ENS

Clean air solutions

~~VERTROUWELIJK~~

Effectonderzoek fijnstofreductie Walburggarage Weert

Datum: 16 oktober 2017

Opdrachtgever: Gemeente Weert
Contactpersoon: Monique Bessems

Auteurs: Dr. Ir. Roel Gijsbers - r.gijsbers@enstechnology.nl
Dr. Guido Jenniskens

Inhoudsopgave

1. Fijnstofreductie Walburggarage **3**
2. Fijn- en ultrafijnstof **5**
2.1 Regelgeving met betrekking tot fijn-, ultrafijnstof en roet 6
2.2 Verkeer als bron van fijn-, ultrafijnstof en roet 6
3. Eliminatie van fijn- en ultrafijnstof **7**
3.1 Longen van de stad: zuivering van stedelijke lucht vanuit de bestaande infrastructuur 8
4. Vooronderzoek ventilatiesysteem Walburggarage **11**
5. Geïnstalleerde systemen **13**
6. Effectonderzoek met behulp van simulaties **16**
6.1 Metingen t.b.v. input en validatie model 16
6.2 CFD-model 20
6.3 Resultaten 22
6.3.1 Luchtstromingen 22
6.3.2 Fijnstofconcentraties (PM10) 23
6.3.3 Stofafvangst 26
7. Conclusie **28**
8. Referenties **29**

Appendix 1 ..... **30**
Onderzoeksrapportage - "CFD Analysis of particulate matter reduction at the Walburgpassage garage in Weert by implementation of the Aufero (ESP) unit"

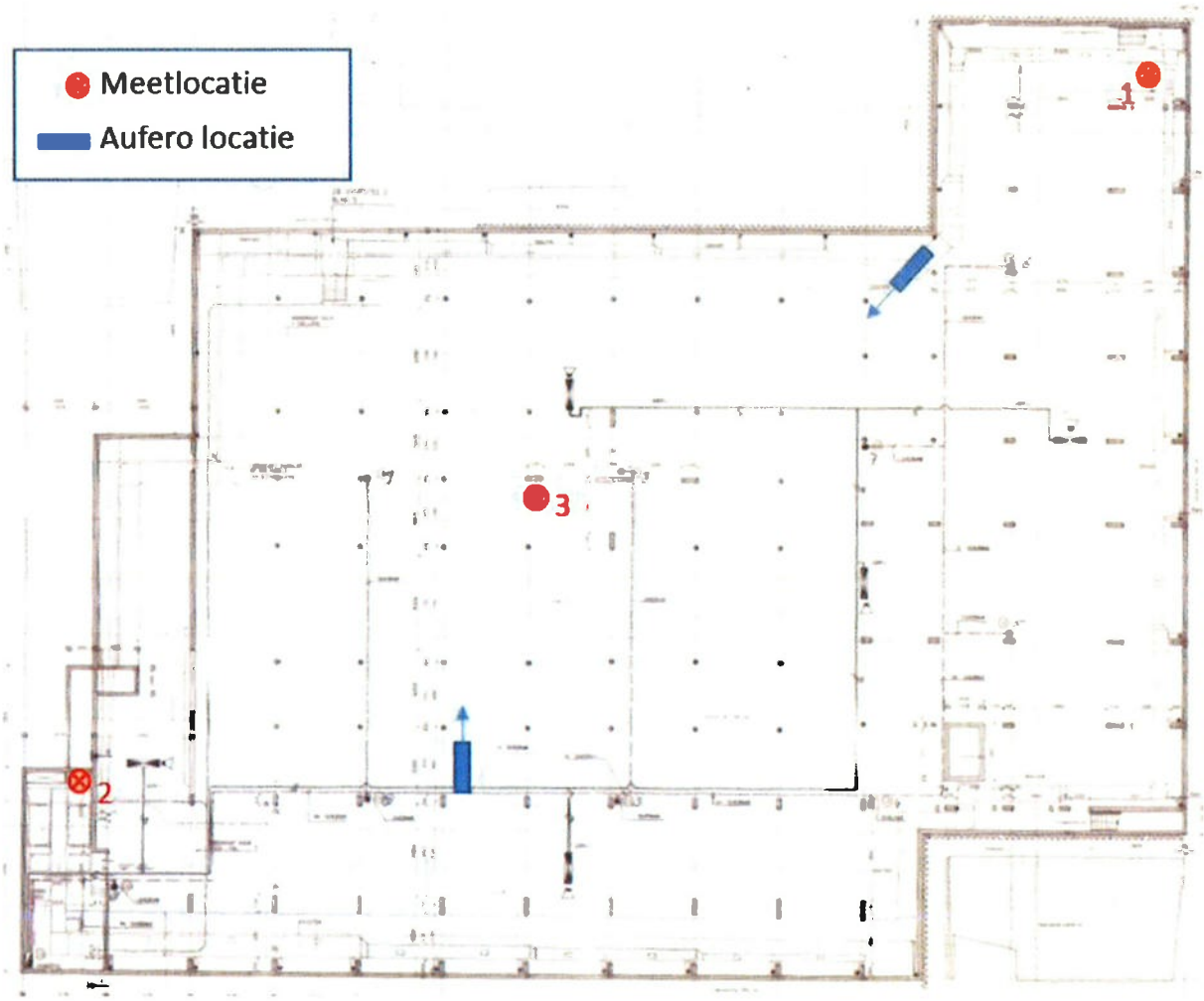
1. Fijnstofreductie Walburggarage

ENS Urban BV is in opdracht van de Gemeente Weert gestart met een project om de fijnstofconcentraties in (en om) de Walburggarage te reduceren. De inpassing van de innovatieve fijnstofafvangst technologie in bestaande infrastructuur in een (binnen)stad heeft een tweeledig doel, namelijk ten eerste het verbeteren van de luchtkwaliteit in het betreffende gebouw, in dit geval een parkeergarage met doorgaans een verhoogde concentratie aan schadelijke gassen en luchtgedragen deeltjes zoals fijnstof, waaronder roet (op het gebied van luchtkwaliteit en gezondheid één van de meest schadelijke stoffen). Doordat een parkeergarage continu wordt geventileerd, wordt een tweede effect bereikt wanneer de gereinigde lucht in de binnenstad wordt uitgestoten.

De toepassing van de ENS technologie in de Walburggarage bestaat uit de plaatsing van twee Aufero systemen, elk met een reinigingscapaciteit van ca. 9000 m^3/u, en daarnaast een onafhankelijk effectonderzoek, bestaande uit een effectsimulatie, uitgevoerd door experts van de Technische Universiteit Eindhoven[1] (TU/e)op het gebied van wind engineering en aerodynamica in stedelijk gebied. Om het effect van de installatie inzichtelijk te maken wordt een 3D effectsimulatie uitgevoerd (met behulp van CFD, Computational Fluid Dynamics) onderbouwd met nationaal en internationaal bronnenmateriaal en ondersteund met metingen ter validatie van de berekeningen. De volledige rapportage van de TU/e is als Appendix bij deze rapportage bijgevoegd.

De afbeelding hiernaast toont een (technische) plattegrond van de ondergrondse parkeerlaag waarin de locatie en blaasrichting van de Aufero systemen is ingetekend. Tevens zijn de posities voor de metingen van de fijnstofconcentraties aangegeven, nabij de trap die uitkomt op de kromstraat (1), in het afvoerkanaal van het ventilatiesysteem (2) en centraal in de parkeergarage (3).

[1] TU/e; research group Urban Physics and Wind Engineering, Prof. Dr. Ir. Bert Blocken
http://www.urbanphysics.net/

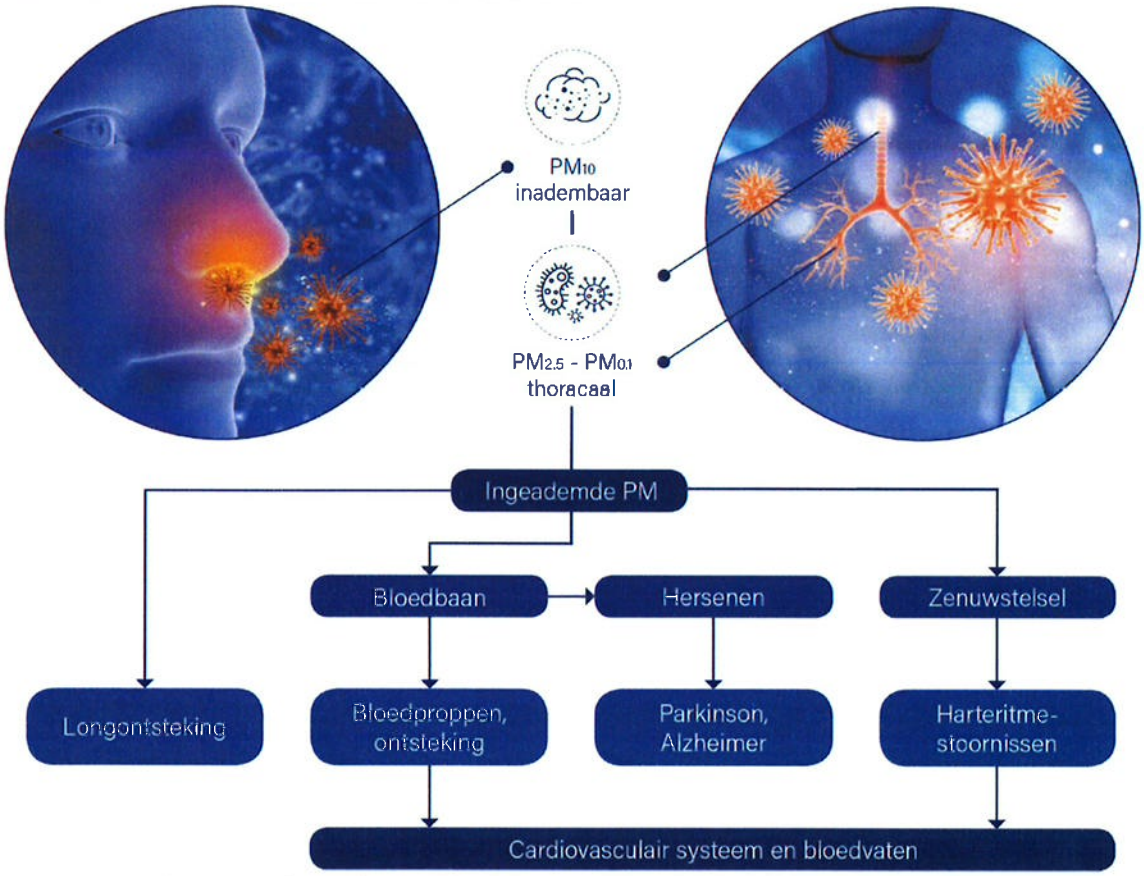


Figuur 1 – Plattegrond van de Walburggarage met daarin aangegeven de posities en blaasrichting van de beide Aufero systemen en de meetlocaties.

2. Fijn- en ultrafijnstof

Fijn- en ultrafijnstof (Particulate Matter; PM) bestaat uit deeltjes in de orde grootte van een miljoenste meter (PM10, PM2,5, PM1 en PM0,1), die voornamelijk ontstaan als gevolg van menselijke activiteit en zijn 'opgelost' in de lucht. Naarmate fijnstofdeeltjes kleiner zijn zullen ze dieper kunnen penetreren in de longen en eventueel worden opgenomen in de bloedbaan, waardoor ernstigere gezondheidseffecten zullen optreden. Kortstondige maar ook langdurige blootstelling aan fijnstof heeft een negatief effect op de gezondheid: Met name long-, hart- en vaatziekten worden veel beschreven, maar in toenemende mate is er ook bewijs voor aandoeningen van het zenuwstelsel.

Roet of zwarte koolstof (Black Carbon; BC) bestaat uit restdeeltjes van de (onvolledige) verbranding van koolstof-houdende brandstoffen (bijvoorbeeld benzine of diesel) en is een goede indicator voor verkeersgerelateerde luchtverontreiniging (Wester-2012). Roet is één van de meest schadelijke componenten van fijnstof afkomstig uit verkeersemissies, mede door aan roet vastgehechte stoffen zoals (zware) metalen en PAK's. Roetdeeltjes hebben een gemiddelde grootte van 0,3 µm, waardoor ze diep doordringen in de longen en in de bloedbaan kunnen worden opgenomen. Blootstelling leidt op korte termijn tot irritatie van de ademhalingswegen en ogen, maar ook tot een verhoogd risico op astma en hart- en vaatziekten. Lange termijn effecten zijn chronische luchtwegaandoeningen en verhoogde risico's op kanker en vroegtijdige sterfte.



Figuur 2 – Inademing van fijnstof en de hieraan gerelateerde ziektebeelden (naar: RIVM)

2.1 Regelgeving met betrekking tot fijn-, ultrafijnstof en roet

De Europese Unie heeft in 1999 grenswaarden vastgesteld voor in de buitenlucht toelaatbare concentraties van fijn stof (PM10: 40 µg/m^3). In 2008 is deze regelgeving uitgebreid met grens- en streefwaarden voor de fijnere fractie van fijn stof (PM2,5: 25 µg/m^3). Via de 'wet milieubeheer' zijn de grenswaarden uit de luchtkwaliteitsrichtlijn Europese Unie (2008/50/EG) geïmplementeerd in de Nederlandse wetgeving.
De 'World Health Organization' (WHO) stelt voor de buitenlucht zogenaamde 'Air Quality Guidelines' op: dit zijn waarden waaronder geen schadelijke gezondheidseffecten meer te verwachten zijn. Voor PM10 bedraagt de waarde momenteel 20 µg/ m^3 en voor PM2,5 geldt een streefwaarde van 10 µg/m^3 (WHO, 2005). Voor beide streefwaarden dient te worden opgemerkt dat deze volgens de WHO naar beneden dienen te worden bijgesteld aangezien er zelfs onder deze waarden een negatief effect is op de gezondheid.
Op basis van de huidige inzichten is er geen veilige drempelwaarde waaronder de blootstelling aan roet zonder effect is; zowel de EU als ook de WHO hebben echter (nog) geen normen opgesteld voor roet.

