

Vraaggestuurde ventilatie op basis van buitenluchtkwaliteit

Kenneth Moyaert

Studentennummer: 01509814

Promotor: prof. dr. ir.-arch. Jelle Laverge

Begeleiders: dr. ir.-arch. Marc Delghust, ir.-arch. Klaas De Jonge, Sarah Lima
Paralovo

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master of Science in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Academiejaar 2018-2019

Vraaggestuurde ventilatie op basis van buitenluchtkwaliteit

Kenneth Moyaert

Studentennummer: 01509814

Promotor: prof. dr. ir.-arch. Jelle Laverge

Begeleiders: dr. ir.-arch. Marc Delghust, ir.-arch. Klaas De Jonge, Sarah Lima
Paralovo

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master of Science in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Academiejaar 2018-2019

WOORD VOORAF

Vooraleer van start te gaan met dit verslag wil ik eerst en vooral verschillende mensen bedanken die bijgedragen hebben in deze masterproef tot wat deze nu geworden is.

Als eerste mijn oprechte dank aan mijn promotor prof. dr. ir.-arch. Jelle Laverge. Hij zorgde ervoor dat ik geïntroduceerd werd in dit thema en leverde mij de verschillende benodigdheden om van start te kunnen gaan met dit onderzoek. Vervolgens stond hij mij ook doorheen het volledige jaar bij met adviezen en antwoorden op mijn vragen.

Daarnaast wil ik ook ir.-arch. Klaas De Jonge bedanken om zijn hulp bij het uitwerken van het onderzoek en verslag. Één of twee keer per maand werd een afspraak gemaakt gedurende het tweede semester voor het bespreken van de vooruitgangen en de doelstellingen op korte termijn. Hiervoor wil ik hem bedanken.

Ten slotte nog een speciaal woord van dank aan mijn mama Ria, nonkel Guido, Brigitte, kleine broer Kenny en mijn vriendin Febe. Zonder hun steun en hulp was het niet mogelijk geweest om deze masterproef tot een goed einde te brengen.

"De auteur geeft de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de bepalingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze masterproef."

"The author gives permission to make this master dissertation available for consultation and to copy parts of this master dissertation for personal use. In all cases of other use, the copyright terms have to be respected, in particular with regard to the obligation to state explicitly the source when quoting results from this master dissertation."

31 mei 2019, Moyaert Kenneth

Sturing van vraaggestuurde ventilatie op basis van buitenluchtkwaliteit

door

Kenneth Moyaert

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van Master of Science in de
industriële wetenschappen: bouwkunde

Promotor: Prof. dr. ir.-arch. Jelle Laverge

Begeleiders: Ir.-arch. Klaas De Jonge, dr. ir.-arch. Marc Delghust, Sarah Lima Paralovo

Vakgroep: Architectuur en Stedenbouw

Voorzitter: Prof. Dr. Ir. Arnold Janssens

Onderzoeksgroep: Bouwfysica

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur

Academiejaar 2018 – 2019

ABSTRACT

Deze masterproef heeft als doel een sturing op te stellen van een ventilatiesysteem waarbij rekening gehouden wordt met de kwaliteit van de buitenlucht. De kwaliteit van de buitenlucht wordt door middel van de concentraties van buitenluchtpolluenten NO_2 , O_3 , $\text{PM}_{2.5}$ en PM_{10} begroot. Deze data worden verkregen via het bedrijf Nazka Mapps voor de locaties Antwerpen, Binkom, Brugge, Hever en Houthalen-Helchteren. Hierdoor is het mogelijk om tijdens dit onderzoek het verschil in de verschillende locaties mee in beschouwing te nemen.

Om eerst een vooral kennis te maken met het thema waarin dit onderzoek zich bevindt, wordt er gestart met een uitgebreide literatuurstudie waarin verschillende polluenten in de lucht onderscheiden worden, samen met normeringen, reglementeringen en beoordelingsmethodes van de binnenlucht en het ventilatiesysteem.

Vervolgens wordt er overgegaan naar het onderzoek zelf. Er zullen voor dit onderzoek drie sturingen opgebouwd worden in het simulatieprogramma contam. De eerste sturing baseert zich op de vier buitenluchtpolluenten NO_2 , O_3 , $\text{PM}_{2.5}$ en PM_{10} terwijl de tweede sturing zich enkel en alleen zal baseren op het meest nadelige polluent van de vier voor onze gezondheid, namelijk $\text{PM}_{2.5}$. Als laatste zal er ook een derde sturing opgebouwd worden die zorgt voor een uitbreiding van een traditionele systeem waarbij een extra controle uitgevoerd wordt op de buitenluchtkwaliteit. Deze verschillende sturingen worden voor de verschillende locaties gesimuleerd waarna ze kunnen geëvalueerd worden op basis van drie criteria, namelijk gezondheid, comfort en energie. Hiernaast wordt er in dit onderzoek ook aandacht besteed aan het gebruik van filters in deze systemen

Uit de beoordeling van de drie evaluatiecriteria per sturing zonder filters kan besloten worden dat de derde sturing, die een uitbreiding vormt van de traditionele sturing met de controle van de buitenluchtkwaliteit, de beste resultaten oplevert. Bij deze sturing, maar ook bij de andere, worden hoge CO_2 -concentraties opgemerkt. In een optimalisatie van deze sturing worden deze hoge concentraties weggewerkt ten koste van de vooruitgang op het vak gezondheid. Tot slot tonen de resultaten van de sturingen met filters dat het gebruik van een vraaggestuurde sturing, die rekening houdt met de buitenluchtkwaliteit, niet meer rendabel is indien gebruik gemaakt wordt van filters.

Trefwoorden: Ventilatiesysteem, buitenluchtkwaliteit, binnenluchtkwaliteit, Contam, luchtfilters

Outdoor air quality based demand controlled ventilation

Kenneth Moyaert

Supervisor: Prof. dr. ir.-arch. Jelle Laverge

Abstract- The aim of this thesis is to set up a ventilation system that takes into account the quality of the outside air. The quality of the outside air is estimated by the concentration of outside pollutant NO₂, O₃, PM2.5 and PM10 obtained through the Nazka Mapps company for the locations Antwerp, Binkom Bruges, Hever and Houthalen-Helchteren. Three ventilation systems D with and without filters will be built up in the simulation program Contam and assessed on three evaluation criteria: health, comfort and energy consumption. Based on these assessments it will be possible to select the best system of the three, check which influence the location does have and conclude what effect the use of the filters has on these systems.

Keywords- Indoor and outdoor air quality, contam

I. INTRODUCTION

Today a ventilation system has become a standard element in the construction of new buildings. This is due on the one hand to different laws, such as the EPB regulations, which make the installation of a ventilation system compulsory. On the other hand, such a system has become necessary for the exchange of fresh air in buildings that are more and more airtight

Originally ventilation systems were systems that ensure a continuous ventilation flow in every room. These systems are accompanied by the consumption of high amounts of energy. This energy consumption can be greatly reduced by using a demand-driven ventilation system. To determine the ventilation flows in each room, such systems rely on a few basic components in the indoor air, mainly CO₂ content and moisture in the damp rooms and, to a lesser extent, VOC in the bathrooms.

These demand-driven systems do not yet take into account whether or not the outside air quality is good or bad. In this research, an attempt will be made to take this outside air quality into account and it will be examined what the consequences are for the indoor air quality.

II. LITERATURE

A. Description of air

The air we breathe in day after day consists not only of oxygen and CO₂, as most people think, but also of many other elements. Air can be subdivided into four components, namely dry pure atmospheric air, water vapor, pollution and particles. The dry, pure atmospheric air is composed of various gaseous substances of which oxygen and CO₂ are the best known. Pollutants are substances that are either present in the air but they do not have to be present here (pollution) or are present in too high concentrations. The presence of

pollutants in the air has a negative impact on human, animal and nature health. There are many different types of pollutants present in the air but the ones covered in this study are CO₂, NO₂, O₃, PM2.5 and PM10.

B. Air quality assessment

The air can be assessed in various ways. The first way is by using proposed standards such as “het binnenmilieubesluit” or the guidelines of the WHO. These documents contain guide and intervention values for a large number of pollutants. For the pollutants that are important in this study, the values are shown in Table 1. They will be used as limit values in the ventilation systems.

Table 1: Guide and intervention values [1,2]

Pollutant	Guide value ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Intervention value ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Source
NO ₂	20	40	Binnenmilieu- besluit
O ₃	40	78	Binnenmilieu- besluit
PM2.5	10	25	WHO
PM10	20	50	WHO

Another way to assess the air is by calculating the amount of Disability-Adjusted Life Years (DALY). This is a general calculation method that attempts to bring together the total burden of disease into one specific value. To make this calculation easily applicable, it is converted into a “Unit Damage Estimate” value (UDE-value). This value represents the number of DALY’s per unit of concentration to which a person is exposed to (table 2).

Table 2: UDE-values

Pollutant	UDE-value
	$\frac{\text{DALY}}{100000 \text{ personen} \cdot \text{jaar}} \cdot \frac{\text{m}^3}{\mu\text{g}}$
NO ₂	6,79
O ₃	0,26
PM2.5	83,01
PM10	5,86

The last way to assess the air is by the use of an existing classification system such as the Aircheckr AQI for the outside air quality. This classification is based on the concentrations of the four pollutants NO₂, O₃, PM_{2.5} and PM₁₀. There are 11 classes from extremely bad to excellent (table 3). It will be used to qualify the outside air.

Table 3: Classification aircheckr AQI

NO ₂	O ₃	PM ₁₀	PM _{2.5}	aircheckr hourly AQI	
hourly µg/m ³	hourly µg/m ³	hourly µg/m ³	hourly µg/m ³	# of classes	11
0-10	0-15	0-10	0-10	10	Excellent
10-20	15-30	10-20	10-15	9	Good
20-30	30-40	20-30	15-20	8	Quite good
30-45	40-60	30-45	20-30	7	Acceptable
45-60	60-80	45-60	30-40	6	Moderate
60-75	80-100	60-75	40-50	5	Insufficient
75-100	100-140	75-100	50-70	4	Rather poor
100-125	140-180	100-125	70-90	3	Poor
125-150	180-200	125-150	90-100	2	Bad
150-200	200-240	150-200	100-140	1	Very bad
>200	>240	>200	>140	0	Extremely bad

III. EVALUATION CRITERIA

In order to evaluate the inside air quality of the various built-up ventilation systems in an unambiguous manner, three evaluation criteria are drawn up, namely health, comfort and energy consumption

A. Health

The amount of DALY's will be used to evaluate the effect on the health of a ventilation system. The main objective of this study is to find a ventilation system that creates a healthier indoor air. This means that the concentrations of the four outside air pollutants must be kept below the intervention values and ideally also below the guide values. As a result, the number of DALY's of each pollutant is only calculated from the moment that the indoor concentrations become higher than the guide values. This is and the target value of the pollutant. This value is then multiplied by the UDE-values. This results in the amount of DALY's caused by the concentrations on top of the guide value.

B. Comfort

Which ventilation system provides more or less comfort in the home is estimated by means of the CO₂- and H₂O-concentrations in the building. The concentrations of these substances may not exceed specified values. If this does happen, it can lead to complaints and therefore to a decrease in comfort in this home. The limit value for CO₂ is 1200 ppm (for longer periods) and 1500 ppm for short periods. For H₂O this is a relative humidity of 70%.

C. Energy consumption

The third and final aspect on which the various controls will be assessed and compared with each other is energy consumption. It is self-evident that when ventilation at the nominal flow rate is almost continuous, the system will score better on comfort parameters than when ventilation is only performed at one-tenth of the nominal flow rate. This doesn't automatically lead to better air quality in the home. The energetic aspect of the control will be estimated by taking the summation of the average of the ventilation flows per room in which air is supplied. This makes it possible to make a comparison between the different controls, which control requires more or less energy than the others.

IV. DATA OUTDOOR QUALITY

The company Aircheckr provided the outdoor air concentrations of the pollutants NO₂, CO₂, PM_{2.5} and PM₁₀ from 11 September 2017 to 8 April 2018 for the locations Antwerp, Binkom, Bruges, Hever and Houthalen-Helchteren.

A. Antwerp

The first location is in the centre of the city Antwerp. The busy traffic in this city leads to very high NO₂-concentrations together with higher PM_{2.5}- and PM₁₀-concentrations as a result of the high density of the buildings. On the other hand, there are low concentrations of ozone. This is due to the fact that ozone is broken down by NO that is also emitted by traffic.

B. Binkom

The second location is on a rural road in the municipality of Binkom. Here the concentrations are opposite in comparison with the city of Antwerp, mainly due to the lack of traffic and the low density of the buildings. High O₃-concentrations are present at this location together with low NO₂-, PM_{2.5}- and PM₁₀-concentrations. It should be noted, that the low values for PM_{2.5} and PM₁₀ will be increasing due to the agricultural activities that will take place in this area during spring.

C. Bruges

The third location is located in the city of Bruges. Just like the city of Antwerp, this location has higher PM_{2.5}- and PM₁₀-concentrations. The presence of less traffic ensures lower NO₂- and higher O₃-values than the location Antwerp.

D. Hever

The fourth location is located in the village of Hever. This location has a moderate outside air climate with low values for PM₁₀, PM_{2.5} and NO₂ compared to the other locations. The relatively low NO₂-concentrations can be attributed to the rural village character of the location where busy traffic is unknown. Due to the absence of this traffic, the emission of NO in this environment is also relatively low, which means that ozone is little degraded. As a result, the ozone concentrations are on the slightly higher side, as was the case with the strongly rural location of Binkom. The low values for PM_{2.5} and PM₁₀ can be caused by the low density of the buildings. Another reason is, that during the studied period, the agricultural activities were restricted.

E. Houthalen-Helchteren

The fifth and final location is a busy traffic road in Houthalen-Helchteren. This location has a similar situation as the other ones. In terms of ozone, the values are lower than most others, in contrast to the pollutant NO_2 where the average concentration is higher. The reasons for these concentrations of NO_2 and O_3 are identical to those discussed at the previous locations. The high NO_2 -values are due to the busy traffic at the location, which also leads to low O_3 -values due to the degradation under the influence of NO . The slightly higher average values for the particulate matter components for this location in comparison with Binkom and Hever can probably be attributed to traffic in combination with industrial activities.

When the outside air quality of these locations is assessed according to the Aircheckr classification system, the classification in table 4 is obtained.

Table 4: Classification of the locations according to Aircheckr

Location	Outside air quality
Antwerp	Quite good
Binkom	Good
Bruges	Quite good
Hever	Good
Houthalen-Helchteren	Quite good

V. SIMULATION MODEL

During this investigation, the various ventilation systems and their simulations are performed in the Contam simulation program. This is a simulation program for indoor air quality and ventilation in which data on air flows, pollution concentrations and personal exposures of people can be obtained. The simulation in the contam program has been applied to a single-floor home in which nine different spaces have been created, including four spaces with supply, four spaces with discharge and 1 space with passage of air.

Sensors are provided in the rooms to measure the concentrations of the various substances in the air. In addition, sources of CO_2 and H_2O have been placed in the building, which ensures the release of these substances from the air, together with various flow openings between the different rooms themselves and the outside environment.

To ensure that the pollutants emissions (CO_2 and H_2O) are taken into account, this study considers two adults together with two children, one of them stays at home almost all day and the other goes to work or to school.

The last important element during this research is the addition of the outside air pollutants in the model. This is done by creating these substances, using the substance properties present in table 5.

Table 5: pollutant properties [4,5]

NO_2	
Molecular weight	46,005 kg/kmol
specific heat	0,8066 kJ/KgK
default concentration	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
O_3	
Molecular weight	47,997 kg/kmol
specific heat	0,8042 kJ/KgK
default concentration	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM2.5	
Mean diameter	2 μm
Decay Rate	0,39 1/s
default concentration	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM10	
Mean diameter	9 μm
Decay Rate	0,65 1/s
default concentration	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

In the contam program, it is possible to place filters in the ventilation. Filters ensure the partial removal of specific pollutants from the air. In this study, only the filters in the supply channels are important because of their impact on the indoor climate. The filter that is added in the model is a particle filter of the MERV12 type. For a specific filter of this type, it is possible to enter the filter efficiency as a function of each particle size in contam. The major problem here is the fact that the pollutants PM2.5 and PM10 can only be assigned a single particle size in contam, while they comprise all particles with a particle size smaller than 2.5 and 10 μm respectively. By using an average particle size, the filters in the model according to the MERV12 type will have a minimum filter efficiency of 80% for the PM2.5 particles and at least 90% for the PM10 particles. This method is a major simplification of reality and will therefore certainly have an influence on the results of the research in which the filters are discussed.

VI. DIFFERENT VENTILATION SYSTEMS

Three different types of ventilation systems are built in contam for this research. The three controls are:

1. Traditional ventilation system based on H_2O and CO_2
2. Ventilation system only based on the outside air quality
3. Traditional ventilation system based on H_2O and CO_2 with an additional check of the outside air quality

A. Traditional ventilation system based on H_2O and CO_2

This system 1 serves mainly as a reference system to determine whether the other two controls ensure an improvement in indoor air quality or not. It is a control that is based on the H_2O -concentrations in the spaces for air extraction and on the CO_2 -concentrations in the spaces for air supply. The ventilation rate increase with the concentration of CO_2 or H_2O , depending on the type of room. The lower and upper limits for both substances and the ventilation rate are in Table 6.

Table 6: Limit values H₂O, CO₂ and ventilation rate

	H ₂ O	CO ₂
Lower limit value	0,35%	350 ppm
Upper limit value	0,70%	950 ppm
Maximum ventilation rate	nominal flow rate	
Minimum ventilation rate	0,1 nominal flow rate	

B. Ventilation system only based on the outside air quality

This second control will be a major change to the traditional model. The system will not be based on the H₂O and CO₂ concentrations indoors but on the outside air pollutants. In order to be able to assess the concentrations of the four pollutants in the open air, the target and intervention values are used of “het binnenmilieubesluit” for NO₂ and O₃, and the WHO guideline, for PM_{2.5} and PM₁₀. Two types are being designed for this third system. The first type is a control based on all four outdoor air pollutants (system 2A), whereby the minimum flow is taken from the four elements. The second type only relies on PM_{2.5} (system 2B). In each system, the ventilation rate decreases with the increase in the concentrations of the selected pollutants. The lower and upper limits of the pollutants are in Table 55, the maximum and minimum ventilation rate stays the same as in system 1.

C. Traditional ventilation system based on H₂O and CO₂ with an additional check of the outside air quality

The third control is almost identical to the first control with the only difference that a check is made of the outside air concentrations of the four pollutants (NO₂, O₃, PM_{2.5} and PM₁₀). Based on the intervention value of ‘het binnenmilieubesluit’ and the WHO guideline, a check will show if the ventilation flow, obtained from the traditional control, must be adjusted to the minimum flow or if it may be maintained. The ventilation flow rate drops to the minimum flow rate from the moment that the outside concentration of one or several pollutants exceeds the intervention value. If this is not the case, the ventilation flow from the traditional control is retained.

D. Previous ventilation systems with filter

By using the filter in the ventilation system, the target and intervention values for PM_{2.5} and PM₁₀ can be changed. The traditional values of these pollutants are increased by the efficiency which the filters can remove these two pollutants from the air, namely 80% for PM_{2.5} and 90% for PM₁₀. The values obtained here are included in Table together with the other target and intervention values used by the other pollutants. By changing these values, the operation of this control is changed and it becomes interesting to see what the consequences are.

Table 7: Guide and intervention values systems with filters [1,2]

Pollutant	Guide value (µg/m ³)	Intervention value (µg/m ³)
NO ₂	20	40
O ₃	40	78
PM _{2.5}	18	45
PM ₁₀	38	95

VII. RESULTS

A. Comparison between the ventilation systems

Ventilation system only based on the four air pollutants NO₂, O₃, PM_{2.5} and PM₁₀ (System 2A)

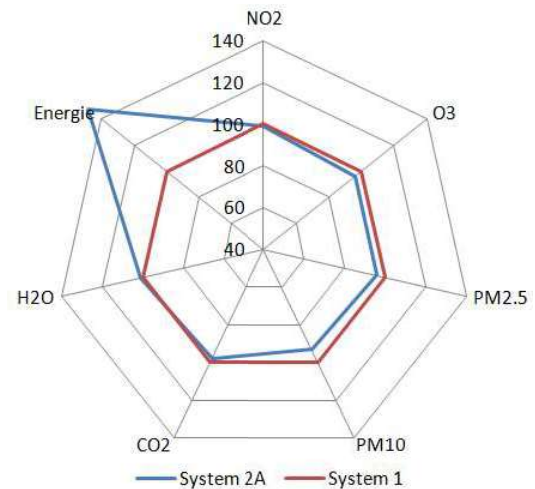


Figure 1: Results evaluation criteria [%], System 2A, Binkom

This ventilation system is characterized in figure 1 by one criterion that scores poorly, namely energy consumption. Incidentally, this system does better in all areas of the health criteria. The comfort parameters are similar to those of control 1, but have a larger number of high peaks, mainly in the CO₂-concentrations and, to a lesser extent, at the H₂O-concentrations

Ventilation system only based on the pollutant PM_{2.5} (System 2B)

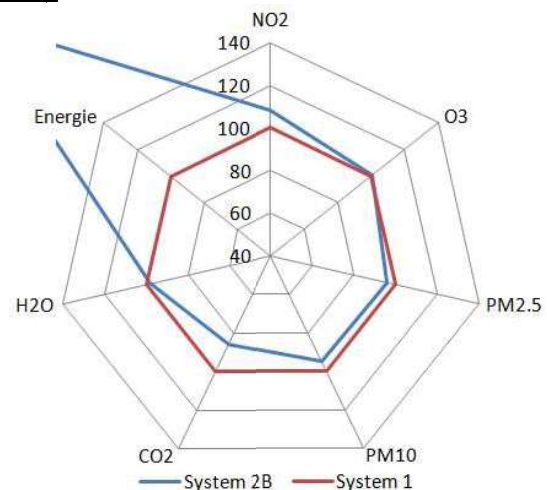


Figure 2: Results evaluation criteria [%], System 2B, Binkom

In the results of this system 2B, figure 2, the high energy consumption is a striking element in these results. The high ventilation rates leans rather against a ventilation system that continuously ventilates at the nominal flow rather than a demand-driven system such as system 1. Due to this high ventilation flow, this system scores much better in terms of comfort with very low CO₂-concentrations but has also a few high peaks. In terms of health, this system also obtains good values for PM_{2.5} and PM₁₀, but a worse value for NO₂.

Traditional ventilation system based on H_2O and CO_2 with an additional check of the outside air quality

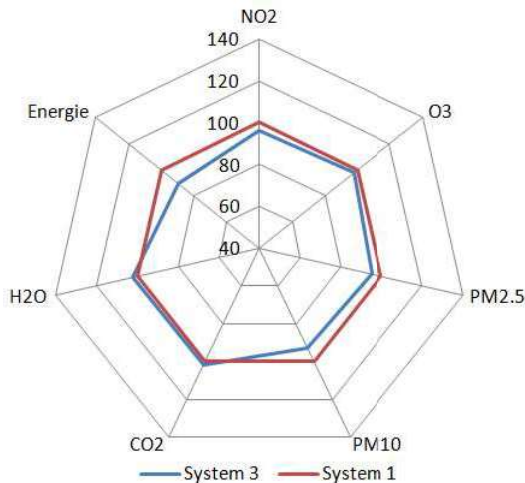


Figure 3: Results evaluation criteria [%], System 3, Binkom

The ventilation system 3 (figure 3) scores better than traditional controls in every area, apart from comfort. The energy consumption is much lower and the health risks decrease for all four outdoor pollutants. The only drawback is the slightly negative results for CO_2 and H_2O with again a large number of high peaks in the concentrations.

B. Comparison between the different locations

The influence of the different locations on the same system will be evaluated in this chapter. The two extreme locations, Antwerp and Binkom are selected, based on the evaluation in section 4. Antwerp has high concentrations of NO_2 , $PM_{2.5}$ and PM_{10} but low concentrations of O_3 . The opposite location, Binkom has low concentrations of NO_2 , $PM_{2.5}$ and PM_{10} but high concentrations of O_3 . The most important pollutants are in this situation NO_2 and O_3 because the concentrations between these locations are much further apart. It should be noted in the figures the used reference for the four pollutants (NO_2 , O_3 , $PM_{2.5}$ and PM_{10}) are different for each location. For the other evaluation criteria, they are the same.

Ventilation system only based on the four air pollutants NO_2 , O_3 , $PM_{2.5}$ and PM_{10} (System 2A)

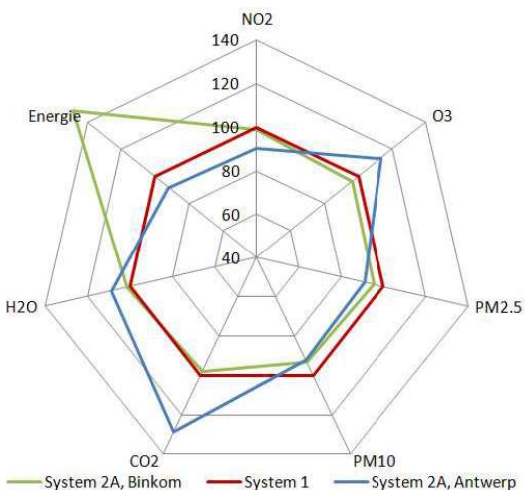


Figure 4: Results evaluation criteria [%], System 2A, Antwerp and Binkom

The results of the locations Antwerp and Binkom are different in almost all criteria for system 2A (figure 4). The first striking element is the higher energy consumption at the location Binkom. This is due to the better air quality, so there can be more ventilated at the nominal flow rate. This high ventilation rate has the consequence that the comfort parameters are much lower than it is at the location Antwerp. Regarding the health aspect, the higher the concentrations in the outside air, the greater the positive effect of the control on the amount of DALY's. The number of DALY's of NO_2 drops stronger for the location Antwerp, with high concentrations of NO_2 outside, the value for Binkom remains unchanged. The number of DALY's of O_3 is decreasing for the location Binkom, with high concentrations of O_3 , while a slight increase is observed for the location Antwerp. The effect of the system at O_3 is less than NO_2 , because the target and intervention values are relatively much higher compared to the average outside concentration of O_3 than it is the case with NO_2 .

