacht, vindt bij de tunnelmonden een verhoging van de concentraties NO_2 en PM_{10} plaats als gevolg van de relatief geconcentreerde wolk uitlaatgassen die de overkapping verlaat. Deze wolk komt vrij ter hoogte van de rechter rijbaan (rijrichting), hetgeen resulteert in een concentratiepiek die is verschoven naar het oosten (dwarsprofiel B) en westen (dwarsprofiel D).

Wat opvalt in afbeeldingen II.4 en II.5 is dat met name configuratie 1 sterk afwijkt van de overige configuraties met overkapping en dat juist de verschillen tussen de overige configuraties relatief klein zijn. Dit is het directe gevolg van de veronderstelde percentages lucht (en emissievracht) die bij de tunnelmond naar buiten komen. Bij configuratie 1 is dit 50 % en de overige configuraties met overkapping 25 %. De manier waarop dit percentage tot stand is gekomen, dus ofwel één grote schoorsteen, ofwel 2 kleinere, ofwel 5 kleinere, maakt weinig verschil.

Ten tweede valt op dat de zuidelijke piek (dwarsprofiel D) fors hoger is dan de noordelijke piek (dwarsprofiel B). Dit heeft te maken met de heersende windrichting en –snelheden. Bij dwarsprofiel B wordt relatief vaak, met zuidwestelijke winden, schone lucht ter plaatse van de overkapping aangevoerd, in tegenstelling tot dwarsprofiel D.

Het effect van de afwezigheid van emissies ter hoogte van de overkapping is bij de buitenstedelijke situatie iets geringer (kleiner verschil tussen dwarsprofielen B en D), maar komt wel duidelijker naar voren dan bij de binnenstedelijke situatie aangezien het resulteert in lagere maximumconcentraties NO_2 en PM_{10} bij configuraties 3, 4 en 5 dan de situatie zonder overkapping (!). Dit is te verklaren doordat naast het effect van de afwezigheid van emissies ter hoogte van de overkapping, bovendien de relatief geconcentreerde wolk uitlaatgassen vanuit de tunnelmond beter wordt verspreid.

effect op grotere afstand van de overkapping (dwarsprofiel A)

Alle overkappingconfiguraties zorgen op 200 meter van de tunnelmond voor een toename van de concentratie. Bij configuratie 1 is de toename groter dan bij de overige configuraties, hetgeen volgt uit de veronderstelde percentages van de lucht en emissievracht die onder de overkapping vandaan komt.

II.2.3 Verdiepte ligging

In tabel II.5 en II.6 zijn de berekende jaargemiddelde concentraties NO_2 en PM_{10} weergegeven op 25 meter van de weg (als representatief receptorpunt). Voor dwarsprofielen A, B en C bevindt het receptorpunt zich ten oosten van de weg; voor dwarsprofiel D ten westen.

In afbeelding II.6. en II.7. (volgende pagina's) zijn de resultaten weergegeven voor de vier dwarsprofielen van respectievelijk NO_2 en PM_{10} (jaargemiddeld).

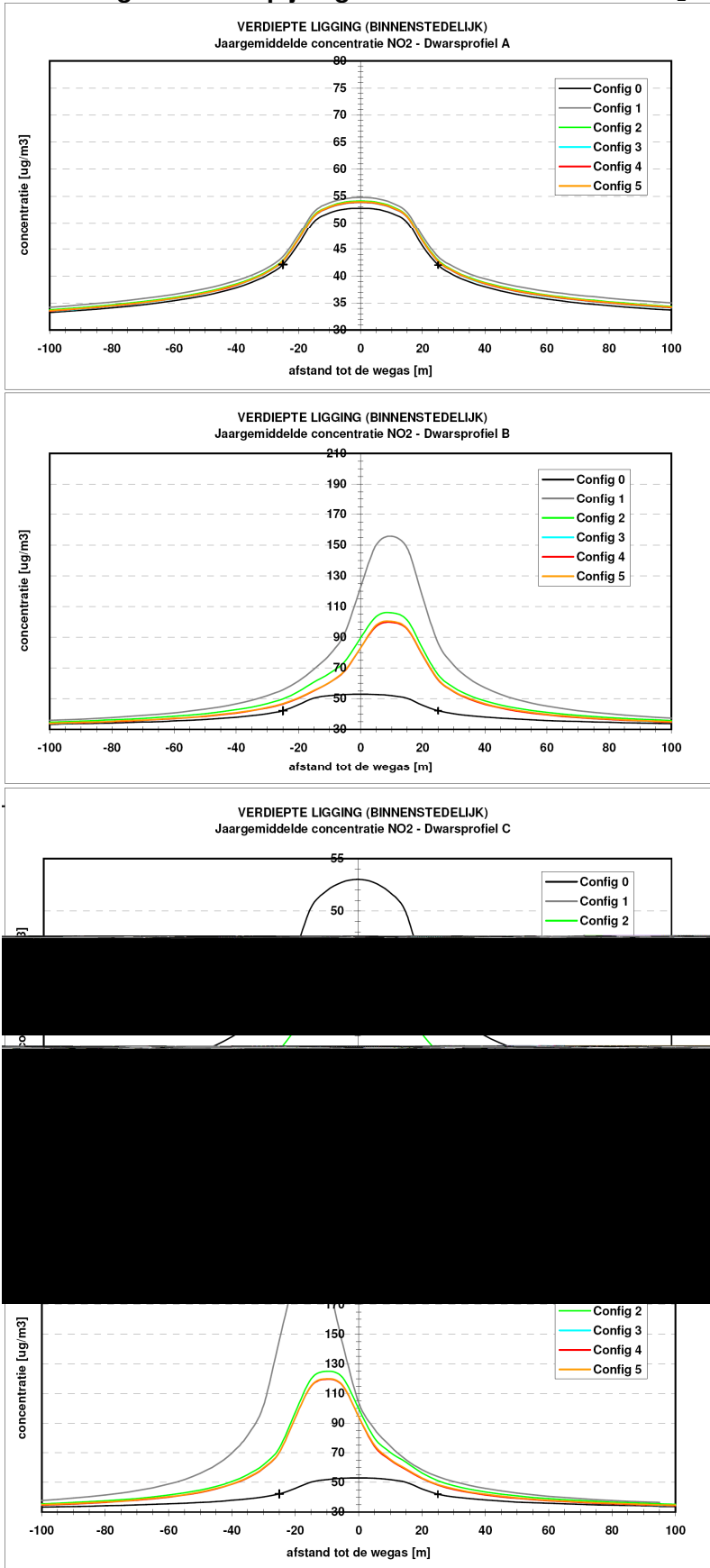
Tabel II.5. Jaargemiddelde concentratie NO₂ op 25 meter van de wegas

configuratie	DP. A	verschil %		verschil %		verschil %		verschil %	
		t.o.v. config 0	DP. B	t.o.v. config 0	DP. C	t.o.v. config 0	DP. D	t.o.v. config 0	
0	42,0	-	42,1	-	42,1	-	42,2	-	
1	43,6	+3,7	86,0	+104,3	30,1	-28,5	101,8	+141,1	
2	42,9	+2,1	65,5	+55,7	36,6	-13,1	73,2	+73,2	
3	42,6	+1,4	62,2	+47,8	29,8	-29,3	70,2	+66,3	
4	42,7	+1,6	62,2	+47,7	29,9	-29,0	70,2	+66,2	
5	42,8	+1,8	62,7	+48,9	30,4	-27,8	70,5	+66,9	

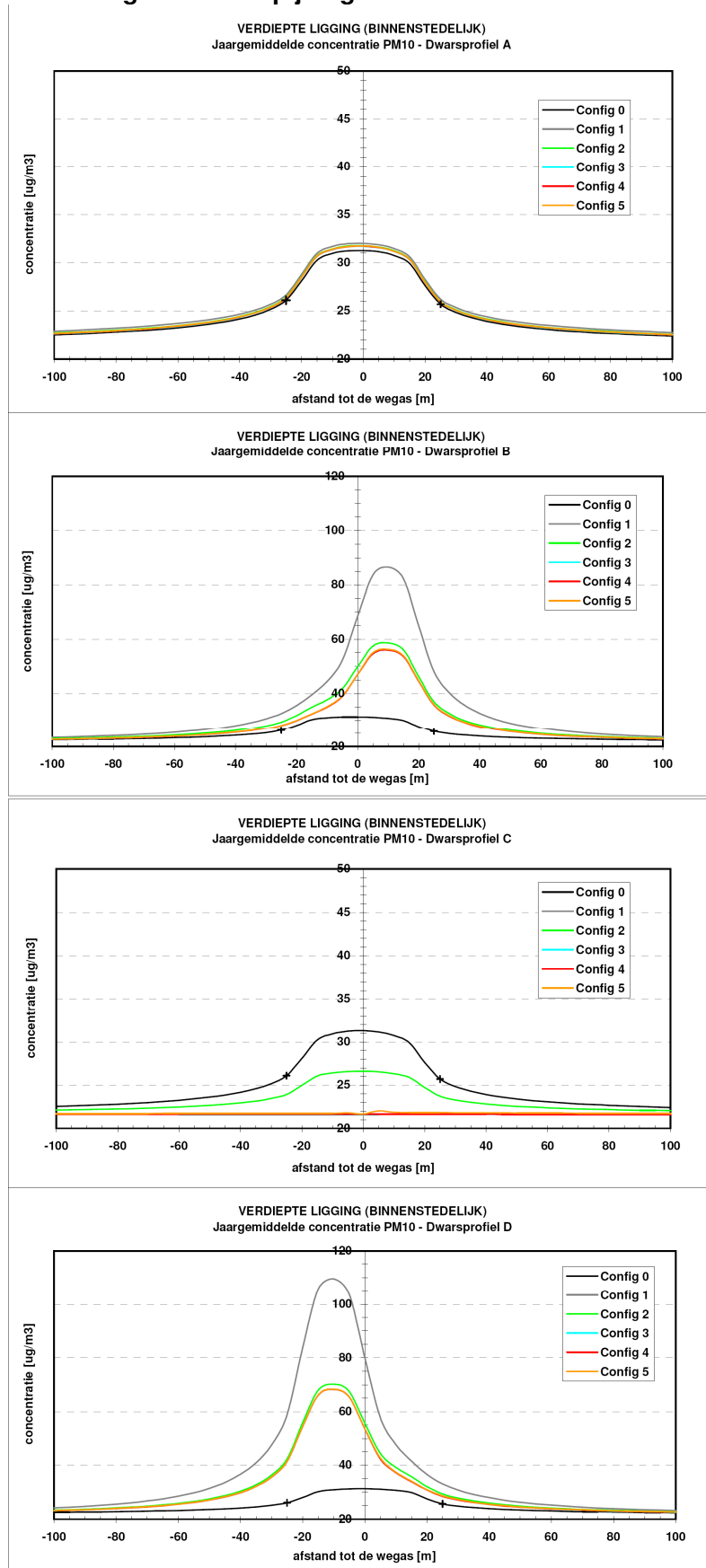
Tabel II.6. Jaargemiddelde concentratie PM₁₀ op 25 meter van de wegas

configuratie	DP. A	verschil %		verschil %		verschil %		verschil %	
		t.o.v. config 0	DP. B	t.o.v. config 0	DP. C	t.o.v. config 0	DP. D	t.o.v. config 0	
0	25,7	-	25,7	-	25,7	-	26,1	-	
1	26,2	+2,0	48,0	+86,9	21,7	-15,7	58,8	+125,4	
2	26,0	+1,1	36,9	+43,5	23,7	-7,7	42,5	+62,7	
3	25,9	+0,8	35,7	+38,8	21,6	-15,9	41,5	+59,0	
4	25,9	+0,9	35,7	+38,8	21,6	-15,9	41,5	+59,0	
5	26,0	+1,0	35,9	+39,5	21,8	-15,1	41,6	+59,3	