2.2 Verkeer als bron van fijn-, ultrafijnstof en roet

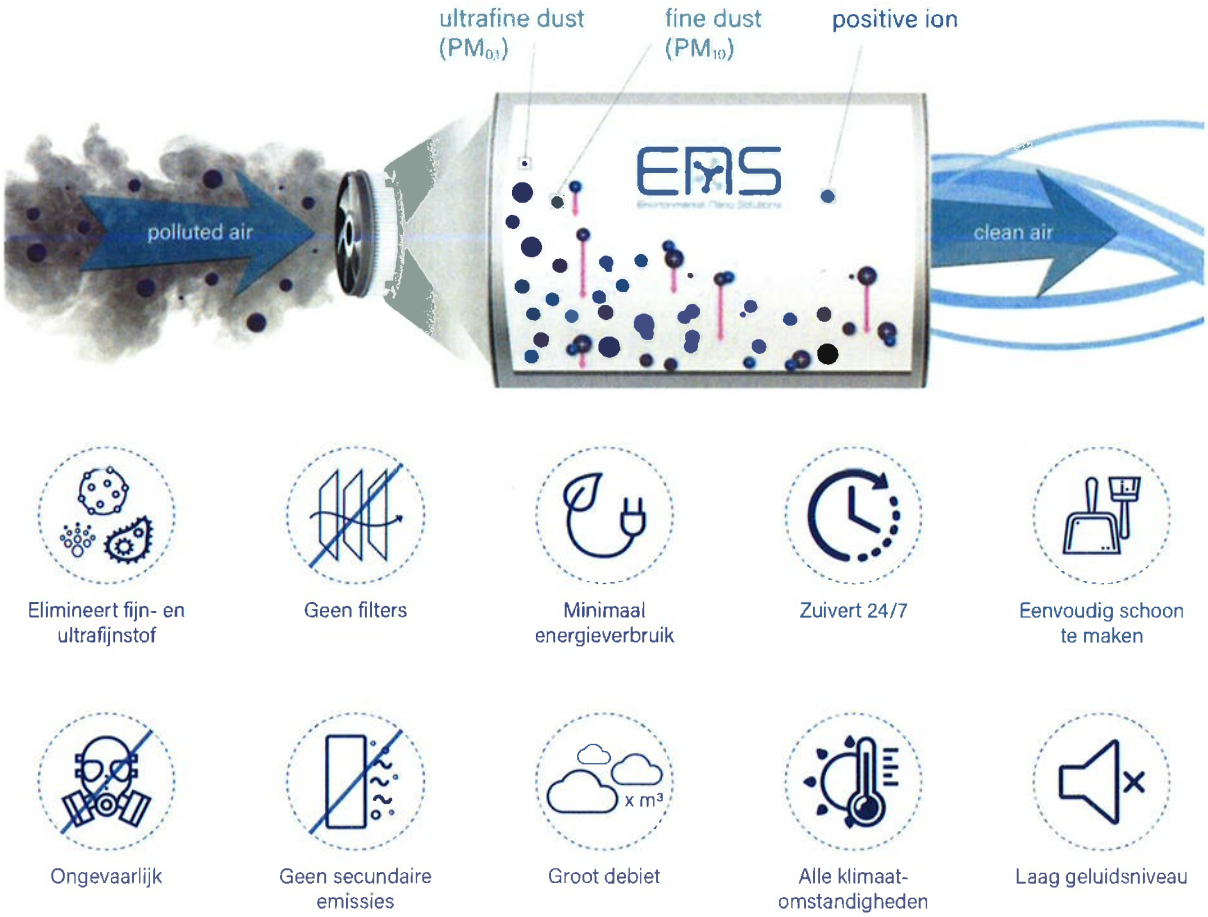
De emissie van fijnstof, roet en gasvormige luchtverontreinigende stoffen door voertuigen veroorzaakt een hoge mate van luchtverontreiniging op, en in de directe nabijheid van, wegen en snelwegen. Uitlaatemissies als gevolg van de verbranding van fossiele brandstoffen leveren een aanzienlijke bijdrage aan de verkeersgerelateerde luchtverontreiniging. Het grootste deel van de luchtverontreiniging door voertuigen komt echter voort uit niet-uitlaatemissies als gevolg van rem-, banden- en wegslijtage (zie Tabel 1). Om de luchtverontreiniging door het verkeer te verminderen zijn sinds 1992 Europese limietwaarden ingesteld voor de toegestane uitlaatemissies door nieuw-verkochte voertuigen (vanaf september 2015 geldt de Euro 6-norm). Voor niet-uitlaatemissie is geen regelgeving, maar deze kan in beperkte mate lokaal worden gestuurd door beperking van de (maximum)snelheid en het opheffen van verkeersobstructies. Om desgewenst te voldoen aan de WHO richtlijnen in de lucht op en rond wegen en in de stedelijke omgeving zijn de huidige maatregelen echter niet toereikend.

	Uitlaat			Niet-uitlaat			Totaal		
	PM10	PM2.5	Waarvan roet	PM10	PM2.5	Waarvan roet	PM10	PM2.5	Waarvan roet
Streek- en snelweg									
Dieselauto met roetfilter (Euro 5)	2	2	0,4	18	9	1,4	20	11	1,8
Benzine auto (Euro 5)	1	1	0,2	18	9	1,4	19	10	1,6
Stedelijke omgeving									
Dieselauto met roetfilter (Euro 5)	4	4	0,8	30	16,5	2,7	34	20,5	3,5
Benzine auto (Euro 5)	1	1	0,2	30	16,5	2,7	31	17,5	2,9

Tabel 1 - Schatting van de uitlaat- en niet-uitlaatemissies van moderne motorvoertuigen (in mg/ km). (Van Zeebroeck, 2013).

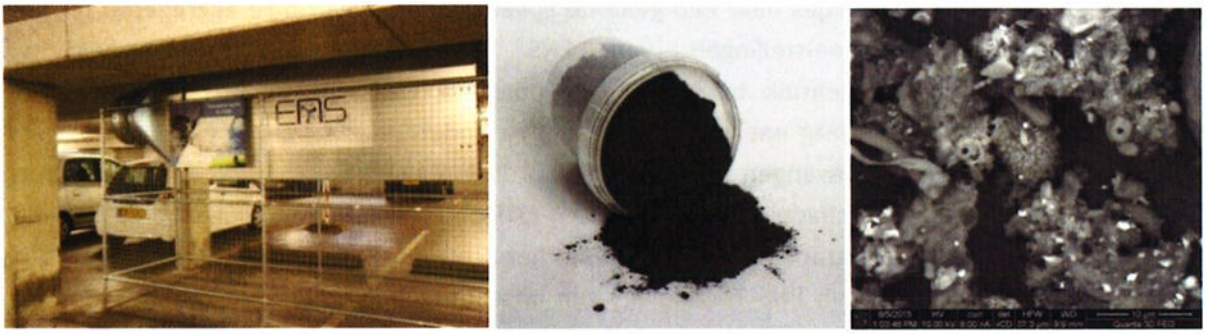
3. Eliminatie van fijn- en ultrafijnstof

Het milieu-innovatie bedrijf 'ENS Technology' (Cuijk, Nederland) ontwikkelt systemen voor de eliminatie van fijn- en ultrafijnstof uit de lucht, gebaseerd op de door haar gepatenteerde 'positieve ionisatie technologie' (zie onderstaande figuur). Hierbij worden lucht-gedragen (ultra)fijn stof deeltjes positief geïoniseerd door middel van een elektrode. Als gevolg van het ladingsverschil migreren de geïoniseerde deeltjes naar een geaarde collectorplaat, waarop ze aggregeren tot grof stof. Belangrijke bedrijfsdoelstellingen van ENS Technology zijn duurzaamheid en milieuvriendelijkheid. Door gebruik te maken van positieve ionisatie technologie hebben de luchtzuiveringssystemen een laag energieverbruik, zijn ze onderhoudsvrij en veroorzaken ze geen reststoffen anders dan het afgevangen stof. Ionisatie wordt doorgaans gekenmerkt door de vorming van het voor de gezondheid schadelijke ozon. De door ENS ontwikkelde technologie zorgt niet voor en verhoging van ozonconcentraties ten opzichte van het achtergrondniveau (bemeten door TNO). De luchtzuiveringssystemen van ENS Technology zijn uitstekend toegerust voor het afvangen van zowel de verbrandings- (uitlaatemissies) als ook de slijtagedeeltjes (niet-uitlaatemissies) die worden geproduceerd door het wegverkeer.



Figuur 3 - Principe werking van ENS positieve ionisatie technologie en de karakteristieken van de toegepaste technologie

Het op deze technologie gebaseerde luchtzuiveringssysteem 'Aufero' werd onder andere ingezet om verkeersgerelateerde luchtverontreinigingen te elimineren in een parkeergarage in Cuijk (zie figuur 4). In deze parkeergarage werd een fijnstof (PM10) reductie bereikt van meer dan 70% en in het bovengelegen winkelcentrum bedroeg de reductie meer dan 60%.



Figuur 4 Links: toepassing Aufero unit in Parkeergarage; midden: afgevangen fijnstof dat in de Aufero is getransformeerd tot niet-inadembaar grofstof; rechts: microscopische opname van afgevangen stof, waarin de samenvoeging van kleine deeltjes tot grote clusters waarneembaar is.

3.1 Longen van de stad: zuivering van stedelijke lucht vanuit de bestaande infrastructuur

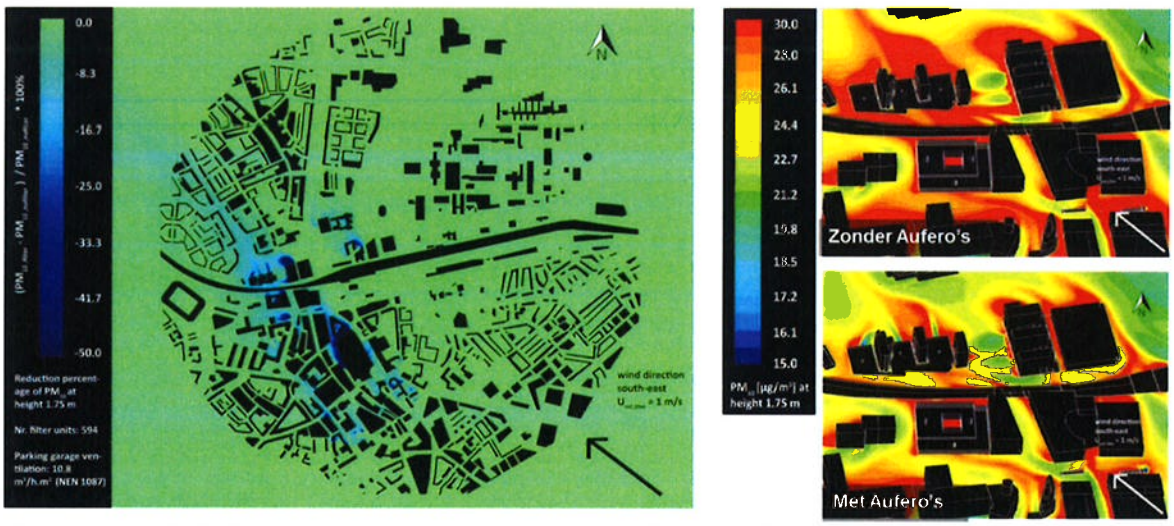
Naar aanleiding van de resultaten die werden behaald in de parkeergarage in Cuijk heeft ENS Technology samen met de TU Eindhoven een concept uitgewerkt waarmee de luchtkwaliteit op stadsniveau substantieel verbetert door toepassing van luchtzuivering in de bestaande infrastructuur. Zeer geschikte locaties voor een dergelijke toepassing zijn parkeergarages.

Parkeergarages zijn vaak gelegen in de binnenstad, waar de luchtkwaliteit van slechte kwaliteit kan zijn door een hoge achtergrondconcentratie aangevuld met vervuiling afkomstig van druk verkeer en hoge bebouwing met windluwe gebieden waar de vervuiling zich kan ophopen. Parkeergarages zijn vaak centraal gelegen in stadscentra en worden geventileerd met buitenlucht. Concentraties kunnen in parkeergarages nog stijgen als gevolg van een hoge autodichtheid en relatief veel verkeersbewegingen in een kleine ruimte. Om die reden worden parkeergarages continu geventileerd met relatief hoge debieten.
Op stadsniveau is de hoeveelheid vervuiling in absolute zin als gevolg van de aanwezigheid van een parkeergarage waarschijnlijk minder, omdat mensen immers minder lang op zoek zijn naar een parkeerplaats wanneer ze gericht een garage bezoeken. De vervuiling die in een parkeergarage wordt gegenereerd zou bij afwezigheid van de garage worden verspreid over een groter gebied in de stad. Dit maakt een parkeergarage een ideaal middel om op geconcentreerde wijze en met grote debieten stadslucht te reinigen, temeer omdat de infrastructuur al aanwezig is en de reinigingsmethodiek de leefbaarheid en het aanzicht van de stad niet belemmert. Bijkomend voordeel is dat ventilatie-uitlaten in de windluwe gebieden rondom dichte bebouwing de lucht in beweging kunnen brengen.

Door de implementatie van luchtzuiveringssystemen in parkeergarages kan zowel fijnstof als roet worden geëlimineerd uit de (stads)lucht in deze parkeergarages. De luchtkwaliteit in de garages zal hierdoor verbeteren en ook de lucht die uit de garages wordt afgevoerd zal een lagere hoeveelheid luchtverontreinigingen bevatten. De afvoerlucht kan zelfs schoner zijn dan de buitenlucht, waardoor ook in de directe omgeving van de parkeergarages de luchtkwaliteit zal verbeteren. Deze schonere lucht zal vanuit de parkeergarages waarin luchtreiniging wordt toegepast de vervuilde stadslucht verdringen: Dit concept werd 'Longen van de Stad' genoemd, naar analogie met de respiratoire functie van longen.

De haalbaarheid van het concept 'Longen van de Stad' is onderzocht door de TU Eindhoven (Blocken *et al.*, 2016) in samenwerking met de Gemeente Eindhoven. Met behulp van driedimensionale computersimulaties (Computational Fluid Dynamics; CFD) werd het effect geanalyseerd van de reiniging van de lucht in parkeergarages in het centrum van de stad Eindhoven. Er werd gekeken naar de potentiële verbetering van de luchtkwaliteit in de binnenstad in de directe omgeving van de parkeergarages.

Uit de luchtstromingssimulaties is gebleken dat bij stadsbrede toepassing, in de parkeergarages ca. 70% fijnstof reductie (PM10) te behalen is en dat de fijnstofconcentraties in de stadslucht lokaal met 50% kunnen worden gereduceerd ten opzichte van de situatie waarin geen luchtzuivering wordt toegepast. In een eerder proefproject langs een snelweg is aangetoond dat de ENS units eveneens effectief roet afvangen (black carbon), ten aanzien van gezondheid een belangrijk onderdeel binnen PM10. De gereinigde lucht wordt meegevoerd door de wind waardoor ze ook de omliggende (woon)gebieden bereikt. Zo worden in de omliggende gebieden rondom de parkeergarages substantiële reducties in luchtverontreiniging behaald.



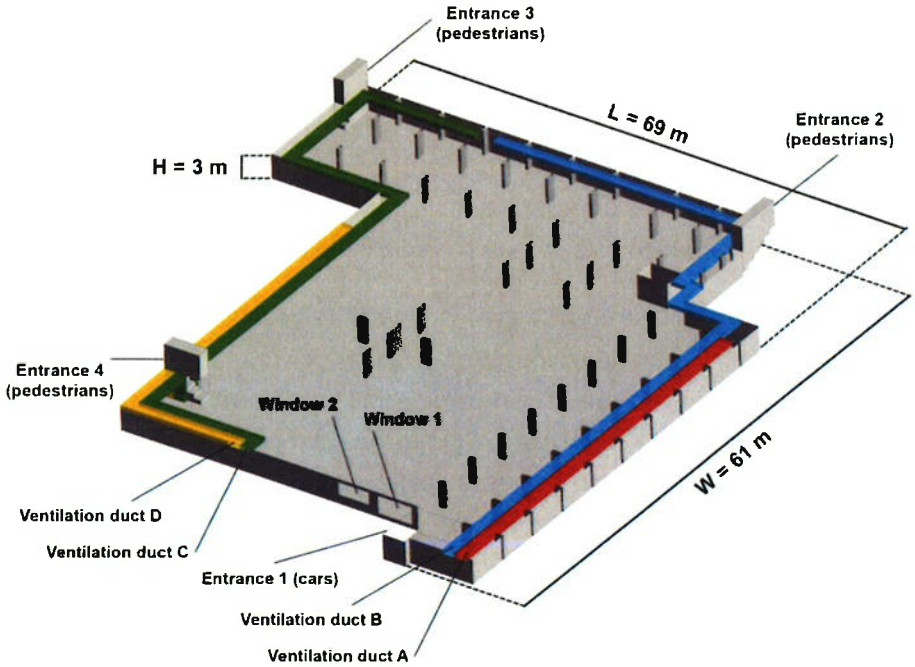
Figuur 5 - Vermindering van PM10 concentraties op 1,75m hoogte; linkerafbeelding - procentuele afname van PM10 op stadsniveau; rechterafbeelding – absolute concentratieverschillen zonder en mét Aufero fijnstofreductiesystemen

Het concept 'Longen van de Stad' lijkt op basis van deze resultaten een uiterst effectieve manier om de luchtkwaliteit in de stad substantieel te verbeteren. De resultaten van deze simulaties zijn gepubliceerd in het hoog aangeschreven wetenschappelijk tijdschrift *'Journal of wind engineering and industrial aerodynamics'* (Blocken, et al., 2016).

In Weert is de ambitie om alle zes gemeentelijk parkeergarages uit te rusten met Aufero installaties, waardoor de luchtkwaliteit in Weert lokaal zal verbeteren ten opzichte van de situatie zonder luchtreiniging. Hiermee bevindt Weert zich in de kopgroep van gemeenten die actieve maatregelen nemen om vervuilde lucht te reinigen op stadsschaal.

4. Vooronderzoek ventilatiesysteem Walburggarage

Er zijn vooraf aan de metingen en simulaties verricht aan het ventilatiesysteem in de Walburggarage zodat de juiste parameters in de modellen werden meegenomen.
De garage kent vier luchtinlaten, namelijk de hellingbaan waar de auto's naar binnen rijden en vier trappen die uitkomen op maaiveld. De lucht wordt vanuit 4 kanalen afgezogen en geleid naar een centraal punt waar deze wordt gefilterd en via een verticaal kanaal boven de gebouwen wordt uitgestoten.