Ventilation system only based on the pollutant $PM_{2.5}$ (System 2B)

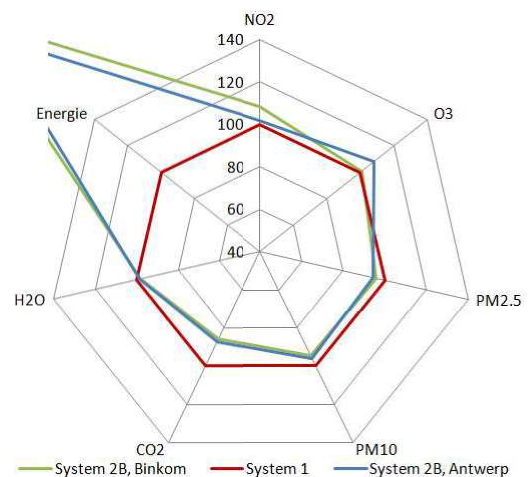


Figure 5: Results evaluation criteria [%], System 2B, Antwerp and Binkom

For the system 2B (figure 5), the results between the two locations are similar on different criteria. This is due to the fact that for $PM_{2.5}$, the differences between the two locations are not so huge. Figure 6 shows that the system at both locations leads to a very high energy consumption and the comfort parameters are identical. The locations scores are almost the same with regards to the improvement in the number of DALY's. For NO_2 and O_3 there is a difference between the two locations. The increase for the pollutant ozone is larger for Antwerp and smaller for Binkom. The reverse effect is observed for Antwerp. This is a remarkable phenomenon, because it would be expected that with a system based on a nominal ventilation flow the number of DALY's would rise sharply for pollutants with the highest concentration in the open air, the pollutant NO_2 for Antwerp and the pollutant O_3 for Binkom. The reason for this is difficult to explain

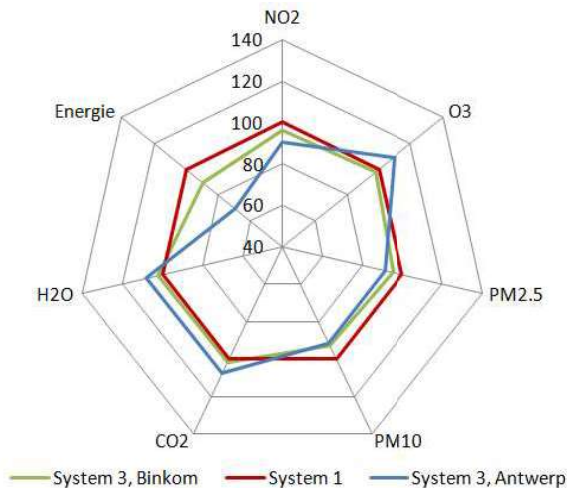


Figure 6: Results evaluation criteria [%], System 3, Antwerp and Binkom

The results of the third system applied at the locations Antwerp and Binkom are in figure 6. There is a clear difference in energy consumption. The Antwerp location has a much lower than Binkom. This is due to the fact that the air quality is poorer in the city of Antwerp, which means that the system functions much more at the minimum flow. These lower ventilation rates lead to a greater decline in terms of comfort than at the location Binkom. For the aspect health, the largest decreases in the amount of DALY's caused by a pollutant is achieved with higher outdoor concentrations of this pollutant.

C. The use of filters

Adding filters to the ventilation systems ensures a sharp decrease in the amount of DALY's, but the difference in these values between these three systems with filter and the traditional system with filter are gone. But the other criteria, there are differences between them. There is a decreasing in comfort through high peaks in the concentrations of mainly CO₂, together with probably higher energy consumption due to the losses caused by the filter itself.

VIII. OPTIMIZATION

To determine the high CO₂-concentrations, a maximum limit value can be used. This leads to an improved comfort but also change the other evaluation criteria. Adding the limit value leads to a higher energy consumption and a decline in health towards the values of the traditional system. Progress in comfort comes at the expense of the health and energy evaluation criteria.

IX. CONCLUSIONS

Taking the outside air quality into account in a ventilation system has an influence on the indoor climate.

With each of the created system, it was noted that high concentrations of the substances CO₂ and H₂O occurred. These are due to periods of poor ventilation due to a bad outdoor air quality. As a result, high concentrations of the outside air pollutants are only minimally introduced into the indoor climate. But during these periods, substances produced in the house, CO₂ and H₂O, accumulate in the building. This leads to high concentrations for these substances.

To avoid these high concentrations of CO₂, an additional limit value can be used, so that concentrations above this value are avoided. These systems are between a traditional demand-driven control and a system whereby the outside air quality is taken into account. As a result, there are no longer high peaks in CO₂-concentrations, but the peak concentrations of the outside air pollutants are rising in the building.

Then it was also generally noted that the systems provided better results with poorer outside air qualities. This means that the controls could achieve a greater decrease in the peak concentration of the outside air pollutants indoor with higher concentrations of these pollutants in the outside air. Taking into account that the outside air quality at locations with poor air quality is more advantageous than this at locations with good air quality.

This study also covered the use of filters. These cause a sharp drop in concentrations, and therefore also the effect on health, of PM_{2.5} and PM₁₀. The difference between the traditional demand-driven system with filter and the system that takes the outside air quality with filter into account is cancelled out by the use of the filters. As a result, when using filters, it is no longer interesting to use a system that takes the outside air quality into account.

When the three controls were compared with each other, it could be decided that the third control, the traditional control whereby a check of the outside air quality was performed, could present the best results. This control ensures a general decrease in the number of DALY's by almost 5% with a lower energy consumption of around 15%. The average values for the comfort parameters have only slightly increased. An important disadvantage of this control remains the number of large peaks in CO₂-concentrations that can be eliminated at the expense of the control of the outside air pollutants.

REFERENCES

- [1] Federale overheidsdienst justitie (2018). Belgische Staatsblad. Consulted on 10 December 2018 through http://www.ejustice.just.fgov.be/mopdf/2018/09/07_1.pdf#page=201.
- [2] Squilbin, M & Davesne S., (2015) De richtlijnen voor de luchtkwaliteit van de wereldgezondheidsorganisatie
- [3] Lehtomäki, H., Korhonen, A., Asikainen, A., Karvosenoja, N., Kupiainen, K., Paunu, V., Savolahti, M., Sofiev, M., Palamarchuk, Y., Karppinen, A., Kukkonen, J. & Hänninen, O. (2018) Health Impacts of Ambient Air Pollution in Finland
- [4] GSI environmental (2018) chemical properties database. Consulted on 28 December 2018 through <https://www.gsi-net.com/en/publications/gsi-chemical-database>.
- [5] National Center for Biotechnology Information (2018) Explore chemistry. Consulted on 28 December 2018 through <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>.

INHOUDSOPGAVE

Woord vooraf	II
Abstract	IV
Extended abstract	V
Inhoudsopgave	XI
Lijst van figuren	XIII
Lijst van tabellen	XVII
Lijst van afkortingen	XVIII
1 Inleiding	1
2 Literatuurstudie	3
2.1 Beschrijving van lucht	3
2.2 Selectie stoffen	14
2.3 Beoordeling luchtkwaliteit	27
2.4 Normering en reglementering ventilatie	35
2.5 Invloed ventilatie op binnenconcentraties polluenten	40
3 Evaluatiecriteria	49
3.1 Gezondheid	49
3.2 Comfort	51
3.3 Energie	51
4 Data buitenluchtpolluenten	52
4.1 Antwerpen	54
4.2 Binkom	57
4.3 Brugge	61
4.4 Hever	64
4.5 Houthalen-Helchteren	67
5 Gebruikte methode	70
5.1 Simulatiemodel	70
5.2 Filters	73
6 Verschillende types sturingen	74
6.1 Sturing 1: Traditionele sturing (H ₂ O, CO ₂)	74
6.2 Sturing 2: Sturing op basis van buitenluchtparameters	76
6.3 Sturing 3: Traditionele sturing (H ₂ O, CO ₂) + extra controle buitenluchtparameters	78

7	Resultaten	79
7.1	Resultaten van elke sturing	79
7.2	Resultaten sturingen toegepast bij de verschillende locaties	106
7.3	Vergelijking tussen verschillende locaties	116
7.4	Samenvatting resultaten locaties en sturingen	118
7.5	Gebruik filters	121
8	Optimaliseren sturingen	125
8.1	Optimalisering uitgewerkt in contam	125
8.2	Resultaten optimalisering	126
9	Conclusie	129
	Referenties	131
	Bijlagen	137
	Bijlage 1: Analyse onderzochte stoffen in de verschillende onderzoeken	137
	Bijlage 2: Gedetailleerde gegevens van de evaluatiecriteria voor de verschillende locaties	139

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1: Samenvattende resultaten drie verschillende onderzoeken	8
Figuur 2: Indeling fijn stof	12
Figuur 3: Impact van luchtverontreinigende stoffen	16
Figuur 4: Piramide van gezondheidseffecten door luchtvervuiling.....	16
Figuur 5: CO ₂ -uitstoot per sector en totale CO ₂ -uitstoot	17
Figuur 6: Aandeel sectoren in totale NO _x -emisie in Vlaanderen in 2016	19
Figuur 7: Aandeel sectoren in totale troposferische ozonemissie in vlaanderen in 2016	21
Figuur 8: Aandeel sectoren in totale TSP-emissie in Vlaanderen in 2016.....	23
Figuur 9: Fijn stof gehalten woning.....	24
Figuur 10: Fijn stof ten gevolge van verschillende bronnen.....	25
Figuur 11:Minimaal geëist ontwerpdebiet voor niet-residentiële gebouwen en de industrie	38
Figuur 12: Verschillende types ventilatiesystemen	41
Figuur 13: Warmtewisselaar.....	41
Figuur 14: Boxplot van CO ₂ concentraties binnenshuis in woningen en scholen/crèches	43
Figuur 15: Paneelfilter	47
Figuur 16: Het zeefeffect	48
Figuur 17: Visualisatie energieparameter	51
Figuur 18: Ligging vijf locaties (Wikipedia, 2019).....	52
Figuur 19: Gemiddelde waarden van de pollutanten voor de verschillend locaties (µg/m ³)	53
Figuur 20: Quellinstraat, Antwerpen.....	54
Figuur 21: Ruime omgeving Quellinstraat, Antwerpen.....	54
Figuur 22: Buitenconcentratie NO ₂ , Antwerpen (µg/m ³)	55
Figuur 23: Buitenconcentratie O ₃ , Antwerpen (µg/m ³)	55
Figuur 24: Buitenconcentraties PM2.5, Antwerpen (µg/m ³).....	56
Figuur 25: Buitenconcentraties PM10, Antwerpen (µg/m ³).....	56
Figuur 26: Brusselstraat, Binkom	57
Figuur 27: Ruime omgeving Brusselstraat, Binkom	57
Figuur 28: Buitenconcentratie NO ₂ , Binkom (µg/m ³).....	59
Figuur 29: Buitenconcentratie O ₃ , Binkom (µg/m ³)	59
Figuur 30: Buitenconcentraties PM2.5, Binkom (µg/m ³)	59
Figuur 31: Buitenconcentraties PM10, Binkom (µg/m ³)	59
Figuur 32: Vlamingendam, Bruggge.....	61
Figuur 33: Ruime omgeving Vlamingendam, Brugge	61
Figuur 34: Buitenconcentratie NO ₂ , Brugge (µg/m ³)	62
Figuur 35: Buitenconcentratie O ₃ , Brugge (µg/m ³).....	62
Figuur 36: Buitenconcentratie PM2.5, Brugge (µg/m ³)	63
Figuur 37: Buitenconcentratie PM10, Brugge (µg/m ³)	63
Figuur 38: Ravestreinstraat, Hever	64
Figuur 39: Ruime omgeving Ravestreinstraat, Hever	64
Figuur 40: Buitenconcentratie NO ₂ , Hever (µg/m ³)	65
Figuur 41: Buitenconcentratie O ₃ , Hever (µg/m ³).....	65

Figuur 42: Buitenconcentratie PM2.5, Hever ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	66
Figuur 43: Buitenconcentratie PM10, Hever ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	66
Figuur 44: Grote Baan, Houthalen-Helchteren	67
Figuur 45: Ruime omgeving Grote Baan, Houthalen-Helchteren	67
Figuur 46: Buitenconcentratie NO ₂ , Houthalen-Helchteren ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	68
Figuur 47: Buitenconcentratie O ₃ , Houthalen-Helchteren ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	68
Figuur 48: Buitenconcentratie PM2.5, Houthalen-Helchteren ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	69
Figuur 49: Buitenconcentratie PM10, Houthalen-Helchteren ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	69
Figuur 50: Simulatiemodel woning in contam	71
Figuur 51: Basissturing sturing 1	75
Figuur 52: Verwerking sturing 1	75
Figuur 53: Keuze systeem C of D	75
Figuur 54: Keuze systeem zonder of met filter	76
Figuur 55: Basissturing sturing 2	77
Figuur 56: Sturing 2A en 2B	77
Figuur 57: Verwerking sturing 3	78
Figuur 58: Controlecomponent buitenluchtconcentraties	78
Figuur 59: Verloop ventilatiedebieten [m^3/h] living, Antwerpen, sturing 1	79
Figuur 60: Verloop CO ₂ -concentraties [ppm] living, Antwerpen, sturing 1	80
Figuur 61: Verloop H ₂ O-concentraties [%] badkamer, Antwerpen, sturing 1	80
Figuur 62: Belang pollutanten op sturing 2A [%]	81
Figuur 63: Werkingsprincipe sturing 2B	82
Figuur 64: Verloop ventilatiedebieten [m^3/h] living, Antwerpen, sturing 2A	83
Figuur 65: Verloop CO ₂ -concentratie [ppm] living, Antwerpen, sturing 2A	83
Figuur 66: Verloop H ₂ O-concentratie [%] badkamer, Antwerpen, sturing 2A	84
Figuur 67: Weekverloop NO ₂ -concentraties [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], Sturing 2A, Living, Antwerpen	85
Figuur 68: Weekverloop O ₃ -concentraties [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], Sturing 2A, Living, Antwerpen	85
Figuur 69: Weekverloop PM2.5-concentraties [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], Sturing 2A, Living, Antwerpen	85
Figuur 70: Weekverloop PM10-concentraties [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], Sturing 2A, Living, Antwerpen	86
Figuur 71: Beoordeling gezondheid [DALY/(100000personen•1jaar)], Sturing 2A, Antwerpen	86
Figuur 72: Weekverloop CO ₂ -concentraties [ppm], Sturing 2A, Living, Antwerpen	87
Figuur 73: Weekverloop H ₂ O-concentraties [%], Sturing 2A, Badkamer, Antwerpen	87
Figuur 74: Boxplot CO ₂ -concentraties [ppm] (Links) en H ₂ O-concentraties [%] (Rechts), Sturing 2A, Antwerpen	88
Figuur 75: Weekverloop ventilatiedebieten sturing 2A [m^3/h] living, Antwerpen	88
Figuur 76: Energieverbruik [m^3/h], Sturing 2A, Antwerpen	89
Figuur 77: Algemene evaluatie sturing 2A [%], Antwerpen	89
Figuur 78: Werkingsprincipe sturing 2B	90
Figuur 79: Verloop ventilatiedebieten [m^3/h] living, Antwerpen, sturing 2B	91
Figuur 80: Verloop CO ₂ -concentratie [ppm] living, Antwerpen, sturing 2B	91
Figuur 81: Verloop H ₂ O-concentratie [%] badkamer, Antwerpen, sturing 2B	92
Figuur 82: Weekverloop NO ₂ -concentraties [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], Sturing 2B, Living, Antwerpen	93
Figuur 83: Weekverloop O ₃ -concentraties [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], Sturing 2B, Living, Antwerpen	93
Figuur 84: Weekverloop PM2.5-concentraties [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], Sturing 2B, Living, Antwerpen	93

Figuur 85: Weekverloop PM10-concentraties [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], Sturing 2B, Living, Antwerpen	94
Figuur 86: Beoordeling gezondheid [DALY/(100000personen•1jaar)], Sturing 2B, Antwerpen	94
Figuur 87: Weekverloop CO ₂ -concentraties [%], Sturing 2B, Badkamer, Antwerpen.....	95
Figuur 88: Weekverloop H ₂ O-concentraties [%], Sturing 2B, Badkamer, Antwerpen.....	95
Figuur 89: Boxplot CO ₂ -concentraties [ppm] (Links) en H ₂ O-concentraties [%] (Rechts), Sturing 2B, Antwerpen	96
Figuur 90: Energieverbruik [m^3/h], Sturing 2B, Antwerpen	96
Figuur 91: Algemene evaluatie sturing 2B [%], Antwerpen.....	96
Figuur 92: Belang polluenten op sturing 3 [%]	97
Figuur 93: Weekverloop concentraties buitenluchtpolluenten [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], Antwerpen.....	97
Figuur 94: Werkingsprincipe sturing 2B	98
Figuur 95: Verloop ventilatiedebieten [m^3/h] living, Antwerpen, sturing 3	98
Figuur 96: Verloop CO ₂ -concentraties [ppm] living, Antwerpen, sturing 3.....	99
Figuur 97: Verloop H ₂ O-concentraties [%] Badkamer, Antwerpen, sturing 3	99
Figuur 98: Weekverloop NO ₂ -concentraties [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], Sturing 3, Living, Antwerpen	101
Figuur 99: Weekverloop O ₃ -concentraties [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], Sturing 3, Living, Antwerpen.....	101
Figuur 100: Weekverloop PM2.5-concentraties [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], Sturing 3, Living, Antwerpen	101
Figuur 101: Weekverloop PM10-concentraties [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], Sturing 3, Living, Antwerpen	102
Figuur 102: Beoordeling gezondheid [DALY/(100000personen•1jaar)], Sturing 3, Antwerpen.....	102
Figuur 103: Weekverloop CO ₂ -concentraties [ppm], Sturing 3, Living, Antwerpen	103
Figuur 104: Weekverloop H ₂ O-concentraties [%], Sturing 3, Badkamer, Antwerpen	103
Figuur 105: Boxplot CO ₂ -concentraties [ppm] (Links) en H ₂ O-concentraties [%] (Rechts), Sturing 3, Antwerpen	104
Figuur 106: Weekverloop ventilatiedebieten sturing3 [m^3/h] living, Antwerpen	104
Figuur 107: Energieverbruik [m^3/h], Sturing 3, Antwerpen.....	105
Figuur 108: Algemene evaluatie sturing 3 [%], Antwerpen	105
Figuur 109: Belang van de buitenluchtpolluenten op sturing 2A (links) en op sturing 3 (rechts) [%], Antwerpen	106
Figuur 110: Globaal overzicht [%], Sturing 2A, Antwerpen.....	107
Figuur 111: Globaal overzicht [%], Sturing 2B, Antwerpen.....	107
Figuur 112: Globaal overzicht [%], Sturing 3, Antwerpen	107
Figuur 113: Belang van de buitenluchtpolluenten op sturing 2A (links) en op sturing 3 (rechts) [%], Binkom.....	108
Figuur 114: Globaal overzicht [%], Sturing 2A, Binkom	109
Figuur 115: Globaal overzicht [%], Sturing 2B, Binkom	109
Figuur 116: Globaal overzicht [%], Sturing 3, Binkom.....	109
Figuur 117: Belang van de buitenluchtpolluenten op sturing 2A (links) en op sturing 3 (rechts) [%], Brugge	110
Figuur 118: Globaal overzicht [%], Sturing 2A, Brugge.....	111
Figuur 119: Globaal overzicht [%], Sturing 2B, Brugge.....	111
Figuur 120: Globaal overzicht [%], Sturing 3, Brugge	111
Figuur 121: Belang van de buitenluchtpolluenten op sturing 2A (links) en op sturing 3 (rechts) [%], Hever	112
Figuur 122: Globaal overzicht [%], Sturing 2A, Hever.....	113

Figuur 123: Globaal overzicht [%], Sturing 2B, Hever.....	113
Figuur 124: Globaal overzicht [%], Sturing 3, Hever	113
Figuur 125: Belang van de buitenluchtpolluenten op sturing 2A (links) en op sturing 3 (rechts) [%], Houthalen-Helchteren	114
Figuur 126: Globaal overzicht [%], Sturing 2A, Houthalen-Helchteren	115
Figuur 127: Globaal overzicht [%], Sturing 2B, Houthalen-Helchteren	115
Figuur 128: Globaal overzicht [%], Sturing 3, Houthalen-Helchteren	115
Figuur 129: Globaal overzicht [%], Sturing 2A, Antwerpen en Binkom.....	116
Figuur 130: Globaal overzicht [%], Sturing 2B, Antwerpen en Binkom.....	117
Figuur 131: Globaal overzicht [%], Sturing 3, Antwerpen en Binkom	117
Figuur 132: Beoordeling gezondheid [DALY/(100000personen•1jaar)], Sturing 2A met filter en zonder filter, Binkom	121
Figuur 133: Boxplot CO ₂ -concentraties [ppm] (Links) en H ₂ O-concentraties [%] (Rechts), Sturing 2A met en zonder filter, Binkom.....	122
Figuur 134: Energieverbruik [m ³ /h], Sturing 2A met en zonder filter, Binkom.....	122
Figuur 135: Beoordeling gezondheid [DALY/(100000personen•1jaar)], Sturing 3 met filter en zonder filter, Binkom	123
Figuur 136: Boxplot CO ₂ -concentraties [ppm] (Links) en H ₂ O-concentraties [%] (Rechts), Sturing 3 met en zonder filter, Binkom.....	124
Figuur 137: Energieverbruik [m ³ /h], Sturing 3 met en zonder filter, Binkom	124
Figuur 138: Weekverloop ventilatiedebiet Sturing 3 (1200) [m ³ /h], Living, Antwerpen	126
Figuur 139: Beoordeling gezondheid [DALY], Sturing 3 (1200) en Sturing 3 (950), Antwerpen.....	127
Figuur 140: Boxplot CO ₂ -concentraties [ppm] (Links) en H ₂ O-concentraties [%] (Rechts), Sturing 3 (1200) en Sturing 3 (950), Antwerpen	127
Figuur 141: Energieverbruik [m ³ /h], Sturing 3 (1200) en Sturing 3 (950), Antwerpen	128
Figuur 142: Algemene evaluatie sturing 3 (1200) en sturing 3 (950) [%], Antwerpen	128

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1: Stoffen aanwezig in de droge zuivere atmosferische lucht.....	3
Tabel 2: Fijn stof.....	12
Tabel 3: Voorbeelden van menselijke bronnen van vochtproductie in gebouwen.....	26
Tabel 4: Richtwaarden WGO voor de klassieke polluenten van de buitenlucht	27
Tabel 5: Richtwaarden WGO voor de (niet-klassieke) niet kankerverwekkende polluenten van de buitenluchtkwaliteit	28
Tabel 6: Richtwaarde WGO voor de kankerverwekkende polluenten van de buitenluchtkwaliteit	28
Tabel 7: Richtwaarden WGO voor de niet-kankerverwekkende polluenten van de binnenluchtkwaliteit	29
Tabel 8: Richtwaarden WGO voor de kankerverwekkende polluenten van de binnenluchtkwaliteit ...	29
Tabel 9: Richt- en interventiewaarden en blootstellingsduur biotische factoren.....	30
Tabel 10: Richt- en interventiewaarden en blootstellingsduur fysische factoren	31
Tabel 11: Richt- en interventiewaarden en blootstellingsduur chemische factoren.....	31
Tabel 12: European Air Quality Index (European Environment Agency, 2018).....	34
Tabel 13: Aircheckr AQI-indeling.....	34
Tabel 14: De Belgische AQI-indeling (BELAQI).....	35
Tabel 15: NBN D50-001	37
Tabel 16: Classificatie filters volgens EN779	45
Tabel 17: Classificatie filters volgens ASHRAE 52.2	45
Tabel 18: Classificatie luchtfilters volgens EN1822	46
Tabel 19: Classificatie luchtfilters volgens ISO16890	46
Tabel 20: Filterklassen ISO16890 samen met filterklassen EN779	47
Tabel 21: UDE-waardes 1	49
Tabel 22: UDE-waardes 2	50
Tabel 23: Indeling buitenlucht volgens Aircheckr, Antwerpen	56
Tabel 24: Indeling buitenlucht volgens Aircheckr, Binkom.....	60
Tabel 25: Indeling buitenlucht volgens Aircheckr, Brugge	63
Tabel 26: Indeling buitenlucht volgens Aircheckr, Hever	66
Tabel 27: Indeling buitenlucht volgens Aircheckr, Houthalen-Helchteren.....	69
Tabel 28: Ruimtes in het model.....	70
Tabel 29: Stofeigenschappen buitenluchtpolluenten	72
Tabel 30: Ingevoerde constanten in contam	74
Tabel 31: Interventie- en richtwaardes buitenluchtparameters	76
Tabel 32: Interventie- en richtwaardes buitenluchtparameters (met filter).....	77
Tabel 33: Samenvatting resultaten sturingen en locaties	120

LIJST VAN AFKORTINGEN

ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

WGO: Wereldgezondheidsorganisatie

WHO: World Health Organization

ppm: Parts Per Million

ppb: Parts Per Billion

ISO: International Organization for Standardization

NBN: Bureau voor Normalisatie

EN: Europese Norm

IARC: International Agency for Research on Cancer

VOS: Vluchtige Organische Stoffen

TSP: De totale hoeveelheid stof in de lucht

HVAC: Heating Ventilation and Air Conditioning

PM: Particulate Matter

UDE: Unit Damage Estimate

1 INLEIDING

Vandaag de dag is een ventilatiesysteem een standaard element geworden bij het bouwen van nieuwe gebouwen. Dit is te wijten aan enerzijds verschillende wetgevingen, zoals de EPB-regelgeving, die de installatie van ventilatiesysteem verplicht maakt, maar anderzijds ook aan de manier waarop hedendaagse gebouwen opgetrokken worden. Want om de energieprestaties van gebouwen sterk te verbeteren is het vereist om luchtdicht te bouwen. Hierdoor is het niet meer mogelijk om de binnenlucht te verversen door middel van natuurlijke ventilatie via spleten en kieren. Het is dus noodzakelijk om over te gaan naar een gecontroleerd ventilatiesysteem die zorgt voor de aan- en afvoer van respectievelijk propere buitenlucht en vervuilde binnenlucht.

Oorspronkelijk waren de ventilatiesystemen systemen die zorgden voor een continue ventilatiedebiet in elke ruimte. Maar deze systemen gaan gepaard met het verbruik van hoge hoeveelheden energie door enerzijds het verlies aan warmte, omdat koude lucht binnengebracht wordt en warme lucht afgezogen wordt, en anderzijds het energieverbruik van het systeem zelf. Dit energieverbruik kan sterk gereduceerd worden door gebruik te maken van een vraaggestuurd ventilatiesysteem. Dergelijke systemen baseren zich voor het bepalen van de ventilatiedebieten in elke ruimte op enkele basiscomponenten in de binnenlucht, voornamelijk CO₂-gehalte en vocht en in mindere mate VOC. Deze componenten worden door middel van sensoren in de ruimtes opgemeten en doorgestuurd naar de centrale ventilatie-unit. Door middel van deze twee, eventueel drie, componenten krijgt de ventilatie-unit een indicatie over de binnenluchtkwaliteit waarop het zich kan baseren voor het regelen van de ventilatiedebieten in de verschillende ruimtes.