Afbeelding II.6. Verloop jaargemiddelde concentratie NO₂ bij verdiepte ligging



Afbeelding II.7. Verloop jaargemiddelde concentratie PM10 bij verdiepte ligging



effect van de overkapping (dwarsprofiel C)

In de binnenstedelijke en buitenstedelijke knelpuntsituaties en bij de verdiepte ligging is het effect van de overkapping ter hoogte van dwarsprofiel C nagenoeg gelijk, aangezien vanaf 25 meter afstand het concentratieverloop zonder overkapping weinig verschilt (zoals is geïllustreerd in afbeelding II.1.). Alleen overkappingconfiguratie 2 wijkt af ten opzichte van de andere knelpuntsituaties, hetgeen het gevolg is van de lagere emissiehoogte (op maaiveld in plaats van op 7 meter hoogte).

effect aan de tunnelmonden (dwarsprofielen B en D)

Zoals verwacht, vindt bij de tunnelmonden een verhoging van de concentraties NO₂ en PM10 plaats als gevolg van de relatief geconcentreerde wolk uitlaatgassen die de overkapping verlaat. Deze 'vieze wolk' komt vrij ter hoogte van de rechter rijbaan (rijrichting), hetgeen resulteert in een concentratiepiek die is verschoven naar het oosten (dwarsprofiel B) en westen (dwarsprofiel D). Door de verdiepte ligging is de hoogte van emissie bij de tunnelmond eveneens lager, waardoor de initiële concentraties NO₂ en PM10 op receptorhoogte fors hoger zijn. Bovendien is de lagere emissiehoogte ongunstiger voor de verspreiding.

Wat opvalt in afbeeldingen II.6 en II.7 is dat met name configuratie 1 sterk afwijkt van de overige configuraties met overkapping en dat juist de verschillen tussen de overige configuraties relatief klein zijn. Dit is het directe gevolg van de veronderstelde percentages lucht (en emissievracht) dat bij de tunnelmond naar buiten komt. Bij configuratie 1 is dit 50 % en de overige configuraties met overkapping 25 %. De manier waarop dit percentage tot stand is gekomen, dus ofwel één grote schoorsteen, ofwel 2 kleinere, ofwel 5 kleinere, maakt weinig verschil.

Tevens valt op dat de zuidelijke piek (dwarsprofiel D) fors hoger is dan de noordelijke piek (dwarsprofiel B). Dit heeft te maken met de heersende windrichting en -snelheden. Bij dwarsprofiel B wordt relatief vaak, met zuidwestelijke winden, schone lucht ter plaatse van de overkapping aangevoerd, in tegenstelling tot dwarsprofiel D. Bij configuratie 2 is de aangevoerde lucht op maaiveld minder schoon dan bij configuraties 3, 4 en 5, hetgeen leidt tot een kleiner effect.

Het effect van de afwezigheid van emissies ter hoogte van de overkapping is bij de situatie met verdiepte ligging (binnenstedelijk) sterker (groter verschil tussen dwarsprofielen B en D) dan bij de onverdiepte knelpuntsituaties.

effect op grotere afstand van de overkapping (dwarsprofiel A)

Alle overkappingconfiguraties zorgen op 200 meter van de tunnelmond voor een toename van de concentratie. Bij configuratie 1 is de toename groter dan bij de overige configuraties, hetgeen volgt uit de veronderstelde percentages van de lucht en emissievracht die onder de overkapping vandaan komt.

II.2.4 Bestaande tunnelmond

De knelpuntsituatie is in dit geval toegespitst op een bestaande tunnelmond, waarbij de tunnelmond verdiept is gelegen. Modelmatig is deze knelpuntsituatie identiek aan 'normale' knelpuntsituatie met verdiepte ligging, maar is er in de beginsituatie reeds sprake van een overkapping. Ter hoogte van dwarsprofiel A is deze knelpuntsituatie identiek aan knelpuntsituatie A (binnenstedelijk), aangezien de helling in de tunnelmond wordt gemodelleerd in twee horizontale stappen: een deel verdiept, waarbij de weg als volumebron op maaiveld is gelegen (zoals bij knelpuntsituatie C), en een deel onverdiept, waarbij de weg als lijnbron op maaiveld is gelegen.

In tabel II.7. en II.8. zijn de jaargemiddelde concentraties NO₂ en PM10 weergegeven op 25 meter van de weg (als representatief receptorpunt). Voor dwarsprofielen A en B bevindt het receptorpunt zich ten oosten van de weg; voor dwarsprofiel D ten westen.

Een tunnel brengt in vergelijking met een overkapping meer beperkingen met zich mee, zodat niet alle configuraties toepasbaar zijn (zoals ook is beschreven in hoofdstuk 2.). Configuratie 2 is geheel niet

toepasbaar. Configuratie 3 en 5 zijn wellicht ook minder realistisch, maar zijn voor de volledigheid wel berekend. Configuratie 1 is in feite de basisconfiguratie. De resultaten zijn dan ook vergeleken met basisconfiguratie 1.

Tabel II.7. Jaargemiddelde concentratie NO₂ op 25 meter van de wegas

configuratie	DP. A	verschil %		verschil %		verschil %		verschil %	
		t.o.v. config 0	DP. B	t.o.v. config 0	DP. C	t.o.v. config 0	DP. D	t.o.v. config 0	
0	bestaat niet	-	bestaat niet	-	bestaat niet	-	bestaat niet	-	
1	43,9	-	86,0	-	30,1	-	101,8	-	
2	bestaat niet	-	bestaat niet	-	bestaat niet	-	bestaat niet	-	
3	43,1	-2,0	62,2	-27,7	29,8	-1,1	70,2	-31,0	
4	43,1	-1,9	62,2	-27,7	29,9	-0,7	70,2	-31,1	
5	43,2	-1,7	62,7	-27,1	30,4	+1,0	70,5	-30,8	

Tabel II.8. Jaargemiddelde concentratie PM10 op 25 meter van de wegas

configuratie	DP. A	verschil %		verschil %		verschil %		verschil %	
		t.o.v. config 0	DP. B	t.o.v. config 0	DP. C	t.o.v. config 0	DP. D	t.o.v. config 0	
0	bestaat niet	-	bestaat niet	-	bestaat niet	-	bestaat niet	-	
1	26,3	-	48,0	-	21,7	-	58,8	-	
2	bestaat niet	-	bestaat niet	-	bestaat niet	-	bestaat niet	-	
3	26,0	-1,1	35,7	-25,7	21,6	-0,2	41,5	-29,5	
4	26,1	-1,1	35,7	-25,7	21,6	-0,2	41,5	-29,5	
5	26,1	-1,0	35,9	-25,3	21,8	+0,7	41,6	-29,3	

effect aan de tunnelmonden (dwarsprofielen B en D)

Aangezien de resultaten nu worden vergeleken met basisconfiguratie 1, verandert het perspectief aanzienlijk. De configuraties waarbij afzuiging van de tunnellucht plaatsvindt door middel van schoorstenen laten een sterke verbetering zien ten opzichte van de basisconfiguratie. Deze verbetering is het gevolg van de afgenomen emissievracht uit de tunnelmond.

effect op grotere afstand van de overkapping (dwarsprofiel A)

Alle overkappingconfiguraties zorgen op 200 meter van de tunnelmond voor een afname van de concentraties. Dit volgt uit de afname van de veronderstelde percentages van de lucht en emissievracht die onder de overkapping vandaan komen.

II.3 Verschillen tussen de alternatieve maatregelen

In tabel II.9. en II.10. zijn de berekende jaargemiddelde concentraties NO₂ en PM10 weergegeven op 25 meter van de wegas (als representatief receptorpunt) voor de binnenstedelijke situatie bij verschillende overkappingsconfiguraties, na het nemen van aanvullende maatregelen zoals beschreven in hoofdstuk 2. Voor dwarsprofielen A, B en C bevindt het receptorpunt zich ten oosten van de wegas; voor dwarsprofiel D ten westen.

Uit de berekeningen kwam naar voren dat alle voorgenomen maatregelen bij de configuraties met schoorstenen nauwelijks tot geen (!) effect hebben op de jaargemiddelde concentraties NO₂ en PM10. Hierbij wordt opgemerkt dat geen rekening is gehouden met eventuele extra emissies als gevolg van het energieverbruik van bijvoorbeeld de emissiebehandeling. Aangezien overkappingsconfiguraties 3 en 4 zijn uitgesplitst in een groot aantal alternatieven, waarbij de onderlinge verschillen echter nihil bleken te zijn, is besloten om configuratie 3 weg te laten uit de tabellen II.9. en II.10.

Tabel II.9. Effect maatregelen op jaargemiddelde concentratie NO₂ (Config 4, Binnenstedelijk)

configuratie en alternatief	verschil %		verschil %		verschil %		verschil %	
	DP. A	t.o.v. config 0	DP. B	t.o.v. config 0	DP. C	t.o.v. config 0	DP. D	t.o.v. config 0
0 a. basis	42,4	-	42,3	-	42,5	-	42,3	-
1 a. basis	43,9	+3,7	60,8	+43,8	30,2	-29,0	68,9	+62,9
b. 95% emissiereductie	43,1	+1,7	49,4	+16,8	29,9	-29,7	53,9	+27,4
c. 80% emissiereductie	43,2	+2,0	51,2	+21,1	29,9	-29,6	56,3	+33,1
d. 50% emissiereductie	43,5	+2,7	54,9	+29,8	30,0	-29,3	61,0	+44,3
4 a. basis	43,1	+1,7	48,8	+15,4	29,9	-29,5	53,1	+25,6
b. 95% emissiereductie	43,0	+1,6	48,8	+15,3	29,9	-29,7	53,1	+25,5
c. 80% emissiereductie	43,0	+1,6	48,8	+15,3	29,9	-29,7	53,1	+25,5
d. 50% emissiereductie	43,1	+1,6	48,8	+15,3	29,9	-29,6	53,1	+25,5
e. uitstroom 5 m/s	43,1	+1,8	48,8	+15,4	30,0	-29,5	53,1	+25,6
f. uitstroom 1 m/s	43,2	+2,0	49,1	+16,2	30,0	-29,4	53,4	+26,3
g. schoorst.h. -10 m	43,2	+1,8	48,8	+15,5	30,0	-29,5	53,1	+25,6
h. schoorst.h. +10 m	43,1	+1,7	48,8	+15,3	29,9	-29,6	53,1	+25,6
i. schoorst.h. +20 m	43,1	+1,6	48,8	+15,3	29,9	-29,6	53,1	+25,5
j. uitstr.5 m/s en h-10 m	43,2	+2,0	49,0	+15,9	30,0	-29,4	53,2	+25,9
5 a. basis	43,2	+1,9	49,0	+15,7	30,0	-29,3	53,2	+25,9
b. 95% emissiereductie	43,0	+1,6	48,8	+15,3	29,8	-29,8	53,1	+25,6
c. 80% emissiereductie	43,1	+1,6	48,8	+15,4	29,9	-29,7	53,1	+25,6
d. 50% emissiereductie	43,1	+1,8	48,9	+15,5	29,9	-29,6	53,2	+25,7

