Verspreiding: Beperkt

Eindrapport

Luchtkwaliteitsmodellering Ringland

Bino Maiheu, Stijn Vranckx, Wouter Lefebvre en Stijn Janssen

Studie uitgevoerd in opdracht van Stramien cvba en Ring genootschap vzw
2015/RMA/R/13

April 2015

VITO NV
Boeretang 200 - 2400 MOL - BELGIE
Tel. + 32 14 33 55 11 - Fax + 32 14 33 55 99
vito@vito.be - www.vito.be

BTW BE-0244.195.916 RPR (Turnhout)
Bank 375-1117354-90 ING
BE34 3751 1173 5490 - BBRUBEBB

Alle rechten, waaronder het auteursrecht, op de informatie vermeld in dit document berusten bij de Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek NV ("VITO"), Boeretang 200, BE-2400 Mol, RPR Turnhout BTW BE 0244.195.916. De informatie zoals verstrekt in dit document is vertrouwelijke informatie van VITO. Zonder de voorafgaande schriftelijke toestemming van VITO mag dit document niet worden gereproduceerd of verspreid worden noch geheel of gedeeltelijk gebruikt worden voor het instellen van claims, voor het voeren van gerechtelijke procedures, voor reclame of antireclame en ten behoeve van werving in meer algemene zin aangewend worden

SAMENVATTING

In dit rapport worden de belangrijkste resultaten samengevat van het onderzoek dat VITO uitvoerde naar de impact van Ringland op de luchtkwaliteit. In een eerste deel hebben we onderzocht hoe de kwaliteit van de lucht aan de tunneluitgangen wordt bepaald. Daarbij hebben ook bekeken wat de huidige kennis is rond filtersystemen in tunnels. In een tweede deel hebben we deze informatie gebruikt om een volledige kaart voor Antwerpen te maken en het effect na te gaan van Ringland op de luchtkwaliteit.

Tunnels en luchtkwaliteit

In verkeerstunnels zal de concentratie van luchtvervuiling gestaag toenemen vanaf de ingang. Dit komt omdat het doorrijdende verkeer voortdurend emissies toevoegt aan de aanwezige luchtstroom in de tunnel. Bij tunnelportalen wordt er telkens een fractie, of op het einde van de tunnel de totale uitstoot, vrijgegeven in de atmosfeer. Hierdoor ontstaan aan tunnelportalen verhoogde concentraties.

De concentraties in verkeerstunnels worden door twee factoren bepaald: de luchtstroom in de tunnel en de uitstoot door het verkeer. Onder normale omstandigheden wordt de luchtstroom in de tunnel in grote mate door het verkeer zelf opgewekt door een aanzuig- of 'piston'-effect. Typisch vind men een stroomsnelheid die ongeveer 1/3 is van de rijsnelheid van het verkeer (Chen et al., 1998). Dit zorgt voor grote debieten in een tunnel. In geval van verkeersopstopping wordt deze "natuurlijke" ventilatie meestal een handje geholpen door ventilatoren die een stroming induceren en ervoor zorgen dat de concentratie van luchtverontreiniging in de tunnel zelf niet al te hoog oploopt.

Voor het bepalen van de verliezen aan de verschillende uitritten in het Ringland tunnelcomplex, heeft VITO een tunnelmodel opgezet. Hierin worden de dimensies (hoogte, breedte, lengte) van de verschillende tunnelsegmenten in rekening genomen samen met de samenstelling en intensiteit van het verkeer en de weerstand t.g.v. wrijving met de tunnelwanden. Op basis van dit tunnelmodel wordt bij elke uitrit de verhouding ingeschat tussen het debiet dat de tunnel verlaat en het doorgaande debiet. Op die manier zal de totale uitstoot van het verkeer dat zich in de tunnel bevindt, herverdeeld worden naar de verschillende tunnelportalen. De tabel hieronder geeft aan wat de fractie is van de totale emissies onder Ringland die bij de verschillende portalen vrijkomen.

Wanneer de verhoogde concentraties terug vrijkomen in de atmosfeer, treedt verdunning op waardoor het effect van tunnelmonden meestal beperkt blijft tot een paar 100m (Huijben and Rangelrooij, 2011). Hierbij zijn o.a. de intensiteit van de luchtstroom uit de tunnel, de zgh. 'jet', de oriëntatie t.o.v. de overheersende windrichting, de vorm van het tunnelportaal maar ook de inrichting van de omgeving bepalend.

Tabel 1 : Fractie van de totale emissie onder Ringland die aan de uitritten/portalen vrijkomt.

Uitrittencomplex	Fractie totaal
Kennedytunnel West	14.6%
Scheldekaaien	3.6%
Antwerpen Zuid	5.6%
A12 JDV Noord	0.3%
A12 JDV1 Zuid	5.1%
E19 Craeybeckx-Noord	1.0%
E19 Craeybeckx-Zuid	10.1%
Singel	1.5%
Berchem Kerk	2.9%
Berchem Station	2.6%
Plantin Moretus	7.1%
E313 Rivierenhof	15.7%
Sportpaleis	5.0%
Groenendaal	3.9%
Antwerpen Noord	21.0%

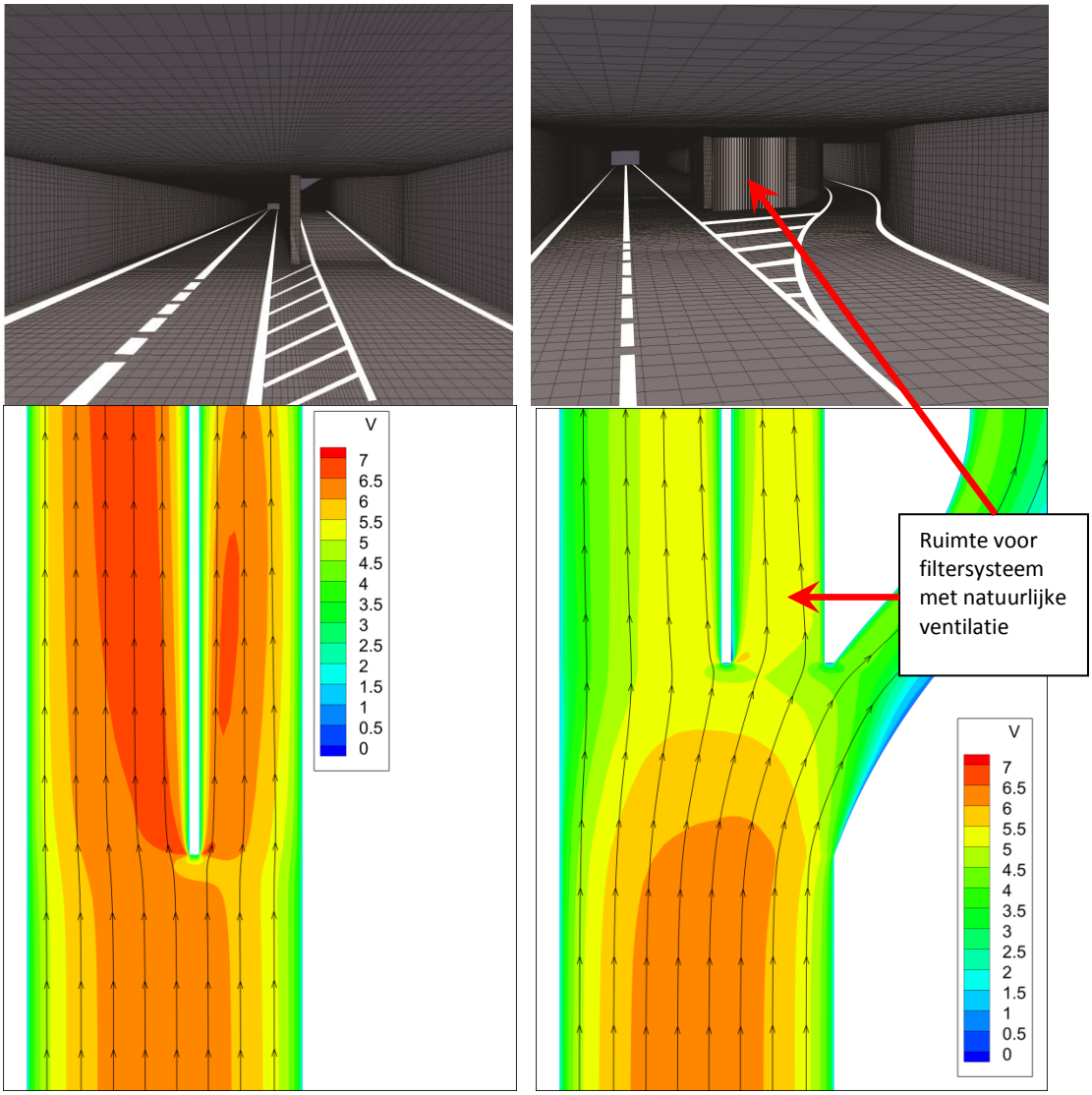
Maatregelen ter verbetering van de luchtkwaliteit rond tunnelmonden

Uiteraard begint het verbeteren van de luchtkwaliteit in eerste plaats bij het aanpakken van de bron. Een optimalisatie van de verkeersstromen kan reeds gevoelig de luchtkwaliteit verbeteren (PIARC, 2008). De locaties van de uitritten bepalen vervolgens waar verhoogde concentraties zullen optreden. Deze locaties kunnen geoptimaliseerd worden in functie van de bevolkingsdichtheid in de onmiddellijke omgeving en de bestemming van het gebied. Voor het reduceren van de concentraties aan tunnelportalen zelf, kunnen verschillende pistes bewandeld worden. Hierbij dienen naast gezondheid ook een aantal criteria zoals kostenefficiëntie, energieverbruik en tunnelveiligheid in rekening gebracht te worden. We onderscheiden hierbij maatregelen in de tunnel zelf en maatregelen aan de tunnel portalen.

Maatregelen in de tunnel zelf

- De geometrie van de uitritten speelt een rol. In het VITO onderzoek is vastgesteld dat voor het beperken van de verliezen aan de verschillende op- en afritcomplexen, laterale uitritten te verkiezen zijn boven frontale uitritten. Bij een laterale uitrit waarbij één rijstrook de tunnel zijdelings verlaat, blijven de afmetingen van de tunnel na een afrit gelijk aan de afmetingen voor de afrit. Hierdoor blijft de doorgaande volumestroom ook beter bewaard en worden de verliezen via de laterale uitrit beperkt. Dit wordt aangegeven in Figuur 1 waarin de windsnelheid voor beide situaties wordt aangegeven. De windsnelheid in de laterale uitgang is veel lager dan in de frontale uitgang. Een frontale uitrit zorgt typisch voor een verlies van 30% van de vervuilde tunnellucht (bij twee doorgaande rijstroken) terwijl dit in een laterale uitrit beperkt kan worden tot 15%. Deze oplossing biedt bovendien de mogelijkheid om in de tunnel net achter/naast de uitrit een ruimte te voorzien voor filtersystemen. Het filtersysteem kan hierbij profiteren van de natuurlijke

ventilatie in de tunnel wat de exploitatiekost van de filter ten goede zal komen (zie ook verder).



Figuur 1 : Visualisatie van een frontale (boven, links) en laterale (boven, rechts) tunneluitgang. Windsnelheid (in m/s) voor een frontale uitrit (onder, links) en een laterale uitrit (onder, rechts). Bij de laterale uitrit kan mogelijk ruimte voor filter systemen gecreëerd worden.

- Een andere mogelijkheid is het actief filteren van de lucht. Onder laboratorium condities is het zo dat met bestaande filtertechnieken een hoog rendement gehaald kan worden. Zo is er in de Plabutschtunnel in Oostenrijk in een kleinschalig experiment aangetoond dat m.b.v. een elektrostatisch filtersysteem tot 90 % van het fijn stof kan gezuiverd worden (FVT, 2010). Een grootschalig experiment gedurende 18 maanden in Sydney, Australië, leert dat in de praktijk een efficiëntie van 55 tot 65 % gehaald worden (AMOG (Roads and Maritime Services NSW), 2012). Momenteel wordt de techniek in de praktijk echter relatief weinig toegepast, omwille van de hoge bijhorende exploitatiekosten. Toch wordt nog actief verder gewerkt aan een nieuwe innovatieve filter technieken die niet selectief zijn en/of betere efficiëntie hebben.

Zoals hoger geschetst, biedt de laterale uitrit de mogelijkheid om een technische ruimte te voorzien voor filtertechnologie die ten dele kan functioneren op de natuurlijke ventilatie van de tunnel. VITO rekende een scenario door waarbij verondersteld werd dat ter hoogte van elke afrit een deel van het doorgaande debiet in de tunnel kan worden gefilterd. Hierbij werd een filterefficiëntie van 65% gehanteerd en kan, afhankelijk van het uitritcomplex, 1/2 tot 1/5 van de doorgaande lucht worden behandeld.

Maatregelen aan de portalen

Ook aan de tunnelportalen kunnen een aantal maatregelen genomen worden ter verbetering van de luchtkwaliteit.

- Zo kan in de nabijheid van een tunnelportaal een afzuigventilator geplaatst worden. Vervuilde lucht wordt uit de tunnel afgezogen en via een schoorsteen op hoogte naar buiten gebracht. Hierdoor wordt de verontreiniging sterk verdund vooraleer die aan de grond komt. Afzuiging heeft overigens ook zijn nut bij brand in de tunnel. Uit praktijkvoorbeelden blijkt wel dat het afzuigen van substantiële tunneldebieten zeer veel energie vergt. Een regelsysteem kan er wel voor zorgen dat de installatie slechts in en uitgeschakeld wordt wanneer nodig.

- Het is geweten dat het plaatsten van schermen langs drukke wegen een positief effect heeft op de luchtkwaliteit (Heist et al., 2009; Hooghwerff et al., 2009). Uit windtunnel onderzoek van TNO in Nederland is gebleken dat het plaatsen van schermen aan tunnelmonden vergelijkbare resultaten (op concentratieniveau) kan geven als afzuiging (Huijben and Rangelrooij, 2011). Meer innovatieve maatregelen zoals tunnelmonden met schoepen of emissiedaken zijn wel minder effectief dan gedacht.

- Voor de portalen op het einde van de tunnels kunnen we ook werken met verschoven uitgangen. In het Ringland concept zijn er immers twee tunnelsystemen per rijrichting. Het verschuiven van de uitrit van beide tunnelbuizen heeft als gevolg dat niet alle emissies op dezelfde locatie worden vrijgegeven, waardoor de concentraties niet zo hoog oplopen.

Deze lijst van maatregelen is uiteraard niet volledig. Het is ook zo dat het gebruik van actieve maatregelen zoals filteren of afzuiging hogere installatie en exploitatiekosten met zich mee brengen dan passieve maatregelen. In een finaal ontwerp dient dan ook een afweging in een breder kader te gebeuren van wat efficiënt en wenselijk is.

Welke effecten heeft Ringland op de Antwerpse luchtkwaliteit ?

Ringland stelt voor om de Antwerpse Ring te overkappen en op te splitsen in een stedelijke-ringweg (SRW) en doorgaande-ringweg (DRW). Ook de singel wordt gewijzigd en krijgt een nieuwe locatie op het dak van de ring. Een aandeel van het singel-verkeer verdwijnt eveneens in het tunnelcomplex. Door deze overkapping komen de verkeersemissies niet rechtstreeks in de buitenlucht. Op basis van de detailmodellering van de in- en uitritcomplexen kunnen we bepalen wat de invloed van Ringland zal zijn op de luchtkwaliteit langs het volledige traject.

Hoe is dit onderzocht ?

Luchtkwaliteitsberekeningen startten van de **verkeersintensiteiten** op de Antwerpse wegen zoals berekend door het Vlaams Verkeercentrum. De mobiliteitscijfers van het Oosterweel-Noord scenario, één van de scenario's uit PlanMER Oosterweel, vormden het startpunt. Voor dit scenario zijn door het Leuvense mobiliteitsbureau VECTRIS de verkeersstromen op de ring opgesplitst tussen de stedelijke-ringweg en de doorgaande-ringweg. Ten tweede werd de singel naar de nieuwe locatie op het dak van de ring verplaatst en werd 50% van de verkeersintensiteit van de singel naar de stedelijke ringweg verschoven. Bijkomend duikt tussen Berchem Kerk en de Borsbeekbrug en Plantin-Moretus en het Sportpaleis de bovengrondse singel mee de SRW tunnels in, zodat de volledige verkeersstroom in deze twee zones overkapt wordt.

De **verkeersemissies** werden berekend vanaf de verkeersintensiteiten met het officiële Vlaamse verkeersemissiemodel MIMOSA voor **2020.** Er werd hierbij gewerkt met de Vlaamse prognoses voor samenstelling van het wagenpark. Dit resulteerde in emissies over het wegennetwerk in Antwerpen en omgeving. Deze emissiegegevens werden in een volgende stap aangepast voor de bestaande en geplande **tunnels** en bruggen. Voor eenvoudige tunnels werden de emissies verdeeld over de tunnelmonden. Bij bruggen werd de exacte hoogte aan de emissies toegekend. Het Ringland ontwerp is complexer omdat dit op- en afritten en splitsing van de tunnels omvat. De resultaten van her Ringland tunnelmodel werden gebruikt voor een gedetailleerde berekening van de emissies die bij elke afrit en tunnelmond vrijkomen. Hierbij werden de afrit- en tunneldimensies, de verkeersvolumes aan personenwagens, lichte vracht en zwaar verkeer in de tunnel en op de afrit in rekening gebracht. De uitstoot per op- en afritcomplex is weergegeven in Tabel 1.

Het **luchtkwaliteitsmodel** startte vervolgens van de emissies aangepast voor tunnels, bruggen en eventueel filtersystemen. Dit model koppelt een hoge-resolutie berekening van de verspreiding van de verkeersemissies met achtergrondconcentraties en een bijdrage ten gevolge van het 'street canyon' effect. De achtergrondconcentraties omvatten alle andere bronnen van polluenten dan de lokale verkeersemissies. 'Street canyons' zijn straten met aaneengesloten bebouwing waar er minder ventilatie en aanvoer van verse lucht is. De luchtkwaliteit wordt voor een volledig jaar berekend voor zowel **fijn stof** (PM_{10}, $PM_{2.5}$), **roet** (elementair koolstof of EC) en **NO_2**. De resultaten werden geanalyseerd op **jaargemiddelde concentratiekaarten voor 2020**.

Dit is dezelfde methodologie als toegepast in de PlanMER Oosterweelverbinding en andere studies voor de Vlaamse Overheid. Uitgebreide documentatie is te vinden op de ATMOSYS webpagina (www.atmosys.eu) onder expertise – high resolution modelling.

Wat is bestudeerd ?

Drie scenario's zijn bestudeerd: Oosterweel-Noord als referentie, Ringland en Ringland met filterinstallaties. In het scenario met luchtfilters werd op 25 locaties in het tunnelcomplex, waar een afrit de tunnels verlaat, de doorgaande luchtstroom gezuiverd. Er wordt hierbij een in de praktijk aangetoonde filterefficiëntie van 65% aangenomen. Aangezien telkens slechts een deel van de tunnellucht kan worden behandeld, varieert de zuiveringsgraad per locatie van 0.13 tot 0.33. In totaal werden 17 % en 32% van de emissies verwijderd in respectievelijk de DRW en SRW tunnels.

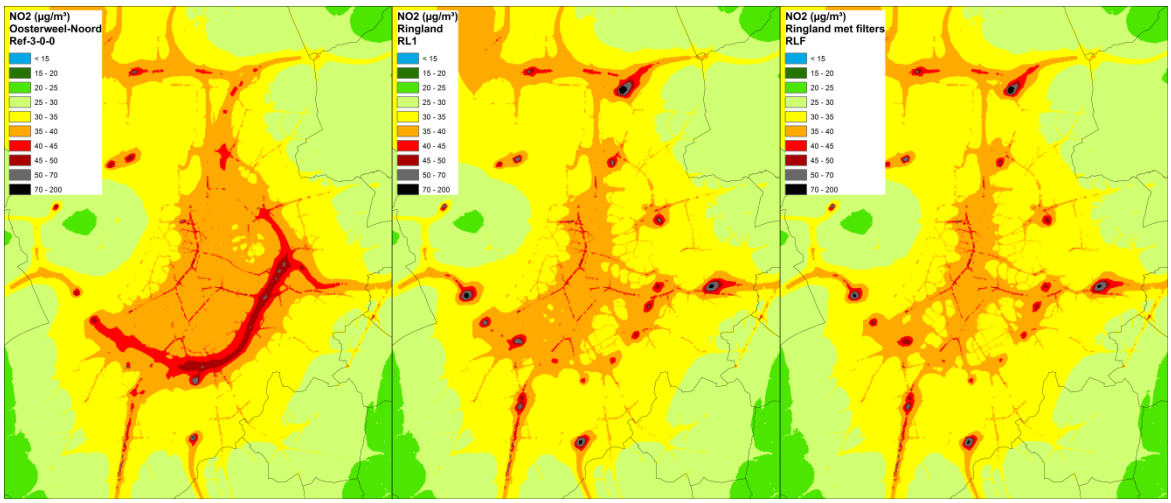
Resultaten

Het tunnelcomplex van Ringland verplaatst de emissies van de Antwerpse ring en een groot deel van de singel naar de tunnelmonden en de afritten van het tunnelcomplex. Twee derde van de emissies verlaat de tunnels via de tunnelmonden (Kennedytunnel, Jan De Vostunnel,

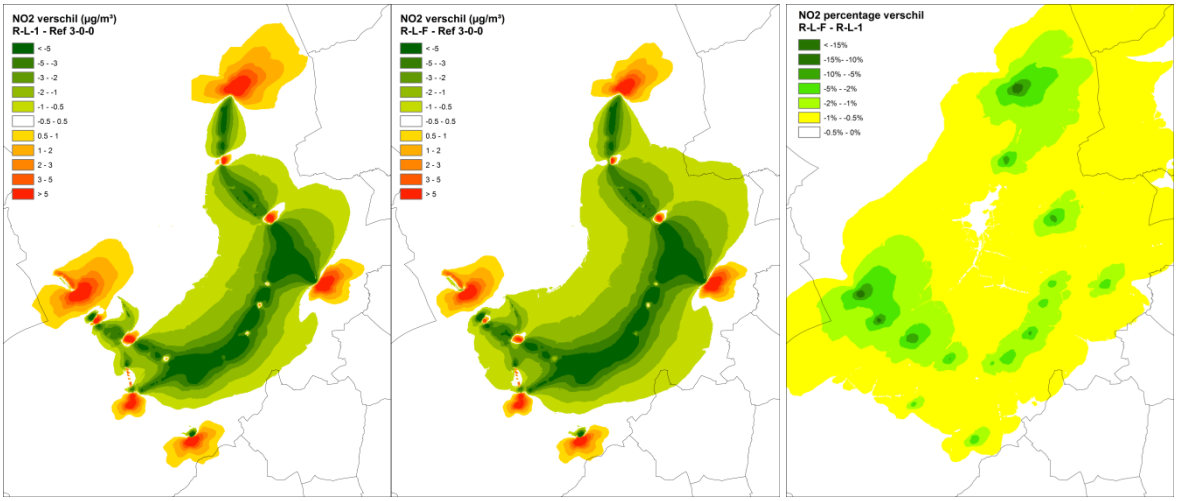
Craeybecktunnel, E313-Rivierenhof en Antwerpen-Noord), één derde komt vrij langs de afritten van het tunnelcomplex. De verschuiving van de emissies leidt tot een verbetering van de luchtkwaliteit in een ruime zone rondom de ring, uitgezonderd de onmiddellijke nabijheid van een tunnelmond. De concentratiekaarten en verschilkaarten tonen de ruimtelijke spreiding van de luchtkwaliteitsimpact (Figuur 2 tem Figuur 4). De effecten nemen in sterkte af naarmate de afstand tot de ring toeneemt, met nog verbeteringen tot 1 µg/m³ NO_2 en 0.2 µg/m³ PM_{10} op 1 km afstand. Voor NO_2, PM_{10}, $PM_{2.5}$ en EC zijn jaargemiddelde concentratiekaarten en verschilkaarten t.o.v. scenario Oosterweel-Noord berekend. De effecten voor NO_2 en roet (EC) zijn relatief groter dan voor fijn stof (PM). De wegverkeersbijdrage is immers groter voor deze polluenten. Rondom de tunnelmonden is er een zone van een paar 100-tal m met sterk verhoogde concentraties. De exacte grote van de zone is afhankelijk van de emissiesterkte en oriëntatie van de tunnelmond ten opzichte van de overheersende windrichting. In Figuur 5 wordt het NO_2 concentratieprofiel getoond net naast de Ring (ongeveer locatie van het Ringfietspad) vanaf de inrit van de Kennedytunnel op Linker Oever tot aan het knooppunt Antwerpen Noord. Op basis van deze figuur is duidelijk op te maken dat de jaargemiddelde concentraties op belangrijke delen van het traject onder de Europese grenswaarde van 40µg/m³zakken.

Zoals hoger vermeld kunnen filtersystemen of andere afschermingen worden aangewend om de resterende problematiek rond tunnelmonden aan te pakken. Het scenario met filtersystemen toont dan ook een verdere daling van de polluentconcentraties (zie Figuur 3, rechts) met een afname in oppervlakte van de zones met hoge concentraties rond tunnelmonden.

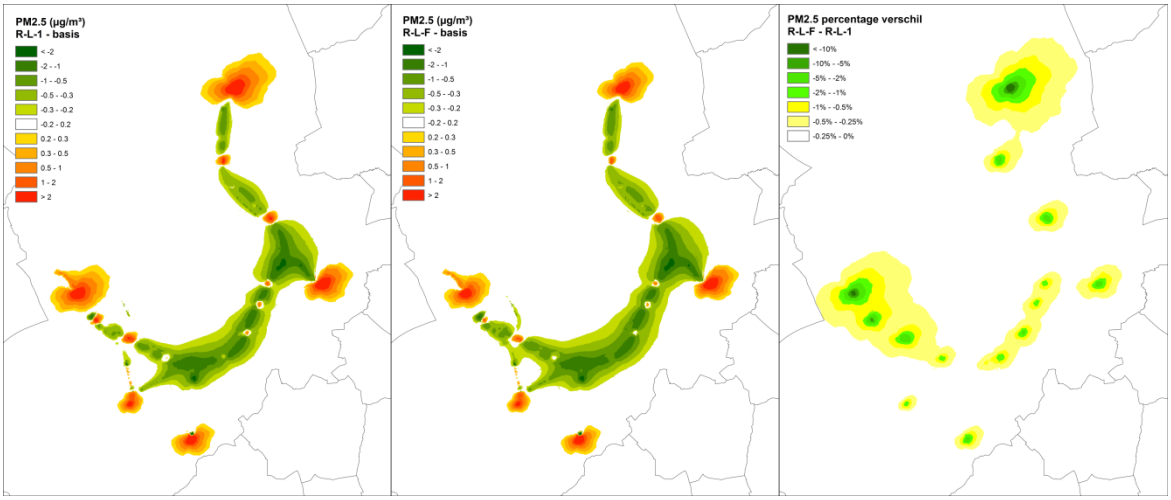
Samengevat kan gesteld worden dat Ringland de luchtkwaliteit rondom de Antwerpse ring verbetert. Het voorstel creëert bijkomende ruimte in de nabijheid van de ring waar de luchtkwaliteit vergelijkbaar wordt aan bestaande wijken op grotere afstand van de ring. Aandachtspunt blijven echter tunnelmonden waar hoge piekconcentraties kunnen ontstaan.



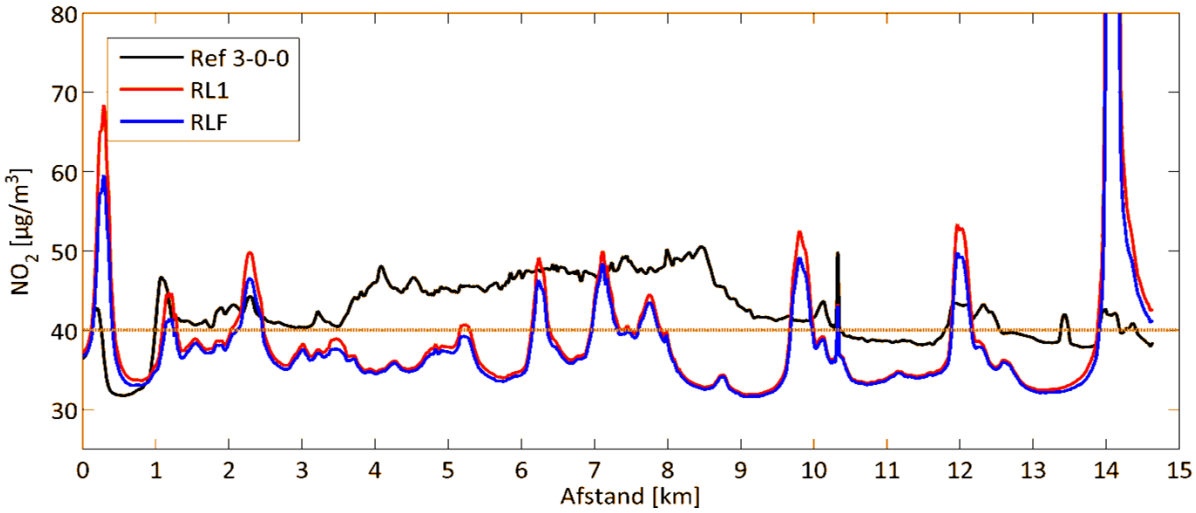
Figuur 2: NO_2 concentraties in 2020 voor het Oosterweel-Noord scenario (links), het Ringland scenario (midden) en het Ringlandscenario met bijkomende filtering (rechts).



Figuur 3: NO_2 verschilkaarten tussen het Oosterweel-Noord scenario en Ringland (links) en Ringland met filtering (midden). Rechts het effect van de bijkomende filtering als het percentueel verschil tussen beide vorige kaarten.



Figuur 4: Analoog verschilkaarten als Figuur 3 maar dan voor $PM_{2.5}$.



Figuur 5: Concentratieprofiel net naast de snelweg (~ringfietspad) over het volledige traject van de Ring vanaf Kennedytunnel-Noord (km 0) tot aan het knooppunt Antwerpen Noord (km15). In zwart de NO2 concentraties (in 2020) voor het Oosterweel-Noord, in rood voor Ringland en blauw voor Ringland met filtering. De EU grenswaarde van 40µg/m³ is aangeduid in oranje stippellijn.

INHOUD

Samenvatting I

Inhoud IX

Lijst van tabellen XI

Lijst van figuren XII

HOOFDSTUK 1. Inleiding 1

HOOFDSTUK 2. Literatuuroverzicht tunnels en luchtkwaliteit 2

2.1. Tunnel ventilatie 2
2.1.1. Longitudinale of langs-ventilatie 2
2.1.2. Afzuigventilatie 4

2.2. Verwijderen van de luchtvervuiling : filtering, coatings 5
2.2.1. Fijn stof filters 6
2.2.2. Gas filters 8
2.2.3. Recente innovatieve technieken 8

2.3. Recirculatie 9

2.4. Schermen 10

2.5. Bebouwing rond de tunnelmond 11

2.6. Verschoven tunnelbuis op einde van de tunnel 11

2.7. Conclusies 12

HOOFDSTUK 3. Tunnelmodel Ringland 15

3.1. Inleiding 15

3.2. Basisprincipes Tunnelmodel 15
3.2.1. Verlies door wrijving met de wanden 15
3.2.2. 'Verlies' door rijdend verkeer 16
3.2.3. Verlies door geometrie van de afrit 18

3.3. Opstellen Tunnelmodel 19

3.4. Vereenvoudigd analytisch model voor inschatting van de verliezen aan de uitritten 23

3.5. Vergelijking resultaten gekoppeld model vs. vereenvoudigd model 26

3.6. CFD simulaties Ringland afritcomplex 27
3.6.1. Geometrie van de tunnel en rekenrooster 28
3.6.2. Randvoorwaarden van de simulaties 29
3.6.3. Resultaten CFD berekeningen 30
3.6.4. Vergelijking CFD - tunnelmodel 31
3.6.5. Gevoeligheid geometrie van de uitritten 33

3.7. Extra mogelijkheid voor filtering 34

HOOFDSTUK 4. Berekening Luchtkwaliteitseffecten Ringland 40

4.1. Mobiliteitscijfers Ringland Scenario's *40*

4.2. Verkeersemissies *42*

4.3. Tunnelcomplex *42*

4.4. Filtering tunnelemissies *44*

4.5. IFDM-street canyon model *47*

4.6. Vergelijking met methodologie andere studies *48*

4.6.1. Vergelijking met Plan-MER Oosterweel 48

4.6.2. Vergelijking met actualisering en verfijning luchtkwaliteitskaarten stad Antwerpen 49

HOOFDSTUK 5. Resultaten Luchtkwaliteitseffecten Ringland 50

5.1. NO_2 *50*

5.2. $PM_{2.5}$ *58*

5.3. PM_{10} *65*

5.4. EC *72*

5.5. Concentratieprofielen langs ringtraject *79*

5.6. Blootstellingsanalyse *82*

HOOFDSTUK 6. Besluit 84

Literatuurlijst 85

Bijlage A : Input bestanden tunnelmodel voor vergelijking met CFD 88

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1 : Fractie van de totale emissie onder Ringland die aan de uitritten/portalen vrijkomt. ____ II
Tabel 2 : Eenvoudige inschatting van de concentraties in de tunnel als functie van de afstand. ___ 3
Tabel 3 : Aerodynamische parameters per voertuigklasse gebruikt in het tunnelmodel. _____ 20
Tabel 4 : Aannames voor de configuratie van een afritcomplex van SRW en de DRW. De Sectie verwijst naar het segment voor (3) en na (2) de afrit en de eigenlijke afrit (1). W is de breedte, H de hoogte, v_{traf} de snelheid van het verkeer en n_{cars}, n_{trck} resp. het aantal personenwagen en vrachtwagens. _____ 24
Tabel 5 : Vergelijking van de uittredende massaflux op basis van het volledig gekoppeld tunnelmodel (VIRTUM) en het vereenvoudigd model dat effectief gebruikt werd voor de doorrekening van de luchtkwaliteitsscenario's. Merk op dat de cijfers enkel gegeven zijn voor het gekoppelde model voor de SRW/DRW richting Nederland (afgekort als WON-west/oost/noord). _____ 27
Tabel 6 : Verliesfracties voor een typische frontale en laterale uitrit van de SRW gebaseerd op CFD simulaties. Gegeven zijn de breedte van inkomende tunnelpijp (W_3), doorgaande tunnel (W_2) en uitrit (W_1), het inkomende en doorgaande debiet en het debiet van de uitrit (verlies), en het verliespercentage t.o.v. het inkomende debiet (Q_1/Q_3). De laatste kolom geeft het drukverlies tussen inlet en outlet van de tunnel dat door de CFD simulatie berekend werd op basis van de randvoorwaarden (zie hoger) en de ruwheid van de wanden (k_s = 0.1 m). _____ 31
Tabel 7 : Resultaten van het tunnelmodel. We gegeven telkens het berekende debiet in elk van de segmenten en het verlies aan de uitrit als fractie van het debiet in de inlet. Ook de stroomsnelheid in segment 1 geven we weer ter vergelijking met de randvoorwaarde van 5 m/s die we in de CFD simulatie oplegden. _____ 32
Tabel 8: Tabel met debieten en verlies fracties voor de gevoeligheidsstudie. _____ 34
Tabel 9 : Debieten voor de case met filterruimte. Q_{2f} geeft het doorgaande debiet dat door de filter passeert, Q_{2t} het doorgaande debiet dat niet door de filter passeert. We gegeven telkens ook de fractie die door de filter passeert en de fractie die naar buiten treedt. _____ 38
Tabel 10: Verdeling emissies over afritten en tunnelmonden scenario zonder luchtfiltering. ____ 43
Tabel 11: Percentage van de totale emissie onder Ringland per afritcomplex _____ 44
Tabel 12: Locaties van luchtfiltersystemen en fracties gefilterd uit tunnelemissies. _____ 45
Tabel 13: Verdeling emissies over afritten en tunnelmonden in scenario inclusief luchtfiltering. _ 46
Tabel 14 : Definitie bestand van de nodes voor vergelijking met CFD voor frontale (links) en laterale (rechts) uitritten. In de eerste kolom is telkens het ID van de node gegeven, dan een vlag of het een interne of externe node is en vervolgens de statische druk in Pa (zie Tabel 6). _____ 88
Tabel 15 : Definitie bestand voor de segmenten voor vergelijking met de CFD berekeningen voor frontale (links) en laterale (rechts) uitritten. In de eerste kolom is het segment ID gegeven, gevolgd door de twee node ID's die het segment definiëren. De volgorde geeft de richting van positieve stroming aan. Dan is de hoogte, breedte en lengte [m] van het segment gegeven gevolgd door de verkeerssnelheid [km/h] en het aantal voertuigen, lichte vracht en zware vrachtwagens per uur dat doorheen het segment rijdt. Deze parameters werden dus op 0 gezet voor de vergelijking met de CFD simulatie. _____ 88

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1 : Visualisatie van een frontale (boven, links) en laterale (boven, rechts) tunneluitgang. Windsnelheid (in m/s) voor een frontale uitrit (onder, links) en een laterale uitrit (onder, rechts). Bij de laterale uitrit kan mogelijk ruimte voor filter systemen gecreëerd worden. ___ III
Figuur 2: NO_2 concentraties in 2020 voor het Oosterweel-Noord scenario (links), het Ringland scenario (midden) en het Ringlandscenario met bijkomende filtering (rechts). _____ VI
Figuur 3: NO_2 verschilkaarten tussen het Oosterweel-Noord scenario en Ringland (links) en Ringland met filtering (midden). Rechts het effect van de bijkomende filtering als het percentueel verschil tussen beide vorige kaarten. _____ VII
Figuur 4: Analoog verschilkaarten als Figuur 3 maar dan voor $PM_{2.5}$. _____ VII
Figuur 5: Concentratieprofiel net naast de snelweg (~ringfietspad) over het volledige traject van de Ring vanaf Kennedytunnel-Noord (km 0) tot aan het knooppunt Antwerpen Noord (km15). In zwart de NO2 concentraties (in 2020) voor het Oosterweel-Noord, in rood voor Ringland en blauw voor Ringland met filtering. De EU grenswaarde van 40µg/m³ is aangeduid in oranje stippellijn. _____ VIII
Figuur 6: Grafische voorstelling van het effect van longitudinale ventilatie in verkeerstunnels. ___ 3
Figuur 7 : Principe van afzuiging via schoorstenen. Figuur overgenomen uit (Huijben, 2006) _____ 4
Figuur 8 : Voorbeeld van bypass http://www.cta.no/bypass.html _____ 5
Figuur 9 : Principe van een elektrostatische precipitator. De fijn stof deeltjes worden eerst geioniseerd, om daarna door een collector te worden aangetrokken en uit de luchtstroom verwijderd. Figuur: wikipedia (http://en.wikipedia.org/wiki/Electrostatic_precipitator). ____ 6
Figuur 10 : Proefopstelling voor metingen van de filter efficiëntie van het ECCO EP systeem. Overgenomen uit (FVT, 2010). _____ 7
Figuur 11 : HD Clean tunnel concept met recirculatie en filtering. Bron: http://www.uctechnologies.nl _____ 10
Figuur 12 : Tabel met effectiviteit van schermen langs snelwegen. Overgenomen uit (Hooghwerff et al., 2009) (Rapport IPL-1b, Toepassingsadvies Schermen, Rijkswaterstaat, Dienst Verkeer en Scheepvaart, Delft, Nederland). Merk op dat de hogere onzekerheid op de resultaten voor PM_{10} terug te wijten is aan de relatief lage wegbijdrage van PM_{10}. _____ 10
Figuur 13 : Schaalmodel voor emissiedak in de windtunnel studie uitgevoerd door TNO, Nederland voor het Centrum Ondergronds Bouwen. Figuur overgenomen uit het COB rapport : (Huijben and Rangelrooij, 2011). _____ 12
Figuur 14 : Grafische weergave van de “piston vergelijking”, waarbij we typische tunneldimensies van de SRW genomen hebben. In de linker figuur werden een aantal curves geplot als functie van de rijsnelheid voor een vaste tunnel lengte van 1 km en variërend aantal voertuigen per uur. In de rechterplot werd uitgegaan van een vast aantal voertuigen per uur (4000) en de windsnelheid als functie van de tunnel lengte voor een aantal rijsnelheden geplot. In beide plots werd uitgegaan van een vloot van enkel auto’s (met een effectieve oppervlakte van 2 m^2). _____ 17
Figuur 15 : Verliescoëfficienten voor een scherpe bocht in een pijpleiding als functie van de verhouding van het debiet Q_1/Q_3. Figuur uit (Miller, 1990) p. 91. De figuur geeft de drukverlies termen voor een T-splitsing en een 45° bocht. _____ 18
Figuur 16 : Schematische voorstelling van het rekenmodel voor een tunneluitrit. _____ 19
Figuur 17 : Knooppuntenschema voor Ringland richting Nederland (SRW+DRW). SRW is bovenaan getekend, te beginnen bij knooppunt 1 (Antwerpen-West). De DRW is onderaan afgebeeld te beginnen bij knooppunt 32. Beide tunnels komen dan samen in knooppunt 30 en terug boven in knooppunt 31, ter hoogte van Antwerpen Noord. De verschillende op/afritten complexen zijn op de figuur aangegeven. _____ 22

Figuur 18 : Dwarsdoorsnede voor de Ringland tunnels. Bovenaan de situatie ter hoogte van een uitrit voor lokaal verkeer. Onderaan de situatie is ter hoogte van een afrit in de tunnel voor doorgaand verkeer. 23
Figuur 19 : Alternatieve geometrie voor de uitritten van de singel en de tunnel voor doorgaand verkeer. Hier wordt gebruik gemaakt van een laterale uitrit met een uitvoegstrook. De respectievelijke frontale oppervlaktes werden aangegeven op de figuur. 24
Figuur 20 : Afhankelijkheid van de uittredende massaflux verhouding Q_1/Q_3 als functie van de verhouding A_2/A_3 van de frontale oppervlakte van de doorgaande tunnel t.o.v. de inkomende tunnelpijp bij vaste breedte van de uitrit. Op de 3D schets is dit aangegeven als de verhouding 25
Figuur 21: Variatie in de verhouding van de uittredende massaflux in functie van de drukverlies coëfficiënt K31. 26
Figuur 22: Screenshot van de gemodelleerde 3D tunnel configuratie met frontale uitrit. Op de rechterfiguur is het rekenrooster afgebeeld van de simulatie. 28
Figuur 23 : Screenshot van de gemodelleerde 3D tunnel configuratie met laterale uitrit. Op de rechterfiguur is het rekenrooster afgebeeld van de simulatie. Bij een volledig laterale uitrit is W_3 gelijk aan W_2. 29
Figuur 24 : Vergelijking tussen de windsnelheid in y-richting (van onder naar boven) voor de case met een frontale uitrit en de case met een laterale uitrit. De slices voor de bepaling van de flux werden op een gelijke hoogte in de tunnel genomen. Merk op dat de breedte van de uitrit in beide figuren gelijk is (er is enkel wat ander ingezoomd). 31
Figuur 25 : Equivalente tunnelschema voor vergelijking met de verliezen met het CFD model. We hebben 4 nodes N1 t.e.m. N4 en 3 segmenten. Merk op dat de nummering hier afwijkt van de conventie die we hoger gebruikten. 32
Figuur 26 : Variaties op de laterale afrit geometrie. 33
Figuur 27 : Afbeelding van de totale stroomsnelheid (van beneden naar boven) voor de hoger beschreven cases &), b) en c). 34
Figuur 28 : Bovenaanzicht voor het uitritconcept met ruimte voor een filterinstallatie. 35
Figuur 29 : Modeldomein en rekenrooster waarbij de frontale wand van de laterale uitrit is geopend en plaats gelaten is voor een mogelijk filtersysteem. De resterende muur naast de doorgaande tunnel is hier een halve meter breed genomen. Na de filterzone (aangeduid op de figuur) stroomt de lucht gewoon verder in de doorgaande tunnel. 35
Figuur 30 : Schets waarbij de verkeersmarkeringen op de figuur zijn aangegeven. (Gemaakt door Sven Augusteyns - Stramien). 36
Figuur 31 : Schets van het M5 experiment te Sydney, Australië. Figuur overgenomen uit (AMOG (Roads and Maritime Services NSW), 2012). 37
Figuur 32 : Windsnelheid voor de filter case. Links is de totale stroomsnelheid aangegeven. We duiden het debiet doorheen de filter aan met Q_{2f} , en het gewoon doorgaande debiet als Q_{2t}. Het inkomende debiet duiden we opnieuw aan met Q_3 en het debiet naar de uitrit met Q_1. 37
Figuur 33 : Illustratieve modellering van de impact van het filterelement in de uitrit sectie. Links zien we de impact op de stroomsnelheid, die duidelijk afneemt doorheen het filterelement, rechts op de concentratie, waarbij een willekeurige concentratie van 100 $\mu g/m^3$ aan de instroom gekozen werd. 39
Figuur 34: Wegennetwerk met tunnelcomplex Ringland en gemeentegrenzen. 41
Figuur 35: Het gebruikte puntengrid binnen deze studie. Ieder zwart puntje stelt een receptorpunt voor. Op veel plaatsen dicht bij wegen liggen zoveel receptorpunten dat de verschillende zwarte aanduidingen niet meer te onderscheiden zijn. Rode lijnen: gemeentegrenzen. 48
Figuur 36: Jaargemiddelde NO_2-concentraties ($\mu g/m^3$) in Antwerpen en omgeving voor referentiescenario Oosterweel-Noord, prognosejaar 2020. 52
Figuur 37: Jaargemiddelde NO_2-concentraties ($\mu g/m^3$) in Antwerpen en omgeving voor Ringland scenario zonder filtertechnieken, prognosejaar 2020. 53

Figuur 38: Verschil in jaargemiddelde NO_2-concentraties (µg/m³) tussen Ringland scenario zonder filtertechnieken en Oosterweel-Noord voor prognosejaar 2020. 54
Figuur 39: Jaargemiddelde NO_2-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving voor Ringland scenario met filtertechnieken, prognosejaar 2020. 55
Figuur 40: Verschil in jaargemiddelde NO2-concentraties (µg/m³) tussen Ringland scenario met filtertechnieken en Oosterweel-Noord voor prognosejaar 2020. 56
Figuur 41: Het procentuele verschil in jaargemiddelde NO_2 concentraties tussen Ringland met en zonder toepassing van filtertechnieken. 57
Figuur 42: Brontoewijzing (in%) voor NO_2, PM_{10} en $PM_{2.5}$ voor de stad Antwerpen (boven) en de haven van Antwerpen (onder), overgenomen uit (Lefebvre et al., 2011). De zes genoemde sectoren stellen de Vlaamse emissies in deze sectoren voor. In andere zitten o.a. niet-lineaire effecten, niet-Vlaamse emissies en niet antropogene emissies. Een waarde voor de sector industrie van 28,78 voor $PM_{2.5}$ voor de haven van Antwerpen betekent dat ongeveer 28,78% van de $PM_{2.5}$-concentraties in de Haven van Antwerpen te wijten zijn aan de Vlaamse Industrie. 58
Figuur 43: Jaargemiddelde $PM_{2.5}$-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving voor referentiescenario Oosterweel-Noord, prognosejaar 2020. 59
Figuur 44: Jaargemiddelde $PM_{2.5}$-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving voor Ringland scenario zonder filtertechnieken, prognosejaar 2020. 60
Figuur 45: Verschil in jaargemiddelde $PM_{2.5}$-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving tussen Ringland scenario zonder filtertechnieken en Oosterweel-Noord, prognosejaar 2020. 61
Figuur 46: Jaargemiddelde $PM_{2.5}$-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving voor Ringland scenario met filtertechnieken, prognosejaar 2020. 62
Figuur 47: Verschil in jaargemiddelde $PM_{2.5}$-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving tussen Ringland scenario met filtertechnieken en Oosterweel-Noord, prognosejaar 2020. 63
Figuur 48: Procentueel verschil in jaargemiddelde $PM_{2.5}$ concentraties tussen Ringland scenario met en zonder filtertechieken, prognosejaar 2020. 64
Figuur 49: Jaargemiddelde PM_{10}-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving voor referentiescenario Oosterweel-Noord, prognosejaar 2020. 66
Figuur 50: Jaargemiddelde PM_{10}-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving voor Ringland scenario zonder filtertechnieken, prognosejaar 2020. 67
Figuur 51: Verschil in jaargemiddelde PM_{10}-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving tussen Ringland scenario zonder filtertechnieken en Oosterweel-Noord, prognosejaar 2020. 68
Figuur 52: Jaargemiddelde PM_{10}-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving voor Ringland scenario met filtertechnieken, prognosejaar 2020. 69
Figuur 53: Verschil in jaargemiddelde PM_{10}-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving tussen Ringland scenario met filtertechnieken en Oosterweel-Noord, prognosejaar 2020. 70
Figuur 54: Procentueel verschil in jaargemiddelde PM_{10} concentraties tussen Ringland scenario met en zonder filtertechieken, prognosejaar 2020. 71
Figuur 55: Jaargemiddelde EC-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving voor Oosterweel-Noord scenario, prognosejaar 2020. 73
Figuur 56: Jaargemiddelde EC-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving voor Ringland scenario zonder filtertechnieken, prognosejaar 2020. 74
Figuur 57: Verschil in jaargemiddelde EC-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving tussen Ringland scenario zonder filtertechnieken en Oosterweel-Noord, prognosejaar 2020. 75
Figuur 58: Jaargemiddelde EC-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving voor Ringland scenario met filtertechnieken, prognosejaar 2020. 76
Figuur 59: Verschil in jaargemiddelde EC-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving tussen Ringland scenario met filtertechnieken en Oosterweel-Noord, prognosejaar 2020. 77
Figuur 60: Procentueel verschil in jaargemiddelde EC concentraties tussen Ringland scenario met en zonder filtertechieken, prognosejaar 2020. 78

Figuur 61: Locatie van het gebruikte traject voor bijkomende concentratieanalyse _____ 79
Figuur 62: Concentratieprofielen langs het ringtraject (µg/m³) in functie van de afstand langs het traject vanaf Kennedytunnel-West tot Antwerpen-Noord. Concentraties voor Oosterweel-Noord (Ref-3-0-0) worden in zwart gegeven, en Ringland met en zonder filtertechnieken (R-L-1 en R-L-F) in respectievelijk rood en blauw. _____ 81
Figuur 63: NO_2 Blootstellingsanalyse Antwerpse bevolking op thuislocatie binnen een zone op 50 tot 100 m afstand van Ringland. _____ 82
Figuur 64: Opsplitsing van het studiegebied in zones voor blootstellingsanalyse _____ 83

HOOFDSTUK 1. INLEIDING

Eind 2014 werd door Ringland (www.ringland.be) een crowdfunding actie opgezet onder de Antwerpse bevolking. Met de ingezamelde middelen werden externe experts aangetrokken om de plannen van Ringland tegen het licht te houden en ev. verder te verfijnen. VITO werd begin 2015 gevraagd om te onderzoeken wat de impact van Ringland zou zijn op de Antwerpse luchtkwaliteit.