Figuur 6 – Geometrie en ventilatiekarakteristieken van de Walburggarage

Uit deze metingen bleek dat de werkelijke ventilatie sterk afwijkt van de ontworpen situatie. De totale ventilatiecapaciteit bedraagt ca. 8000 m3/u terwijl deze ontworpen is met 18.000 m3/u. (zie Appendix voor meer gedetailleerde cijfers).
Op locatie bleek dat deze afwijking in negatieve zin (deels) wordt veroorzaakt doordat een groot aantal ventilatieroosters geblokkeerd zijn, terwijl andere volledig open staan, waardoor een zeer onevenwichtige luchtafvoer ontstaat, welke ook de metingen op locatie beïnvloedt.
Hieronder een aantal foto's, waarop de verschillen tussen openingen van de verschillende roosters zichtbaar zijn.

Figuur 7 - Links: nagenoeg gesloten aanzuigrooster, rechts: volledig open aanzuigrooster

In de simulaties zijn zowel de ventilatiekarakteristieken van de werkelijke situatie als van de ontworpen situatie meegenomen en uitgewerkt. In de verslaglegging in deze rapportage wordt alleen gericht op de praktijksituatie zoals deze in werkelijkheid is.

Op basis van de aangetroffen en bemeten situatie is het aan te bevelen om de inregeling van het ventilatiesysteem in de Walburggarage te controleren, zodat de ventilatie optimaal kan functioneren. In de huidige situatie is het zo dat op verschillende plaatsen nabij de inlaat van verse lucht bovengemiddeld sterk wordt aangezogen, zodat deze lucht nooit de verversing teweeg brengt zoals bedoeld. Anderzijds zijn aanzuigroosters plaatselijk nagenoeg geblokkeerd. Een gedetailleerd beeld van de bemeten debieten per aanzuigroosters zijn weergegeven in het onderzoeksrapport van de TU/e (appendix 1).

5. Geïnstalleerde systemen

De twee Aufero systemen in de Walburggarage zijn op verzoek uitgevoerd op een frame dat gefixeerd is aan de vloer. De totale unit met frame is zo uitgevoerd dat deze volledig automatisch kan functioneren en voorzien van veiligheidsmaatregelen zodat onbevoegde personen geen toegang hebben. Tevens zijn extra veiligheidsvoorzieningen aangebracht om de kans op ongelukken te minimaliseren. De systemen worden door ENS onderhouden en tweemaandelijks gereinigd, waarbij het afgevangen en tot grof stof geagglomereerd fijnstof worden afgenomen en afgevoerd.
Onderstaand foto's van de systemen in de Walburggarage.

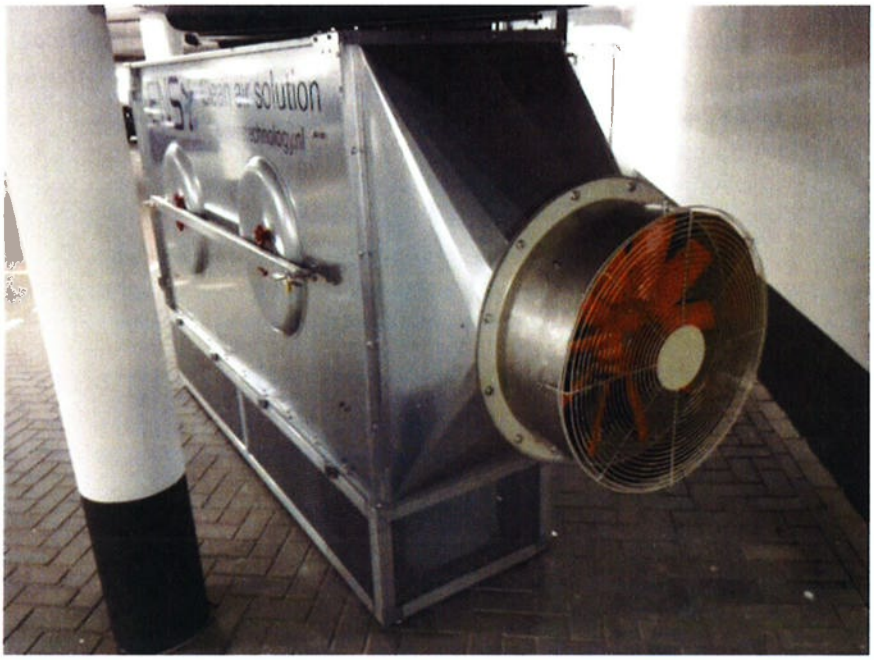
Figuur 8 – Positie van Aufero (1) nabij de toerit

Figuur 9 - Positie van Aufero (2) nabij de trap naar de Kromstraat

Figuur 10 – Beide Aufero's gefotografeerd aan uitstroomzijde. De Aufero's worden zo hoog mogelijk geplaatst zodat de gereinigde lucht zicht het verst verspreid zonder obstructie door obstakels zoals geparkeerde auto's. Vanwege de aanwezige ventilatiekanalen is de Aufero op de linkerafbeelding (2) op een lager frame geplaatst.

Om de risico's op ongelukken nog verder te verkleinen is op verzoek nog een aanpassing uitgevoerd aan de 'Fingerguard', het rooster dat bescherming biedt tegen contact met de draaiende ventilator.

Hierbij is met plaatwerk een op maat gemaakte afstandhouder geplaatst op beide systemen, zie onderstaande foto



Figuur 11 – Verlengde afstandhouder ter bescherming tegen de draaiende ventilator

6. Effectonderzoek met behulp van simulaties

6.1 Metingen t.b.v. input en validatie model

Er zijn gedurende de periode april tot augustus 2017 op verschillende plekken in de garage metingen verricht met als doel om de verwachte luchtstromingen en deeltjesconcentraties te verifiëren. Onderstaand foto's van de meetlocaties gedurende de meetperioden

Figuur 12 - Meetlocaties: linksboven - nabij trap uitkomend op Kromstraat (1), rechtsboven - in centraal afvoerkanaal (2), onder – centraal in de garage (3)

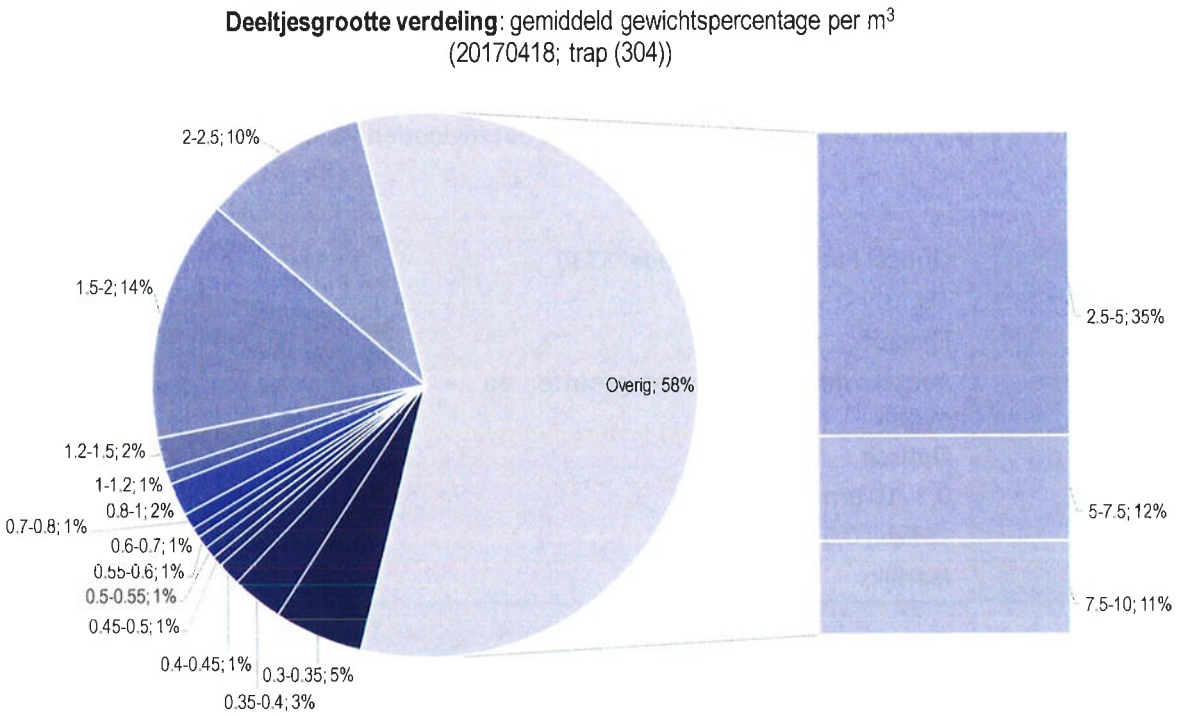
Voor het meten van fijnstof (grootterange 0,3 µm t/m 10 µm) wordt gebruik gemaakt van de Optical Particle Sizer Model 3330 (OPS) van de Amerikaanse fabrikant van precisie meetapparatuur TSI[2]. Beide OPS-en die zijn gebruikt in de metingen zijn ter bescherming geplaatst in een environmental enclosure die de apparatuur beschermt en ervoor zorgt dat invloeden van buitenaf een minimale rol spelen.

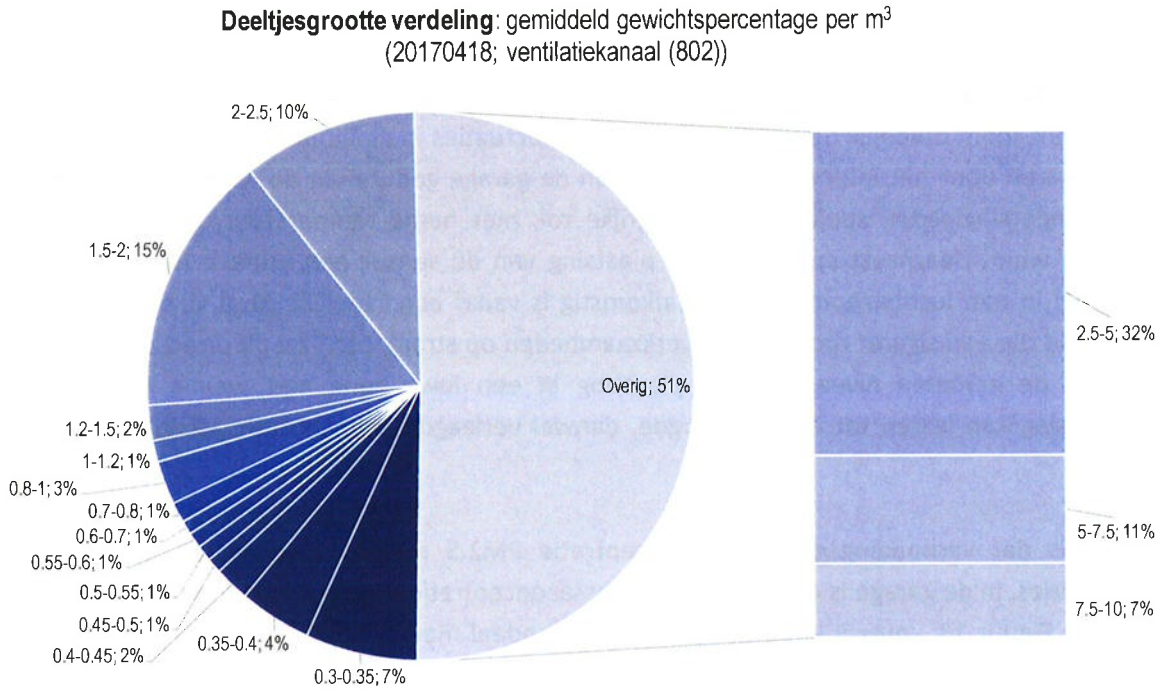
Type	Optical Particle Sizer Model 3330
Fabrikant	TSI
Metingen	Fijnstof
Meetwaarden	Aantal deeltjes, deeltjesgrootte en -massa
Meetprincipe	Optisch
Meetbereik	0,3 -10 µm
Resolutie	±5% bij 0,5 µm
Kalibratie	Jaarlijks

Op de aangegeven locaties (zie Figuur 1 en Figuur 12) zijn op meerdere metingen uitgevoerd in de periode van april en augustus.
Uit de metingen is gebleken dat de concentraties gedurende de looptijd sterk fluctueren. Gedurende de dag worden maxima gemeten boven 50µg/m^3 (PM10), terwijl de PM10-concentraties gedurende de nacht doorgaans beneden 10-20 µg/m^3 liggen. Figuur 14 toont een trendweergave van de uurgemiddelde fijnstofconcentraties (PM10 & PM2,5) in de garage over een hele week in april. Dit weekoverzicht toont duidelijk de (veelvoorkomende) fluctuaties in de aanwezige concentratie. Deze zijn te verklaren door het intensievere gebruik van de garage gedurende de winkelopeningstijden, maar ook weersinvloeden spelen een belangrijke rol, met name temperatuur, luchtvochtigheid, neerslag en wind. Daarnaast speelt ook de plaatsing van de sensor een kritieke rol. Indien deze bijvoorbeeld in een luchtstroom staat die afkomstig is vanaf een tijdelijke bron (bv. een lopende auto, iemand die een sigaret rookt, bouwwerkzaamheden op straat, etc.) zal dit direct zijn weerslag hebben op de gemeten niveaus. Ook plaatsing in een luwe zone met weinig of juist veel luchtverversing kan leiden tot een verhoogde, danwel verlaagde concentratie, afhankelijk van de situatie.

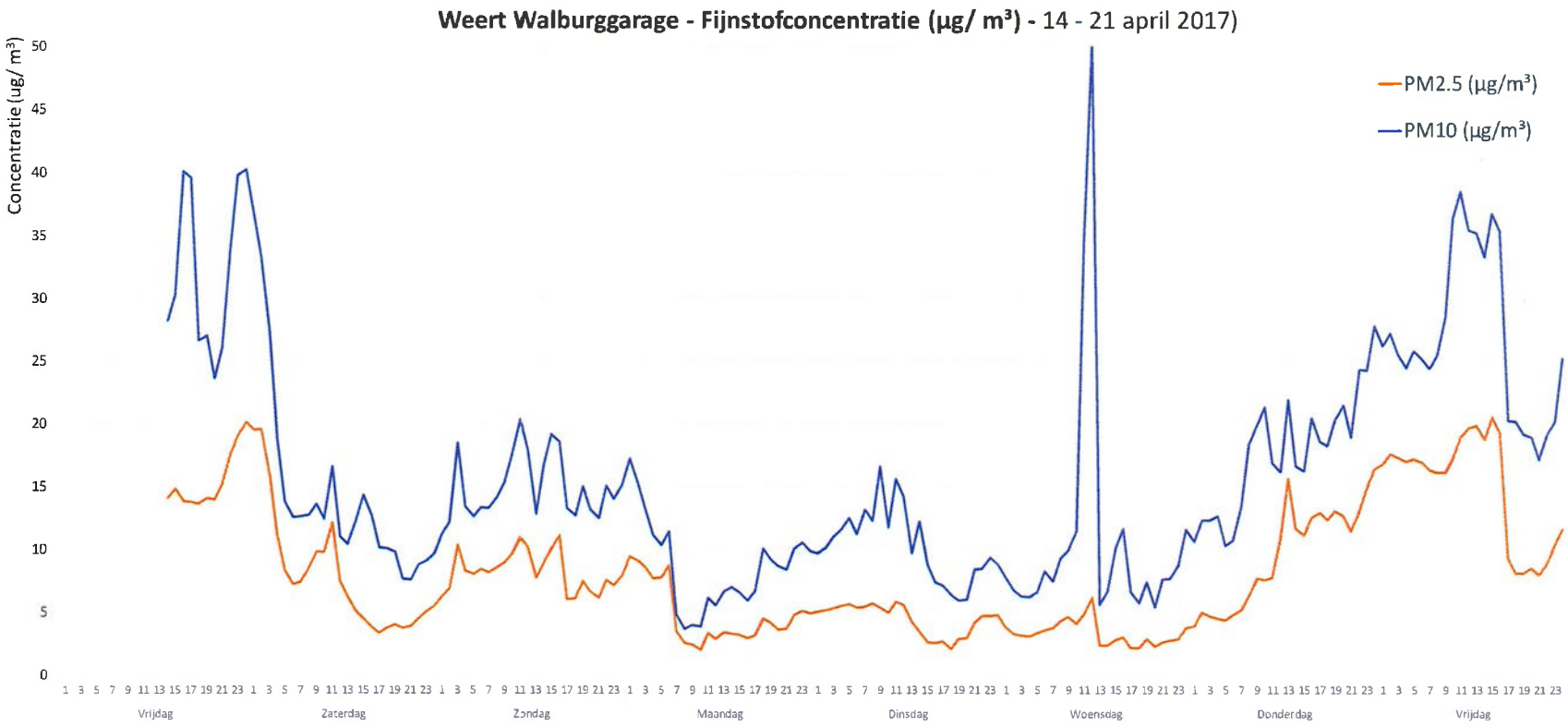
Opvallend is dat verhoudingsgewijs de concentratie PM2.5 relatief hoog is ten opzichte van buitencondities. In de garage is ca. 50% van de massaconcentratie deeltjes kleiner dan 2,5 µm, zoals zichtbaar in Figuur 13, terwijl in de buitenlucht dit aandeel meestal veel kleiner is. Dit verschil is meest waarschijnlijk te verklaren door de aanwezigheid van auto's met bijbehorende typische emissies.