Deze vraaggestuurde systemen houden nog geen rekening met het al dan niet kwaliteitsvol zijn van de buitenlucht. Zo is het mogelijk bij een vraaggestuurd ventilatiesysteem dat er maximaal geventileerd wordt, om de binnenluchtkwaliteit op te krikken, maar dit gebeurt gedurende een periode waar er zich in de buitenlucht zomersmog (zeer hoge piekwaardes voor ozon) voordoet. In deze situatie zal men ervoor zorgen dat grote ozon concentraties binnengebracht worden in de woning, wat zorgt voor een achteruitgang van de kwaliteit van de binnenlucht in plaats van een vooruitgang. Om dergelijke situatie met ozon, maar ook met andere buitenluchtpolluenten, te vermijden is het belangrijk dat de werking van een ventilatiesysteem ook gebaseerd is op de kwaliteit van de buitenlucht.

In deze masterproef zal getracht worden de kwaliteit van de buitenlucht te implementeren in de sturingen van de ventilatiesystemen. Dit zal gebeuren door middel van het opbouwen en simuleren van verschillende sturingen in het simulatieprogramma contam. De kwaliteit van de buitenlucht zal begroot worden door middel van de concentraties van vier buitenluchtpolluenten, namelijk NO₂, O₃, PM_{2.5} en PM₁₀. Deze data wordt voorzien door het bedrijf Nazka Maps voor verschillende locaties (Antwerpen, Binkom, Brugge, Hever en Houthalen-Helchteren). Uit de simulatiemodellen worden gegevens verzameld die vervolgens, door middel van vooraf vastgelegde evaluatiecriteria, geëvalueerd worden. Hiernaast zal ook de combinatie tussen dergelijke systemen en het gebruik van filters onder de loep genomen worden.

Eerst en vooral wordt er in dit onderzoek gestart met een literatuurstudie om zich in te werken in het thema. Vervolgens kan er van start gegaan worden met het daadwerkelijke onderzoek door het opstellen van de drie evaluatiecriteria (gezondheid, comfort en energieverbruik) om de sturingen op een eenduidige manier met elkaar te kunnen vergelijken. De verkregen data van de verschillende locaties wordt geanalyseerd waarbij getracht wordt verklaringen te zoeken voor trends die zich voordien in de buitenluchtconcentraties van de vier pollutanten. Hierna volgt een beschrijving over de manier waarop en waarin de simulaties zullen plaatsvinden, gevolgd door een uiteenzetting van de verschillende opgebouwde sturingen. Daarna worden de resultaten uit de simulatiemodellen besproken, gebruik makende van de evaluatiecriteria, met daaropvolgend een optimalisatie van de sturingen uit de vaststellingen van de net besproken resultaten. Dit verslag wordt afgerond met de algemene conclusies die kunnen besloten worden uit dit onderzoek.

2 LITERATUURSTUDIE

2.1 Beschrijving van lucht

2.1.1 Algemene samenstelling lucht

De lucht die we dag in dag uit inademen bestaat niet alleen uit zuurstof en CO₂, zoals de meeste mensen denken, maar uit zoveel meer andere elementen. Lucht kan onderverdeeld worden in vier componenten, namelijk droge zuivere atmosferische lucht, waterdamp, vervuiling en deeltjes. De droge zuivere atmosferische lucht is samengesteld uit verschillende gasvormige stoffen, waarvan zuurstof en CO₂ de meest gekende zijn. Deze omvatten ongeveer 21% van het totale volume droge zuivere atmosferische lucht. De overige 79% bestaat voornamelijk uit stikstof (+78%) aangevuld met verschillende andere componenten (+1%). Alle verschillende stoffen aanwezig in de droge zuivere atmosferische lucht zijn weergegeven in tabel 1 met telkens het volumepercent in droge lucht van deze stof. De volumeverhoudingen van deze stoffen in de lucht veranderen nauwelijks tot een hoogte van 16 km. (Lenntech, 2018)

*Tabel 1: Stoffen aanwezig in de droge zuivere atmosferische lucht
(Lenntech, 2019)*

Stof	% van het volume in droge lucht
Stikstof (N ₂)	78.09%
Zuurstof (O ₂)	20.94%
Argon (Ar)	0.93%
Koolstofdioxide (CO ₂)	0.03%
Neon (Ne)	0.0018%
Helium (He)	0.00052%
Methaan (CH ₄)	0.00022%
Krypton (Kr)	0.00010%
Distikstofoxide (N ₂ O)	0.00010%
Waterstof (H ₂)	0.00005%
Xenon (Xe)	0.00008%

Naast bovenstaande gasvormige deeltjes bestaat de lucht voornamelijk uit waterdamp. De hoeveelheid waterdamp aanwezig in de lucht is typerend voor het klimaat. Lucht bevat bijvoorbeeld bij een temperatuur van 20°C maximaal 2% waterdamp. In een erg koude omgeving daarentegen kan 2% dalen naar 0,02% waterdamp en in een tropische omgeving stijgen naar 6% waterdamp. (Airsan, 2019)

De derde component waaruit lucht bestaat is vervuiling. Dit zijn vervuilende stoffen die oorspronkelijk nog niet aanwezig waren in de lucht en door toedoen van de mens in de lucht gebracht werden. (Airsan, 2019)

Als laatste bevat de lucht ook nog deeltjes. Dit zijn vloeibare en vaste bestanddelen zoals stof of biologisch materialen (onder andere zaden, pollen, bacteriën, virussen, et cetera). Ook hier heeft de mens een belangrijke invloed. Zo zal het dagelijkse verkeer zorgen voor een verhoogde uitstoot van fijn stof in de lucht. (Airsan, 2019)

Verontreinigende stoffen, ook wel polluenten of contaminanten genoemd, zijn stoffen die ofwel aanwezig zijn in de lucht, maar hier niet aanwezig dienen te zijn (vervuiling) of in te hoge concentraties aanwezig zijn. De aanwezigheid van polluenten in de lucht hebben een negatieve impact op zowel de gezondheid van mens, dier als natuur. De mate waarin deze polluenten aanwezig zijn, is afhankelijk van de plaats waar men zich op dat moment bevindt en de mate waarin ze uitgestoten worden. (Airsan, 2019)

De samenstelling, en dus ook de kwaliteit van de binnenlucht en de buitenlucht, kan men niet zomaar gelijk stellen aan elkaar. Binnenlucht bevat een grotere diversiteit aan polluenten en velen van deze polluenten zijn in hogere concentraties aanwezig dan in de buitenlucht. Deze grotere diversiteit in de binnenlucht is voornamelijk toe te wijzen aan het feit dat er in de woningen diverse bronnen aanwezig zijn. Mede door accumulatie veroorzaakt dit hoge concentraties in de woningen. Met accumulatie wordt bedoeld dat stoffen, die in de woning terechtkomen, niet eenvoudig de woning terug kunnen verlaten, waardoor ze zich opstapelen in de woning. De wereldwijde trend om duurzamer, energie-efficiënter, luchtdichter en beter geïsoleerd te bouwen versterkt het verschil tussen de lucht binnen en buiten (Crump et al., 2010). (De Gids, 2012)

De kwaliteit van de binnenlucht en dus ook de hoeveelheid polluenten aanwezig in de binnenlucht worden hoofdzakelijk bepaald door de omgevingslucht, de gebouwschil en verschillende bronnen binnenshuis (hoge gezondheidsraad, 2017).

De eerste bepalende factor voor de kwaliteit van de binnenlucht is de buitenlucht aanwezig rond het gebouw. Deze lucht wordt in de woning gebracht door middel van ventilatie en bevat ook polluenten die een negatief effect kunnen hebben op het binnenklimaat. Hierdoor is het mogelijk dat ventilatie zorgt voor een slechter binnenklimaat in plaats van het verbeteren van het binnenklimaat. Om dit te voorkomen kan er gewerkt worden met filters. Deze filters zorgen ervoor dat welbepaalde stoffen uit de buitenlucht gefilterd worden zodat deze niet in het binnenklimaat terecht komen. In 2.5.2 van deze literatuurstudie wordt dit uitgebreider besproken. (De Gids, 2012)

De tweede grote invloedsfactor op de kwaliteit van binnenlucht is de gebouwschil. Deze bestaat uit de luchtdichtheid en het ventilatiesysteem van het gebouw. Beide elementen staan duidelijk in verband met elkaar wanneer er gekeken wordt naar de aanwezigheid van polluenten in de binnenomgeving. Indien gebouwen meer en meer luchtdichter gebouwd worden zal de gebouwverluchting via openingen en scheuren in de gebouwschil verloren gaan. Hierdoor treed er geen verversing op van de binnenlucht, wat nefast is voor de gezondheid van de inwoners. Aangezien een goede verluchting onmisbaar is om een gezond binnenmilieu te creëren en te behouden, is bij dit soort gebouwen een ventilatiesysteem noodzakelijk (hoge gezondheidsraad, 2017). Door de alsmaar hoger wordende energieprestatie-eisen van gebouwen de dag van vandaag, dient er een hoge luchtdichtheid behaald te worden wat resulteert in de plaatsing van een ventilatiesysteem. Een deels of volledig mechanisch systeem is wenselijk, want mechanische ventilatiesystemen bieden het voordeel van een gecontroleerde gebouwventilatie. (De Gids, 2012)

De derde en laatste belangrijke invloedsfactor van de binnenluchtkwaliteit zijn de bronnen binnenshuis. De belangrijkste bronnen in woningen zijn onder te verdelen in vier groepen, namelijk:

- Stoffen uit bouw- en inrichtingsmaterialen.
- Stoffen afkomstig van menselijk gedrag en hun dagelijkse handelingen:
 - Vocht bij onder andere koken, wassen, douchen en het drogen van de was binnenshuis,
 - Menselijke afscheidingsproducten (bio-effluenten),
 - Interne verbrandingsgassen: open haarden, CV ketels, boilers, koken, ovens, geisers en kaarsen (NO_x en fijn stof).
- Stoffen uit producten die geconsumeerd worden door de mens:
 - Chemische verbindingen die vrijkomen bij persoonlijke verzorging,
 - Vluchtige stoffen die vrijkomen bij onderhoudswerkzaamheden als verven, lakken en schoon maken.
- Emissies van HVAC installaties.

(De Gids, 2012)

2.1.2 Luchtverontreinigende stoffen

Om een verdere bespreking te kunnen uitvoeren van de polluenten aanwezig in het binnenmilieu wordt er gebruik gemaakt van een opdeling op basis van hun toestand in de lucht. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen de gasvormige polluenten en de particles of deeltjes.

2.1.2.1 Gasvormige polluenten

Er is een enorm grote hoeveelheid chemische stoffen die in de lucht aanwezig kunnen zijn. Aangezien het onmogelijk is om deze grote hoeveelheid stoffen op te nemen in deze literatuurstudie, is het noodzakelijk om welbepaalde stoffen te filteren uit de grote groep van chemische stoffen. Dit gebeurt op basis van de geraadpleegde literatuur. In bijlage 1 is te zien welke stoffen aan bod kwamen in enkele belangrijke studies. Uit de frequentie waarmee de stoffen voorkomen in deze tabel en het belang dat de literatuur hecht aan welbepaalde stoffen worden tien chemische stoffen geselecteerd.

Deze stoffen zijn:

1. Benzeen
2. Koolstofdioxide
3. Koolstofmonoxide
4. Formaldehyde
5. Naftaleen
6. Stikstofdioxide
7. Radon
8. Trichloorethyleen
9. Tetrachloorethyleen
10. Acetaldehyde
11. Ozon

In de literatuur komt vaak de term vluchtige organische stoffen of VOS in de binnenlucht aan bod. Het is een verzameling van stoffen die tot verschillende families behoren, maar wel één gelijke eigenschap delen, namelijk ze verdampen snel bij kamertemperatuur. Er worden hierbij twee types van oorsprong onderscheiden. Enerzijds zijn er de stoffen van antropogene oorsprong. Ze zijn ontstaan door toedoen van de mens zoals bij raffinage, de verdamping van een organische oplosmiddel, enzovoort. Anderzijds zijn er de stoffen van natuurlijke oorsprong. Deze stoffen ontstaan door planten of bepaalde gistingsprocessen in de natuur. De totale hoeveelheid VOS in de binnenlucht vormt een indicator voor de organische vervuiling van de lucht. De stoffen die hier in deze literatuurstudie uitgelicht worden en behoren tot de vluchtige organische stoffen zijn: benzeen, formaldehyde, trichloorethyleen, tetrachloorethyleen en acetaldehyde. Deze stoffen worden vaak in de literatuur aangeduid als de totale vluchtige organische stoffen of TVOS.

(Federale overheidsdienst volksgezondheid: veiligheid van de voedselketen en leefmilieu, 2016; Vlaamse milieumaatschappij, 2018)

Benzeen C_6H_6

Benzeen is een uitgebreid bestudeerd pollutant in de binnenlucht binnen België en Europa. Het is een heldere, kleurloze, vluchtige en licht ontvlambare vloeistof, waardoor benzeen dan ook voornamelijk in de dampfase voorkomt. Het wordt gebruikt als een industrieel oplosmiddel, bijvoorbeeld in verven, vernissen, lakverduuners en benzine. Tegenwoordig wordt het ook gebruikt als grondstof voor de synthese van styreen, fenol, cyclohexaan, aniline en alkylbenzenen en bij de productie van verschillende kunststoffen en harsen. Dagelijks wordt de mens blootgesteld aan kleine hoeveelheden benzeen via inademing.

Door het vluchtige karakter van deze stof worden mensen voornamelijk blootgesteld aan benzeen door middel van inhalatie. Een korte blootstelling aan deze stof in lage concentraties leidt tot verschillende effecten zoals slaperigheid, verwarring, duizeligheid, trillen, snelle hartslag, hoofdpijn en bewusteloosheid. Over het algemeen zullen deze verschillende symptomen stoppen wanneer deze personen terug frisse lucht inademen. Een langdurige blootstelling kan leiden tot een verminderde productie van essentiële bloedbestanddelen zoals rode bloedcellen en witte bloedcellen, wat kan leiden tot de ontwikkeling van leukemie.

Binnenconcentraties benzeen liggen doorgaans hoger dan de concentraties in de buitenomgeving. In Europese steden is een trend waargenomen van toenemende binnenconcentraties van noord naar zuid. Lage binnenconcentraties ($2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) werden gemeten in Finse huizen, terwijl ze varieerden van 2 tot $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in centraal-Europese steden en van 10 tot $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in de zuidelijke steden zoals Milaan en Athene.

(gezondheid en milieu, 2018; Eduardo de Oliveira et al., 2009; Kotzias, D. et al., 2005; GHS, 2018; WHO, 2018)

Koolstofdioxide CO₂

Koolstofdioxide (CO₂) is een kleurloos en geurloos gas dat van nature in de atmosfeer aanwezig is. De twee voornaamste bronnen van CO₂ zijn enerzijds de verbranding van koolstofhoudende stoffen, zoals fossiele brandstoffen, en anderzijds elk levend wezen door middel van de ademhaling. Het is een stof die een belangrijke bijdrage levert bij de totale uitstoot van broeikasgassen. De concentratie van CO₂ in lucht is sterk toegenomen sinds het begin van de industriële revolutie.

Koolstofdioxide heeft geen onmiddellijk risico voor de gezondheid van de mens. Toch wordt CO₂ vaak opgemeten in het binnenmilieu als indicator voor de mate waarmee geventileerd dient te worden, voornamelijk in ruimtes waar veel mensen aanwezig zijn. De gemiddelde toename van de CO₂-concentratie loopt echter parallel met de toename van andere door de mens geproduceerde stoffen in de binnenlucht. Voorbeelden hiervan zijn geurstoffen en allergene stofdeeltjes.

De concentratie aan CO₂ wordt uitgedrukt in ppm of part per million en schommelt in de buitenomgeving rond een waarde van 350 ppm.

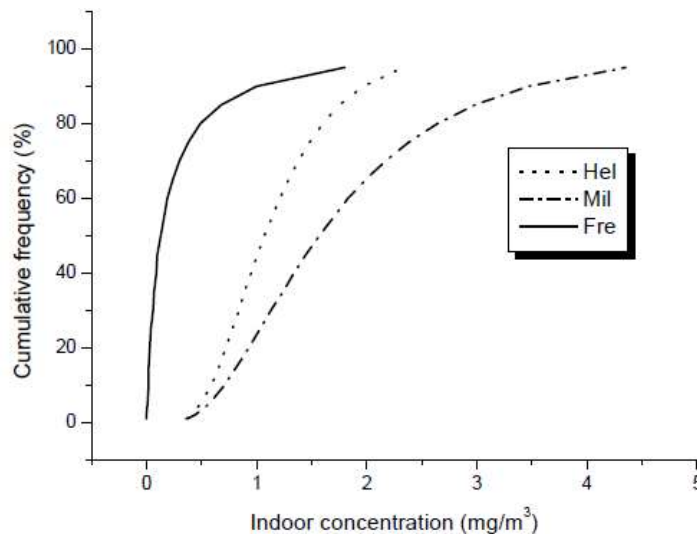
(Gezondheid en milieu, 2018)

Koolstofmonoxide CO

In ideale omstandigheden leiden verbrandingsprocessen enkel tot water en koolstofdioxide (CO₂). Wanneer de verbranding onvolledig is, ontstaat echter koolstofmonoxide of CO. Dit is een zeer giftig kleur-, smaak- en reukloos gas dat zwaarder is dan lucht. Binnenshuis kunnen hoge CO-concentraties voorkomen in slecht verluchte ruimtes waar oude verbrandingstoestellen op basis van een vlam actief zijn. Hiernaast kan ook het roken van tabaksproducten zorgen voor een verhoogde concentratie CO binnenshuis met circa 1 tot $2 \text{ mg}/\text{m}^3$ in woningen.

Koolstofmonoxide is een gasvormige stof waardoor het bijna uitsluitend opgenomen wordt door de mens via de ademhaling. Bij blootstelling aan hoge CO-concentraties wordt het transport van zuurstof in het bloed verstoord. Koolstofmonoxide bindt 200 tot 250 maal sterker met hemoglobine dan zuurstof, daardoor krijgt zuurstof niet de kans om te binden met hemoglobine en kan het bloed minder zuurstof transporteren. Dit kan ernstige gevolgen hebben voor het menselijk lichaam. De gezondheidseffecten zullen zich, door het zuurstoftekort, vaak als eerste voordoen bij organen met een hoog zuurstofverbruik, zoals de hersenen en het hart.

De algemene concentraties van koolstofmonoxide in de binnenlucht bevinden zich binnen het bereik van 0,1 tot 4 mg/m³. Dit blijkt uit figuur 1 die de resultaten van drie verschillende onderzoeken samenvat.



Figuur 1: Samenvattende resultaten drie verschillende onderzoeken
(Kotzias, D. et al., 2005)

(Gezondheid en milieu, 2018; De Gids, 2012; Vlaamse Milieumaatschappij, 2018; Eduardo de Oliveira et al., 2009; WHO, 2010; Kotzias, D. et al., 2005)

Formaldehyde CH₂O

Formaldehyde is een kleurloos, geurig, brandbaar, vluchtig en organisch gas. Het is doorgaans altijd in grotere mate aanwezig in de binnenlucht dan in de buitenlucht en is dan ook al gedurende een lange tijd een uitgebreid bestudeerd pollutant binnenshuis. In een oplossing heeft formaldehyde een breed scala aan toepassingen: bij de productie van harsen en textiel, als ontsmettingsmiddel en als een fixermiddel of conserveringsmiddel in consumentenproducten (SIS, 2003). Hiernaast staat formaldehyde ook vooral bekend om het gebruik in geperste houtproducten als kleefhars. Met de toename van kwaliteitsverbetering van zowel bouw als inrichtingsmaterialen, vormt formaldehyde de laatste jaren bijna geen probleem meer in woningen.

Formaldehyde is zodanig makkelijk oplosbaar in water dat het ingeademde formaldehyde, aanwezig in de lucht, geabsorbeerd wordt in het ademhalingsstelsel. Klachten door blootstelling aan formaldehyde zijn voornamelijk irritaties en ontstekingen van de oogslimvliezen en bovenste luchtwegen (Gezondheid en milieu, 2018). Langdurige blootstelling kan leiden tot de ontwikkeling van kanker in de neus en keelholte. Daarnaast werd ook aangetoond dat er een verband is tussen enerzijds de blootstelling aan formaldehyde en anderzijds neusholte kanker en eventueel leukemie. Maar doorslaggevend bewijs hiervoor werd nog niet geleverd.

De gemiddelde concentratie waarin formaldehyde aanwezig is in de binnenlucht schommelt in normale omstandigheden tussen 25 en 60 µg/m³. Deze concentratie is over het algemeen enkele malen hoger dan de buitenconcentraties.

(De Gids, 2012; Eduardo de Oliveira et al., 2009; Kotzias, D. et al., 2005; WHO, 2010; WHO, 2000)

Naftaleen $C_{10}H_8$

Naftaleen is in zijn zuivere vorm een wit kristallijn poeder met een aromatische geur. Het wordt gebruikt als tussenproduct in diverse producten zoals ter bestrijding van motten of in smeerolie. Hiernaast bevat ook benzine en dieselbrandstoffen naftaleen. Naftaleenemissies naar de atmosfeer zijn dan ook voornamelijk afkomstig van uitlaatgassen van motorvoertuigen. De concentraties in het binnenmilieu van naftaleen zijn voornamelijk afkomstig van de buitenlucht, maar kunnen verhoogd worden door ongeventileerde kerosineverwarmers en tabaksrook. (EPA, 2003, HSDB, 2003)

Naftaleen kan opgenomen worden via inhalatie, dermale en orale blootstelling. Blootstellingen aan deze stof leiden tot bloedarmoede. Dit is een tekort aan rode bloedcellen. Enkele van de symptomen die optreden bij deze aandoening zijn vermoeidheid, gebrek aan eetlust, rusteloosheid en een bleek uiterlijk van de huid.

(Eduardo de Oliveira et al., 2009; Kotzias, D. et al., 2005; WHO, 2010; GHS, 2018; WHO, 2018)

Stikstofdioxide NO_2

Stikstofdioxide is een uitgebreid bestudeerde stof. In zuivere vorm komt het voor als een roodachtig bruin, sterk oxiderend gas met een karakteristieke doordringende geur. Stikstofdioxide heeft een lage dampspanning waardoor het in normale omgevingscondities als een gas zal bestaan. Stikstofdioxide komt voornamelijk voort uit verbrandingsprocessen. Het is, naast de nadelige gezondheidseffecten voor de mens, wel een belangrijk atmosferisch gas. Het zorgt voor het absorberen van zonnestraling waardoor het bijdraagt aan de zichtbaarheid in de lucht. Het zou een rol kunnen spelen bij de wereldwijde klimaatverandering en is samen met stikstofmonoxide (NO) een hoofdregelaar van de oxiderende capaciteit van de vrije troposfeer en ozonconcentraties in de troposfeer (WHO, 2000). Gasfornuizen en gaskachels zonder afzuigkappen zijn belangrijke bronnen in de binnenlucht. Hierdoor vinden de hoogste concentraties aan NO_2 binnenshuis meestal plaats in keukens.

Omdat stikstofdioxide voornamelijk als gas voorkomt is de voornaamste blootstellingswijze van de mens aan deze stof door middel van inhalatie. Blootstelling aan deze stof heeft voornamelijk gevolgen voor het ademhalingsstelsel.

(Eduardo de Oliveira et al., 2009; Kotzias, D. et al., 2005; WHO, 2010)

Radon Rn

Radon is van natuurlijke oorsprong een kleurloos edelgas. Aangezien we spreken van een edelgas zal het vrijwel geen enkele chemische verbinding aangaan met andere materialen. Radongas is daarentegen wel een radioactieve stof en heeft verschillende isotopen. Het meest stabiele isotoop is radon-222.

Radon op zich is ongevaarlijk voor de gezondheid, maar uit het radongas ontstaan echter andere (niet-gasvormige) radioactieve stoffen. Deze stoffen hechten zich aan rondzwevende stofdeeltjes waardoor ze vervolgens ingeademd kunnen worden en zich vastzetten op het longweefsel. Dit weefsel kan, door de afgifte van stralingen bij verder verval van deze stoffen, beschadigd worden waardoor na enige tijd longkanker kan ontstaan. Volgens de wereldgezondheidsorganisatie (WHO) is radongas, in veel landen, na tabak de belangrijkste oorzaak van kanker.

Het radongas in de lucht is grotendeels afkomstig van gesteenten in de bodem. Deze bevatten een welbepaald gehalte van uranium waaruit uiteindelijk radon gevormd wordt. Omdat het gehalte radon aanwezig in de lucht voornamelijk afhankelijk is van het gesteente waarop de woning gebouwd is, zijn radonconcentraties binnenshuis sterk variërend van de plaats waar de woning gebouwd is. De laatste jaren is er wel een belangrijke daling aan radonconcentraties waargenomen. Dit kan worden verklaard door het feit dat bouwmaterialen duidelijk minder radon afscheiden dan voorheen. De grenswaarden die in het algemeen internationaal worden gesteld, liggen rond de 50 tot 100 Bq/m³.

(De Gids, 2012; Eduardo de Oliveira et al., 2009; Kotzias, D. et al., 2005; WHO, 2010)

Trichlooretheen C_2HCl_3

Trichlooretheen of trichlooretheen is een kleurloze, giftige, niet ontvlambare en vluchtige vloeistof met een karakteristieke geur. Trichlooretheen komt in de binnenlucht voor door het gebruik als oplosmiddel bij producten zoals verfabijtmiddelen en bepaalde reinigingsmiddelen.

Er zijn drie belangrijke blootstellingsroutes aan trichlooretheen, namelijk inhalatie, huidabsorptie en wateropname. Inhalatie is de belangrijkste blootstellingsroute voor de algemene bevolking. Dit is vooral te wijten aan het vluchtige karakter van trichlooretheen, waardoor het snel in de binnenlucht terecht komt. Trichlooretheen heeft verschillende gevolgen voor de gezondheid van de mens na blootstelling. De belangrijkste gevolgen zijn neurotoxisch en carcinogeen. Zo kan het leiden tot de vorming van leverkanker, nierkanker,

(Gezondheid en Milieu, 2018; WHO, 2010).