Tabel II.10. Effect maatregelen op jaargemiddelde concentratie PM₁₀ (Config 4, Binnenstedelijk)

configuratie en alternatief	verschil %		verschil %		verschil %		verschil %	
	DP. A	t.o.v. config 0	DP. B	t.o.v. config 0	DP. C	t.o.v. config 0	DP. D	t.o.v. config 0
0 a. basis	25,8	-	25,7	-	25,8	-	26,1	-
1 a. basis	26,3	+2,2	35,4	+37,7	21,7	-15,9	41,2	+58,3
b. 95% emissiereductie	26,1	+1,1	29,7	+15,4	21,6	-16,1	33,2	+27,2
c. 80% emissiereductie	26,1	+1,3	30,6	+18,9	21,6	-16,1	34,4	+32,1
d. 50% emissiereductie	26,2	+1,6	32,4	+26,0	21,6	-16,0	37,0	+41,9
4 a. basis	26,1	+1,1	29,4	+14,2	21,6	-16,1	32,7	+25,6
b. 95% emissiereductie	26,0	+1,0	29,4	+14,2	21,6	-16,2	32,7	+25,6
c. 80% emissiereductie	26,0	+1,0	29,4	+14,2	21,6	-16,2	32,7	+25,6
d. 50% emissiereductie	26,0	+1,1	29,4	+14,2	21,6	-16,1	32,7	+25,6
e. uitstroom 5 m/s	26,1	+1,2	29,5	+14,6	21,6	-16,1	32,8	+25,8
f. uitstroom 1 m/s	26,1	+1,1	29,4	+14,2	21,6	-16,1	32,7	+25,6
g. schoorst.h. -10 m	26,1	+1,2	29,5	+14,8	21,6	-16,1	32,9	+26,1
h. schoorst.h. +10 m	26,1	+1,2	29,4	+14,3	21,6	-16,1	32,7	+25,6
i. schoorst.h. +20 m	26,0	+1,1	29,4	+14,2	21,6	-16,1	32,7	+25,6
j. uitstr.5 m/s en h-10 m	26,0	+1,0	29,4	+14,2	21,6	-16,1	32,7	+25,6
5 a. basis	26,1	+1,2	29,4	+14,4	21,7	-16,0	32,7	+25,7
b. 95% emissiereductie	26,0	+1,0	29,4	+14,2	21,6	-16,2	32,7	+25,6
c. 80% emissiereductie	26,0	+1,0	29,4	+14,2	21,6	-16,1	32,7	+25,6
d. 50% emissiereductie	26,1	+1,1	29,4	+14,3	21,6	-16,1	32,7	+25,6

effect emissiezuivering (b, c en d)

De emissiezuivering in de overkapping (configuratie 1) heeft als gevolg dat de emissievracht uit de tunnelmonden afneemt. De omvang van de concentratiereductie is evenredig met het percentage emissiereductie. Het effect is hiermee vergelijkbaar met het effect van emissieafvang door middel van schoorstenen bij de configuraties 3, 4 en 5. Een emissiereductie van 95 % op 50 % van de totale luchtstroom

onder de overkapping leidt tot een effectieve reductie van 47,5 % op de totale emissievracht, waarvan het effect bij benadering overeenkomt met de effectieve reductie van 50 % bij schoorsteenconfiguraties.

Uit de resultaten blijkt dat het effect van emissiereducerende maatregelen op de emissies uit de schoorstenen (configuratie 3, 4 en 5) nihil is. Kennelijk zijn de schoorsteenhoogte in de basissituatie (20m) en de uitstroomsnelheid (10 m/s) al hoog genoeg om de emissies voldoende te verspreiden (verdunnen) zodat op receptorhoogte (1,5m) daar nagenoeg niets meer van is terug te zien. Hierdoor is de reiniging van de emissies niet merkbaar op receptorhoogte.

effect uitstroomsnelheid (e en f)

Uit de resultaten waarin de uitstroomsnelheid van de emissies uit de schoorsteen is verminderd naar 5 m/s, blijkt dat het effect hiervan nihil is. Een enigszins onrealistische uitstroomsnelheid van 1 m/s resulteert in een lichte concentratietoename, als gevolg van het stack-tip downwash effect. Hierbij wordt de emissiepluim door een kleine onderdruk achter de schoorsteen naar beneden gezogen. Kennelijk is de schoorsteenhoogte in de basissituatie (20 meter) al hoog genoeg om de emissies voldoende te verspreiden (verdunnen) zodat op receptorhoogte (1,5 meter) daar nauwelijks iets van is terug te zien.

effect gewijzigde schoorsteenhoogte (g, h en i)

Uit de resultaten waarin de schoorsteenhoogte is aangepast tot respectievelijk 10 meter lager, 10 meter hoger en 20 meter hoger, blijkt dat het effect hiervan nihil is. Kennelijk zijn de schoorsteenhoogte in de basissituatie (20m) en de uitstroomsnelheid (10 m/s) al hoog genoeg om de emissies voldoende te verspreiden (verdunnen) zodat op receptorhoogte (1,5m) nagenoeg niets meer is terug te zien van een verdere verhoging van de schoorsteen. Met een verlaging van 10 meter is de schoorsteen kennelijk nog steeds hoog genoeg

Opgemerkt wordt dat de schoorsteenhoogte bij de overkappingconfiguratie 5 bij knelpuntsituatie C (verdiepte ligging) 3 meter bedraagt. In dit geval is een kleine concentratietoename van 0,3 – 0,5 $\mu\text{g NO}_2 / \text{m}^3$ en 0,1 – 0,2 $\mu\text{g PM}_{10} / \text{m}^3$ berekend.

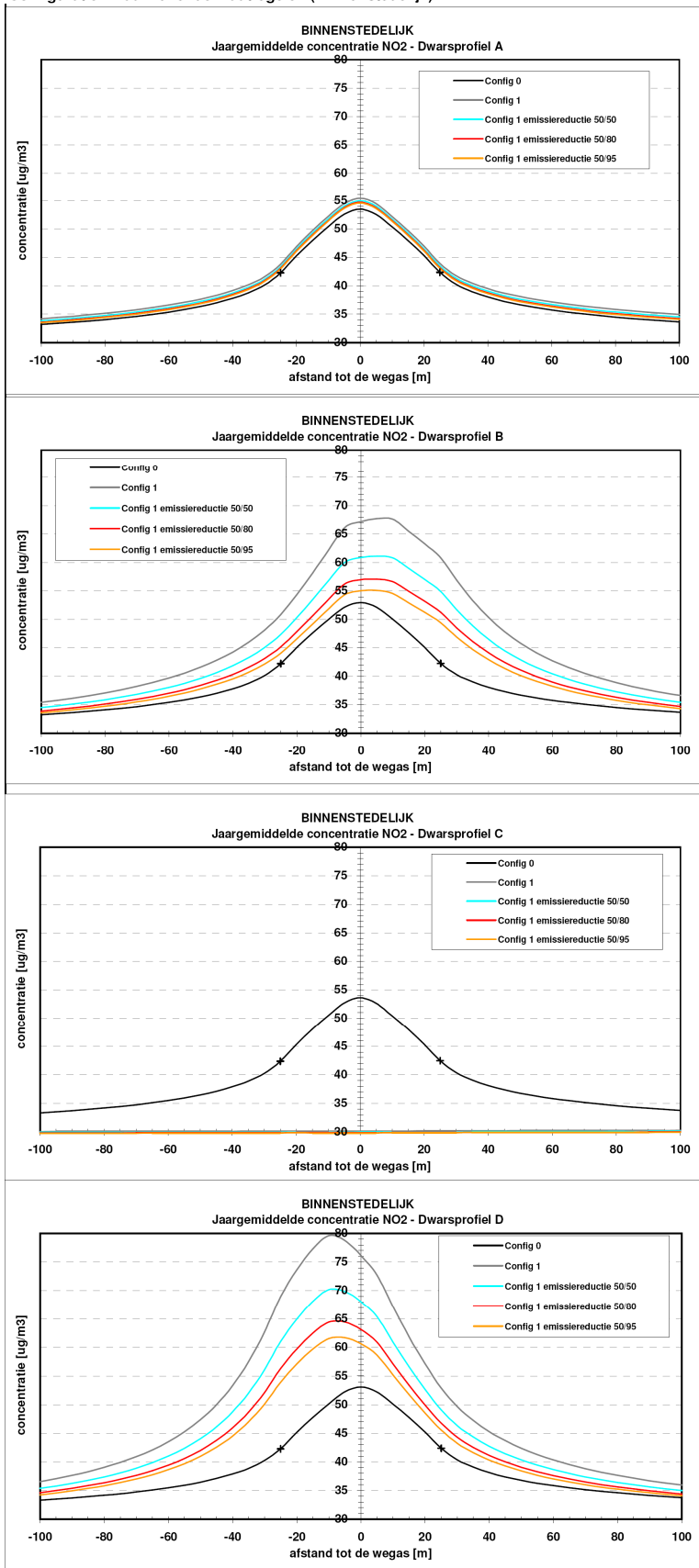
effect van combinatie gewijzigde schoorsteenhoogte en uitstroomsnelheid (j)

Uit de resultaten waarin de schoorsteenhoogte is verlaagd tot 10 meter, en waarbij de uitstroomsnelheid is verlaagd tot 5 m/s, blijkt dat het effect hiervan nihil is. Kennelijk zijn de schoorsteenhoogte en de uitstroomsnelheid nog steeds hoog genoeg om de emissies voldoende te verspreiden (verdunnen).

In afbeelding II.8. en II.9. (volgende pagina's) zijn de resultaten weergegeven voor de vier dwarsprofielen van NO_2 (jaargemiddeld) bij aanvullende maatregelen op respectievelijk configuratie 1 en 4 (binnenstedelijk).

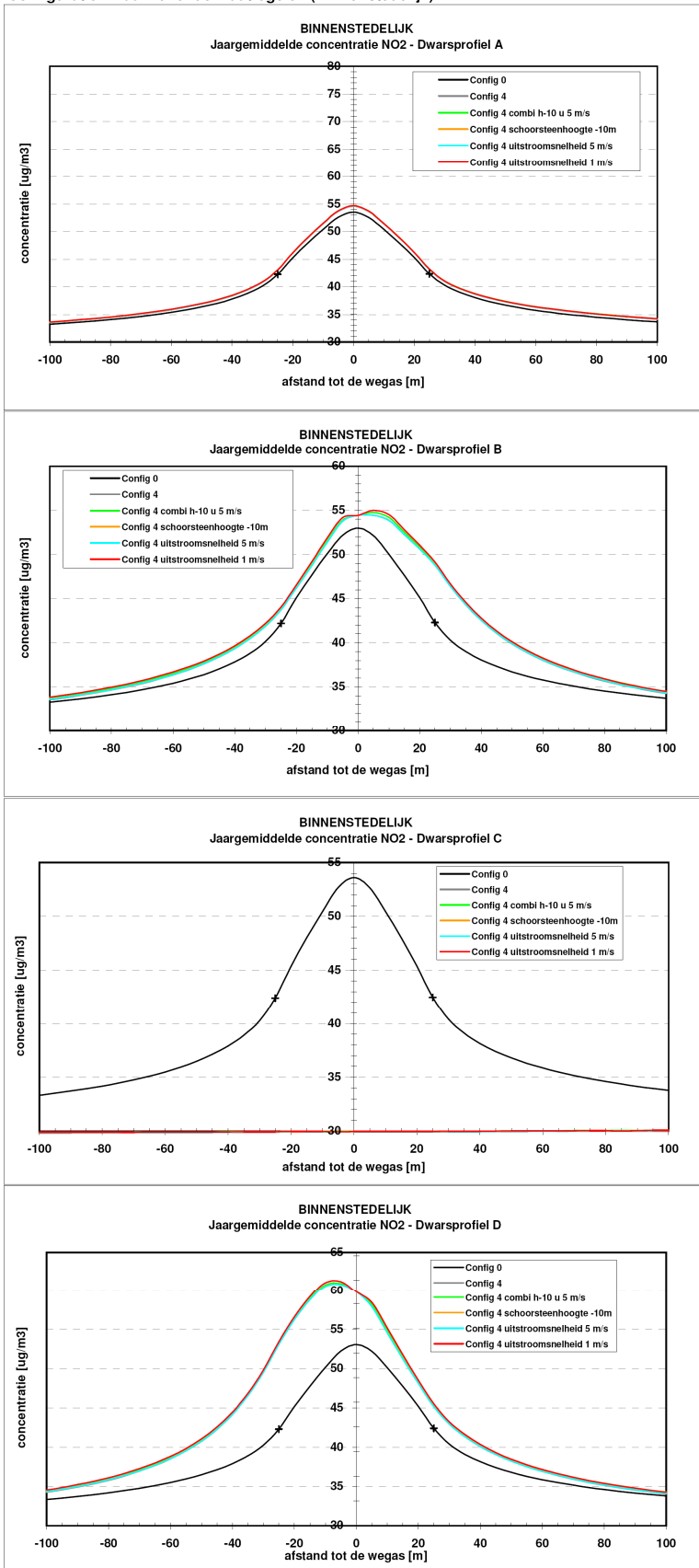
Afbeelding II.8. Effect aanvullende maatregelen bij configuratie 1