[2] http://www.tsi.com/optical-particle-sizer-3330/



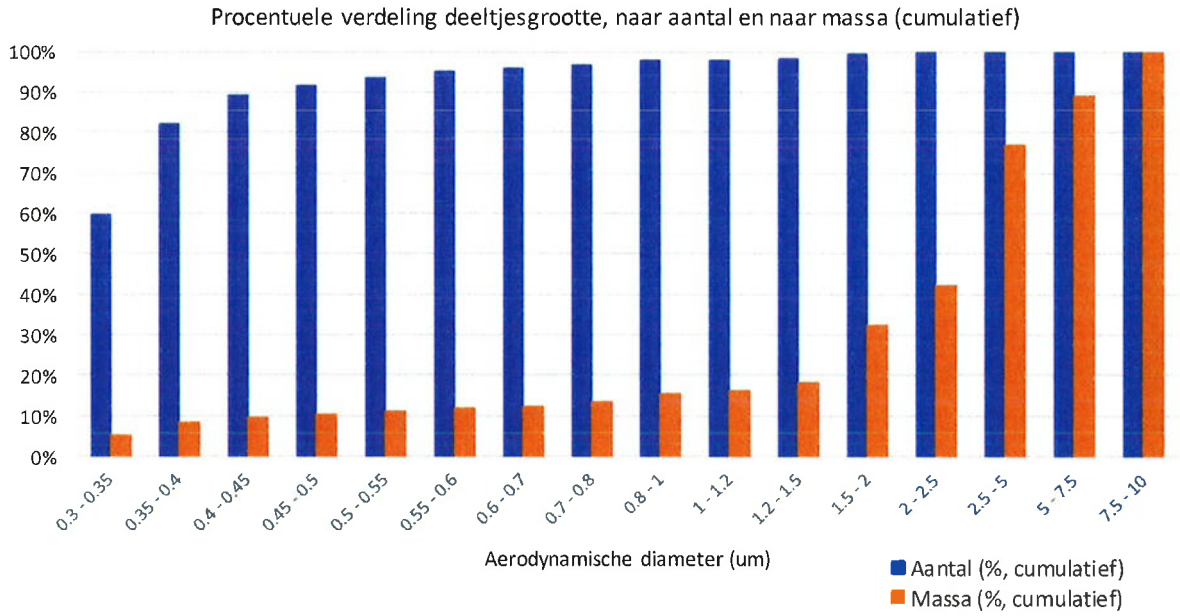


Figuur 13 – Procentuele verdeling van het gewichtsaandeel per deeltjesgroottefractie in de totale PM10-massaconcentratie (µg/m3) in de Walburggarage ter plaatse van de meetlocaties trap (bovenste taartdiagram) en ventilatiekanaal (onderste taartdiagram)



Figuur 14 – Trendweergave van de fijnstofconcentratie (PM10 & PM2,5) in parkeergarage Walburg gedurende een hele week (14-21 april 2017)

In onderstaande grafiek wordt het onderscheid gemaakt tussen het aantal deeltjes en de massa van deeltjes in het fijnstof waarmee inzichtelijk wordt waarom een massaconcentratie in µg/m3 niet altijd direct een helder beeld geeft van de potentiele gevaren van het aanwezige fijnstof. Zoals in Figuur 2 is getoond zijn met name de kleine deeltjes (<2.5 µm) het meest schadelijk omdat ze tot in de longen en zelfs de bloedbaan kunnen doordringen. Daarnaast bevindt verkeersgerelateerd fijnstof zich bovenmatig in deze kleinste range, waarvan een groot aantal roetdeeltjes (grootterange 0,3-0,5 µm), die vanwege de chemische samenstelling het meest impact hebben op de gezondheid. In onderstaande grafiek is bijvoorbeeld af te lezen dat deeltjes groter dan 2,5 µm 58% van de massaconcentratie vertegenwoordigen, maar minder dan 0.3% van het absolute aantal deeltjes. Om een indruk te geven van verhouding hebben binnen onderstaande dataset circa 20.000 deeltjes met een aerodynamische diameter van 0.3 µm dezelfde massa als 1 deeltje met een aerodynamische diameter van 10 µm.



Figuur 15 – Overzicht van de gemiddelde cumulatieve procentuele bijdrage in de aanwezige fijnstofconcentratie per deeltjesfractie aan het totaal aantal deeltjes (blauw) en het totale gewicht (oranje)

6.2 CFD-model

Onderzoekers van de Technische Universiteit Eindhoven, onderzoeksgroep Urban Physics & Wind Engineering, hebben met behulp van lokaal en nationaal bronnenmateriaal en de karakteristieken van de garage een 3D rekenmodel gecreëerd van de Walburggarage. De meetgegevens zijn gebruikt bij de controle van de inputparameters.

Doel van het TU/e onderzoek was om met behulp van een 3D luchtstromingssimulatie het reducerende effect op de fijnstofconcentratie in de Walburggarage inzichtelijk te maken en hiermee de plaatsing van de fysieke systemen te kunnen valideren en verantwoorden.

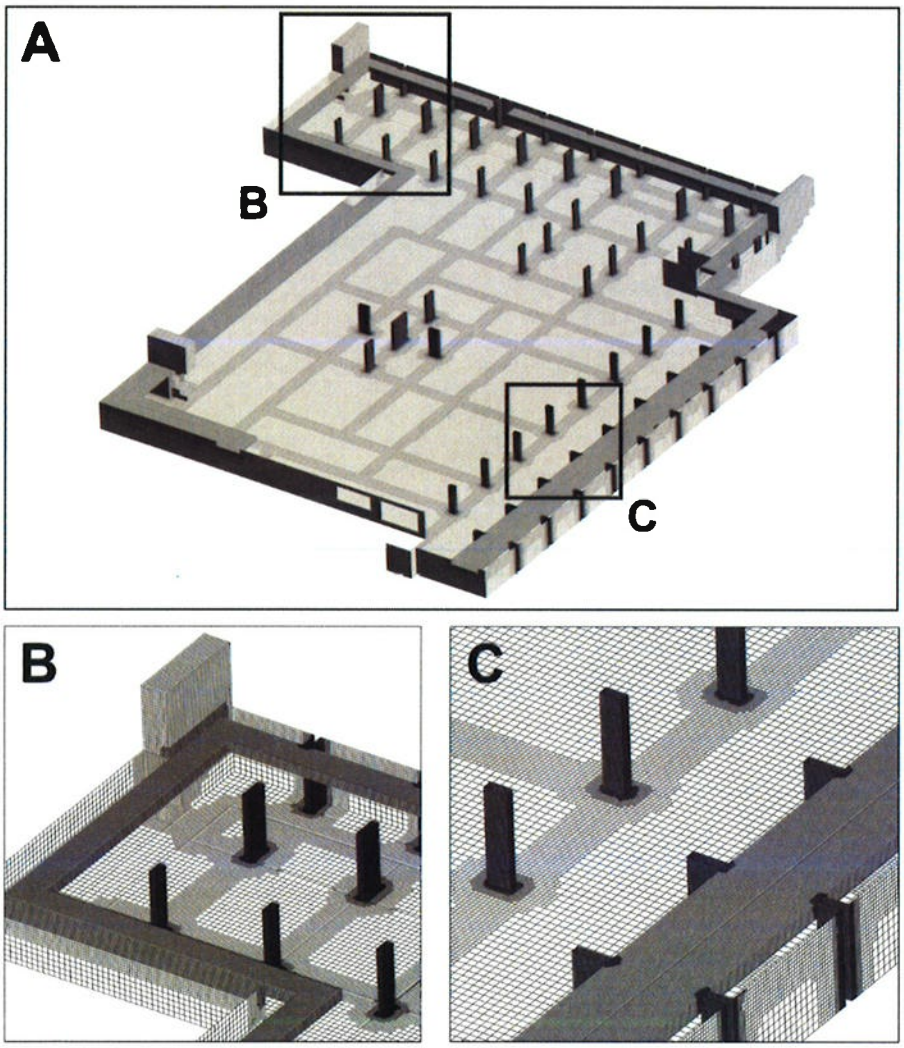
De volledige rapportage van het (onafhankelijke) TU/e rapport zijn opgenomen als Appendix bij deze rapportage. In deze paragraaf volgt een beknopte samenvatting van het uitgevoerde onderzoek en de bijbehorende resultaten. Hierbij is onderscheid gemaakt in:

- de ontworpen situatie,
- de werkelijke (bemeten) situatie;

en:

- De situatie zonder luchtreiniging,
- De situatie mét luchtreiniging.

De Walburggarage is volledig in 3D getekend en vervolgens is een 3D rekenraster gegenereerd bestaande uit 8,7 miljoen rekencellen. Met de input van (bemeten) luchtaan- en afvoer en de vervuilingsbronnen en achtergrondconcentraties (o.b.v. RIVM gegevens en inschattingen van het gebruik van de garage) volgt een iteratieproces waarin een balanssituatie wordt bereikt waaruit bovenstaande gegevens volgen. Hieronder een impressie van het rekenraster:

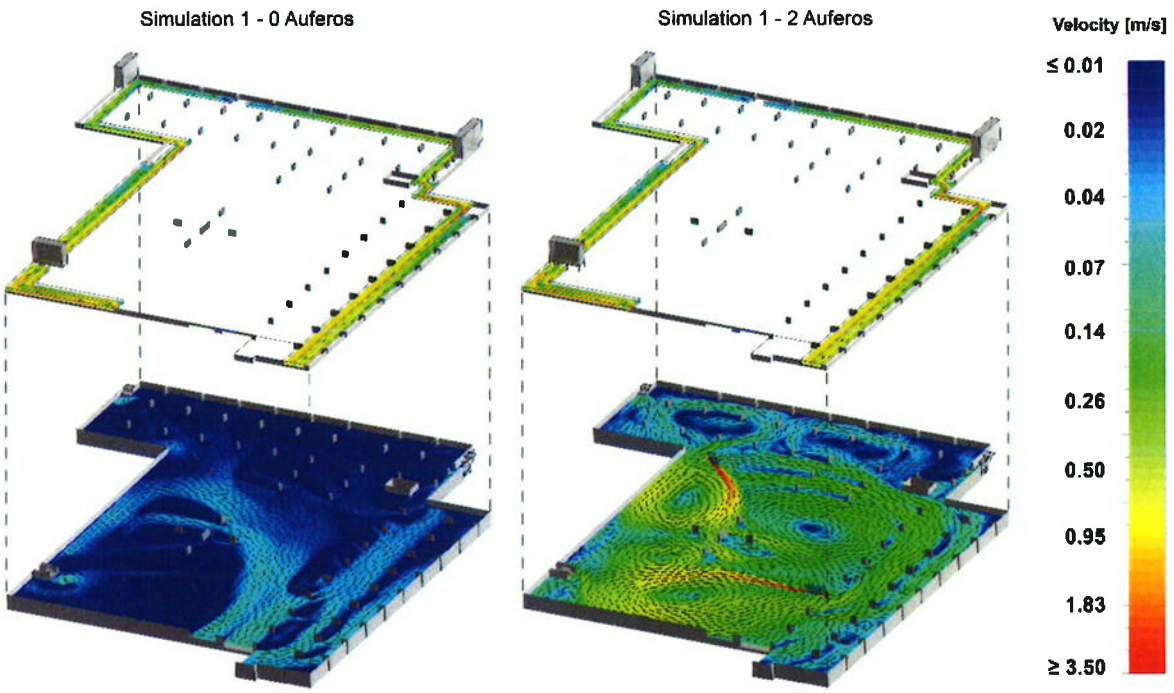


Figuur 16 – impressie van het fijnmazig 3D rekenraster voor de luchtstromingssimulaties (8,7 miljoen rekencellen)

6.3 Resultaten

6.3.1 Luchtstromingen

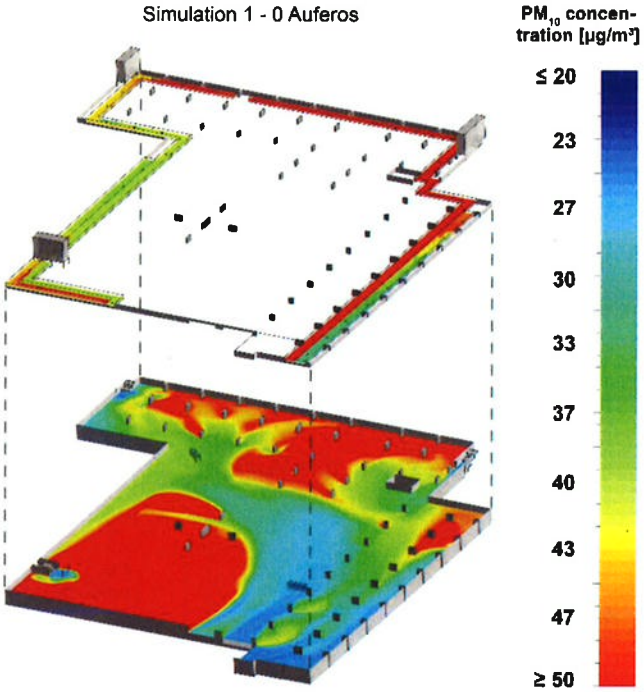
Onderstaande afbeeldingen geven een statische en gemiddelde weergave van de luchtsnelheden in de garage. Transiënte effecten als gevolg van verkeersbewegingen in de garage zijn niet meegenomen vanwege de vele extra variabelen die dit zou opleveren. Daarnaast geldt dit beeld bij een garage zonder auto's, die de luchtstroming zouden kunnen beïnvloeden. Ook hierbij geldt dat er ontelbaar veel configuraties zijn waarin auto's opgesteld kunnen zijn in de garage, waardoor het rekenwerk exponentieel zou toenemen. Op basis van onderstaande afbeeldingen is duidelijk te zien dat in de oorspronkelijke situatie (*'Simulation 1 – 0 Aufero's'*) de luchtsnelheden erg laag zijn, waardoor er weinig menging zal optreden. In de situatie mét Aufero's (*'Simulation 1 – 2 Aufero's'*) wordt de lucht in de garage als gevolg van de recirculatie door de Aufero's in beweging gebracht waardoor de luchtsnelheden veel hoger zijn en er voldoende menging optreedt om de buitenlucht samen met de gereinigde lucht in redelijk gelijke mate over de garage te verdelen. Wel is zichtbaar dat in het in de afbeelding bovenste gedeelte van de garage veel minder menging en luchtbeweging is doordat beide Aufero's gericht staan op het centrale gedeelte.



Figuur 17 - Simulatie van de luchtsnelheden en –richtingen als gevolg van de ventilatie, met en zonder Aufero's.