Tetrachlooretheen C_2Cl_4

Tetrachlooretheen, of ook wel nog tertachlooretheen en perchlooretheen genoemd, is een vluchtige en kleurloze stof. Het breekt traag af in het milieu en is weinig oplosbaar met water. Deze stof wordt voornamelijk gebruikt voor industriële toepassingen zoals reinigingsmiddel in droogkuisinstallaties, maar ook als ontvetter van metalen. (Hazardous Substances Data Bank, 2010)

Wanneer mensen blootgesteld worden aan hoge concentraties van korte duur kan duizeligheid, slaperigheid en tekenen van dronkenschap waargenomen worden. Wanneer men gedurende een lange tijd blootgesteld wordt aan hoge concentraties kunnen effecten waargenomen worden op de hersenen en het zenuwstelsel onder de vorm van verminderde neuromotorische functies en veranderende kleurgewaarwording. (Gezondheid en Milieu, 2018; WHO, 2010)

Acetaldehyde C_2H_4O

Acetaldehyde of ethanal is een organische verbinding die als kleurloze, vluchtige en licht ontvlambare vloeistof voorkomt met een scherpe geur. Als vloeistof is het lichter dan water, maar de dampen zijn zwaarder dan lucht. Het is één van de belangrijkste aldehyden die vaak voorkomen in de natuur en op grote schaal worden geproduceerd in de industrie. Acetaldehyde komt van nature voor in brood, koffie en rijp fruit (Uebelacker, M. & Lachenmeier, D. ,2011).

De belangrijkste gezondheidseffecten van acetaldehyde zijn te wijten aan de blootstelling na inhalatie. Bij een acute blootstelling aan matige concentraties acetaldehyde wordt irritatie van de ogen, de luchtwegen, het darmkanaal en een veranderde ademhalingsfunctie waargenomen. Een langdurende blootstelling aan acetaldehyde kan leiden tot chronische weefselbeschadiging en ontsteking in de luchtwegen. Het vermoeden is dat blootstelling aan deze stof leidt tot de ontwikkeling van kankers.

(Kotzias, D. et al., 2005; GHS, 2018; WHO,2018)

Ozon O_3

Ozon is bij omgevingstemperaturen en -druk een kleurloos tot lichtblauw gas met een onaangename prikkelende geur. Het speelt in allerlei opzichten een belangrijke rol. Er kan namelijk op twee verschillende hoogtes ozon aangetroffen worden in de lucht. De eerste plaats is hoog in de lucht, in de stratosfeer. Hier is er een tekort aan ozon aanwezig waardoor het ook wel eens benoemd wordt met het gat in de ozonlaag. De tweede plaats bevindt zich dicht bij de grond. Hier is ozon een ongewenst pollutant die gevormd wordt door de combinatie van luchtvervuiling, warmte en zonlicht. Dat is de beruchte ozonsmog die elk jaar weer toeslaat. In deze studie is enkel de ozon dat voorkomt dicht bij het aardoppervlak van belang. (Milieusite, 2018)

Ozon is hoofdzakelijk een secundair pollutant. Dit betekent dat het niet rechtstreeks uitgestoten wordt in de lucht maar het in de lucht zelf gevormd wordt door middel van fotochemische reacties. Deze reactie houdt in dat onder invloed van het zonlicht op warme dagen ($>25^{\circ}C$) stikstofoxiden en vluchtige koolwaterstoffen met elkaar reageren tot ozon. Dit is dan ook de reden waarom ozon voornamelijk voorkomt in hoge concentraties bij zonnig en warm weer met weinig wind. De twee basiselementen, namelijk stikstofoxiden (NO_x) en vluchtige organische stoffen (VOS), worden de precursoren genoemd. Hiernaast spelen ook nog koolstofmonoxide en methaan een rol, echter wel in mindere mate. Om de vorming van ozon tegen te gaan dient een globale vermindering van de uitstoot van precursoren gerealiseerd te worden.

Ozon komt voornamelijk via ingeademde lucht het menselijk lichaam binnen en heeft een negatieve impact op de gezondheid van de mens. Door het oxiderend vermogen van ozon kan een verminderende longfunctie optreden. Hiernaast kan ozon samen met enkele andere elementen uit de zomersmog, waaronder peroxyacetylnitraat (PAN), verschillende andere gezondheidsklachten veroorzaken zoals onder andere prikkelende ogen, hoesten en irritatie van de slijmvliezen. Naast de gevolgen voor de mens lijdt ook de natuur onder een verhoogde concentratie van ozon.

(Ukkel, 2018; Charles J. W., 2000; Health Canada, 2010)

2.1.2.2 Particles

Fijn stof



Figuur 2: Indeling fijn stof
(VMM, 2018)

Zwevend stof (PM = Particulate Matter) is een mengsel van vloeibare en/of vaste deeltjes met uiteenlopende samenstellingen en afmetingen. Er wordt gesproken van fijn stof wanneer zwevende deeltjes in de lucht kleiner zijn dan 10 micrometer, waardoor ze makkelijk ingeademd kunnen worden. Zowel de natuur als menselijke activiteiten kunnen een bron zijn van deze deeltjes.

Zwevend stof wordt verder nog eens ingedeeld in twee groepen. De eerste groep is op basis van de oorsprong van de deeltjes, namelijk de primaire en de secundaire deeltjes. De primaire deeltjes ontstaan door rechtstreekse uitstoot in de atmosfeer door verschillende soorten bronnen of door mechanische verkleining van grover materiaal. Anderzijds zijn er de secundaire deeltjes. Deze deeltjes zijn ontstaan in de atmosfeer door chemische of fysische reacties uit gasvormige componenten zoals ammoniak, zwaveldioxide, stikstofoxiden of organische verbindingen. De tweede groep is op basis van de grootte van de deeltjes, namelijk TSP, PM10, PM2,5 en UFP. De grootte van de deeltjes wordt uitgedrukt in de aerodynamische diameter (a.d.). Dit is de diameter van een bolvormig deeltje dat in de omgevingslucht hetzelfde gedrag vertoont als het stofdeeltje. In tabel 2 en figuur 2 zijn de verschillende onderverdelingen aanwezig met telkens een korte beschrijving.

Tabel 2: Fijn stof
(VMM, 2018)

TSP	De totale hoeveelheid stof in de lucht
PM10	Deeltjes met een a.d. kleiner dan 10 µm
PM2,5	Deeltjes kleiner dan 2,5 µm
UFP	Ultrafijn stof: deeltjes met een a.d. kleiner dan 0,1 µm
Zwarte koolstof	Maat voor roetconcentratie in de buitenlucht

Zwarte koolstof of elementaire koolstof is een maat voor de roetconcentratie in de omgevingslucht. Roet ontstaat bij de onvolledige verbranding van fossiele brandstoffen, biomassa en biobrandstof. Wanneer de metingen op een optische manier verlopen, dus door te meten hoe 'zwart' een filter is, spreken we van zwarte koolstof. Als de meting op een andere manier verloopt, dan is er sprake van elementair koolstof.

Afhankelijk van de grootte van de deeltjes kennen ze een verschillend gedrag in de lucht. Grotere deeltjes worden, door middel van de zwaartekracht, snel neergeslagen op de grond of uitgespoeld door regen, nadat ze in de atmosfeer terechtgekomen zijn. Ze kunnen wel weer in de lucht terechtkomen door heropwaaien, dit fenomeen noemt men resuspensie. De fijnere deeltjes kunnen veel langer in de lucht aanwezig blijven, van enkele dagen tot enkele weken. Bijgevolg kunnen deze fijnere deeltjes over langere afstanden getransporteerd worden.

Over het algemeen kan men stellen dat de concentratie aan fijn stof voor de binnenlucht, zonder de aanwezigheid van verbranding en roken in de woning, lager is dan deze van de omgevingslucht. Hiernaast zal binnenlucht meer grove minerale deeltjes bevatten en minder secundaire verbrandingsdeeltjes dan buitenlucht op dezelfde locatie. Roken zorgt ervoor dat de hoeveelheid fijne deeltjes binnenshuis met 50% of meer verhoogt.

(Eduardo de Oliveira et al., 2009; VMM, 2018; Vlaamse Milieumaatschappij, 2018)

Vocht en Microbiologische polluenten

De lucht die zich continue rondom ons bevindt, bestaat naast chemische stoffen ook nog uit zeer minuscule levensvormen. Deze levende organismen vormen de microbiologische polluenten in de lucht en bestaan voornamelijk uit bacteriën, virussen, schimmels, zwammen, huisstofmijten en dierlijke allergenen. Ze kunnen zich eenvoudig verder ontwikkelen en groeien in een welbepaald temperatuurbereik met de aanwezigheid van voedingsstoffen en zuurstof. De limiterende factor voor de ontwikkeling van deze organismen is de aanwezigheid van vocht in materialen of lucht, met een minimum van minstens 70 tot 80% relatieve vochtigheid. Microbiologische polluenten komen vaak voor in woningen waarbij het vocht, geproduceerd door de gebruikers en de activiteiten, zoals douches en koken, vaak onvoldoende afgevoerd wordt door de ventilatie. Dit leidt tot een verhoogd vochtgehalte in de lucht en hygroscopische materialen waardoor schimmelvorming bevorderd wordt. Hiernaast kunnen ook vochtproblemen zoals bouwvocht, opstijgend vocht, infiltratie en condensatie ter hoogte van een koudebrug de oorzaak vormen voor de ontwikkeling van deze micro-organismen.

Aanwezigheid van deze micro-organismen binnenshuis kunnen verschillende gezondheidsproblemen veroorzaken, zoals irritaties aan de ogen, keel en huid, allergische tot toxische reacties die zich uiten in de vorm van ademhalingsmoeilijkheden, astma, hoofdpijn, griepsymptomen en in bepaalde gevallen zelfs infecties.

(WHO, 2009; Vlaamse Milieumaatschappij, 2018)

2.2 Selectie stoffen

Uit de uitgebreide lijst van stoffen die hierboven werd beschreven worden slechts enkele stoffen tijdens dit onderzoek in beschouwing genomen. Dit omdat enerzijds de tijd beperkt is om deze stoffen allemaal uit te werken en anderzijds omdat de buitenconcentraties, die vereist zijn voor dit onderzoek, niet van alle stoffen beschikbaar is. De stoffen waarvan de buitenconcentraties gekend zullen zijn, zijn stikstofdioxide, ozon en de twee fracties van fijn stof, PM10 en PM2.5. Vervolgens zijn koolstofdioxide samen met waterstof nog twee belangrijke stoffen die belangrijk zijn voor de sturing van de huidige ventilatiesturingen. Omdat hoge concentraties waterstof in gebouwen gepaard gaat met een verhoogd risico op microbiologische verontreinigingen wordt dit hier ook verder in beschouwing genomen. Voor elk van de hier opgenoemde stoffen wordt in dit onderdeel besproken waar ze hun oorsprong vinden gevolgd door bespreking welke gevolgen ze hebben op de gezondheid van de mens. Maar eerst en vooral worden enkele algemene zaken omtrent bronnen en gezondheid beschreven.

Bronnen

Een grote invloedsfactor voor de aanwezigheid van welbepaalde pollutanten en hun concentraties in de lucht is de aanwezigheid van bronnen. Ze zullen ervoor zorgen dat pollutanten in de lucht uitgestoten worden. Er dient hier een belangrijk onderscheid gevormd te worden tussen enerzijds de bronnen die zich in het binnenmilieu bevinden en anderzijds de bronnen die zich in het buitenmilieu bevinden. Het eerste type, de bronnen binnenin de woning, hebben een veel grotere invloed op de binnenluchtkwaliteit dan deze van het tweede type. Dit kan verklaard worden door het feit dat deze bronnen zorgen voor rechtstreekse uitstoot van pollutanten in de binnenlucht zonder de sterke verdunning die andere pollutanten, uitgestoten door de buitenbronnen, wel ondergaan. Hierdoor wordt in het vervolg van dit onderdeel vooral dieper ingegaan op de bronnen binnenshuis. Voor beide types kunnen enkele belangrijke algemene bronnen opgesteld worden. Voor de buitenbronnen zijn dit:

- De industrie
- Het verkeer
- De land- en tuinbouw en de natuur
- Verwarming woningen
- De energiesector

Voor de bronnen binnenshuis kunnen er drie algemene types van bronnen onderscheiden worden. Deze zijn:

- Bouw- en inrichtingsmaterialen:
 - Steenachtige materialen (radon)
 - Isolatiemateriaal (VOC en formaldehyde)
 - Hout (formaldehyde)
 - Plastic (VOC)
 - Behang (VOC)
 - Gordijnen (VOC)
 - Meubilair (formaldehyde)
- Menselijk gedrag en hun dagelijkse handelingen:
 - Vocht bij onder andere koken, wassen, douchen en het drogen van de was binnenshuis (vocht)

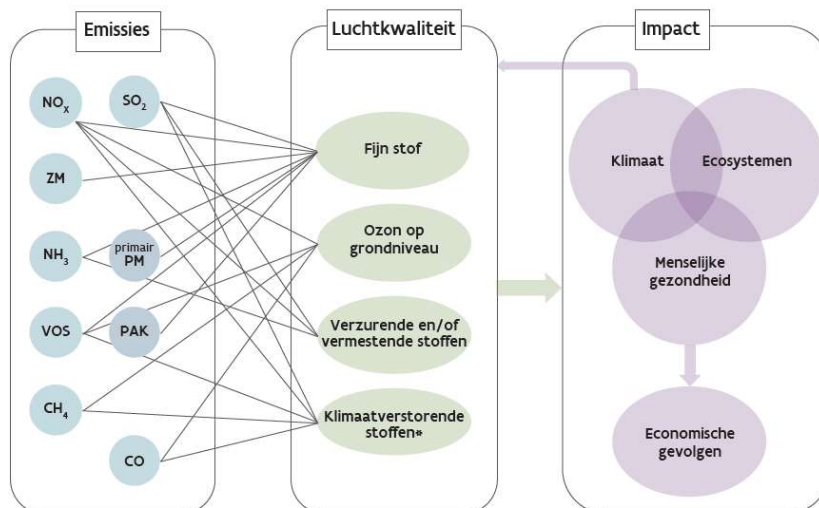
- Het gebruik van huishoudelijke apparatuur
- Kook- en bakplaten (vocht, vet en fijn stof)
- Ovens (fijn stof)
- Warmwatergeiser (CO en NO₂)
- Menselijke afscheidingsproducten (bio-effluenten)
- Interne verbrandingsgassen: open haarden, CV ketels, boilers, koken, ovens, geisers en kaarsen (NO_xen fijn stof)
- Emissies van HVAC installaties (fijn stof, bacteriën, virussen)
- Producten die geconsumeerd worden door de mens:
 - Chemische verbindingen die vrijkomen bij persoonlijke verzorging (VOC):
 - Crèmes
 - Nagel- en haarlakken
 - Onderhoudsmiddelen (VOC)
 - Verf
 - Beits
 - Lak
 - Schoonmaakmiddelen (VOC)
 - Toiletreiniger
 - Wasmiddelen
 - Oplosmiddelen

(De Gids, 2012)

Gezondheidseffecten

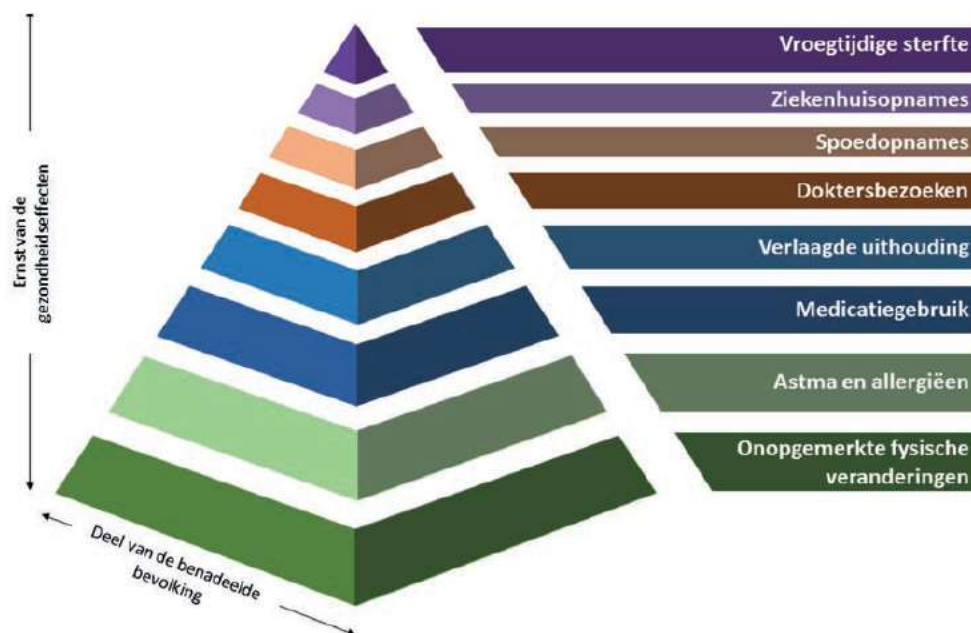
De aanwezigheid van verschillende pollutanten in de lucht zullen een effect hebben op zowel de menselijke gezondheid, het klimaat en het ecosysteem. De uitstoot van luchtverontreinigende stoffen beïnvloeden de luchtkwaliteit op meerdere manieren, zoals op figuur 3 te zien is. Een voorbeeld hiervan is de uitstoot van ammoniak. Dit zal, naast een verhoging van de concentratie ammoniak in de lucht, een invloed hebben op de luchtconcentratie van fijn stof en verzurende en vermestende stoffen. Verzuring is het proces dat zorgt voor het verzuren van de bodem en het water ten gevolge van stikstof- en zwavelverbindingen uit de lucht. Het leidt tot de vorming van fijn stof, ozon en wintersmog en tast het milieu en gebouwen aan. Hiernaast is vermesting het gevolg van een overmaat aan nutriënten waardoor een verstoring van ecologische processen en natuurlijke kringlopen wordt veroorzaakt (VMM, 2018).

In de omgekeerde richting kan ook de luchtconcentratie van een pollutant afhangen van de emissie van meerdere stoffen. Zo wordt fijn stof in de lucht zowel beïnvloed door de uitstoot van primair fijn stof en zware metalen, als door de uitstoot van gassen die secundair fijn stof vormen, zoals ammoniak, zwaveldioxide, stikstofoxiden en organische verbindingen.



*Figuur 3: Impact van luchtverontreinigende stoffen
(Vlaamse Milieumaatschappij, 2018)*

De invloed van deze pollutanten op de gezondheid kan verscheidene vormen aannemen, van het onschuldig hoesten tot het veroorzaken van chronische aandoeningen. Soms zijn ook hartaandoeningen te wijten aan vervuilde lucht. Verder heeft luchtvervuiling een nadelig effect op de zwangerschap bij vrouwen en op het geboortegewicht van hun baby's. De bovengenoemde gezondheidsaandoeningen, door toedoen van vervuilde lucht, kan verder aangevuld worden door een lange lijst aandoeningen. Deze aandoeningen worden gerangschikt in de piramide die de gezondheidssimpact van luchtvervuiling visueel voorstelt. De rangschikking wordt weergegeven in figuur 4. (Vlaamse Milieumaatschappij, 2018)



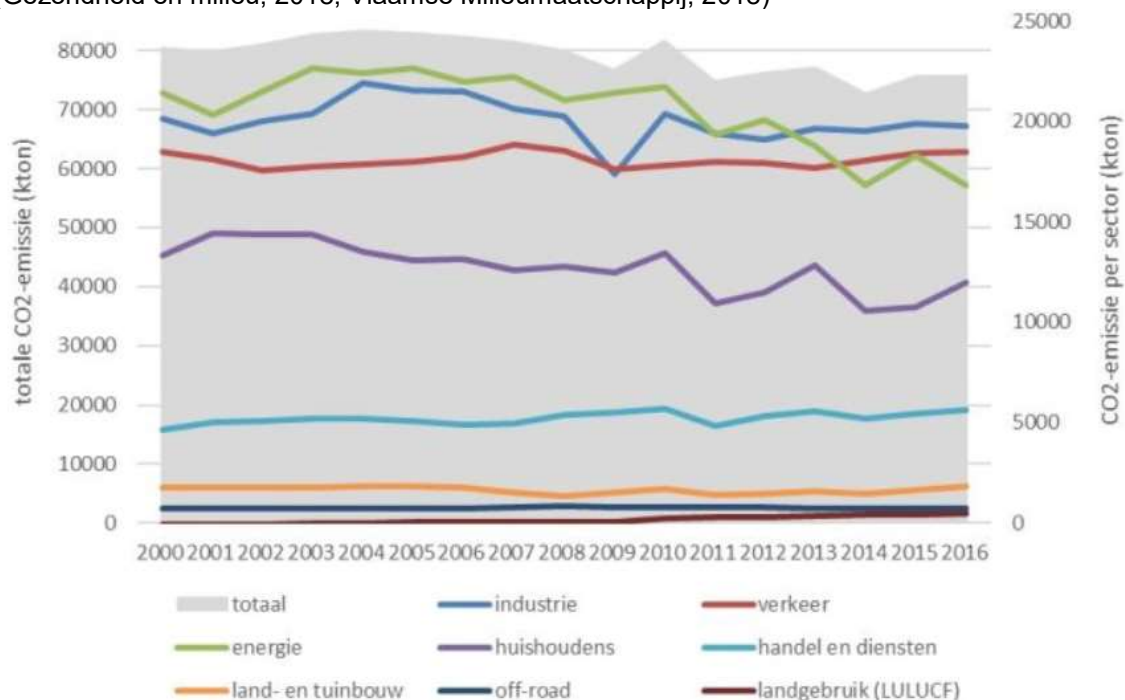
*Figuur 4: Piramide van gezondheidseffecten door luchtvervuiling
(Vlaamse Milieumaatschappij, 2018)*

2.2.1 Koolstofdioxide

2.2.1.1 Bronnen

CO₂ kan afkomstig zijn van enerzijds natuurlijke afkomst en anderzijds van menselijke afkomst. De natuurlijke oorsprong van koolstofdioxide kan gebeuren op drie manieren, als eerste vulkanische activiteit, als tweede door afbraak van organisch materiaal (planten- en dierenresten), en als laatste door de uitwisseling van CO₂ tussen oceaan en atmosfeer. Daar tegenover staat de uitstoot van CO₂ ten gevolge van menselijke activiteiten. De twee voornaamste bronnen van menselijke oorsprong zijn de verbranding van koolstofhoudende stoffen, zoals fossiele brandstoffen, en elk levend wezen door middel van de ademhaling. Als de uitstoot per sector vergeleken wordt (figuur 5) kan besloten worden dat de voornaamste sectoren die zorgen voor de uitstoot van koolstofdioxide de industrie en energiesector zijn. Deze twee sectoren zijn verantwoordelijk voor maar liefst 50% van de totale CO₂-emissies in Vlaanderen. Hiernaast speelt ook het wegverkeer een belangrijke rol in de totale CO₂-emissies naar de atmosfeer.

(Gezondheid en milieu, 2018; Vlaamse Milieumaatschappij, 2018)



Figuur 5: CO₂-uitstoot per sector en totale CO₂-uitstoot
(Vlaamse Milieumaatschappij, 2018)

Stoffen afkomstig van menselijk gedrag en hun dagelijkse handelingen

De mens zelf zal zorgen voor de uitstoot van CO₂ door de ademhaling. Een persoon genereert per dag ongeveer 1 kg CO₂. Hiernaast is een andere belangrijke bron binnenshuis de verbrandingsreacties. Wanneer een verstoorde of slecht werkende afzuiging van de verbrandingstoestellen plaatsvindt kunnen er grote hoeveelheden koolstofdioxide in de binnenlucht gebracht worden.

(Gezondheid en milieu, 2018)

2.2.1.2 Gezondheid

Absorptie

Mensen worden blootgesteld aan koolstofdioxide door middel van inhalatie van deze stof die aanwezig is in de lucht.

Gezondheidseffecten

De hoeveelheden koolstofdioxide die voorkomen in de lucht heeft geen onmiddellijk risico op de menselijke gezondheid. Pas als de concentratiewaarden hoger dan 1000 ppm liggen, kunnen gezondheidsklachten zoals hoofdpijn, slaperigheid en duizeligheid optreden. Echter bij concentraties boven 5000 ppm zijn de gevolgen voor de gezondheid ernstig waarbij toxiciteit of zuurstofgebrek kunnen optreden.

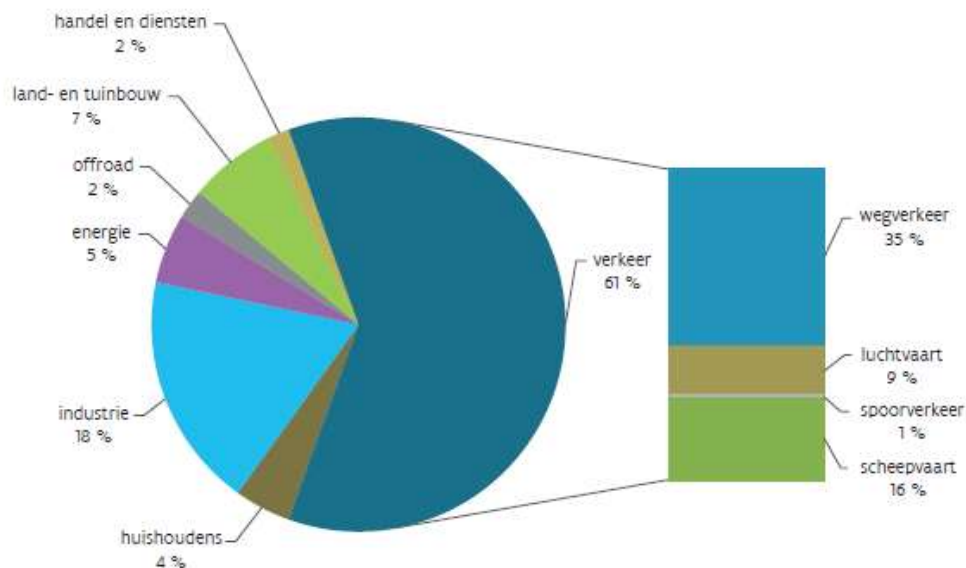
(Gezondheid en milieu, 2012; WHO, 2018)

2.2.2 Stikstofdioxide

2.2.2.1 Bronnen

De belangrijkste menselijke bronnen van stikstofdioxide in de buitenomgeving zijn verbrandingsprocessen. Bij deze processen speelt de temperatuur een bepalende rol voor de vorming van de oxiden van het stikstof. Hoe hoger de verbrandingstemperatuur, hoe meer stikstofoxiden worden gegenereerd en hoe minder stikstofdioxiden gevormd worden. In de meeste gevallen zal 90-95% van de stikstofoxiden worden uitgestoten als stikstofmonoxide en slechts 5-10% als stikstofdioxide. Zo zal bij fossiele brandstofcentrales, motorvoertuigen en huishoudelijke verbrandingsapparatuur voornamelijk stikstofmonoxide (NO) uitgestoten worden. Dit stikstofmonoxide is een sterk reactieve verbinding die in de atmosfeer snel overgaat tot stikstofdioxide. Omgevingsconcentraties van NO₂ in stedelijke gebieden pieken tijdens de ochtend vanwege de toegenomen uitstoot van NO door motorvoertuigen (WHO, 1997, WHO, 2000).