Configuratie 1 - aanvullende maatregelen (Binnenstedelijk)



Afbeelding II.9. Effect aanvullende maatregelen bij configuratie 4

Configuratie 4 - aanvullende maatregelen (Binnenstedelijk)



II.4 Belangrijkste bevindingen luchtberekeningen

Uit de resultaten van de luchtkwaliteitsberekeningen blijkt dat een overkapping inderdaad een aanzienlijk effect heeft op de luchtkwaliteit. Ter plaatse van de overkapping (dwarsprofiel C) nemen de concentraties NO₂ en PM10 in alle gevallen af tot ongeveer het niveau van de achtergrondconcentratie. Ter plaatse van de tunnelmonden ontstaat (met name in de binnenstedelijke situaties met een verdiepte ligging) een forse lokale piek in de concentraties NO₂ en PM10.

De hoeveelheid vuile lucht die door de tunnelmonden naar buiten gaat is bepalend voor de uiteindelijke concentratie aan de tunnelmond. De manier waarop deze hoeveelheid wordt beperkt maakt niet veel uit. In onderhavig onderzoek is verondersteld dat dit ofwel door middel van emissiereducerende maatregelen in een overkapping (configuratie 1), ofwel met sleuven in het dak (configuratie 2), ofwel met schoorstenen (configuratie 3, 4 en 5) kan worden gerealiseerd.

Tenslotte blijkt dat de invloed van aanvullende maatregelen bij schoorstenen (schoorsteenhoogte, emissiereductie) in het algemeen gering is. Kennelijk is een schoorsteenhoogte van 20 meter in combinatie met een uitstroomsnelheid van 10 m/s al hoog genoeg om de emissies in zodanig te verspreiden dat deze op receptorniveau nauwelijks meer zijn terug te zien.

BIJLAGE III Veiligheidsvoorzieningen

Bijlage III Overzicht kosten van veiligheidsvoorzieningen per omgevingstype

Locatie	Omgeving	Type constructie	Zelfredzaamheid vluchten					Compartimentering en rookbeheersing					Hulpverlening en brandbestrijding					Brandwerendheid		Tunnel Technische Installaties (TTI)			Detectie		Verlichting			Verkeersafwikkeling			totale kosten per kilometer overkapping									
			vluchtroute in dwarsrichting naar buiten	vluchtlocaties buiten tunnel	vluchtpaden in langrichting in tunnelkoker	vluchten naar naastgelegen koker (tussendeuren)	vluchtgang tussen weg	hulpposten (handblusser)	tussenscheiding/compartimentering kokers	"natuurlijke" stratificatie en rookberging	rookluiken in dakconstructie	langventilatie (tevens scheiding kokers)	dwarsventilatie	overdrukinstallaties vluchtgangen	hulpposten met brandslanghaspel	droge blusleiding (vulling middels tankautospuits)	natte blusleiding, vaste pompen en reservoir	afstroming bluswater en gev. Stoffen naar buitenrook	bluswaterkelders	actieve brandblussystemen	toetredingsweg in tunnel (evt. vluchtstrook)	route/wegen buiten tunnel voor toegankelijkheid	spanten: brandwerende bekleding/resistentie	gehele dak: brandwerende bekleding/resistentie	luidsprekerinstallatie	intercominstallatie	telefooninstallatie	Aarding, potentiaalvereffening, bliksembeveiliging	C2000, HF	LEL-detectie		luchtkwaliteit	tunnelverlichting (afhankelijk van lichtdoorlatendheid/g)	vluchtdeurverlichting	verkeersgeleide- en evacuatieverlichting	afsluitbomen	hoogtedetectie	Stilstanddetectie	verkeerslichten	
A. Binnenstedelijk	Zijdelingse ruimtelijke beperkingen	Ruim en hoog dwarsprofiel	O	O	X		X	X	O	O			O	X	O	O	O		X	O		X		O	O	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O	X			
		kosten	400					150					150					150				150		400		150		400		150		400		400		400		2.200.000		
	Regulier minimaal dwarsprofiel	O	O	X	X	O	X	X	O	X	O		O	X	O	O	O		X	O		X	O	O	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
	kosten	800					800					150					150				150		800		150		400		400		800		800		800		4.050.000			
Variant met sleuven/openingen in dak	variant overkapping	Ruim en hoog dwarsprofiel	O	O	X		X	X	O				O	X	O	O	O		X	O		X		O	O	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O	X			
		kosten	400					100				150						150				150		400		150		300		400		400		400		400		2.050.000		
B. Buitenstedelijk	Vrij toegankelijke omgeving	Ruim en hoog dwarsprofiel	X	X			X	X	O	O					X		O	X		O		O		O	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O	X		
		kosten	30					150				150					30				30		400		30		400		400		400		400		400		400		1.590.000	
	Regulier minimaal dwarsprofiel	X	X	O	O	X	X	O	O					X		O	X		X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	kosten	150					150				150					150				150		800		30		400		400		800		800		800		800		2.630.000		
Variant met sleuven/openingen in dak	variant overkapping	Ruim en hoog dwarsprofiel	X	X			X	X	O				X		O	X		O		O		O		O	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O	X		
		kosten	30					100				150					30				30		400		30		300		400		400		400		400		400		1.440.000	
C. Verdiepte ligging	Zijdelingse en niveau belemmeringen	Ruim en hoog dwarsprofiel			X	X	X	X		X	X	O	O	O		X	O	X	X	X		X		O	O	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O	X	
		kosten	1500					150				1500					150				150		400		150		400		400		400		400		400		400		4.650.000	
	Regulier minimaal dwarsprofiel			X	X	X	X		X	O	X	X		X	O	X	X	X		X	O	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	kosten	1500					800				1500					150				150		1500		150		1500		400		800		800		800		800		6.800.000		
Variant met sleuven/openingen in dak	variant overkapping	Ruim en hoog dwarsprofiel			X	X	X	X		X	X	O		O	X	O	O	X	O		X		O	O	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O	X	
		kosten	1500					100				150					150				150		400		150		400		300		400		400		400		400		3.150.000	
D. Verlenging tunnelmond	Onderdeel van tunnel	Beperkt profiel (aansluitend op tunnel)			X	X	X	X		X	O	X	O	X		X	X	X	O		O	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O	X	O	
		kosten	1500					800				1500					400				400		1500		150		400		400		400		400		400		400		6.650.000	
	Variant met sleuven/openingen in dak	variant overkapping			X	X	X	X		X	X	O		O	X	O	X		X	O		X	O	O	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O	O	O	
kosten	1500						100				150					150				150		400		150		300		200		200		200		200		200		2.950.000		

Legenda:

- lage kostenpost: < 50.000 euro
- middel lage kostenpost: 50.000 - 200.000 euro
- normale kostenpost: 200.000 - 500.000 euro
- substantiele kostenpost: 500.000 - 1.000.000 euro
- zeer grote kostenpost: > 1.000.000 euro

BIJLAGE IV Kostenonderbouwing

IV.1. Inleiding

In hoofdstuk 5 zijn de kosten van de verschillende overkappingconfiguraties gepresenteerd. De kosten van de totale configuratie zijn verkregen door de kosten van de verschillende onderdelen van de configuratie bij elkaar op te tellen. In deze bijlage wordt uitgebreid onderbouwd hoe de kosten van de verschillende onderdelen zijn vastgesteld.

Bij het bepalen van de kosten van de verschillende onderdelen van een overkapping, is gestreefd naar inzicht in de 'gemiddelde kosten' van de verschillende voorzieningen. De diverse experts die hiervoor zijn geraadpleegd gaven echter allemaal aan dat er niet zoiets bestaat als 'gemiddelde kosten'. Het realiseren van een overkapping is maatwerk en de uiteindelijke kosten zijn sterk afhankelijk van de concrete uitvoeringsvariant en de lokale omstandigheden. Desalniettemin is getracht om op basis van verschillende praktijkervaringen, kostenkennallen te formuleren. Omdat er echter nog geen lichte overkappingen zijn gerealiseerd, is er binnen dit onderzoek gebruik gemaakt van drie state-of-the-art tunnelprojecten. Het betreft de tunnel onder de Zuidas, de tunnel onder de A6/A9 en de nieuwe Coentunnel.

Voorafgaande aan de behandeling van de verschillende kostenposten in paragraaf IV.3. tot en met IV.6., wordt in paragraaf IV.2. een overzicht gegeven van de belangrijkste informatie uit deze drie tunnelprojecten. Paragraaf IV.3. geeft vervolgens inzicht in de kosten van de overkappingconstructie, paragraaf IV.4. behandelt de kosten van de schoorsteen. De kosten van het afzuig/ventilatiesysteem worden behandeld in paragraaf IV.5. en de kosten van het emissiezuiveringssysteem komen aan bod in paragraaf IV.6. De kosten van de veiligheidsvoorzieningen zijn reeds nader toegelicht in het hoofdstuk vier en bijlage III (veiligheid).

IV.2. Praktijksituaties

Het project Zuidas en het project A6/A9 staan beschreven in het onderzoeksrapport naar de verbetering van de luchtkwaliteit rondom ondergrondse bouwwerken³. De situatie rond de Coentunnel staat beschreven in 'Maatregelen ter bevordering van de luchtkwaliteit bij de Coentunnel'⁴.

IV.2.1. Project Zuidas

uitgangspunten

- 4 buizen à 3 rijstroken - 2 boven elkaar aan noord- /zuidzijde;
- overdekt gedeelte tunnel: 1500 meter;
- etmaal intensiteit Noordbaan: 97.150 mvt;
- etmaal intensiteit Zuidbaan: 93.550 mvt;
- oppervlakte vrije doorsnede per tunnelbuis: 64 m²;
- schoorsteenhoogte: 40 meter boven maaiveld (geïntegreerd in gebouw);
- minimum uitblaassnelheid: 15 m/s.

	eenheid	Rijsnelheid	
		50 km/h	80 km/h
luchtsnelheid in tunnel	m/s	5,4	6,8
luchtdebiet	m ³ /s	345	435
NO ₂ begin tunnelbuis	µg/m ³	35	35
NO ₂ eind tunnelbuis	µg/m ³	508	247
PM10 begin tunnelbuis	µg/m ³	37	37
PM10 eind tunnelbuis	µg/m ³	115	70

³ Meijnefeldt, drs. G. von; et al (2007); Verbetering luchtkwaliteit rondom ondergrondse bouwwerken, Deel A: Verkeerstunnels & Overkappingen, Deel B: Parkeergarages; COB-publicatienummer D10-07-05; juli 2007; Stichting COB, Gouda.