Het voorliggende rapport beschrijft het opzet en de resultaten van deze studie. In HOOFDSTUK 2 wordt een overzicht gegeven van de huidige kennis over de impact van tunnels op de luchtkwaliteit. Hierbij wordt uitvoerig stil gestaan bij mogelijke maatregelen die genomen kunnen worden om de luchtkwaliteit zowel in de tunnels maar zeker ook ter hoogte van de tunneluitgangen onder controle te houden. Hierbij wordt uitgebreid verwezen naar internationale praktijkvoorbeelden en onderzoeksprojecten.

Ringland stelt een complex systeem van tunnels voor waarbij verschillende op- en afritcomplexen de toegang voor het verkeer verzorgen. Een grote uitdaging in het voorliggend onderzoek, was de bepaling van de emissiesterkte ter hoogte van deze verschillende tunneluitgangen. Deze nieuwe emissiebronnen zullen immers in belangrijke mate de nieuwe luchtkwaliteitskaart van Ringland bepalen. In HOOFDSTUK 3 wordt daarom een tunnelmodel uitgewerkt dat in staat is om voor de verschillende tunnelprotalen en op- en afritcomplexen de uitstoot te bepalen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een relatief eenvoudig modelconcept voor één individueel afrit complex. Ter validatie en controle van deze methodologie, werd een meer complex en volledig gekoppeld tunnelmodel ontwikkeld en werden ook computational fluid dynamics (CFD) berekening uitgevoerd. Op basis van de tunnelmodel berekeningen en de inschatting van de nieuwe emissiebronnen van Ringland wordt vervolgens de impact op de luchtkwaliteit in heel Antwerpen bepaald. In HOOFDSTUK 4 wordt het gebruikte model en de gemaakte aannames beschreven, in HOOFDSTUK 5 worden de eigenlijke resultaten getoond gevolgd door een blootstellingsanalyse. Tenslotte volgt in HOOFDSTUK 6 een kort besluit van deze studie.

HOOFDSTUK 2. LITERATUUROVERZICHT TUNNELS EN LUCHTKWALITEIT

In dit onderdeel bieden we een beknopt overzicht van in de literatuur beschreven proeven, maatregelen en praktijkvoorbeelden m.b.t. de relatie tussen tunnels en luchtkwaliteit. Er is reeds heel wat literatuur beschikbaar in verband met tunnels en luchtkwaliteit. In het bijzonder vermelden we een publicatie van Oranjewoud (Cornelissen et al., 2013) die een overzichtelijke samenvatting biedt van de huidige stand van techniek met ingeschatte kostprijs, effectiviteit en status van de technologie. Ook het Nederlandse Innovatie Programma Luchtkwaliteit[1] (IPL) heeft heel wat onderzoeksresultaten opgeleverd i.v.m. tunnels en luchtkwaliteit. Hieronder lichten we een aantal zaken toe en bespreken we de mogelijke relevantie voor Ringland. We beperken ons hierbij tot maatregelen die men in en om tunnels kan nemen.

Uiteraard is de beste manier om verhoogde concentraties te voorkomen, er voor te zorgen dat de bron die ze veroorzaakt, afneemt. Dit kan door regulering van de verkeersstromen, al dan niet toelaten van zwaar vrachtverkeer, tolheffing, snelheidsreductie, maar ook het stimuleren van een schoner wagenpark. De maatregelen die hier worden opgelijst dienen hier tegenover te worden afgewogen.

In de ontwerpfase van een dergelijk complex tunnelsysteem als Ringland dient reeds rekening gehouden moet worden met de luchtkwaliteit, zowel binnen als buiten de tunnel. Naast regulering van de verkeersstromen zullen design en werking van de ventilatiesystemen in de tunnel zelf een effect hebben op de luchtkwaliteit aan de tunnelmonden. Die kan verder gehandhaafd worden door een combinatie van maatregelen (PIARC, 2008). Maatregelen kunnen zowel dispersie bevorderen door het beter mengen van de verontreinigde lucht met “schonere” omgevingslucht, waardoor de concentraties op grondniveau afnemen. Of, alternatief, filtering, waarbij de polluenten effectief uit de luchtstroom gehaald worden. Beide types maatregelen hebben voor en nadelen die hieronder kort besproken worden.

2.1. TUNNEL VENTILATIE

2.1.1. LONGITUDINALE OF LANGS-VENTILATIE

Veelal wordt in verkeerstunnels longitudinale ventilatie toegepast, maar dan vooral met het oog op brandveiligheid. Indien er een ongeval met brand ontstaat in de tunnel en bijhorende verkeersopstopping, dan valt de natuurlijke ventilatie in de tunnel stil. Via longitudinale – of langs-ventilatie kan men toch een luchtstroming in de tunnel induceren waardoor de rook van de brand naar een uitgang wordt afgevoerd (of naar een afzuigschacht).

[1] http://www.rijkswaterstaat.nl/wegen/natuur_en_milieu/luchtkwaliteit/innovatieprogramma_luchtkwaliteit/

Longitudinale ventilatie kan er verder ook voor zorgen dat de concentraties in de tunnel niet te hoog oplopen. Het verloop van de concentraties in een tunnel wordt gegeven door onderstaande grafiek in Figuur 6, waarbij het verband gegeven wordt door[2] :

$$C(x) = C_0 + \frac{qx}{Au}$$

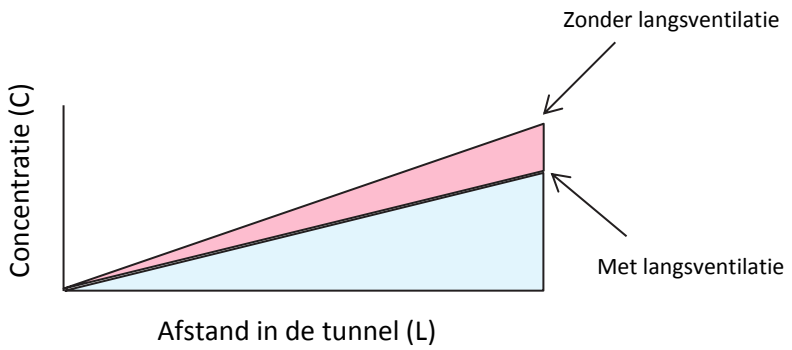
Met C(x) de concentratie als functie van de afstand in de tunnel, C_0 de inlet of achtergrond concentratie, x de afstand vanaf de ingang van de tunnel, u de luchtsnelheid in de tunnel, q de verkeersemissie sterkte per lengte eenheid en A de tunneloppervlakte. Een hogere windsnelheid in de tunnel geeft m.a.w. aanleiding tot een minder hoog oplopende concentratie aan het einde van de tunnel.

Om een idee te geven van de concentraties in de tunnel maken we in onderstaande tabel op basis van bovenstaande relatie een eerste inschatting van de concentraties in de DRW richting Nederland ter hoogte van Berchem kerk. Op basis van het verkeersemissie model dat we in verdere hoofdstukken zullen beschrijven, vinden we de emissies voor NO_2, PM_{10}, PM_{25} en EC die we in onderstaande tabel hebben opgenomen.

Tabel 2 : Eenvoudige inschatting van de concentraties in de tunnel als functie van de afstand.

Polluent	*Emissies kg/h/km*	*Hoogte*	*Breedte*	*Area [m2]*	*u [m/s]*	*L [m]*	*C [mg/m³]*
NO2	1.25	6.7	26.2	175.54	5	1000	0.3956
PM10	0.185	6.7	26.2	175.54	5	1000	0.0585
PM25	0.0963	6.7	26.2	175.54	5	1000	0.0305
EC	0.0637	6.7	26.2	175.54	5	1000	0.0202

Wanneer we de dimensies van de DRW tunnel meenemen en een windsnelheid van 5 m/s veronderstellen in de tunnel (zie verder), dan komen we vb. voor NO_2 op een additionele 0.4 mg/m³ per km tunnel.



Figuur 6: Grafische voorstelling van het effect van longitudinale ventilatie in verkeerstunnels.

Het is uiteraard zo dat de totale emissie van een tunnel door langsventilatie niet afneemt, maar de concentratie van de lucht die de tunnel verlaat is wel lager door de hogere luchtsnelheid in de

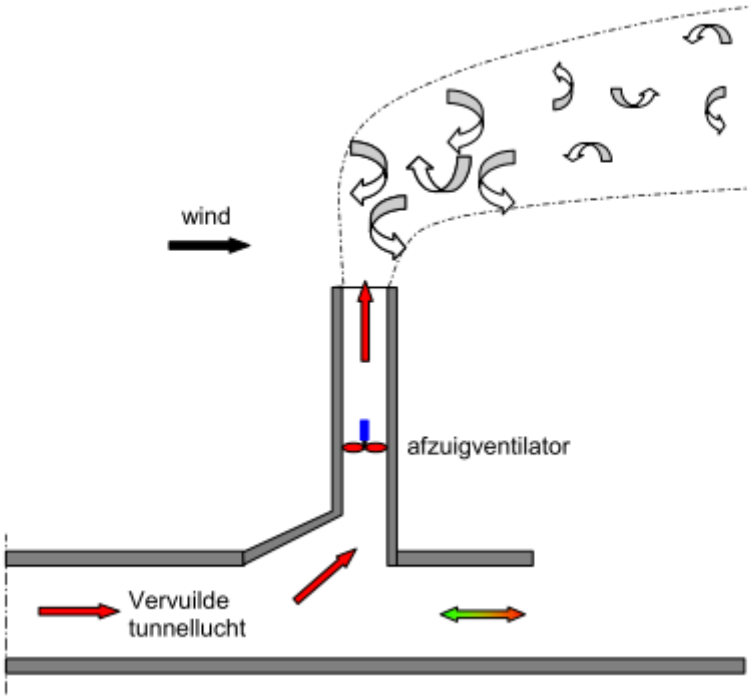
[2] Hierbij houden we geen rekening met depositie.

tunnel. Dit heeft als gevolg dat er een sterkere jet-werking optreedt en het invloedgebied van de tunnelmond groter is, waardoor de concentraties in dat gebied wel afnemen (Huijben, 2006).

Een grote bron van onzekerheid hierbij is het feit dat dit effect sterk beïnvloed wordt door het atmosferische windveld. Het is immers geweten dat de positie van de jet die uit tunnelmonden komt, sterk beïnvloedt wordt door fluctuaties in het atmosferische windveld (Oettl et al., 2002), waardoor de effectiviteit van deze maatregel heel onzeker is als maatregel om de luchtkwaliteit aan de tunnelmonden te verbeteren.

2.1.2. AFZUIGVENTILATIE

Aan de tunnelmonden kunnen afzuigventilatiesystemen gebruikt worden. Hierbij wordt de lucht uit de tunnel afgezogen voordat die de tunnel verlaat. De vervuilde lucht wordt via een schoorsteen van enkele tientallen meter naar buiten gebracht, waardoor de verontreiniging goed verdund wordt vooraleer die terug aan de grond komt. Hiervoor dient echter ter hoogte van de aansluiting van het afzuigsysteem aan de tunnel een aanzienlijke onderdruk gecreëerd te worden wil men ervoor zorgen dat een aanzienlijk deel van het debiet effectief langs de schoorsteen naar buiten komt en de lucht de afzuiginstallatie niet gewoon passeert (Huijben, 2006). Een afzuiginstallatie kan nuttig zijn bij brand voor afzuiging van opgehoopte rook, in combinatie met langsventilatie.



Figuur 7 : Principe van afzuiging via schoorstenen. Figuur overgenomen uit (Huijben, 2006)

Inschattingen van kosten van energieverbruik voor een afzuiginstallatie van de Coen tunnel in Nederland, waarbij aangenomen worde dat een debiet van 300-350 m^3/s wordt afgezogen bij continue bedrijfsvoering zijn in de orde van 500 – 600 kEUR per jaar (Huijben, 2006) bij continue inschakeling. Uit de voorbeeldberekening van het vermeldde rapport, blijkt een energievraag van 5.7 kWh, wat overeenkomt met ca. 2000 huishoudens. De investeringskost wordt in de orde van

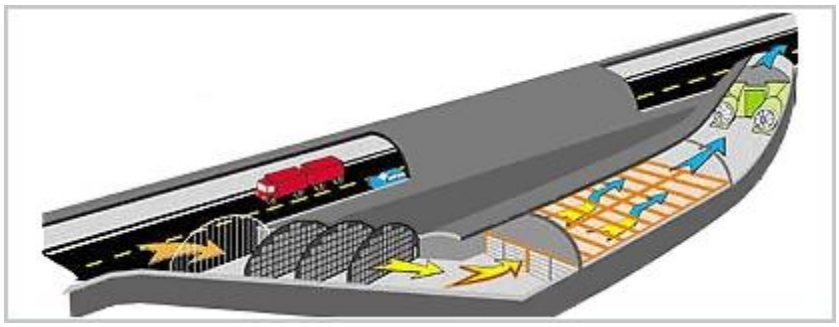
~50 MEUR geraamd. Uiteraard kan een monitoring/regelsysteem voorzien worden waarbij de installatie slechts operationeel is wanneer nodig. Bijkomend aandachtspunt is verder ook dat de tunnelstructuur zwaar genoeg moet zijn om vb. een schoorsteen te kunnen dragen.

2.2. VERWIJDEREN VAN DE LUCHTVERVUILING : FILTERING, COATINGS

Voor het filteren van luchtvervuiling bestaan heel uiteenlopende technologieën. Veel van die technieken zijn ontwikkeld voor industriële toepassingen waar de volumes lucht relatief laag zijn en de concentraties heel groot. De relatief lagere concentraties aan vervuiling in de vrije atmosfeer maken filtering zeer inefficiënt in omgevingslucht. Gezien in het geval van tunnels de concentraties toch hoog kunnen oplopen, maakt dat filtertechnologie in verkeerstunnels toch wordt toegepast. Van de verschillende duizenden tunnels wereldwijd, beschikt slechts een heel kleine fractie (< 1%) over afzuigschoorstenen en slechts in een minieme fractie (<0.01%) wordt filtertechnologie toegepast (PIARC, 2008).

Filtersystemen kunnen geïnstalleerd worden in de tunnel zelf als bypass (zie Figuur 8) of via een extractie met uitgang naar buiten. In het laatste geval wordt een deel van de tunnellucht afgezogen en naar een filteringinstallatie geleid waar die behandeld wordt en via schoorstenen naar buiten wordt gebracht.

Analoog als bij ventilatie dient ook hier een significante exploitatiekost in rekening gebracht te worden, zeker voor de hoogspanning nodig voor fijn stof filtersystemen (zie verder). Exploitatie kosten van dergelijke systemen kunnen oplopen van een paar 100 kEUR tot jaarlijkse een 1 MEUR (Cornelissen et al., 2013). Gegenereerde CO_2 uitstoot t.g.v. de grote energievraag van dergelijke installaties, kan echter wel opgevangen worden door gebruik te maken van duurzame energievormen zoals windturbines of PV installaties.

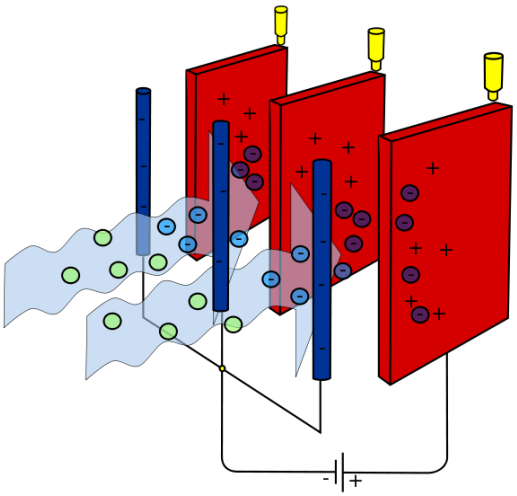


Figuur 8 : Voorbeeld van bypass http://www.cta.no/bypass.html

We onderscheiden filtersystemen voor het verwijderen van fijn stof (PM_{10}, $PM_{2.5}$, …) en filtersystemen voor het verwijderen van gasvormige componenten (typisch NO_x). De meest technologie is hierbij selectief, dit houdt in dat fijn stof filters geen NO_2 of andere emissies reduceren, dit in tegenstelling tot dispersietechnieken die voor een verhoogde verspreiding van de luchtverontreiniging zorgen. Voor een overzicht van de huidige “state-of-the-art” van filtertechnieken en hun praktijkvoorbeelden verwijzen we o.a. naar (CETU, 2010).

2.2.1. FIJN STOF FILTERS

Voor het filteren van fijn stof in verkeerstunnels wordt meestal zogenaamde elektrostatische precipitatie (EP) toegepast. Hierbij worden de fijn stof deeltjes door ionisatie geladen om vervolgens in een collector te worden aangetrokken.

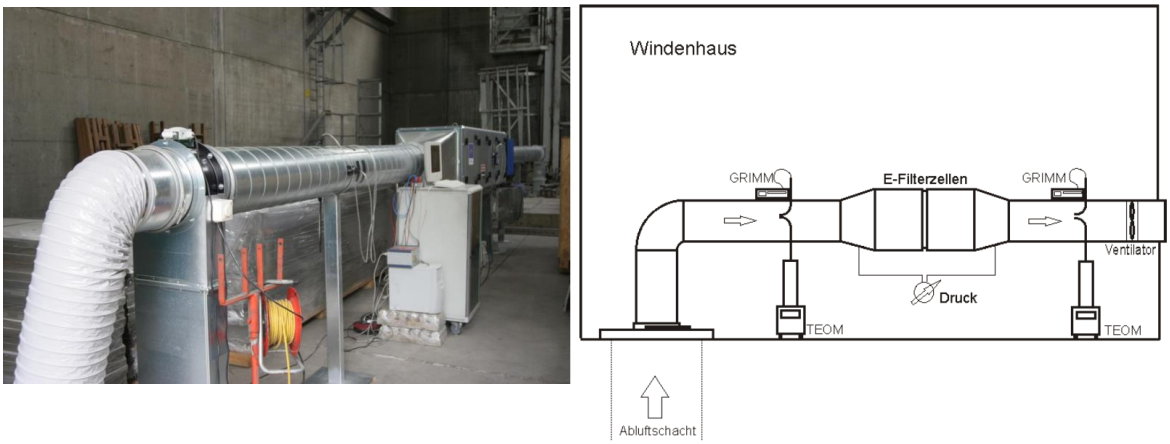


Figuur 9 : Principe van een elektrostatische precipitator. De fijn stof deeltjes worden eerst geioniseerd, om daarna door een collector te worden aangetrokken en uit de luchtstroom verwijderd. Figuur: wikipedia (http://en.wikipedia.org/wiki/Electrostatic_precipitator).

Het grootste aantal EP systemen vindt men in Japan, waar van de 8000 verkeerstunnels, er zo'n 40 zijn uitgerust met fijn stof filtering. Ook in Noorwegen, waar van de ongeveer 1000 tunnels er 8 uitgerust zijn met EP systemen (PIARC, 2008). Het dient ook vermeld te worden dat de meerderheid van de EP installaties als doel heeft het verbeteren van de zichtbaarheid in de tunnel zelf en dat er weinig tot geen publieke data beschikbaar is die de impact van EP systemen op de buitenluchtkwaliteit aantoont (Arnold Dix, 2006). In recente jaren werd filtering ook toegepast in tunnels in Italië, o.a. in de "Le Vigne" tunnel in het druk bevolkte Cesene en in Spanje op de M10 in Madrid.

De efficiëntie van EP filtersystemen voor PM_{10} en $PM_{2.5}$ is relatief groot (80 tot 90 %), wat ook blijkt uit een kleinschalige test van het Duitse Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH in de Plabutschtunnel in Oostenrijk (FVT, 2010). In dat rapport wordt een proefopstelling beschreven in de toegangsschacht van de Plabutschtunnel, een 10 km lange bypass tunnel in Graz. In de opstelling wordt een elektrostatische filter voor fijn stof met een grootte van 0.01 tot 40 µm uitgemeten. In de proefopstelling gaat het concreet om een elektrofilter van het type ECCO EP van Aigner Filter Technology (http://www.aignertunnel.com/). Hieronder is een foto overgenomen uit het rapport.

Er is wel vast gesteld dat de filterefficiëntie afneemt voor kleinere deeltjes. Voor deeltjes kleiner dan 0.5 µm wordt een rendement van < 60 % gehaald (CETU, 2010). Dit is uiteraard belangrijk omdat de één van de meest schadelijke component van fijn stof (EC) zich net rond die grootte bevindt (Jaffrezo et al., 2005). Uit de testen in de Plabutschtunnel hierboven beschreven, blijkt ook een afname van de efficiëntie bij kleinere deeltjes grootte.



Figuur 10 : Proefopstelling voor metingen van de filter efficiëntie van het ECCO EP systeem. Overgenomen uit (FVT, 2010).

Bij een grootschalig experiment in Australië in een tunnel op het oostelijke stuk van de M5 in Sydney, werden gedurende 18 maanden testen gedaan met een EP filtersysteem en op actieve koolstof gebaseerde filters voor NO_x (Halliburton and Azzi, 2011) . Voor het EP systeem werd 200 m^3/s tunnellucht behandeld waarbij 65% van het fijn stof (PM_{10} + $PM_{2.5}$) gecapteerd werd. Het systeem werd enkel geëvalueerd op z'n verbeteringen van de zichtbaarheid in de tunnel, niet op de luchtkwaliteit buiten de tunnel. Het totale systeem koste $60M (omgerekend[3] 43 MEUR), waarvan $16M (11.5 MEUR) voor de filterinstallatie met elektrische en mechanische uitrusting. De uitbatingskosten werden ingeschat op zo'n 600 kEUR/jaar. Hierbij dient wel de opmerking gemaakt te worden dat de hoge installatiekost grotendeels te wijten is aan het feit dat de filterinstallatie slechts nadien aan de tunnel is toegevoegd en er bij het ontwerp geen rekening mee gehouden werd (CETU, 2010). Na 18 maanden werd een afweging gemaakt van de efficiëntie van het filtersysteem t.o.v. bv. de kost-efficiëntie van de installatie van voertuigfilters. Op basis hiervan werd het experiment stopgezet (AMOG (Roads and Maritime Services NSW), 2012).

Een zelfde afname van de hoge theoretische filter efficiëntie (~90%) in praktijkopstellingen wordt ook elders vastgesteld. Op basis van PM_{10} en $PM_{2.5}$ metingen in de Ekeburg tunnel in Noorwegen werd een filter efficiëntie van 40% opgetekend (PIARC, 2008).

De kost voor de installatie in de "Le Vigne" tunnel in Cesene, Italië, waarbij 2 filter systemen van 200 m^3/s zijn aangebracht, bedraagt 2.5 MEUR (exclusief constructie of ventilatie systemen) (Arnold Dix, 2006; CETU, 2010). Op basis van de huidige voorbeelden, kan gesteld worden dat de installatiekost een paar miljoen EUR bedraagt wanneer van bij het begin met dergelijke installatie rekening gehouden wordt. Een jaarlijkse kostprijs van een paar honderdduizend EUR lijkt de norm te zijn voor de uiteindelijke exploitatiekosten (Cornelissen et al., 2013). Tenslotte dient men er ook rekening mee te houden dat hetgeen neerslaat op de filters moet behandeld worden als chemisch afval, wat een additionele kost met zich meebrengt. Een groot aantal tunnels die uitgerust zijn met elektrostatische filters maken er echter in de praktijk slechts weinig gebruik van t.g.v. de hoge exploitatiekost (CETU, 2010).

[3] Aan een huidige koers van 0.72 EUR/$

2.2.2. GAS FILTERS

Voor de behandeling van NO_2 in verkeerstunnels bestaan slechts een 5 tal voorbeelden (d.d. 2010): de Laerdal tunnels in Noorwegen, de Chuo-Kanjo-Shinjuku tunnel in Japan, Umberto in Rome, de M5 tunnel in Sydney, Australië en de M30 in Madrid (CETU, 2010). Er bestaan verschillende technieken, gebaseerd op absorptie of adsorptie (PIARC, 2008). Veelal wordt gebruik gemaakt van actief kool. Een efficiënte filtering verondersteld wel dat de lucht ontdaan wordt van fijn stof, en een NO_2 filterinstallatie dus voorafgegaan wordt door vb. een fijn stof filtersysteem (Arnold Dix, 2006). Bij praktijktesten in de M5 tunnel in Sydney, Australië werd een rendement van 55% gehaald (AMOG (Roads and Maritime Services NSW), 2012). Er dient hierbij wel vermeld te worden dat het ontwerp van de filters in het Sydney experiment niet optimaal was, waardoor hogere rendementen in de praktijk waarschijnlijk haalbaar zijn.

Hoewel fijn stof filtersystemen relatief compact kunnen zijn, zijn grotere ruimtes nodig voor NO_2 filtering. De luchtsnelheid moet voldoende laag gehouden kunnen worden zodanig dat de gasmoleculen voldoende tijd krijgen om met de filters te interageren. (CETU, 2010) vermeldt snelheden in de orde van 0.3 – 1.0 m/s, te vergelijken met de typische luchtstroming in de tunnels van 5 – 10 m/s.

2.2.3. RECENTE INNOVATIEVE TECHNIEKEN

Er wordt momenteel nog steeds actief onderzoek verricht naar filtersystemen voor het behandelen van vervuilde lucht in verkeerstunnels. Dit opent zeker naar de toekomst perspectieven. Niet elke proef echter bleek in de praktijk succesvol te zijn.

- Onder UV straling (die dan additioneel in de tunnel dient aangebracht te worden) werkt een TiO_2 coating als katalysator die de omzetting van NO_2 naar nitraten bewerkstelligt die dan vervolgens op het substraat blijven hangen. Hierdoor kan NO_2 uit de luchtstroom verwijderd worden. In (Guerrini, 2012) wordt dergelijk experiment in de “Umberto I” tunnel in Rome beschreven. De auteur claimt een NO_x reductie van 20%. Onlangs bleek een experiment van het PhotoPAQ consortium[4] in de Brusselse Leopold II tunnel, waarbij een TiO_2 gebaseerde coating werd aangebracht om de NO_2 concentraties te reduceren, echter niet succesvol (Gallus et al., 2015). Ook experimenten in het kader van het Innovatie Programma Luchtkwaliteit in Nederland gaven een verwaarloosbaar effect van TiO_2 coatings (Rijkswaterstaat, 2009), weliswaar in open lucht.
- In (Gale, 2009) wordt een concept toegelicht waarbij een nieuw soort EP filter direct op een ventilator kan worden gemonteerd, ontwikkeld door RITCO[5]. Men claimt dat de filter een efficiëntie van 90% haalt bij een luchtsnelheid van 30 m/s. Het is onduidelijk of dit systeem in de praktijk reeds wordt toegepast.
- In het kader van het Innovatie Programma Luchtkwaliteit in Nederland, werd in de Thomassen tunnel een experiment uitgevoerd door TU Delft i.s.m. BAM Infraconsult. Hierbij werd het zogeheten “fijn stof reductie systeem” (FDRS) uitgetest in de tunnelbuis. Bij het FDRS worden tegen de wanden rekken op hoogspanning aangebracht waardoor een elektrische veld ontstaat in de tunnel, de fijn stof deeltjes geladen worden en nadien neerslaan op geaarde oppervlakken (Ursem et al., 2009). De experimentele proef claimt een filter efficiëntie van 15%.

[4] http://photopaq.ircelyon.univ-lyon1.fr/
[5] http://www.ecotrade.org/homepage/ry8781/catalog.asp?DirectoryID=194&CatalogID=246

- Tenslotte vermelden we nog een proef in Eindhoven waarbij de zogeheten "Corona Pulse Power Technologie" is getest. Deze techniek wekt via hoge elektrische spanning een plasma op waarin stof deeltjes geladen worden en vervolgens neerslaan op geaarde platen. In labotesten werd voor concentraties beneden 1 ppm (~2 mg/m^3 NO_2) geen succesvol resultaten bekomen (Geertsma et al., 2011), voor concentraties van 10 ppm (~20 mg/m^3 NO_2) bekwam men een rendement van 60% in labo condities. In een proef uitgevoerd met brommers in de Dommeltunnel in Eindhoven werd aangetoond dat voor NO_x concentraties van 8 – 20 mg/m^3 een verwijderingsrendement van 80% bereikt kan worden. De kosten voor het systeem worden ingeschat in de orde van 100 – 200 kEUR per jaar, hoewel hier nog enige onzekerheid rond bestaat (Cornelissen et al., 2013). Wanneer we rekening houden met de ruwe berekening in Tabel 2, waarbij we voor NO_2 een toename van 0.4 mg/m^3 per km inschatten op basis van de emissies op het drukste stuk van de DRW, komen we op een NO_2 concentratie 6 mg/m^3 voor 15 km tunnel[6].

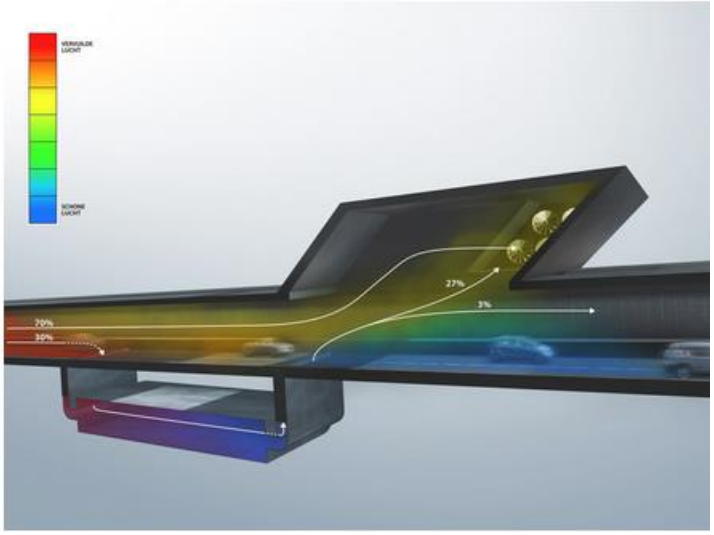
2.3. RECIRCULATIE

Het is geweten dat bij tunnelmonden waar beide rijrichtingen naast elkaar liggen, een significant kortsluitingseffect kan optreden (Koopmans, n.d.) indien geen gepaste maatregelen genomen worden. De vervuilde lucht die vrijkomt uit een tunnelbuis wordt door het aanzuigeffect van de tunnelbuis voor de andere rijrichting, terug aangezogen. Het effect is afhankelijk van de geometrie van het tunnelportaal en de meteorologische condities. Dit effect geeft voornamelijk een probleem voor de luchtkwaliteit in de tunnel zelf, waardoor extra ventilatie nodig is. Feit is wel dat bij bidirectionele tunnels (i.e. tunnels met twee rijrichtingen in dezelfde tunnelpijp), de invloedzone van het tunnelportaal stukken kleiner is. Uit metingen in Frankrijk bij de Croix-Rousse tunnel in Lyon blijkt dat op een afstand van slechts 20 m vanaf het tunnelportaal de concentraties reeds terugvallen op het achtergrond niveau (Huijben and Rikkelman, 2009). Let wel dat het hier gaat om een stedelijk tunnel met relatief lage verkeerssnelheid. Naar verkeersveiligheid zijn bidirectionele tunnels dan weer iets minder interessant en er moet rekening gehouden worden met hoger oplopende concentraties binnenin de tunnel.

Op basis van het recirculatieprincipe ontwikkelde het HD Clean Tunnel consortium een concept[7] waarbij dit recirculatie-effect gecombineerd wordt met filtering. De lucht wordt voor een uitrit actief afgezogen en in de tunnelpijp van de tegenrichting geblazen, idem op het einde van de andere tunnelpijp. Hierdoor blijft de vervuilde lucht langer in de tunnel. Deze recirculatie wordt gecombineerd met een filtersysteem, waardoor de lucht gezuiverd wordt vooraleer die de tunnel verlaat. In het concept wordt ook gebruik gemaakt van tegenventilatie of luchtmesventilatoren aan het einde van de tunnelbuis die een bijna verticale luchtstroom induceren waardoor verontreinigde lucht naar een afzuigpunt geleid wordt.

De werking van het concept is voor zover geweten nog niet in de praktijk of in schaalmodel aangetoond. Ook het gebruik van luchtmesventilatoren in de vloer van de tunnel vereist de nodige overwegingen inzake veiligheid. Er wordt verwacht dat de kosten van dezelfde grootte orde zijn als voor systemen met actieve ventilatie en filtering, zijnde 40 MEUR aan investering (Cornelissen et al., 2013).

[6] Deze inschatting houdt uiteraard geen rekening met de vele op/afritten en aanwezig ventilatie systemen die de luchtkwaliteit in de tunnel zelf bevorderen.
[7] http://www.uctechnologies.nl/?p=20



Figuur 11 : HD Clean tunnel concept met recirculatie en filtering. Bron: http://www.uctechnologies.nl

2.4. SCHERMEN

Op basis van verschillende onderzoeksprojecten is geweten dat schermen langs snelwegen een positief effect kunnen hebben op de luchtkwaliteit. Schermen induceren extra turbulentie en zorgen voor een verticale lift van de vervuilde lucht. Hierdoor wordt een betere vermenging met hoger gelegen "schonere" lucht bewerkstelligd, waardoor de concentraties afnemen achter de schermen in vergelijking met de situatie zonder schermen. Dit wordt bevestigd in windtunnel studies (Heist et al., 2009) en CFD berekeningen (Hagler et al., 2011, 2010). Ook in het Nederlandse IPL onderzoek bleek uit veldtesten langs de Nederlandse A28 snelweg dat schermen een positief effect hebben. Onderstaande tabel geeft de effectiviteit weer voor schermen langs snelwegen voor NO_2, NO_x en PM_{10}, telkens voor wat betreft de wegbijdrage.

hoogte scherm	4 meter	7 meter
NO_2	14% (± 10%)	35% (± 26%)
NOx	20% (± 6%)	42% (± 13%)
PM_{10}	34% (± 25%)	45% (± 48%)

Gemiddeld effect op de wegbijdrage en onzekerheid (95% betrouwbaarheidinterval) van het vier meter hoge referentiescherm en het zeven meter hoge scherm op 10 meter achter het scherm in de Proeftuin Schermen

Figuur 12 : Tabel met effectiviteit van schermen langs snelwegen. Overgenomen uit (Hooghwerff et al., 2009) (Rapport IPL-1b, Toepassingsadvies Schermen, Rijkswaterstaat, Dienst Verkeer en Scheepvaart, Delft, Nederland). Merk op dat de hogere onzekerheid op de resultaten voor PM_{10} terug te wijten is aan de relatief lage wegbijdrage van PM_{10}.

Uit windtunnel onderzoek concludeerde TNO dat vergelijkbare of zelfs betere verbeteringen te behalen zijn met schermen dan met afzuiging van de tunnellucht. Voor de Gaasperdammertunnel in Amsterdam volstonden 5-6 m hoge schermen en gaven 12m hoge schermen een verbetering t.o.v. 70% afzuiging. Voor de Keizer Kareltunnel te Amstelveen werden vergelijkbare verbeteringen

gehaald met schermen van 9 m hoog (Huijben and Rangelrooij, 2011). Voor de afzuiging werd een schoorsteen van 20 m gebruikt voor de portaalopening.

Als passieve en dus relatief goedkope maatregel kunnen scherm potentieel kosten-effectief zijn in het reduceren van de concentraties op grondniveau. Wel is het zo dat de omgeving en de tunnelkenmerken een belangrijke invloed hebben op de effectiviteit. Ook de atmosferische condities kunnen een belangrijke rol spelen. Het positieve effect is niet altijd eenduidig (Ning et al., 2010).

2.5. BEBOUWING ROND DE TUNNELMOND

Gebouwen beïnvloeden de luchtstroming, creëren een versnelling langs de randen van het gebouw en zorgen voor mechanische turbulentie. Door goede positionering van gebouwen rond de tunnelportalen kan een betere dispersie worden bewerkstelligt. Het effect hiervan hangt echter af van de overheersende windrichting, type gebouwen (hoogbouw, laagbouw), geometrie en inpassing van het tunnelportaal en andere aanwezige structuren die het windveld beïnvloeden zoals vegetatie. Het is geweten dat hoogbouw op grondniveau kan zorgen voor sterke wind, wat een positief effect kan hebben op de concentraties, maar dan weer een negatief effect op het windcomfort (Blocken et al., 2012). Slechts een gedetailleerd onderzoek in windtunnels of via 3D rekenmodellen kan uitsluitsel geven over de impact en effectiviteit van deze maatregel. Er zijn geen standaardoplossingen mogelijk (Cornelissen et al., 2013). Bij de Ringland overkapping dient verder ook nog rekening gehouden te worden met het feit dat de overkappende structuur eventuele gebouwen dient te kunnen dragen.

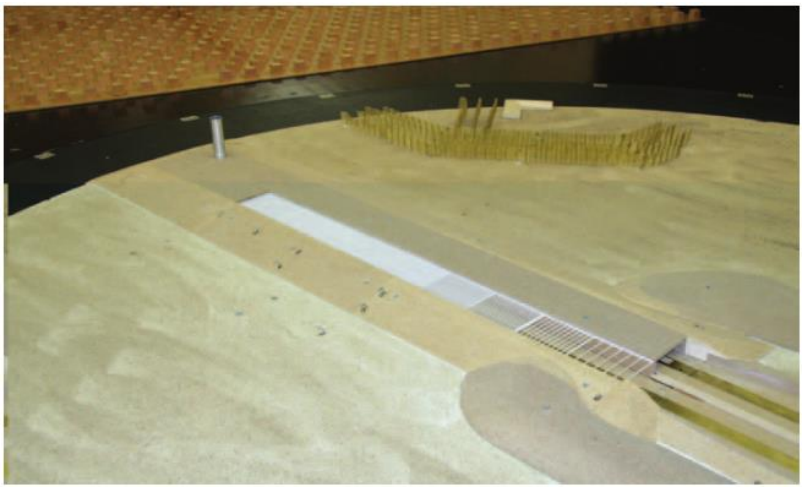
2.6. VERSCHOVEN TUNNELBUIS OP EINDE VAN DE TUNNEL

Gezien in het Ringland concept gewerkt wordt met twee tunnelsystemen per rijrichting, de DRW en de SRW, kan het interessant zijn om beide tunnels niet in een gezamenlijke pijp te laten uitkomen vooraleer het verkeer uit de tunnels rijdt. Wanneer de emissies uit beide pijpen niet op dezelfde plaats vrijkomen, zal de resulterende concentratiepiek ook uitgesmeerd worden. Hierbij dienen beide pijpen per rijrichting over een afstand van een paar 100 m verschoven te worden, overeenkomstig met de invloedssfeer. Er wordt aangeraden de dimensionering te bepalen op basis van een effectieve doorrekening van de luchtkwaliteit gezien de overheersende windrichting hierop een uitgesproken effect kan hebben.

Een vergelijkbaar effect kan bekomen worden door te werken met lichte (niet-dragende) halfopen overkappingen op het einde van de tunnels. Hierdoor zullen de geaccumuleerde emissies uit de tunnel niet op één plaats vrijkomen. De kostprijs van dergelijke overkappingen wordt op 50 MEUR/km ingeschat (Cornelissen et al., 2013; Hoekstra et al., 2009).

Openingen in de overkapping om emissies van de tunnel geleidelijk vrij te geven zijn waarschijnlijk minder geschikt in het Ringland concept gezien de bedoeling hier is om juist de emissies van de ring weg te nemen. Op het einde van de tunnels kan het echter wel overwogen worden om de emissies over een groter gebied te spreiden.

Er dient hierbij wel opgemerkt te worden dat schaalmodel onderzoek van TNO voor de A4 Delft-Schiedam en de Gaasperdammerweg tunnels met emissiedaken en wanden niet de verhoopte resultaten opleverde. Wel is er sprake van een meer geleidelijk concentratieverloop (Huijben and Rangelrooij, 2011).



Figuur 13 : Schaalmodel voor emissiedak in de windtunnel studie uitgevoerd door TNO, Nederland voor het Centrum Ondergronds Bouwen. Figuur overgenomen uit het COB rapport : (Huijben and Rangelrooij, 2011).

2.7. CONCLUSIES

Algemeen kunnen we concluderen dat er wereldwijd verschillende mogelijkheden onderzocht zijn om de luchtkwaliteit in de tunnels en ter hoogte van de tunnelportalen te verbeteren. Mirakeloplossing zijn tot nu toe nog niet gevonden. Anderzijds wordt er nog steeds onderzoek verricht naar nieuwe innovatieve technieken.

Door de complexiteit van de Ringlandtunnels met verschillende op/afritten dient een optimalisatie van het ontwerp te gebeuren op basis van de verwachtte verkeerstromen. Hiervoor is een rigoureuze verkeersmodelering nodig en een uitgewerkt ventilatieplan dat niet enkel rekening houd met luchtkwaliteit in de omgevingslucht, maar ook met luchtkwaliteit in de tunnel en de brandveiligheid. Deze optimalisatie mag niet los gezien worden van maatregelen die ook een invloed hebben op de verkeerstromen, zoals het omleiden of beperken van zwaar vrachtverkeer (ev. onder bepaalde omstandigheden), tolheffing e.d.