6.3.2 Fijnstofconcentraties (PM10)

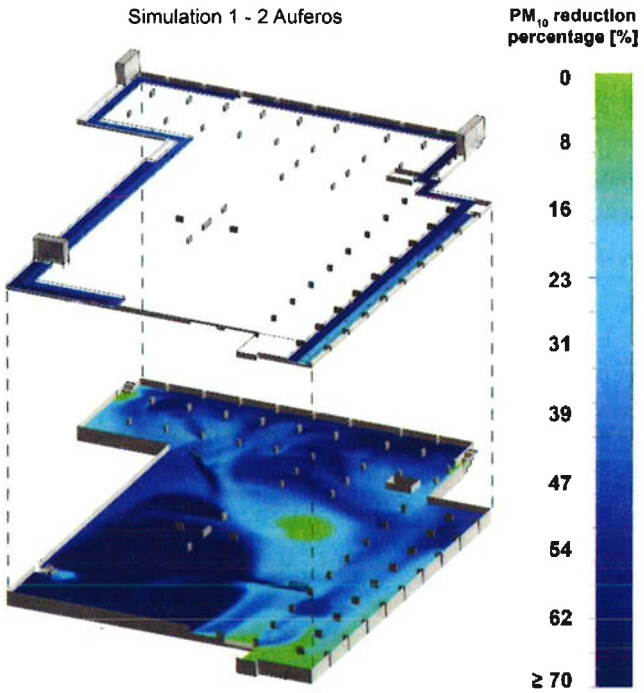
In het model zijn naast de luchtbeweging en de vervuilingsbronnen ook de Aufero reinigingssystemen opgenomen. Deze kennen bij een capaciteit van 9200 m3/u een reductiepercentage op PM10 van 70% en op PM2.5 van 40%.
In onderstaande afbeeldingen is achtereenvolgens getoond welke fijnstofconcentraties aanwezig zullen zijn bij een gemiddeld gebruik van de garage met inbegrip van de aanwezige ventilatiekarakteristieken, emissiebronnen en achtergrondconcentratie (figuur 18).



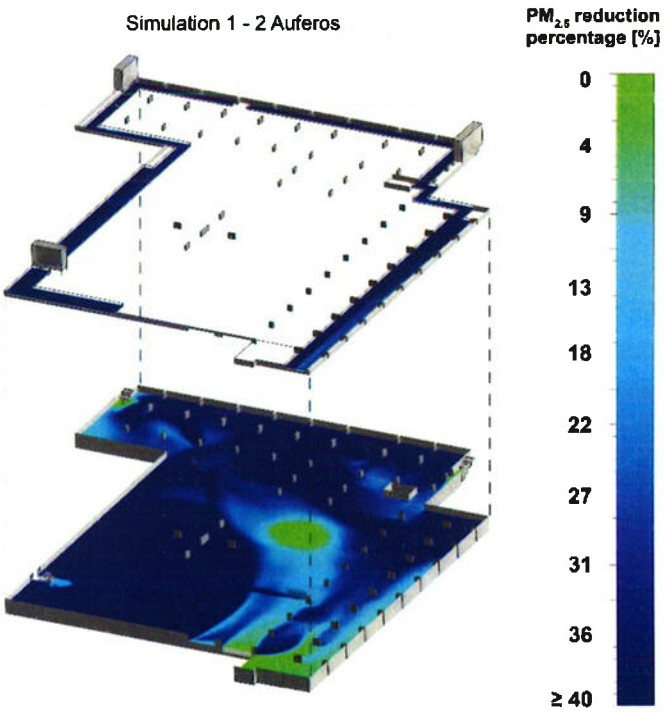
Figuur 18 - De absolute PM10- concentraties als gevolg van de vervuilingsbronnen zonder toepassing van Aufero-units.

Het is zichtbaar dat nabij de luchtinlaten de fijnstofconcentratie het laagst is en in het centrale deel het hoogst, met (gemiddelde) waarden boven 50 µg/m^3, waar als gevolg van de geometrie en de ventilatiekarakteristieken ogenschijnlijk een ophoping van vervuilde lucht ontstaat.

In de figuren 18 en 19 op de volgende pagina's is te zien wat het reducerende effect op de gemiddelde concentraties PM10 en PM2.5 door plaatsing van de 2 Aufero's. Door de richting van de uitblaasopening van de Aufero's wordt een groot effect bereikt in het centrale deel van de garage (donkerblauw, >70% reductie). Door de aanwezige luchtstromingen zijn er ook gebieden waar slechts beperkt effect wordt bereikt (0-10% reductie).



Figuur 19 - de relatieve PM10- reductie als gevolg van toepassing van de twee Aufero's ten opzichte van de uitgangssituatie



Figuur 20 - de relatieve PM2.5- reductie als gevolg van toepassing van de twee Aufero's ten opzichte van de uitgangssituatie

In onderstaande tabel wordt de gemiddelde afname van PM-concentratie over de gehele garage getoond als gevolg van de installatie van de 2 Aufero's in de Walburgpassage.

		Aufero's		Reductie percentage
		0	2	
Volumegemiddelde concentratie fijnstof in garage [µg/m³]	PM10	44,6	20,8	53%
	PM2,5	22,7	12,2	46%

Tabel 2 – De gemiddelde PM10-concentratie en PM10 reductie in de Walburggarage in situatie zonder Aufero's en mét 2 Aufero's

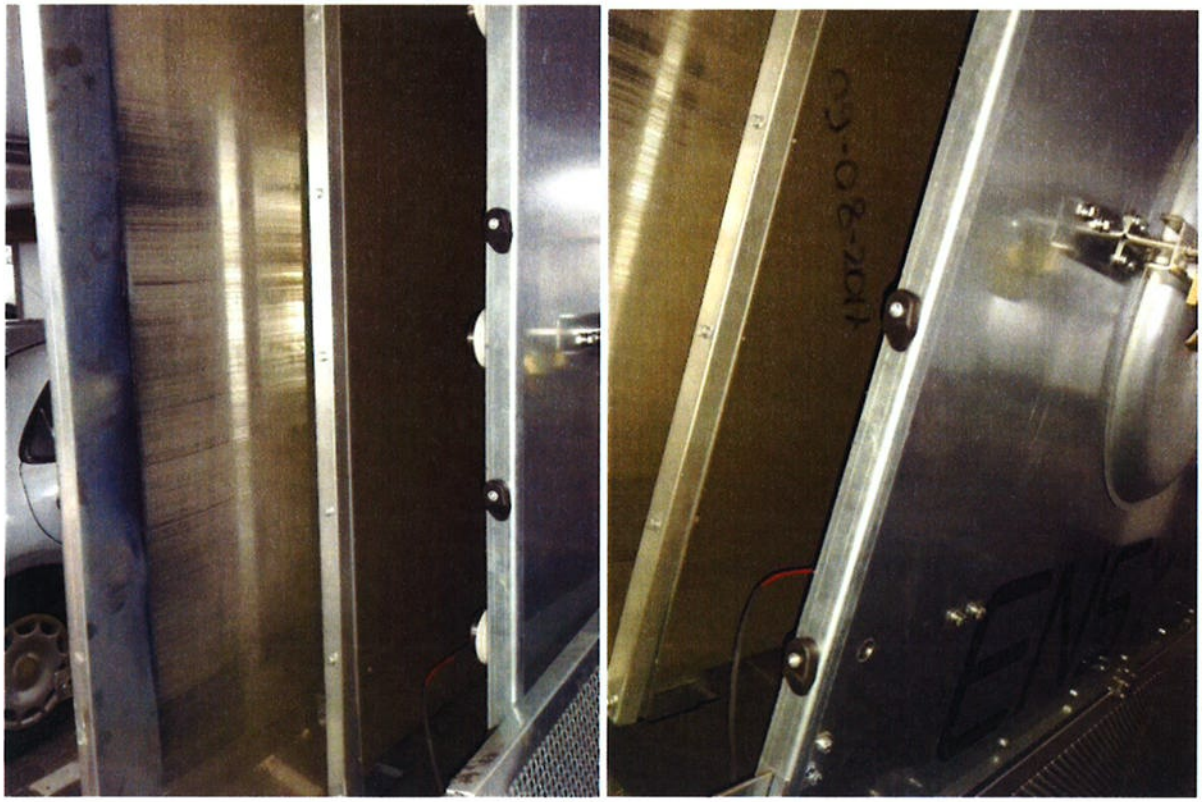
De getallen in bovenstaande tabel geven het resultaat van de gemiddelde concentratieverlaging in de garage, waaruit blijkt dat de lucht die bij verblijf in de garage wordt ingeademd aanzienlijk minder schadelijk is. Hierdoor wordt ook een reductie bereikt in de lucht die als gevolg van ventilatie naar de omgeving van de garage wordt uitgestoten. De concentratieverlaging in de lucht die via de vier afvoerkanalen de garage verlaat varieert per kanaal, vanwege de locaties van de aanzuigroosters, en ligt gemiddeld op 43% voor PM10 en 29% voor PM2,5.
Om een indruk te geven van de verschillen: de fijnstofreductie in de lucht in kanaal A is 29% en 25%, terwijl de lucht in kanaal D 67% en 54% is voor respectievelijk PM10 en PM2,5. Dit vrij grote verschil is logisch te verklaren doordat kanaal A nabij de toerit hangt, waar de meeste buitenlucht de garage betreedt. De PM-concentraties zijn in dit gebied niet alleen het laagst, zoals zichtbaar in figuur 18, ook de Aufero's zijn niet op dit gebeid gericht (zie figuur 17), waardoor het relatieve verschil minder is.

6.3.3 Stofafvangst

Buiten de berekende effect is er ook in praktische zin een resultaat waar te nemen. De afvangst van fijnstof in de garage is duidelijk waarneembaar op de systemen. Onderstaande foto's zijn gemaakt op 9 augustus 2017, 41 dagen na de installatie en in werking stelling van de Aufero systemen op 28 juni 2017.

Het fijn stof is in het ionisatieproces geclusterd tot niet-inadembaar en daardoor niet schadelijk grof stof dat achterblijft op de collectorplaat in de unit. Centraal in de achterzijde van de unit is een verticale balk zichtbaar. Hierop is een schraper gemonteerd die het systeem schoon schraapt zodra de collectorplaat waarop het fijnstof neerslaat uit het systeem wordt geschoven. Er is een duidelijk verschil te zien tussen het deels schoon geschraapte uitstekende gedeelte en het diepbruine gedeelte van de plaat dat nog in het systeem is en niet schoon geschraapt is. Het verwijderde fijnstof valt naar beneden in een verzamelbak onder in het systeem.

Figuur 21 – Achterzijde van een Aufero met deels uitgetrokken collectorplaat



Figuur 22 – Stofopbouw 41 dagen na installatie (9 augustus 2017). Op de foto links is duidelijk contrast zichtbaar tussen het linkerdeel van de metalen collector dat schoon geschraapt is en het rechterdeel waarop het neergeslagen fijnstof een donkerbruine laag vormt. Rechts een foto met datum in stoflaag ingetekend.

7. Conclusie

Het effectonderzoek toont aan dat met de huidige installatie van 2 Aufero's, die samen ca. 16.000 kubieke meter lucht per uur reinigen, de fijnstofconcentratie in de garage gemiddeld met 53% (PM10) en 46% (PM2,5) gereduceerd wordt. Hierbij geldt dat er is uitgegaan van de bemeten situatie met een ventilatie van ca. 8000 m^3/u.
Indien het ventilatiesysteem zou functioneren zoals ontworpen, met een totale luchtverversing van 18.000 m^3/u, zou de reductie minder uitgesproken zijn, met 43% en 29% voor respectievelijk PM10 en PM2.5.

Op basis van de inzichtelijk gemaakte luchtverdeling en PM-concentratieafname is te zien dat er relatief grote verschillen ontstaan in PM-afname als gevolg van de combinatie van geometrie van de garage, ventilatiesysteem en de plaatsing en richting van de Aufero systemen.
Hoewel met de twee geplaatste Aufero-systemen reeds een aanzienlijke verbetering van de fijnstofconcentraties geven op de uitgangssituatie, kan worden geconcludeerd dat het zeer aannemelijk is dat toevoeging van één Aufero-systeem ideaal zou zijn geweest voor deze specifieke situatie.

8. Referenties

- Blocken, Vervoort, van Hooff (2016) Reduction of outdoor particulate matter concentrations by local removal in semi-enclosed parking garages: a preliminary case study for Eindhoven city center. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **159**:80-98 (doi:10.1016/j.jweia.2016.10.008) http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167610516304536
- RIVM (2013) *Dossier fijnstof*, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven
- RIVM (2013) *Ultrafijnstof en gezondheid*, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven
- RIVM, DCMR (2013) *Eerste kaart roetconcentraties Nederland* – Roet aanvullende maat voor gezondheidseffecten luchtvervuiling, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven
- van Zeebroeck (2013) *Elektrische auto veroorzaakt evenveel fijn stof als conventionele auto omdat...* Verkeersspecialist 204
- Venkatram, Snyder, Isakov (2013) Modeling the impact of roadway emissions in light wind, stable and transition conditions. *Transport. Res. D* **24**:110–119
- Wester, van den Elshout (2012) *Reader luchtkwaliteit en gezondheid: naar een roetmaat voor een gezonder luchtkwaliteitsbeleid*, DCMR Milieudienst Rijnmond, Schiedam
- WHO (2005) *Air Quality Guidelines for Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide,* World Health Organization, Genève

Appendix 1

Onderzoeksrapportage - "CFD Analysis of particulate matter reduction at the Walburgpassage garage in Weert by implementation of the Aufero (ESP) unit"

Auteur: ir. R. Vervoort (TU/e)
Dr. Ir. T. van Hooff (KU Leuven, TU/e)
Prof. Dr. Ir. B. Blocken (TU/e, KU Leuven)
Dr. Ir. R. Gijsbers (ENS Technology BV)

Datum: 24 Juli 2017

Technische Universiteit
Eindhoven
University of Technology

Navigation address: De Zaale, Eindhoven
P.O. Box 513, 5600 MB Eindhoven
The Netherlands
www.tue.nl

Author
R. Vervoort (TU/e)
T. van Hooff (KU Leuven, TU/e)
B. Blocken (TU/e, KU Leuven)
R. Gijsbers (ENS Technology)

Date
24 July 2017

CFD analysis of particulate matter reduction at the Walburgpassage garage in Weert by implementation of the Aufero (ESP) unit

Particulate matter (PM) is one of the most dangerous forms of air pollution and traffic is a major contributor to PM concentrations. High concentrations of PM can be found in parking garages. Currently two Aufero units are installed at an underground parking garage in Weert (located at the Walburgpassage).

The performance of the two Aufero units is investigated using computational fluid dynamics (CFD) simulations. Subsequently, CFD simulations are compared with on-site measurements

Where innovation starts

Technische Universiteit
Eindhoven
University of Technology

Table of contents

Title
CFD analysis of particulate matter reduction at the Walburgpassage garage in Weert by implementation of the Aufero (ESP) unit.

1 INTRODUCTION – WALBURGPASSAGE WEERT 3

1.1 IONIZATION UNIT 3

2 METHODOLOGY 4

2.1 COMPUTATIONAL DOMAIN 4
2.2 BOUNDARY CONDITIONS 5
2.2.1 Volume flow 5
2.2.2 PM sources 5
2.3 COMPUTATIONAL GRID 7

3 RESULTS 8

3.1.1 Contour plot analysis 8
3.1.2 Quantitative analysis 11

4 DISCUSSION 13

5 CONCLUSION 14

6 LITERATURE 15

7 APPENDICES 16

1 Introduction – Walburgpassage Weert

The parking garage is located in the city center of Weert at the Walburgpassage (Figure 1). The one story garage is ventilated using a negative pressure system, air is exhausted from the garage using ventilation ducts positioned near the vicinity of the walls/perimeter.