⁴ Huijben, ir. J.W. (2006); Maatregelen ter bevordering van de luchtkwaliteit bij de Coentunnel; Onderzoek naar het vermijden van te hoge emissie concentraties nabij de tunnelportalen; 16 oktober 2006; Rijkswaterstaat Bouwdienst, Delft.

omvang schoorsteen

Iedere verkeersbuis voor auto's zal aan de uitzijde worden voorzien van een ventilatieschacht, waarbij is aangenomen dat circa 70-80 procent van de door de verkeersbuis opgewekte luchtroom kan worden afgezogen. De vier schoorstenen worden geïntegreerd in de gebouwen die boven op de Zuidas worden gerealiseerd. Er is verondersteld dat de emissies op een hoogte van 40 meter boven maaiveld worden uitgestoten.

- aangehouden af te zuigen luchtdebiet per tunnelbuis: 270 m³/s (circa 75% van 345 m³/s);
- aangehouden af te zuigen luchtdebiet voor de gehele tunnel: 1080 m³/s;
- schacht: 270 m³/s / 15 m/s = 18 m² = 4,25 x 4,25 m.

De totale investeringskosten van de 4 geïntegreerde schoorstenen bedraagt circa 5 miljoen euro. Indien deze kosten gelijkmatig verdeeld kunnen worden over de 4 schoorstenen, dan zijn de investeringskosten voor één schoorsteen circa 1.250.000 euro.

uitvoeringsvariant 1

Alleen afzuiging aan de tunnelmondingen.

Ventilatoren per schoorsteen: 3 stuks

- 90 m³/s bij 800 Pa;
- rendement η 80 %;
- vermogen 90 kW.

- aanschaf ventilatoren inclusief besturing en techniekruimte (gehele tunnel): EUR 5.050.000
- energiekosten per jaar (gehele tunnel): EUR 390.000

uitvoeringsvariant 2

Afzuiging tunnelmondingen + elektrostatisch filter voor PM10.

Ventilatoren per schoorsteen: 3 stuks

- 90 m³/s bij 1050 Pa;
- rendement η 80 %;
- vermogen 120 kW;
- EP-Filter van Aigner (weerstand 250 Pa) is opgenomen bij ventilatoren.

- aanschaf ventilatoren inclusief besturing en techniekruimte (gehele tunnel): EUR 5.420.000
- aanschaf reinigingsinstallatie inclusief techniekruimte (gehele tunnel): EUR 5.900.000
- energiekosten per jaar (gehele tunnel): EUR 520.000

uitvoeringsvariant 3

Afzuiging tunnelmonding + elektrostatisch filter voor PM10 in combinatie met actief koolstoffilter voor NO₂.

Ventilatoren per schoorsteen: 3 stuks

- 90 m³/s bij 1650 Pa;
- Rendement η 80 %;
- Vermogen 120 kW;
- EP-Filter en koolstoffilter van FILTRONTEC (weerstand 850 Pa) is opgenomen bij ventilatoren.

- aanschaf ventilatoren inclusief besturing en techniekruimte (gehele tunnel): EUR 5.760.000
- aanschaf reinigingsinstallatie inclusief techniekruimte (gehele tunnel): EUR 16.100.000
- energiekosten per jaar (gehele tunnel): EUR 810.000

IV.2.2. Project A6/A9

uitgangspunten

- 2 buizen à 3 rijstroken;
- overdekt gedeelte tunnel circa 7500 meter;
- etmaal intensiteit: ca 151.000 mvt;
- oppervlakte vrije doorsnede tunnelbuis: 100 m²;
- maximale diepte boortunnel: 30 meter
- schoorsteenhoogte: 10 meter boven maaiveld;
- minimum uitblaassnelheid: 15 m/s.

	eenheid	Rijsnelheid	
		50 km/h	80 km/h
luchtsnelheid in tunnel	m/s	5,8	8,2
luchtdebiet	m ³ /s	580	820
NO ₂ begin tunnelbuis	µg/m ³	35	35
NO ₂ eind tunnelbuis	µg/m ³	1140	671
PM10 begin tunnelbuis	µg/m ³	37	37
PM10 eind tunnelbuis	µg/m ³	216	132

schoorsteen

Iedere verkeersbuis zal aan de uitzijde worden voorzien van een ventilatieschacht, waarbij is aangenomen dat circa 70-80 procent van de door de verkeersbuis opgewekte luchtroom kan worden afgezogen. Daarnaast zal de onbehandelde doorgaande luchtstroom worden gemengd met schoon aan te zuigen buitenlucht.

- aangehouden af te zuigen luchtdebiet per tunnelbuis: 440 m³/s (circa 75% van 580 m³/s);
- aangehouden af te zuigen luchtdebiet voor de hele tunnel: 880 m³/s;
- schacht: 440 m³/s / 15 m/s = 19 m² = 5,5 x 5,5 m.

De totale lengte van de schoorstenen is 40 meter waarvan 10 meter boven maaiveld. De twee schoorstenen zullen worden geïntegreerd in de gebouwen waarin zich ook de nooduitgangen bevinden. De totale investeringskosten van de ondergrondse schachten bedragen 2.2 miljoen euro en voor de bovengrondse schachten 2 miljoen euro.

uitvoeringsvariant 1

Alleen afzuiging van vervuilde lucht en inblaas van schone buitenlucht.

Ventilatoren afzuiging: 4 stuks

- 110 m³/s bij 1000 Pa;
- rendement η 80 %;
- vermogen 140 kW.

Ventilatoren inblaas: 4 stuks

- 110 m³/s bij 1000 Pa;
- rendement η 80 %;
- vermogen 140 kW.

- aanschaf ventilatoren inclusief besturing en techniekruimte (gehele tunnel): EUR 6040.000
- energiekosten per jaar (gehele tunnel): EUR 790.000

uitvoeringsvariant 2

Afzuiging tunnelmondning + elektrostatisch filter voor PM10 en inblaas van schone buitenlucht.

Ventilatoren afzuiging per tunnelbuis: 4 stuks

- 110 m³/s bij 1250 Pa;
- rendement η 80 %;
- vermogen 170 kW;
- EP-Filter van Aigner (weerstand 250 Pa) is opgenomen bij ventilatoren.

Ventilatoren inblaas per tunnelbuis: 4 stuks

- 110 m³/s bij 1000 Pa;
- rendement η 80 %;
- vermogen 140 kW.

· aanschaf ventilatoren inclusief besturing en techniekruimte (gehele tunnel):	EUR	6.250.000
· aanschaf reinigingsinstallatie inclusief techniekruimte (gehele tunnel):	EUR	5.700.000
· energiekosten per jaar (gehele tunnel):	EUR	890.000

uitvoeringsvariant 3

Afzuiging tunnelmondning + elektrostatisch filter voor PM10 + actief koolstoffilter voor NO₂ en inblaas van schone buitenlucht.

Ventilatoren afzuiging per tunnelbuis: 4 stuks

- 110 m³/s bij 1850 Pa;
- rendement η 80 %;
- vermogen 250 kW;
- EP-Filter en koolstoffilter van FILTRONTEC (weerstand 850 Pa) is opgenomen bij ventilatoren.

Ventilatoren inblaas per tunnelbuis: 4 stuks

- 110 m³/s bij 1000 Pa;
- rendement η 80 %;
- vermogen 140 kW.

· aanschaf ventilatoren inclusief besturing en techniekruimte (gehele tunnel):	EUR	6.460.000
· aanschaf reinigingsinstallatie inclusief techniekruimte (gehele tunnel):	EUR	8.400.000
· energiekosten per jaar (gehele tunnel):	EUR	1.130.000

IV.2.3. Coentunnel

uitgangspunten

- 2 buizen met 3+2+3 rijstroken;
- luchtsnelheid in de tunnel: 4 m/s (zonder langsventilatie bij normaal rijdend verkeer. Indien langsventilatie wordt ingeschakeld wordt de snelheid 8 m/s bij normaal rijdend verkeer);
- schoorsteen aan zuid- én noordkant;
- hoogte schoorsteen: 25 tot 30 meter;
- 70% van de vervuilde lucht kan worden afgezogen (400 m³/s voor beide tunnelbuizen tezamen);
- luchtsnelheid in schoorsteen: 15 tot 20 m/s;
- inwendige doorsnede schoorsteen: 25 m²;
- gebruik van aanjaag en afzuigventilatoren.

kosten

investering schoorsteen + ventilatietechniek (totaal):	EUR	50.000.000
energiekosten per jaar (bij continue inschakeling):	EUR	500.000

IV.3. De overkappingconstructie

De overkapping wordt op maaiveld geplaatst (weg op maaiveld). Hiervoor zijn geen bijzondere kunstwerken nodig. De kosten worden alleen bepaald door de kosten van de overkapping zelf.

In tabel IV.1 is weergegeven wat de kosten zijn van de verschillende overkappingen zoals die in fase 1 door verschillende bureaus zijn ontworpen. Uit deze tabel komt naar voren dat een overkapping van één kilometer op maaiveld grofweg rond de 10 miljoen euro kost.

Tabel IV.1. Kosten van overkappingen

ontwerper overkapping	type	kosten (euro/km)
DHV / NIO	Beton met lichte ribben	65.000.000
TU Eindhoven / Booghal	Stalen spanten met folie	6.000.000
Bosvariant / TNO	Glazen kas	7.000.000
Samenwerking CI etc	Aluminium constructie met doek	12.000.000
Lammerts van Bueren	Tent (excl deel opbouwkosten)	6.600.000
Movares	Koudgebogen glas	20.000.000
	gemiddelde	19.433.333
	gemiddelde - DHV	10.320.000
	gemiddelde - DHV & Movares	7.900.000

Indien een overkapping wordt geplaatst over een weg welke verdiept is aangelegd, kan er worden bespaard op wanden van de constructie. In het gunstigste geval hoeft alleen de dakconstructie te worden gerealiseerd. Er van uitgaande dat de dakconstructie de helft van de kosten van een volledige overkapping voor zijn rekening neemt, kost een overkapping over een verdiept liggende weg rond de 5 miljoen euro.

Een constructie die aansluit op een bestaande tunnelmond wordt deels op maaiveld geplaatst en deels boven een verdiept liggende weg. Daar waar het de verdiept liggende weg betreft kan materiaal worden uitgespaard. Daar staat tegenover dat er aanpassingen gemaakt moeten worden om de overkapping op de tunnel te laten aansluiten. Een overkapping die aansluit op een bestaande tunnelmond zal daarom in prijs niet veel afwijken van een overkapping op maaiveld.

In tabel IV.2. wordt een overzicht gegeven van de gemiddelde constructiekosten van de verschillende overkappingen.