Studies in Nederland (Arnold Dix, 2006; Hoekstra and Schraa, 2009) concluderen dat passieve maatregelen die de dispersie van polluenten bevorderen te verkiezen zijn boven actieve maatregelen zoals afzuiging of filtering.

Dispersie-bevorderende maatregelen zijn hoe dan ook niet selectief (de concentraties van alle polluenten worden verlaagd) en vergen geen zware installatie of uitbatingskost.

- Aan de finale tunnelmonden (Antwerpen-West, Antwerpen-Noord, E19, A12 en E34/E313) kan het interessant zijn om te werken met verschoven tunnelbuizen, zeker voor de knooppunten Antwerpen-West en Antwerpen-Noord, waar de DRW en de SRW volgens voorliggend concept in dezelfde tunnel terug samenkomen. Bij verschoven tunneluitgangen (minstens over een afstand groter dan een paar 100 m, wat de typisch invloedssfeer is van een tunneluitgang), wordt de totale emissie uit de tunnel gespreid, waardoor wegbijdrage van de concentraties in het gebied evenredig afnemen. Wel is het zo dat het gebied met verhoogde concentraties hierdoor groter wordt. Doordachte ruimtelijke planning is hiervoor nodig.

- Emissiedaken/openingen aan de finale tunnelmondingen (niet langs het tracé) kunnen zorgen voor een meer geleidelijk verloop van de concentraties waardoor die niet zo hoog oplopen. TNO onderzoek toonde echter wel aan dat het gebruik van emissiedaken/wanden misschien niet zo effectief is als gedacht.
- Het gebruik van schermen is te overwegen gezien het bijkomende voordeel naar geluid en relatief lage exploitatiekost. Uit TNO windtunnelonderzoek bleek dat schermen een zelfde efficiëntie kunnen halen als het afzuigen van 70% van het debiet voor de tunnelmond.

Bij dispersie bevorderende maatregelen dient wel in rekening gebracht te worden dat de totale emissie in de atmosfeer dezelfde blijft. De concentraties aan de tunnelmonden nemen wel af in dit geval, maar de luchtverontreiniging wordt over een groter gebied uitgespreid.

Het gebruik van filter technieken en/of afzuigventilatie kan overwogen worden, hoewel dit in de praktijk minder evident is wegens een grotere installatie/exploitatie kost. Hoe dan ook is er veel onduidelijkheid over operationele kosten en installatiekosten, gerapporteerde bedragen durven sterk uit elkaar lopen. Verschillende studies claimen wel dat een significant deel van de kosten verbonden zijn aan energie consumptie (CETU, 2010). Men moet typisch rekenen op een exploitatiekost van een paar 100 kEUR/jaar tot 1 MEUR/jaar. Een investeringskost wordt begroot in de orde van een paar tientallen MEUR, afhankelijk van het type installatie en of de tunnel reeds voorzien was op een filterinstallatie dan wel dat ze nadien is bijgebouwd. De benodigde technische ruimte kan immers aanzienlijk zijn wegens de lage luchtsnelheid die nodig is voor het halen van voldoende rendement. Er dient hierbij vooral een afweging gemaakt te worden naar kost-efficiëntie van de verschillende mogelijke maatregelen. Dergelijke afweging dient uitgebreider onderzocht te worden en valt buiten het kader van deze studie.

Onder laboratorium omstandigheden wordt met luchtfilters typisch een efficiëntie van 90% gehaald. Toepassing van fijn stof filters op basis van Elektrostatische Precipitatie blijken in de praktijk een rendement van 65 % te halen, waarbij we ons voornamelijk baseren op zeer uitgebreide praktijktesten in Australië. Toepassing van NO_2 filters gebaseerd op actieve kool blijken in diezelfde praktijktesten een rendement van ~55 % te halen, hoewel met de nodige optimalisaties hogere rendementen mogelijk lijken. Er zijn de afgelopen jaren studies verschenen met enkele innovatieve concepten, maar de geclaimde resultaten zijn meestal representatief voor labocondities of kleinschaliger proeven. Hoewel hier een aantal interessante ideeën tussen zitten, zijn niet alle proeven succesvol gebleken en is verder onderzoek en praktijktesten noodzakelijk.

Bij het gebruik van filter technieken voor NO_2 dient echter wel rekening gehouden te worden met het feit dat filters met actief kool slechts een impact hebben op NO_2, maar niet op NO (AMOG (Roads and Maritime Services NSW), 2012; CETU, 2010). Er zijn claims dat een significant deel van de NO reeds geoxideerd wordt tot NO_2 door elektrostatische filters die meestal voorafgaan aan de gasfilters, waardoor producenten claimen een totale NO_x filter efficiëntie van 70 % te kunnen bereiken (CETU, 2010).

Het dient tenslotte duidelijk te zijn dat voor een uitgebreide afweging en analyse van de kost-efficiëntie van maatregelen aan tunnel monden, in het bijzonder voor Ringland, binnen het kader van deze studie geen ruimte was. Bij eventueel verder onderzoek dient dit ten gronde te worden bekeken, waarbij ook praktijkvoorbeelden beter bestudeerd dienen te worden. Een doorlichting en ev bezoek aan recent geïnstalleerde filterinstallaties in Italië (Cesene Tunnel) en Spanje (M30 in Madrid) lijkt aangewezen voor het verder evalueren van de haalbaarheid.

HOOFDSTUK 3. TUNNELMODEL RINGLAND

3.1. INLEIDING

Een belangrijke onderzoeksvraag in het Ringland dossier is de luchtverontreiniging die (extra) gecreëerd wordt ter hoogte van de tunneluitgangen. De overkapping zorgt er immers voor dat de verkeersemissies niet direct vrijkomen in de omgevingslucht maar door de natuurlijke ventilatie in de tunnel naar de uitgangen wordt geduwd. In dit hoofdstuk beschrijven we de berekeningen die zijn uitgevoerd om deze bijdragen te kunnen inschatten. Hiervoor werd zowel een analytisch model gebruikt, aangevuld met computational fluid dynamics (CFD) berekeningen, waarbij de tunnel geometrie explicit in 3D gemodelleerd werd.

3.2. BASISPRINCIPES TUNNELMODEL

Voor het berekenen van de verliesfracties aan de verschillende afritten van het Ringland complex is in het kader van deze studie een tunnelmodel ontwikkeld. We beschrijven hieronder de methodologie. Het zal blijken dat voor een correcte doorrekening de verkeersintensiteiten en de samenstellingen van het wagenpark belangrijk zijn. Deze cijfers kwamen echter slechts ter beschikking tijdens de uitvoering van het project, waardoor er voor de effectieve doorrekening van de verliezen voor de luchtkwaliteitsmodellering in HOOFDSTUK 4 gewerkt is met een vereenvoudigde versie van dit tunnelmodel. Dit bespreken we verder in § 3.3 en § 3.4, samen met een vergelijking met de resultaten van het volledige model.

Voor het benaderen van het probleem van de verliezen aan de uitritten zijn we te rade gegaan in de hydraulica, met name bij de Hardy-Cross methode (Cross, 1936) voor het dimensioneren van pompen en het berekenen van de debieten in systemen van pijpleidingen. We benaderen m.a.w. een verkeerstunnel als een hydraulisch vraagstuk waarbij we een systeem van pijpleidingen hebben met elk een debiet en een drukverlies (of winst).

In eerste instantie bespreken we hieronder het drukverlies in een verkeerstunnel t.g.v. wrijving met de wanden, de geometrie van de afrit en de drukwinst door het doorrijdend verkeer, het z.g.h. *piston effect*. Vervolgens bespreken we het volledige tunnelmodel.

3.2.1. VERLIES DOOR WRIJVING MET DE WANDEN

Door wrijving van de luchtstroming met de ruwe wanden van een tunnel zal een verlies van kinetische energie optreden. Het gekoppelde drukverlies ΔP_{frict} [Pa] wordt gegeven door :

$$\Delta P_{frict} = \frac{1}{2}\rho v^2 f \frac{L}{D_h}$$

waarbij

- ρ : de massadichtheid van lucht (1.2 kg/m^3)
- v : de windsnelheid in de tunnel [m/s]

- L, D_h : resp. de lengte van het tunnel segment en de hydraulische diameter (gegeven door $D_h = 4A/P$, met A het frontale tunneloppervlakte en P de tunnelomtrek of perimeter).
- f : een dimensie loze wrijvingsconstante, typisch 0.015 – 0.025 voor tunnels (Bring et al., 1997). Deze laatste kan effectief ook berekend worden op basis van het zgh. Moody-diagram, of op basis van een benaderingsformule (Miller, 1990), p191 :

$$f = 0.25 \Big/ \left[\log\left(\frac{k}{3.7D_h} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right)\right]^2$$

Waarin k de ruwheid van de tunnelwand (in m) is en Re het Reynolds getal[8] voor de stroming door de tunnel.

3.2.2. 'VERLIES' DOOR RIJDEND VERKEER

Het verkeer dat door een tunnelsegment rijdt, zal energie toevoegen aan de stroming in de tunnel (wanneer de rijsnelheid groter is dan de stroomsnelheid in de tunnel). Deze bijdrage kunnen we als volgt berekenen (Bring et al., 1997) :

$$\Delta P_{traf} = -\frac{\rho}{2A}|v_{traf} - v|(v_{traf} - v)\sum_{k=1}^{n} C_{d,k}A_{e,k}N_k$$

Hierin is :

- A : de frontale tunneldoorsnede
- v_{traf} : de rijsnelheid van het verkeer door de tunnel (we nemen dezelfde snelheid aan voor alle voertuigtypes)
- v : de windsnelheid in de tunnel
- $C_{d,k}$: de drag-coëfficiënt voor voertuigtype k, typisch 0.35 voor personenwagens en 0.96 voor vrachtwagens met oplegger[9].
- $A_{e,k}$: de effectieve frontale oppervlakte van voertuigtype k, typisch een 2 m^2 voor personenwagens en 6-7 m^2 voor vrachtwagens.
- N_k : het totale aantal voertuigen van het type k in het tunnel segment.

De laatste parameter kan eenvoudig berekend worden op basis van de verkeersintensiteiten (aantal voertuigen per uur), de lengte van het segment en de rijsnelheid van het verkeer. De som loopt verder over alle beschouwde voertuigtypes (die dus een verschillende drag coëfficiënt en een verschillende effectieve frontale oppervlakte hebben). In dit eenvoudig model maken we onderscheid tussen personen wagens en (zware) vrachtwagens.

Wanneer we bovenstaande relatie in iets vereenvoudigde vorm toepassen op een volledige tunnel, rekening houden met verliezen door de tunnel ingang en geen atmosferisch drukverschil tussen begin en einde van de tunnel aannemen[10], dan kunnen we effectief de sterkte van de stroming bepalen op basis van de vergelijking (Okamoto et al., 1998):

---

[8] $Re = vD_h/\nu$ met D_h de hydraulische diameter en ν de kinematische viscositeit voor lucht (1.568 x 10^{-5} m2/s) bij 300 K.

[9] http://en.wikipedia.org/wiki/Automobile_drag_coefficient

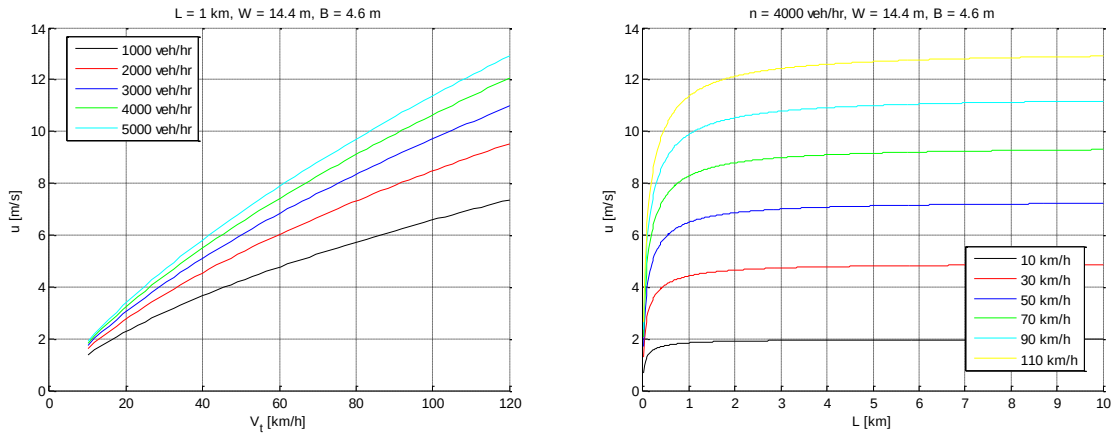
[10] Deze aanname zou bv. niet kloppen in bergachtig gebied waar het mogelijk is dat beide einden van de tunnelpijpen bovenkomen op

$$\left(1+\zeta_e+\lambda\frac{L}{D_h}\right)U_0^2=\frac{A_m n}{A_t}(V_t-U_0)^2$$

Waarin (Oettl et al., 2002) :

- ζ_e : een tunnelingang verliescoëfficiënt (~0.2),
- λ : een verliescoëfficiënt t.g.v. wrijving aan de tunnelwanden (~0.012 – 0.015).
- L : de tunnellengte
- A_t : het frontaal tunneloppervlak
- D_h : de hydraulische diameter van de tunnel, met $D_h = 4A_t/C$, waarin C de tunnel omtrek
- V_t : de snelheid van het doorrijdende verkeer
- U_0 : de snelheid van de uittredende stroming geïnduceerd door de voorstuwing van het verkeer.
- A_m : een equivalent (gemiddeld) frontaal oppervlak voor de voertuigen
- n : het aantal voertuigen in de tunnel.

Als functie van de snelheid van het doorrijdende verkeer kunnen we de uittredesnelheid berekenen. Windtunnel metingen (Chen et al., 1998) hebben uitgewezen dat de gemiddelde windsnelheid in tunnels ongeveer 1/3 is van de rijsnelheid. Wat inhoudt dat voor een tunnel met een gemiddelde rijsnelheid van 50, 70 en 90 km/h, we een windsnelheid in de tunnel van resp. ongeveer 4.6, 6.5 en 8.3 m/s hebben. In de praktijk vinden we voor typisch stedelijke tunnels met rijsnelheden boven 60 km/h gemiddelde gemeten windsnelheden van 3.7 – 6.0 m/s (NHMRC, 2008). Een snelheid van 5 m/s lijkt een goed gemiddelde te zijn.



Figuur 14 : Grafische weergave van de "piston vergelijking", waarbij we typische tunneldimensies van de SRW genomen hebben. In de linker figuur werden een aantal curves geplot als functie van de rijsnelheid voor een vaste tunnel lengte van 1 km en variërend aantal voertuigen per uur. In de rechterplot werd uitgegaan van een vast aantal voertuigen per uur (4000) en de windsnelheid als functie van de tunnel lengte voor een aantal rijsnelheden geplot. In beide plots werd uitgegaan van een vloot van enkel auto's (met een effectieve oppervlakte van 2 m^2).

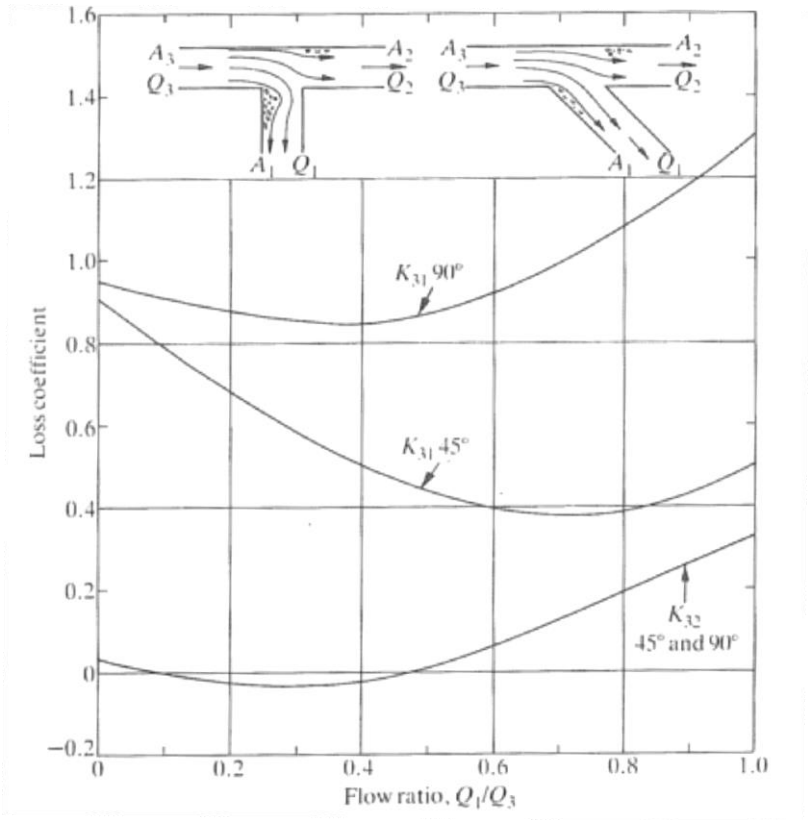
Uit bovenstaande eenvoudige grafische voorstellingen zien we ook dat de finale windsnelheid in een tunnel typisch reeds na 1 à 2 km bereikt wordt. We zien uit het rechterpaneel van bovenstaande Figuur 14 dat er zich relatief vlug een evenwicht instelt, waardoor de windsnelheid in de tunnel niet langer toeneemt naarmate de tunnel langer wordt.

3.2.3. VERLIES DOOR GEOMETRIE VAN DE AFRIT

Tenslotte is het zo dat er zich ten gevolge van de geometrie van een afrit ook extra verliezen kunnen voordoen. Dergelijke verliezen worden typisch gegeven middels een verlies coëfficiënt K, op basis waarvan het drukverlies kan berekend worden :

$$\Delta P_{TJunc} = \frac{1}{2} K \rho v^2$$

Zoals in Figuur 15 wordt aangegeven, zijn er in het geval van een "afrit" 2 coëfficiënten te definiëren, eentje voor de doorgaande stroming K_{32}, en eentje voor de afrit : K_{31}.



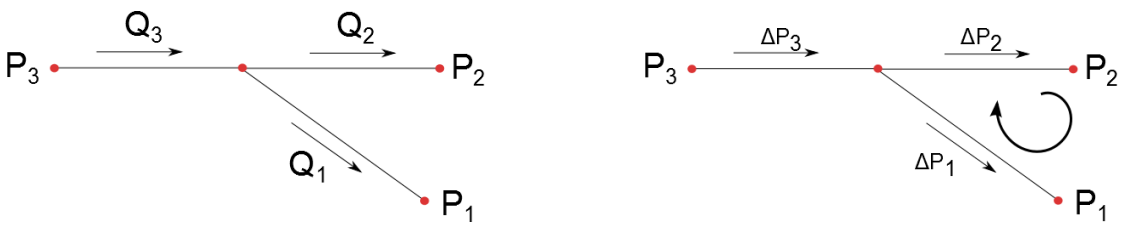
Figuur 15 : Verliescoëfficienten voor een scherpe bocht in een pijpleiding als functie van de verhouding van het debiet Q_1/Q_3. Figuur uit (Miller, 1990) p. 91. De figuur geeft de drukverlies termen voor een T-splitsing en een 45° bocht.

De grafiek geeft beide coëfficiënten als functie van de verhouding van het debiet Q_1/Q_3. De oorsprong van deze verliestermen zit in het ontstaan van turbulentie en mogelijke recirculatie zones aan de afbuiging waardoor dissipatie van energie optreedt.

Het is echter zo (Bring et al., 1997) dat deze verliescoëfficiënten voor verkeerstunnelsystemen zeer onzeker zijn. De waarden die in de literatuur terug te vinden zijn, zijn typisch voor normale hydraulische leidingen waarin geen stroming geïnduceerd wordt door vb. rijdend verkeer. Verkeer zal voor extra turbulentie zorgen wat de verliescoëfficiënten onzeker maakt. Verder zijn de hoeken tussen de doorgaande tunnelpijp en de afrit veel kleiner dan in typische hydraulische pijpleidingen (denk vb. aan een T-stuk). Daarom is in de praktijk een goede validatie met metingen wenselijk.

3.3. OPSTELLEN TUNNELMODEL

In de voor Ringland geïmplementeerde rekenmethode stellen we een verkeerstunnel voor door een aaneenschakeling van segmenten (N_s in totaal) en knooppunten (N_n in totaal waarvan $N_{n,int}$ het aantal interne knooppunten, i.e. knooppunten die niet in contact staan met de buitenlucht en dus dienen opgelost te worden). In elk knooppunt is de druk gedefinieerd en op elk segment de luchtsnelheid, geometrie van de tunnel en intensiteit, rijsnelheid en samenstelling van de verkeersvloot. Voor elke knoop leggen we de wet van behoud van massa op. Dit houdt in dat bij een afsplitsing van de tunnel de som van de debieten (met correct teken) gelijk dient te zijn aan 0. In onderstaande figuur is dit voor een individuele tunneluitrit geïllustreerd. Het debiet (in m^3/s) van de luchtverplaatsing wordt gegeven door resp. Q_3 voor de tunnel voorafgaand aan de splitsing/uitrit, Q_2 voor het debiet van de doorgaande tunnel en Q_1 voor het debiet van de afrit/splitsing.



Figuur 16 : Schematische voorstelling van het rekenmodel voor een tunneluitrit.

Op de splitsing zelf geldt behoud van massa, met name:

$$Q_3 = Q_2 + Q_1$$

Of uitgedrukt aan de hand van de frontale tunneloppervlakte :

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 + A_3 v_3$$

Waarin A_i de frontale oppervlakte in m^2 van het tunnelsegment is en v_i de gemiddelde windsnelheid in dat segment. Naast behoud van massa geldt ook behoud van energie. Dit wil zeggen dat de som van de totale drukverschillen over een gesloten loop in het netwerk gelijk moet zijn aan 0. In het schema dat we hierboven in Figuur 16 (rechts) hebben opgenomen, betekent dit dat op de getekende loop :

$$\Delta P_2 + (P_1 - P_2) - \Delta P_1 = 0$$

Waarbij ΔP_2 het drukverlies in de doorgaande tunnel en ΔP_1 het drukverlies in de uitrit. $P_1 - P_2$ geeft het verschil in totale druk tussen het eindpunt van de doorgaande tunnel en de tunneluitrit. Wanneer we aannemen dat er geen verschil is in statische druk, dan kunnen we schrijven :

$$\Delta P_2 - \Delta P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 - \frac{1}{2}\rho v_2^2 = 0$$

Wat samen met de bovenstaande vergelijking van massabehoud een niet lineair stelsel[11] van 2 vergelijkingen en 2 onbekenden geeft dat iteratief kan opgelost worden naar v_2 en v_1 of de debieten Q_2 en Q_1 in de doorgaande tunnel en de uitrit. De verhouding Q_1/Q_3 geeft ons bijgevolg de gezochte fractie van het debiet dat uit de tunnel treedt.

Behoud van energie kan ook per segment worden opgelegd, waarbij het drukverschil tussen de begin en eindnode van een segment gelijk moet zijn aan het drukverlies op dat segment. Deze methode is gekozen voor het oplossen van het volledige Ringland tunnelmodel. Het probleem reduceert zich dus tot het specifiëren van de druk"verliezen" op elk segment. Deze verliezen zijn hierboven reeds besproken.

De verschillende segmenten van het gekoppelde tunnelmodel worden voor zowel druk en luchtsnelheid aan elkaar gekoppeld door middel van een set van $N_s+N_{n,int}$ niet lineaire vergelijkingen met evenveel onbekenden. Het stelsel is niet lineair en dient dus iteratief te worden opgelost. Hiervoor maken we gebruik van het MATLAB software pakket[12]. De implementatie van dit gekoppelde tunnelmodel hebben we "VIRTUM" genoemd, VITO Road Tunnel Model.

We merken op dat dezelfde techniek ook in (Colella et al., 2009) wordt toegepast voor het koppelen van een analoog 1D tunnel model aan 3D simulaties van bepaalde stukken tunnel. Daardoor wordt een inline gekoppelde simulatie bekomen van een analytisch tunnelmodel en een CFD berekening van een nader te bestuderen stuk tunnel. Dergelijke aanpak zou ons echter binnen het kader van dit project te ver leiden (zie verder), maar diende wel, samen met het werk van (Jacques, 1991), als inspiratie voor de hier beschreven rekenmethode.

In het tunnelmodel wordt inzake de vlootsamenstelling onderscheid gemaakt tussen 3 categorieën, overeenkomstig met de categorieën die in de mobiliteitscijfers terug te vinden zijn: personenwagens, lichte vracht, zware vrachtwagens. We gegeven telkens de aerodynamische drag coëfficient en het effectief aerodynamisch oppervlak mee (cfr. § 3.2.2). Voor de waarden van de aerodynamische drag beroepen we ons op waarden uit de literatuur[13]. Uiteraard is er een verschil tussen verschillende types wagens en zijn de gepresenteerde waarden te interpreteren als gemiddelden.

Tabel 3 : Aerodynamische parameters per voertuigklasse gebruikt in het tunnelmodel.

	Personenwagens	***Lichte vracht***	***Zware vracht***
Aerodynamische drag coëfficiënt, C_d	0.35	0.70	0.96
Aerodynamische oppervlakte, A_{eff} [m^2]	2.0	4.0	6.0

Er wordt momenteel geen onderscheid gemaakt in rijsnelheid tussen de verschillende voertuigcategorieën. We nemen aan dat er op de SRW 70 km/h gereden wordt en op de DRW 90 km/h, resp. 50 en 70 km/h op de afritten. We baseren ons hiervoor om de maximum snelheden zoals vooropgesteld door Ringland. Het is moeilijk in te schatten wat de effectieve rijsnelheden zullen zijn voor het verkeer in de tunnels zonder rigoureuze verkeersmodellering. Voor de wrijvingsverliezen baseren we ons op bovenvermelde formule uit (Miller, 1990), zie § 3.2.1.

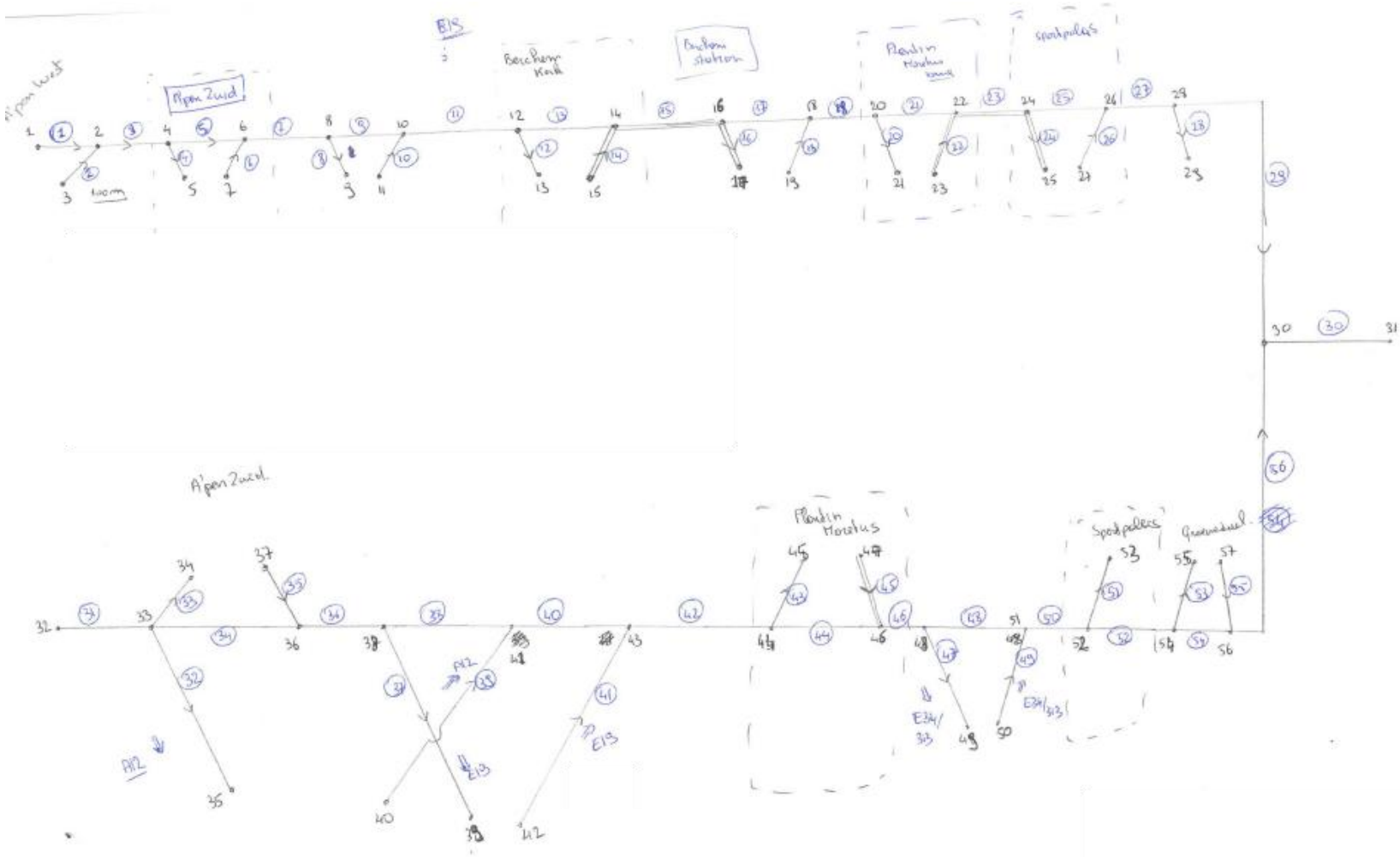
[11] Merk op dat ten gevolge van de kwadratische term in v, de drukverliezen ook op niet-lineaire manier van de stroomsnelheid kunnen afhangen.
[12] http://nl.mathworks.com
[13] http://en.wikipedia.org/wiki/Drag_coefficient

We dienen hierbij op te merken dat in deze fase van het onderzoek geen rekening gehouden is met mogelijke ventilatie systemen. Voor een realistische simulatie dient een volledig tunnelmodel opgesteld en doorgerekend te worden, waarbij ook ventilatieschachten en mogelijke connecties tussen de tunnels van beide rijrichtingen in rekening gebracht worden.

Onderstaand schema in Figuur 17 geeft de opgeschaalde modelvoorstelling van het complex van de SRW en DRW richting Nederland. De exacte karakteristieken van de verschillende nodes en segmenten zijn in appendix opgenomen, waarbij hoogte, breedte, lengte, rijsnelheid, aantal voertuigen per categorie (aantallen per uur) en het aantal rijstroken gegeven wordt. Het verkeer dat zich op de afritten bevindt zal in de tunnel zelf ook voor een beperkt aanzuigeffect zorgen. Daarom moet ook de lengte van de afrit zelf in rekening gebracht te worden. We nemen hiervoor 100 m aan. Het dient gezegd dat een aantal van de parameters van bepaalde segmenten ingeschat zijn op basis van expert judgement gezien er tijdens het uitvoeren van deze studie nog geen voldoende gedetailleerde gegevens m.b.t. Ringland beschikbaar waren of verkeersopdelingen tussen op/afritten niet eenduidig konden worden afgeleid uit de cijfers van VECTRIS.

Voor het correct inschatten van de debieten in een tunnel is sowieso een volledig tunnelmodel noodzakelijk waarin details van geometrie, verkeersstromen en ventilatie voldoende gekend zijn (Bring et al., 1997; Colella et al., 2009). De doorrekening van het volledig gekoppelde tunnelmodel is daarom slechts kunnen geschieden nadat de inschattingen van de verkeersstromen beschikbaar gemaakt zijn door VECTRIS. Jammer genoeg was het wegens het krappe tijdskader van deze studie niet mogelijk om deze resultaten te gebruiken voor de doorrekening naar luchtkwaliteit in HOOFDSTUK 4. Voor deze modellering werd met de vereenvoudigde rekenmethode voor één enkele knoop gewerkt, die hierna in §3.4 beschreven is.

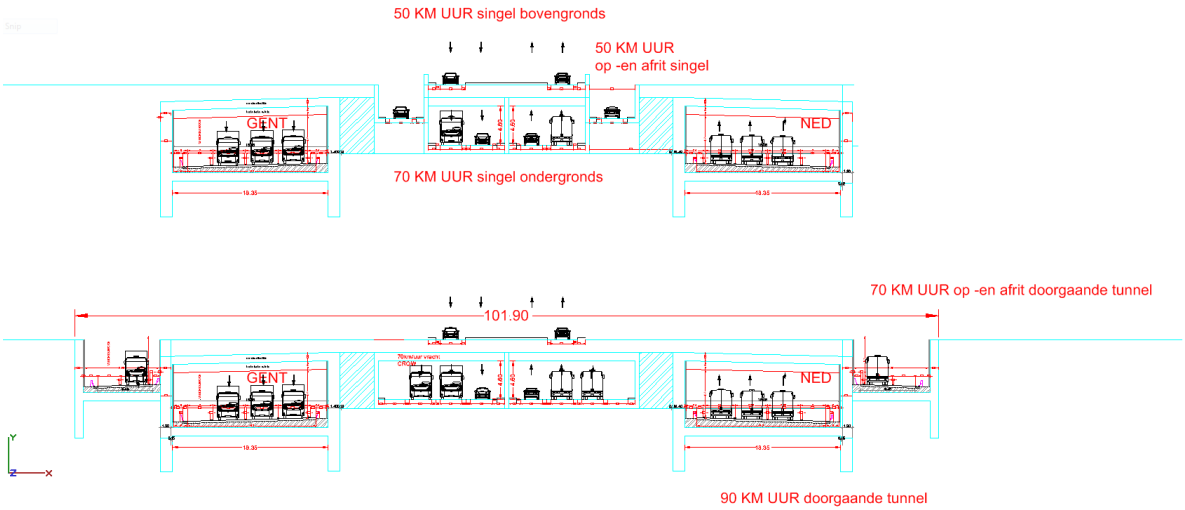
Het is verder ook zo dat deze berekeningen momenteel niet gevalideerd of gekalibreerd zijn met metingen en dus inschattingen blijven. Zeker gelet op de complexiteit van het beoogde Ringland tunnelsysteem is een goede validatie/kalibratie geen eenvoudige opdracht. De auteurs zijn op de hoogte van een schaalmodelproef uitgevoerd door de Université de Louvain voor de Brusselse tunnels (Jacques, 1991; Jacques and Possoz, 1996), waarin een gelijkaardige methodiek wordt toegepast. Op het ogenblik van schrijven zijn we er echter nog niet in geslaagd om hierrond een modelvergelijking op te zetten. Dit punt verdient verder onderzoek.



Figuur 17 : Knooppuntenschema voor Ringland richting Nederland (SRW+DRW). SRW is bovenaan getekend, te beginnen bij knooppunt 1 (Antwerpen-West). De DRW is onderaan afgebeeld te beginnen bij knooppunt 32. Beide tunnels komen dan samen in knooppunt 30 en terug boven in knooppunt 31, ter hoogte van Antwerpen Noord. De verschillende op/afritten complexen zijn op de figuur aangegeven.

3.4. VEREENVOUDIGD ANALYTISCH MODEL VOOR INSCHATTING VAN DE VERLIEZEN AAN DE UITRITTEN

Zoals reeds toegelicht, is voor het inschatten van de verliezen aan de afritten een inschatting nodig van de verkeersvolumes. Gezien deze cijfers niet tijdig beschikbaar waren in deze studie, is gewerkt met een vereenvoudigde versie van het tunnelmodel, waarbij we de fracties berekenden op basis van één enkele afrit zoals afgebeeld in Figuur 16. Voor de geometrie baseren we ons op de voorlopige plannen aangeleverd door Stramien (dd. Februari 2015), waarbij dwarsdoorsnedes met hun afmetingen beschikbaar zijn voor respectievelijk de SRW tunnel voor lokaal verkeer (met snelheidsbeperking tot 70 km/h) en de DRW tunnel voor doorgaand verkeer (90 km/h).



Figuur 18 : Dwarsdoorsnede voor de Ringland tunnels. Bovenaan de situatie ter hoogte van een uitrit voor lokaal verkeer. Onderaan de situatie is ter hoogte van een afrit in de tunnel voor doorgaand verkeer.

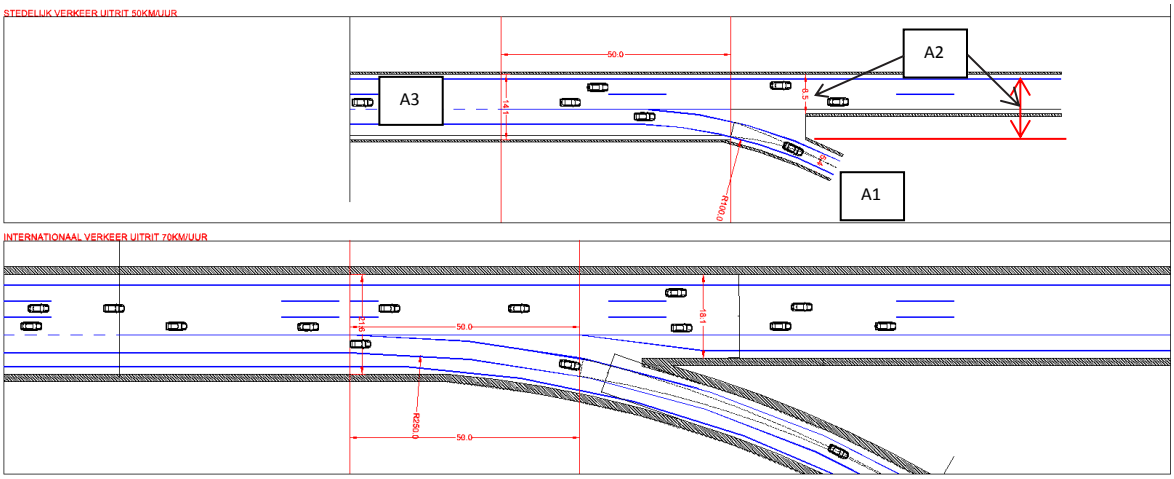
Er werden verkeersintensiteiten en configuratie van de tunnels aangenomen zoals aangegeven in Tabel 4. Hoewel de absolute waarde van de verkeersintensiteiten waarschijnlijk een onderschatting is voor de werkelijkheid, is de verhouding tussen de verschillende takken het belangrijkst. We veronderstellen dat 20 % van het verkeer de uitrit neemt (in het vereenvoudigde model) en waarbij op de SRW zich geen zwaar vrachtverkeer bevindt. De dwarsdoorsnede in Figuur 18 geeft een basis configuratie voor de uitrit aan, waarbij de uitvoegstrook frontaal op de tunnel aansluit. Hierbij versmalt de SRW ter hoogte van een op/afrit naar 8.5 m i.p.v. 14.4 m voor de afrit. Een mogelijk alternatief hiervoor is om gebruik maken van laterale uitritten, waarbij de uitrit lateraal of zijdelings op de tunnel aansluit. Deze configuratie is afgebeeld in onderstaande Figuur 19. De tunneluitrit vertrekt met een boog vanaf de doorgaande tunnelpijp. De minimum straal van deze afbuiging is afhankelijk van de snelheid van het verkeer. Voor een uitrit van de tunnel voor lokaal verkeer werd gewerkt met een snelheidsbeperking van 50 km/h en een afbuig straal van 100 m. Voor de tunnel voor doorgaand verkeer is uitgegaan van 70 km/h ter hoogte van de uitrit en een afbuigstraal van 250 m. Deze waarden (zie Figuur 19) werden aangereikt door Stramien op basis van een detailuitwerking van de uitrit door het landschapsarchitecten bureau Omgeving (Maarten Moers).

In het vereenvoudigd model gaan we voor de eenvoud uit van “zeer” lange, gelijke wegsegmenten in alle 3 de benen van de uitrit. Deze lengte wordt geven als het aantal keer (N_{Dh}) de hydraulische diameter van de tunnelpijp. We stelden vast dat er een kleine afhankelijkheid is, maar dat deze waarde convergeert naar een vaste verhouding bij grote waarden voor N_{Dh}. Uiteraard zijn de 3 tunnel secties niet even lang, maar gezien de convergentie bij grote N_{Dh} en we ons in het model voor de uittredende massaflux beperken tot 1 intersectie, lijkt ons deze aanname, hoewel waarschijnlijk aan de conservatieve kant, te verdedigen.

Tabel 4 : Aannames voor de configuratie van een afritcomplex van SRW en de DRW. De Sectie verwijst naar het segment voor (3) en na (2) de afrit en de eigenlijke afrit (1). W is de breedte, H de hoogte, v_{traf} de snelheid van het verkeer en n_{cars}, n_{trck} resp. het aantal personenwagen en vrachtwagens.

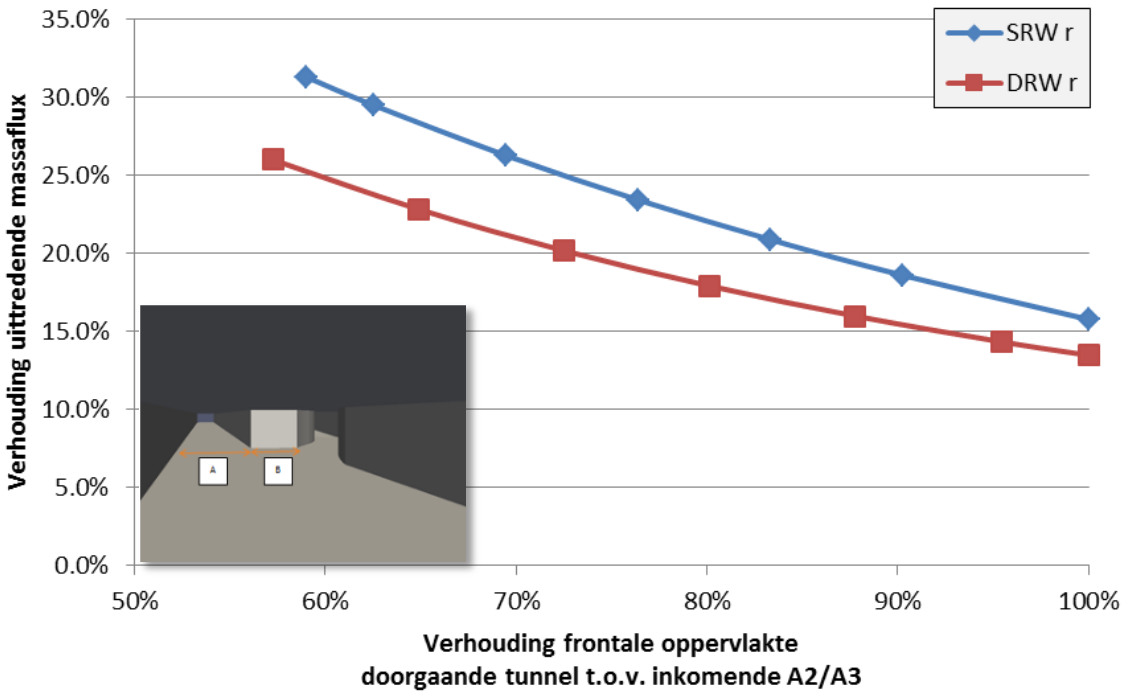
	SRW			***DRW***			***Eenheden***
Sectie:	**3**	**2**	**1**	**3**	**2**	**1**	
W	14.4	14.4	5.4	26.2	26.2	6.45	m
H	4.6	4.6	4.6	6.7	6.7	6.7	m
v_{traf}	70	70	50	90	90	70	km/h
n_{cars}	5000	4000	1000	5000	4000	1000	#/h
n_{trck}	0	0	0	2000	1600	400	#/h

Merk op dat in de onderstaande Figuur 19 voor de schets van de SRW (bovenaan) er niet helemaal sprake is van een laterale uitrit gezien er op de figuur nog een frontale muur aanwezig is. Indien we deze muur echter weghalen (zodat de dimensies van de doorgaande tunnel gelijk blijven, zoals aangeduid door de rode pijl), dan kan eventueel ruimte voorzien worden voor het aanbrengen van filtersystemen. Een voordeel hierbij zou zijn dat we gebruik maken van de natuurlijke stroming in de tunnel en dus minder lucht actief dienen aan te zuigen doorheen een potentiële filterinstallatie. Dit hypothetisch concept is verder uitgewerkt in §3.7.



Figuur 19 : Alternatieve geometrie voor de uitritten van de singel en de tunnel voor doorgaand verkeer. Hier wordt gebruik gemaakt van een laterale uitrit met een uitvoegstrook. De respectievelijke frontale oppervlaktes werden aangegeven op de figuur.

Met deze instellingen komen we finaal tot een uittredende massaflux verhouding (Q_1/Q_3) van **15.7 %** voor de SRW en **13.4 %** voor de DRW. Hierbij zijn we telkens uitgegaan van een laterale uitrit, m.a.w. waar de fysische tunnelbreedte van de doorgaande tunnel gelijk blijft en de uitrit zijwaarts op de doorgaande tunnelkoker aansluit. Deze verhouding is zeer bepalend factoren voor de verliezen aan de uitritten. We geven deze hieronder grafisch weer in Figuur 20.