De totale uitstoot van NO₂ bedroeg in 2016 in Vlaanderen 136.229 ton. Het aandeel van elke sector in deze totale uitstoot van stikstofdioxide is voorgesteld in het diagram van figuur 6. Hierop is duidelijk zichtbaar dat het verkeer de grootste boosdoener is met een percentage van 61% waarbij het wegverkeer (35%) de grootste bron is. Vervolgens was de industrie de tweede grootste vervuilende sector (18%). Op de derde plaats staat de land- en tuinbouwsector met 7 % waarbij 75% afkomstig is van het gebruik van meststoffen op de akkers. (Vlaamse Milieumaatschappij, 2018)



*Figuur 6: Aandeel sectoren in totale NO_x-emisie in Vlaanderen in 2016
(Vlaamse Milieumaatschappij, 2018)*

Stoffen afkomstig van menselijk gedrag en hun dagelijkse handelingen

Over het algemeen kan gesteld worden dat de belangrijkste bron van NO₂ in de binnenomgeving verbrandingstoestellen zijn op basis van gas, hout, olie, kerosine en kolen. De NO₂ uitstoot in de binnenlucht is hierbij voornamelijk te wijten aan een slecht onderhoud of foutieve afstelling. Vooral de gasfornuizen met waakvlam vormen een sterke bron binnenshuis. Ze zorgen voor een stijging van de NO₂-concentraties met een factor 2 tot 5 in vergelijking met woningen met elektrische kachels. Hierdoor zal in de winter, wanneer het gebruik van gasverwarming toeneemt, de ventilatiesnelheden dalen en de buitenconcentraties stijgen, de stikstofdioxide concentraties sterk stijgen.

(Kotzdias et al., 2005; WHO, 2010)

2.2.2.2 Gezondheid

Absorptie

De voornaamste blootstellingwijze aan stikstofdioxide is door middel van ingeademde lucht. Dit omdat bij omgevingscondities deze stof in zijn gasvormige toestand aanwezig is in de lucht. In uitzonderlijke situaties, vooral in industriële omgevingen na een accidenteel contact met hoge gasvormige stikstofdioxideconcentraties, kan contact met de ogen leiden tot oogirritatie. Geïnhaleerd stikstofdioxide bereikt eenvoudig de onderste luchtwegen waaronder de bronchioli en alveoli van de longen. In deze zones lost het op in longvloeistoffen, waar het langzaam hydrateert tot salpeterig- (HNO₂) of salpeterzuur (HNO₃). Deze stoffen dissociëren zich vervolgens in nitriet (NO₂⁻) of nitraat (NO₃⁻) ionen, die snel worden opgenomen in het longepitheel. NO₂ doet dienst als sterk oxidatiemiddel waardoor het reageert met onverzadigde lipiden en functionele eiwitten in cellen. Dit leidt tot een verlies van de cel-doorlaatbaarheid.

Gezondheidseffecten

Een sterke blootstelling voor een korte periode aan stikstofdioxide heeft gevolgen voor de longfunctie. De concentraties moeten wel hoger zijn dan $1880 \mu\text{g}/\text{m}^3$ om veranderingen in de longfunctie bij gezonde volwassenen te induceren (U.S.EPA, 1993; Berglund, 1993; Wagner, 1985). Omdat deze concentraties bijna niet voorkomen in de binnenlucht wordt vooral aandacht besteed aan de effecten van stikstofdioxide bij mensen die al lijden aan een bestaande longziekte. Verschillende literatuurstudies handelen over mensen met astma, chronisch obstructieve longziekte of chronische bronchitis waarin aangetoond werd dat een blootstelling aan lage niveaus stikstofdioxiden verminderingen in vitale capaciteit en expiratoir volume in 1 seconde of toenames in luchtwegweerstand kunnen veroorzaken.

Naast invloed op de longfunctie heeft de NO_2 -blootstelling een invloed op de allergenen bij astmapatiënten. Uit verschillende recente onderzoeken bleek dat lage blootstellingen aan NO_2 zorgen voor een verhoogde gevoeligheid voor allergenen.

Een langdurige blootstelling van enkele weken tot maanden aan stikstofdioxide concentraties van minder dan $1880 \mu\text{g}/\text{m}^3$ kunnen leiden tot een overvloed aan effecten, voornamelijk in de longen, maar ook in andere organen zoals de milt, lever en bloed. Zelfs stikstofdioxidegehalten die schommelen rond de waarde $940 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hebben een invloed op de gezondheid. Het leidt tot het verhogen van de gevoeligheid voor bacteriële en virale infecties van de longen. Over het effect van stikstofdioxide op de ontwikkeling van kanker is in de literatuur geen directe verwijzing aanwezig, ook in de indeling van het IARC en het GHS is ozon niet opgenomen.

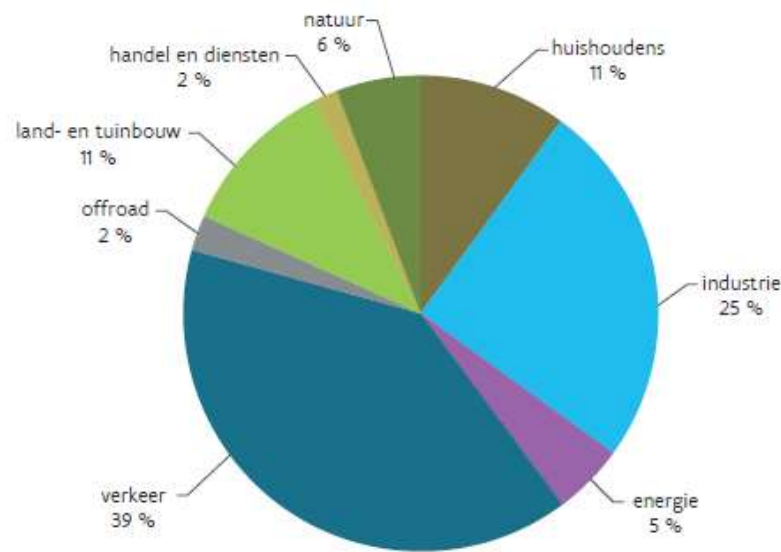
(Eduardo de Oliveira et al., 2009; Kotzias, D. et al., 2005; WHO, 2010; GHS, 2018; WHO, 2018)

2.2.3 Ozon

2.2.3.1 Bronnen

Ozon is voornamelijk een secundair pollutant. Dit betekent dat het niet rechtstreeks uitgestoten wordt, maar in de lucht zelf gevormd wordt door middel van vier precursors (NO_x , CO, CH_4 en NMVOS). De aanwezigheid van deze precursors in de lucht zijn dan ook een bepalende factor in welke mate ozon gevormd wordt. Er kan dus gesteld worden dat de bronnen van ozon de bronnen zijn die de uitstoot veroorzaken van deze vier precursors. Maar hierbij heeft elke precursor een verschillend aandeel in de vorming van dit ozon. Daarom wordt van elke bron hun relatieve bijdrage aan de vorming van ozon uitgedrukt via Tropospheric Ozone Forming Potential. (NO_x : 1,22; CO: 0,11; CH_4 : 0,014; NMVOS: 1).

Op figuur 7 wordt per sector aangegeven in welke mate ze verantwoordelijk zijn in de totale uitstoot van ozonvormende precursors in het jaar 2016. De grootste bron van ozonvormende stoffen is het verkeer, gevolgd door de industrie. In 2016 werd er in Vlaanderen een potentiële troposferische ozonemissie van 283 kton uitgestoten. Het verkeer was hierbij de grootste bron met een percentage van 39%. Hierna komt de industrie met een percentage van 25%. De land- en tuinbouw volgt als derde grootste speler (11 %), gevolgd door de huishoudens (10%). De andere sectoren spelen slechts een kleinere rol.



*Figuur 7: Aandeel sectoren in totale troposferische ozonemissie in vlaanderen in 2016
(Vlaamse Milieumaatschappij, 2018)*

Wat betreft de binnenomgeving is de vorming van ozon miniem. Ozon in de binnenlucht is bijna volledig afkomstig van de buitenlucht die naar binnen werd gebracht door middel van natuurlijke luchtstromen of door middel van het ventilatiesysteem. Hierdoor zijn de ozonconcentraties binnenshuis gemiddeld de helft lager dan deze in de buitenlucht. Een bijdrage aan de ozonconcentraties in de binnenlucht kan geleverd worden door enkele apparaten zoals printers.

Stoffen afkomstig van menselijk gedrag en hun dagelijkse handelingen

Bronnen van ozon binnenshuis zijn voornamelijk te wijten aan welbepaalde apparaten. Als eerste zijn er de ozongeneratoren. Deze toestellen worden verkocht als huishoudelijke luchtreinigungsapparatuur die opzettelijk ozon produceren. Verschillende andere toestellen, die instaan voor het zuiveren van de lucht zoals de elektrostatische luchtfilters en elektrostatische stofvangers, kunnen ook ozon genereren. Door fabrikanten wordt de vorming van ozon zo veel mogelijk beperkt maar wanneer vonkvorming optreedt, kunnen deze apparaten toch tientallen ppb bijdragen aan ozonconcentraties in binnenomgevingen.

Hiernaast zullen ook printers en kopieermachines zorgen voor de productie van ozon. Dit komt omdat er gewerkt wordt met hoge elektrische spanningen die het zuurstof uit de lucht gedeeltelijk omzet in ozon (op dezelfde wijze wordt ozon gevormd tijdens onweer). In slecht verluchte ruimtes waar veel (oude) kopieertoestellen en (of) laserprinters werkzaam zijn, kunnen sterk verhoogde ozonconcentraties aanwezig zijn. De laatste generatie laserprinters en kopieerapparaten bezitten "ozonfilters" die de gevormde ozon afbreken en de restemissie tot een minimum beperken.

(Health Canada, 2010; Vlaamse Milieumaatschappij, 2018)

2.2.3.2 Gezondheid

Absorptie

Mensen worden hoofdzakelijk blootgesteld aan ozon door middel van ingeademde lucht die een welbepaalde ozonconcentratie bevat. Omdat ozon een gasvormig secundair pollutant in de lucht is, wordt er vanuit gegaan dat andere manieren van blootstelling niet mogelijk zijn.

Gezondheidseffecten

De eerste gezondheidseffecten die optreden bij blootstelling aan ozon is irritatie van het ademhalingsstelsel en de ogen samen met hoesten en het veroorzaken van hoofdpijn. Deze symptomen kunnen enkele uren na blootstelling aanhouden en kunnen zelfs pijnlijk worden. Ozon kan ervoor zorgen dat astma bij mensen erger wordt en een hogere gevoeligheid voor allergenen ontstaat. Daarnaast zorgt ozon voor ontstekingen in de longen en de beschadiging van de bekleding van de longen. Dit effect van ozon op de bekleding van de longen kan vergeleken worden met het effect van zonnebrand op de huid. Ozon beschadigt de cellen die de luchtruimtes in de long bedekken. Binnen een paar dagen worden de beschadigde cellen hersteld, net zoals onze huid op natuurlijke wijze herstelt van zonnebrand. Ozon kan ook zorgen voor het verergeren van chronische longziekten, zoals emfyseem en bronchitis.

In een onderzoek werden gezonde volwassenen blootgesteld aan concentraties ozon van 40, 80 en 120 ppb. Daarbij werden geen statistisch significante effecten opgemerkt bij het laagste blootstellingsniveau (40 ppb). Voor de concentratie van 80 en 120 ppb werden wel significante effecten waargenomen met een afname van de longfunctie en toenames van respiratoire symptomen. Over het effect van ozon op de ontwikkeling van kanker is in de literatuur geen directe verwijzing aanwezig. Ook in de indeling van het IARC en het GHS is ozon niet opgenomen, wat er op wijst dat ozon geen effect heeft op de ontwikkeling van kanker.

(Health Canada, 2010; GHS, 2018; WHO, 2018)

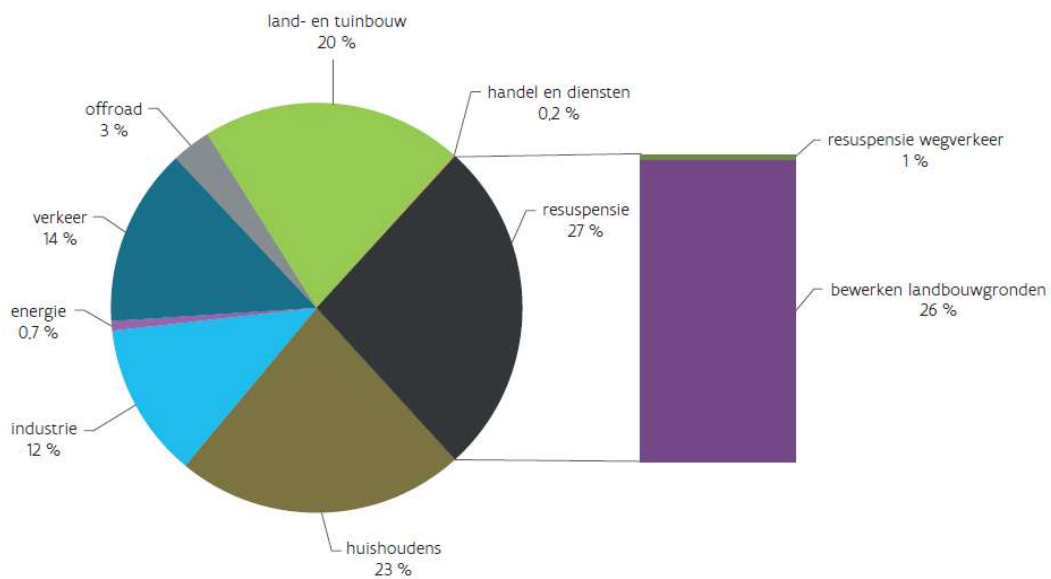
2.2.4 Fijn stof

2.2.4.1 Bronnen

De verschillende percentages in figuur 8 geven weer in welke mate de verschillende bronnen verantwoordelijk zijn voor de totale uitstoot van stof in de lucht. Op deze figuur is af te leiden dat de emissies door resuspensie (27 %), huishoudens (23 %) en land- en tuinbouw (20 %) de grootste bronnen zijn van totale hoeveelheid stof in Vlaanderen in 2016. Resuspensie wordt voornamelijk veroorzaakt door het bewerken van landbouwgronden en in mindere mate door verkeer op de rijweg. Hierdoor kan, samen met het percentage van 20%, besloten worden dat de landbouw verantwoordelijk is voor 46% van de totale hoeveelheid stof in de buitenlucht. Hierdoor is het de belangrijkste bron van stof in de lucht.

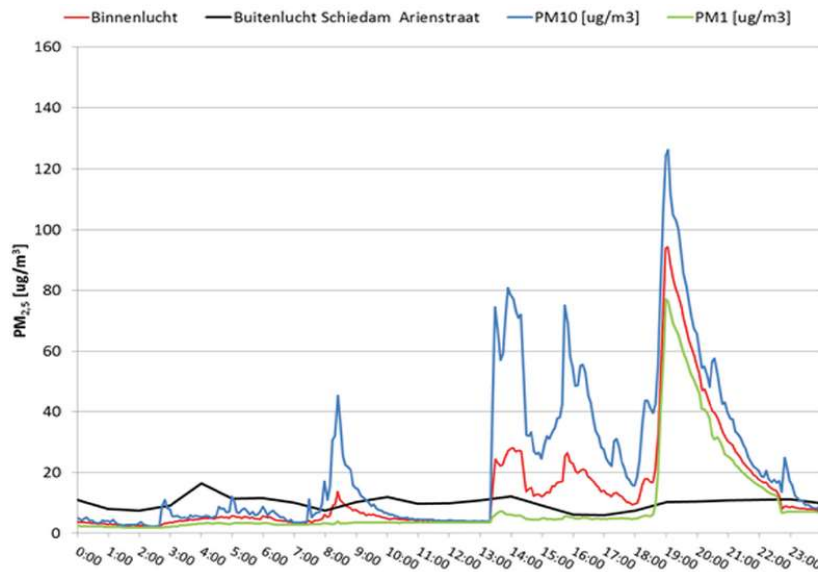
Voor de huishoudens is vooral de huishoudelijke verwarming de grootste bron van stof. De reden hiervoor is voornamelijk het gebruik van hout in kachels en open haarden voor het verwarmen van de woningen. In de winter draagt de verbranding van hout tot één derde bij aan de totale hoeveelheid stof in de winter (VMM, 2016). De 20% die toegeschreven wordt aan de landbouw is voornamelijk te wijten aan de veeteelt. Hierbij zal stof afkomstig zijn van het voederen en het ligstro van de dieren (stof met een diameter groter dan 10µm). De overige sectoren stoten vooral stof uit met een diameter kleiner dan 10 of 2,5 µm.

(Vlaamse Milieumaatschappij, 2018)



*Figuur 8: Aandeel sectoren in totale TSP-emissie in Vlaanderen in 2016
(Vlaamse Milieumaatschappij, 2018)*

Het is vooral belangrijk om dieper in te gaan op de hoeveelheden fijn stof aanwezig in de lucht, omdat deze deeltjes eenvoudig ingeademd kunnen worden en een langere tijd in de lucht aanwezig blijven. Voor dit fijn stof kan worden geconcludeerd dat de fijn stof waarden of PM-waarden voor binnenlucht (bij afwezigheid van grote bronnen fijn stof) normaal gesproken iets lager zijn dan de niveaus van de omgevingslucht, met meer grove minerale deeltjes (afkomstig van binnenbronnen) en minder secundaire en verbrandingsdeeltjes (afkomstig van buitenbronnen) dan de buitenlucht op dezelfde locatie. Dit wordt bevestigd door figuur 9 waarop de resultaten aanwezig zijn van onderzoek naar stofdeeltjes doorheen de dag. (Jacobs, 2017)



*Figuur 9: Fijn stof gehaltenes woning
(Jacobs, 2017)*

Bouwmaterialen

Normaal gesproken bevinden isolatiematerialen zich niet in directe verbinding met de binnenlucht waardoor ze weinig of geen stof in de woning kunnen binnenbrengen. Er dient wel altijd voldoende aandacht besteed te worden aan het feit dat er geen lucht via de spouwconstructie de woning mag binnenkomen en de isolatie dient altijd goed afgewerkt te zijn.

Stoffen afkomstig van menselijk gedrag en hun dagelijkse handelingen

Wanneer in de woning gerookt wordt of andere vormen van verbrandingsbronnen aanwezig zijn, vormt dit de belangrijkste bron van fijn stof. Het zorgt voor een verhoging van de niveaus binnenshuis met 50% of meer.

Naast de verbrandingsprocessen worden echter nog door verschillende andere bronnen het gehalte fijn stof in het binnenmilieu verhoogd. Het meest opmerkelijke is dat er ook bij het koken van maaltijden fijn stof vrijkomt. Zowel bij het koken, het bakken en het braden zullen deeltjes kleiner dan 1 µm uitgestoten worden. Ze zullen bijdragen aan het verhogen van de PM2.5-concentraties. In het algemeen blijkt het braden van vlees en het wokken van groenten het meeste fijn stof te genereren. Om dit te voorkomen dient een voldoende afzuigcapaciteit voorzien te worden. Naast koken zal ook het gebruik van papier en het vrijkomen van vezels uit textiel zorgen voor de uitstoot van stof. Op onderstaande figuren (figuur 10) is het fijn stofgehalte in de binnenlucht weergegeven samen met de verschillende elementen die dit fijn stof veroorzaken. Hierop is duidelijk te zien dat het koken van gerechten zorgen voor grote pieken binnen de curve. Opvallend is dat tijdens en na het koken de binnenconcentratie PM2.5 tot een factor 10 hoger is dan de buitenconcentratie. Ook het scheuren van papier, het spelen van de kinderen, het gebruik van een waterstofzuiger en de terugslag van rook uit de kachel voortonen duidelijke pieken in deze curve.

(Kotzias et al., 2005; Jacobs, 2017)



Figuur 10: Fijn stof ten gevolge van verschillende bronnen
(Jacobs, 2017)

2.2.4.2 Gezondheid

Absorptie

Fijn stof is zowel in de binnen- als de buitenlucht aanwezig, waardoor bij elke inademing een zekere hoeveelheid fijn stof in het menselijk lichaam terecht komt. Deeltjes groter dan 10 micrometer worden vastgehouden door de neus en uitgescheiden via het slijmvlies. De overige kleinere zwevende deeltjes komen bij inademing in de longen terecht. Hoe kleiner deze stofdeeltjes zijn, hoe dieper ze in de luchtwegen indringen. Het fijn stof in de longen zorgt voor schade, maar hoe is nog onduidelijk. Er wordt vanuit gegaan dat de kleine deeltjes ontstekingsreacties veroorzaken, waardoor zuurstofopname bemoeilijkt wordt.

Gezondheidseffecten

Het inademen van fijn stof kan op lange termijn aandoeningen veroorzaken aan de luchtwegen, de longen, het hart en de bloedvaten. Zo zal een langdurige blootstelling leiden tot een verminderde longfunctie, het dichtslippen van bloedvaten, het veroorzaken van hartaanvallen en een verhoogde kans op chronische luchtwegaandoeningen zoals longkanker. Ongeboren kinderen, ouderen en mensen met chronische luchtwegenziektes of hart- en vaatziektes zijn gevoeliger voor fijn stof.

Populaties met hogere blootstelling aan zwarte koolstof gedurende een lange periode lopen een groter risico op hartaanvallen en beroertes. Bovendien is zwarte koolstof geassocieerd met hypertensie, astma, chronische obstructieve longziekte (COPD), bronchitis en verschillende soorten kanker.

Uit verschillende studies blijkt dat er geen veilige ondergrens kan vooropgesteld worden waaronder de blootstelling aan fijn stof geen effect heeft op de gezondheid. De huidige EU-grenswaarden die vooropgesteld worden aan de concentratie fijn stof in de lucht zijn dan ook een compromis tussen gezondheids- en socio-economische belangen. Hoe klein de blootstelling ook is, er is altijd een meetbaar schadelijk effect op de gezondheid.

(EDF, 2018; Gezondheid en milieu, 2018; VMM, 2018)

2.2.5 Vocht en Microbiologische polluenten

2.2.5.1 Bronnen

Bronnen van vocht kunnen enerzijds een buitenliggende oorzaken hebben, zoals binnensijpelend regenwater, maar anderzijds ook van binnenuit komen, zoals een lekkende waterleiding en menselijke activiteiten (ademhaling, koken, wassen, ...). Om een beeld te kunnen vormen van de hoeveelheden vocht die mensen produceren wordt in de tabel 3 verschillende waardes weergegeven.

*Tabel 3: Voorbeelden van menselijke bronnen van vochtproductie in gebouwen
(Hoge gezondheidsraad, 2017)*

Menselijke bronnen van vocht	Vochtproductie
<i>Personen in rust</i>	<i>40 g/uur</i>
<i>Personen met matige activiteit</i>	<i>60 g/uur</i>
<i>Koken</i>	<i>2 kg/dag</i>
<i>De was drogen</i>	<i>1,5 kg/dag</i>

In onze streken heeft men vaak te maken met zichtbare schimmelvorming als gevolg van overmatig vocht. Door de goede zichtbaarheid van een schimmel wordt het bij de bevolking beschouwd als de vaakste microbiologische verontreiniging. Andere micro-organismen, die door hun geringere grootte minder opvallen, zoals schimmels komen echter vaak samen voor met deze schimmels. Hiernaast blijkt ook dat vochtigheid een belangrijke factor is voor een mijten- of kakkerlakkenplaag.

2.2.5.2 Gezondheid

Gezondheidsproblemen ten gevolge van de aanwezigheid van microbiologische verontreinigende stoffen zijn voornamelijk irritatie van de luchtwegen, astma, allergieën, luchtweginfecties en algemene symptomen zoals vermoeidheid, hoofdpijn, of spijsverteringsproblemen. De mate waarin deze gezondheidseffecten optreden zijn afhankelijk van het aanwezige micro-organisme, de gevoeligheid van het individu en de concentratie van het micro-organisme in de lucht.

De impact van microbiologische verontreinigingen in de lucht kunnen vooral voor kinderen snel aanleiding geven tot verschillende gezondheidseffecten. Blootstelling in de vroege kinderjaren kan leiden tot ontstekingen en endothele disfunctie, oxidatieve stress. Dit kan vervolgens op lange termijn leiden tot chronische, niet-besmettelijke ziekten.

(Vlaamse Milieumaatschappij, 2018)

2.3 Beoordeling luchtkwaliteit

2.3.1 Richtlijn WGO

De Wereldgezondheidsorganisatie (WGO) of in het Engels the World Health Organization (WHO) is een organisatie van de Verenigde Naties. Deze organisatie is opgericht met doel wereldwijde aspecten van de gezondheidszorg in kaart te brengen, activiteiten op het gebied van de gezondheidszorg te coördineren en de gezondheid van de wereldbevolking te bevorderen. Hierbij is de luchtkwaliteit één van de vele thema's waarrond deze organisatie onderzoek verricht. Uit dit onderzoek werden richtlijnen vastgelegd voor het bevorderen van zowel de binnenlucht- als de buitenluchtkwaliteit in Europa. Deze richtlijnen, samen met de richtwaarden en aanvullende verklarende informatie zijn een hulpmiddel voor de verschillende landen bij het uitwerken van hun nationale en regionale normen inzake luchtkwaliteit. Deze richtlijn werd dan ook vertaalt naar de Belgische wetgeving onder de vorm van het binnenmilieubesluit, die hier later aan bod komt.

In deze richtlijnen wordt een onderscheid gemaakt tussen enerzijds kankerverwekkende en niet-kankerverwekkende stoffen. Bij de niet-kankerverwekkende stoffen stelt het WHO richtwaardes op. Deze richtwaardes zijn concentraties waaronder het pollutent geen nadelig effect heeft op de gezondheid. Voor de kankerverwekkende stoffen worden geen drempelwaardes gedefinieerd waaronder de stoffen geen gevaar vormen voor de gezondheid. Hiertegenover worden termen van bijkomend risico op kanker gedefinieerd ten gevolge van de aanwezigheid van deze stoffen in de lucht. Hieronder worden bovengenoemde waardes weergegeven in tabel 4, 5, 6, 7 en 8.