Tabel IV.2. Kostenkennallen voor de overkappingconstructie

	kosten (mln €)
constructie op maaiveld	10
constructie over een verdiept liggende weg	5
constructie aansluitend op bestaande tunnelmond	10

IV.4. De schoorsteen/schoorstenen

De kosten van (de constructie van) een schoorsteen worden grotendeels bepaald door de hoeveelheid benodigd materiaal. De hoeveelheid benodigd materiaal wordt bepaald door de omvang van de schoorsteen.

omvang van een schoorsteen

De omvang van een schoorsteen wordt bepaald door de hoogte en de oppervlakte van de schoorsteen. De hoogte van de schoorsteen is reeds per configuratie vastgesteld en de doorsnede kan worden bepaald aan de hand van de hoeveelheid af te zuigen lucht in combinatie met de snelheid waarmee de lucht de schoorsteen moet verlaten. Deze uitstroomsnelheid is eveneens per configuratie vastgesteld.

De hoeveelheid af te zuigen lucht wordt op zijn beurt bepaald door het debiet in de overkapping. Dit is afhankelijk van de oppervlakte van de tunnelmond en de luchtsnelheid in de overkapping. De oppervlakte van de tunnelmond is gegeven. Voor de luchtsnelheid in de tunnel worden twee waarden gehanteerd te weten:

- situatie 1: 'normale' luchtsnelheid onder overkapping:
 - snelheid: 4 m/s;
 - debiet 1 tunnelbuis: 560 m³/s (2.000.000 m³/h);
 - debiet gehele overkapping: 1120 m³/s (4.000.000 m³/h);
- situatie 2: 'hoge' luchtsnelheid onder overkapping (als gevolg van langsventilatie):
 - snelheid: 7 m/s;
 - debiet 1 tunnelbuis: 980 m³/s (3.500.000 m³/h);
 - debiet gehele overkapping: 1960 m³/s (7.000.000 m³/h).

De schoorstenen bij de benoemde configuraties worden geacht in staat te zijn om 50 % van de emissievracht af te voeren. Dit betekent dat de schoorsteen van configuratie 3 50 % van de emissievracht moet afvoeren, dat de twee schoorstenen in configuratie 4 elk 25 % afvoeren en dat de vijf schoorstenen van configuratie 5 elk 10 % van de emissievracht afvoeren.

Tabel IV.3. geeft per configuratie inzicht in de benodigde schoorsteenomvang indien wordt uitgegaan van een luchtsnelheid onder de overkapping van 4 m/s (situatie 1) en tabel IV.4 geeft inzicht in de benodigde schoorsteenomvang indien wordt uitgegaan van een luchtsnelheid van 7 m/s (situatie 2). De benoemde diameter is de inwendige diameter van de schoorsteen. Uit deze overzichten blijkt dat de benodigde diameter van de schoorsteen per situatie sterk verschilt. De kleinste diameter is 4 meter en de grootste 35 meter. Het is niet waarschijnlijk dat er schoorstenen met een diameter van 35 meter worden gerealiseerd om de lucht te verspreiden Dit is namelijk bijna net zo breed als de gehele overkapping.

Tabel IV.3. Omvang schoorsteen bij een luchtsnelheid van 4 m/s (situatie 1)

	uitstroomsnelheid (m/s)	oppervlakte (m ²)	diameter (m)
configuratie 3	10	56	8
	5	112	12
	1	560	27
configuratie 4	10	28	6
	5	56	8
	1	280	19
configuratie 5	10	11	4
	5	22	5
	1	112	12

Tabel IV.4. Omvang schoorsteen bij een luchtsnelheid van 7 m/s (situatie 2)

	uitstroomsnelheid (m/s)	oppervlakte (m ²)	diameter (m)
configuratie 3	10	98	11
	5	196	16
	1	980	35
configuratie 4	10	49	8
	5	98	11
	1	490	25
configuratie 5	10	17	5
	5	34	7
	1	169	15

kosten van een schoorsteen

Gezien de voorgestelde lichte constructies van de verschillende ontwerpers is het niet waarschijnlijk dat een overkapping het gewicht van een schoorsteen kan dragen. De schoorsteen zal daarom rechtstreeks op het maaiveld geplaatst worden. De hoogte van de schoorsteen kan dus niet ingekort worden met de hoogte van de overkapping en er is wat betreft de kosten van een schoorsteen, geen verschil tussen verdiept aangelegde overkappingen en overkappingen op maaiveld.

De kosten voor één schoorsteen ten behoeve van de afzuiging van de emissies in de tunnel onder de Zuidas bedragen circa 1,25 miljoen euro. Deze schoorsteen is 40 meter hoog, heeft een oppervlakte van 18m² (diameter: 5 meter) en wordt geïntegreerd in bebouwing.

De totale kosten van de bovengrondse schachten bij de tunnel onder de A6/A9 bedragen 2 miljoen euro. Hiervan worden vier gebouwen gerealiseerd. Twee van die gebouwen worden uitgerust met zowel een noodtrappenhuis als een ventilatieschacht en twee gebouwen krijgen alleen een noodtrappenhuis. Op basis van deze informatie wordt aangenomen dat de kosten van één schoorsteen circa 750.000 euro bedragen. Deze schoorsteen is 10 meter hoog, heeft een oppervlakte van 19m² (diameter: 5 meter).

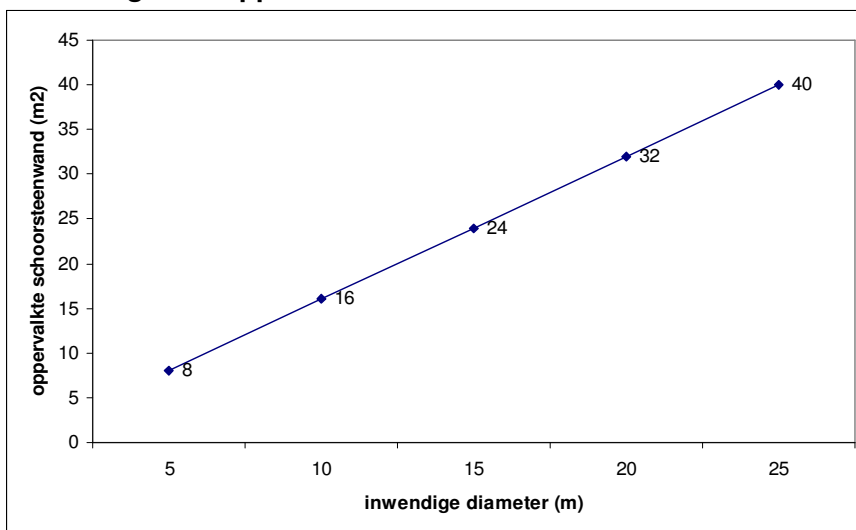
Op basis van de kosten van de schoorstenen bij de Zuidas (hoogte: 40 meter, diameter: 5 meter) en bij de A6/A9 (hoogte: 10 meter, diameter: 5 meter) zijn de kosten van een schoorsteen met een lengte van 20 meter en een schoorsteen met een lengte van 30 meter bepaald (tabel IV.5.). Hierbij is uitgegaan van een lineair verband tussen de hoogte en de kosten van een schoorsteen. De kosten zijn bepaald voor de 'normale' situatie waarbij er sprake is van een windsnelheid van 4 m/s.

Tabel IV.5. Kosten van een schoorsteen met inwendige diameter van 5 meter

hoogte (m)	kosten (mln €)
10	0,75
20	0,90
30	1,05
40	1,25

Er zijn geen concrete kostenramingen beschikbaar die inzicht geven in de kosten van schoorstenen met een diameter groter dan 5 meter. Om toch een inschatting te kunnen maken van deze kosten is gekeken naar de toename van het oppervlak van de schoorsteenwand als gevolg van de toename van de inwendige schoorsteendiameter. Afbeelding IV.1. geeft inzicht in de toename van de oppervlakte van de schoorsteenwand. Hierbij is uitgegaan van een schoorsteenwand van 1 meter breed.

Afbeelding IV.1. Oppervlakte van de schoorsteenwand



Uit afbeelding IV.1. komt duidelijk naar voren dat de er sprake is van een lineair verband. Ditzelfde lineaire verband is ook gebruikt om het kostenoverzicht voor de verschillende schoorstenen verder in te vullen (zie tabel IV.6.).

Tabel IV.6. Kosten van een schoorsteen met bij verschillende omvang (mln €)

hoogte (m)	diameter (m ²)				
	2-5	5-10	10-15	15-20	20-25
10	0,75	1,50	2,25	3,00	3,75
20	0,90	1,80	2,70	3,60	4,50
30	1,05	2,10	3,15	4,20	5,25
40	1,25	2,50	3,75	5,00	6,25

Aan de hand van het kostenoverzicht zoals weergegeven in tabel IV.6. kan per configuraties worden bepaald wat de kosten zijn voor de benodigde schoorstenen. Dit overzicht wordt gegeven in tabel IV.7.

Tabel IV.7. Kosten voor schoorstenen per configuratie

configuratie	aantal schoorstenen	uitstroomsnelheid (m/s)	diameter (m)	hoogte (m)	kosten één schoorsteen (mln €)	totale kosten (mln €)
3 a,b,c,d	1	10	8	20	1,8	1,8
e	1	5	12	20	2,7	2,7
f	1	1	27	20	4,5	4,5
g	1	10	8	10	1,5	1,5
h	1	10	8	30	2,1	2,1
i	1	10	8	40	2,5	2,5
4 a,b,c,d	2	10	6	20	1,8	3,6
e	2	5	8	20	1,8	3,6
f	2	1	19	20	3,6	7,2
g	2	10	6	10	1,5	3
h	2	10	6	30	2,1	4,2
i	2	10	6	40	2,5	5
j	2	5	8	10	1,5	3
5 a,b,c,d	5	10	4	10	0,75	3,75
e	5	5	5	10	0,75	3,75
f	5	1	12	10	1,5	7,5

Omdat de schoorsteen direct op maaiveld wordt aangelegd is geen verschil tussen de schoorstenen die geplaatst moeten worden op verdiept aangelegde overkappingen en schoorstenen die geplaatst moeten worden op overkappingen op maaiveld.

IV.5. Het afzuig- en ventilatiesysteem

De kosten van een afzuig- en ventilatiesysteem worden gevormd door de verschillende kostenposten. Hierbij moet gedacht worden aan:

- ventilatoren;
- geluidsdempers;
- besturingsinstallatie;
- techniekruimte;
- energiekosten.

De grootste kostenpost bij een afzuig- en ventilatiesysteem zijn de benodigde ventilatoren. De kosten van de ventilatoren worden beïnvloed door het type ventilator, door de hoeveelheid lucht die de ventilatoren moeten verplaatsen (m³/s) en door de drukverschillen. De energiekosten worden beïnvloed door de tijd dat de ventilatoren zijn ingeschakeld. De kosten voor afzuiging zijn dus niet afhankelijk van de hoeveelheid schoorstenen, noch van de karakteristieke knelpuntsituatie. Wel speelt de hoogte van

een schoorsteen nog een rol in relatie tot het verschil in luchtdruk maar dit valt buiten de scope van dit project.

De kostenkennallen voor een afzuig- en ventilatiesysteem zijn gebaseerd op de kosten van de systemen zoals benoemd binnen de projecten Zuidas en A6/A9 (zie paragraaf IV.2.). In tabel IV.9. staan de uitgangspunten en de kosten van het totale afzuig- en ventilatiesysteem voor de volledige tunnel. In deze tabel is tevens weergegeven wat het kost om bij een overkapping met een lengte van 1 kilometer, 1 m³/s af te zuigen. Deze investeringskosten per m³/s en energiekosten per m³/s zijn verkregen door de respectievelijk de investerings- en energiekosten te delen door de lengte van de tunnel. Dit resulteert in de energiekosten per kilometer overkapping. Dit bedrag is vervolgens gedeeld door het af te zuigen debiet per kilometer overkapping.