Figuur 20 : Afhankelijkheid van de uittredende massaflux verhouding Q_1/Q_3 als functie van de verhouding A_2/A_3 van de frontale oppervlakte van de doorgaande tunnel t.o.v. de inkomende tunnelpijp bij vaste breedte van de uitrit. Op de 3D schets is dit aangegeven als de verhouding

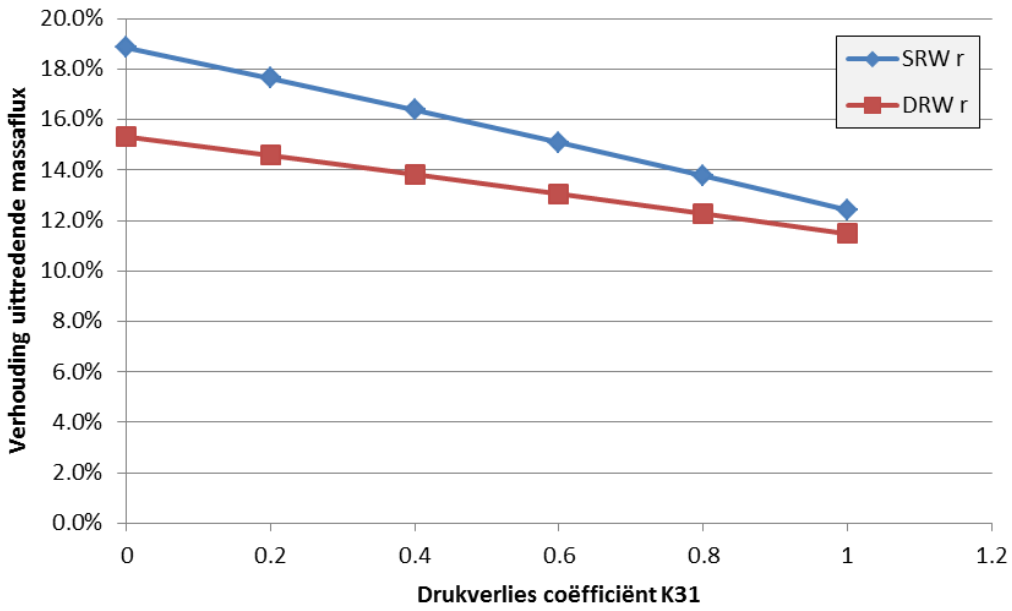
A/(A+B).

We komen hierop in het volgende hoofdstuk nog terug, maar het is duidelijk dat een doorlopende tunnelpijp voor doorgaand verkeer (A_2/A_3 verhouding 100%) sterk te verkiezen is gezien het verlies aan de uitgang ongeveer halveert, van zo'n 30% naar 15% voor de typische SRW configuratie en van zo'n 25 naar 13 % voor de typische DRW configuratie. Voor de DRW is de afhankelijkheid iets minder, maar ook zeer uitgesproken.

Tot slot dienen we nog de nodige opmerkingen te maken bij de **onzekerheden** en de toepasbaarheid van de rekenmethode :

- We haalden reeds de onzekerheid aan bij het inschatten van de drukverliescoëfficiënten K_{31} en K_{32} t.g.v. de geometrie van de afritten (zie § 3.2.3). Een gevoeligheidsanalyse voor een gebruikte configuratie voor een afrit van de stedelijke ringweg leerde dat dit inderdaad een impact heeft op de uittredende massaflux. Deze gevoeligheid is weergegeven in Figuur 21 en bedraagt **+/- 3 à 4%** op de uittredende massaflux verhouding. Voor het

Ringlandmodel zullen we uitgaan van een gemiddelde waarde voor K_{31} van **0.5** (zie ook Figuur 15 hierboven).



Figuur 21: Variatie in de verhouding van de uittredende massaflux in functie van de drukverlies coëfficiënt K31.

- In de rekenmethode die we vooropstelden, houden we geen rekening met ventilatie of andere geometrische features in de tunnelpijpen die een impact kunnen hebben op het drukverloop in de tunnel.
- Een finale bron van onzekerheid is het feit dat we op het tijdstip van modellering niet beschikten over een volledige verdeling van het verkeer over de verschillende tunnelsegmenten.

3.5. VERGELIJKING RESULTATEN GEKOPPELD MODEL VS. VEREENVOUDIGD MODEL

Een directe vergelijking tussen het vereenvoudigd tunnelmodel op basis van één enkele afrit en de gekoppelde versie is moeilijk. In de opgeschaalde versie van het tunnelmodel is er immers sprake van een koppeling tussen de verschillende segmenten. Toch geeft een vergelijking tussen beide rekenmethodes een inschatting van de nauwkeurigheid van de inschatting van de verliezen die gebruikt zijn voor de effectieve doorrekening van de luchtkwaliteitsscenario's in HOOFDSTUK 4.

De vergelijking van de verliezen aan de afritcomplexen tussen beide methodes is hieronder opgenomen in Tabel 5.

Tabel 5 : Vergelijking van de uittredende massaflux op basis van het volledig gekoppeld tunnelmodel (VIRTUM) en het vereenvoudigd model dat effectief gebruikt werd voor de doorrekening van de luchtkwaliteitsscenario's. Merk op dat de cijfers enkel gegeven zijn voor het gekoppelde model voor de SRW/DRW richting Nederland (afgekort als WON-west/oost/noord).

		Eenvoudig model	*VIRTUM*	*verschil*
A'pen zuid	SRW-WON	15.2%	13.0%	-2.2%
Singel	SRW-WON	15.2%	23.5%	8.3%
Berchem Kerk	SRW-WON	15.2%	12.5%	-2.7%
Berchem Station	SRW-WON	29.8%	35.4%	5.6%
Plantin Moretus	SRW-WON	15.2%	10.1%	-5.1%
Sportpaleis	SRW-WON	29.8%	54.3%	24.5%
Groenendaal	SRW-WON	15.2%	35.0%	19.8%
A'pen Zuid	DRW-WON	20.7%	-0.5%	-21.2%
A12 JDV1 Zuid	DRW-WON	20.7%	25.5%	4.8%
E19 Craeybeckx-Zuid	DRW-WON	26.5%	46.4%	19.9%
Plantin Moretus	DRW-WON	16.8%	4.8%	-12.0%
E313 Rivierenhof	DRW-WON	49.8%	42.8%	-7.0%
Sportpaleis	DRW-WON	16.8%	25.8%	9.0%
Groenendaal	DRW-WON	17.4%	14.4%	-3.0%

Voor de meeste van de uitritten blijft het verschil tussen het gekoppeld model en de vereenvoudigde inschatting van de verliezen per afrit beperkt tot 5-6%. Voor een aantal afritten is het verschil echter groter, met name voor het Sportpaleis (+24% t.o.v. het vereenvoudigd model) en Groenendaal (+19.8%) in de SRW en Antwerpen Zuid (-21.2%), Plantin Moretus (-12.0%) en de afsplitsing naar de E19 (+19.9%) in de DRW. Let wel dat het hier telkens om de verliezen per afrit gaan, niet de verschillen in fracties van de totale tunnelemissie, die uiteraard (veel) kleiner zullen zijn.

Voor de afrit Sportpaleis in de SRW kon echter zonder volledige verkeersmodellering geen goede inschatting gemaakt worden van de fractie van het verkeer dat de uit de tunnel rijdt, waardoor deze cijfers zeer onzeker blijven. Analoge overwegingen gelden voor de andere afritten, waar telkens een inschatting gemaakt is van de verdeling van de verkeersstromen.

Hoe dan ook leert de vergelijkingsoefening dat het belangrijk is om over een goede verkeersmodellering te beschikking bij het inschatten van de verliezen langsheen het tracé. Het verdient aanbeveling deze aanpak verder uit te werken aan de hand van een rigoureuze verkeersmodellering en verdere validatie van de methodiek.

3.6. CFD SIMULATIES RINGLAND AFRITCOMPLEX

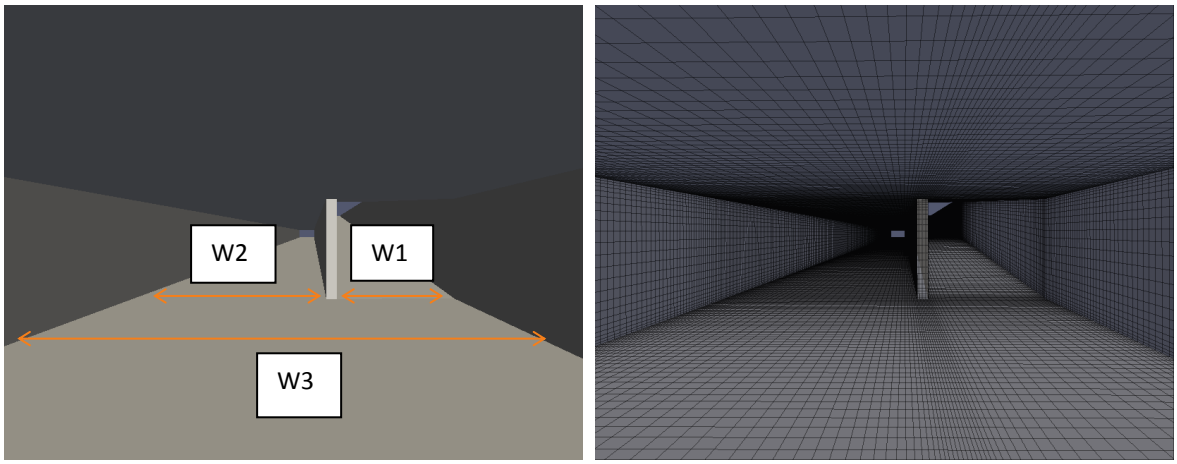
Ter ondersteuning en controle van de analytische berekeningen van de verliezen aan de Ringlandafritten, hebben we de stromingspatronen ook proberen in te schatten aan de hand van een numeriek stromingsmodel (Computational Fluid Dynamics, CFD). In een dergelijk model wordt de 3D geometrie van de tunnelafrit explicit gemodelleerd, waardoor we uitspraken kunnen doen over de impact van de geometrie en tunnel configuratie op de verliezen. Hierbij dienen we reeds

onmiddellijk de opmerking te maken dat het moeilijk is om op basis van deze berekeningen uitspraken te doen over de absolute verliezen. Uit vorige paragraaf is duidelijk geworden dat deze afhankelijk zijn van de specifieke locatie in het volledige tracé en de verdeling van verkeersvolumes op de afslag. Onder meer in (Colella et al., 2009) wordt daarom gebruik gemaakt van een gekoppelde aanpak waarbij een 1D tunnelmodel gecombineerd wordt met een 3D modellering van bepaalde segmenten langsheen het tracé. Dit zou ons hier te ver leiden. Verder is het ook zo dat het expliciet in rekening brengen van het verkeer in de tunnel niet onbelangrijk is gezien het verkeer de luchtstroming en in hoge mate ook de mechanische turbulentie in de tunnel gaat induceren. Ook dit in rekening brengen zou ons hier te ver leiden.

Voor deze simulaties maken we gebruik van de OpenFOAM toolkit[14]. We bespreken eerst de opzet van de model simulaties en vervolgens de resultaten. We bespreken in een laatste sectie ook een uitwerking van een idee rond potentiële filtermaatregelen die we in de Ringland tunnels kunnen aanbrengen.

3.6.1. GEOMETRIE VAN DE TUNNEL EN REKENROOSTER

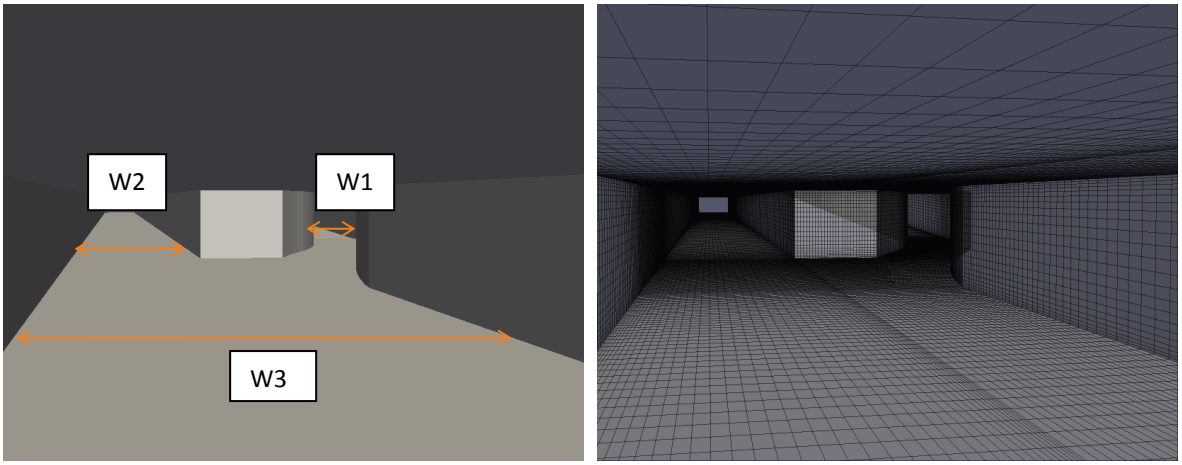
Voor de geometrie van de CFD simulaties vertrekken we van de plannen aangeleverd door Ringland en afgebeeld in Figuur 18 en het alternatief in Figuur 19. Deze tunnelafrit configuraties werden in een virtueel 3D model getekend. We onderscheiden een scenario met een frontale afrit en een scenario met een laterale afrit. Zoals reeds hoger besproken, is vooral de breedte[15] en de verhouding van de breedtes tussen doorgaande tunnel, afrit en inkomende tunnel van belang.



Figuur 22: Screenshot van de gemodelleerde 3D tunnel configuratie met frontale uitrit. Op de rechterfiguur is het rekenrooster afgebeeld van de simulatie.

In onderstaande Figuur 23 is de frontale uitrit vervangen door een zijlingse uitrit. In de configuratie kan makkelijk de breedte van het frontale stuk (W_3-W_2 in de figuur) aangepast worden. Voor een volledig laterale uitrit zal W_3 gelijk zijn aan W_2.

[14] http://www.openfoam.org/
[15] Meer precies: oppervlak, maar we gaan ervan uit dat de tunnels even hoog zijn.



Figuur 23 : Screenshot van de gemodelleerde 3D tunnel configuratie met laterale uitrit. Op de rechterfiguur is het rekenrooster afgebeeld van de simulatie. Bij een volledig laterale uitrit is W_3 gelijk aan W_2.

De rekenroosters werden opgemaakt met de GMSH software (http://geuz.org/gmsh/), waarbij het rekenrooster telkens verfijnd werd aan de wanden.

3.6.2. RANDVOORWAARDEN VAN DE SIMULATIES

De aanwezige turbulentie in de tunnel wordt veroorzaakt door het doorrijdende verkeer. Hierdoor zullen de polluent concentraties in de tunnel nagenoeg volledig gemengd zijn in het vlak loodrecht op de tunnelrichting. In de CFD simulaties zullen we echter de individuele rijdende auto's niet als dusdanig modelleren gezien dit ons binnen het kader van dit project veel te ver zou leiden. We simuleren enkel de tunnel ter hoogte van een uitrit en nemen hierbij een homogeen wind- en turbulentieprofiel aan, aan de instroomrand van onze simulatie. Bij het aanleggen van een homogeen windveld is het echter zo dat er zich in de tunnel een typisch parabolisch windsnelheidsprofiel zal ontwikkelen met een grenslaag aan de wanden van de tunnel. Dit profiel ontwikkelt zich typisch over een afstand die gegeven wordt door de hydrodynamische lengte $L_h = 1.359 D_h Re^{0.25}$. Met D_h de hydraulische diameter van de tunnel en Re het Reynolds getal. Typische waarden voor L_h voor de dimensies van de SRW en DRW zijn hier 400 – 600 m. Gezien zich in de praktijk in een verkeerstunnel hoogstwaarschijnlijk nooit een mooi ontwikkeld stromingsprofiel zal vormen wegens de sterke verstoring door het doorrijdend verkeer, kozen we er in onze simulatie voor om deze "entry" lengte te beperken tot 200 m voor alle simulaties en de gevoeligheid ervan na te gaan voor wat betreft de uittredende massaflux. Deze invloed werd als verwaarloosbaar vastgesteld t.o.v. de sowieso aanwezig onzekerheid, i.e. < 0.5% van de uittredende massaflux bij een L_h van 800 m i.p.v. 200 m.

Gezien we in de CFD simulatie gebruik zullen maken van het k-ε model voor turbulentie, dienen we ook voor de turbulente intensiteit k en dissipatie ε waarden op te geven aan de instroom. We nemen hierbij een bepaalde graad van turbulentie[16] $I = u'/\bar{u}$ aan in de tunnel. We nemen I = 25 % in de veronderstelling dat dit overeenkomt met sterke turbulentie[17]. Op basis van volgende vergelijkingen kunnen we de inlet randvoorwaarden voor de turbulentie parameters k, ε en de turbulente kinematische viscositeit ν_t vervolgens opbouwen :

[16] Gegeven door de verhouding van de RMS fluctuaties van de windsnelheid en de gemiddelde windsnelheid.
[17] http://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_intensity

$$k = \frac{3}{2}(\bar{u}I)^2$$

$$\varepsilon = C_\mu^{\frac{3}{4}} \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l_t}$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Waarbij C_μ = 0.09, een constante van het k-ε turbulentie model en l_t , een lengte schaal voor turbulentie lengte schaal die typisch wordt ingeschat op l_t = 0.07 D_h.

3.6.3. RESULTATEN CFD BEREKENINGEN

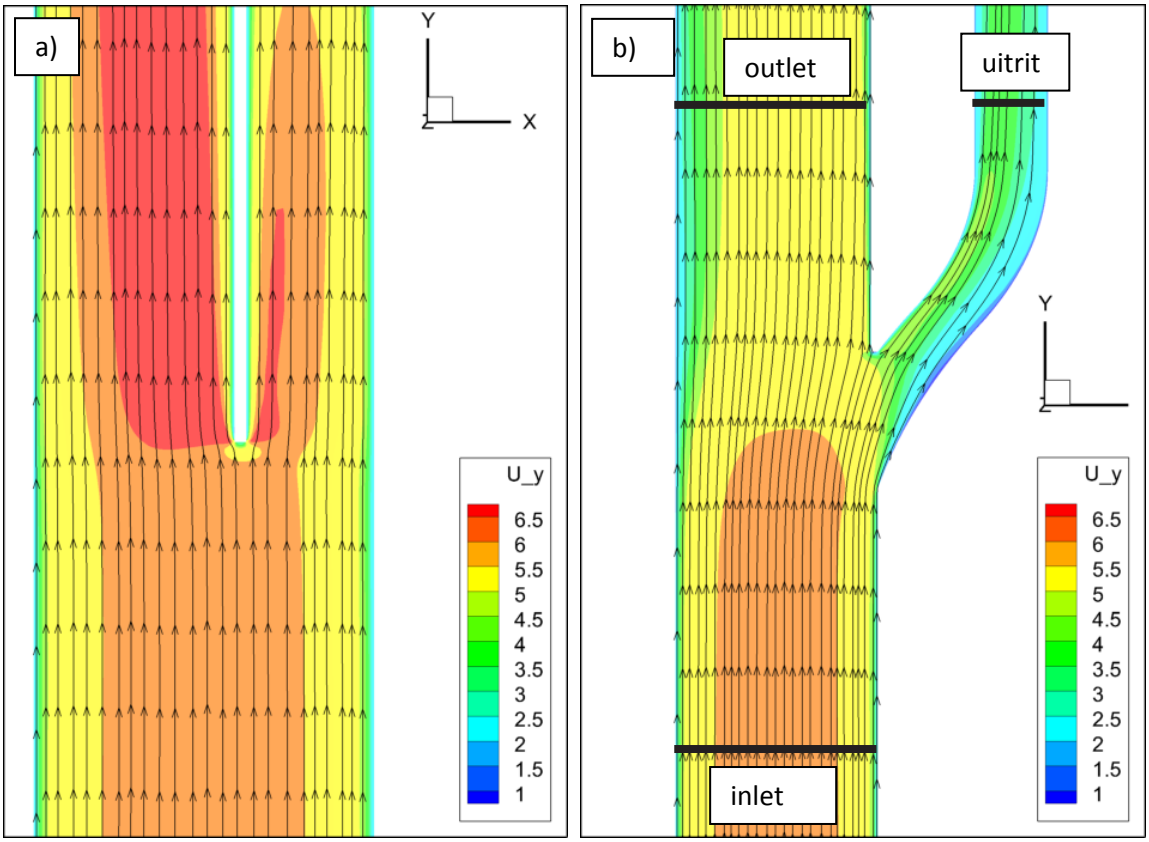
We maken eerst en vooral de vergelijking tussen frontale en laterale uitritten zoals afgebeeld in Figuur 22 en Figuur 23. Uiteindelijk zijn we geïnteresseerd in de verhouding van het debiet ter hoogte van de tunneluitrit en de doorgaande (of inkomende) tunnelpijp. De massaflux of het debiet in m^3/s werd bepaald in de OpenFOAM simulaties door het definiëren van een vlak ter hoogte van de tunnel inlet, de tunnel outlet en de outlet van de tunneluitrit. Het debiet wordt berekend in OpenFOAM door de som te nemen van de massaflux ϕ, doorheen cell faces waaruit de tunnel inlet, outlet en uitrit patches bestaan. Deze zijn ook op onderstaande figuur aangegeven. De massaflux wordt in OpenFOAM voor incompressible flow gegeven door :

$$\phi = \vec{u} \cdot \vec{A}$$

en uitgedrukt in m^3/s. Hierin is u de snelheidsvector en A het georiënteerde[18] oppervlak van een cell face.

We zien duidelijk een hoge stroomsnelheden in geval van de doorgaande uitrit, terwijl de stroomsnelheid in de laterale uitrit duidelijk afneemt. In onderstaande Tabel 6 vergelijken we de debieten samen met enkele geometrische gegevens van de simulatie. Op basis van de CFD berekeningen merken we dus een reductie van het verlies van ongeveer 16% wanneer we een laterale uitrit nemen t.o.v. een frontale.

[18] Oppervlak x normaal vector op de oppervlak.



Figuur 24 : Vergelijking tussen de windsnelheid in y-richting (van onder naar boven) voor de case met een frontale uitrit en de case met een laterale uitrit. De slices voor de bepaling van de flux werden op een gelijke hoogte in de tunnel genomen. Merk op dat de breedte van de uitrit in beide figuren gelijk is (er is enkel wat ander ingezoomd).

Tabel 6 : Verliesfracties voor een typische frontale en laterale uitrit van de SRW gebaseerd op CFD simulaties. Gegeven zijn de breedte van inkomende tunnelpijp (W_3), doorgaande tunnel (W_2) en uitrit (W_1), het inkomende en doorgaande debiet en het debiet van de uitrit (verlies), en het verliespercentage t.o.v. het inkomende debiet (Q_1/Q_3). De laatste kolom geeft het drukverlies tussen inlet en outlet van de tunnel dat door de CFD simulatie berekend werd op basis van de randvoorwaarden (zie hoger) en de ruwheid van de wanden (k_s = 0.1 m).

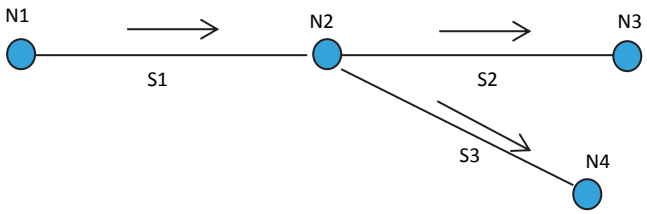
	W_3 [m]	W_2 [m]	W_1 [m]	Q_3 inlet [m^3/s]	Q_2 outlet [m^3/s]	Q_1 uitrit [m^3/s]	Q_1/Q_3	ΔP [Pa]
frontaal	14.4	8.5	5.4	331.2	208.1	123.1	37.2%	33.5
lateraal	14.9	14.4	5.4	342.7	269.7	73.0	21.3%	24.0

3.6.4. VERGELIJKING CFD - TUNNELMODEL

Op basis van de beschikbare resultaten is het nu mogelijk om de CFD resultaten te vergelijken met deze van het tunnelmodel zoals beschreven in de vorige secties. Gezien er echter in het CFD model geen sprake is van een door het verkeer geïnduceerde stroming zullen we in het tunnelmodel de verkeersvolumes dan ook afzetten. We dienen wel een stroming te induceren. Dit kunnen we doen door een drukverschil aan te leggen tussen het begin en de eindpunten van het tunnel model,

analoog zoals we de randvoorwaarden definiëren van het CFD model. De drukverschillen vinden we in hoger gegeven tabel. Verder is het in de CFD simulatie belangrijk om een ruwheid voor de tunnel wanden te specifiëren. Hiervoor gebruikt men typisch een ruwheid[19] k_S uitgedrukt in m. In de OpenFOAM simulatie gebruikten we voor de tunnelwanden een k_s = 0.1 m. Deze waarde kunnen we ook in het tunnelmodel ingeven ter berekening van de verliesfactoren voor wrijving aan de wanden.

Hieronder geven we het schema van het equivalente tunnel model voor de frontale en laterale uitrit.



Figuur 25 : Equivalente tunnelschema voor vergelijking met de verliezen met het CFD model. We hebben 4 nodes N1 t.e.m. N4 en 3 segmenten. Merk op dat de nummering hier afwijkt van de conventie die we hoger gebruikten.

De invoer bestanden voor de frontale (links) en laterale uitritten (rechts) zijn gegeven in appendix. De resultaten van de tunnelmodel simulatie zijn in de Tabel 7 hieronder aangegeven.

Tabel 7 : Resultaten van het tunnelmodel. We gegeven telkens het berekende debiet in elk van de segmenten en het verlies aan de uitrit als fractie van het debiet in de inlet. Ook de stroomsnelheid in segment 1 geven we weer ter vergelijking met de randvoorwaarde van 5 m/s die we in de CFD simulatie oplegden.

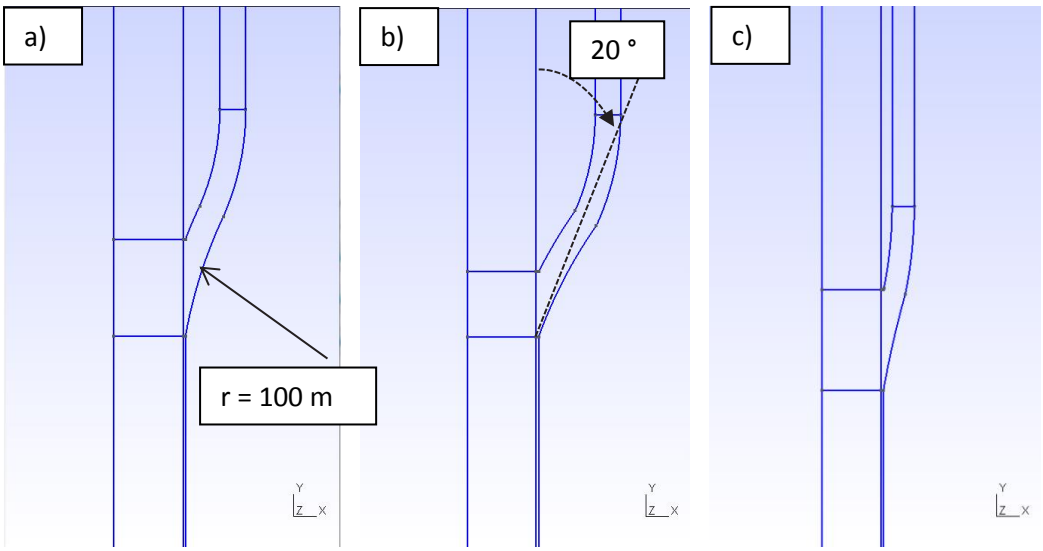
	v inlet [m/s]	*Q inlet [m^3/s]*	*Q outlet [m^3/s]*	*Q uitrit [m^3/s]*	*Verlies aan uitrit*
Frontale uitrit	5.6	371.6	238.2	133.4	35.9 %
Laterale uitrit	5.2	359.2	276.9	82.3	22.9 %

Wanneer we de resultaten van Tabel 7 vergelijken met de CFD berekeningen uit Tabel 6, dan merken we dat er kleine afwijkingen zijn in de geïnduceerde windsnelheid in segment 1 van het tunnelmodel. We vinden resp. 5.6 en 5.2 m/s i.p.v. 5.0 m/s die we als randvoorwaarde oplegden aan het CFD model. Desalniettemin zien we dat we toch heel vergelijkbare cijfers krijgen. Zeker voor wat betreft de verliesfractie vinden we 35.9% voor het tunnelmodel en 37. % in de CFD berekeningen voor de frontale uitrit en respectievelijk 22.9 % en 21.3 % voor de laterale, wat een verschil is van respectievelijk -1.3 % en 1.6 %. Uiteraard gelden deze cijfers niet als validatie van het tunnelmodel of de CFD berekeningen, maar deze oefening geeft wel extra vertrouwen in de correctheid van de methodologie, hoewel een uitgebreide validatie met de praktijk nog steeds aangewezen is.

[19] Meer correct : equivalent sand-grain roughness height

3.6.5. GEVOELIGHEID GEOMETRIE VAN DE UITRITTEN

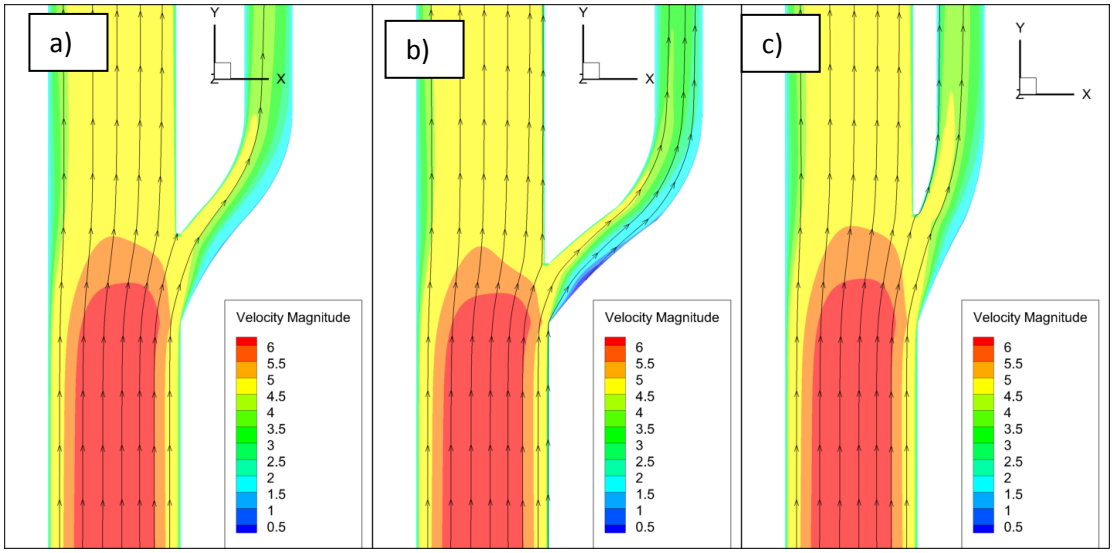
Om de gevoeligheid van de analyse van de laterale uitrit te testen, zijn een tweetal bijkomende scenario's doorgerekend waarbij we een scherpere uitrit gehanteerd hebben. De verschillende geometrieën zijn hieronder afgebeeld.



Figuur 26 : Variaties op de laterale afrit geometrie.

In de figuur zien we in a) de geometrie van de laterale uitrit zoals hierboven in § 3.6.3 beschreven. De afbuigstraal van de uitrit hierbij is telkens 100 m en de breedte blijft 5.4 m zoals in de plannen aangeleverd door Ringland. In case b) zijn we echter het effect nagegaan van een laterale uitrit waarbij de afbuighoek iets groter genomen wordt, met name 20 °, zoals aangegeven in de figuur. Uiteraard is dit naar verkeersveiligheid waarschijnlijk minder te verkiezen, maar het is interessant de gevoeligheid hiervan te bekijken. Ook is het zo dat in de basis case de laterale afrit zich nogal ver van de doorgaande tunnelpijp bevindt. In het Ringland concept, waar de tunnels toch vlak naast elkaar liggen is het minder evident om dit in te passen. We reduceerden dus bijgevolg de afstand tussen de uitrit en de doorgaande tunnel van 7 m in case a) naar 2.5 m in case c), wat een meer compactere variant van de afrit geeft. De breedte van de uitrit zelf blijft gelijk, 5.4 m. Hierbij dienen we expliciet te vermelden dat bij deze variaties geen rekening gehouden is met tunnelveiligheid en/of inpasbaarheid in het volledig Ringland concept. Deze berekeningen dienen enkel om de gevoeligheid van het verlies t.a.v. de geometrie van de uitritten te bestuderen.

Het windsnelheidsveld ter hoogte van de uitrit wordt hieronder afgebeeld in Figuur 27. We merken duidelijk een zone met lagere windsnelheid in de case met een scherpere uitrit. Wanneer we echter het verschil in verlies bekijken, dan blijken die cijfers toch relatief dicht in elkaars buurt te liggen (Tabel 8). We zien een kleiner verlies voor de scherpere uitrit en een iets groter verlies voor de meer compactere variant wat in de lijn ligt der verwachtingen. Maar al bij al is het verschil tussen de varianten niet erg significant.



Figuur 27 : Afbeelding van de totale stroomsnelheid (van beneden naar boven) voor de hoger beschreven cases &), b) en c).

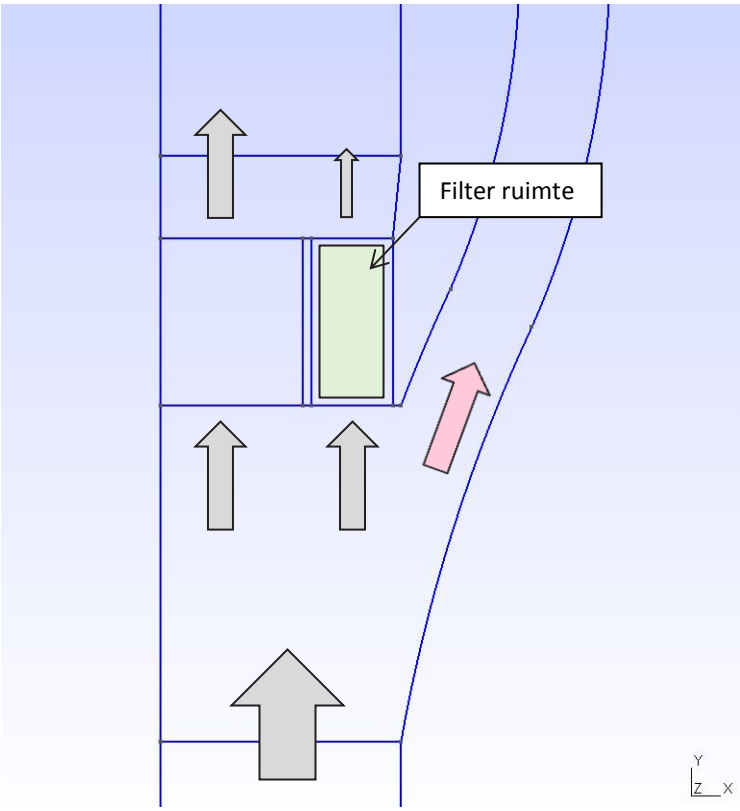
Tabel 8: Tabel met debieten en verlies fracties voor de gevoeligheidsstudie.

	Q inlet [m³/s]	*Q outlet [m³/s]*	*Q uitrit [m³/s]*	*Verlies*
a) frontaal SRW	342.7	269.7	73.0	21.3 %
b) scherpere uitrit	342.7	274.5	68.2	19.9 %
c) compactere uitrit	342.7	268.4	74.3	21.7 %

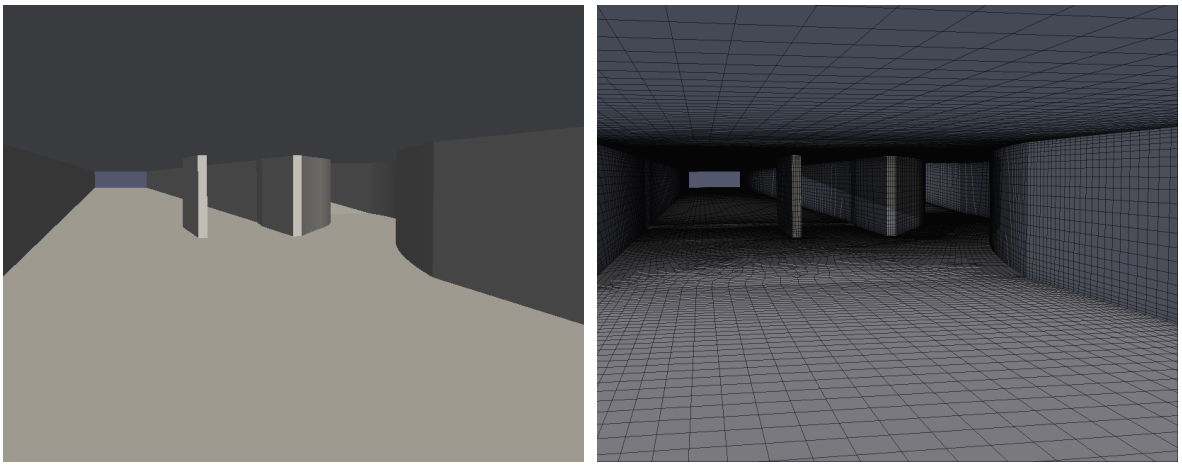
3.7. EXTRA MOGELIJKHEID VOOR FILTERING

Tijdens de uitvoer van het project is gebleken dat er bij een laterale uitrit eventueel de mogelijkheid bestaat om de ruimte die vrij komt naast de afrit in te vullen met een filtersysteem. Hierdoor zou tenminste een deel van de luchtstroom gefilterd kunnen worden. Het frontale vlak zou dan kunnen vervangen worden door een doorlaatbaar rooster waarbij in de vrijgekomen ruimte dan een filtersysteem kan geïnstalleerd worden. Dit wordt schematisch weergegeven in onderstaande Figuur 28. Het virtuele modeldomein en rekenrooster hiervoor is afgebeeld in Figuur 29. In Figuur 30 werden voor de duidelijkheid de verkeersmarkeringen aangegeven zodat beter kan gezien worden hoe het filterconcept in een tunnel zou kunnen ingepland worden.

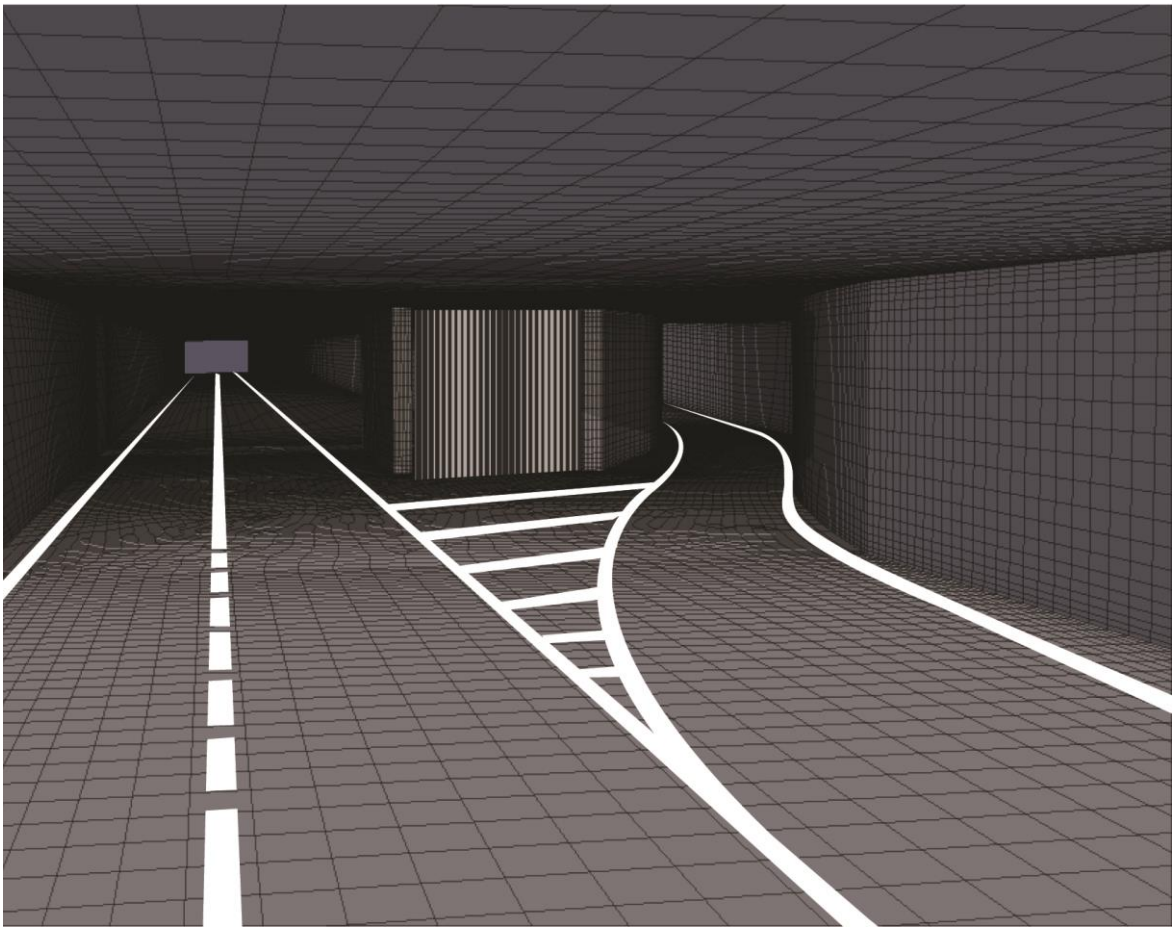
Door de locatiekeuze van de filter kan gebruik worden gemaakt van de natuurlijke stroming van de lucht en wordt dus een deel van het debiet op natuurlijke wijze doorheen het filterelementen geleid. Hierdoor dient de lucht niet actief te worden aangezogen uit de tunnel zoals dat wel het geval was in vb. het test experiment in Australië (AMOG (Roads and Maritime Services NSW), 2012). Daar werd, zoals afgebeeld op de figuur hieronder, een ~280 m lange schacht aangelegd waarlangs de tunnellucht werd afgezogen met een debiet van 200 m^3/s (bij werking van de filter installatie 184 m^3/s, wat overeenkomt kwam met 58 % van het tunnel debiet. Voor NO_2 bedroeg het debiet doorheen de filters 44 m^3/s, wat overeenkwam met 14 % van het tunnel debiet).



Figuur 28 : Bovenaanzicht voor het uitritconcept met ruimte voor een filterinstallatie.



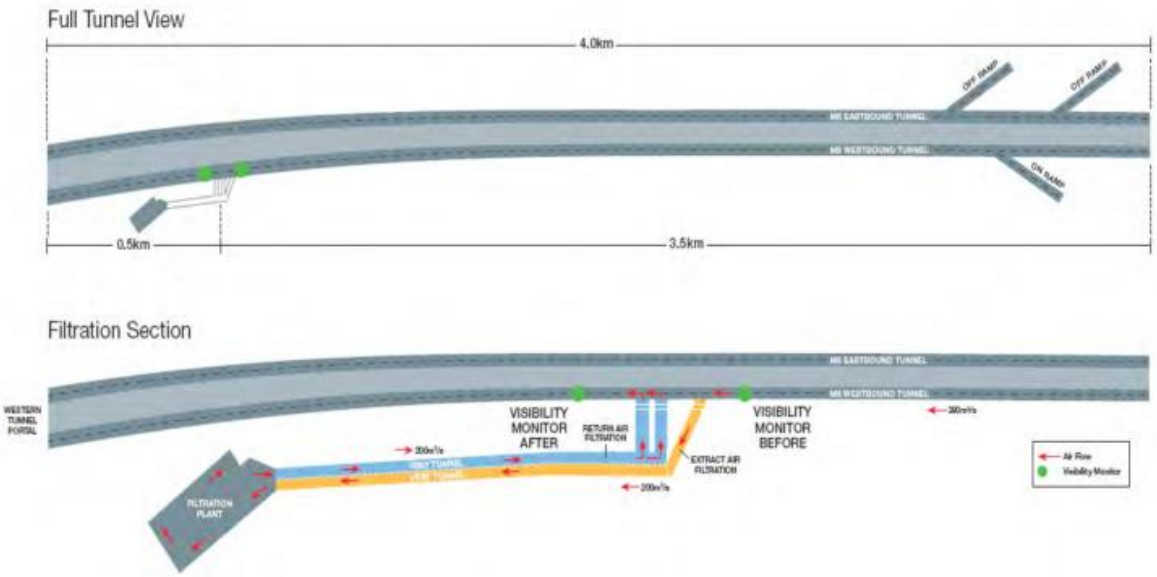
Figuur 29 : Modeldomein en rekenrooster waarbij de frontale wand van de laterale uitrit is geopend en plaats gelaten is voor een mogelijk filtersysteem. De resterende muur naast de doorgaande tunnel is hier een halve meter breed genomen. Na de filterzone (aangeduid op de figuur) stroomt de lucht gewoon verder in de doorgaande tunnel.



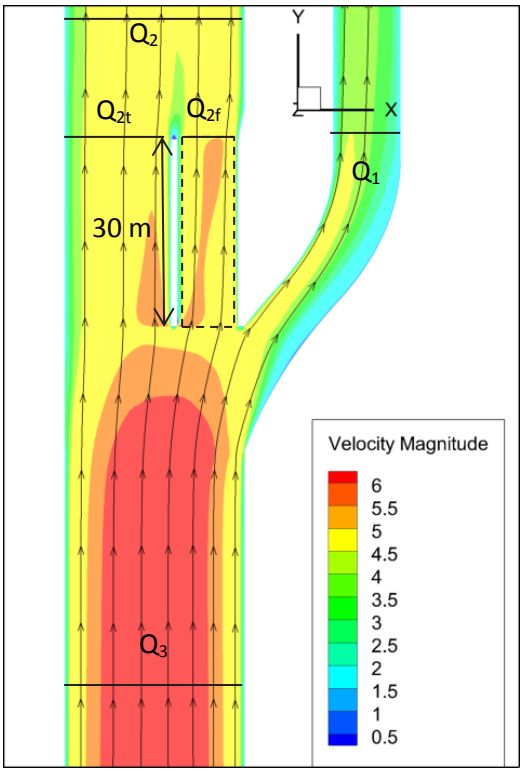
Figuur 30 : Schets waarbij de verkeersmarkeringen op de figuur zijn aangegeven. (Gemaakt door Sven Augusteyns - Stramien).