(Squilbin & Davesne, 2015)

*Tabel 4: Richtwaarden WGO voor de klassieke pollutanten van de buitenlucht
(Squilbin & Davesne, 2015)*

Richtwaarden WGO voor de klassieke pollutanten van de buitenluchtkwaliteit		
Bron : WGO, 1999 en 2005		
Stof	Richtwaarde ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Duurtijd van blootstelling
SO ₂	500	10 min
	20	24 uren
	50	1 jaar
NO ₂	200	1 uur
	40	1 jaar
O ₃	160 (informatiedrempel)	1 uur
	240 (waarschuwingsdrempel)	1 uur
	100	8 uren
PM ₁₀	50	24 uren
	20	1 jaar
PM _{2,5}	25	24 uren
	10	1 jaar

Tabel 5: Richtwaarden WGO voor de (niet-klasseke) niet kankerverwekkende polluenten van de buitenluchtkwaliteit
(Squilbin & Davesne, 2015)

Richtwaarden WGO voor de (niet-klasseke) niet kankerverwekkende polluenten van de buitenluchtkwaliteit		
Bron : WGO, 1999 en 2005		
Stof	Richtwaarde ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Duurtijd van blootstelling
CO	100.000	15 min
	60.000	30 min
	30.000	1 uur
	10.000	8 uren
Cadmium (Cd)	0,005	1 jaar
Mangaan (Mn)	0,15	1 jaar
Kwik (Hg)	1	1 jaar
Platina (Pt)	-	-
Lood (Pb)	0,5	1 jaar
Vanadium (V)	1	24 uren
Koolstofdioxide (CO_2)	100	24 uren
1,2-Dichloorethaan	700	24 uren
Dichloormethaan	450	1 week
Fluoride	-	-
Formaldehyde	100	30 min
PCBs	-	-
PCDD / PCDF	-	-
Styreen	260	1 week
Watersstof sulfide	150	24 uren
Tetrachloorethyleen	250	1 jaar
Tolueen	260	1 week

Tabel 6: Richtwaarde WGO voor de kankerverwekkende polluenten van de buitenluchtkwaliteit
(Squilbin & Davesne, 2015)

Richtwaarden WGO voor de kankerverwekkende polluenten van de buitenluchtkwaliteit			
Bron : WGO, 1999 en 2005			
	Soort kanker	Concentratie	Bijkomend kankerrisico (levenslange blootstelling)
Acrylonitril	Long	$1 \mu\text{g}/\text{m}^3$	2 / 100.000
Benzeen	Bloed (leukemie)	$1 \mu\text{g}/\text{m}^3$	6 / 1.000.000
Butadieen	Veelvoudig	$1 \mu\text{g}/\text{m}^3$	-
Vinylchloride	Lever en andere	$1 \mu\text{g}/\text{m}^3$	1 / 1.000.000
PAK *	Long	$1 \mu\text{g}/\text{m}^3$	9 / 100
Trichloorethyleen	Long, Testis	$1 \mu\text{g}/\text{m}^3$	4,3 / 10.000.000
Arseen (As)	Long	$1 \mu\text{g}/\text{m}^3$	1,5 / 1.000
Chroom (IV)	Long	$1 \mu\text{g}/\text{m}^3$	4 / 100
Nikkel (Ni)	Long	$1 \mu\text{g}/\text{m}^3$	4 / 10.000
Minerale wol	Long	$1 \mu\text{g}/\text{m}^3$	1 / 1.000.000 (vezel/l) ⁻¹
Asbest	Long (voor een bevolking met 30% rokers)	$500 \text{ F}^{**}/\text{m}^3$	tussen 1 / 1.000.000 en 1 / 100.000
	Mesothelioom		tussen 1 / 100.000 en 1 / 10.000
Radon	Long	$1 \text{ Bq}/\text{m}^3$	tussen 3 / 100.000 en 6 / 100.000
* Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen, in het bijzonder benzo[a]pyreen			
** Vezels gemeten door optische methode			

Tabel 7: Richtwaarden WGO voor de niet-kankerverwekkende polluenten van de binnenluchtkwaliteit
(Squilbin & Davesne, 2015)

Richtwaarden WGO voor de niet-kankerverwekkende polluenten van de binnenluchtkwaliteit		
Bron : WGO, 2010		
	Richtwaarde ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Duurtijd van blootstelling
Koolstofmonoxide (CO)	100.000	15 min
	35.000	1 uur
	10.000	8 uren
	7.000	24 uren
Formaldehyde	100	30 min
Naftaleen	10	1 jaar
Stikstofdioxide (NO_2)	200	1 uur
	40	1 jaar
Tetrachloorethyleen	250	1 jaar

Tabel 8: Richtwaarden WGO voor de kankerverwekkende polluenten van de binnenluchtkwaliteit
(Squilbin & Davesne, 2015)

Richtwaarden WGO voor de kankerverwekkende polluenten van de binnenluchtkwaliteit			
Bron : WGO, 2010			
	Soort kanker	Concentratie	Bijkomend kankerrisico (levenslange blootstelling)
Benzeen	Leukemie	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	6 / 1.000.000
		17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 / 10.000
		1,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 / 100.000
		0,17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 / 1.000.000
PAK *	Long	1 ng/m^3	8,7 / 100.000
		1,2 ng/m^3	1 / 10.000
		0,12 ng/m^3	1 / 100.000
		0,012 ng/m^3	1 / 1.000.000
Radon	Long	1 Bq/m^3	6 / 1.000.000 (niet-rokers) en 1,5 / 1.000.000 (rokers)
		1670 Bq/m^3 (niet-rokers) 67 Bq/m^3 (rokers)	1 / 100
		167 Bq/m^3 (niet-rokers) 6,7 Bq/m^3 (rokers)	1 / 1.000
Trichloorethyleen	Lever	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	4,3 / 10.000.000
		230 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 / 10.000
		23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 / 100.000
		2,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 / 1.000.000

* Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen, in het bijzonder benzo[a]pyreen

2.3.2 Binnenmilieubesluit

In 2004 werd door de Vlaamse regering in het binnenmilieubesluit richt- en interventiewaarden vastgelegd voor chemische, fysische en biotische factoren om de kwaliteit van het binnenklimaat van woningen en publiek toegankelijke gebouwen voldoende hoog te houden.

Hierin zijn richtwaarden waarden die aangeven vanaf welke hoeveelheden er gezondheidsrisico's kunnen optreden bij langdurige blootstelling. Deze waarden zijn niet dwingend maar worden vooral bedoeld als een element om te sensibiliseren. Hiernaast zijn er interventiewaarden die wel dwingend zijn. Wanneer interventiewaarden overschreden worden dienen maatregelen genomen te worden om de risico's te beperken of te elimineren. Deze maatregelen kunnen gaan van het wegnemen van de vervuilende stoffen, de blootstellingstermijn beperken of zorgen voor een intensieve ventilatie.

Deze richt- en interventiewaarden van 2004 kregen na 14 jaar voor het eerst een update. Op 7 september 2018 werden de aanpassing aan het binnenmilieubesluit doorgevoerd waarbij de oorspronkelijk richt- en interventiewaarden aangescherpt werden en er extra stoffen toegevoegd werden die voor het eerst een richt- en/of interventiewaarde mee krijgen. Hiernaast werden de parameters voor schimmels, micro-organismen en mijten anders gedefinieerd.

In tabel 9, 10 en 11 bevinden zich de richt- en interventiewaarden gevolgd door de bijhorende blootstellingduur waarop de waarden van toepassing zijn voor de biotische factoren, de fysische factoren en de chemische factoren.

(Zorg en gezondheid, 2018)

*Tabel 9: Richt- en interventiewaarden en blootstellingsduur biotische factoren
(Federale overheidsdienst justitie, 2018)*

stof /factor	richtwaarde	interventie- waarde	blootstellings- duur waarop richt- en interventie- waarden van toepassing zijn
zichtbare schimmel omvang beschimmeld oppervlak aanwezigheid van <i>Stachybotrys chartarum</i> aanwezigheid van schimmelmijten	<0,3 m ² /kamer 0/gebouw 0/gebouw	-	-
ongedierte	0/gebouw		-

Tabel 10: Richt- en interventiewaarden en blootstellingsduur fysische factoren
(Federale overheidsdienst justitie, 2018)

stof / factor	richtwaarde	interventie- waarde	blootstellings- duur waarop richt- en interventie- waarden van toepassing zijn
extreem laag frequente elektromagnetisch e straling	0,4 μT	20 μT	richtwaarde: chronisch* interventiewaarde: acuut****
temperatuur koude jaarhelft** warme jaarhelft***	20 °C $\leq T < 24$ °C 22 °C $\leq T < 26$ °C	-	-
tocht koude jaarhelft** warme jaarhelft***	< 0,15 m/s < 0,25 m/s	-	-
relatieve vochtigheid - koude jaarhelft** - warme jaarhelft***	40 % $\leq RV < 60\%$ 30 % $\leq RV < 70\%$	-	-

Tabel 11: Richt- en interventiewaarden en blootstellingsduur chemische factoren
(Federale overheidsdienst justitie, 2018)

stof / factor	richtwaarde	interventie- waarde	blootstellings- duur waarop richt- en interventie- waarden van toepassing zijn
2-ethylhexanol	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	810 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	chronisch *
acetaldehyde	160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	480 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	chronisch *
asbest chrysotiel	28 vezels/ m^3	280 vezels/ m^3	chronisch *
asbest amfibool	3 vezels/ m^3	30 vezels/ m^3	chronisch *
asbest gemengde stalen	$\frac{\text{amfibool} [\text{vezels}/\text{m}^3]}{3 [\text{vezels}/\text{m}^3]} + \frac{\text{chrysotiel} [\text{vezels}/\text{m}^3]}{28 [\text{vezels}/\text{m}^3]} \leq 1$	$\frac{\text{amfibool} [\text{vezels}/\text{m}^3]}{30 [\text{vezels}/\text{m}^3]} + \frac{\text{chrysotiel} [\text{vezels}/\text{m}^3]}{280 [\text{vezels}/\text{m}^3]} \leq 1$	chronisch *
benzeen		0,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ **	chronisch *
C ₄ -C ₁₁ -aldehydes	650 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	chronisch *
C ₉ -C ₁₄ -alkanen	250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	490 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	chronisch *
formaldehyde		100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	chronisch *
koolstofdioxide	<500 ppm boven de buitenluchtconcentra- tie	-	-
koolstofmonoxide		8 mg/ m^3	24 uur
metallisch kwik (damp)	0,05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	chronisch *
naftaleen	3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	chronisch *
nicotine	0,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	-
ozon	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	8 uur
polycyclische aromatische koolwaterstoffen met benzo(A)pyreen als indicator	0,012 ng/ m^3	0,1 ng/ m^3	chronisch *
PM _{2,5} (fijn stof)	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	chronisch *
stikstofdioxide	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	chronisch *
styreen	260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	chronisch *
tetrachloor- ethyleen	4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	chronisch *
tolueen	5000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	14000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	chronisch *
trichloorethyleen	0,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	chronisch *
totale vluchtige organische stoffen	300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	chronisch *

2.3.3 DALY'S: Disability-Adjusted Life Years

DALY'S of Disability-Adjusted Life Years is een algemene berekeningsmethode die de totale last, ontstaan door ziekte, tracht samen te brengen in één welbepaalde waarde.

Het volledige systeem is ontwikkeld door de Wereldgezondheidsorganisatie (WGO). Het houdt rekening met enerzijds het aantal mensen dat vroegtijdig komt te sterven door ziekte en anderzijds het aantal jaren dat mensen dienen te leven met beperkingen ten gevolge van ziekte. Het zorgt dus voor het samenbrengen van de mortaliteit en de morbiditeit in een waarde uitgedrukt in de eenheid DALY'S. Eén DALY kan beschouwd worden als één verloren jaar van "gezond" leven. De som van deze DALY's kan uitgedrukt worden over de bevolking of over een bepaalde ziektelast. Het systeem kan worden gezien als een maat voor de kloof tussen de huidige gezondheidstoestand en een ideale gezondheidssituatie waarin de gehele bevolking leeft tot een gevorderde leeftijd, vrij van ziekte en invaliditeit.

Het aantal DALY'S voor een ziekte of gezondheidstoestand wordt berekend als de som van de Years of Life Lost (YLL) en Years Lived with Disabilities (YLD). Years of Life Lost (YLL) zijn de jaren van vroegtijdige sterfte in de bevolking, de mortaliteit. Lived with Disabilities (YLD) is een maat voor de jaren waarin mensen leven in een welbepaalde gezondheidstoestand of met de gevolgen van een ziekte, morbiditeit.

$$\text{DALY} = \text{YLL} + \text{YLD}$$

De YLL staat gelijk aan het aantal sterfgevallen vermenigvuldigd met de standaard levensverwachting op de leeftijd waarop de dood plaatsvindt. De basisformule voor YLL voor een bepaalde oorzaak, leeftijd en geslacht is:

$$\text{YLL} = N \times L$$

Met:

N = aantal sterfgevallen

L = standaardlevensverwachting op de leeftijd van overlijden in jaren

Om YLD voor een bepaalde oorzaak in een bepaalde periode te schatten, wordt het aantal incidenten in die periode vermenigvuldigd met de gemiddelde duur van de ziekte en een gewichtsfactor die de ernst van de ziekte weergeeft op een schaal van 0 (perfecte gezondheid) tot 1 (dood). De basisformule voor YLD is de volgende:

$$\text{YLD} = I \times DW \times L$$

Met:

I = aantal incidenten

DW = invaliditeitsgewicht

L = gemiddelde duur van de zaak tot remissie of overlijden (jaren)

In de recente studie “GBD 2010” wordt de berekeningswijze voor YLD aangepast. Deze werd nu gebaseerd op prevalentie in plaats van incidentie:

$$YLD = P \times DW$$

Met:

P = aantal veel voorkomende gevallen

DW = invaliditeitsgewicht

Door gebruik te maken van deze berekeningsmethode hebben ziektes die sterfte op jonge leeftijd veroorzaken (bijvoorbeeld aids) en ziektes die bij veel mensen op jonge leeftijd sterke beperkingen veroorzaken (zoals psychiatrische ziektes) belangrijke bijdragen aan de totale DALY van een populatie.

(WHO, 2018)

2.3.4 UDE

UDE staat voor Unit Damage Estimate en is een afgeleide van de DALY's. Het is een waarde die het aantal DALY's voor een welbepaalde stof uitdrukt in functie van de eenheid van concentratie per persoon per jaar. Hierdoor kan men op een eenvoudige manier het aantal DALY's bekomen die toe te wijten is aan de blootstelling van een persoon aan een welbepaald pollutant. Hiervoor dient men de som te nemen van alle concentraties waaraan die persoon werd blootgesteld gedurende een volledig jaar en dit te vermenigvuldigen met de UDE waarde, zoals in onderstaande formule gebeurt. De eenheid van deze UDE waardes is dan ook $\frac{DALY's \cdot m^3}{jaar \cdot persoon \cdot \mu g}$.

$$DALY_i = \sum concentratie_i * UDE_i$$

2.3.5 Bestaande classificatiesystemen

De kwaliteit van de lucht kan naast voorgaande methodes ook geëvalueerd worden op basis van een algemeen referentiekader. Hierin wordt aan de hand van de concentraties van een beperkt aantal parameters de lucht gekwalificeerd. Door middel van deze referentiekaders kan eenvoudig en eenduidig aangeduid worden hoe het gesteld is met de kwaliteit van de buitenlucht. Hieronder worden de classificatiesystemen weergegeven van Aircheckr, De Europese Air Quality Index en de Belgische AQI in tabellen 12,13 en 14.

European Air Quality Index

Tabel 12: European Air Quality Index (European Environment Agency, 2018)

Pollutant	Index level (based on pollutant concentrations in µg/m ³)				
	Good	Fair	Moderate	Poor	Very poor
Particles less than 2.5 µm (PM _{2.5})	0-10	10-20	20-25	25-50	50-800
Particles less than 10 µm (PM ₁₀)	0-20	20-35	35-50	50-100	100-1200
Nitrogen dioxide (NO ₂)	0-40	40-100	100-200	200-400	400-1000
Ozone (O ₃)	0-80	80-120	120-180	180-240	240-600
Sulphur dioxide (SO ₂)	0-100	100-200	200-350	350-500	500-1250

Aircheckr AQI

Tabel 13: Aircheckr AQI-indeling
(Aircheckr, 2018)

NO ₂	O ₃	PM ₁₀	PM _{2.5}	aircheckr hourly AQI			
hourly	hourly	hourly	hourly	# of classes			
µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	101	11	4	
0-10	0-15	0-10	0-10	100-91	10	Excellent	3 Good
10-20	15-30	10-20	10-15	90-81	9	Good	
20-30	30-40	20-30	15-20	80-71	8	Quite good	
30-45	40-60	30-45	20-30	70-61	7	Acceptable	2 Moderate
45-60	60-80	45-60	30-40	60-51	6	Moderate	
60-75	80-100	60-75	40-50	50-41	5	Insufficient	
75-100	100-140	75-100	50-70	40-31	4	Rather poor	1 Bad
100-125	140-180	100-125	70-90	30-21	3	Poor	
125-150	180-200	125-150	90-100	20-11	2	Bad	
150-200	200-240	150-200	100-140	10-1	1	Very bad	0 Very bad
>200	>240	>200	>140	0	0	Extremely bad	

Tabel 14: De Belgische AQI-indeling (BELAQI)
(VMM, 2018)

Index	Classificatie	PM ₁₀	PM _{2.5}	O ₃	NO ₂
		daggemiddelde (µg/m³)	daggemiddelde (µg/m³)	max 1- uur/dag (µg/m³)	max 1- uur/dag (µg/m³)
1	uitstekend	0 - 10	0 - 5	0 - 25	0 - 20
2	zeer goed	11 - 20	6 - 10	26 - 50	21 - 50
3	goed	21 - 30	11 - 15	51 - 70	51 - 70
4	vrij goed	31 - 40	16 - 25	71 - 120	71 - 120
5	middelmatig	41 - 50	26 - 35	121 - 160	121 - 150
6	ondermaats	51 - 60	36 - 40	161 - 180	151 - 180
7	vrij slecht	61 - 70	41 - 50	181 - 240	181 - 200
8	slecht	71 - 80	51 - 60	241 - 280	201 - 250
9	zeer slecht	81 - 100	61 - 70	281 - 320	251 - 300
10	uitermate slecht	>100	>70	>320	>300

2.4 Normering en reglementering ventilatie

Normeringen zijn afspraken over een dienst, een product of een proces. Ze zorgen voor een correct vakmanschap in de activiteitsdomeinen in de industrie, de dienstensector en de overheid. Ze worden ontwikkeld vanuit de bedrijfswereld met behulp van verschillende andere betrokkenen waardoor rekening gehouden wordt met het milieu, duurzaamheid, consumentenveiligheid en andere maatschappelijke thema's.

Een norm wordt vrijwillig toegepast door allen die er belang bij hebben. Dit zijn voornamelijk producenten, dienstverleners, leveranciers, klanten enz. Normen vormen geen wet maar in welbepaalde gevallen kan ervoor gezorgd worden dat personen verplicht worden de norm na te leven. Ze kunnen enerzijds verplicht worden wanneer ze opgenomen worden in wetten en regelgevingen van de overheid en anderzijds kunnen ook contracten verwijzen naar de toepassing van normen. Dit eerste principe wordt toegepast in onder andere de EPB-regelgeving.

(Bureau voor Normalisatie, 2018)

2.4.1 EPB-regelgeving

Iedereen die in Vlaanderen bouwt of verbouwt, is verplicht om te voldoen aan de energieprestatieregelgeving of EPB-regelgeving. Hierin staat 'EPB' voor 'EnergiePrestatie en Binnenklimaat'. Deze regelgeving omvat verschillende eisen op het vlak van isolatie, installaties, ventilatie en oververhitting. Aan welke eisen het bouw- of renovatieproject moet voldoen is afhankelijk van de aard van (renovatie of nieuwbouw), de bestemming van het gebouw of gebouwdeel (woongebouwen of niet-residentiële gebouwen) en de datum van de bouw aanvraag. Deze Vlaamse EPB-regelgeving volgt uit de Europese richtlijn voor de energieprestaties van gebouwen, afgekort als EPBD (Energy Performance of Buildings Directive). Deze Vlaamse regelgeving trad op 1 januari 2006 in zijn voegen en vormde de vervanging van de vroegere isolatiereglementering. Hierbij verschuift de aandacht van enkel en alleen maar isolatie-eisen naar de totale energieprestaties van gebouwen. Er wordt hierin ook aandacht besteed aan het ventilatiesysteem in gebouwen, waarvan hieronder de belangrijkste toegelicht worden.

(Wikipedia, 2018)

2.4.1.1 NBN D50-001: Ventilatievoorzieningen in woongebouwen

Deze norm is opgenomen in de EPB-regelgeving en is van toepassing voor alle nieuwe gebouwen of gedeelten ervan en gebouwen waaraan grondige renovaties uitgevoerd worden, bestemd als woning. In deze norm wordt het onderscheid gemaakt tussen de verschillende ruimtes. Hierbij wordt per ruimte een minimaal ontwerpdebiet geëist van 3,6 m³/h per m² vloeroppervlakte van de ruimte. Om te voorkomen dat in kleine ruimtes te weinig geventileerd wordt, bevat de norm per ruimte een minimum toevoer- en afvoerdebiet dat gehaald dient te worden. Hiernaast worden ook maximale waarden bepaald om het energieverbruik beter onder controle te houden. Vooral voor ventilatiesysteem A of C wordt sterk aanbevolen deze beperking op het ontwerptoevoerdebiet na te leven om het energieverlies te beperken. In de norm wordt geen rekening gehouden met de hoogte van de ruimtes en het aantal personen in een ruimte omdat enerzijds de hoogte geen invloed heeft op het aantal personen aanwezig in deze ruimte en anderzijds het aantal personen in een ruimte omvat zit in het type ruimte en het ventilatiedebiet per ruimte. De norm wordt schematisch weergegeven in tabel 15.

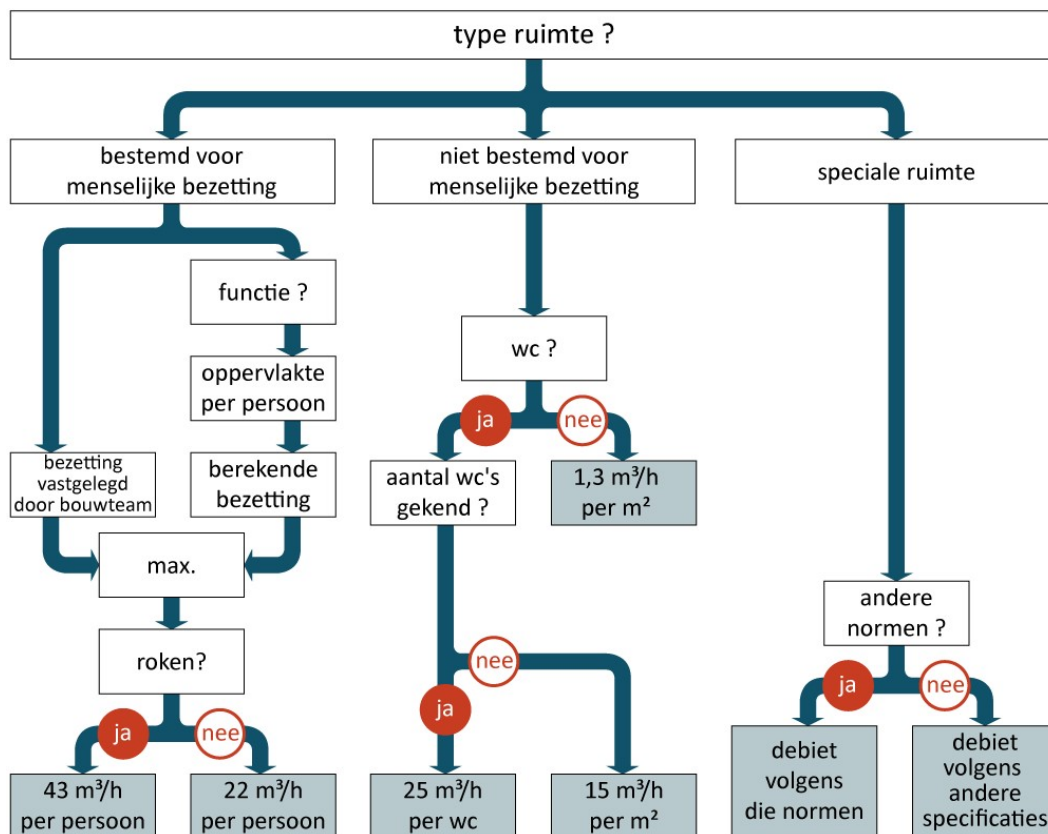
(Het Vlaams energieagentschap, 2018)

Tabel 15: NBN D50-001
(Bureau voor normalisatie, 2018)

ruimte		nominale debiet		debiet mag beperkt worden tot	minimale spleet onder de deur
		algemene regel	minimaal debiet		
toevoer	woonkamer	3,6 m³/h	75 m³/h	150 m³/h	
	slaapkamer		25 m³/h	72 m³/h	
	studeerkamer				
	speelkamer				
doorstroom als afvoer uit de ruimte	woonkamer		25 m³/h		70 cm²
	slaapkamer				
	studeerkamer				
	speelkamer				
doorstroom als toevoer naar de ruimte	keuken		50 m³/h		140 cm²
	badkamer		25 m³/h		70 cm²
	was- en droogplaats				
	wc				
afvoer	keuken	3,6 m³/h	50 m³/h	75 m³/h	
	badkamer				
	was- en droogplaats		75 m³/h		
	open keuken				
	wc	25 m³/h			

2.4.1.2 Niet-residentiële gebouwen en industrie

Voor de niet-residentiële gebouwen en de industrie wordt gebruik gemaakt in de EPB regelgeving van verschillende normen. Deze werden allemaal samen gebracht in figuur 11. Hierop is te zien dat het minimaal geëiste ontwerpdebiet van een ruimte afhankelijk is van het ruimtetype en de ontwerpbezetting, bij de menselijke bezetting van een ruimte, of een gebruiksoppervlakte bij ruimtes voor niet menselijke bezetting. Hierbij wordt enkel een minimaal ontwerpdebiet vastgelegd maar geen maximaal.



*Figuur 11: Minimaal geëist ontwerpdebiet voor niet-residentiële gebouwen en de industrie
(Het Vlaams energieagentschap, 2018)*

Er wordt terug geen rekening gehouden met de hoogte van de ruimte omdat deze nauwelijks een invloed heeft op het aantal aanwezige personen of op de (vervuilende) activiteiten.

(Het Vlaams energieagentschap, 2018)

2.4.1.3 Vraaggestuurde ventilatie

Voor vraaggestuurde ventilatiesystemen wordt in deze EPB-regelgeving een onderscheid gemaakt op energetisch vlak door middel van een reductiefactor ($f_{\text{reduc,vent}}$) om de beperkte ventilatieverliezen ten gevolge van een vraaggestuurd systeem in rekening te brengen.

Residentieel

Voor residentiële projecten worden drie reductiefactoren onderscheiden, namelijk:

- $f_{\text{reduc,vent,heat,seci}}$: voor ventilatie in energiesector i specifiek voor de verwarmingsberekeningen
- $f_{\text{reduc,vent,cool,seci}}$: voor ventilatie in energiesector i specifiek voor de koelberekeningen
- $f_{\text{reduc,vent,overh,seci}}$: voor ventilatie in energiesector i specifiek voor de oververhittingsberekeningen

Deze reductiefactoren kunnen de dag van vandaag nog op twee manieren bekomen worden. De eerste methode is het bepalen op basis van de tabellen met forfaitaire waarden. De tweede methode is door middel van de productgegevensdatabank. Hierin kunnen fabrikanten hun product laten opnemen met de bijhorende reductiefactoren.