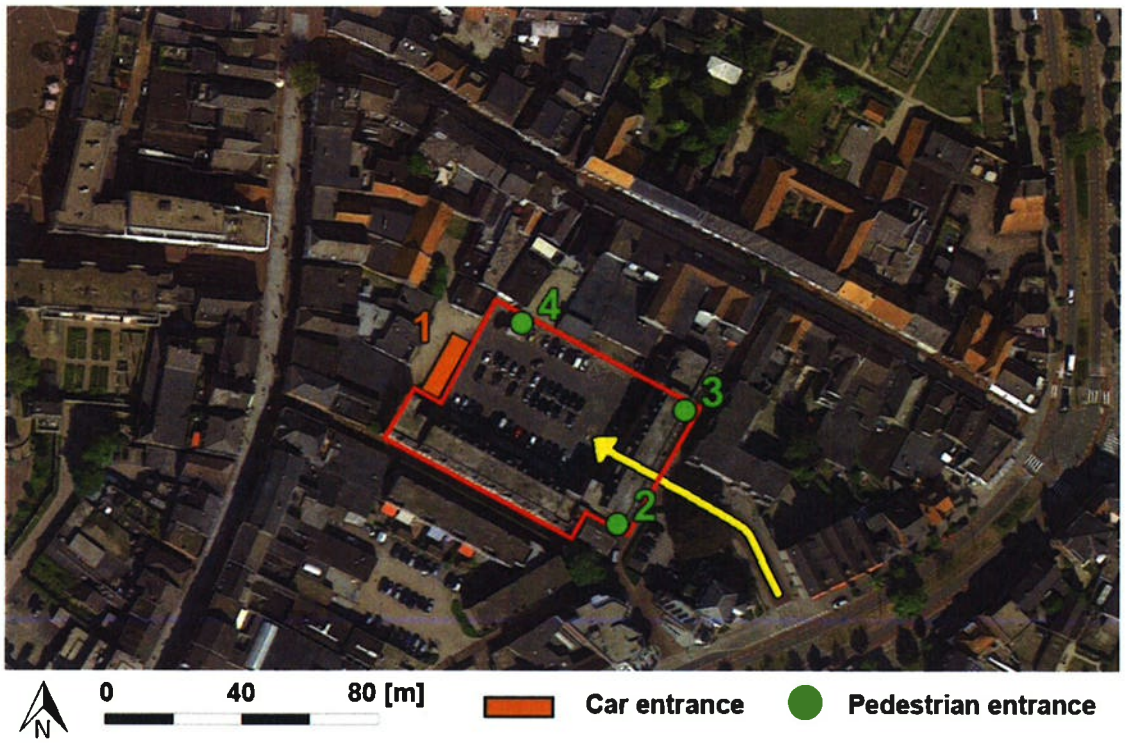


Figure 1: Location of the one-story underground parking garage; red indicates the perimeter, green the access points for pedestrians (staircases), orange the car entrance (slope) and yellow the access to the location from the main road.

In this study, computational fluid dynamics (CFD) simulations are performed to analyze the ventilation and ambient particulate matter (PM_{10} and $PM_{2.5}$) concentrations inside the parking garage including two Aufero units. Two different ventilation scenarios are analyzed. Thermal effects are not taken into account. Furthermore, to reduce computational costs wind effects in the nearby surroundings of the garage are not considered. As visible in Figure 1, the access points of the underground parking are shielded from the wind by the surrounding buildings.

1.1 Ionization unit

The dimensions of the unit are 3,150 (L) x 700 (W) x 1,350 (H) mm^3, consisting of a fan, a diffuser and a rectangular box in which the collector plate is positioned. For the current simulations, the unit has been simplified to a rectangular box with size 2,500 (L) x 600 (W) x 1,200 (H) mm^3. Measurements performed by ENS show a removal efficiency of 70% and 40% for PM_{10} and $PM_{2.5}$ respectively [1]. The volume flow rate produced by the fan is 9,000 m^3/h. The unit is designed for air treatment in industrial buildings but also for civil infrastructures (such as tunnels) and livestock farms [1].

2 Methodology

The 3D steady Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations are solved in combination with the realizable k-ε turbulence model [1] using standard wall functions [2]. The SIMPLE algorithm is applied for pressure-velocity coupling. The second-order pressure interpolation scheme is applied. Second-order upwind schemes are used for the numerical approximation of momentum, energy, turbulent kinetic energy and turbulent dissipation.

2.1 Computational domain

Figure 2 presents the geometry of the garage for which the simulations are performed. The dimensions of the garage are approximately 69 m (L) x 61 m (W) x 3 m (H), there are three entrances for pedestrians and one for cars. Due to the fact that wind effects on the surroundings of the garage are not taken into account, the size of the computational domain can be limited to the garage itself. Inside the garage some simplifications are made when creating the computational domain. Unlike the rectangular columns (0.7 m x 0.3 m), the relatively thin (diameter = 0.3 m) round columns are not modeled. Furthermore, the ventilation duct is modeled as a simple rectangular duct instead of the actual duct that gets narrower towards the end (Figure A-1).

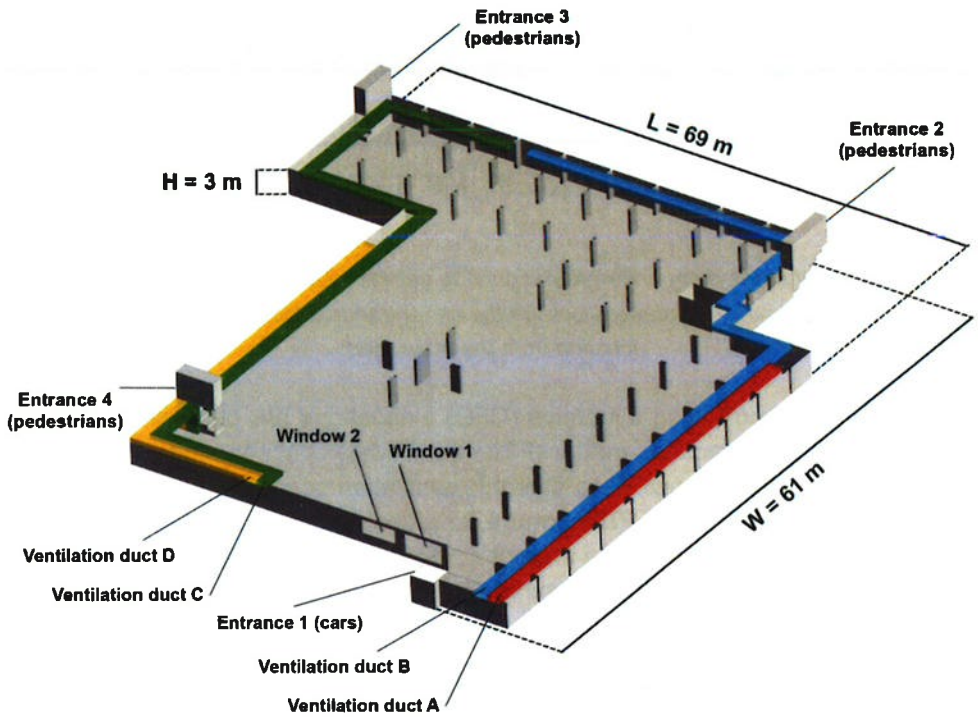


Figure 2: Computational domain of the parking garage in Weert (base case).

A carbon monoxide detection system is present that is able to increase the amount of ventilation in the garage. For this purpose, ventilation openings are positioned near the vicinity of the ground which are connected to the ventilation ducts using pipes. These pipes are not modeled, however, it is possible to increase the ventilation rates in the ducts accordingly.

2.2 Boundary conditions

2.2.1 Volume flow

As shown in Figure 2 and 3, the garage is ventilated using four ventilation ducts with several openings (Figure 3) that extract air out of the parking garage. According to the specifications of the ventilation system design, each ventilation duct should ventilate 4,500 m^3/h under normal operation circumstances. A carbon monoxide detection system is present that is able to increase this amount to 9,000 m^3/h.

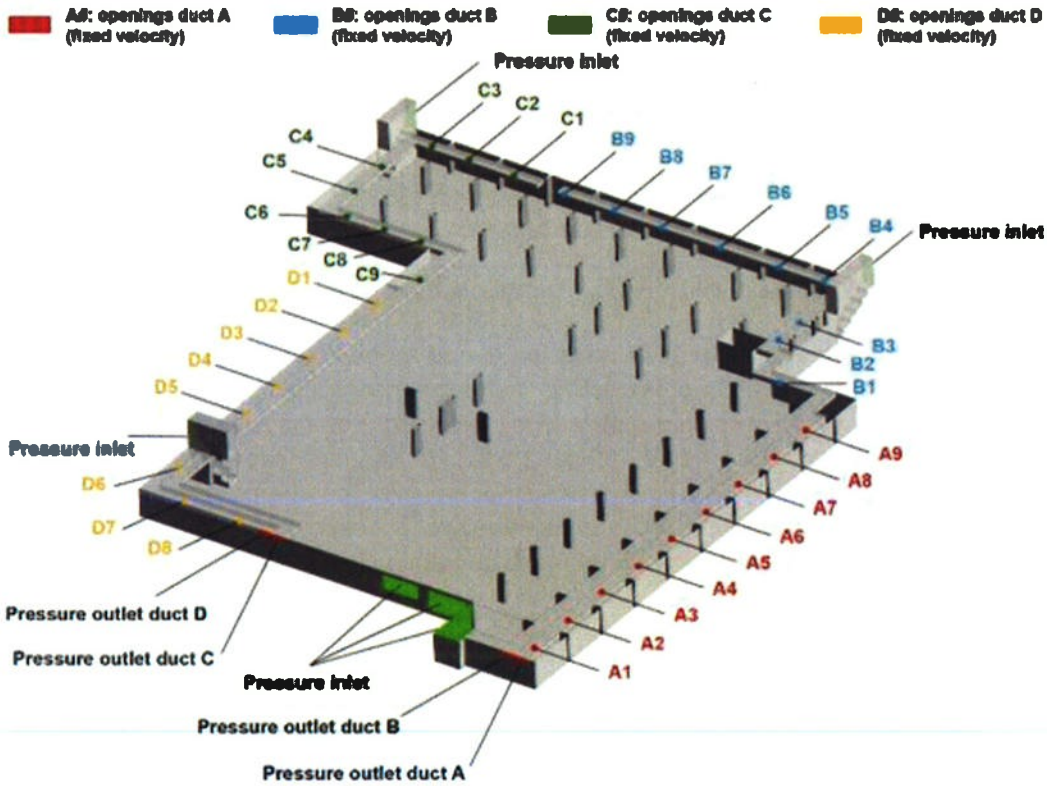


Figure 3: Boundary conditions for the parking garage in Weert (base case).

On-site measurements are performed to determine the volume flow rate at the duct openings (indicated in Figure 3). In this case it is found that there is a large difference between design (4,500 m^3/h) and practice. The measured total volume flow rates through duct A, B, C and D are 1,680, 2,372, 1,787 and 2,413 m^3/h respectively. Furthermore, the total volume flow rate is not evenly distributed over the inlet openings of each duct. Therefore, simulations are conducted using the actual measured volume flow rates (referred to as 'Simulation 1') at the openings and using 4,500 m^3/h per duct evenly distributed over the openings (referred to as 'Simulation 2') by assigning fixed velocities to the openings. More details regarding the measurements and corresponding boundary conditions can be found in Figure A-1 (appendices).

2.2.2 PM sources

PM_{10} and $PM_{2.5}$ transport are included in the model by means of a source term at the locations of the driving lanes with a height of 3 m (Figure 4). PM_{10} and $PM_{2.5}$ traffic emissions are

determined based on the procedure that is explained in Blocken et al. [3]. It involves assumptions regarding the number of vehicles moving through the garage in a day (in this case 300) and the number of kilometers driven inside of the garage during a day (in this case 40). Subsequently the total amount of PM_{10} and $PM_{2.5}$ emission (in grams) are calculated using the 'passenger cars' data presented in Table 1 as provided by Rijkswaterstaat [4].

Table 1: Total Emission burning fuel and mechanical wear [4].

CALCULATION DATA FOR 2016	Traffic in urban areas in 2013		City stagnant a) (g/km)		City normal b) (g/km)		City smooth c) (g/km)	
	milion km	%	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5
Total traffic	26561	100.0%	0.0461	0.0228	0.0423	0.0183	0.0414	0.0174
Passenger cars	20954	78.9%	0.0390	0.0184	0.0370	0.0158	0.0370	0.0158
Motorcycles	387	1.5%	0.0390	0.0184	0.0370	0.0158	0.0370	0.0158
Mopeds	1570	5.9%	0.0390	0.0184	0.0370	0.0158	0.0370	0.0158
Vans	2643	10.0%	0.0390	0.0184	0.0370	0.0158	0.0370	0.0158
Lorries	413	1.6%	0.2254	0.1234	0.1810	0.0790	0.1586	0.0566
Tractors	269	1.0%	0.2462	0.1512	0.1898	0.0948	0.1632	0.0682
Buses	248	0.9%	0.2048	0.1278	0.1498	0.0728	0.1250	0.0480
Special vehicles total								
- Light	22	0.1%	0.2254	0.1234	0.1810	0.0790	0.1586	0.0566
- Heavy	55	0.2%	0.2462	0.1512	0.1898	0.0948	0.1632	0.0682

It is assumed that the total amount of emission during a day is emitted in a time frame of 10 hours (due to the fact that most of the activity in the garages will be during day-time) and with this value the amount of emission per second is calculated. For this simulation this results in a PM_{10} and $PM_{2.5}$ source term of 1.19 10^{-11} and 5.62 10^{-12} kg/m^{3}s respectively (in a volume of 3,636 m^3). The source terms are uniformly distributed over the source volumes presented in Figure 4. Background PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations of respectively 25 and 13 µg/m^3 are assigned to the pressure inlets, which are based on data by the RIVM [5].

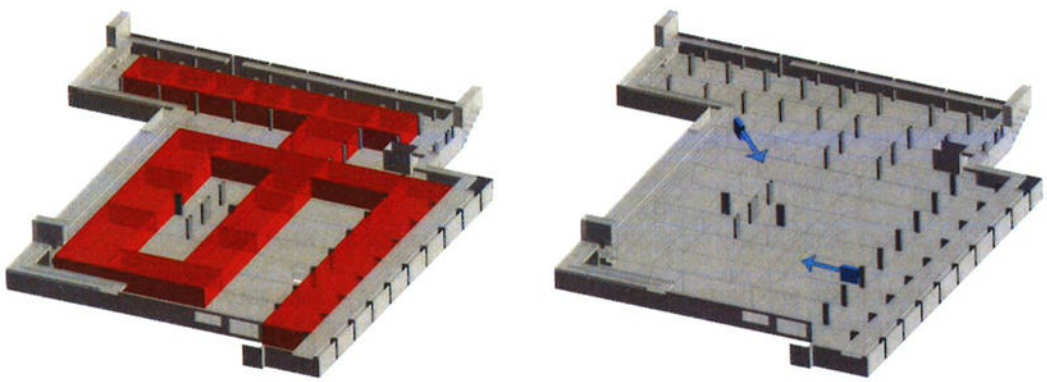


Figure 4: Location of the indoor PM source volumes at the driving lanes (red) and Aufero units (blue).

A sink term is assigned to the Aufero volume to remove pollutants from the domain. A PM_{10} and $PM_{2.5}$ removal efficiency of respectively 70% and 40% are assigned to both units. Both units are running at a volume flow rate of 8,000 m^3/h. The location and directionality of the units can be found in Figure 4.

A simplified PM dispersion modeling method is applied. This means that the particles are treated as a gas excluding aerosol dynamics (e.g. chemical formation, coagulation, condensation).

2.3 Computational grid

The computational (cut-cell) grid is presented in Figure 5. This is the computational grid that is used for the base-case (approximately 8.7 million cells). Subsequently a computational grid is created including two Aufero units, resulting in a grid of approximately 9.1 million cells. A minimum of 10 cells is applied along the edges of openings.