Op zicht is het geopperde concept relatief analoog als een bypass filter installatie zoals afgebeeld in Figuur 8, maar hierbij wordt dus gebruik gemaakt van het natuurlijke debiet in de tunnel in plaats van een afzuiging te realiseren. De vraag is uiteraard of dit concept naar tunnelveiligheid een haalbare kaart is, gezien de frontale wand die in de tunnel aanwezig is. Aan de andere kant is het zo dat ook bij een frontale uitrit een frontale wand in de tunnel aanwezig zal zijn, zoals te zien op Figuur 22.

Om na te gaan welk debiet door het filterelement zou gaan en het concept wat verder uit te werken, hebben we de geometrie van deze case aangemaakt en doorgerekend met OpenFOAM (zie figuren hierboven). We veronderstellen hierbij een filter sectie van 30 m lang en de breedte van 1 rijstrook. De muren werden telkens op 0.5 m voorzien. De resultaten worden getoond in Figuur 32 en Tabel 9.



Figuur 31 : Schets van het M5 experiment te Sydney, Australië. Figuur overgenomen uit (AMOG (Roads and Maritime Services NSW), 2012).



Figuur 32 : Windsnelheid voor de filter case. Links is de totale stroomsnelheid aangegeven. We duiden het debiet doorheen de filter aan met Q_{2f} , en het gewoon doorgaande debiet als $Q_{2t.}$ Het inkomende debiet duiden we opnieuw aan met Q_3 en het debiet naar de uitrit met Q_1.

Tabel 9 : Debieten voor de case met filterruimte. Q_{2f} geeft het doorgaande debiet dat door de filter passeert, Q_{2t} het doorgaande debiet dat niet door de filter passeert. We gegeven telkens ook de fractie die door de filter passeert en de fractie die naar buiten treedt.

	Q_3 inlet [m^3/s]	Q_2 outlet [m^3/s]	Q_{2f} filter [m^3/s]	Q_{2t} tunnel [m^3/s]	Q_{2f}/Q_3	Q_1 Uitrit [m^3/s]	Q_1/Q_3
Laterale uitrit	342.7	269.7	n/a	n/a	n/a	73.0	21.3 %
Laterale uitrit + open filterruimte	331.2	257.0	97.2	159.7	29.3 %	74.3	22.4 %
Laterale uitrit + filterelement	331.2	234.7	27.3	207.5	11.6 %	96.5	29.1 %

Merk eerst en vooral op dat het debiet Q_3 (inlet) lichtjes afwijkt van de vorige cases voor een laterale uitrit. Dit is te wijten aan een klein verschil (0.5 m) in tunnelbreedte die genomen is voor de laterale uitrit met filter ruimte. De reden hiervoor was het iets handiger opzetten van de geometrie en het rekenrooster voor de case in GMSH. We zien verder dat de fractie van het verlies aan de uitrit nagenoeg gelijk blijft. De weerstand in de doorgaande tunnel is iets toegenomen door de aanwezigheid van een frontale muur van 0.5 m die de scheidingswand uitmaakt tussen de filterinstallatie en de doorgaande tunnel. Hierdoor wordt er een iets hoger verlies opgetekend (22.4 % i.p.v. 21.3 %). We merken dat er in totaal een kleine 30 % (t.o.v. het volledige tunnel debiet) van het debiet door de filter passeert. Omdat het hier slechts om een hypothetisch scenario gaat is er geen verdere gevoeligheidsstudie uitgevoerd.

Wel is het zo dat de ruimte van het filterelement uiteraard niet leeg zal blijven. De filters zullen voor een zeker drukverlies ΔP zorgen waardoor ter hoogte van de inlet van de filterinstallatie een overdruk zal ontstaan die de stroming doorheen het filterelement verhindert. Zonder de exacte geometrische uitwerking, inplanting in de tunnel en specificaties van de volledige filterinstallatie is het onmogelijk hier een waarde op te plakken. Algemeen geldt voor de berekening van de verliezen in pijpleidingen (Miller, 1990) :

$$\Delta P = \frac{1}{2} K \rho U^2$$

Waarin K de drukverliescoëfficiënt voor een component. Op basis van een elektrostatische filter in een proefopstelling in de Plabutschtunnel in Oostenrijk (FVT, 2010) werd een oefening gedaan voor het bepalen van dergelijke drukverliescoëfficiënt. Aan de hand van de afgeleide coëfficiënt is een poreus element gedefinieerd in de CFD simulatie dat dit drukverlies simuleert. In dat poreus element is vervolgens een depositieterm gedefinieerd waarmee we het filterend effect kunnen simuleren.

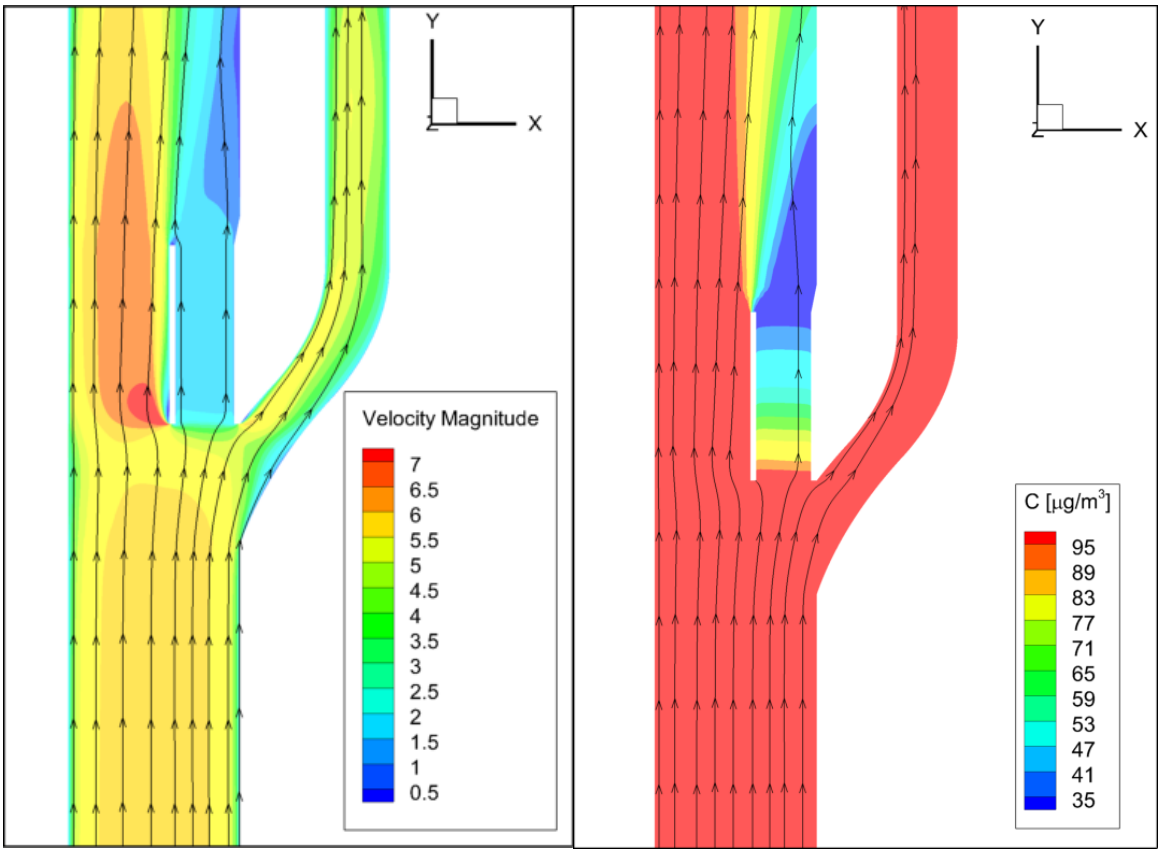
Wanneer we uitgaan van een efficiëntie van 65 % die op praktijktesten in Australië is gebaseerd, en een lengte van de filtersectie van 30 m, dan kunnen we op basis hiervan een depositie snelheid berekenen voor het verwijderen van polluenten. Op basis van deze parameters kunnen we een louter illustratieve modellering opzetten om de impact van dergelijk filterelement te analyseren. De resultaten worden getoond in Figuur 33. De figuur illustreert de impact van het filterelement op de concentraties. We kozen hiervoor een inlet concentratie van 100 µg/m^3.

Door de verhoogde weerstand van het filterelement is het echter wel zo dat er minder debiet doorheen de filter passeert. Voor de gekozen parameters bedraagt dit debiet slechts 11% ipv 30% (zie Tabel 9). De totale fractie van het debiet dat naar buiten treedt wordt hierdoor ook groter, van ~20 naar 30 % voor de gekozen parameters. Deze resultaten tonen aan dat hoewel in dit concept

op een meer efficient manier gebruik kan gemaakt worden van het natuurlijke debiet in de tunnel, extra ventilatie toch noodzakelijk zal zijn om het verlies te compenseren.

Bij een eventuele verdere uitwerking van dit concept dient eerst een afweging t.a.v. tunnelveiligheid en inpassing binnen het uitvoeringsplan verder te worden bestudeerd. Bij een verdere uitwerking kunnen dan ook meer geometrische en technische details bekeken te worden. Hiervoor was binnen het kader van dit project echter geen tijd.

Algemeen kunnen we besluiten dat deze CFD analyses een meerwaarde bieden voor de onderbouwing van de inschatting van de verliezen aan de uitritten. We toonden aan dat de bekomen verliesfracties voor laterale en frontale uitritten gelijkaardige cijfers opleveren als twee sterk verschillende (analytische) rekenmethodes. We dienen desalniettemin te vermelden dat deze overeenkomst zeker geen validatie van de bekomen modelresultaten inhoudt. Een uitgebreide vergelijking met schaalmodellen is wenselijk om de inschatting van de verliezen langs de afritten verder ten gronde te valideren.



Figuur 33 : Illustratieve modellering van de impact van het filterelement in de uitrit sectie. Links zien we de impact op de stroomsnelheid, die duidelijk afneemt doorheen het filterelement, rechts op de concentratie, waarbij een willekeurige concentratie van 100 µg/m^3 aan de instroom gekozen werd.

HOOFDSTUK 4. BEREKENING LUCHTKWALITEITSEFFECTEN RINGLAND

Voor de berekening van de impact van Ringland op de luchtkwaliteit wordt gewerkt met een modelketen die mobiliteitscijfers vertaald naar polluentconcentraties. Hierbij worden vier belangrijke luchtkwaliteitspolluenten doorgerekend, namelijk de fijn-stof-fracties PM_{10}, $PM_{2.5}$ en roet (EC), en het gasvormige NO_2. Bij de opzet van het model is er voor gekozen om met een project naar het zichtjaar 2020 te werken. 2020 is immers ook het zichtjaar dat binnen tal van andere Vlaamse beleidsscenario's (o.a. Plan-MER Oosterweel) is gehanteerd. In dit hoofdstuk worden verschillende componenten van de modelketen toegelicht.

4.1. MOBILITEITSCIJFERS RINGLAND SCENARIO'S

Een berekening van de lokale Antwerpse luchtkwaliteit start van mobiliteitscijfers. Voor Ringland is er gekozen om te starten van een bestaand scenario opgesteld door het Vlaams Verkeercentrum in het kader van de PlanMER Oosterweelverbinding, namelijk Ref-3-0-0. In Ref-3-0-0 wordt er een bijkomende Scheldekruising gecreëerd volgens het Oosterweel-Noord-Tracé. Dit tracé loopt vanaf E34 op linkeroever onder de Schelde, Amerikadok en Albertkanaal om aan te sluiten op het bestaande complex A12/Noorderlaan. Ref-3-0-0 omvat geen bijkomende infrastructurele ingrepen (bv. zgn. tangenten R11bis + A102) en is een scenario zonder exploitatievoorwaarden. Voor een volledig gedetailleerde bespreking van het scenario Oosterweel-Noord Ref-3-0-0 wordt verwezen naar het Plan-Milieueffectenrapport (MER) Oosterweelverbinding van januari 2014, meer bepaald deelrapport 2 beschrijving alternatieven (http://www.vlaanderen.be/nl/mobiliteit-en-openbare-werken/wegen/antwerpse-ring-oosterweelverbinding). De mobiliteitsresultaten Ref-3-0-0 werden opgevraagd bij het Departement Mobiliteit en Openbare Werken – Verkeerscentrum Vlaanderen. Het betreft dus resultaten van de strategische verkeersmodellen van het verkeerscentrum, doorgerekend in het kader van de PlanMER Oosterweel die binnen dit project worden hergebruikt.

Startend van Ref-3-0-0 zijn de verkeersstromen aangepast aan het voorstel van Ringland waarbij er een opsplitsing wordt gemaakt van de verkeersstroom op de ring tussen een Stedelijke-Ringweg-tunnel (SRW) en doorgaande-ringweg-tunnel (DRW). Hierbij heeft Vectris (www.vectris.be) in opdracht van Ringland de noodzakelijke verdeling gemaakt van de verkeerstromen van de ring naar de SRW en DRW. Hierbij werd gebruik gemaakt van het Plan-MER scenario Ref-4-3-0 waarin reeds een opsplitsing tussen doorgaand en stedelijk verkeer werd gemaakt (gegevens eveneens opgevraagd bij Verkeerscentrum Vlaanderen). De berekening van Vectris geven gemiddeld (variaties langsheen traject van de ring) een opsplitsing voor personenwagens van 53% SRW en 47% DRW, zwaar verkeer dient gebruik te maken van DRW.

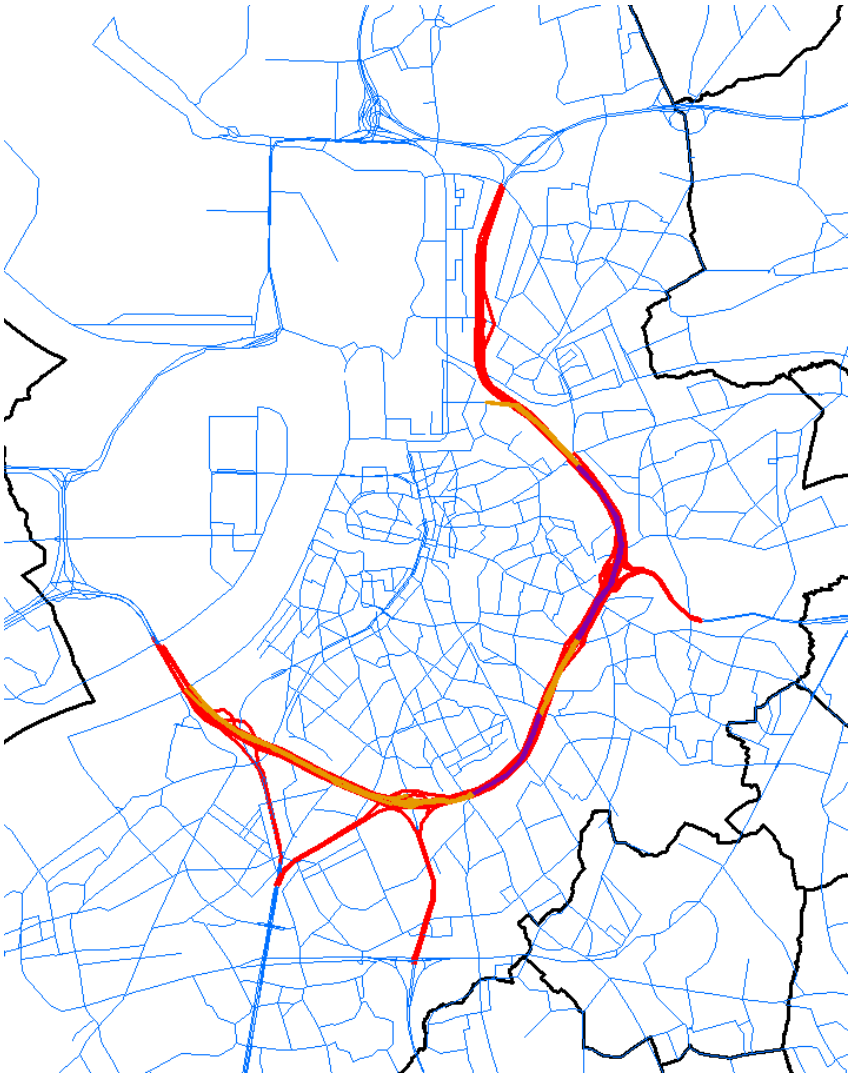
Naast de ring, wordt ten tweede ook de singel (R10) gewijzigd. In het Ringland-ontwerp verschuift de singel van de bestaande locatie naar het dak van de ring-overkapping. De bovengrondse singel wordt hierbij eveneens gereduceerd in capaciteit aangezien het stedelijk verkeer ook de SRW-tunnels kan gebruiken. Aangezien binnen het huidige project geen gedetailleerde verkeersmodellering van het Ringland scenario mogelijk was, diende er een aanname gemaakt te worden voor de effecten op het singel-verkeer. De verkeersstromen op de bestaande singel zijn op advies van de opdrachtgever voor 50% toegekend aan de SRW tunnels en voor 50% aan de bovengrondse singel op het dak van de ring. Bijkomend dient hierbij opgemerkt te worden dat

tussen Berchem Kerk en de Borsbeekbrug en Plantin-Moretus en het Sportpaleis de bovengrondse singel mee de SRW tunnels ingaat zodat de volledige verkeersstroom in deze twee zones overkapt wordt (zie Figuur 34).

Samengevat geeft dit voor mobiliteit de volgende aannames:

- Startpunt: Ref-3-0-0
- Stap 1: Opsplitsing Ring in SRW en DRW (split is ongeveer 53% en 47% voor personenwagens)
- Stap 2: Verschuiving Singel naar nieuwe locatie en opsplitsing tussen SRW en bovengrondse Singel (50% - 50%).
- Stap 3: Controle verkeersvolumes

De onderstaande figuur toont het wegennetwerk dat gemodelleerd is. De wijzigingen aangebracht voor Ringland zijn aangegeven in rood (SRW en DRW), oranje (Singel op dak van de ring) en paars (Singel bij in SRW tunnel).



Figuur 34: Wegennetwerk met tunnelcomplex Ringland en gemeentegrenzen.

4.2. VERKEERSEMISSIES

De verkeersemissies worden berekend, startend van de mobiliteitscijfers, aan de hand van het MIMOSA-model. MIMOSA is het officiële Vlaamse verkeersemissiemodel, door VITO ontwikkeld. Er wordt gewerkt met de meeste accurate Vlaamse prognoses voor samenstelling van het wagenpark. Specifiek voor deze studie werd het zichtjaar 2020 gekozen. Omwille van consistentie is er gekozen om met dezelfde modelversie, MIMOSA v4.25, te werken als gebruikt voor de luchtkwaliteitsberekeningen uitgevoerd voor Plan-MER Oosterweel. De verkeersemissies worden berekend op de etmaalintentsiteiten van het verkeer. Een gedetailleerd beschrijving van het model is te vinden in de literatuur (Mensink et al., 2000; Vankerkom et al., 2009).

4.3. TUNNELCOMPLEX

De verkeersemissies over het wegennet dienen aangepast te worden voor de aanwezige infrastructuur van tunnels, bruggen en viaducten. Het emissiebestand wordt aangepast voor alle bestaande en geplande infrastructuur. Dit omvat dus het tunnelcomplex dat Ringland introduceert en de bestaande tunnels, bruggen en viaducten. Voor bruggen en viaducten wordt aan de emissies een correcte hoogte toegekend. Bij tunnels komen de totale uitstoot in een tunnel vrij aan de tunnelmonden. De specifieke uitstoot voor de complexe Ringlandtunnels is opgenomen in de eerdere hoofdstukken van dit rapport.

Op basis van de beschikbare informatie (Huijben and Rangelrooij, 2011) blijkt dat het gebruik van een “emissiejet” van 150m aan tunnelmonden een geschikte keuze is. Dit is eveneens consistent met de luchtkwaliteitsmodellering uitgevoerd voor PlanMER Oosterweel. Het model plaatst dus de tunnelemissies als een lijnsegment van 150m aan de tunnelmonden waar het verkeer de tunnel verlaat.

Door de overkapping van de Antwerpse ring komen er in het Ringlandontwerp een aanzienlijk aantal op- en afritten aan het SRW en DRW tunnelcomplex. Op basis van de resultaten uit HOOFDSTUK 3 is er een gedetailleerde berekening gemaakt van het aandeel van de emissies dat bij elke afrit en tunnelmond de tunnel verlaat. Hierbij worden de afrit- en tunneldimensies, de verkeersvolumes aan personenwagens, lichte vracht en zwaar verkeer in de tunnel en op de afrit in rekening gebracht. Indien er geen gedetailleerde gegevens beschikbaar zijn voor de verkeersvolumes op elke afrit, wordt er met een inschatting gewerkt. Een overzicht van de fracties die bij elke afrit en tunnelmond de tunnels verlaten wordt in Tabel 10 gegeven. In deze tabel geeft de kolom “Fractie uit vanaf splitsing” aan welke percentage van het totale debiet in de tunnel bij de afrit de tunnel verlaat. Bij een tunnelmond verlaat uiteraard 100% van het debiet de tunnel. De kolom “Fractie per tunnel” geeft aan welke fractie van de totale emissies in één van de tunnel-deelsystemen (opsplitsing per rijrichting en SRW/DRW) bij afritten en tunnelmonden terecht komt. Tenslotte geeft de finale kolom de fractie aan emissies van het volledige emissietotaal voor het totale Ringland-tunnelcomplex. Tabel 10 geeft een overzicht voor de situatie zonder filtersystemen om de tunnellucht te zuiveren.

De sommatie van de emissies per uitrittencomplex, gegeven in Tabel 11, toont dat twee derde van de emissies via de tunnelmonden aan het einde het tunnelcomplex (Kennedytunnel west, A12 Jan De Vostunnel zuid, E19 Craeybecktunnel zuid, E313 Rivierenhof en Knooppunt Antwerpen Noord) vrijkomt en één derde verspreid over de afritten langsheen het tunnelcomplex.

Tabel 10: Verdeling emissies over afritten en tunnelmonden scenario zonder luchtfiltering.

Afrit/Tunnelmond	Tunnel	Fractie uit vanaf splitsing	Fractie per tunnel	Fractie totaal tunnelcomplex
A'pen Zuid	DRW-WON	0.21	0.015	0.006
A12 JDV1 Zuid	DRW-WON	0.21	0.040	0.015
E19 Craeybeckx-Zuid	DRW-WON	0.27	0.130	0.050
Plantin Moretus	DRW-WON	0.17	0.061	0.023
E313 Rivierenhof	DRW-WON	0.50	0.309	0.118
Sportpaleis	DRW-WON	0.17	0.048	0.018
Groenendaal	DRW-WON	0.17	0.057	0.022
A'pen Noord	DRW-WON	1.00	0.339	0.129
Groenendaal	DRW-NOW	0.20	0.014	0.004
E313 Rivierenhof	DRW-NOW	0.43	0.128	0.039
Plantin Moretus	DRW-NOW	0.22	0.067	0.021
E19 Creaybeckx	DRW-NOW	0.30	0.167	0.052
A12 JDV2 Zuid	DRW-NOW	0.15	0.116	0.036
A'pen zuid	DRW-NOW	0.18	0.064	0.020
Scheldekaaien	DRW-NOW	0.18	0.067	0.021
Kennedytunnel West	DRW-NOW	1.00	0.337	0.104
JDV Noord	DRW-NOW	1.00	0.009	0.003
E19 Craeybeckx Noord	DRW-NOW	1.00	0.031	0.010
A'pen zuid	SRW-WON	0.15	0.022	0.004
Singel	SRW-WON	0.15	0.027	0.004
Berchem Kerk	SRW-WON	0.15	0.040	0.007
Berchem Station	SRW-WON	0.30	0.106	0.017
Plantin Moretus	SRW-WON	0.15	0.055	0.009
Sportpaleis	SRW-WON	0.30	0.174	0.028
Groenendaal	SRW-WON	0.15	0.081	0.013
A'pen Noord	SRW-WON	1.00	0.495	0.081
Sportpaleis	SRW-NOW	0.15	0.025	0.004
Plantin Moretus	SRW-NOW	0.30	0.124	0.018
Berchem Station	SRW-NOW	0.15	0.059	0.009
Berchem Kerk	SRW-NOW	0.30	0.148	0.022
Singel	SRW-NOW	0.15	0.071	0.011
A'pen Zuid	SRW-NOW	0.40	0.183	0.027
Scheldekaaien	SRW-NOW	0.31	0.105	0.016
Kennedytunnel West	SRW-NOW	1.00	0.285	0.042

*Nota: De naamgeving van elke afrit en tunnelmond verwijst naar de naamgeving in de Ringland-plannen. JDV1- en JDV2-Zuid verwijzen naar de zuidelijke tunnelmonden van de Jan-De-Vos-tunnel, hier hebben verschillende bestemmingen tunnelmonden die verschoven liggen t.o.v. mekaar. WON duidt op de rijrichting west-oost-noord (richting Nederland) en NOW op de rijrichting noord-oost-west (richting Gent).

Naast het Ringland-tunnelcomplex wordt het emissiebestand eveneens aangepast voor alle andere bestaande tunnels (Liefkenshoektunnel, Waaslandtunnel,…) en geplande tunnels (Oosterweel-Noord). Als referentie is eveneens het Ref-3-0-0 scenario doorgerekend. en werd hiervoor eveneens aangepast voor alle tunnels en bruggen.

Tabel 11: Percentage van de totale emissie onder Ringland per afritcomplex

Uitrittencomplex	Percentage totaal
Kennedytunnel West	14.6%
Scheldekaaien	3.6%
Antwerpen Zuid	5.6%
A12 JDV Noord	0.3%
A12 JDV Zuid	5.1%
Singel	1.5%
E19 Craeybeckx Noord	1.0%
E19 Craeybeckx Zuid	10.1%
Berchem Kerk	2.9%
Berchem Station	2.6%
Plantin Moretus	7.1%
E313 Rivierenhof	15.7%
Sportpaleis	5.0%
Groenendaal	3.9%
Antwerpen Noord	21.0%

4.4. FILTERING TUNNELEMISSIES

De emissie-opsplitsing in Tabel 10 geeft de verdeling van de emissies over Ringland voor een scenario waarbij geen emissies gefilterd worden. Voor deze studie is er een eveneens een 2de emissiescenario aangemaakt waarbij een luchtfilteringsstrategie is toegepast in de tunnels. Het Ringland-ontwerp voor de tunnels maakt het mogelijk om bij elke afrit of splitsing in het verlengde van de rijstrook die de tunnel verlaat luchtfiltering toe te passen (zie §3.7). Hierbij wordt de aanname gemaakt dat het debiet dat kan worden gefilterd overeenstemt met de fractie van het ingenomen tunnelvolume. Naast de fractie van het totale debiet dat gefilterd kan worden, is eveneens de efficiëntie van het filtersysteem bepalend. Hiervoor baseren we ons op de resultaten van een recente meetcampagne in Australië (AMOG (Roads and Maritime Services NSW), 2012). Hierin wordt aangetoond dat met fijn stof filters, zogenaamde “Electrostatic Precipitators”, in de praktijk 65% van het fijn stof gefilterd kan worden. In de Ringland modellering is ervoor gekozen om te werken met een filter-efficiëntie die in de praktijk reeds is aangetoond. De efficiëntie van 65% wordt hierbij toegepast voor elke polluent. Beide aannames worden verduidelijkt aan de hand van een voorbeeld hieronder. De keuze voor deze aannames wordt gemotiveerd in HOOFDSTUK 2.

In het Ringland-scenario met filtertechnologie wordt er in totaal op 25 plaatsen filters geplaatst. De onderstaande tabel geeft een overzicht van wat er op elke locatie bereikt wordt volgens de aannames hier gemaakt. De fractie aan luchtfiltering is van toepassing op de emissies die plaatsvinden in de tunnel ‘stroomopwaarts van de filter” en de tunnel nog niet verlaten hebben via een afrit. Aan de hand van Tabel 12 zijn de geaccumuleerde emissies voor elke afrit en tunnelmond van het tunnelcomplex herrekend. We krijgen dus een aangepaste versie van Tabel 10 voor het scenario met filters. Dit wordt gegeven in de volgende tabel. Hieraan zijn eveneens de totalen per tunnel-deelsysteem toegevoegd. Deze analyse toont dat er in DRW-WON 15.5%, DRW-NOW 17.6%, SRW-WON 32% en SRW-NOW 31.6% van de totale emissies per deelsysteem kan worden gefilterd. In DRW worden aanzienlijk lagere percentages van de emissies weg-gefilterd, aangezien deze

tunnels aansluiten op E313, E19 en A12 waar er geen filtersystemen in de bestaande tunnels en snelwegen voorzien zijn.

Voorbeeld SRW-Noord-Oost-West Singel:

De SRW-tunnel richting Noord-Oost-West heeft bij afrit Singel voor de afrit 3 rijstroken waarvan 1 rijstrook de afrit wordt. 2 rijstroken blijven in de tunnel waar het verkeer dus rechtdoor richting Antwerpen-Zuid rijdt. In het verlengde van de rijstrook van het verkeer dat de afrit kiest, wordt het volume dat vrijkomt doordat het verkeer op deze rijstrook de tunnel verlaat, ingevuld door een installatie voor luchtfiltering. Eén derde van de doorgaande tunnel wordt dus ingenomen door de luchtfiltering en we nemen aan dat hierdoor één derde van de lucht in de tunnel kan worden gefilterd. De filter installatie haalt een efficiëntie van 65%. In totaal wordt er dus 65*1/3 = 22% van de emissies uit de luchtstroom die in de tunnel blijft gefilterd.

Tabel 12: Locaties van luchtfiltersystemen en fracties gefilterd uit tunnelemissies.

Afrit	Tunnel	Fractie Filtering emissies doorgaand
A'pen zuid	DRW-WON	0.22
E19-Uitrit	DRW-WON	0.22
Plantin Moretus	DRW-WON	0.13
E313-uitrit	DRW-WON	0.22
Sportpaleis	DRW-WON	0.13
Groenendaal	DRW-WON	0.16
Groenendaal	DRW-NOW	0.16
E313-uitrit	DRW-NOW	0.16
E313 splitsing oprit	DRW-NOW	0.16
Plantin Moretus	DRW-NOW	0.22
E19 - A12 uitrit	DRW-NOW	0.22
A'pen zuid	DRW-NOW	0.22
A'pen zuid	SRW-WON	0.22
Singel	SRW-WON	0.22
Berchem Kerk	SRW-WON	0.22
Berchem Station	SRW-WON	0.22
Plantin Moretus	SRW-WON	0.22
Sportpaleis	SRW-WON	0.22
Groenendaal	SRW-WON	0.22
Sportpaleis	SRW-NOW	0.22
Plantin Moretus	SRW-NOW	0.22
Berchem Station	SRW-NOW	0.22
Berchem Kerk	SRW-NOW	0.22
Singel	SRW-NOW	0.22
A'pen zuid	SRW-NOW	0.33

*Nota: Alle filtersystemen worden in de doorgaande tunnels na de vermelde afrit geplaatst. Met E313 splitsing oprit wordt de locatie bedoelt waar de E313 splitst tussen invoegen DRW Noord en West, hier kan richting DRW-NOW gefilterd worden.

Tabel 13: Verdeling emissies over afritten en tunnelmonden in scenario inclusief luchtfiltering.

Afrit	Tunnel	Fractie uit vanaf splitsing	Fractie per tunnel	Fractie totaal tunnelcomplex
A'pen zuid	DRW-WON	0.21	0.015	0.006
A12 JDV1 Zuid	DRW-WON	0.21	0.040	0.015
E19 Creaybeckx	DRW-WON	0.27	0.128	0.049
Plantin Moretus	DRW-WON	0.17	0.058	0.022
E313 Rivierenhof	DRW-WON	0.50	0.282	0.107
Sportpaleis	DRW-WON	0.17	0.037	0.014
Groenendaal	DRW-WON	0.17	0.044	0.017
A'pen Noord	DRW-WON	1.00	0.241	0.092
		Totalen DRW-WON:	0.845	0.321
Groenendaal	DRW-NOW	0.20	0.014	0.004
E313 Rivierenhof	DRW-NOW	0.43	0.124	0.038
Plantin Moretus	DRW-NOW	0.22	0.059	0.018
E19 Creaybeckx	DRW-NOW	0.30	0.145	0.045
A12 JDV2 zuid	DRW-NOW	0.15	0.104	0.032
A'pen zuid	DRW-NOW	0.18	0.049	0.015
Scheldekaaien	DRW-NOW	0.18	0.046	0.014
Kennedytunnel	DRW-NOW	1.00	0.243	0.075
JDV naar stad	DRW-NOW	1.00	0.009	0.003
Craeybeckx naar stad	DRW-NOW	1.00	0.031	0.010
		Totalen DRW-NOW:	0.824	0.254
A'pen zuid	SRW-WON	0.15	0.022	0.004
Singel	SRW-WON	0.15	0.023	0.004
Berchem Kerk	SRW-WON	0.15	0.033	0.005
Berchem Station	SRW-WON	0.30	0.082	0.013
Plantin Moretus	SRW-WON	0.15	0.039	0.006
Sportpaleis	SRW-WON	0.30	0.135	0.022
Groenendaal	SRW-WON	0.15	0.056	0.009
A'pen Noord	SRW-WON	1.00	0.290	0.047
		Totalen SRW-WON:	0.680	0.111
Sportpaleis	SRW-NOW	0.15	0.025	0.004
Plantin Moretus	SRW-NOW	0.30	0.114	0.017
Berchem Station	SRW-NOW	0.15	0.047	0.007
Berchem Kerk	SRW-NOW	0.30	0.111	0.016
Singel	SRW-NOW	0.15	0.049	0.007
A'pen zuid	SRW-NOW	0.40	0.111	0.016
Scheldekaaien	SRW-NOW	0.31	0.054	0.008
Kennedytunnel	SRW-NOW	1.00	0.172	0.026
		Totalen SRW-NOW:	0.684	0.102

*Nota: De naamgeving van elke afrit en tunnelmond verwijst naar de naamgeving in de Ringland-plannen. JDV1- en JDV2-Zuid verwijzen naar de zuidelijke tunnelmonden van de Jan-De-Vos-tunnel, hier hebben verschillende bestemmingen tunnelmonden die verschoven liggen t.o.v. mekaar.

4.5. IFDM-STREET CANYON MODEL

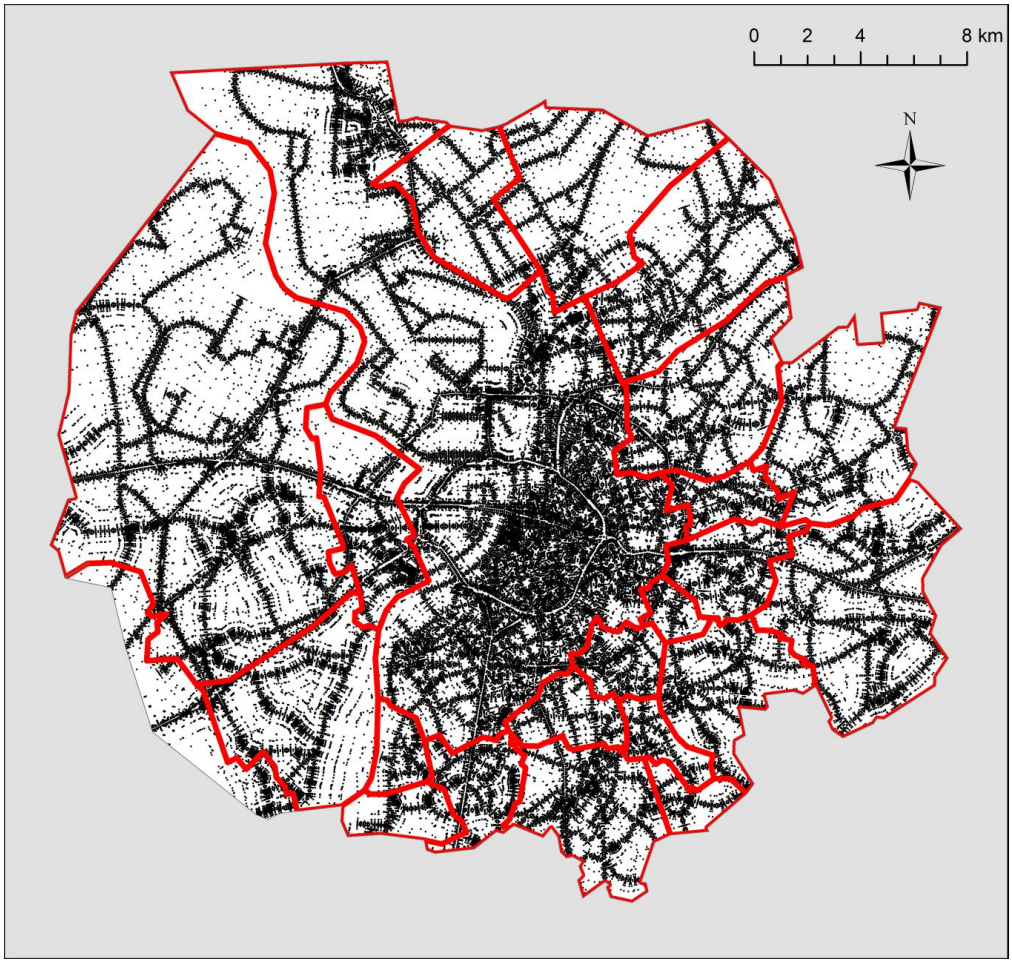
Het IFDM-street canyon model start vanaf de emissiebestanden (output MIMOSA) aangepast voor tunnels, bruggen en eventueel filtersystemen. Dit model bestaat uit de koppeling van achtergrondconcentraties, het IFDM-model (v4.1.6) en een aangepaste versie van het OSPM-street canyon model. IFDM resulteert in concentratiekaarten die representatief zijn voor de achtertuinen, open ruimte en boven de daken. Het OSPM model brengt hierbij een bijdrage in rekening ten gevolge van het street canyon effect. Het is dezelfde methodologie als degene die gebruikt werd in o.a. de PlanMER Oosterweelverbinding en de actieplannen luchtkwaliteit voor de Stad Antwerpen.
IFDM (Immision Frequency distribution Model) is een uitgebreid gevalideerd bi-gaussiaans pluimmodel dat wordt toegepast om de dispersie van polluenten geëmitteerd in het studiegebied accuraat weer te geven (Lefebvre and Vranckx, 2013a). OSPM (Operational Street pollution Model) kent de verhoogde street canyon bijdrages toe (Berkowicz et al., 1997; Lefebvre et al., 2013). Door de verminderde ventilatie in street canyons (straten met aangesloten bebouwing) kunnen de lokale emissies minder snel afgevoerd worden, leidend tot hogere concentraties in deze straten. In deze stap wordt een gedetailleerde versie van de gebouwenconfiguratie gebruikt. De koppeling van IFDM aan OSPM is recent ook uitgebreid gevalideerd, waaruit blijkt dat de modelketen in staat is accuraat de polluentconcentraties te modelleren (Lefebvre et al., 2013).

Voor de **achtergrondconcentraties** wordt gewerkt met gegevens uit de eerdere studie van (Lefebvre et al., 2010). Naar de toekomst toe worden de achtergrondconcentraties geschaald aan de hand van de beschikbare prognoses (Lefebre et al., 2010). Analoog aan de PlanMER-studie is er gewerkt met de achtergrondconcentraties uit 2007, referentiejaar conform MER-richtlijnenboek lucht, die op basis van IMMI-2 is bijgesteld voor 2020. De achtergrondconcentraties omvatten de bijdrage van buitenstedelijke, regionale en buitenlandse bronnen. Voor **meteorologie** is gewerkt met de gemeten meteo van Luchtbal 2007.

Alle simulaties worden uitgevoerd met een irregulier rekenrooster met maximale resolutie in de nabijheid van de wegsegmenten, opgesteld voor stad Antwerpen en de omliggende gemeentes. Hierdoor worden de gradiënten zo goed mogelijk gecapteerd. In totaal omvat het rooster 143416 punten waarop de concentraties bepaald worden, een overzicht wordt gegeven in Figuur 35. Voor OSPM wordt op ieder wegsegment om de 20m een receptorpunt toegekend, indien het een street canyon locatie betreft. Voor deze receptor punten (22,335 punten in studiegebied) wordt de street canyon bijdrage bepaald.

Dankzij de koppeling van de achtergrondconcentraties met IFDM en OSPM output, wordt dus een volledige hoge-resolutie berekening van de polluent-concentraties (PM_{10}, $PM_{2.5}$, NO_2 en EC) mogelijk. Hierbij wordt een **dubbeltellingscorrectie** toegepast, waarbij eerst in lage resolutie de lokale bijdrage van de achtergrondwaardes wordt afgetrokken om vervolgens in hoge resolutie de gecorrigeerde achtergrond met concentraties ten gevolge van de lokale emissies te combineren. Deze correctie is nodig om dubbeltelling van emissies in de verschillende modelstappen te vermijden.

Meer informatie over de gebruikte modelketen en validatie hiervan is samengevat in een uitgebreid validatierapport (Lefebvre and Vranckx, 2013b) dat kan worden geraadpleegd via de ATMOSYS web-pagina:
http://www.atmosys.eu/faces/doc/ATMOSYS_Deliverable_10_IFDM_Model_Validation.pdf.



Figuur 35: Het gebruikte puntengrid binnen deze studie. Ieder zwart puntje stelt een receptorpunt voor. Op veel plaatsen dicht bij wegen liggen zoveel receptorpunten dat de verschillende zwarte aanduidingen niet meer te onderscheiden zijn. Rode lijnen: gemeentegrenzen.

4.6. VERGELIJKING MET METHODOLOGIE ANDERE STUDIES

Verschillen in gemaakte aannames, modelversies en referentiejaar kunnen er toe leiden dat de methodologie aangewend in Vlaamse luchtkwaliteitsstudies onderling verschilt. We geven een kort overzicht van de punten waarin deze studie, in opdracht van Ringland, verschilt ten opzichte van eerdere studies rond luchtkwaliteit voor Antwerpen en omgeving.

4.6.1. VERGELIJKING MET PLAN-MER OOSTERWEEL

De methodologie aangewend voor deze studie is volledig identiek aan de Plan-MER Oosterweel. Er is gewerkt met identieke modelversies, hetzelfde referentiejaar en dezelfde prognoses naar de toekomst. Enige afwijking is de opdeling van de verkeersvolumes op de Ring naar de SRW en DRW en de behandeling van de Singel (50% op nieuwe Singel, 50% mee in de SRW).

4.6.2. VERGELIJKING MET ACTUALISERING EN VERFIJNING LUCHTKWALITEITSKAARTEN STAD ANTWERPEN

Bij een vergelijking van deze studie met de studie rond de actualisering en verfijning van de luchtkwaliteitskaarten van stad Antwerpen (Vranckx and Lefebvre, 2013) kunnen er een aantal verschillen in methodologie opgemerkt worden. We geven hier een lijst met de belangrijkste verschilpunten:

- Ander referentiejaar: in deze studie en de Plan-MER Oosterweel wordt conform het richtlijnenboek lucht, het referentiejaar 2007 gebruikt. In de studie in opdracht van stad Antwerpen werd het laatst beschikbare jaar gebruikt, namelijk 2012. Dit betekent dus andere meteo en andere achtergronden.
- Andere modelversies: een aantal updates aan de modellen (bv. emissiefactoren, uitbreiding van MIMOSA voor EC-emissies, updates RIO-model gebruikt voor achtergronden) maakt dat er verschillen zijn tussen de modelketen aangewend in de studie voor Stad Antwerpen enerzijds en deze studie en Plan-MER Oosterweel anderzijds.
- Behandeling van puntbronnen: volgens de procedure in het richtlijnenboek lucht (IFDM-traffic) zijn voor deze studie en Plan-MER Oosterweel de aanwezige puntbronnen niet expliciet opgenomen in de modellering maar maken deze onderdeel uit van de achtergrond. Bij de actualisering van de Antwerpse luchtkwaliteitskaarten werden de puntbronnen wel expliciet meegenomen.

HOOFDSTUK 5. RESULTATEN LUCHTKWALITEITSEFFECTEN RINGLAND

In dit hoofdstuk wordt het effect van het overkappen van de Antwerpse ring volgens het Ringland principe op de lokale luchtkwaliteit voorgesteld. De berekeningen zijn uitgevoerd voor 4 polluenten: PM_{10}, $PM_{2.5}$, NO_2 en EC (elemental carbon of roet). Drie scenario's zijn bestudeerd, Oosterweel-Noord (Ref-3-0-0) als referentie, Ringland en Ringland met filtertechnieken. De modellering geeft uurlijkse concentraties voor een volledig jaar die als jaargemiddelde concentraties geanalyseerd worden voor het prognosejaar 2020.