Niet-residentieel en industrie

Voor niet residentiële projecten en de industrie worden twee reductiefactoren onderscheiden:

- $f_{\text{reduc,vent,heat}}$: voor ventilatie in functioneel deel f specifiek voor de verwarmingsberekeningen
- $f_{\text{reduc,vent,cool}}$: voor ventilatie in functioneel deel f specifiek voor de koelberekeningen

Deze twee factoren worden gelijkgesteld aan de reductiefactor $f_{\text{reduc,vent,zone } z}$ voor ventilatie in ventilatiezone z. Deze reductiefactor wordt bepaald aan de hand van eisen aan de detectie en eisen aan de regeling.

Het in rekening brengen van een dergelijke reductiefactor kan een sterke invloed uitoefenen op het E-peil:

- Bij de verwarmingsberekeningen zal het in rekening brengen van de reductiefactor betekenen dat de ventilatieverliezen lager zijn zodat een lagere netto energiebehoefte voor verwarming bekomen wordt. Dat geeft uiteindelijk een beter E-peil.
- Bij de koelingsberekeningen en de berekeningen voor het risico op oververhitting betekent de reductiefactor lagere ventilatieverliezen dus een hogere netto energiebehoefte voor koeling. Dit geeft uiteindelijk een slechter E-peil. Voor koeling en oververhitting is een hogere reductiefactor dus beter.
- Als laatste kan door een by-pass gezorgd worden voor een lage reductiefactor voor verwarming, en een factor 1 voor koeling.

(Het Vlaams energieagentschap, 2018)

2.4.2 Arbeidsreglement ventilatie

Het welzijn van de mensen tijdens het uitvoeren van hun werk wordt bewaakt door de welzijnswet. Deze wet trad in werking op 4 augustus 1996 en vormt de basiswet op het vlak van de veiligheid en de gezondheid op het werk. Welzijn van mensen definieert men als het geheel van factoren met betrekking tot de arbeidsvoorwaarden waarin het werk wordt uitgevoerd. Deze zijn:

- veiligheid op het werk
- arbeidshygiëne
- bescherming van de gezondheid van de werknemer
- ergonomie
- psychosociale aspecten van het werk
- verfraaiing van de werkplaatsen.

Als er gekeken wordt wat er in de welzijnswet opgenomen is over ventilatie komt men bij het onderdeel Titel III – Arbeidsplaatsen, Hoofdstuk I – Basiseisen. Hierin zijn verschillende eisen vermeld waaraan arbeidsplaatsen moeten voldoen. Onder de term arbeidsplaatsen veronderstelt men de ruimtes waar werknemers hun werk dienen uit te voeren met hierbij enkele plaatsen die buiten dit toepassingsgebied vallen, bijvoorbeeld: tijdelijke of mobiele bouwplaatsen, winningindustrieën en vissersvaartuigen. De verschillende eisen die opgesteld werden in verband met luchtverversing in de welzijnswet zijn:

- De werkgever zorgt ervoor dat de werknemers in de werklokalen over voldoende verse lucht beschikken, rekening houdend met de werkmethoden en de door de werknemers te leveren lichamelijke inspanningen.
- Hiertoe neemt de werkgever de nodige technische of organisatorische maatregelen opdat de CO₂-concentratie in deze werklokalen lager is dan 800 ppm, tenzij deze kan aantonen dat dit om objectieve en gegronde redenen niet mogelijk is.
- In elk geval mag de CO₂-concentratie in deze werklokalen nooit hoger zijn dan 1200 ppm!
- De luchtverversing gebeurt op natuurlijke wijze of door middel van een luchtverversingsinstallatie. De installatie moet aan bepaalde voorwaarden voldoen. Zo moet ze verse lucht verspreiden.
- De luchtverversingsinstallatie is bovendien zo ingesteld dat over een werkdag de gemiddelde relatieve luchtvochtigheid tussen 40% en 60% ligt, tenzij dit om technische redenen niet mogelijk is. De relatieve luchtvochtigheid mag tussen 35% en 70% liggen indien de werkgever aantoont dat de lucht geen chemische of biologische agentia bevat die een risico kunnen vormen voor de veiligheid en de gezondheid van de aanwezige personen op de arbeidsplaats.

(Prevent agri, 2018)

2.5 Invloed ventilatie op binnenconcentraties polluenten

2.5.1 Ventilatiesysteem

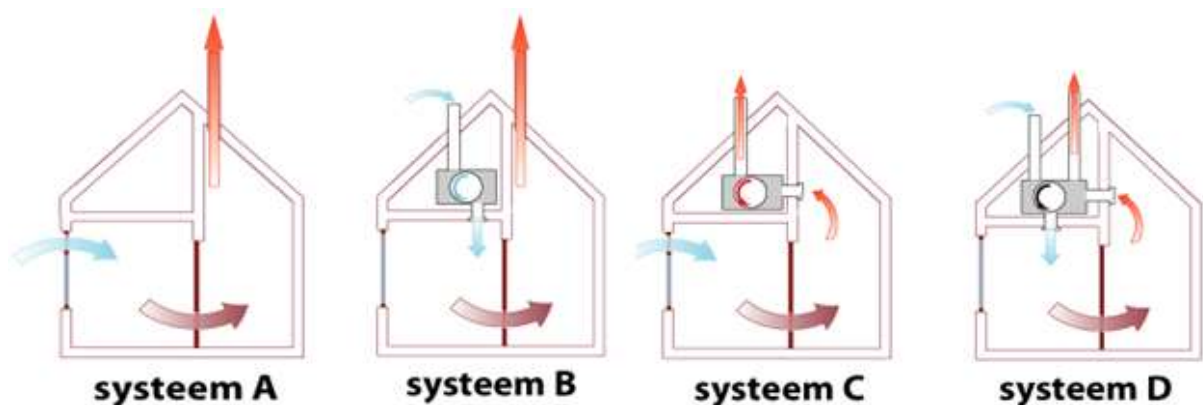
De dag van vandaag is het ventileren van gebouwen een absolute must geworden. Dit is voornamelijk te wijten aan het principe van energiezuinig bouwen waarbij sterk geïsoleerd en luchtdicht gebouwd wordt. Hierdoor kan er geen verse lucht meer binnen in de woning waardoor het noodzakelijk is om verse lucht door middel van ventilatie binnen te brengen in het gebouw.

2.5.1.1 Types ventilatiesystemen

Bij een ventilatiesysteem verloopt de luchtcirculatie binnen woningen altijd volgens hetzelfde principe. De verse lucht komt binnen in de droge ruimtes, zoals de slaapkamers en leefruimtes. Vervolgens stroomt de lucht via openingen naar de natte ruimtes. Deze openingen kunnen verscheidene vormen aannemen zoals binnenmuurroosters of kieren onder de deuren. De laatste fase in de luchtcirculatie is het afvoeren van vervuilde vochtige lucht in de natte ruimtes, zoals de keuken of badkamer. Naargelang de toe- en afvoer natuurlijk of mechanisch gebeurt, kunnen er vier verschillende systemen (figuur 12) onderscheiden worden om gecontroleerd te ventileren:

- Ventilatiesysteem A
- Ventilatiesysteem B
- Ventilatiesysteem C
- Ventilatiesysteem D

In dit onderzoek zal gewerkt worden met een systeem D, hoewel de mogelijkheid er ook is om te werken met een systeem C. Hierdoor zullen beide systemen hieronder kort toegelicht worden.



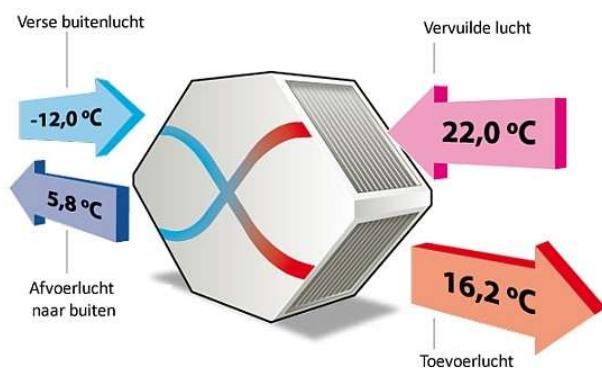
Figuur 12: Verschillende types ventilatiesystemen
(Renovatie elektro delbeke bvba, 2018)

Systeem C: natuurlijke toevoer, mechanische afvoer

Bij dit systeem zal de toevoer natuurlijk plaatsvinden. De afvoer gebeurt echter mechanisch via afvoeropeningen met extractieventielen in de natte ruimtes. Dit type ventilatiesysteem is het meest voorkomende type, met een marktaandeel van 65,31% in nieuwbouwwoningen de afgelopen 5 jaar. Dit is voornamelijk te wijten aan de lage investeringskost en het installatiegemak. Het systeem C kan uitgerust worden met een warmteterugwinningsunit voor het recupereren van de warmte die de afgezogen lucht bevat. Deze warmte kan hergebruikt worden voor het opwarmen van sanitair water of verwarming. Dit water dient vervolgens wel nog extra verwarmd te worden in de klassieke toestellen tot de gewenste temperatuur.

Systeem D: mechanische toe- en afvoer

Bij systeem D gebeurt zowel afvoer en toevoer mechanisch. Hierdoor is het noodzakelijk dat een dubbel kanalenet geplaatst wordt, één voor de toevoer in de droge ruimtes en één voor de afvoer in de natte ruimtes. Het grote voordeel aan dit systeem is dat het een grote controleerbaarheid heeft. Er kan relatief eenvoudig ingesteld worden wat de aanvoer en afvoer in de verschillende ruimtes dient te zijn waardoor een goed evenwicht bereikt wordt tussen aan- en afvoer. Daarom wordt het systeem D ook wel 'balansventilatie' genoemd. Hiernaast wordt in de meeste gevallen dit systeem uitgerust met een warmteterugwinningsunit (figuur 13). Deze unit zorgt voor het overdragen van de warmte van de warme afgevoerde verontreinigde lucht naar de koude verse aangevoerde lucht. Een ventilatiesysteem D kent de laatste tijd een sterke groei in het marktaandeel van 9,93% (2006) naar 25,01% (2018).



Figuur 13: Warmtewisselaar
(Devree, 2018)

(Livios, 2018; Renovatie elektro delbeke bvba, 2018)

2.5.1.2 Invloed op de luchtkwaliteit

Ventilatie kan op verschillende manieren een invloed hebben op het comfort in het binnenklimaat. Het zal zorgen voor een beïnvloeding van de luchtstroming in een ruimte en hiermee gepaard gaande de verspreiding van stoffen in de lucht. Een teveel aan ventilatie zal leiden tot sterke luchtbeweging die samen met een te lage temperatuur zal leiden tot lokale afkoeling met klachten over tocht tot gevolg. Ventilatie heeft dus ook een invloed op het comfort die de mensen ervaren.

Maar het hoofddoel van ventilatie is de verversing van de binnenlucht met buitenlucht. Dit kan doormiddel van 3 verschillende mechanismen:

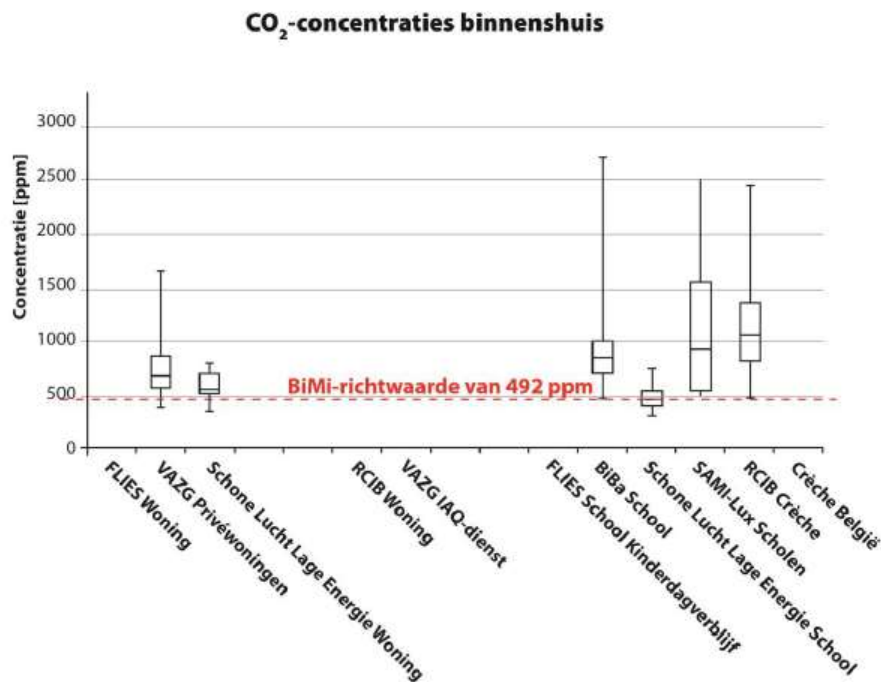
- via lokale afzuiging
- via verdringing
- via verdunning

Een zeer praktische uitvoering van lokale afzuiging in de woningbouw is het gebruik van een dampkap in de keuken. Lokale verdringing is het meest effectieve mechanisme om vervuilende binnenlucht te verwijderen, maar dit is praktisch en technisch te complex. In bijna alle gebouwen wordt er gebruik gemaakt van verdunning om de binnenlucht te verversen. Hierbij wordt verse lucht van buitenaf in de woning gebracht die zich vermengt met de binnenlucht.

(De Gids et al., 2012)

Bij een goed en zorgvuldig gebruik van het ventilatiesysteem zal het zorgen voor een sterke verbetering van de luchtkwaliteit, zeker als dit systeem gecombineerd wordt met aangepaste en goed onderhouden luchtfilters. Dit kan aangetoond worden aan de hand van figuur 14. In deze grafiek worden de resultaten van verschillende projecten samengevat omtrent CO₂-metingen in het binnenklimaat. Uit deze grafiek valt duidelijk af te leiden dat de concentraties CO₂ beduidende lager zijn in de resultaten van het project “schone lucht, lage energie”, waarbij mechanische ventilatiesystemen (C en D) aanwezig waren in de gebouwen, in vergelijking met de resultaten van andere projecten. Hiernaast bevestigt het onderzoek, uitgevoerd bij Amerikaanse gezinnen (Raja et al., 2011), dat de installatie van een ventilatiesysteem uitgerust met een filtereenheid (95% verwijderen fijn stof) leidt tot een sterke verbetering van het binnenluchtkwaliteit met een verhoogde longfunctie van 20 kinderen tussen 5 en 16 jaar oud tot gevolg. Maar er dient ook op te merken dat een slecht gedimensioneerd of slecht onderhouden ventilatiesysteem kan leiden tot enerzijds overlast, zoals tocht en geluidshinder, en anderzijds een bron vormen van vervuilende stoffen.

(Hoge gezondheidsraad, 2017)



Figuur 14: Boxplot van CO₂ concentraties binnenshuis in woningen en scholen/crèches
(Hoge gezondheidsraad, 2017)

Naast de verschillende meetbare aspecten van het binnenmilieu, zoals fysieke, chemische, biologische en akoestische metingen, is de perceptie en het gevoel van tevredenheid van de bewoners een belangrijke factor. Dit gegeven beschrijft men in de literatuur als de waargenomen binnenluchtkwaliteit. Bogers et al. (2011) concludeerde dat gebouwen met ventilatiesysteem D gepaard gaan met een lagere waargenomen binnenluchtkwaliteit, terwijl gebouwen met ventilatiesysteem C worden geassocieerd met een beter waargenomen binnenluchtkwaliteit. Verschillende andere onderzoeken in Nederland staven deze conclusie (Van Dyken et al., 2011). Maar er zijn ook tegenstrijdige conclusies van andere onderzoeken, waarbij het systeem C minder kwaliteitsvol werd ervaren door verhoogde geluidshinder als gevolg van natuurlijke ventilatie.

(Stranger et al., 2012)

2.5.2 Luchtfilters

Een luchtfilter wordt geplaatst in de luchtstroom van aangevoerde of afgevoerde lucht. Ze zorgt voor het wegfilteren van ongewenste stoffen uit de lucht waardoor deze zuiverder en schoner wordt. Luchtfilters kunnen twee types van toepassingen hebben, namelijk het beschermen van een welbepaalde installatie of de luchtkwaliteit verhogen. De filters voor het beschermen van installaties zijn in deze literatuurstudie minder van belang. Er zal hier vooral dieper ingegaan worden op de filters die zorgen voor het verbeteren van de luchtkwaliteit en welke invloed deze zullen hebben op de luchtkwaliteit.

Voor een goede keuze te maken welke filter optimaal is, zijn drie aspecten belangrijk.

Deze zijn:

- De luchtfilterklasse
- Het type luchtfilter
- De weerstand van de luchtfilter

2.5.2.1 Luchtfilterklassen

Luchtfilters kunnen ingedeeld worden in zes hoofdgroepen die op hun beurt een verdere onderverdeling krijgen.

De zes hoofdgroepen zijn:

- G-filters (Grof-)
- M-filters (Medium-)
- F-filters (Fijn-)
- E-filters (EPA- Efficient Particulate Air-filters)
- H-filters (HEPA- High Efficiency Particle Air-filters)
- U-Filters (ULPA- Ultra Low Penetration Air-filters)

De HEPA- en ULPA-filters hebben over het algemeen geen toepassingen in klimaatinstallaties. Ze worden voornamelijk gebruikt in luchtbehandelinginstallaties voor operatiekamers, cleanrooms en industriële toepassingen waarbij stof niet aanwezig mag zijn. Het zijn vooral de F-filters die regelmatig hun toepassing vinden in klimaatinstallaties.

(Camfil, 2018)

Er zijn twee normen die handelen over de definiëring van de grof, medium en fijn filters, namelijk de Europese norm EN779 en de Amerikaanse norm ASHRAE 52.2.

EN779 (Tabel 16)

In deze norm wordt elke type grof, medium en fijn filter verder opgedeeld in respectievelijk 4, 2 en 3 subklassen. Bij elk van deze subklassen worden specifieke eisen opgelegd aan de drukval en de gemiddelde stofvangst voor synthetische stof of voor deeltjes van 0,4µm samen met eventueel een waarde voor de minimale efficiëntie voor deeltjesgrootte 0,4µm. (Camfil, 2018)

Tabel 16: Classificatie filters volgens EN779
(Bureau voor Normalisatie, 2018)

Groep	Klasse	Einddrukval (test) [Pa]	Gemiddelde stofvangst "Am" voor synthetisch stof [%]	Gemiddelde efficiëntie voor deeltjes van 0,4µm [%]	Minimum efficiëntie voor deeltjes van 0,4µm [%]
Grof filter (Voorfilter)	G1	250	50=<Am<65		
	G2	250	65=<Am<80		
	G3	250	80=<Am<90		
	G4	250	90=<Am		
Medium filter	M5	450		40=<Em<60	
	M6	450		60=<Em<80	
Fijn filter	F7	450		80=<Em<90	35
	F8	450		90=<Em<95	55
	F9	450		95=<Em	70

ASHRAE 52.2 (Tabel 17)

Deze ASHRAE-norm zorgt voor een opdeling in 16 klassen waarbij in elke klasse specifieke eisen gesteld worden aan de filterefficiëntie (%) bij drie bereiken van deeltjesgrootte en een totale weerstand. (Camfil, 2018)

Tabel 17: Classificatie filters volgens ASHRAE 52.2
(Camfil, 2018)

Standard 52.2 Minimum Efficiency Reporting Value (MERV)	Composite Average Particle Size Efficiency, % In Size Range, µm			Average Arrestance, %
	Range 1 (0.3-1.0)	Range 2 (1.0-3.0)	Range 3 (3.0-10.0)	
1	n/a	n/a	E3 < 20	$A_{avg} < 65$
2	n/a	n/a	E3 < 20	$65 \leq A_{avg} < 70$
3	n/a	n/a	E3 < 20	$70 \leq A_{avg} < 75$
4	n/a	n/a	E3 < 20	$75 \leq A_{avg}$
5	n/a	n/a	$20 \leq E3$	n/a
6	n/a	n/a	$35 \leq E3$	n/a
7	n/a	n/a	$50 \leq E3$	n/a
8	n/a	$20 \leq E2$	$70 \leq E3$	n/a
9	n/a	$35 \leq E2$	$75 \leq E3$	n/a
10	n/a	$50 \leq E2$	$80 \leq E3$	n/a
11	$20 \leq E1$	$65 \leq E2$	$85 \leq E3$	n/a
12	$35 \leq E1$	$80 \leq E2$	$90 \leq E3$	n/a
13	$50 \leq E1$	$85 \leq E2$	$90 \leq E3$	n/a
14	$75 \leq E1$	$90 \leq E2$	$95 \leq E3$	n/a
15	$85 \leq E1$	$90 \leq E2$	$95 \leq E3$	n/a
16	$95 \leq E1$	$95 \leq E2$	$95 \leq E3$	n/a

EN1822 (Tabel 18)

De Europese norm EN1822 zorgt voor de definiëring van de EPA-, HEPA-, ULPA-filters in respectievelijk 3, 2 en 3 subklassen. Dit gebeurt op basis van een integrale en lokale waarde voor efficiëntie en penetratie. (Bureau voor Normalisatie, 2018)

*Tabel 18: Classificatie luchtfilters volgens EN1822
(Bureau voor Normalisatie, 2018)*

Groep	Klasse	Integrale Waarde		Lokale Waarde	
		Efficiency %	Penetratie %	Efficiency %	Penetratie %
EPA-filter	E10	85	15	-	-
	E11	95	5	-	-
	E12	99,5	0,5	-	-
HEPA-filter	H13	99,95	0,05	99,75	0,25
	H14	99,995	0,005	99,975	0,025
ULPA-filter	U15	99,9995	0,0005	99,9975	0,0025
	U16	99,99995	0,00005	99,99975	0,00025
	U17	99,999995	0,000005	99,9999	0,0001

ISO16890 (Tabel 19)

ISO, de Internationale Organisatie voor Standaardisatie, heeft in 2017 de ISO16890-norm uitgegeven. Deze norm definieert testprocedures en een classificatiesysteem voor luchtfilters die in algemene ventilatie-apparatuur worden gebruikt. Deze wereldwijde norm vormt een harmonisatie van de twee bestaande lokale normen, namelijk de ASHRAE 52.2 die dominant is in de VS, en de EN779:2012, die dominant is in Europa. In de nieuwe norm wordt er gebruik gemaakt van twee definities voor het bepalen van de filterklassen. Als eerste is er ePM_x of de fijnstof efficiëntiegraad. Dit zijn drie categorieën ePM₁ (0,3 µm tot 1 µm), ePM_{2,5} (0,3 µm tot 2,5 µm) en ePM₁₀ (0,3 µm tot 10 µm) die beschrijven tot welke deeltjesgrootte de efficiëntiegraad betrekking heeft. Als tweede is er ePM_{x,min} of de minimale fijnstof efficiëntiegraad. Deze waarde heeft betrekking op de minimale fijnstof efficiëntiegraad in de categorieën PM₁ en PM_{2,5}. Voor de bepaling van deze waarde wordt de efficiëntiegraad van een filter in elektrostatisch ontladen toestand onderzocht. Gebruik maken van beide definities leidt dit tot de indeling aanwezig in tabel 19. (Rabotherm, 2018)

*Tabel 19: Classificatie luchtfilters volgens ISO16890
(Rabotherm, 2018)*

Filtergroepen ISO 16890	Vereiste minimale efficiency			Referentiewaarde voor bepaling van de filterprestatie
	ePM ₁ , min	ePM _{2,5} , min	ePM ₁₀	
ISO ePM ₁	≥ 50%			ePM ₁
ISO ePM _{2,5}		≥ 50%		ePM _{2,5}
ISO ePM ₁₀			≥ 50%	ePM ₁₀
ISO Coarse			< 50%	Aanvangsefficiëntiegraad

De tabel 20 geeft een overzicht van de nieuwe filterklassen met als referentie de huidige filterklassen toegevoegd. Een één op één vergelijking van een bepaald filtertype uit de EN 779-norm en filtertype uit de ISO 16890-norm is niet mogelijk. De aanbevelingen van onderzoeksinstituten en filterfabrikanten lijken op elkaar, maar wijken doorgaans wel van elkaar af. Deze nieuwe benamingen betekenen dat bijvoorbeeld een filter met de benaming ISO ePM1 85% een efficiencygraad bij een deeltjesgrootte kleiner dan 1 µm heeft tussen 85% en 90% (afrondding van 5%). (Rabotherm, 2018)

Tabel 20: Filterklassen ISO16890 samen met filterklassen EN779

(Rabotherm, 2018)

Classificeringstabel							
PM1		PM2,5		PM10		Coarse	
ISO ePM1 95%	F9	ISO ePM2,5 95%	F7	ISO ePM10 95%	M6	ISO Coarse 95%	G4
ISO ePM1 90%		ISO ePM2,5 90%		ISO ePM10 90%		ISO Coarse 90%	
ISO ePM1 85%		ISO ePM2,5 85%		ISO ePM10 85%		ISO Coarse 85%	
ISO ePM1 80%		ISO ePM2,5 80%		ISO ePM10 80%		ISO Coarse 80%	
ISO ePM1 75%	F8	ISO ePM2,5 75%		ISO ePM10 75%		ISO Coarse 75%	
ISO ePM1 70%		ISO ePM2,5 70%		ISO ePM10 70%		ISO Coarse 70%	
		ISO ePM2,5 65%		ISO ePM10 65%		ISO Coarse 65%	
ISO ePM1 65%	F7	ISO ePM2,5 60%	M6	ISO ePM10 60%	M5	ISO Coarse 60%	
ISO ePM1 60%		ISO ePM2,5 55%		ISO ePM10 55%		ISO Coarse 55%	
ISO ePM1 55%		ISO ePM2,5 50%		ISO ePM10 50%		ISO Coarse 50%	
ISO ePM1 50%						ISO Coarse 45%	
						ISO Coarse 40%	G3
						ISO Coarse 35%	
						ISO Coarse 30%	G2
Minimaal 50% efficiency- graad in onbehandelde en in ontlade toestand.		Minimaal 50% efficiency- graad in onbehandelde toestand. Geen eis met betrekking tot ontlade toestand.		Minimaal 50% efficiency- graad in onbehandelde toestand. Geen eis met betrekking tot ontlade toestand.		Geen eis met betrekking tot ontlade toestand.	
Fijnfilter		Mediumfilter				Groffilter	

2.5.2.2 Type luchtfilter

Er kunnen twee onderscheidingen gemaakt worden als er gesproken wordt over het type luchtfilter. Enerzijds kan men een onderscheid maken tussen de vorm van de filters en anderzijds kan er een onderscheid aangebracht worden tussen het werkingsprincipe van de filters.