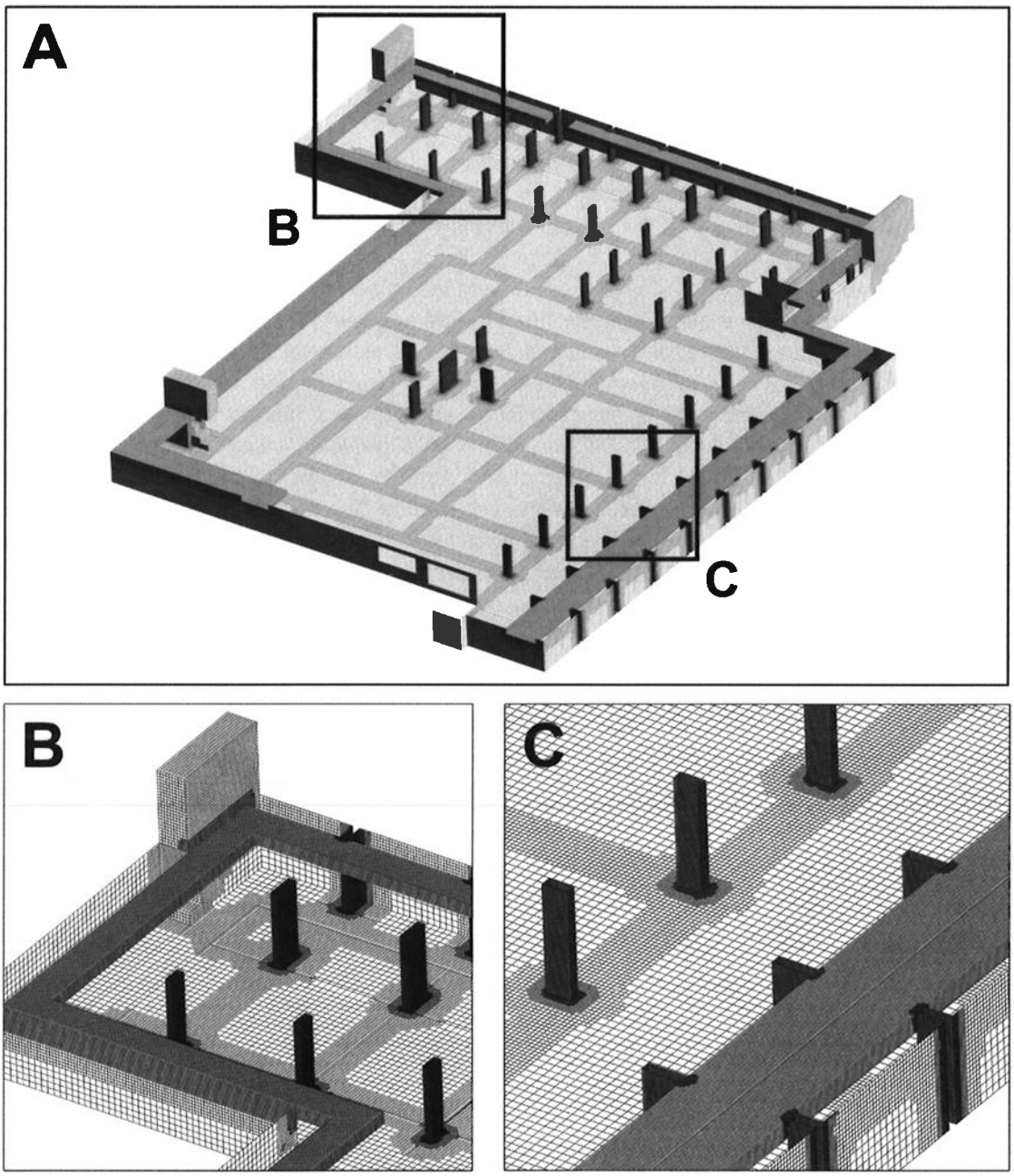


Figure 5: Cut-cell grid parking garage Weert used for the base-case simulation (8.7 million cells).

3 Results

3.1.1 Contour plot analysis

In this paragraph the simulation results are presented in the form of contour plots. PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentration reductions are assessed at garage mid-height (1.5 m) for two ventilation scenarios. Furthermore, velocity contour plots are presented for the case with and without Aufero units in order to visualize the flow field.

Figure 6 present the velocity contours for the situation without Aufero units at garage mid-height and in the ventilation ducts for simulation 1 and 2 respectively. Figure 6A presents the velocity contours for the situation using the measured volume flow rates at the duct openings. The velocities in the garage are relatively low. As a result, relatively high ambient PM concentrations can be found at locations where the amount of ventilation is low (Figure 7A). For simulation 2, presented in Figure 6B, the overall ventilation of the garage is significantly improved due to the increased volume flow rate in the ventilation ducts. As visible in Figure 7B this results in decreased ambient PM concentrations inside the garage. However, Figure 7 shows there is still a large area in which ambient PM concentrations are high. For this reason the Auferos are installed in the vicinity of this location. Figure 8 presents the velocity contours for simulation 1 and 2 including Aufero units. The impact of the Auferos on the ambient PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations is presented in Figure 9 and 10 respectively. The results indicate that significant reductions are achieved for the entire garage. Figure 10 shows that the effect of the two units is decreased when the amount of ventilation is increased. More details regarding the ambient PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations and reduction percentages for the different case studies are provided in Table 2-5.

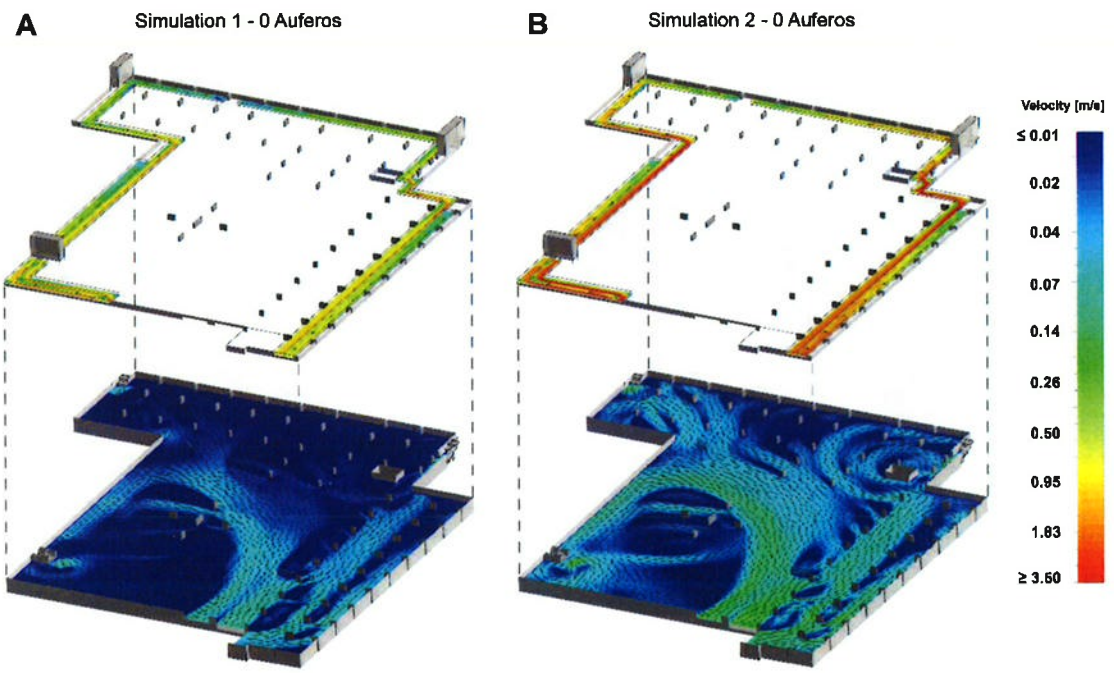


Figure 6: Velocity contour plot at garage mid-height and ventilation ducts for simulation 1 (A) and simulation 2 (B) without Aufero units. Simulation 1 - volume flow rate duct A = 1,680 m^3/h - duct B = 2,371 m^3/h - duct C = 1,787 m^3/h - duct D = 2,413 m^3/h. Simulation 2 - volume flow rate duct A = 4,500 m^3/h - duct B = 4,500 m^3/h - duct C = 4,500 m^3/h - duct D = 4,500 m^3/h.

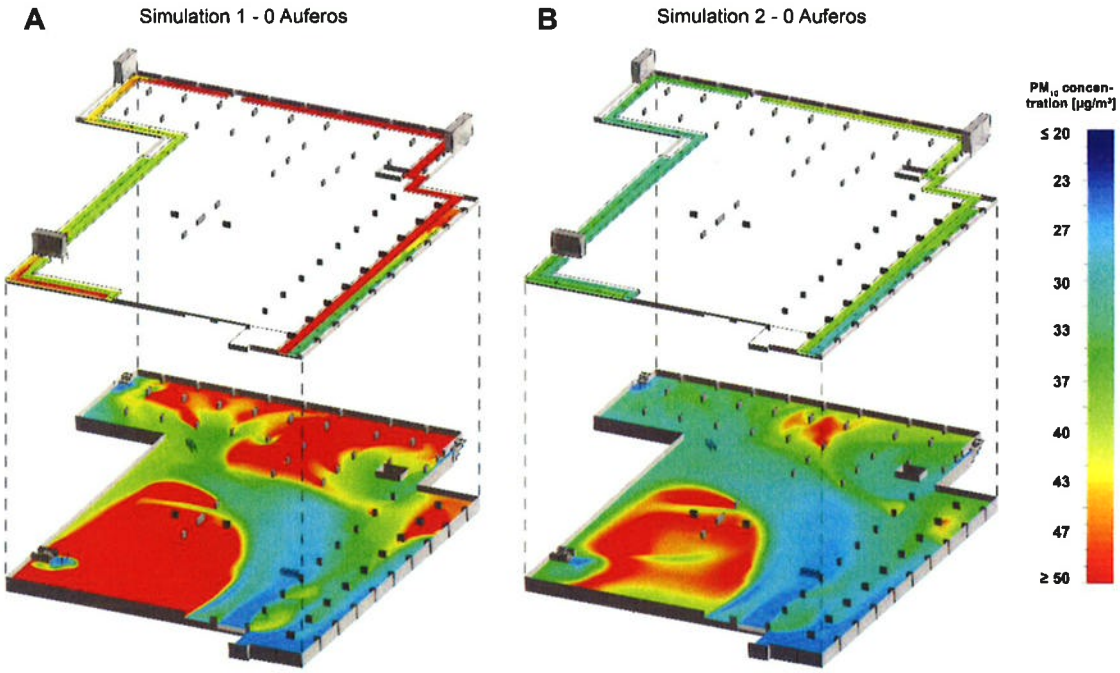


Figure 7: PM_{10} concentration contour plot at garage mid-height and ventilation ducts for simulation 1 (total garage ventilation 7,974 m^3/h) (A) and 2 (total garage ventilation 18,000 m^3/h) (B) without Aufero units.

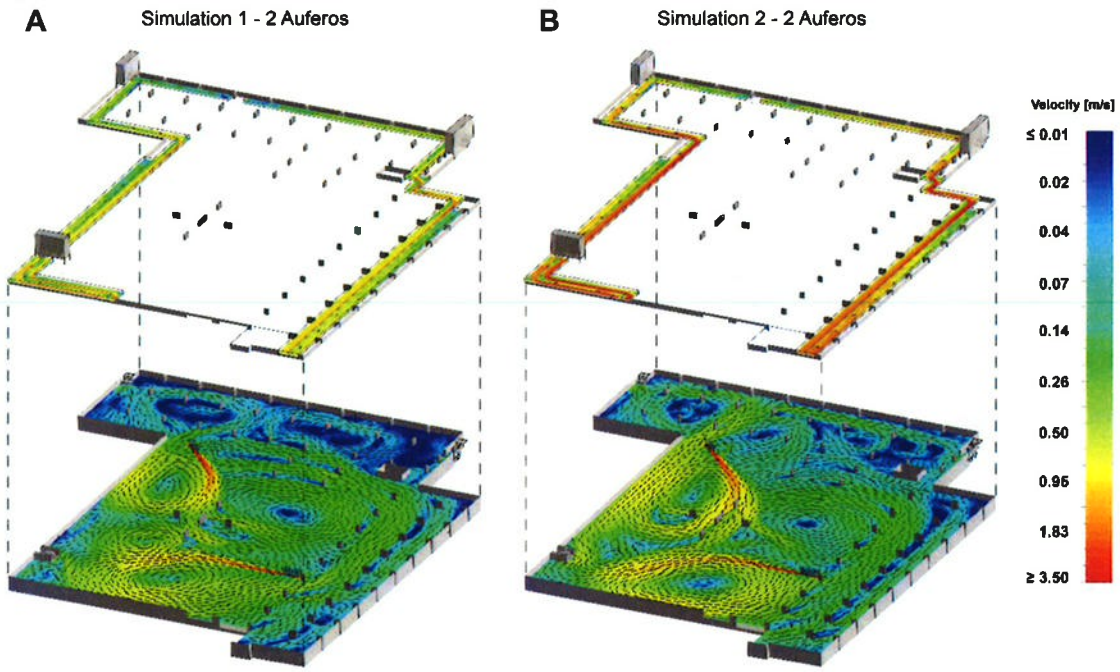


Figure 8: Velocity contour plot at garage mid-height and ventilation ducts for simulation 1 (A) and simulation 2 (B) with Aufero units. Simulation 1 - volume flow rate duct A = 1,680 m^3/h - duct B = 2,371 m^3/h - duct C = 1,787 m^3/h - duct D = 2,413 m^3/h. Simulation 2 - volume flow rate duct A = 4,500 m^3/h - duct B = 4,500 m^3/h - duct C = 4,500 m^3/h - duct D = 4,500 m^3/h.

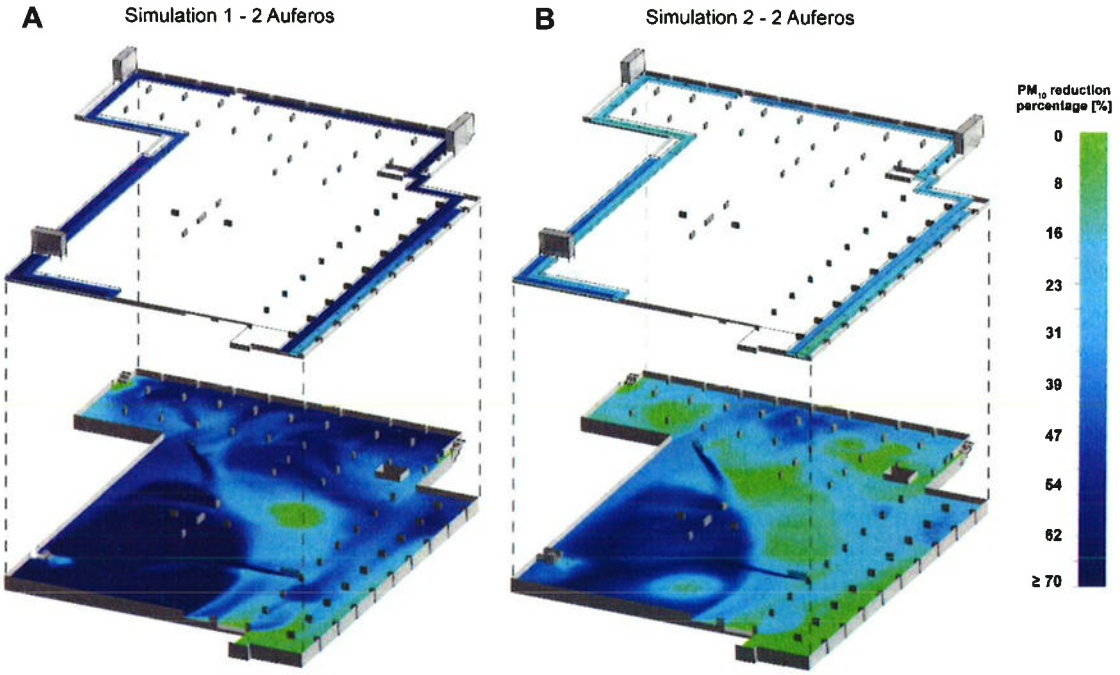


Figure 9: PM_{10} concentration reduction percentage contour plot at garage mid-height and ventilation ducts for simulation 1 (total garage ventilation 7,974 m^3/h) (A) and 2 (total garage ventilation 18,000 m^3/h) (B) including Aufero units.