5.1. NO_2

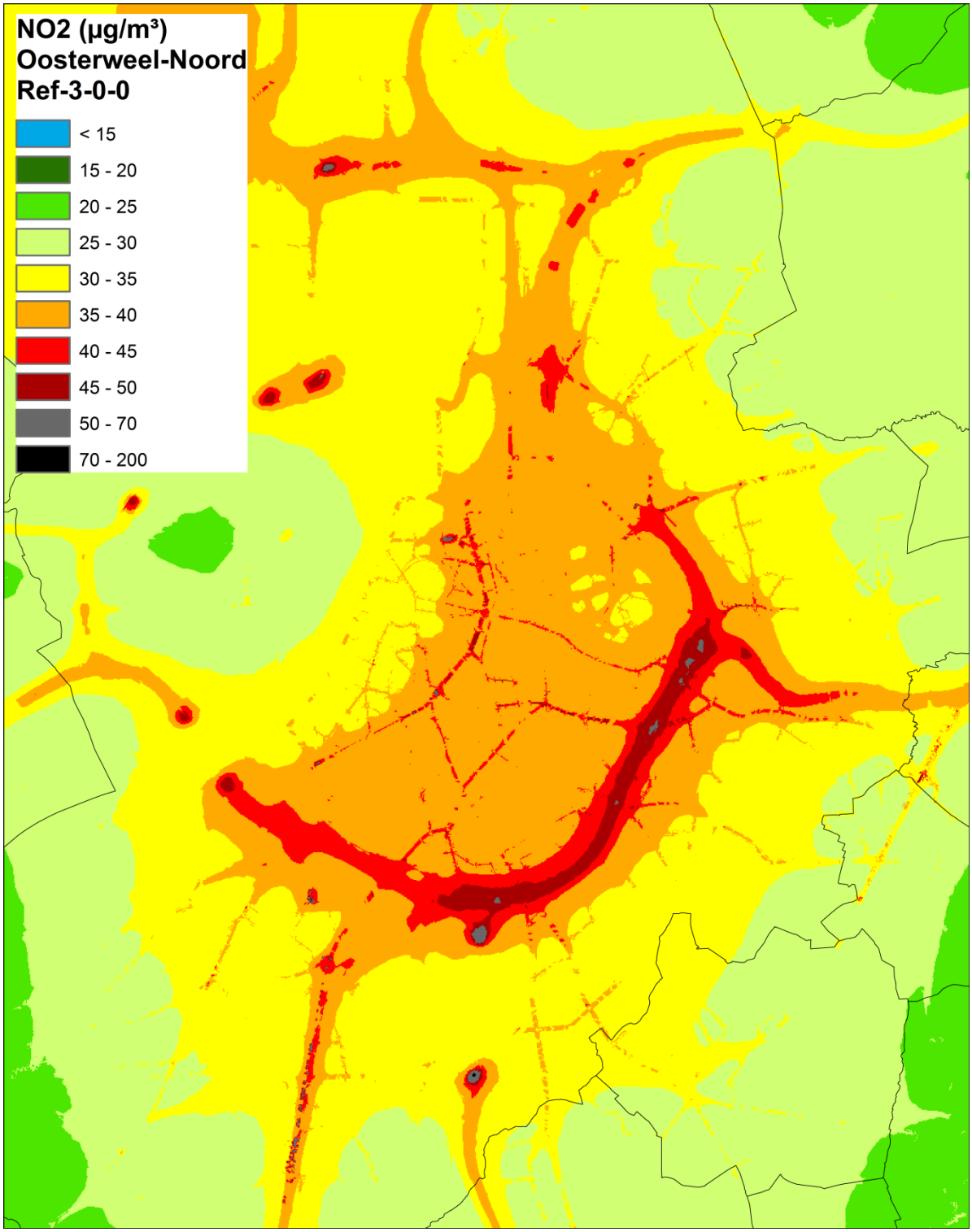
De jaargemiddelde concentratiekaarten voor elk scenario tonen de sterke invloed van verkeersemissies op de lokale NO_2 concentraties in Antwerpen en omgeving. De kaarten tonen hogere NO_2-concentraties in het stadscentrum en in de omgeving van de verschillende snelwegen.

De referentiekaart met absolute NO_2-concentraties voor het scenario Oosterweel-Noord als referentie, toont sterk verhoogde concentraties in de volledige zone rondom de ring omwille van de grote verkeersstromen (Figuur 36). Over een breedte van ongeveer 450m overschrijden de gemodelleerde concentraties de Europese grenswaarde van 40 µg/m³.

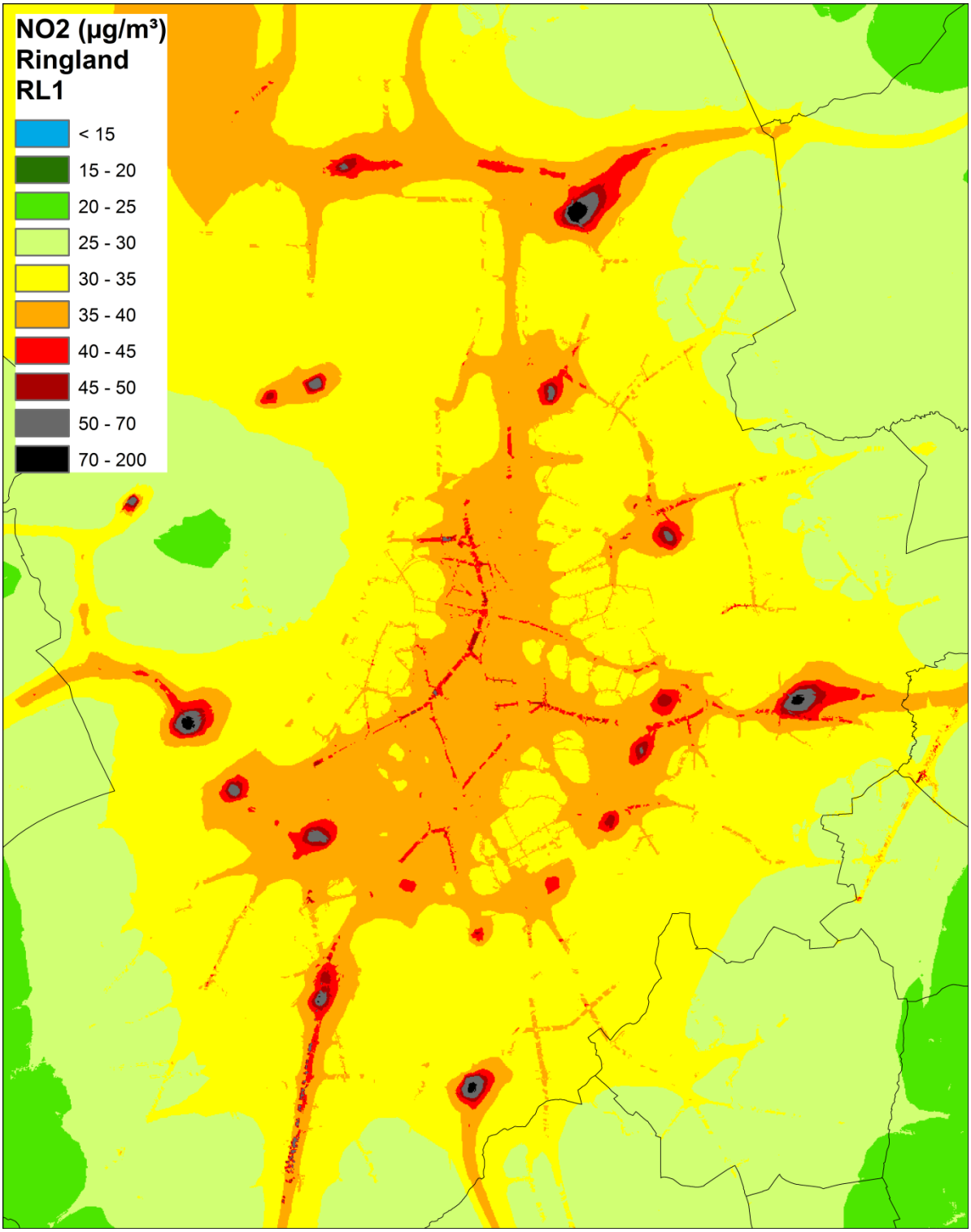
Bij het Ringland scenario wordt de ring overkapt en verplaatst 50% van het verkeer op de singel naar de tunnels. Het resterende singelverkeer verhuist naar het dak van de ring. Tussen Berchem Kerk en de Borsbeekbrug en Plantin-Moretus en Sportpaleis komt al het verkeer van de singel bij in de tunnels. Door de verkeersstroom te overkappen, verplaatst Ringland de emissies van het volledige ring- en singeltraject naar de tunnelmonden van het tunnelcomplex, zoals aangegeven in Tabel 11. De concentraties in de nabijheid van de ring dalen hierdoor significant, uitgezonderd de tunnelmonden en de afritten van het tunnelcomplex. Figuur 37 toont de NO_2 concentratiekaart voor Ringland. De verbeteringen in concentraties blijven niet beperkt tot de onmiddellijke nabijheid van de ring maar er zijn effecten voor een ruimer deel van de binnenstad. Het verschil in jaargemiddelde NO_2-concentraties (µg/m³) tussen dit Ringland scenario zonder filtertechnieken en Oosterweel-Noord wordt getoond in Figuur 38. De grootste verbeteringen in concentraties zijn te vinden langsheen het zuidelijke traject van de ringweg waar de verkeersvolumes het hoogst zijn. Tot op een afstand van ongeveer 1300 m van de ring dalen de NO_2 concentraties met 1 µg/m³. Anderzijds stijgen de concentraties bij de tunnelmonden. De zone rond een tunnelmond waar er sterke stijgingen van meer dan 5 µg/m³ gemodelleerd worden, strekt zicht uit over enkele 100-tal m afhankelijk van de emissiesterkte en oriëntatie ten opzichte van de hoofdwindrichting. Nabij de tunnelmond met de sterkste emissies, Antwerpen-Noord, bedraagt deze zone 500 m. De kaarten geven het volledige overzicht van de wijzigingen die Ringland teweeg brengt.

Filtertechnieken kunnen worden toegepast om een deel van de emissies uit de tunnels te capteren. Het Ringland scenario waarbij er na afritten tunnellucht wordt gezuiverd is eveneens doorgerekend en vergeleken met het referentiescenario. Toepassen van filtertechnieken leidt vooral tot een verbetering van de lokale situatie rond tunnelmonden, en laat zich in beperkte mate merken op grotere afstanden. Figuur 39 toont de jaargemiddelde NO_2-kaart die sterk lijkt op de kaart voor Ringland zonder filtertechnieken. Figuur 40 en Figuur 41 tonen de verschilkaarten ten opzichte van

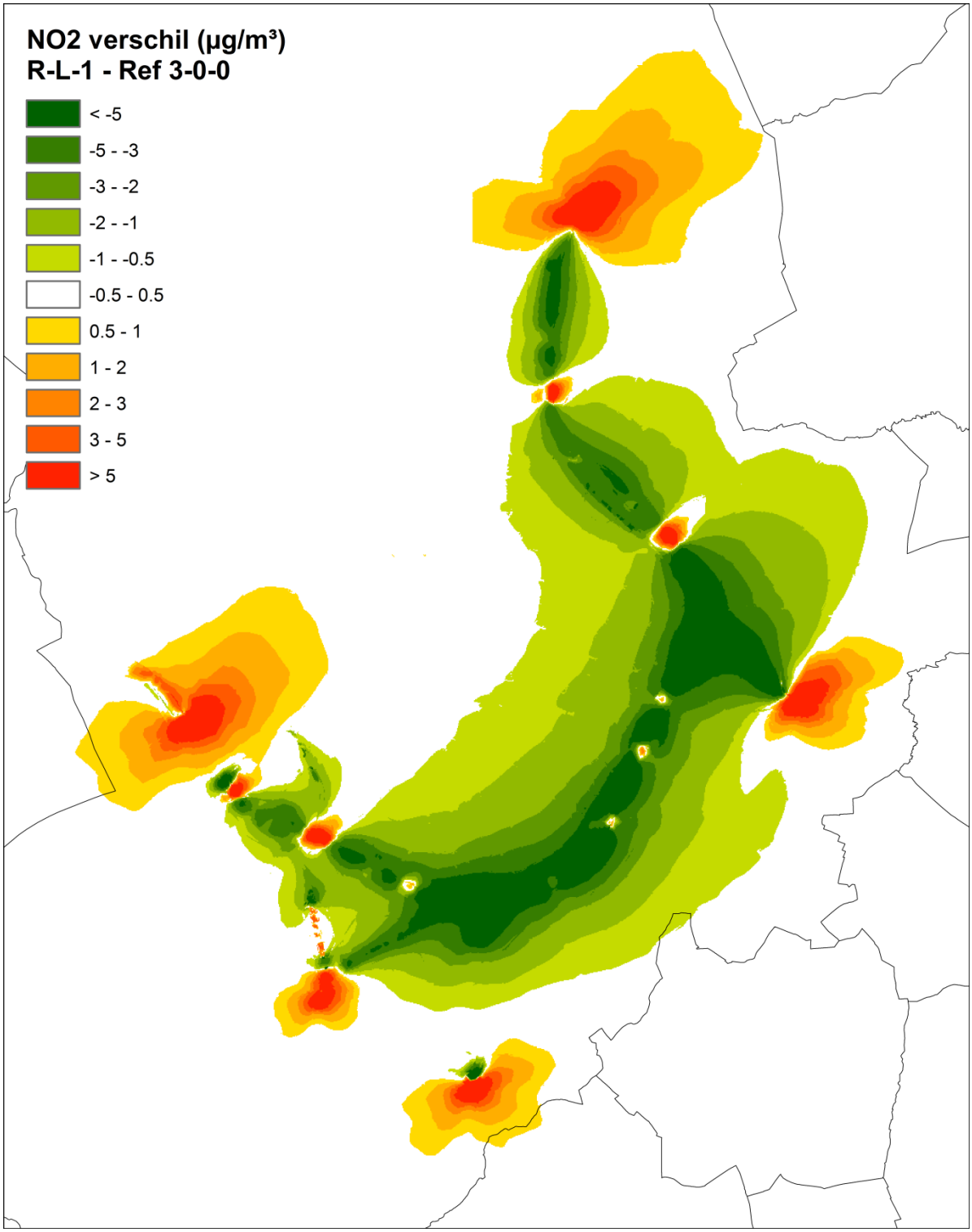
respectievelijk Oosterweel-Noord en Ringland zonder filtertechnieken. De aanname dat op 25 locaties filtertechnieken worden geplaatst met een efficiëntie van 65% leidt tot verbeteringen aan de tunnelmonden met maximaal ongeveer 20%, in de binnenstad resulteert dit nog tot een bijkomende verbetering met 0.5 tot 1%.



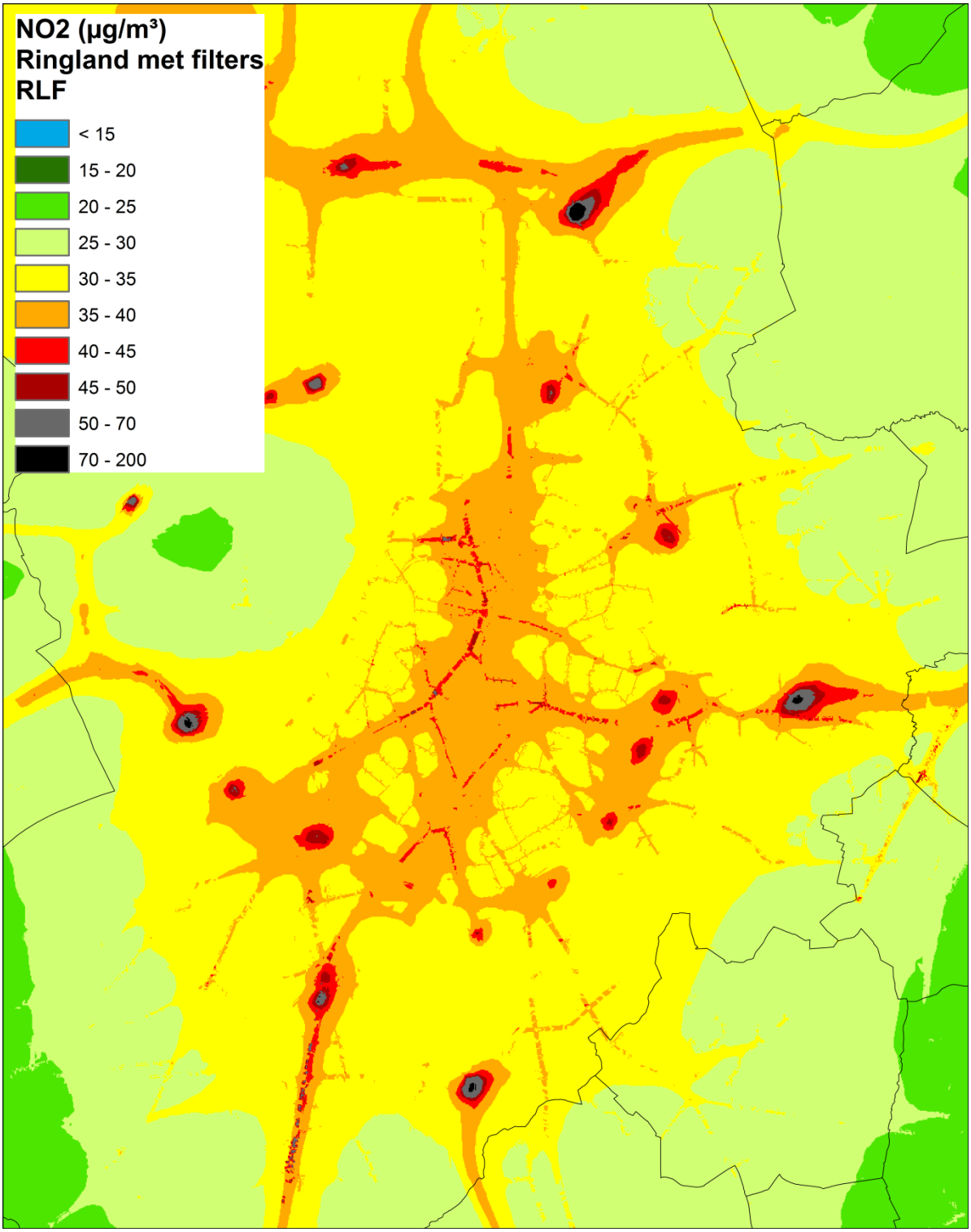
Figuur 36: Jaargemiddelde NO_2-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving voor referentiescenario Oosterweel-Noord, prognosejaar 2020.



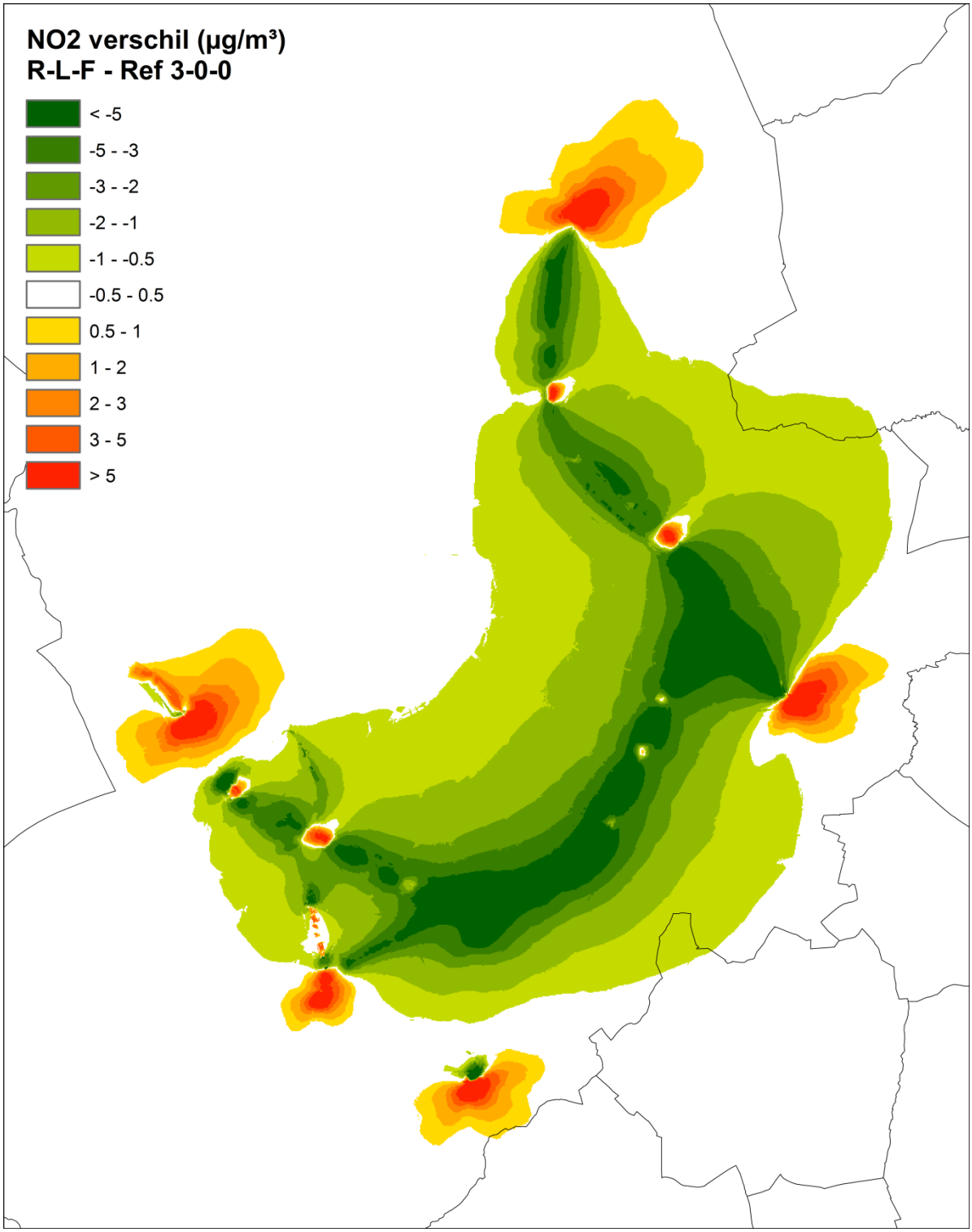
Figuur 37: Jaargemiddelde NO_2-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving voor Ringland scenario zonder filtertechnieken, prognosejaar 2020.



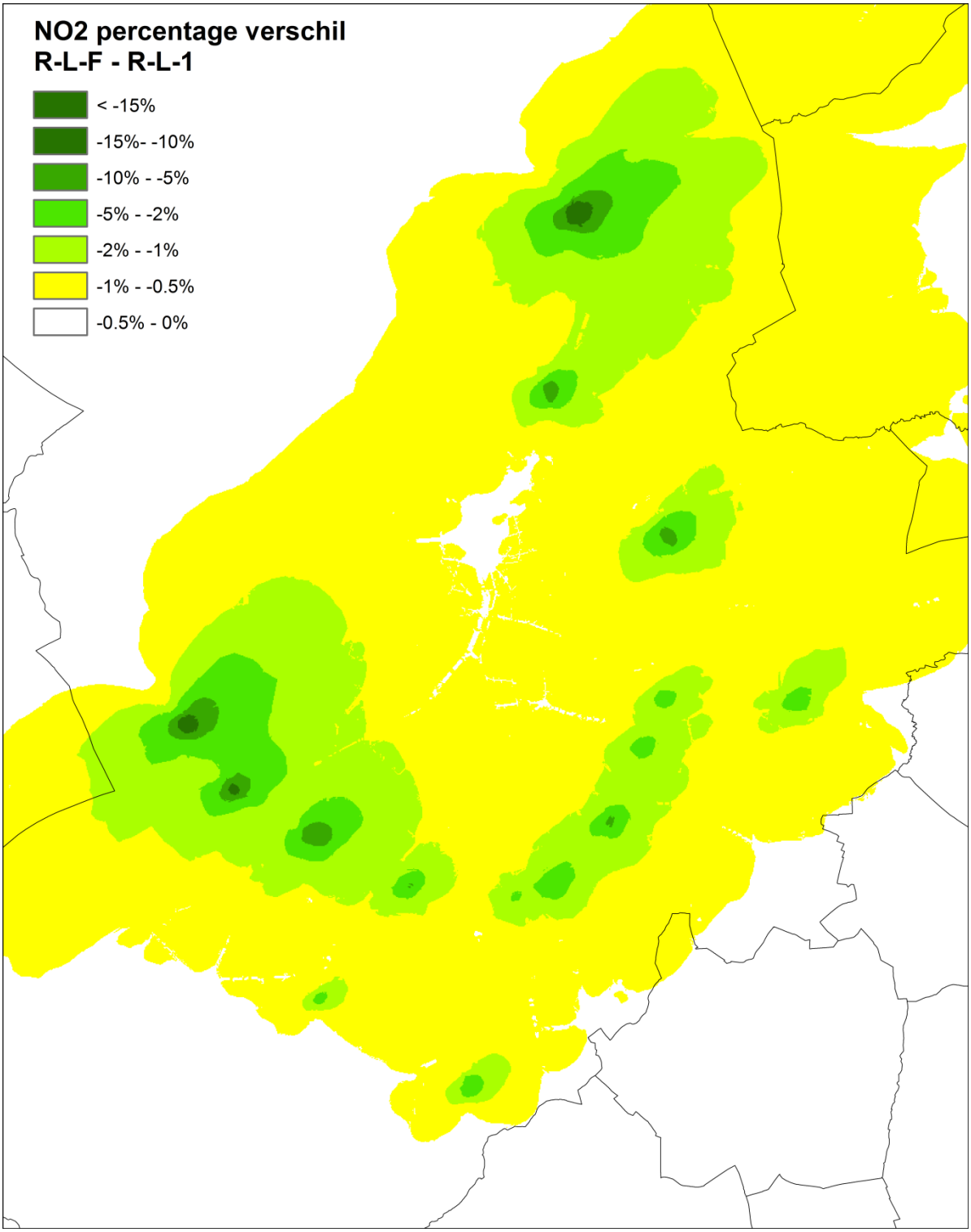
Figuur 38: Verschil in jaargemiddelde NO_2-concentraties (µg/m³) tussen Ringland scenario zonder filtertechnieken en Oosterweel-Noord voor prognosejaar 2020.



Figuur 39: Jaargemiddelde NO_2-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving voor Ringland scenario met filtertechnieken, prognosejaar 2020.



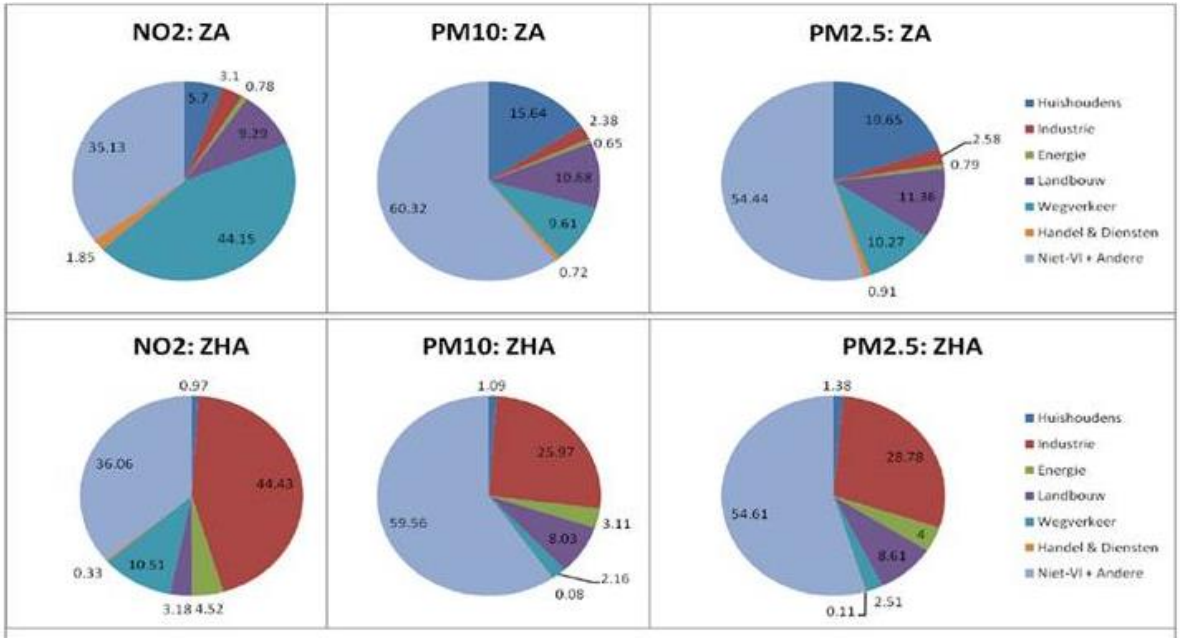
Figuur 40: Verschil in jaargemiddelde NO2-concentraties (µg/m³) tussen Ringland scenario met filtertechnieken en Oosterweel-Noord voor prognosejaar 2020.



Figuur 41: Het procentuele verschil in jaargemiddelde NO_2 concentraties tussen Ringland met en zonder toepassing van filtertechnieken.

5.2. $PM_{2.5}$

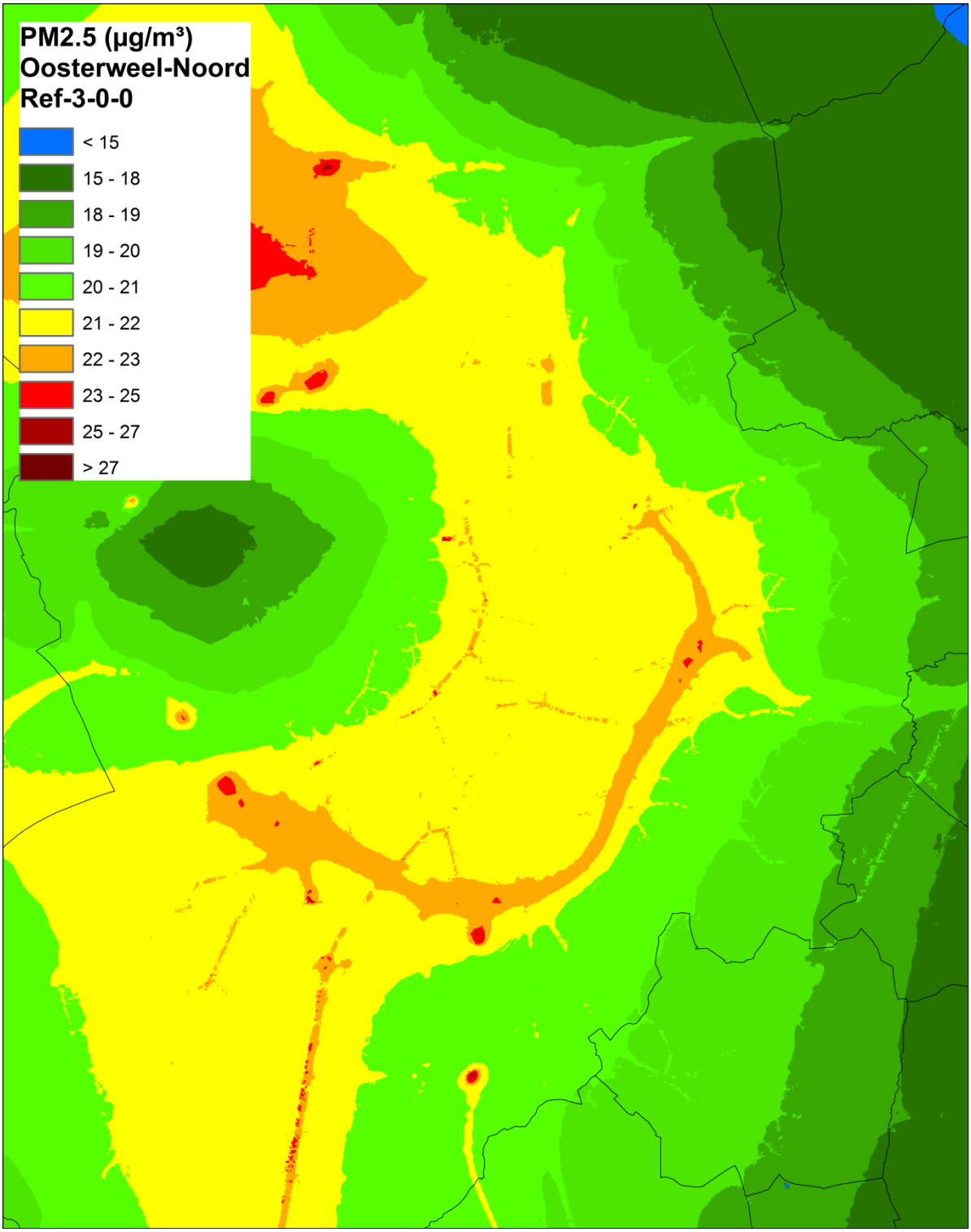
De variatie in PM-concentraties is veel lager dan de variatie in NO_2-concentraties, zoals bijvoorbeeld kan worden vastgesteld in Figuur 43. Voor PM zijn de lokale verkeersbijdrages in Antwerpen maar ook elders in Vlaanderen minder dominant in het bepalen van de lokale concentraties. Figuur 42 geeft de brontoewijzing voor NO_2, PM_{10} en $PM_{2.5}$ voor de stad Antwerpen en de haven. Voor NO_2 wordt 44% van de concentraties geleverd door de bijdrage van wegverkeer, voor PM bedraagt dit slechts 10%. In het ruimtelijk patroon van de PM concentraties zijn de verkeersbijdrages duidelijk maar ze zijn minder dominant dan bij NO_2.



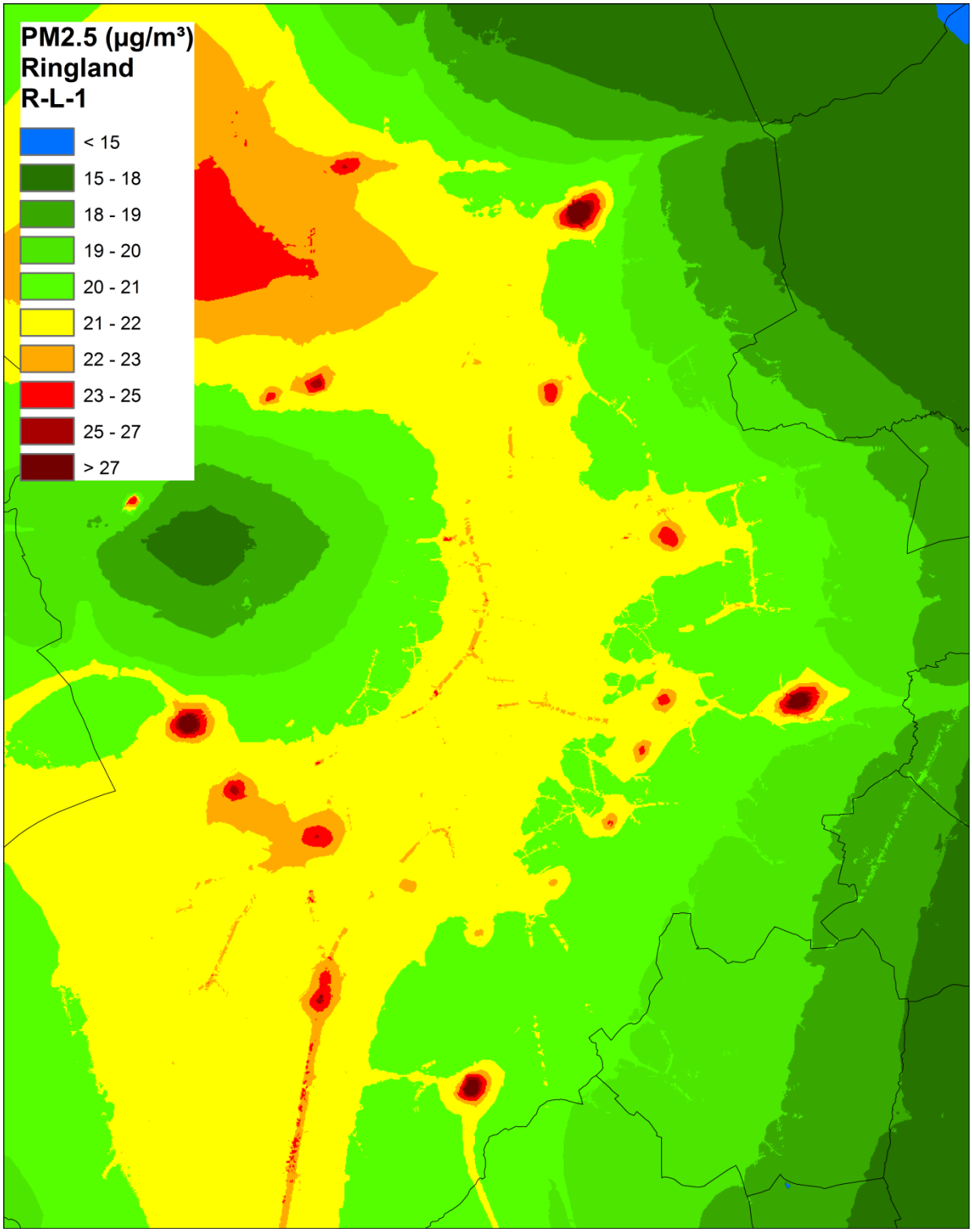
Figuur 42: Brontoewijzing (in%) voor NO_2, PM_{10} en $PM_{2.5}$ voor de stad Antwerpen (boven) en de haven van Antwerpen (onder), overgenomen uit (Lefebvre et al., 2011). De zes genoemde sectoren stellen de Vlaamse emissies in deze sectoren voor. In andere zitten o.a. niet-lineaire effecten, niet-Vlaamse emissies en niet antropogene emissies. Een waarde voor de sector industrie van 28,78 voor $PM_{2.5}$ voor de haven van Antwerpen betekent dat ongeveer 28,78% van de $PM_{2.5}$-concentraties in de Haven van Antwerpen te wijten zijn aan de Vlaamse Industrie.

Verhoogde $PM_{2.5}$ concentraties zijn gemodelleerd in de nabijheid van de ring, de tunnelmonden en het zuidelijk deel van het havengebied (Figuur 43). Overschrijdingen van de $PM_{2.5}$-jaarnorm (25 µg/m³) worden alleen gezien aan tunnelmonden. Overschrijdingen van de streefwaarde van 20 µg/m³ worden gezien in zowel de stadskern als het zuidelijk deel van de haven. De WHO-norm van 10 µg/m³ wordt bijna overal overschreden.

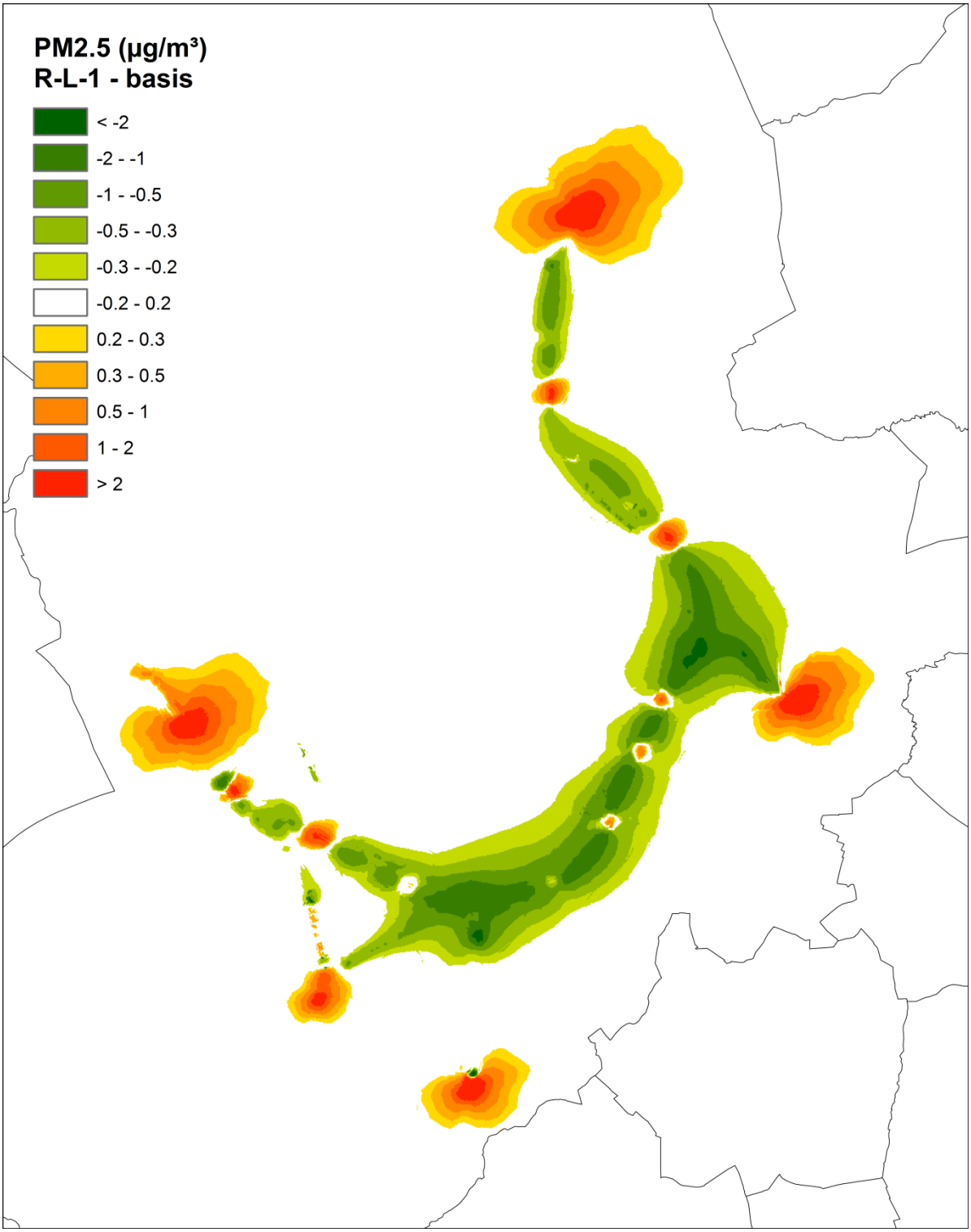
Het Ringland scenario zorgt voor een verschuiving van de tunnelemissies naar de tunnelmonden (Figuur 44 en Figuur 45). De verschilkaart toont dat langs het traject van de ring $PM_{2.5}$ concentraties met ongeveer 1 µg/m³ afnemen en ongeveer 0.3 µg/m³ dalen op 500 m van de ring in de binnenstad. Bij de tunnelmonden stijgen daarentegen de PM concentraties. Het scenario met filtertechnieken leidt tot verbeteringen met tot ongeveer 10% rondom de tunnelmonden. De absolute $PM_{2.5}$-kaarten en de verschilkaarten voor dit scenario worden hiervoor getoond in Figuur 46, Figuur 47 en Figuur 48.



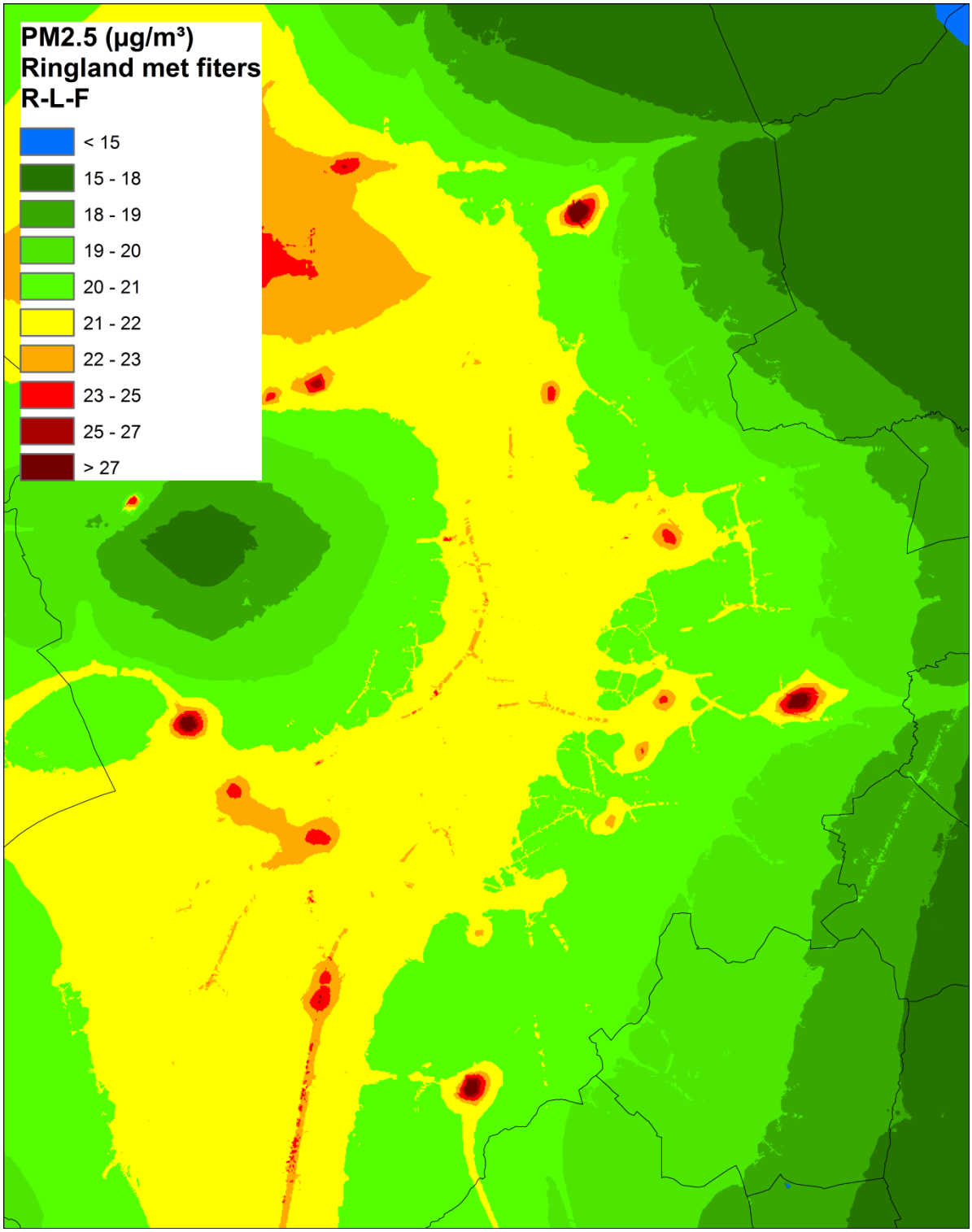
Figuur 43: Jaargemiddelde $PM_{2.5}$-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving voor referentiescenario Oosterweel-Noord, prognosejaar 2020.