Tabel IV.9. Kosten en uitgangspunten bij de Zuidas en de A6/A9

		Zuidas	A6/A9
aantal tunnelbuizen	#	4	2
lengte overkapping	km	1,5	7,5
af te zuigen luchtdebiet per tunnelbuis	m ³ /s	270	440
af te zuigen luchtdebiet per overkapping	m ³ /s	1080	880
investeringskosten totale afzuig en ventilatiesysteem	EUR	5.050.000	6.040.000
energiekosten per jaar	EUR	390.000	790.000
investeringskosten per m ³ /s	EUR	4.676	6.864
energie kosten per m ³ /s	EUR	361	898

Op basis van de kosten voor de afzuiging bij de Zuidas en de A6/A9 kan worden vastgesteld dat de gemiddelde investeringskosten voor de afzuiging van 1 m³/s circa 5.700 euro per kilometer overkapping bedragen. De gemiddelde energiekosten bedragen circa 630 euro per jaar. Aangezien de voorgestelde overkapping bij een normale lichtsnelheid van 4 m/s een luchtdebiet heeft van 1120 m³/s, is er met de aanschaf van een afzuig- en ventilatiesysteem een bedrag gemoeid van circa 6,5 miljoen euro. De jaarlijkse energiekosten van 700.000 euro.

VI.6. Het emissiezuiveringssysteem

Bij het bepalen van de kosten van een emissiezuiveringssysteem spelen twee aspecten een belangrijke rol⁵ te weten de hoeveelheid lucht die behandeld moet worden (luchtdebiet) en de hoeveelheid emissie die moet worden afgevangen. De hoeveelheid emissie die moet worden afgevangen is bepalend voor de onderhoudskosten. Hoe meer emissie er gefilterd moet worden, hoe eerder de filters gereinigd of vervangen moeten worden. De hoeveelheid te behandelen lucht is bepalend voor de investeringskosten en de energiekosten. Hoe meer lucht er behandeld moet worden, hoe groter de capaciteit van het systeem moet zijn. Een systeem met een grotere capaciteit is duurder in aanschaf en verbruikt meer energie.

In fase 1 van het project overkappen en luchtbehandeling⁶ is reeds veel informatie verzameld over de principes en de werking van de verschillende emissiezuiveringssystemen (zie ook bijlage I). Informatie over de kosten is echter nauwelijks voorhanden. Dit wordt grotendeels veroorzaakt doordat de kosten in belangrijke mate afhankelijk zijn van de lokale situatie. De meest uitgebreide en daardoor bruikbare kostenraming is die van Camfill voor hun doekenfilter voor PM10 (2 varianten) en NO₂. Daarnaast is er inzicht in de kosten van het filtersysteem Ecco (PM10) van Aigner, van de Fujita plantenfilter (PM10 en NO₂) en van de fotokatalytische verf van het consortium Vogel-BAM. Binnen de projecten Zuidas en

⁵ Bron: telefonisch contact met de heer Noordmans van Camfill

⁶ Cornelissen, T. (2007). Overkappen van wegen en luchtbehandeling; een maatregel voor de luchtkwaliteit langs hoofdwegen; Eindrapport fase 1; juni 2007; Rijkswaterstaat Dienst Weg-en Waterbouwkunde, Delft.

A6/A9 wordt gebruik gemaakt van de systemen Ecco van Aigner en het CLAIR Filter systeem van FIL-TRONtec. De kosten van deze verschillende systemen staan hieronder toegelicht.

Camfill zakkenfilter

Het bedrijf Camfil is leverancier van zogenoemde zakkenfilters (www.zakkenfilter.nl). In fase 1 heeft Camfil in opdracht van Rijkswaterstaat een offerte opgesteld voor een fictieve situatie. De uitgangspunten hierbij waren:

- debiet omgevingslucht: 1.000.000 m³/h;
- concentratie PM10 aan tunnelmond: 1700 µg/m³;
- concentratie NO₂ aan tunnelmond: 400 µg/m³;
- bedrijfsuren per etmaal: 8 uur;
- rendement van de ventilator 60 %;
- kilowatturenprijs: 0,1 euro;
- afvoerkosten bedrijfsafval per 1000 kg: 165 euro.

De luchtreiniging is opgebouwd uit een tweetal filtratietrappen die in serie geplaatst worden:

1. deeltjes filtratie (zwevend stof);
2. moleculaire filtratie (hoofdbestanddeel NO₂).

PM10 optie 1: Tweetrapsfiltratiesysteem met Hi-Flo zakkenfilters met filterklasse F6 en F7

- aanschaf kast+systeem: EUR 200.000;
- exploitatiekosten per jaar (energie, vervanging filters, afvalkosten): EUR 246.260;
- benodigde ruimte: 3000 m³.

PM10 optie 2: Reverse pulssysteem (Hemipleat-cartridge) met filterklasse F9

- aanschaf kast+systeem: EUR 530.000;
- exploitatiekosten per jaar (energie, vervanging filters, afvalkosten): EUR 96.216;
- benodigde ruimte: 9600 m³.

NO₂: 2 rijen horizontaal geplaatste DCAF platen (Deep Cell Absorption filter)

- aanschaf kast+systeem: EUR 545.000;
- exploitatiekosten per jaar (energie, vervanging filters, afvalkosten): EUR 236.000;
- benodigde ruimte: 3000 m³.

Aigner Ecco

Producent Aigner brengt het systeem Ecco op de markt. Dit systeem filtert PM10 uit de lucht met behulp van een electrostatisch filter. Bij een luchtdebiet van 100 m³/s zijn van dit systeem de volgende kosten bekend.

- aanschaf systeem: EUR 116.000;
- energiegebruik filtersysteem per jaar: EUR 1.200;
- energiegebruik benodigde ventilatie per jaar: EUR 6.000
- reiniging filter per jaar: EUR 4.000;
- onderhoud per jaar (luchtdebiet: 100 m³/s): EUR 7.000.

De aanschaf van het Ecco systeem bij de Zuidas bedroeg EUR 5.900.000. De extra benodigde investering in ventilatie bedraagt EUR 370.000 en de extra kosten voor energie bedragen jaarlijks EUR 130.000. Bij de A6/A9 kost de aanschaf van het systeem EUR 5.700.000 en zijn de extra kosten voor ventilatie en energie respectievelijk EUR 210.000 en EUR 100.000.

Fujita plantenfilter

Het Fujita plantenfilter zuivert de lucht uit de tunnel door de vuile lucht af te zuigen en van onderen door een bak met aarde en vegetatie te leiden. Dit systeem wordt op kleine schaal in Japan toegepast. Van

dit systeem is bekend dat 1m² filter 100 m³ lucht per uur kan verwerken en dat 1m² filter EUR 2500 kost.

katalytische verf

De firma Global Engineering/HabitatSolutions BV is leverancier EcoPittura. Dit is een speciale verf die onder invloed van UV-licht in staat is NO_x af te breken. Deze verf kan in Nederland worden aangebracht door BAM Betontechnieken te Schiedam, dochteronderneming van BAM Civiel en Vogel te Zwijndrecht, behorend tot Joh. Mourik & Co. Holding. Hen is gevraagd een inschatting te maken van de benodigde kosten voor het aanbrengen en onderhouden van de verflaag en het benodigde UV-licht in een overkapping zoals beschreven in hoofdstuk 3. Een gedetailleerde kostenraming kon niet gegeven worden. Er kon slecht worden aangegeven dat er diverse scenario's mogelijk zijn en dat gerekend moet worden op een totaalbedrag tussen de 2 en de 5 miljoen euro voor een periode van 10 jaar.

FILTRONtec CLAIR Filter System

Het CLAIR Filter Systeem van FILTRONtec is gebaseerd op filtering van PM10 met behulp van een electrostatisch filter in combinatie met het gebruik van actieve koolstoffilter voor de absorptie van NO₂. De aanschaf van het CLAIR Filter systeem bij de Zuidas bedroeg EUR 16.100.000. De extra benodigde investering in ventilatie bedraagt EUR 710.000 en de extra kosten voor energie bedragen jaarlijks EUR 420.000. Bij de A6/A9 kost de aanschaf van het systeem EUR 8.400.000 en zijn de extra kosten voor ventilatie en energie respectievelijk EUR 420.000 en EUR 340.000.

Tabel IV.10. geeft een overzicht van de investeringskosten en de jaarlijkse kosten van de verschillende systemen. Ook is aangegeven wat het luchtdebiet is dat door de leveranciers van de systemen als uitgangspunt is gebruikt bij het bepalen van de gepresenteerde kosten. Met behulp van een schalingsfactor worden de kosten van de verschillende systemen vertaald naar de situatie waarin een luchtdebiet van 1120 m³/s moet worden verwerkt. Hierbij is verondersteld dat zowel de kosten voor aanschaf, energiegebruik en onderhoud lineair afhankelijk zijn van het te verwerken luchtdebiet. In werkelijkheid ligt dit veel gecompliceerder maar dit valt buiten de scope van dit project. De schalingsfactor is verkregen door het te verwerken luchtdebiet (1120 m³/s) te delen door het gehanteerde luchtdebiet.

Tabel IV.10. Kosten verschillende zuiveringssystemen

	reiniging van	kosten volgens opgaaf		luchtdebiet	schalingsfactor	kosten bij luchtdebiet 1120 m ³ /s	
		investering	jaarlijks			investering	jaarlijks
		EUR	EUR			EUR	EUR
Camfill PM10 optie 1	PM10	200.000	246.260	275	4,1	814.545	1.002.950
Camfill PM10 optie 2	PM10	530.000	96.216	275	4,1	2.158.545	391.862
Camfill NO ₂	NO ₂	545.000	236.000	275	4,1	2.219.636	961.164
Aigner Ecco	PM10	116.000	18.200	200	5,6	649.600	101.920
Aigner bij Zuidas	PM10	6.270.000	130.000	1080	1,0	6.502.222	134.815
Aigner bij A6/A10	PM10	5.910.000	100.000	880	1,3	7.521.818	127.273
Fujita plantenfilter	NO ₂ + PM10	9.000.000		100	11,2	100.800.000	
FILTRONtec bij Zuidas	NO ₂ + PM10	16.810.000	420.000	1080	1,0	17.432.593	435.556
FILTRONtec bij A6/A10	NO ₂ + PM10	16.520.000	340.000	880	1,3	21.025.455	432.727
Katalytische verf	NO _x					2.000.000	200.000

Bij het benoemen van de verschillende overkappingsconfiguraties is er uitgegaan van een systeem dat in staat is zowel NO₂ als PM10 te zuiveren. Dit betekent dat er twee mogelijkheden zijn. Of de overkapping wordt uitgerust met een systeem dat in staat is beide stoffen te zuiveren of de overkapping wordt uitgerust met twee aparte systemen die elk één van de twee stoffen kunnen zuiveren. Indien het systeem van de Fujita plantenfilter buiten beschouwing wordt gelaten dan blijkt dat de aanschaf van een systeem dat zowel NO₂ als PM10 kan zuiveren circa 20 miljoen euro kost. De jaarlijkse kosten zijn dan circa 430.000 euro.