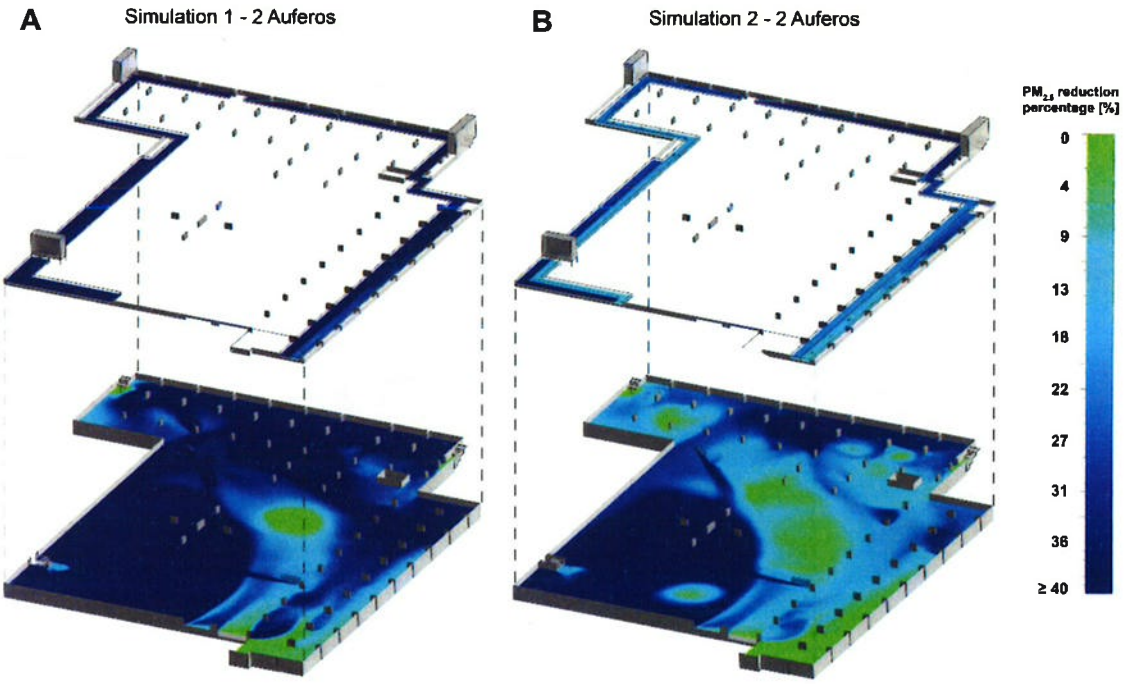


Figure 10: $PM_{2.5}$ concentration reduction percentage contour plot at garage mid-height and ventilation ducts for simulation 1 (total garage ventilation 7,974 m^3/h) (A) and 2 (total garage ventilation 18,000 m^3/h) (B) including Aufero units.

3.1.2 Quantitative analysis

Absolute PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations at the ventilation openings and in the garage as a whole are presented. Table 2 and 3 present the PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentration data at the in- and outflow openings. Table 4 presents the total garage emissions calculated from the volume flow rate and ambient PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations at the outflow openings (as indicated in Table 2 and 3). Table 5 presents the ambient PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentration data (and the reductions) inside the garage volume. The names of the locations for which the values are calculated correspond with the names given in Figure 2.

Table 2: Absolute PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations for the chosen set of boundary conditions at the parking garage openings and corresponding reduction percentages for Simulation 1. Green color indicates inflow and blue color and negative value indicates outflow through the openings.

	Simulation 1							
	0 Auferos			2 Auferos			Reduction [%]	
	PM_{10} [µg/m³]	$PM_{2.5}$ [µg/m³]	Volume flow [m³/h]	PM_{10} [µg/m³]	$PM_{2.5}$ [µg/m³]	Volume flow [m³/h]	PM_{10}	$PM_{2.5}$
Duct-A	32	16	-1,680	23	12	-1,680	29%	25%
Duct-B	50	26	-2,372	19	12	-2,372	61%	54%
Duct-C	39	20	-1,786	20	12	-1,786	50%	38%
Duct-D	48	24	-2,414	16	11	-2,414	67%	54%
Entrance-1	25	13	2,357	25	13	3,187	0%	0%
Entrance-2	25	13	526	25	13	1,348	0%	0%
Entrance-3	25	13	451	25	13	1,189	0%	0%
Entrance-4	25	13	863	17	11	-2,803	33%	15%
Window-1	25	13	1,478	25	13	1,349	0%	0%
Window-2	25	13	2,299	25	13	4,166	0%	0%

** Absolute concentrations and mass flow highly dependent on chosen set of boundary conditions (sources etc.)*

Table 3: Absolute PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations for the chosen set of boundary conditions at the parking garage openings and corresponding reduction percentages for Simulation 2. Green color indicates inflow and blue color and negative value indicates outflow through the openings.

	Simulation 2							
	0 Auferos			2 Auferos			Reduction [%]	
	PM_{10} [µg/m³]	$PM_{2.5}$ [µg/m³]	Volume flow [m³/h]	PM_{10} [µg/m³]	$PM_{2.5}$ [µg/m³]	Volume flow [m³/h]	PM_{10}	$PM_{2.5}$
Duct-A	29	15	-4,500	25	13	-4,500	12%	11%
Duct-B	38	19	-4,500	24	15	-4,500	36%	22%
Duct-C	32	16	-4,500	24	14	-4,500	25%	13%
Duct-D	36	18	-4,500	20	11	-4,500	46%	41%
Entrance-1	25	13	5,970	25	13	8,132	0%	0%
Entrance-2	25	13	1,253	25	13	2,187	0%	0%
Entrance-3	25	13	1,086	25	13	1,881	0%	0%
Entrance-4	25	13	1,962	19	11	-2,478	22%	17%
Window-1	25	13	3,259	25	13	2,164	0%	0%
Window-2	25	13	5,097	25	13	6,473	0%	0%

** Absolute concentrations and mass flow highly dependent on chosen set of boundary conditions (sources etc.)*

Table 4: Total PM_{10} and $PM_{2.5}$ garage emissions and corresponding reduction percentages for the cases including Auferos for Simulation 1 and 2.

	Total garage emission [µg/h]				Reduction [%]	
	0 Auferos		2 Auferos			
	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$
Simulation 1	357,723	180,833	204,148	127,678	43%	29%
Simulation 2	605,327	307,641	466,728	264,084	23%	14%

** Absolute concentrations and mass flow highly dependent on chosen set of boundary conditions (sources etc.)*

Table 5: Volume averaged absolute PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations in the garage and corresponding reduction percentages for the cases including Auferos.

			# Auferos		Reduction [%]
			0	2	
Volume averaged garage concentration [µg/m³]	Simulation 1	PM_{10}	44.6	20.8	53%
		$PM_{2.5}$	22.7	12.2	46%
	Simulation 2	PM_{10}	35.5	24.3	32%
		$PM_{2.5}$	17.9	12.8	28%

The contour plots in the previous paragraph show that significant PM_{10} and $PM_{2.5}$ reductions can be obtained inside of the garage. Table 5 shows that when considering the ventilation scenario as measured in practice (Simulation 1), the total PM_{10} and $PM_{2.5}$ reductions (averaged over the whole garage volume) are 53% and 46% respectively. For the case with the increased amount of ventilation (Simulation 2), these reduction percentages are slightly reduced (32% and 28% for PM_{10} and $PM_{2.5}$, respectively).

Besides lowering the PM concentrations inside the parking garage, making the garage healthier to reside in, the Auferos have another advantage. As visible in Table 2, 3 and 4, the amount of PM_{10} and $PM_{2.5}$ that is emitted from the garage to the surroundings is reduced. For the case of Simulation 1 the amount of PM_{10} and $PM_{2.5}$ exhausted from the garage is reduced by 43% and 29%, respectively (Table 4).

4 Discussion

A CFD study is conducted to assess the potential purification ability of the Aufero units as applied in the Walburgpassage parking garage in Weert. PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentration reductions are assessed at garage mid-height (1.5 m) for two ventilation scenarios. A comparison is made between the different cases. Before the conclusions are listed, important limitations and remarks regarding the study are reported below:

- Modeling of PM source terms in the garage is based on several assumptions. More detailed data is required to be able to model the exact amount of pollutants in the computational domain (e.g. more detailed traffic intensity data).
- Steady RANS simulations are used while the flow of traffic in a garage during a day is dynamic. All the available source term data (in kg/m^3day) are calculated towards this steady simulation (in kg/m^3s) by distributing the emissions over 10 hours. This means that only one situation is modeled instead of the dynamic situation during the day. For example during rush hours it is expected that local PM concentrations will be higher.
- To reduce complexity to a certain extent in the model to make it feasible to be used, source terms are uniformly distributed over the source volumes. However it can be expected that certain regions of the parking garage are used more intensively than others.
- Generally the behavior of the flow inside a garage can be highly transient, however, movement inside of the parking garage is not taken into account (e.g. moving cars and pedestrians) and the current study therefore represents a highly simplified case. When the movement of cars is included, the amount of mixing is increased and this will affect the results.
- Obstacles in the garage such as cars are not taken into account. The presence of cars can influence the flow inside the garage. When occupancy of the garage has to be taken into account the case study becomes rather difficult to define with respect to geometry and boundary conditions.
- To reduce computational costs wind effects in the urban surrounding of the garage are not taken into account. It is assumed that for this case the wind velocity is zero. This choice can be justified due to the fact that the garage (including entrances) is located in a region where there is a high amount of shielding by surrounding buildings.
- Current simulations are performed with a PM_{10} and $PM_{2.5}$ removal efficiency of respectively 70% and 40% at a volume flow rate of 8,000 m^3/h (per unit). It can be expected that the same efficiency is achieved at a volume flow rate of 9,000 m^3/h. This would result in a performance improvement of approximately 10% from what is currently modeled.

The previously discussed limitations of the study will have an effect on the distribution of ambient PM concentrations inside the garage. However, for comparison of the base-case with the case including Auferos, this is not an issue. Boundary conditions are identical in both cases and therefore it is possible to provide a relative comparison of results in the form of PM_{10} and $PM_{2.5}$ reduction percentages.

5 Conclusion

The results of the study show that there is a significant decrease in PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations inside the parking garage. This also means that ambient PM concentrations are reduced around the parking garage since air is exhausted into the urban surroundings.

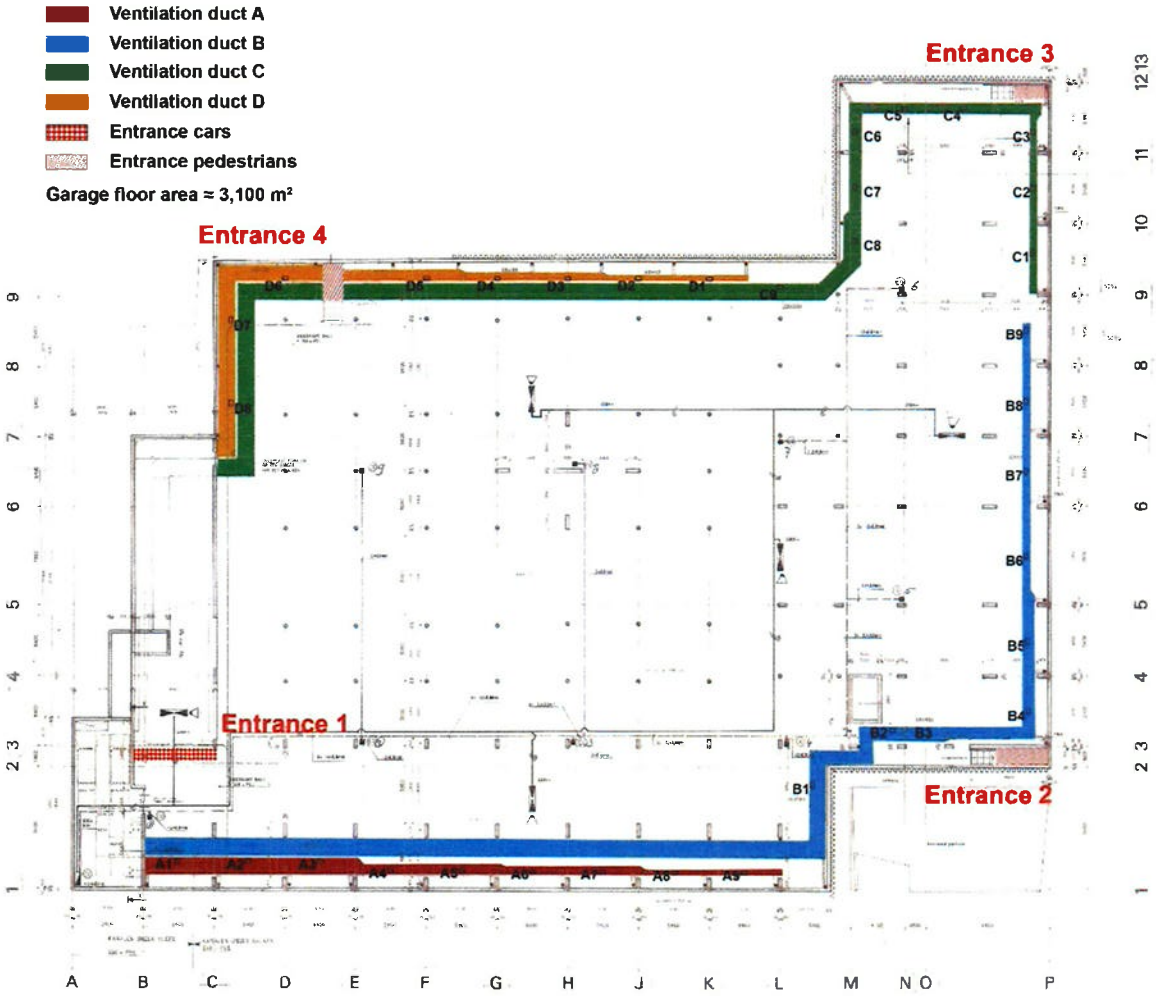
For the case with ventilation conditions as found in practice (see Figure 1-A, appendices), an average PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentration reduction of 53% and 46% is found inside the garage. The total amount of PM_{10} and $PM_{2.5}$ that is emitted from the parking garage to the surroundings is reduced by 43% and 29% respectively. For the case with ventilation conditions as specified in the design (4,500 m^3/h per duct equally divided over the openings), an average PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentration reduction of 32% and 28% is found inside the garage. The total amount of PM_{10} and $PM_{2.5}$ that is emitted from the parking garage to the surroundings is reduced by 23% and 14% respectively in that case.

Results show that the placement of one additional units would have been ideal for this specific situation. However it should be noted that with two units, PM reductions are already significant.

6 Literature

[1] Shih, T.H., Liou, W.M., Shabbir, A., Zhu, J. (1995). A new k-ε turbulence model for high Reynolds number turbulent flows – model development and validation, Comput. Fluids, 24, pp. 227-238.
[2] Launder, B.E., Spalding, D.B. (1974). The numerical computation of turbulent flows, Comput. Method. App. M., 3, pp. 269-289.
[3] Blocken B., Vervoort R., van Hooff T. (2016). Reduction of outdoor particulate matter concentrations by local removal in semi-enclosed parking garages: a preliminary case study for Eindhoven city center, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 159, pp. 80-98.
[4] Rijkswaterstaat (2015). Emissiefactoren voor niet-snelwegen. https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/luchtkwaliteit
[5] RIVM (2016). Grootschalige concentratie- en depositiekaarten Nederland (GCN en GDN). http://geodata.rivm.nl/gcn/

7 Appendices



Duct	Grille	Location	V [m³/h] meas. 1	V [m³/h] meas. 2	V [m³/h] meas. 3	Avg. V [m³/h] meas. 1-3	V [m³/h] duct	V [m³/h] fan
A	1	A1	42	42	43	42		
A	2	A2	96	92	109	99		
A	3	A3	130	120	123	124		
A	4	A4	172	179	182	178		
A	5	A5	237	219	218	225	1680	
A	6	A6	143	132	140	138		
A	7	A7	269	235	271	258		
A	8	A8	375	382	391	383		
A	9	A9	241	231	226	233		4052
B	1	B1	820	849	813	827		
B	2	B2	117	108	99	108		
B	3	B3	125	118	125	123		
B	4	B4	336	331	349	339		
B	5	B5	102	85	93	93	2372	
B	6	B6	224	240	237	234		
B	7	B7	358	367	338	354		
B	8	B8	244	226	238	236		
B	9	B9	56	60	57	58		
C	1	C1	132	119	125	125		
C	2	C2	130	135	132	132		
C	3	C3	170	170	163	168		
C	4	C4	307	319	330	319		
C	5	C5	27	41	27	32	1786	
C	6	C6	105	89	92	95		
C	7	C7	394	397	390	394		
C	8	C8	410	406	390	402		
C	9	C9	122	122	115	120		4200
D	1	D1	234	250	228	237		
D	2	D2	60	49	51	53		
D	3	D3	520	522	505	516		
D	4	D4	162	148	139	150	2414	
D	5	D5	690	652	720	687		
D	6	D6	447	439	423	436		
D	7	D7	175	183	192	183		
D	8	D8	165	142	145	151		
						Total V [m³/h]	8252	
						[m³/hm²] =	2.66	

Figure A-1: Volume flow measurement results parking garage Walburgpassage Weert.