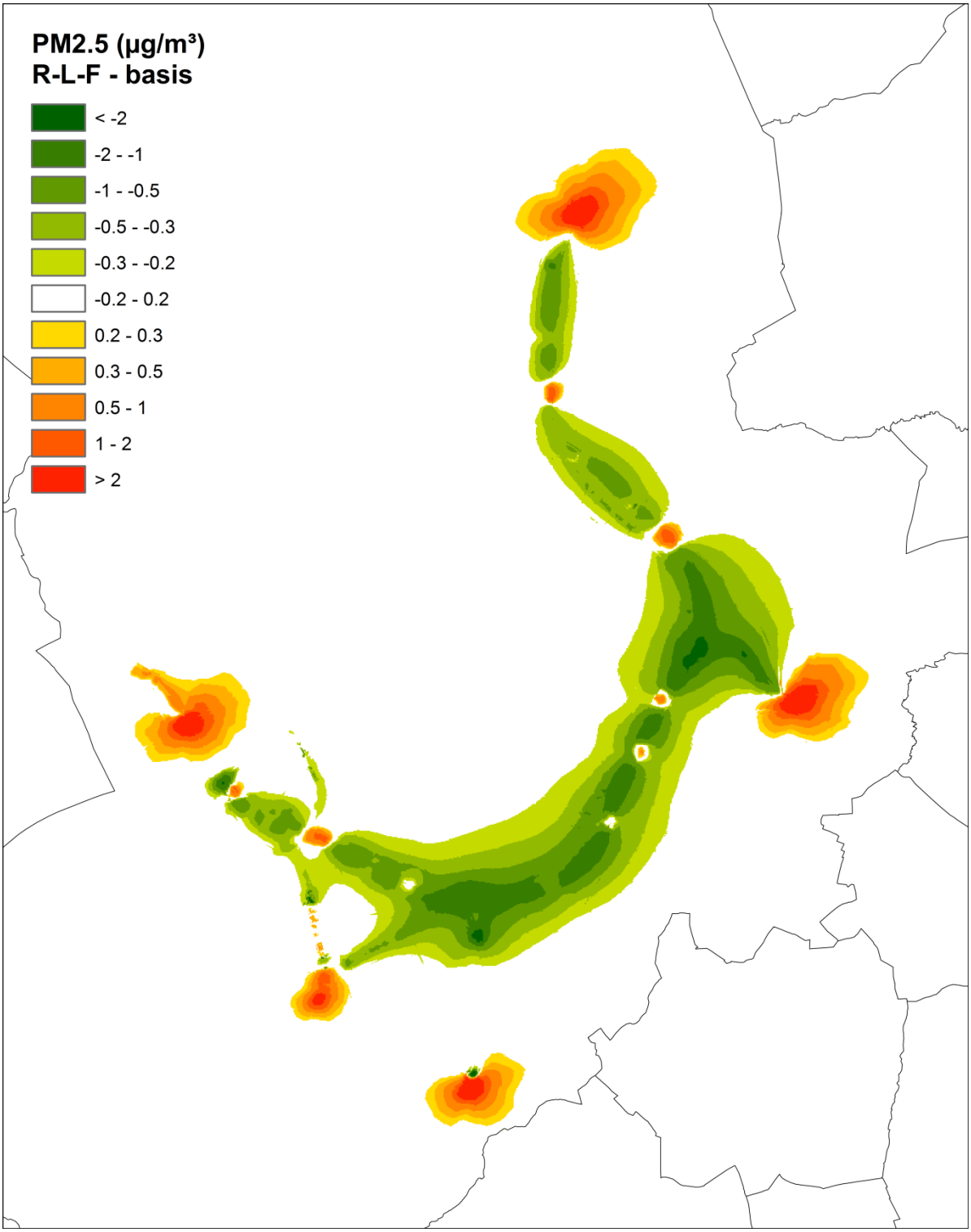
Figuur 44: Jaargemiddelde $PM_{2.5}$-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving voor Ringland scenario zonder filtertechnieken, prognosejaar 2020.



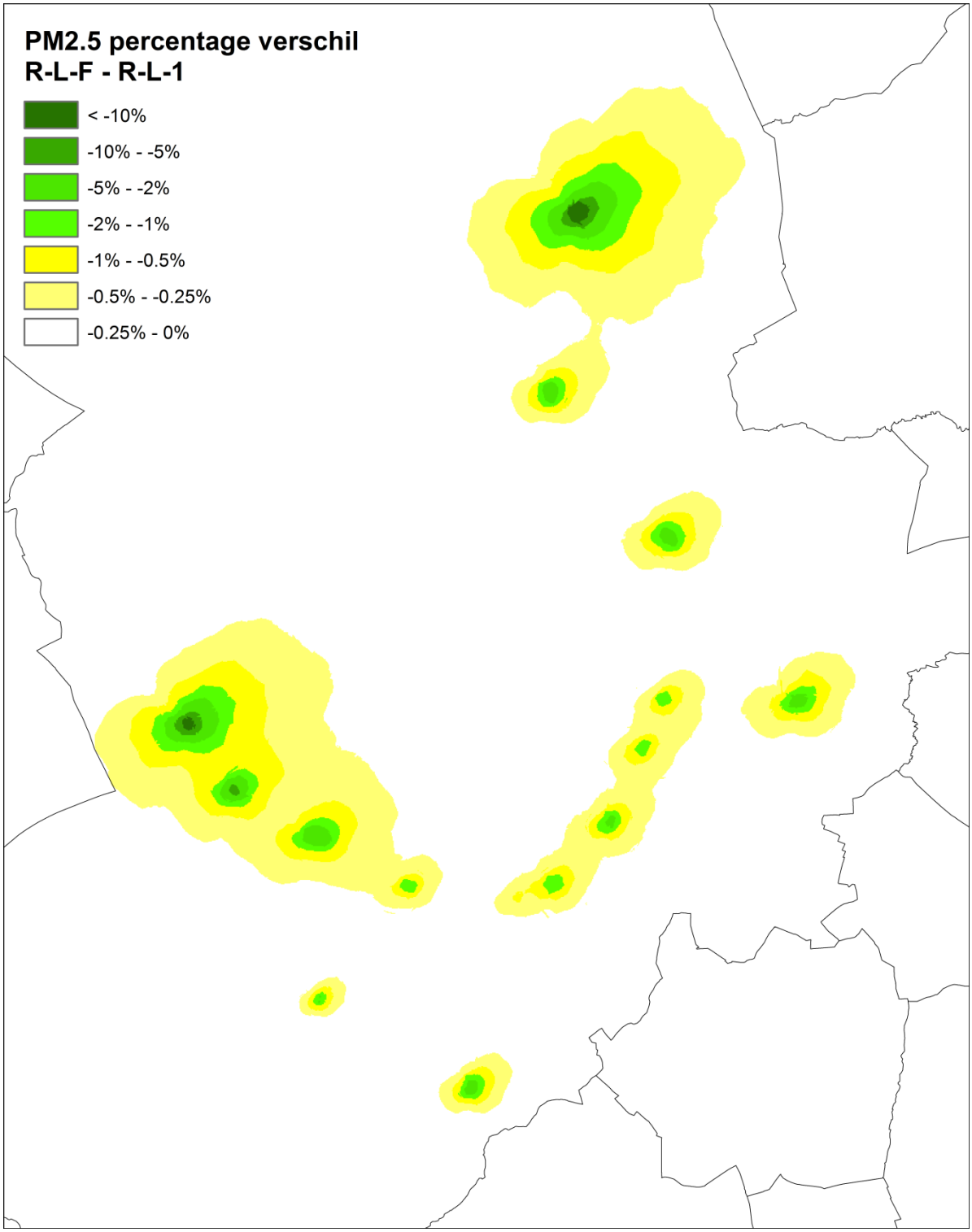
Figuur 45: Verschil in jaargemiddelde $PM_{2.5}$-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving tussen Ringland scenario zonder filtertechnieken en Oosterweel-Noord, prognosejaar 2020.



Figuur 46: Jaargemiddelde $PM_{2.5}$-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving voor Ringland scenario met filtertechnieken, prognosejaar 2020.



Figuur 47: Verschil in jaargemiddelde $PM_{2.5}$-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving tussen Ringland scenario met filtertechnieken en Oosterweel-Noord, prognosejaar 2020.

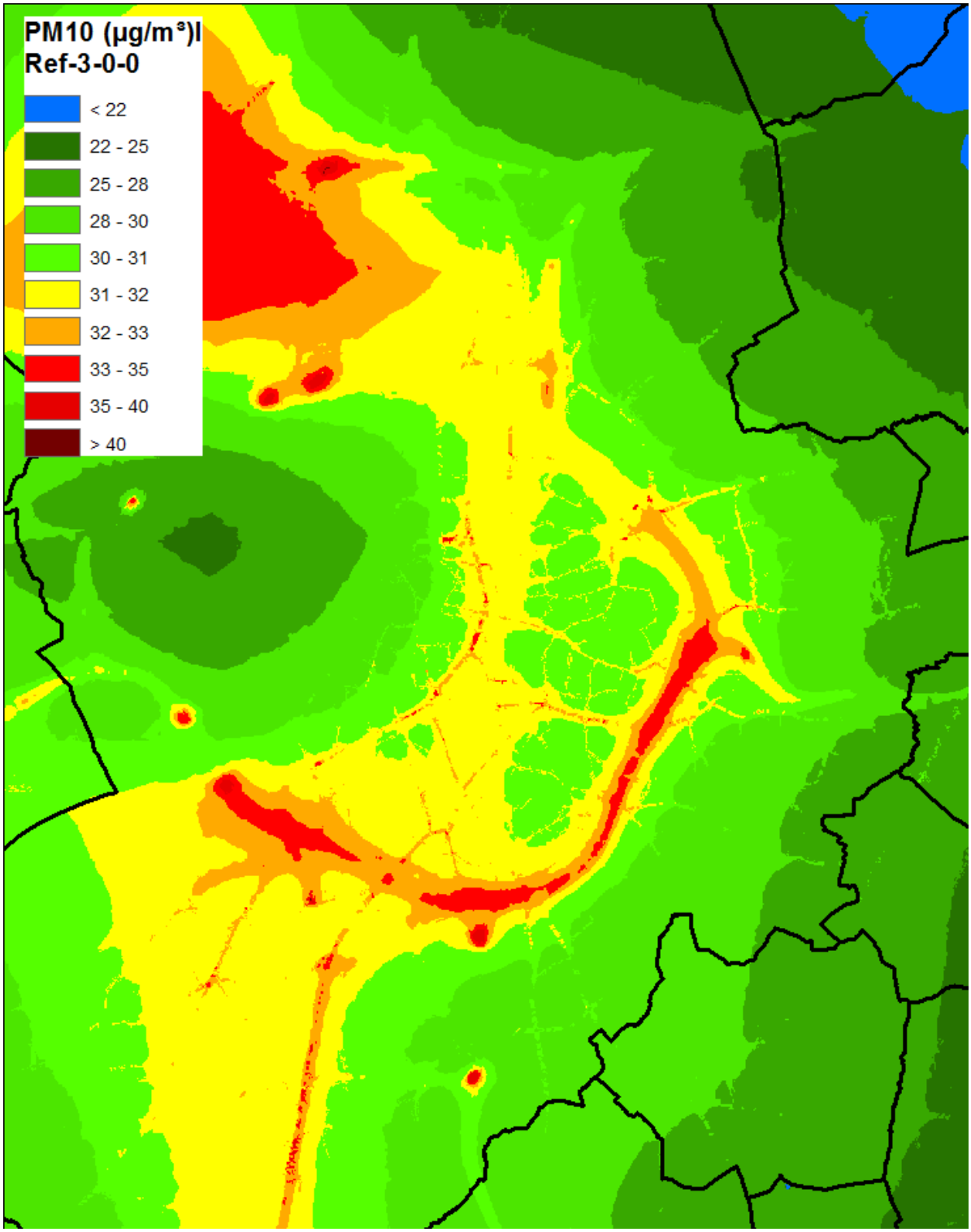


Figuur 48: Procentueel verschil in jaargemiddelde $PM_{2.5}$ concentraties tussen Ringland scenario met en zonder filtertechieken, prognosejaar 2020.

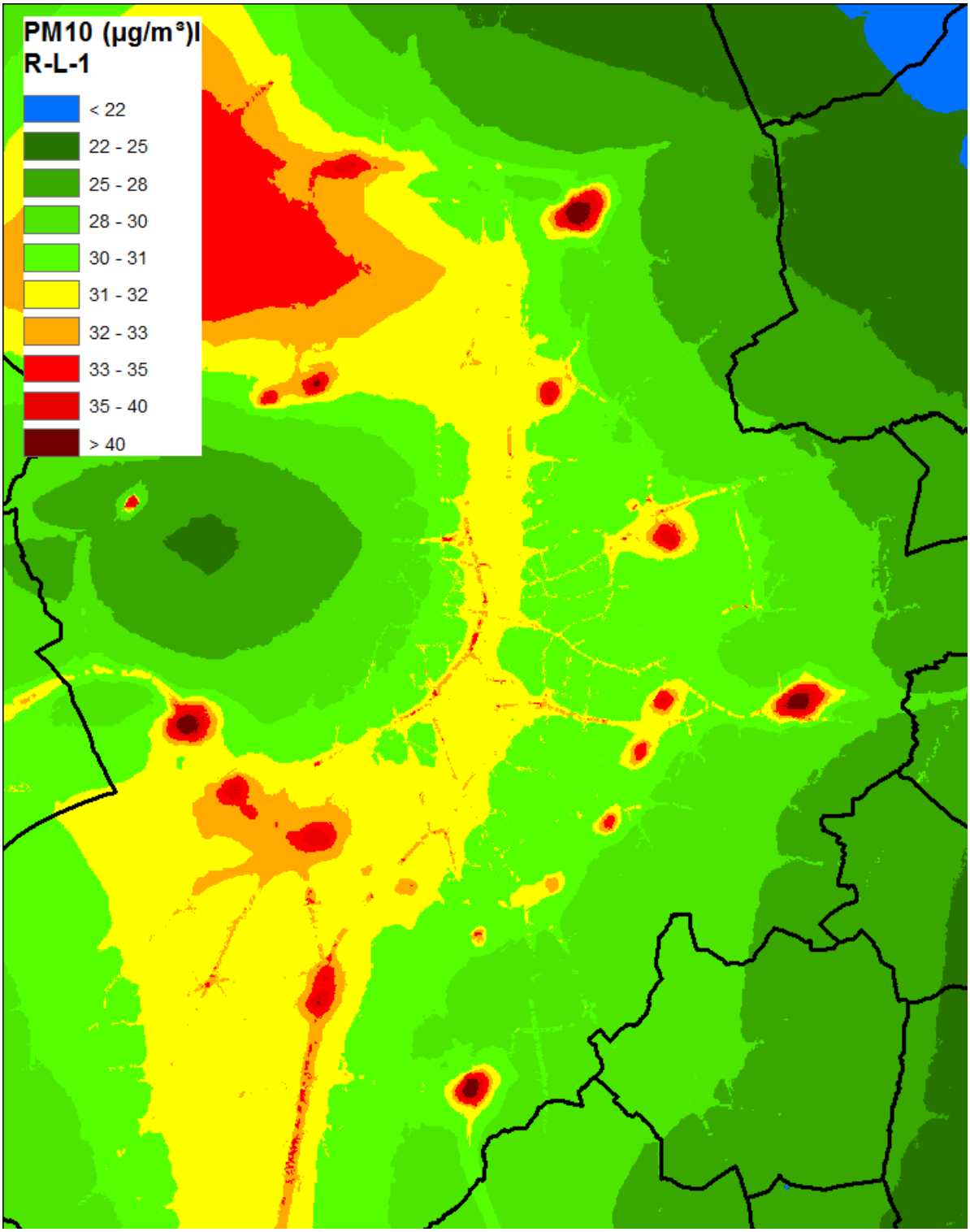
5.3. PM_{10}

De variatie en wijzigingen in PM_{10}-concentraties is vergelijkbaar aan deze van $PM_{2.5}$. De absolute PM_{10} concentraties zijn groter maar de procentuele effecten van Ringland en luchtzuivering in de tunnels is soortgelijk. De figuren hieronder geven de jaargemiddelde concentratiekaarten voor de 3 scenario's, de verschilkaarten voor Ringland ten opzichte van Oosterweel-Noord en de effecten die luchtfilters in de tunnels teweeg brengen.

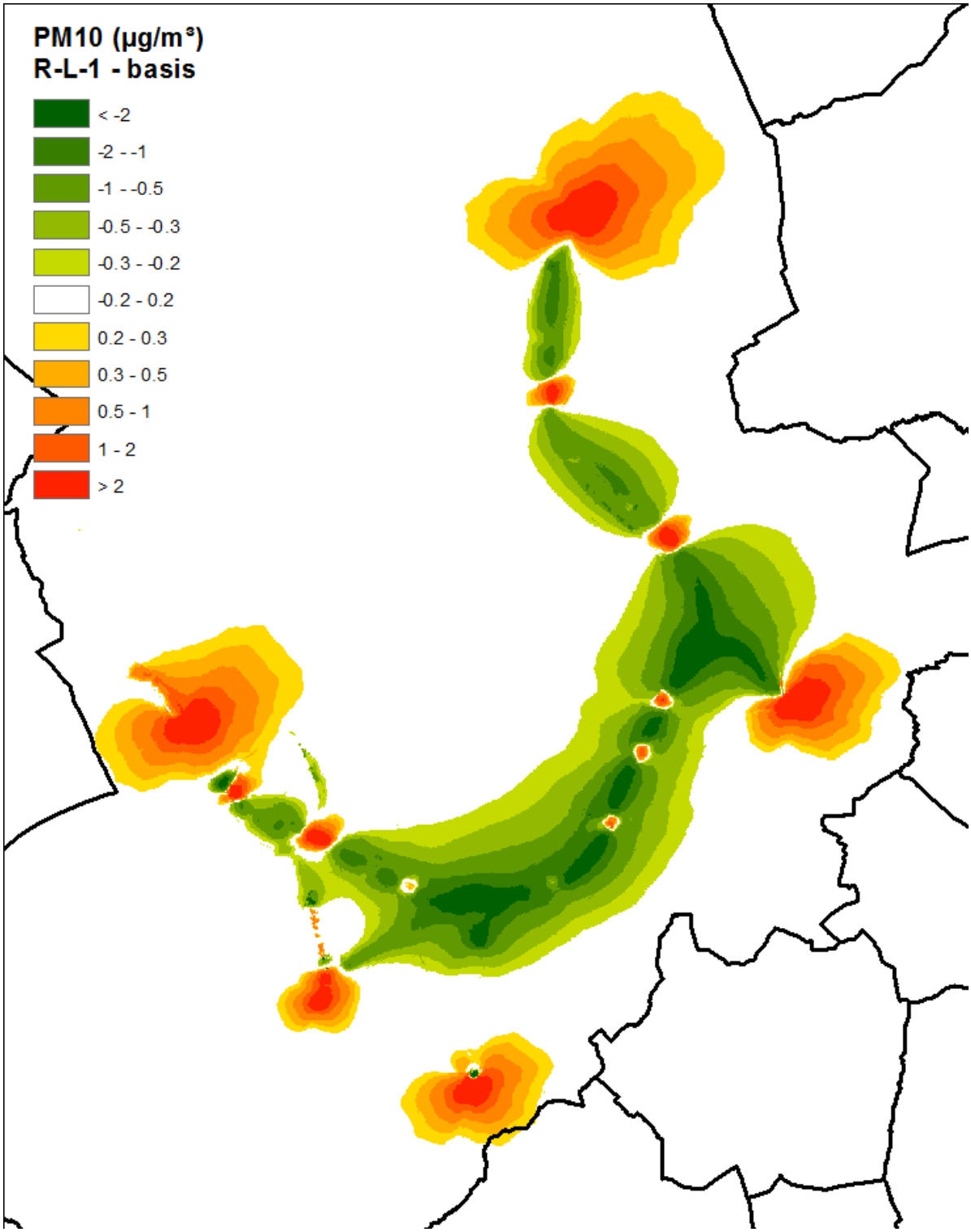
Voor PM_{10} gelden verschillende Europese normen. Voor PM_{10} wordt de jaargemiddelde norm van 40 µg/m³ slechts bij de belangrijkste tunnelmonden overschreden. Voor PM_{10} is er echter eveneens een norm voor de daggemiddelde concentraties, waar de norm ligt op 35 overschrijdingen van de drempel van 50 µg/m³ gedurende een jaar. Een jaargemiddelde concentratiegrens van 31 µg/m³ is een goede indicator voor het overschrijden van de dagnorm. Dit toont dus dat er rond deze dagnorm nog resterende problematiek wordt verwacht in Antwerpen, meer bepaald in delen van de binnenstad, nabijheid van snelwegen en het zuiden van de haven. De WHO-norm van 20 µg/m³ wordt bijna overal overschreden.



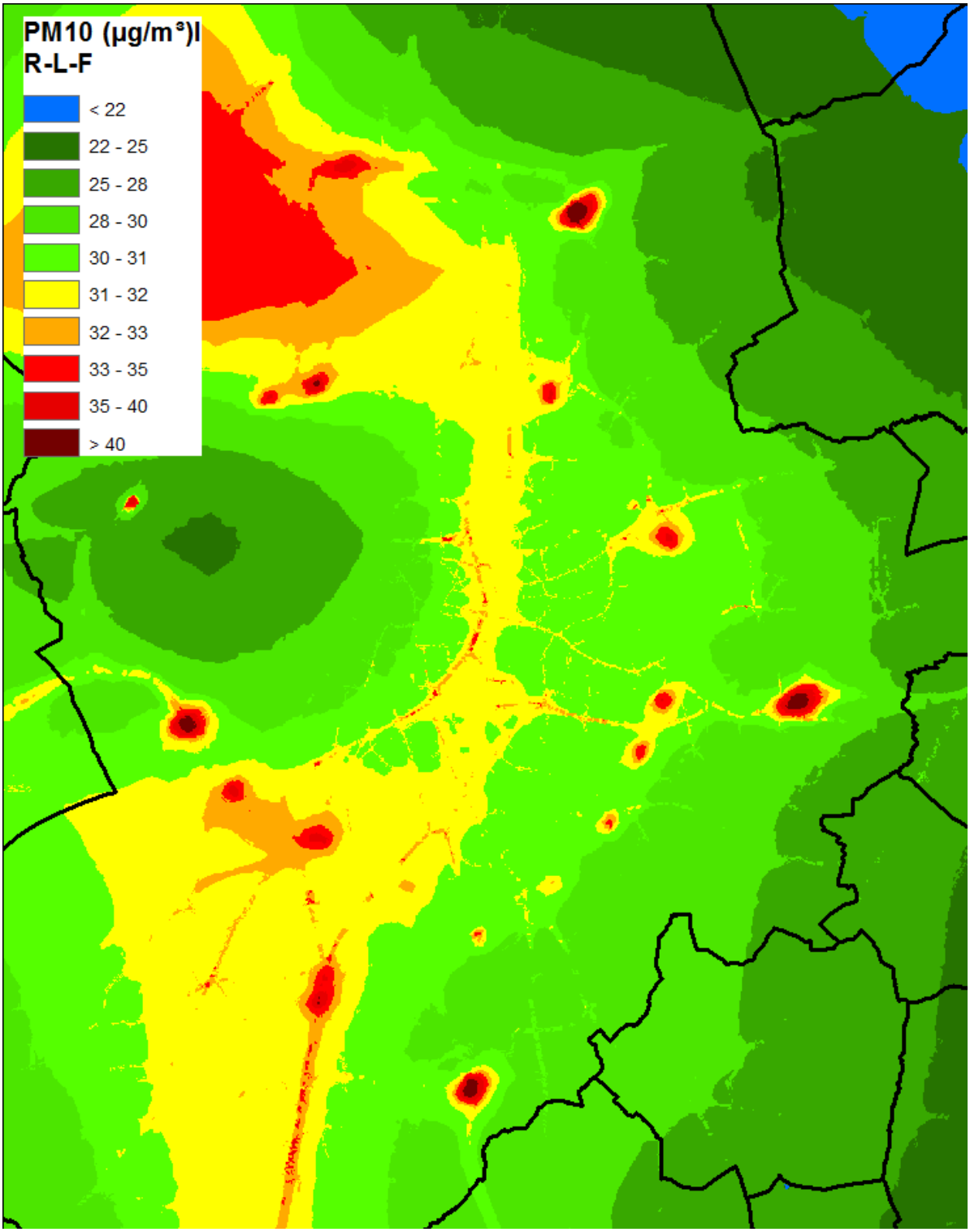
Figuur 49: Jaargemiddelde PM_{10}-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving voor referentiescenario Oosterweel-Noord, prognosejaar 2020.



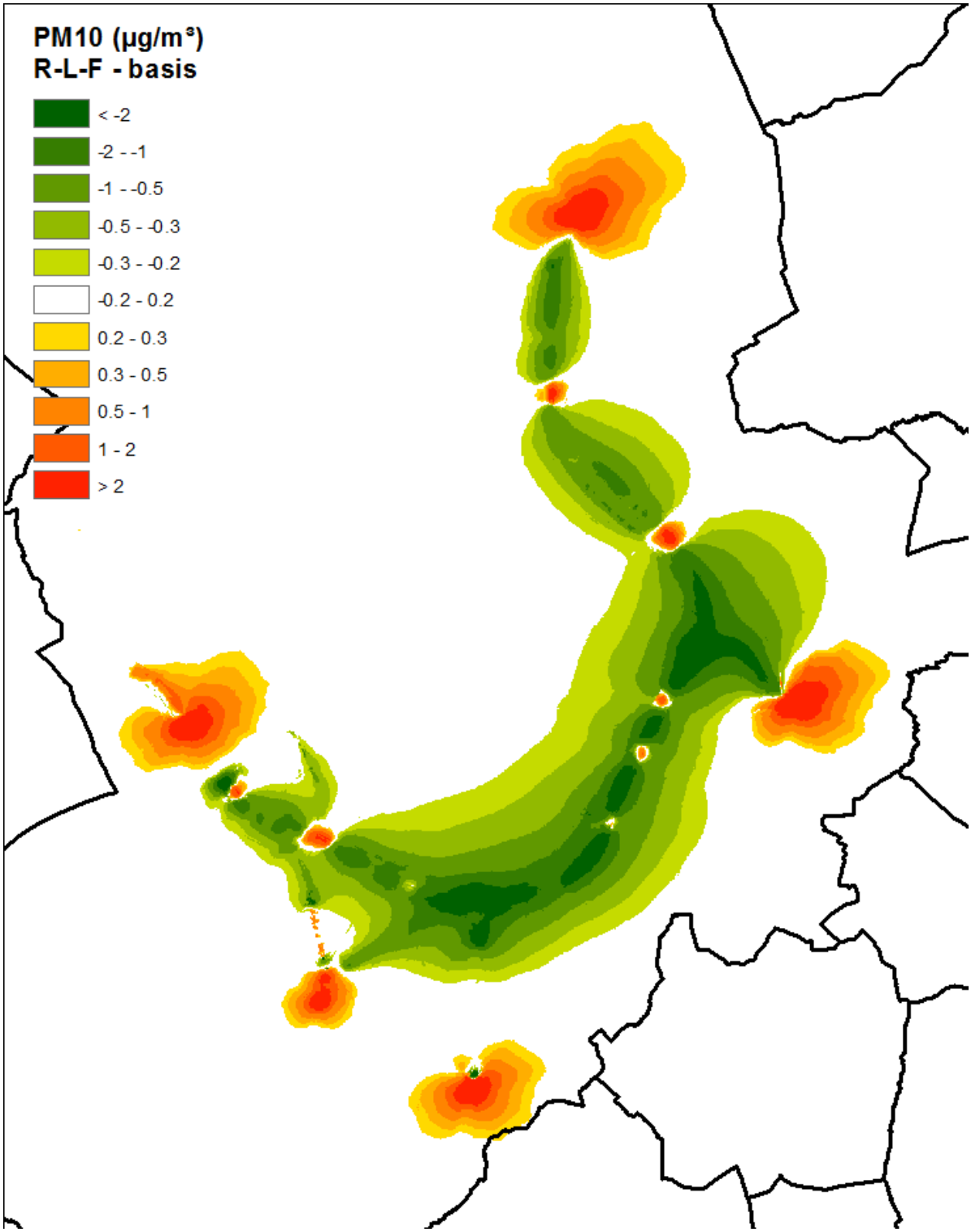
Figuur 50: Jaargemiddelde PM_{10}-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving voor Ringland scenario zonder filtertechnieken, prognosejaar 2020.



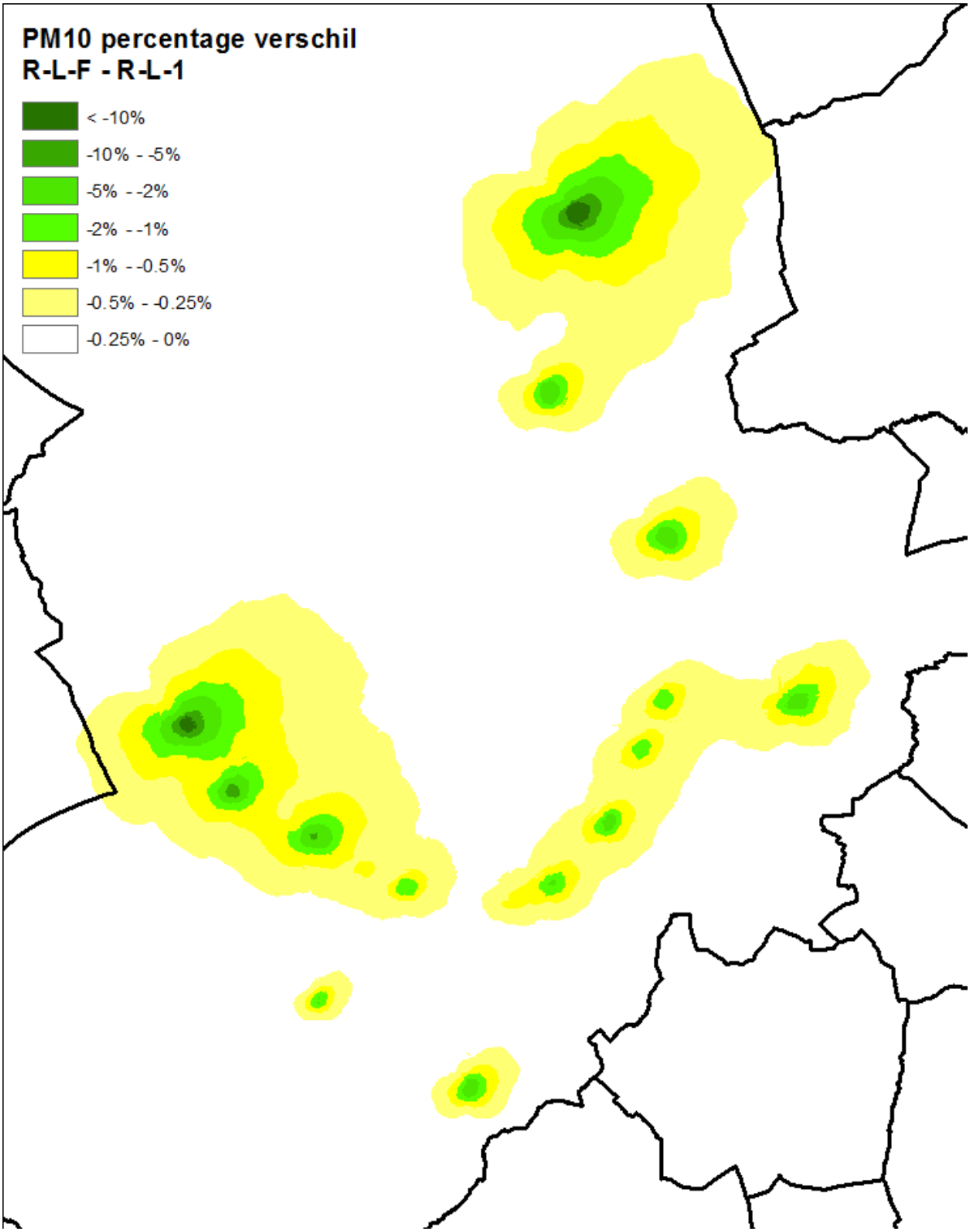
Figuur 51: Verschil in jaargemiddelde PM_{10}-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving tussen Ringland scenario zonder filtertechnieken en Oosterweel-Noord, prognosejaar 2020.



Figuur 52: Jaargemiddelde PM_{10}-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving voor Ringland scenario met filtertechnieken, prognosejaar 2020.



Figuur 53: Verschil in jaargemiddelde PM_{10}-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving tussen Ringland scenario met filtertechnieken en Oosterweel-Noord, prognosejaar 2020.



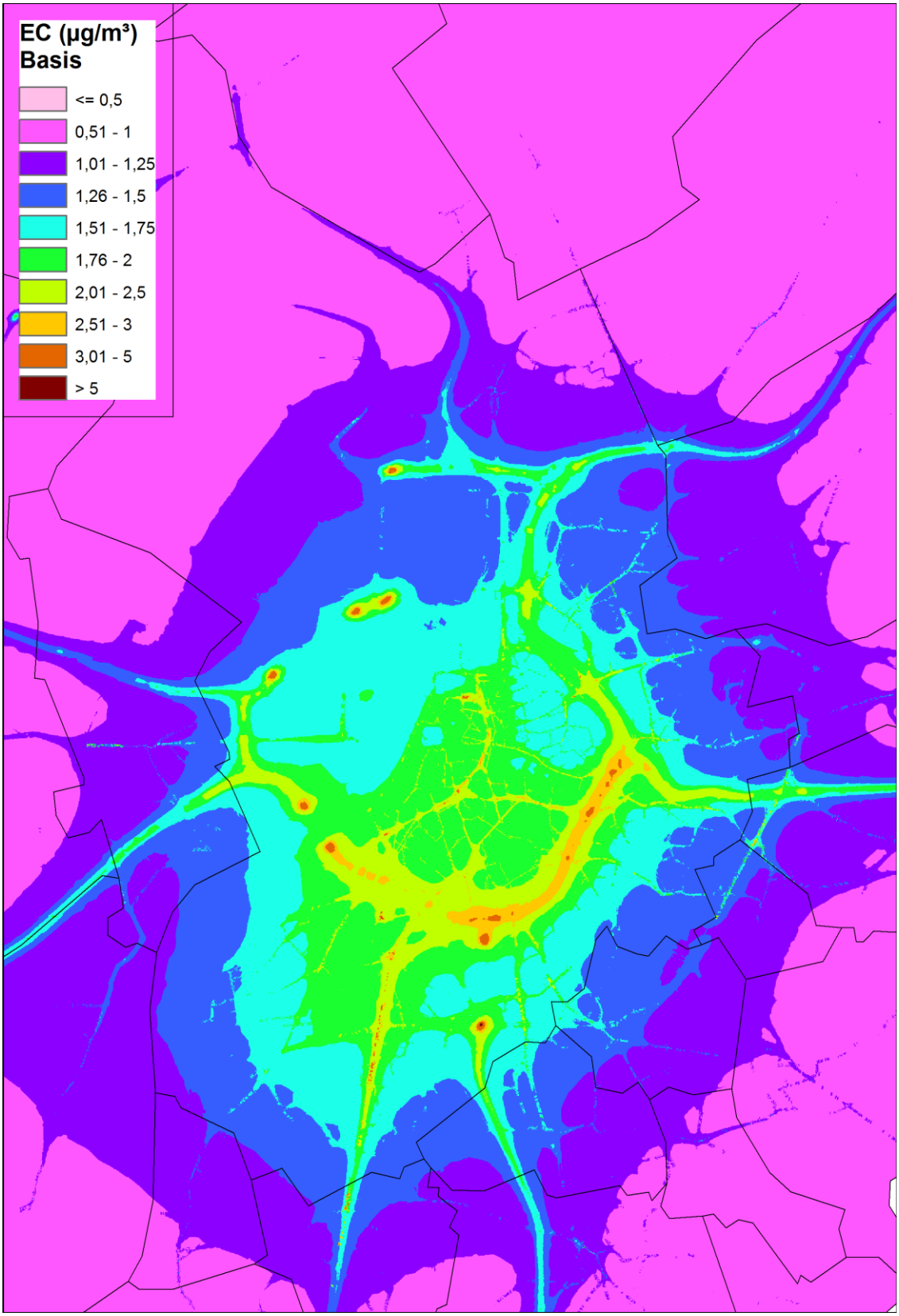
Figuur 54: Procentueel verschil in jaargemiddelde PM_{10} concentraties tussen Ringland scenario met en zonder filtertechieken, prognosejaar 2020.

5.4. EC

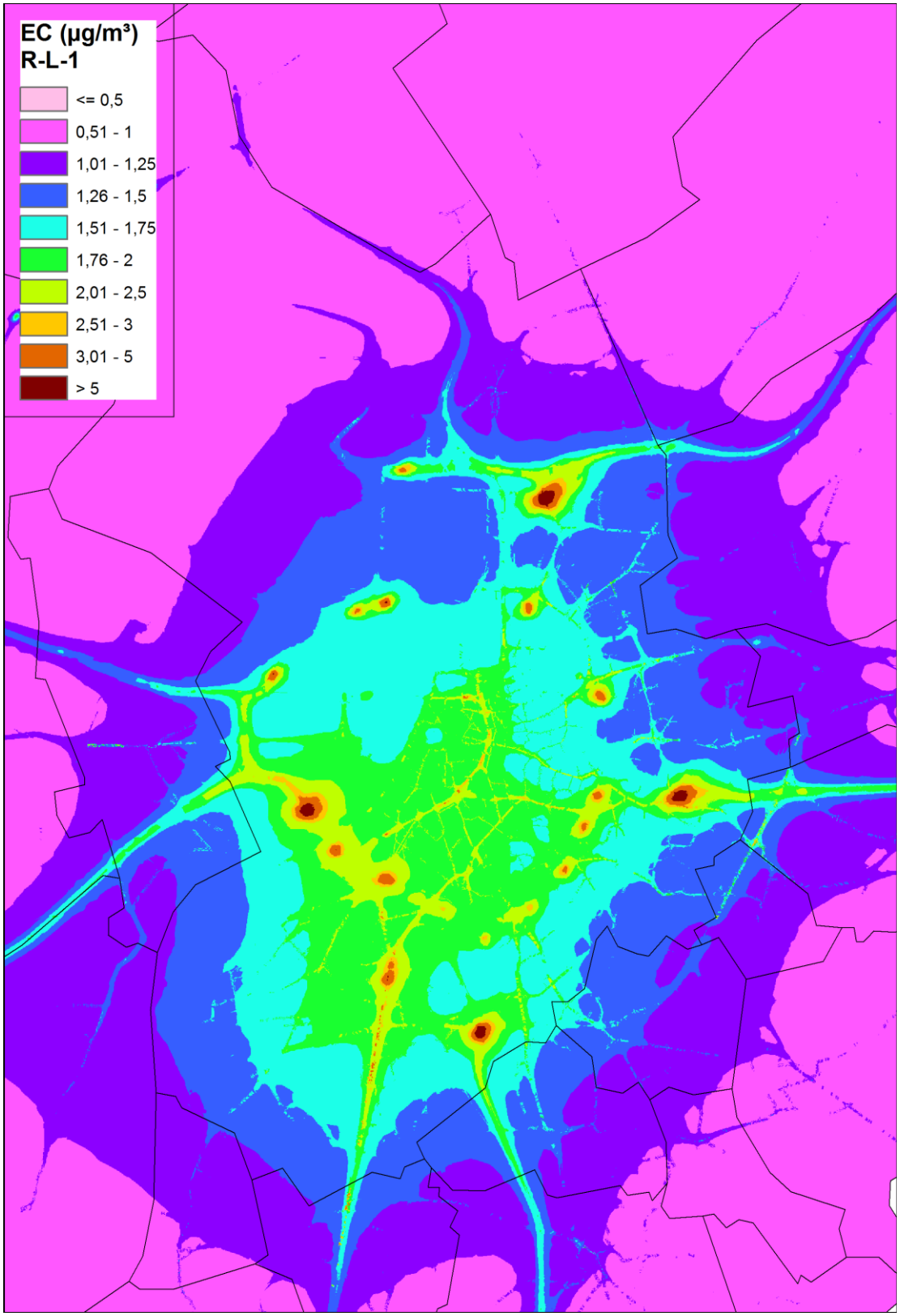
Elementair koolstof of EC is een fractie van $PM_{2.5}$. Dit betreft roetdeeltjes waartoe o.a. dieselmotoren een belangrijke bijdrage leveren. Voor deze luchtpolluent is er dus net zoals voor NO_2 een sterke link met wegverkeer en zijn er sterke gradiënten over het studiegebied. Sterk verhoogde concentraties worden dus gemodelleerd in de nabijheid van belangrijke verkeersaders. Voor EC is er momenteel geen Europese norm. Rapporten van de Wereld Gezondheidsorganisatie (WHO) tonen echter de link tussen EC en gezondheidseffecten, zodat dit als een schadelijke fractie van PM kan worden beschouwd (Janssen et al., 2012).

De introductie van Ringland zorgt voor een daling van de EC concentraties in de nabijheid van de ring en een aanzienlijk deel van de binnenstad. In de zone van ongeveer 1 km rond de zuidelijke ring dalen de concentraties met 0.2 µg/m³ tot 1.0 µg/m³. Dit komt overeen met 10% tot 40% verbetering. Uitzondering vormen uiteraard wederom de tunnelmonden waar de emissies toenemen. Toepassen van filtertechnieken kan deze hot-spots milderen met tot 15%.

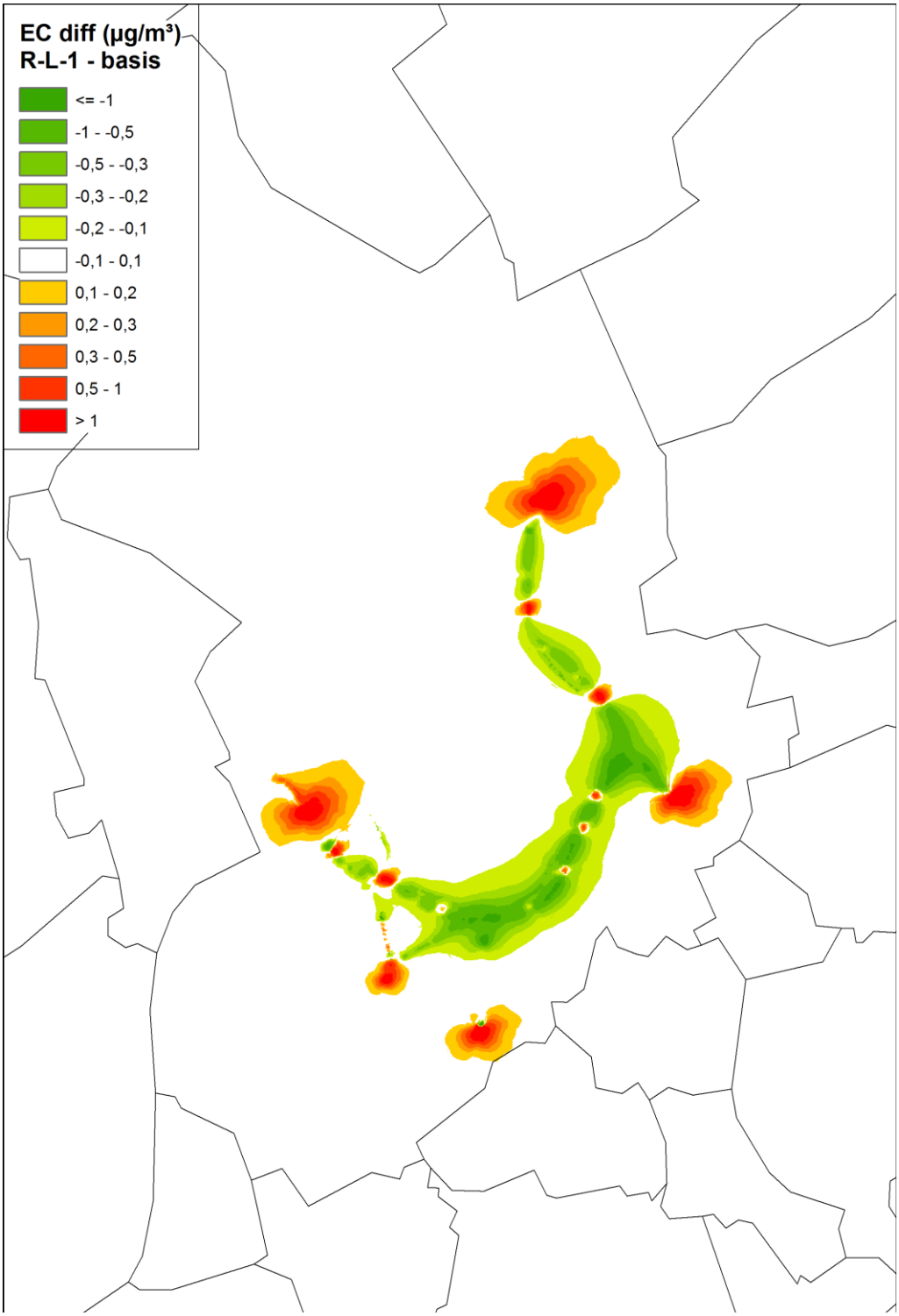
Omwille van het ontbreken van bestaande normen geven we als referentiekader een vergelijking met andere locaties in Vlaanderen. Landelijke achtergrondwaardes voor EC schommelen op jaarbasis rond 0.5 µg/m³, stedelijke achtergrondwaarden kunnen 2 µg/m³ of hogere waardes bereiken en lokaal rond drukke verkeersaders kunnen EC concentraties hoger dan 5 µg/m³ worden aangetroffen.