Een systeem dat NO₂ kan zuiveren kost zo'n 2 miljoen euro waarbij de jaarlijkse kosten bijna een miljoen euro bedragen. De investeringskosten en jaarlijkse kosten voor een systeem voor PM10 vertonen grote verschillen. Indien de kosten van het Camfill systeem optie 1 en het Aigner systeem zoals opgegeven door de leverancier buiten beschouwing worden gelaten, kunnen de gemiddelde investeringskosten voor een systeem voor PM10 worden geschat op circa 5 miljoen euro. De jaarlijkse kosten kunnen worden geschat op 200.000 euro. De aanschaf van de twee losse systemen samen kost dan circa 7 miljoen euro en de jaarlijkse kosten bedragen 1,2 miljoen euro.

Er blijkt dus een groot verschil te bestaan tussen de kosten(opbouw) van twee losse systemen en die van een integraal systeem (tabel IV.11.). Als echter wordt gekeken naar de life cycle kosten voor een periode van 10 jaar, dan blijkt dat de kosten wel min of meer dezelfde orde van grootte hebben. Er is daarom besloten om de kosten van een 'gemiddeld' zuiveringssysteem vast te stellen op basis van het rekenkundig gemiddelde van 'een integraal systeem' en 'twee losse systemen'. De investeringskosten bedragen in dit geval 13 miljoen euro en de jaarlijkse kosten 0,8 miljoen.

Tabel IV.11. Kosten van een 'gemiddeld' zuiveringssysteem voor NO₂ en PM10

	investeringskosten	jaarlijkse kosten	life cycle kosten
	mln €	mln €	mln €
integraal systeem	20	0,4	24
twee losse systemen	7	1,2	19
'gemiddeld systeem'	13	0,8	21

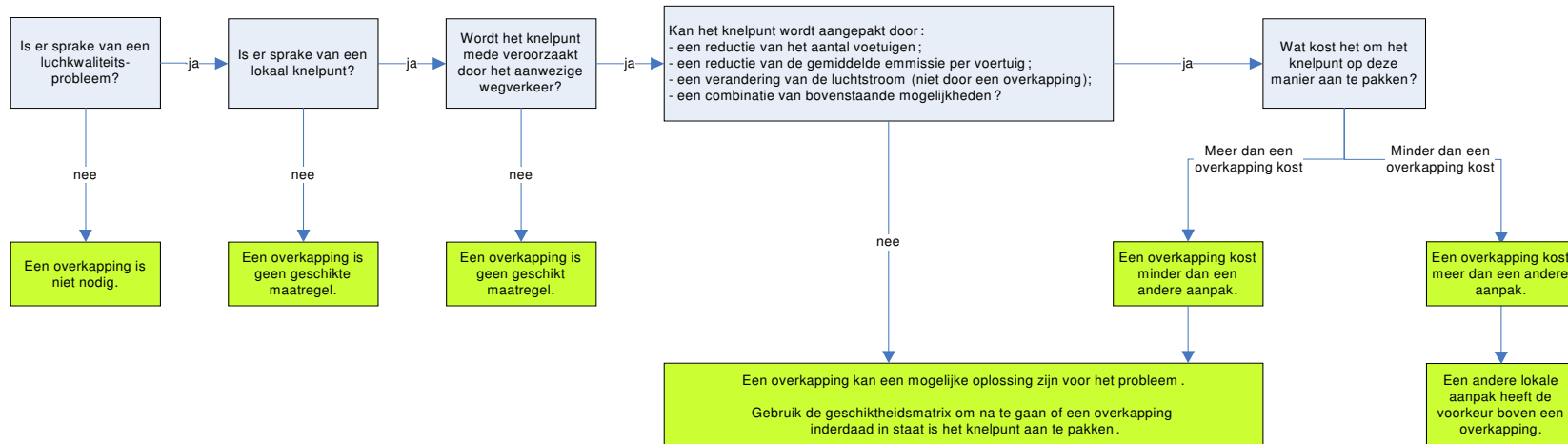
De kosten zoals weergegeven in tabel IV.11. hebben betrekking op een hoog percentage (95 %) afvang. De kosten voor de systemen met een gemiddeld afvangpercentage (80 %) en een laag afvangpercentage (50 %) liggen lager dan die van een systeem met een hoog afvangpercentage. Zoals reeds aangegeven is de hoeveelheid af te vangen emissie met name van invloed op de jaarlijkse kosten en niet zozeer op de investeringskosten.

In tabel IV.12. wordt weergegeven wat de investeringskosten en de jaarlijkse kosten zijn in relatie tot de hoeveelheid af te vangen emissie. De kosten voor het gemiddelde en het lage afvangpercentage zijn ingeschat door een vast bedrag af te trekken van het bedrag zoals berekend voor het hoge afvangpercentage.

Tabel IV.12. Kosten in relatie tot het afvangpercentage

	hoog afvangpercentage	gemiddeld afvangpercentage	laag afvangpercentage
investeringskosten (mln €)	13	12,5	12
jaarlijkse kosten (mln €/ jaar)	0,8	0,7	0,6

BIJLAGE V Beslisboom



BIJLAGE VI Beoordelingsmatrix

1. Volledig gesloten overkapping basisvariant: - geen luchtbehandeling.	a	basisvariant
	b	met hoog percentage afvang NO ₂ en PM10
	c	met midden percentage afvang NO ₂ en PM10
	d	met laag percentage afvang NO ₂ en PM10

Binnenstedelijk			
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-29%	-16%	12	0
63%	58%	0	
2,4	1,3	12	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-16%	25	0
27%	27%	1	
0,9	0,5	33	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-16%	25	0
33%	32%	1	
0,9	0,5	32	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-29%	-16%	24	0
44%	42%	1	
1,0	0,5	30	

Buitenstedelijk			
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-17%	12	0
33%	33%	0	
2,6	1,5	12	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-18%	25	0
11%	14%	1	
0,9	0,6	33	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-18%	24	0
15%	17%	1	
1,0	0,6	31	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-17%	24	0
22%	23%	1	
1,0	0,6	30	

Verdiepte ligging			
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-29%	-16%	10	-
141%	125%	0	
2,9	1,6	10	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-29%	-16%	23	-
70%	62%	1	
0,9	0,5	31	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-29%	-16%	22	-
81%	72%	1	
1,0	0,5	29	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-29%	-16%	21	-
104%	92%	1	
1,0	0,6	28	

Bestaande tunnelmond			
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
Basisvariant niet van toepassing			
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-1%	0%	30	-
-30%	-28%	1	
0,0	0,0	38	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-1%	0%	29	-
-25%	-24%	1	
0,0	0,0	36	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-1%	0%	29	-
-16%	-15%	1	
0,0	0,0	35	

2. Overkapping met een sleuf in het dak basisvariant: - geen luchtbehandeling.	a	basisvariant
--	---	--------------

Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-16%	12	0
25%	26%	0	
2,5	1,3	12	

Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-18%	11	0
10%	13%	0	
2,6	1,6	11	

Niet van toepassing			
---------------------	--	--	--

Niet van toepassing			
---------------------	--	--	--

3. Overkapping met in het midden een schoorsteen basisvariant: - 20 meter boven maaiveld; - uitstroomsnelheid 10 m/s; - geen luchtbehandeling.	a	basisvariant
	b	met hoog percentage afvang NO ₂ en PM10
	c	met midden percentage afvang NO ₂ en PM10
	d	met laag percentage afvang NO ₂ en PM10
	e	met een uitstroomsnelheid van 5 m/s
	f	met een uitstroomsnelheid van 1 m/s
	g	met een 10 meter lagere schoorsteen
	h	met een 10 meter hogere schoorsteen
	i	met een 20 meter hogere schoorsteen

Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-16%	14	-
26%	26%	0	
2,1	1,1	14	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-16%	33	-
26%	26%	2	
0,6	0,3	49	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-16%	33	-
26%	26%	2	
0,6	0,3	48	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-16%	32	-
26%	26%	1	
0,6	0,3	46	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-16%	21	-
26%	26%	1	
1,0	0,6	29	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-16%	23	-
26%	26%	1	
1,0	0,5	31	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-16%	20	-
26%	26%	1	
1,1	0,6	28	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-16%	21	-
26%	26%	1	
1,0	0,6	29	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-16%	21	-
26%	26%	1	
1,0	0,6	29	

Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-31%	-18%	13	-
10%	13%	0	
2,3	1,3	13	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-18%	33	-
10%	13%	2	
0,6	0,4	49	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-31%	-18%	32	-
10%	13%	2	
0,6	0,4	47	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-31%	-18%	32	-
10%	13%	1	
0,7	0,4	46	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-31%	-18%	21	-
10%	13%	1	
1,1	0,6	29	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-31%	-18%	23	-
10%	13%	1	
1,4	0,8	23	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-31%	-18%	20	-
10%	13%	1	
1,1	0,6	28	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-18%	20	-
10%	13%	1	
1,1	0,6	28	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-18%	21	-
10%	13%	1	
1,1	0,6	28	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-18%	21	-
10%	13%	1	
1,1	0,6	29	

Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-29%	-16%	12	-
66%	59%	0	
2,5	1,4	12	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-29%	-16%	31	-
66%	59%	2	
0,6	0,3	47	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-29%	-16%	30	-
66%	59%	2	
0,6	0,3	45	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-29%	-16%	30	-
66%	59%	1	
0,7	0,4	44	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-29%	-16%	19	-
66%	59%	1	
1,1	0,6	27	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-29%	-16%	21	-
66%	59%	1	
1,0	0,6	29	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-29%	-16%	18	-
66%	59%	1	
1,1	0,6	26	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-29%	-16%	18	-
66%	59%	1	
1,1	0,6	26	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-29%	-16%	19	-
66%	59%	1	
1,1	0,6	27	

Niet van toepassing			
---------------------	--	--	--

4. Overkapping met aan beide tunnelmonden een schoorsteen basisvariant: - 20 meter boven maaiveld; - uitstroomsnelheid 10 m/s; - geen luchtbehandeling.	a	basisvariant
	b	met hoog percentage afvang NO ₂ en PM10
	c	met midden percentage afvang NO ₂ en PM10
	d	met laag percentage afvang NO ₂ en PM10
	e	met een uitstroomsnelheid van 5 m/s
	f	met een uitstroomsnelheid van 1 m/s
	g	met een 10 meter lagere schoorsteen
	h	met een 10 meter hogere schoorsteen
	i	met een 20 meter hogere schoorsteen
	j	met een 10 meter lagere schoorsteen i.c.m. een uitstroomsnelheid van 5 m/s

Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-16%	16	-
26%	26%	0	
1,9	1,0	16	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-16%	35	-
26%	26%	2	
0,6	0,3	51	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-16%	35	-
26%	26%	2	
0,6	0,3	50	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-16%	34	-
26%	26%	1	
0,6	0,3	48	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-29%	-16%	22	-
26%	26%	1	
1,0	0,5	30	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-29%	-16%	26	-
26%	26%	1	
0,9	0,5	34	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-29%	-16%	22	-
26%	26%	1	
1,0	0,5	30	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-16%	23	-
26%	26%	1	
1,0	0,5	31	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-16%	24	-
26%	26%	1	
0,9	0,5	32	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-29%	-16%	22	-
26%	26%	1	
1,0	0,5	30	

Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-18%	15	-
10%	13%	0	
2,0	1,2	15	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-18%	35	-
10%	13%	2	
0,6	0,3	51	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-18%	34	-
10%	13%	2	
0,6	0,4	49	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-18%	34	-
10%	13%	1	
0,6	0,4	48	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-18%	22	-
10%	13%	1	
1,0	0,6	30	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-18%	22	-
10%	13%	1	
1,0	0,6	30	
Effect NO ₂	Effect PM10	Kosten	Veiligheid
-30%	-18%	23	-
10%	13%	1	
1,0	0,6	31	
Effect NO ₂	Effect PM10		