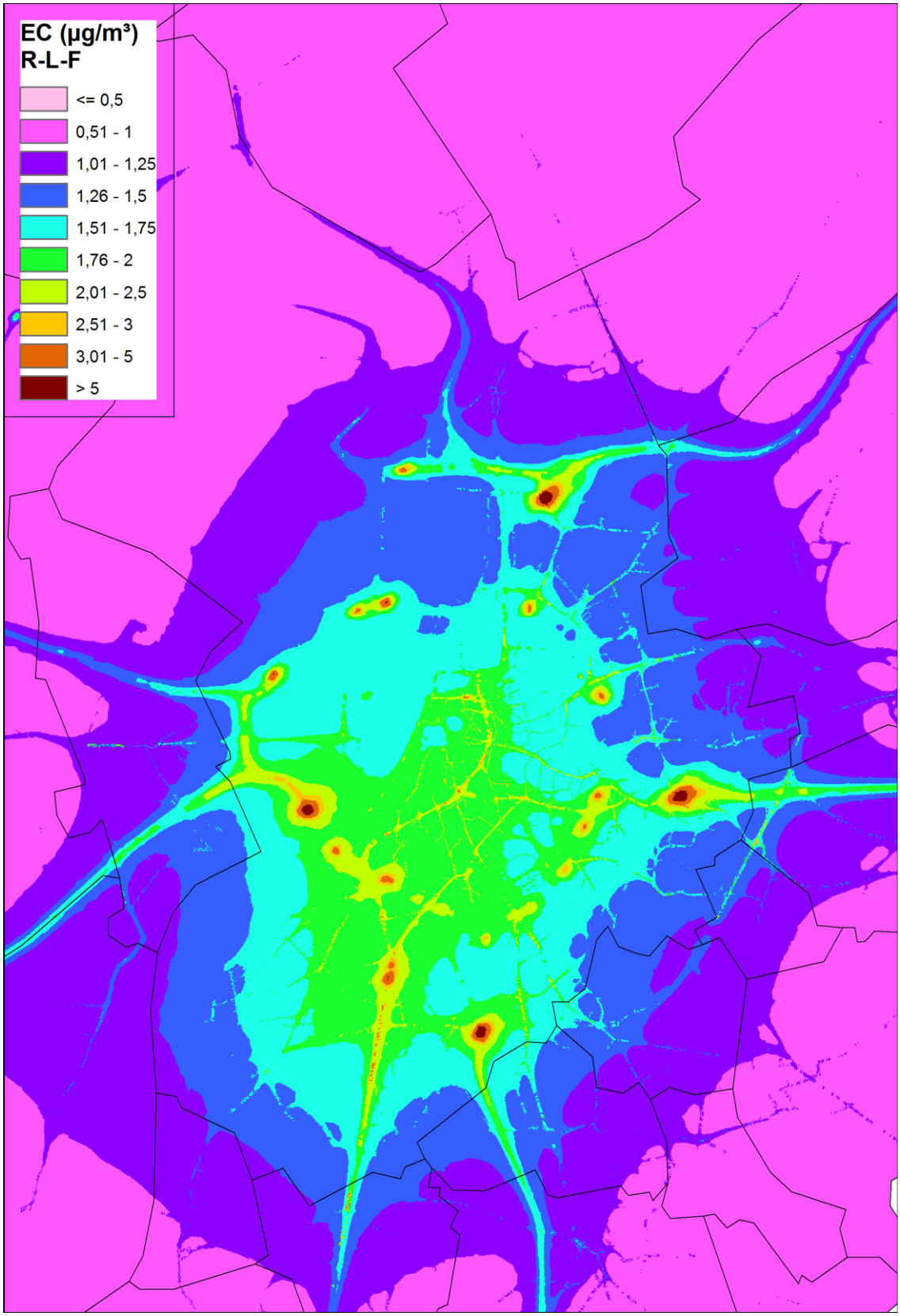
Figuur 55: Jaargemiddelde EC-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving voor Oosterweel-Noord scenario, prognosejaar 2020.



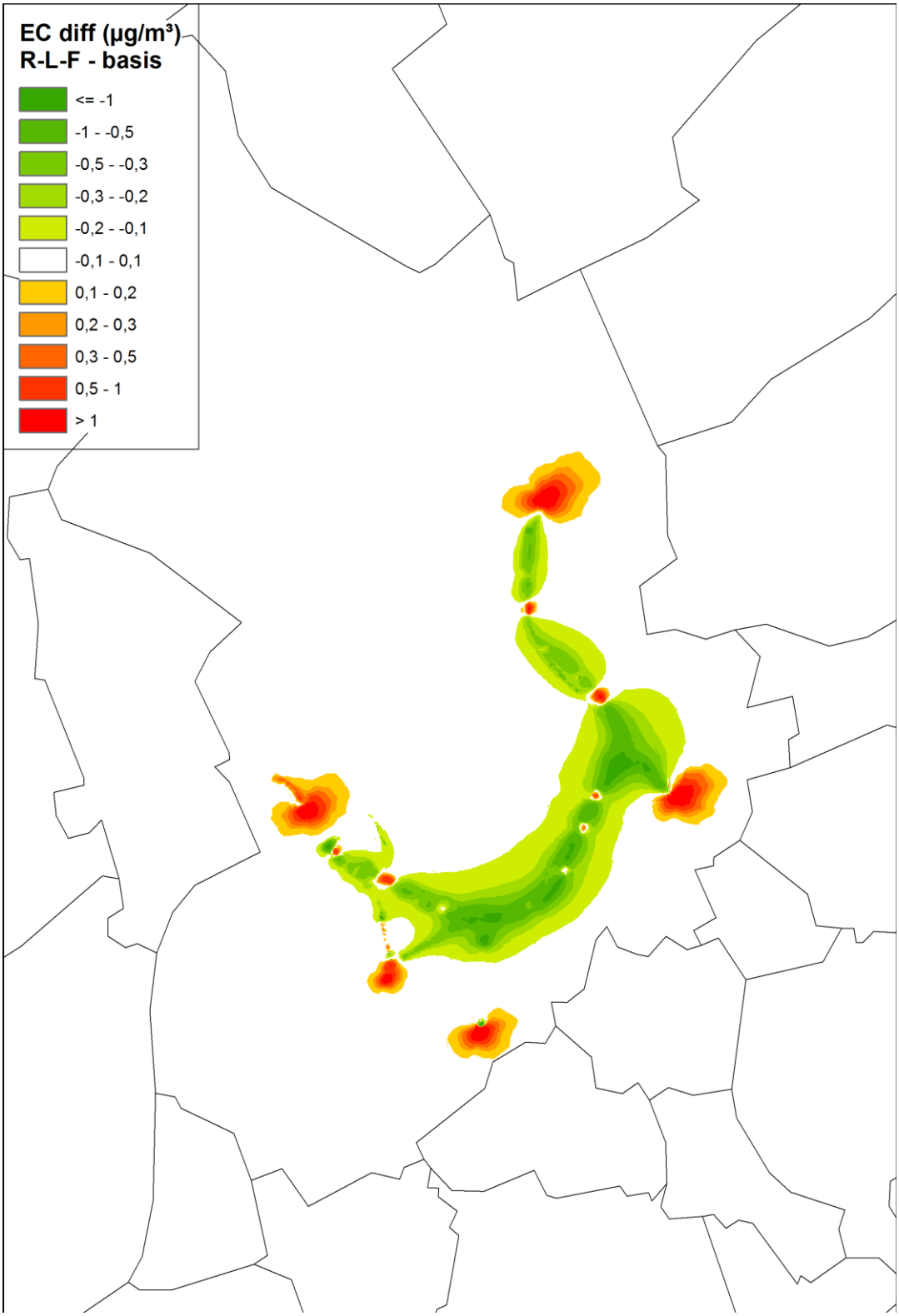
Figuur 56: Jaargemiddelde EC-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving voor Ringland scenario zonder filtertechnieken, prognosejaar 2020.



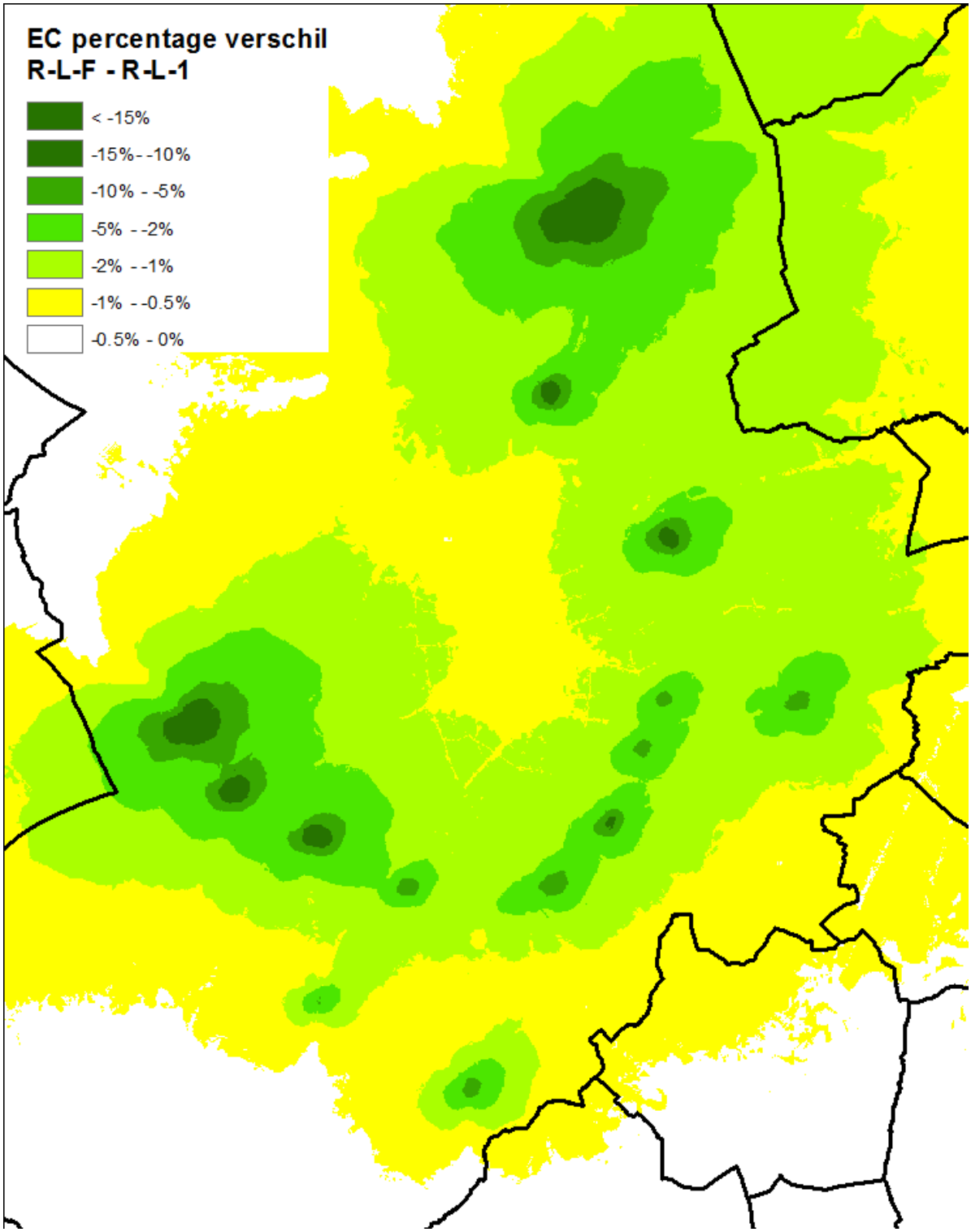
Figuur 57: Verschil in jaargemiddelde EC-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving tussen Ringland scenario zonder filtertechnieken en Oosterweel-Noord, prognosejaar 2020.



Figuur 58: Jaargemiddelde EC-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving voor Ringland scenario met filtertechnieken, prognosejaar 2020.



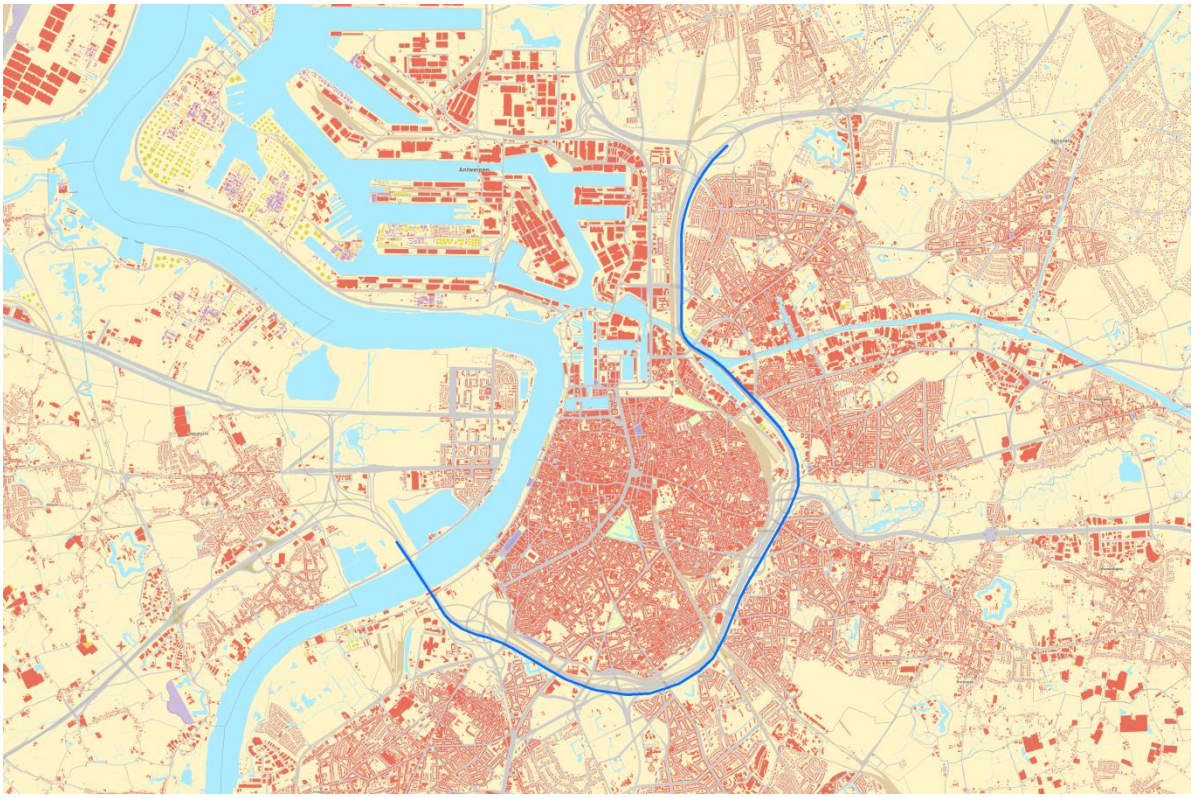
Figuur 59: Verschil in jaargemiddelde EC-concentraties (µg/m³) in Antwerpen en omgeving tussen Ringland scenario met filtertechnieken en Oosterweel-Noord, prognosejaar 2020.



Figuur 60: Procentueel verschil in jaargemiddelde EC concentraties tussen Ringland scenario met en zonder filtertechieken, prognosejaar 2020.

5.5. CONCENTRATIEPROFIELEN LANGS RINGTRAJECT

De jaargemiddelde concentratie is voor de verschillende polluenten geanalyseerd voor een traject langsheen de ring. Het startpunt vormt de westelijke tunnelmond van de Kennedytunnel (km 0), het eindpunt is het einde van het Ringland-tunnelcomplex nabij het knooppunt Antwerpen-Noord (km 15). Een overzicht van dit traject wordt gegeven in Figuur 61.

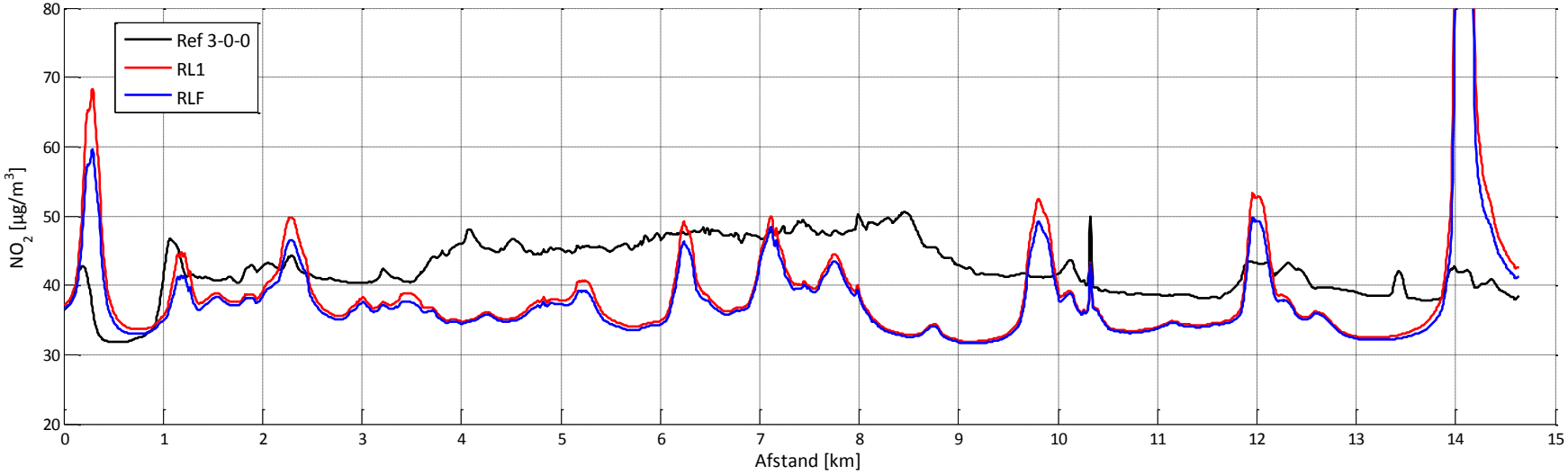


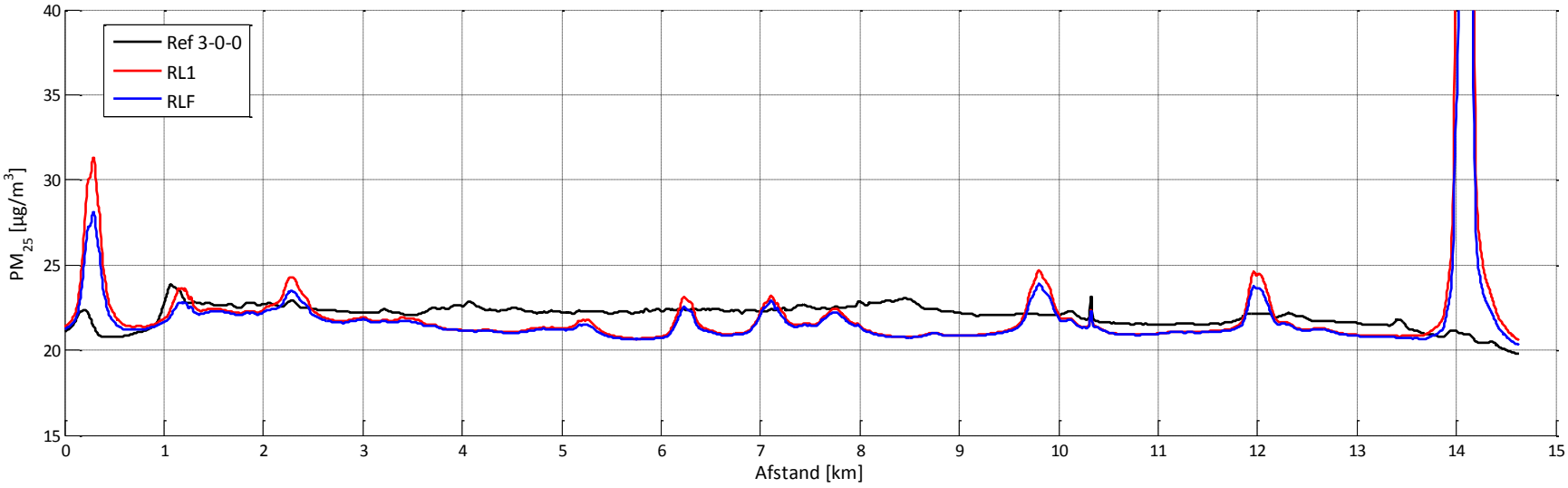
Figuur 61: Locatie van het gebruikte traject voor bijkomende concentratieanalyse

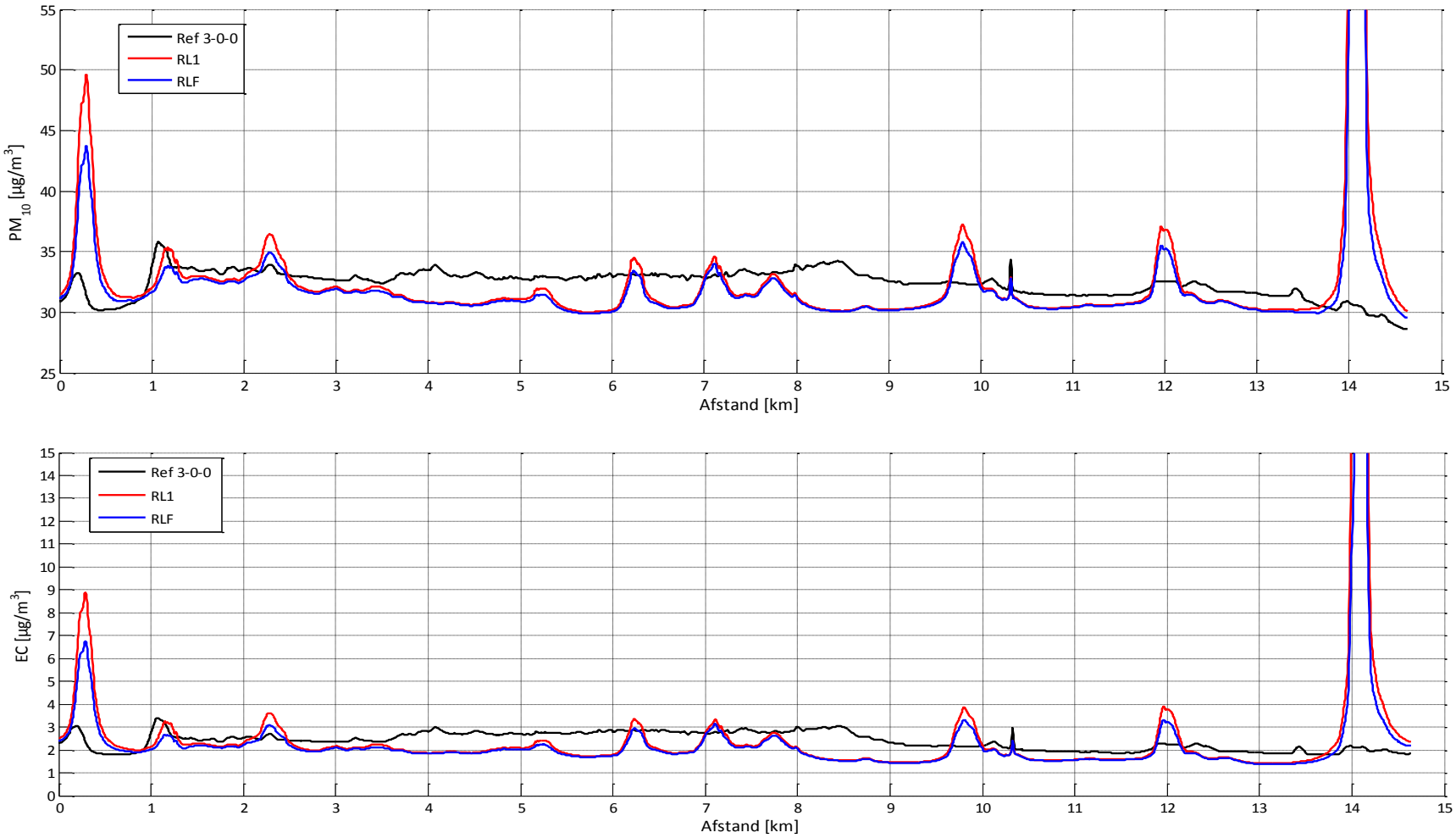
Langs dit traject kunnen de concentraties voor de 3 gemodelleerde scenario's vergeleken worden. Door de verplaatsing van emissies van het ringtraject naar de tunnelmonden zorgt Ringland voor verbeteringen langs grote zones van het traject waar de polluentconcentraties dalen tot de waardes in de bestaande woonwijken op grotere afstand van de ring. Eveneens brengt de analyse, voorgesteld in Figuur 62, de stijging van de concentratie bij tunnelmonden en afritten in beeld.

In het referentiescenario Oosterweel-Noord worden de hoogste concentraties gemodelleerd vanaf het knooppunt Antwerpen-Zuid (E19) tot voorbij knooppunt Antwerpen-Oost (E313). Het viaduct van Merksem heeft vervolgens een positieve invloed. Aangezien de emissies niet op grondniveau vrijkomen zijn de concentraties aan de grond lager. De analyse toont dat Ringland zorgt voor bijkomende ruimte langsheen de ring waar de concentraties van NO_2 onder de Europese norm van 40 µg/m³ blijven, uitgezonderd de afritten uit het tunnelcomplex. Bij de tunnelmonden ontstaan sterke toenames zoals ook uit de concentratiekaarten blijkt.

Vergelijking van de verschillende polluenten toont nogmaals aan dat de impact van Ringland, zoals te verwachten is, groter is voor de polluenten met een sterkere bijdrage van verkeer zoals NO_2 en EC.


Ref 3-0-0
RL1
RLF
NO2 [µg/m3]
Afstand [km]

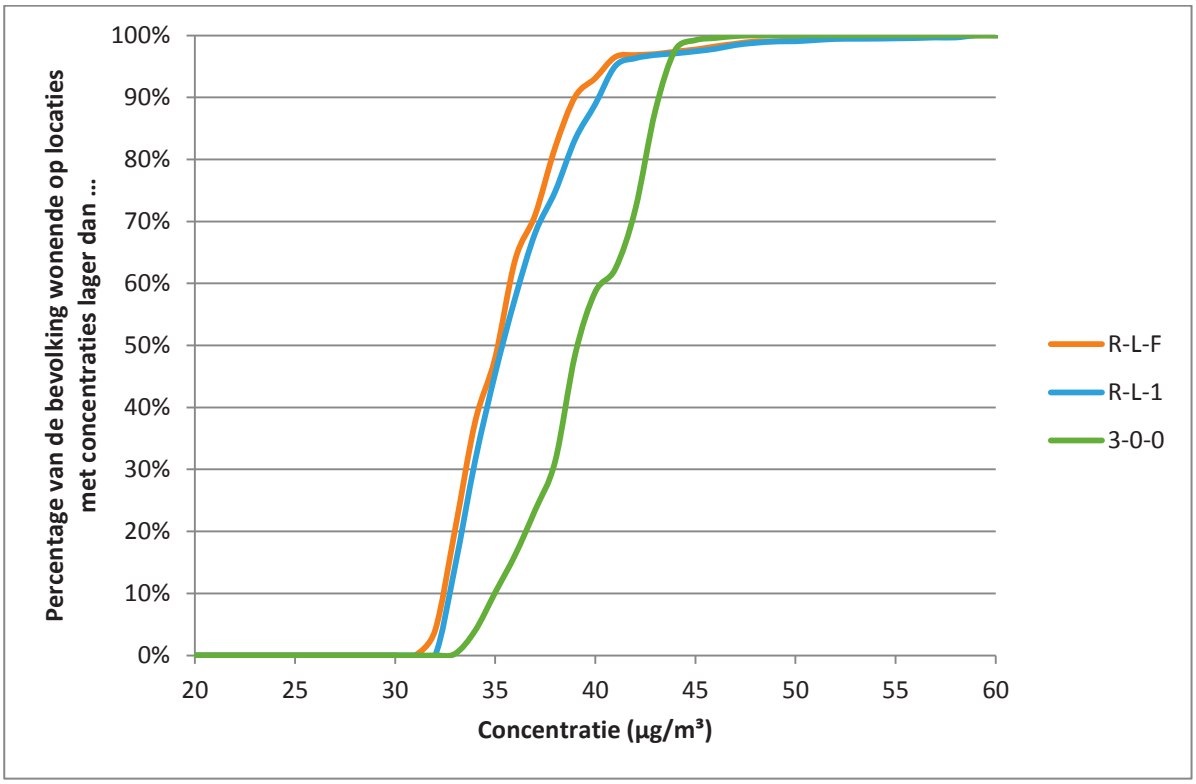

Ref 3-0-0
RL1
RLF
PM25 [µg/m3]
Afstand [km]



Figuur 62: Concentratieprofielen langs het ringtraject (µg/m³) in functie van de afstand langs het traject vanaf Kennedytunnel-West tot Antwerpen-Noord. Concentraties voor Oosterweel-Noord (Ref-3-0-0) worden in zwart gegeven, en Ringland met en zonder filtertechnieken (R-L-1 en R-L-F) in respectievelijk rood en blauw.

5.6. BLOOTSTELLINGSANALYSE

Volgend op deze luchtkwaliteitsstudie heeft Ringland een analyse laten uitvoeren naar de invloed op gezondheid. Door de luchtkwaliteitskaarten te kruisen met de Antwerpse bevolkingskaart is de blootstelling van de Antwerpse bevolking bepaald. Hiervoor werd gebruik gemaakt van gedetailleerde bevolkingscijfers op perceelniveau die door Stad Antwerpen ter beschikking werden gesteld. Deze analyse is uitgevoerd voor verschillende bufferafstanden rondom de zones waar Ringland een overkapping voorstelt (vanaf Kennedytunnel tot Antwerpen-Noord, inclusief A12 tot en met Jan De Vostunnel, E19 tot en met Craeybeckxtunnel en E313 tot en met tunnelmond ter hoogte van Rivierenhof). Voor de eerste 500 m is er een analyse per 50 m uitgevoerd naar de blootstelling van de bevolking op de thuislocatie, aangevuld met zones op 500 tot 1000 m en 1000 tot 1500 m van de ring. De blootstellingsanalyse is voor elke polluent uitgevoerd.



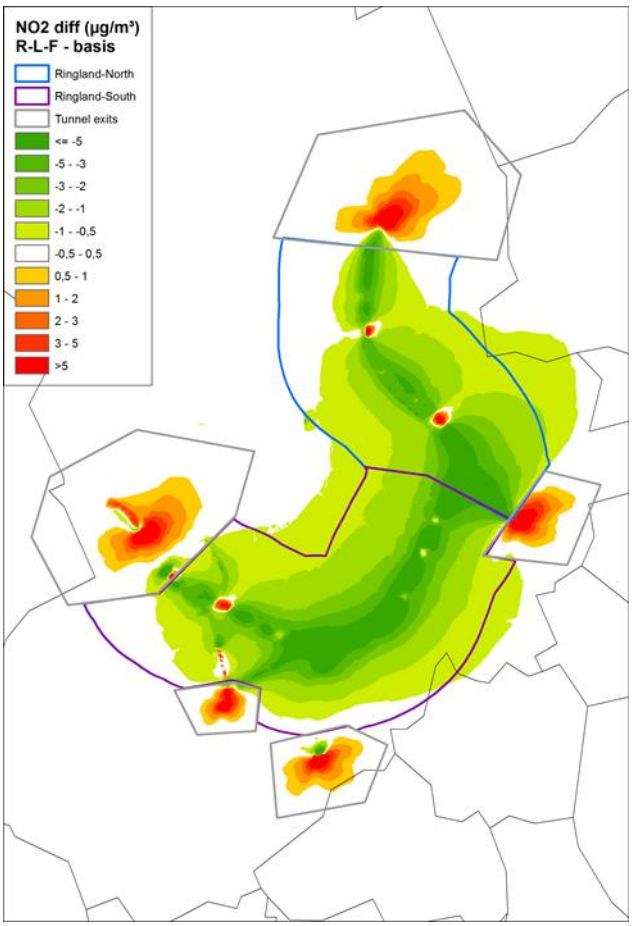
Figuur 63: NO_2 Blootstellingsanalyse Antwerpse bevolking op thuislocatie binnen een zone op 50 tot 100 m afstand van Ringland.

Een voorbeeld van de blootstellingsanalyse wordt in Figuur 63 gegeven voor NO_2. Voor de Antwerpse bevolking woonachtig in de zone gelegen op afstanden tussen de 50 en de 100 m afstand van het Ringlandgebied wordt de blootstelling op hun thuislocatie samengevat. De figuur toont dat in de nabijheid van de ring de gemiddelde blootstelling afneemt. In het Oosterweel-Noord scenario worden 90% van de bewoners van deze zone op hun thuislocatie bloot gesteld aan concentraties hoger dan 35 µg/m³ (of slechts 10% aan een concentratie lager dan 35 µg/m³). Bij het Ringland scenario zakt dit tot 55% van de bewoners, bij Ringland met filters tot 52%. Voor 97% van de bevolking in deze zone daalt de blootstelling aan NO_2, voor 3% van de bevolking in deze buffer stijgt de blootstelling echter door de nabijheid van de tunnelmonden. Gemiddeld daalt de

blootstelling voor de Ringland scenario's respectievelijk zonder en met filters met 3.2 µg/m³ en 3.7 µg/m³.

Naast de blootstelling binnen de bufferafstanden rond de ring, is er bijkomend nog een analyse uitgevoerd voor de blootstelling van de bevolking woonachtig in 4 geselecteerde gebieden, getoond in Figuur 64. Dit zijn de zones rond tunnelmonden (Kennedytunnel, Jan De Vostunnel, Craeybeckxtunnel, Rivierenhof en Antwerpen-Noord), het noordelijke Ringland gebied, het zuidelijke Ringland gebied en de rest van het studiegebied. Doel van deze analyse was om een nog beter zicht te krijgen op de invloed van Ringland op blootstelling van de bevolking in deze toch wel verschillende deelgediende van de stad. Tenslotte is voor alle Antwerpse onderwijsinstellingen en rust- en verzorgingstehuizen de blootstelling bepaald voor elke polluent.

De resultaten van de blootstellingsanalyse werden niet door VITO maar door een groep medische experts geanalyseerd (zie www.ringland.be). Ze maken dan ook geen deel uit van deze rapportage.



Figuur 64: Opsplitsing van het studiegebied in zones voor blootstellingsanalyse

HOOFDSTUK 6. BESLUIT

Op basis van de uitgevoerde modelberekeningen kunnen we besluiten dat Ringland de luchtkwaliteit langsheen de Antwerpse ring significant kan verbeteren. In de toekomst kunnen de concentraties langsheen grote delen van de ring door Ringland dalen tot het niveau van de "stedelijke achtergrond", een niveau dat in andere delen van de stad, weg van belangrijke verkeersaders, ook wordt behaald.

Ter hoogte van de tunnelmonden stelt er zich wel een knelpunt. Ringland capteert immers de emissies maar zorgt er eveneens voor dat deze naar de uitgangen van het tunnelcomplex worden gestuwd. Op deze locaties komt dus een groot deel van de uitstoot onder Ringland vrij in de buitenlucht met hoge concentraties tot gevolg. De zone met verhoogde concentraties bestrijkt enkele 100 m rondom een tunnelmond.

Op basis van literatuuronderzoek, analyse van internationale praktijkvoorbeelden en eigen modelberekeningen, blijkt dat er mogelijkheden zijn om deze nieuwe hotspot locaties ter hoogte van de tunnelmonden aan te pakken. Hierbij wordt gedacht aan filtertechnologie in de tunnel zelf, aan passieve maatregelen ter hoogte van de tunneluitgangen en aan "slimme" configuraties van de uitritcomplexen. Een mirakeloplossing is de dag van vandaag nog niet voorhanden maar wereldwijd wordt nog steeds onderzoek verricht naar nieuwe innovatieve concepten om de uitstoot in tunnels en aan tunnelmonden onder controle te krijgen. Het voordeel van Ringland is echter wel dat de uitstoot van het verkeer gecapteerd wordt waardoor het mogelijk wordt om deze met bestaande of nieuwe toekomstige technologie verder te behandelen.

LITERATUURLIJST

AMOG (Roads and Maritime Services NSW), 2012. M5 East Tunnel filtration Trial Evaluation Program - Review of Operational Performance.

Arnold Dix, 2006. Managing air outside of tunnels: Contract No. 6400/3003.

Berkowicz, R., Hertel, O., Larsen, S.E., Sorenson, N.N., Nielsen, M., 1997. Modelling traffic pollution in streets (report in PDF format, 850 kB), link on http://www.dmu.dk/en/air/models/ospm/ospm_description/.

Blocken, B., Janssen, W.D., Hooff, T. Van, 2012. CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas : General decision framework and case study for the Eindhoven University campus. Environ. Model. Softw. 30, 15–34. doi:10.1016/j.envsoft.2011.11.009

Bring, A., Malmström, T.-G., Boman, C.A., 1997. Simulation and measurement of road tunnel ventilation. Tunn. Undergr. Sp. Technol. 12, 417–424. doi:10.1016/S0886-7798(97)00031-X

CETU, 2010. The treatment of air in road tunnels - State-of-the-art of studies and works.

Chen, T.Y., Lee, Y.T., Hsu, C.C., 1998. Investigations of piston-effect and jet fan-effect in model vehicle tunnels. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 73, 99–110. doi:10.1016/S0167-6105(97)00281-X

Colella, F., Rein, G., Borchiellini, R., Carvel, R., Torero, J.L., Verda, V., 2009. Calculation and design of tunnel ventilation systems using a two-scale modelling approach. Build. Environ. 44, 2357–2367. doi:10.1016/j.buildenv.2009.03.020

Cornelissen, T., Smulders, B., Mesuere, B., 2013. Luchtkwaliteit bij tunnelmonden - stand der techniek van maatregelen ter verbetering van de luchtkwaliteit.

Cross, H., 1936. Analysis of flow in networks of conduits or conductors. Eng. Exp. Stn. 34, 1–29.

Finn, D., Clawson, K.L., Carter, R.G., Rich, J.D., Eckman, R.M., Perry, S.G., Isakov, V., Heist, D.K., 2010. Tracer studies to characterize the effects of roadside noise barriers on near-road pollutant dispersion under varying atmospheric stability conditions☆. Atmos. Environ. 44, 204–214. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.10.012

FVT, 2010. Optimierung eines Verfahrens zur Reinigung von Abluft aus Straßentunnel.

Gale, R., 2009. Electrostatic Precipitator : The Next Generation, in: Yan, K. (Ed.), 11th International Conference on Electrostatic Precipitation. Hangzhou, China.

Gallus, M., Akylas, V., Barmpas, F., Beeldens, a., Boonen, E., Boréave, a., Cazaunau, M., Chen, H., Daële, V., Doussin, J.F., Dupart, Y., Gaimoz, C., George, C., Grosselin, B., Herrmann, H., Ifang, S., Kurtenbach, R., Maille, M., Mellouki, a., Miet, K., Mothes, F., Moussiopoulos, N., Poulain, L., Rabe, R., Zapf, P., Kleffmann, J., 2015. Photocatalytic de-pollution in the Leopold II tunnel in Brussels: NOx abatement results. Build. Environ. 84, 125–133. doi:10.1016/j.buildenv.2014.10.032

Geertsma, R., Beckers, R.J.C.M., Smulders, R.W.J., 2011. Reductie van belasting verkeersemissies middels efficiënte luchtfiltering in Eindhovense Hot Spots.

Guerrini, G.L., 2012. Photocatalytic performances in a city tunnel in Rome: NOx monitoring results. Constr. Build. Mater. 27, 165–175. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.07.065

Hagler, G.S.W., Tang, W., Freeman, M.J., Heist, D.K., Perry, S.G., Vette, A.F., 2010. Computational fluid dynamics modeling to assess the impact of roadside barriers on near-road air quality. Cwe2010 1–8.

Hagler, G.S.W., Tang, W., Freeman, M.J., Heist, D.K., Perry, S.G., Vette, A.F., 2011. Model evaluation of roadside barrier impact on near-road air pollution. Atmos. Environ. 45, 2522–2530. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.02.030

Halliburton, B., Azzi, M., 2011. Final Report Air filtration plant of the M5 Tunnel. Determination of nitric oxide and nitrogen dioxide removal efficiencies.

Heist, D.K., Perry, S.G., Brixey, L. a., 2009. A wind tunnel study of the effect of roadway configurations on the dispersion of traffic-related pollution. Atmos. Environ. 43, 5101–5111. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.06.034

Hoekstra, B., Schraa, G.-J., 2009. Toepassingsadvies Overkappen en Luchtbehandeling.

Hoekstra, B., Schraa, G.-J., Toenink, C., 2009. Invloed overkappen en luchtbehandeling op de luchtkwaliteit.

Hooghwerff, J., Lanser, N., Ooststroom, L. van, Tollenaar, C., 2009. Toepassingsadvies Schermen (IPL-1b).

Huijben, J.W., 2006. Maatregelen ter bevordering van de luchtkwaliteit bij de Coentunnel.

Huijben, J.W., Rangelrooij, B. van, 2011. Tunnels en luchtkwaliteit.

Huijben, J.W., Rikkelman, M., 2009. Literatuur onderzoek modellering emissieverspreiding bij tunnelportalen.

Jacques, E.J., 1991. Numerical Simulation of Complex Road Tunnels.

Jacques, J., Possoz, L., 1996. Road tunnels and the environment.

Jaffrezo, J., Aymoz, G., Cozic, J., 2005. Size distribution of EC and OC in the aerosol of Alpine valleys during summer and winter. Atmos. Chem. Phys. 5, 2915–2925.

Janssen, N., Gerlofs-Nijland, M., Lanki, T., Salonen, R., Cassee, F., Hoek, G., Fischer, P., Brunekreef, B., Krzyzanowski, M., 2012. Health effects of black carbon (WHO Report).

Koopmans, J.F.W., n.d. Air pollution short circuit effects of road traffic tunnel portals.

Lefebre, F., Lefebvre, W., Op, T., Smeets, N., 2010. IFDM-Traffic : Handleiding.

Lefebvre, W., Janssen, S., Schrooten, L., Deutsch, F., Vankerkom, J., Degraeuwe, B., Veldeman, N., Van Looy, S., Lodewijks, P., Meynaerts, E., De Vlieger, I., Op ’t Eyndt, T., Schepens, J., Lefebre, F., 2010. Luchtkwaliteit langs snelwegen en belangrijke gewestwegen in Vlaanderen.

Lefebvre, W., Schillemans, L., Op, T., Vandersickel, M., Poncelet, P., Dumez, J., Janssen, S., Vankerkom, J., Maiheu, B., Janssen, L., Buekers, J., 2011. Voorstel van maatregelen om de luchtkwaliteit te verbeteren en de geluidshinder te beheersen in de stad Antwerpen.

Lefebvre, W., Van Poppel, M., Maiheu, B., Janssen, S., Dons, E., 2013. Evaluation of the RIO-IFDM-street canyon model chain. Atmos. Environ. 77, 325–337. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.05.026

Lefebvre, W., Vranckx, S., 2013a. Validation of the IFDM-model for use in urban applications.

Lefebvre, W., Vranckx, S., 2013b. Validation of the IFDM-model for use in urban applications, Study accomplished in the framework of the ATMOSYS-project. VITO report 2013/RMA/R/56.

Mensink, C., De Vlieger, I., Nys, J., 2000. An urban transport emission model for the Antwerp area. Atmos. Environ. 34, 4595–4602. doi:10.1016/S1352-2310(00)00215-6

Miller, D.S., 1990. Internal Flow Systems (second edition).

NHMRC, 2008. Air Quality in and Around Traffic Tunnels.

Ning, Z., Hudda, N., Daher, N., Kam, W., Herner, J., Kozawa, K., Mara, S., Sioutas, C., 2010. Impact of roadside noise barriers on particle size distributions and pollutants concentrations near freeways. Atmos. Environ. 44, 3118–3127. doi:10.1016/j.atmosenv.2010.05.033

Oettl, D., Sturm, P.J., Bacher, M., Pretterhofer, G., Almbauer, R.A., 2002. A simple model for the dispersion of pollutants from a road tunnel portal. Atmos. Environ. 36, 2943–2953. doi:10.1016/S1352-2310(02)00254-6

Okamoto, S., Sakai, K., Matsumoto, K., Horiuchi, K., Kobayashi, K., 1998. Development and Application of a Three-Dimensional Taylor-Galerkin Numerical Model for Air Quality Simulation near Roadway Tunnel Portals. J. Appl. Meteorol. 37, 1010–1025.

PIARC, 2008. Road tunnels: a guide to optimising the air quality impact upon the environment.

Rijkswaterstaat, 2009. Invloed TiO2 coatings op de luchtkwaliteit.

Ursem, W.N.J., Marijnissen, J.C.M., Roos, R.A., 2009. Optimalisatie FDRS (Elektrostatisch concept) Samenvatting.

Vankerkom, J., De Vlieger, I., Schrooten, L., Vliegen, J., Styns, K., 2009. Beleidsondersteunend onderzoek: Aanpassingen aan het emissiemodel voor wegtransport MIMOSA.

Vranckx, S., Lefebvre, W., 2013. Actualisering en verfijning luchtkwaliteitskaarten Stad Antwerpen.

BIJLAGE A : INPUT BESTANDEN TUNNELMODEL VOOR VERGELIJKING MET CFD

Tabel 14 : Definitie bestand van de nodes voor vergelijking met CFD voor frontale (links) en laterale (rechts) uitritten. In de eerste kolom is telkens het ID van de node gegeven, dan een vlag of het een interne of externe node is en vervolgens de statische druk in Pa (zie Tabel 6).

ID	EXT	P
1	1	33.5
2	0	0
3	1	0
4	1	0

ID	EXT	P
1	1	24
2	0	0
3	1	0
4	1	0

Tabel 15 : Definitie bestand voor de segmenten voor vergelijking met de CFD berekeningen voor frontale (links) en laterale (rechts) uitritten. In de eerste kolom is het segment ID gegeven, gevolgd door de twee node ID's die het segment definiëren. De volgorde geeft de richting van positieve stroming aan. Dan is de hoogte, breedte en lengte [m] van het segment gegeven gevolgd door de verkeerssnelheid [km/h] en het aantal voertuigen, lichte vracht en zware vrachtwagens per uur dat doorheen het segment rijdt. Deze parameters werden dus op 0 gezet voor de vergelijking met de CFD simulatie.

ID	IN	OUT	H	W	L	vt	ncar	nlfr	nhfr
1	1	2	4.6	14.4	200	0	0	0	0
2	2	3	4.6	8.5	60	0	0	0	0
3	2	4	4.6	5.4	60	0	0	0	0

ID	IN	OUT	H	W	L	vt	ncar	nlfr	nhfr
1	1	2	4.6	14.9	200	0	0	0	0
2	2	3	4.6	14.4	60	0	0	0	0
3	2	4	4.6	5.4	60	0	0	0	0