Vorm filters

Als er gekeken wordt naar de vorm van de filters kan men de opdeling maken in volgende groepen:

- Paneelfilters
- Draadfilters
- Zakkenfilters
- Compactfilters

Een paneelfilter, figuur 15, bestaat uit een rechthoekig kader waartussen het filtermateriaal zich bevindt. Het kader is in de meeste gevallen vervaardigd uit staal, maar kunststof en karton kunnen hier ook voor gebruikt worden. Dit is het type filter dat in het systeem van dit onderzoek zal geplaatst worden.

(Habitatos, 2018)



*Figuur 15: Paneelfilter
(Habitatos, 2018)*

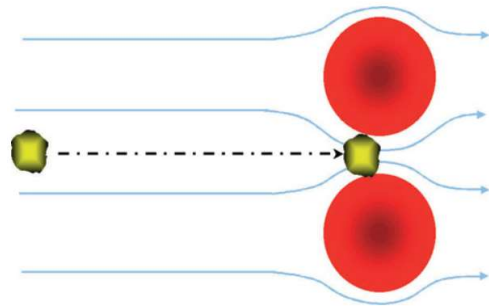
Werkingsprincipe filters

De verschillende groepen die hier ingedeeld worden, zijn op basis van het mechanisme waarmee deeltjes uit de lucht gehaald worden.

Deze zijn:

- Zeven
- Onderscheppen
- Diffusie
- Vertraagde scheiding
- Elektrostatische aantrekking
- Actieve kool

Het zeefeffect (figuur 16), het werkingprincipe van de gebruikte filters in dit onderzoek, werkt volgens het principe waarbij de ruimte tussen het filtermedia (vezels, zeefgaas, golfplaten, enz.) kleiner is dan de diameter van de deeltjes die de filter dient op te vangen. Dit principe wordt toegepast bij de meeste filterontwerpen en is volledig gerelateerd aan de grootte van het deeltje, de tussenruimte tussen de media en de mediadichtheid.



*Figuur 16: Het zeefeffect
(Camfil, 2018)*

(Camfil, 2018)

Weerstand van luchtfilter

De luchtweerstand van een luchtfilter heeft een grote invloed op het energetische aspect van het ventilatiesysteem. Indien filters een grote luchtweerstand hebben, zal de lucht ter hoogte van de filters sterk afgeremd worden. Hierdoor dient extra energie toegevoegd te worden aan het systeem om deze verliezen te compenseren. Deze extra energie ten gevolge van de luchtfilters wordt ook wel het energiegebruik van luchtfilters genoemd. De keuze van filters is een belangrijke factor in de totale kosten van ventilatie. Over het algemeen vormen de kosten voor energiegebruik van luchtfilters 70% van de totale kosten van ventilatie. Bij ontwerp is het dus aan te raden om luchtfilters te kiezen die een beperkt drukverlies hebben. Wanneer luchtfilters een te grote weerstand krijgen, dienen ze vanuit economisch standpunt vervangen te worden.

(Camfil, 2018)

3 EVALUATIECRITERIA

Om de verschillende voorgaande sturingen te kunnen evalueren ten opzicht van elkaar is het noodzakelijk om de evaluatie eenduidig te definiëren. In dit onderzoek zal van elke sturing bepaald worden hoe goed ze is voor de gezondheid van de aanwezigen, hoe comfortabel is het voor de aanwezigen en wat is het energieverbruik van de sturing. Deze drie evaluatiecriteria worden hieronder besproken en komen terug in de bespreking van de resultaten van het onderzoek later in dit verslag.

3.1 Gezondheid

Om het effect op de gezondheid van een sturing te kunnen evalueren zal er beroep gedaan worden op principe van DALY's. Omdat het hoofddoel van deze masterproef niet gericht is op het bepalen van de DALY's wordt hiervoor beroep gedaan op de literatuur. Hierin werden twee relevante bronnen gevonden. Ze worden hieronder kort toegelicht en met elkaar in overweging genomen.

3.1.1.1 UDE

In de eerste bron, met titel "Equivalence in Ventilation and Indoor Air Quality", bepalen de onderzoekers M. H. Sherman, I.S. Walker en J.M. Logue voor de stoffen NO₂, O₃ en PM2.5 een UDE-waarde of een Unit Damage Estimate. Deze waarden zijn aanwezig in tabel 21 en geven het aantal DALY weer voor een welbepaalde stof per blootstellingconcentratie voor 1 persoon gedurende 1 jaar maal. Deze waarde vermenigvuldigd met de concentratie waaraan een persoon werd blootgesteld is gelijk aan het aantal DALY voor deze stof. In de tabel 21 wordt deze traditionele verder omgerekend naar de gebruikte eenheid in dit onderzoek.

*Tabel 21: UDE-waardes 1
(Sherman, Walker & Lo, 2011)*

	$UDE \left[\frac{DALY}{\text{jaar} \cdot \text{persoon}} * \frac{m^3}{\mu g} * 10^{-6} \right]$	$UDE\text{-}waarde \frac{DALY}{100000 \text{ personen} \cdot \text{jaar}} * \frac{m^3}{\mu g}$
NO₂	10.7	1,7
O₃	1.4	0,14
PM2.5	500	50

Het grote nadeel van dit onderzoek voor het verder verloop van dit onderzoek is het feit dat één component niet aanwezig is in dit onderzoek, namelijk PM10.

(Sherman, Walker & Lo, 2011)

3.1.1.2 Onderzoek Finland

De tweede bron heeft als titel “Health Impacts of Ambient Air Pollution in Finland” . In deze bron werd het aantal DALY’s voor de vier polluenten NO₂, O₃, PM2.5 en PM10 bepaald in Finland (tabel 22). Deze waarden werden berekend voor de totale Finse populatie die blootgesteld werd aan een gemiddelde concentratie van elke polluent gedurende 1 jaar. Deze gemiddelde concentratie is ook opgenomen in tabel 22. Omdat in dit onderzoek zal gewerkt worden met het aantal DALY’s per 100.000 personen per jaar dient de Finse populatie gekend te zijn. In het verslag wordt een totale populatie van 5,4 miljoen mensen aangehaald. Deze waarde wordt dan ook gebruikt om het uiteindelijke aantal DALY’s per 100.000 personen per jaar per µg/m³ te bepalen.

(Lehtomäki et al., 2018)

*Tabel 22:UDE-waardes 2
(Lehtomäki et al., 2018)*

Polluent	Aantal DALY DALY $\left[\frac{\text{Finse bevolking} \cdot \text{jaar}}{\text{jaar}} \right]$	Gemiddelde blootstellingsconcentratie bevolking [µg/m³]	UDE-waarde DALY $\left[\frac{\text{100000 personen} \cdot \text{jaar}}{\text{jaar}} \cdot \frac{\text{m}^3}{\mu\text{g}} \right]$
NO₂	4400	12	6,79
O₃	750	53	0,26
PM2.5	26000	5,8	83,01
PM10	3800	12	5,86

Als bovenstaande gegevens van beide onderzoeken naast elkaar geplaatst worden zien we dat de waarden van gelijke aard zijn maar de verhoudingen tussen de verschillende polluenten verschillen van elkaar. Omdat het tweede onderzoek handelt over alle vier de polluenten die hier in beschouwing genomen worden zal gedurende het verder verloop van dit onderzoek gerekend worden met de waarden afkomstig van het Finse onderzoek.

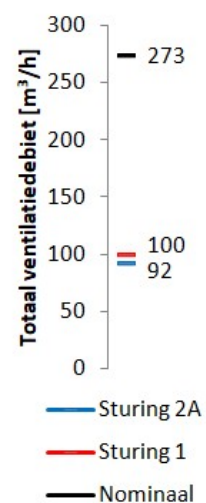
In dit onderzoek zal het voornamelijk de bedoeling zijn om een sturing van een ventilatiesysteem te vinden die ervoor zorgt dat er een gezonder binnenklimaat gecreëerd wordt. Met een gezonder binnenklimaat wordt voornamelijk bedoeld dat de concentraties van de vier buitenluchtpolluenten onder de interventiewaarden gehouden moet worden en idealiter ook onder de richtwaarden. Hierdoor wordt het aantal DALY’s van elk polluent pas berekend vanaf het moment dat de binnenconcentraties hoger worden dan de richtwaarden. Dit gebeurt door middel van het verschil te nemen tussen de reële binnenconcentratie van een polluent en deze waarde te verminderen met de richtwaarde van het polluent. Deze bekomen waarde drukt de concentratie boven de richtwaarde uit en wordt vervolgens vermenigvuldigd met de UDE-waarden. Hierdoor bekomt men het aantal DALY die veroorzaakt worden door de concentraties bovenop de richtwaarde.

3.2 Comfort

Welke sturing voor meer of minder comfort zorgt in de woning wordt begroot door middel van de CO₂- en H₂O-concentraties in de woning. De concentraties van deze stoffen mogen binnenshuis welbepaalde waarden niet overschrijden, indien dit wel gebeurt kan dit leiden tot klachten en dus tot een daling van het comfort in deze woning. Deze grenswaarde voor CO₂ bedraagt 1200 ppm voor korte periodes (Arbeidsreglement ventilatie). Voor H₂O is dit een relatieve vochtigheid van 70%. Deze twee comfort parameters worden door middel van boxplotten met elkaar vergeleken. Hierdoor kunnen de maximale- en minimale pieken, de gemiddelde concentratie, en de spreiding op een eenvoudige wijze vergeleken worden.

3.3 Energie

Het derde en laatste aspect waarop de verschillende sturingen beoordeeld en vergeleken zullen worden met elkaar is het energieverbruik. Het is natuurlijk vanzelfsprekend dat wanneer er bijna voortdurend geventileerd wordt aan het nominaal debiet, het systeem beter zal scoren op de comfort parameters dan wanneer slechts geventileerd wordt aan één tiende van het nominaal debiet. Maar dit leidt niet automatisch tot een betere luchtkwaliteit in de woning. Het energetisch aspect van de sturing zal begroot worden door middel van de som te nemen van het gemiddelde van de ventilatiedebieten per kamer waarin lucht aangevoerd wordt. Hierdoor kan men een vergelijking maken tussen de verschillende sturingen, welke sturing meer of minder energie nodig heeft dan de andere. Deze evaluatieparameters worden gevisualiseerd door middel van een verticale rangschikking, zoals op figuur 17 te zien is. Hierop zijn drie waarden aanwezig, namelijk het totale nominale ventilatiedebiet van de volledige woning, het totale gemiddelde ventilatiedebiet van de traditionele sturing en als laatste het totale gemiddelde ventilatiedebiet van sturing 2 of 3. Door de visualisatie van deze evaluatieparameter kan in één oogopslag waargenomen worden in welke mate het nieuwe systeem energie-efficiënter is dan het basissysteem.



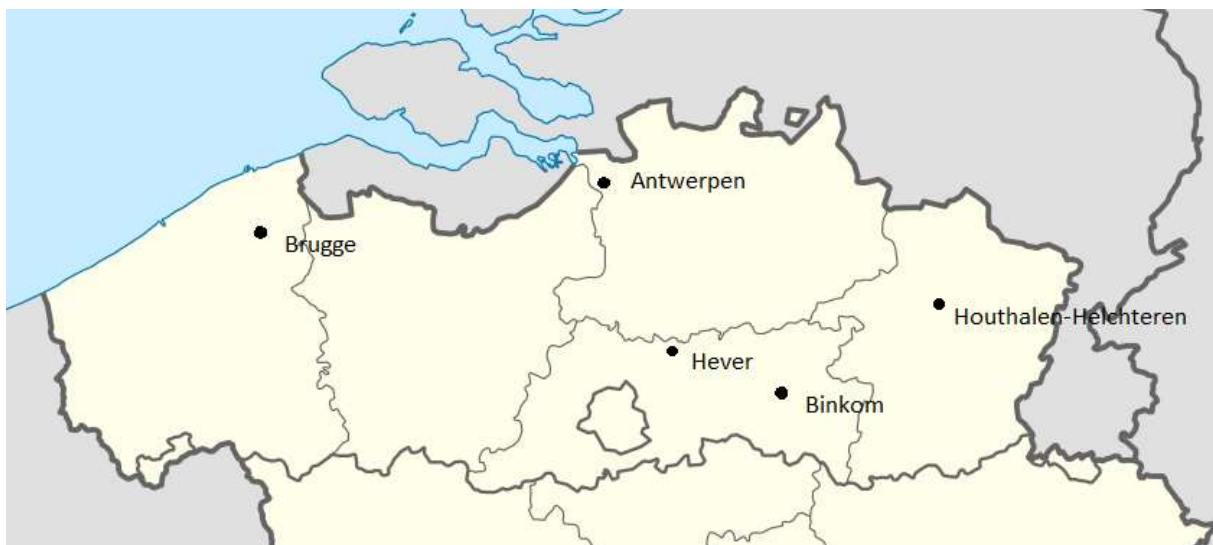
Figuur 17: Visualisatie energieparameter

4 DATA BUITENLUCHTPOLLUENTEN

Om het ventilatiesysteem te sturen op basis van de buitenlucht dienen de buitenluchtparameters gedefinieerd en gekend te zijn. Deze gegevens werden ter beschikking gesteld door Aircheckr, een product van de firma Nazka Mapps dat ondersteund wordt door het Europees Agentschap voor Ruimtevaart (ESA). Aircheckr heeft als doel gegevens omtrent de luchtkwaliteit geschikt te maken voor individueel gebruik of zakelijke toepassingen. Deze gegevens worden aangeboden tot op straatniveau in real-time, waarnaast ook voorspellingen en statistieken tot de mogelijkheden behoren. Aircheckr selecteerde hiervoor vier polluenten, NO_2 , O_3 , $\text{PM}_{2.5}$ en PM_{10} , die gebruikt worden om de kwaliteit van de buitenlucht te definiëren.

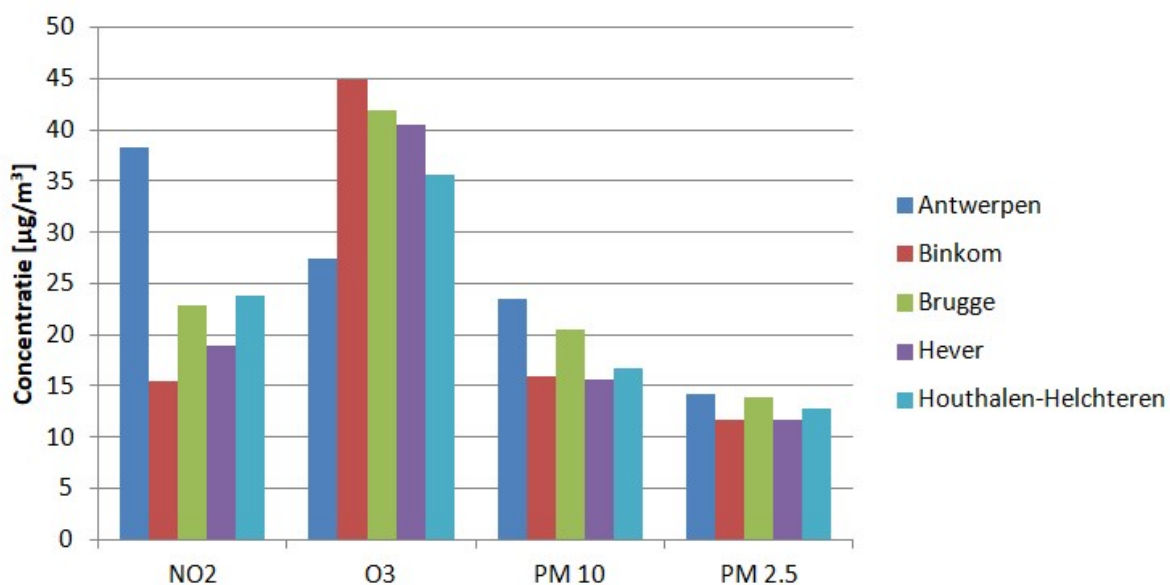
De concentraties van de vier polluenten NO_2 , O_3 , $\text{PM}_{2.5}$ en PM_{10} voor de onderstaande locaties werden verkregen. De ligging van deze locaties is weergegeven op figuur 18.

- Antwerpen
- Houthalen-Helchteren
- Binkom
- Brugge
- Hever



Figuur 18: Ligging vijf locaties (Wikipedia, 2019)

Deze locaties werden gekozen op basis van hun karakteristieke eigenschappen zoals bebouwing, transport, Voor elke locatie wordt de kwaliteit van de buitenlucht beschreven door vier polluenten vanaf 11 september 2017 tot 9 april 2018. Aan de hand van deze gegevens wordt in dit onderzoek bepaald in welke mate er geventileerd kan worden. Hieronder zal gestart worden met een algemene beschrijving van de geselecteerde locaties met vervolgens een analyse van de buitenluchtparameters. In deze beschrijving zal getracht worden verbanden te leggen tussen enerzijds de trends in de parameters en anderzijds de karakteristieken van de desbetreffende locatie. In figuur 19 worden de gemiddelde waarden van de vier polluenten voor elke locatie weergegeven. Er wordt in het verloop van dit onderdeel geregeld naar deze grafiek verwezen. De andere figuren die aan bod zullen komen geven de concentraties van één van de vier buitenluchtpolluenten weer in functie van de tijd. De richt- en interventiewaarde is hierop telkens aanwezig. Deze waarden zijn afkomstig van het binnenmilieubesluit en de WGO-richtlijn voor buitenluchtkwaliteit, ze komen later in dit verslag nog uitgebreid aan bod. Als laatste zal per locatie de buitenlucht gekwalificeerd worden volgens de indeling die opgesteld werd door Aircheckr. Deze indeling kwam al reeds aan bod in de literatuurstudie en is daar dan ook terug te vinden. Deze indeling gebeurt maandelijks, algemeen dient wel opgemerkt te worden dat voor de maand april de gegevens beperkt zijn tot slechts 7-9 dagen waardoor de beoordeling van deze maand met een korrel zout dient genomen te worden.

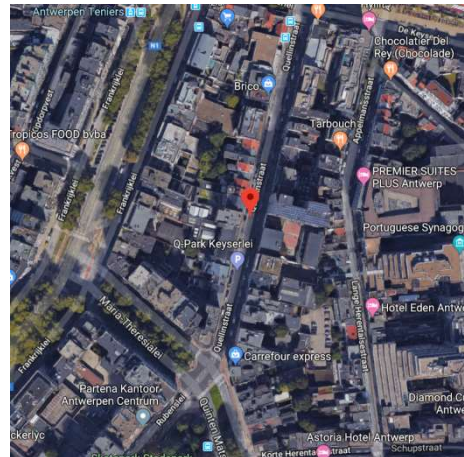


Figuur 19: Gemiddelde waarden van de polluenten voor de verschillende locaties ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

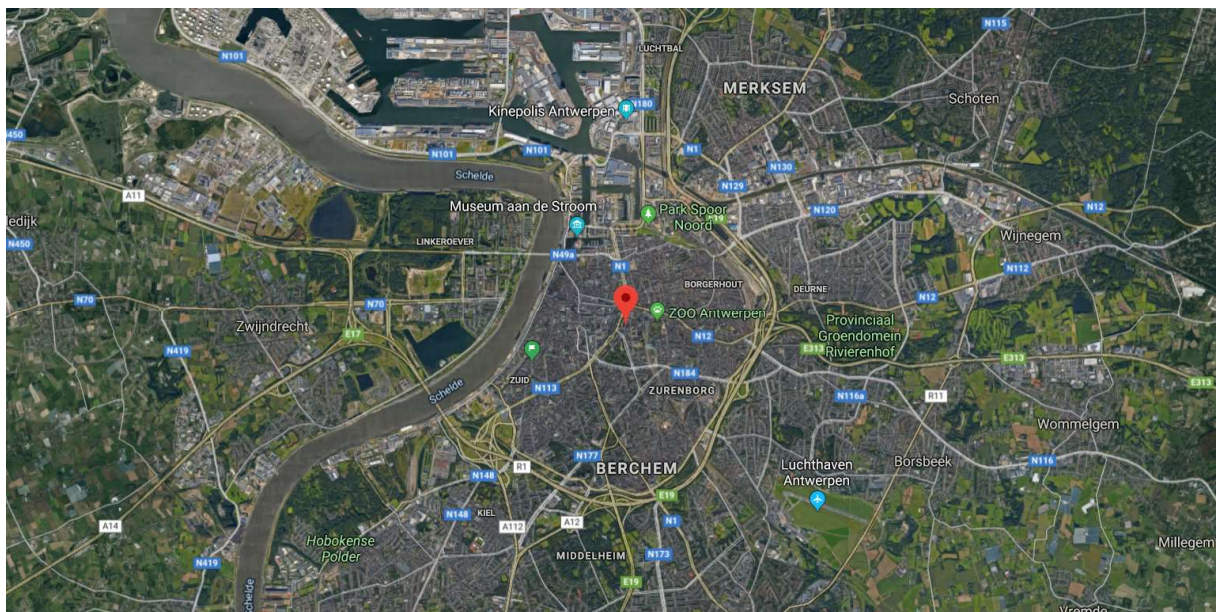
4.1 Antwerpen

4.1.1 Ligging

De eerste locatie heeft als coördinaten 51.216136 noorderbreedte en 4.416110 zuiderbreedte. Dit zijn de coördinaten van de Quellinstraat in het centrum van de stad Antwerpen (figuur 20). Deze locatie wordt gekenmerkt door zijn stedelijk karakter. Het heeft een zeer geconcentreerde bebouwing, wat aanleiding kan gegeven tot luchtvervuiling door huishoudelijke activiteiten zoals verwarming. Hiernaast kan ook de nabij gelegen haven van Antwerpen, figuur 21, een belangrijke invloed uitoefenen op de kwaliteit van de buitenlucht. Als laatste is op deze locatie de invloed van het verkeer niet te verwaarlozen. Het verkeer is permanent aanwezig in het straatbeeld waardoor het zorgt voor de uitstoot van pollutanten. Door bovengenoemde factoren wordt hier een minder gunstige kwaliteit van de buitenluchtklimaat verwacht.



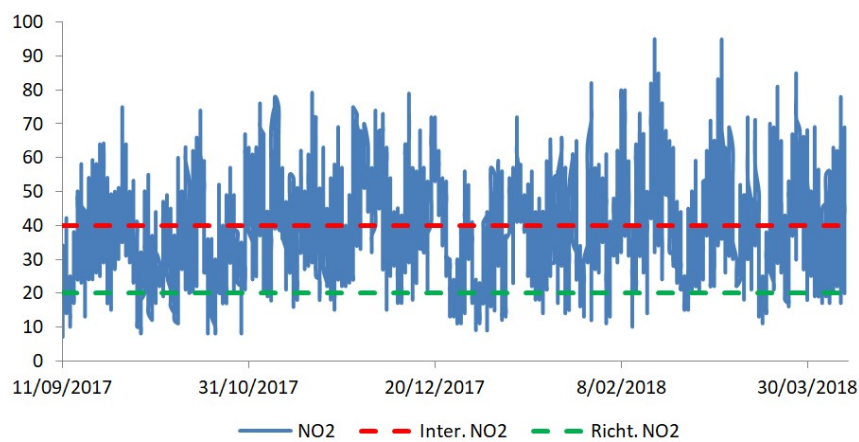
*Figuur 20: Quellinstraat, Antwerpen
(Google Maps, 2019)*



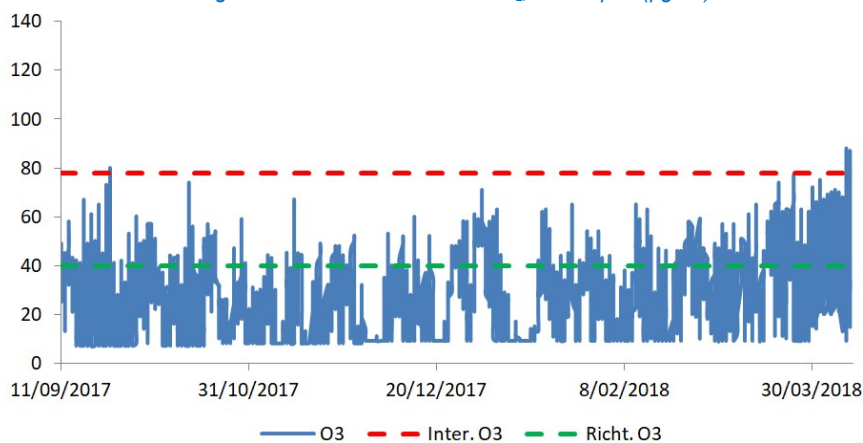
*Figuur 21: Ruime omgeving Quellinstraat, Antwerpen
(Google Maps, 2019)*

4.1.2 Buitenconcentraties

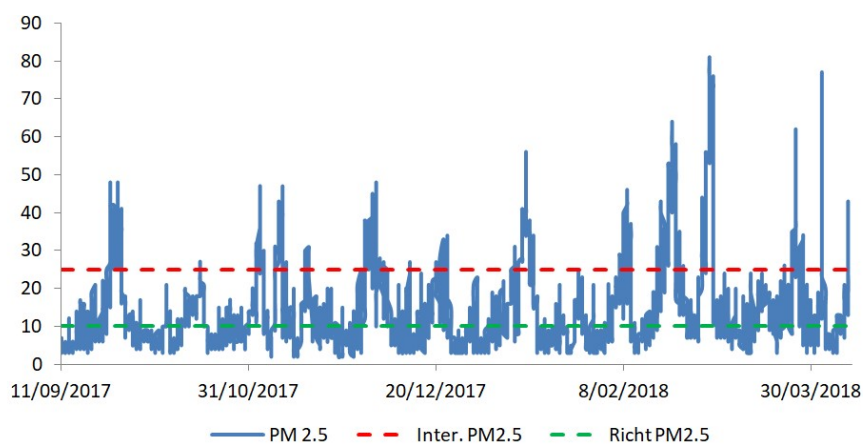
Wanneer er gekeken wordt naar figuur 19 valt er op dat de gemiddelde concentratie van NO_2 in Antwerpen ongeveer het dubbele bedraagt in vergelijking met de andere steden. Dit opmerkelijk gegeven kan verklaard worden door de aanwezigheid van het drukke wegverkeer in de stad Antwerpen. Vervolgens zijn op deze figuur de ozonwaardes veel lager voor deze locatie. Dit is te wijten aan het omgekeerd verband dat deze stof heeft met stikstofdioxide, de reden hiervoor komt bij de volgende locatie uitgebreid aan bod. Als laatste zijn de waardes voor PM_{10} en $\text{PM}_{2.5}$ lichtjes hoger dan in de andere steden het geval is. Dit kan in alle waarschijnlijkheid toegeschreven worden aan de dichte bebouwing van deze locatie, waardoor de uitstoot van fijn stof door huishoudens sterk vertegenwoordigd is. Als de figuren 22, 23, 24 en 25 van naderbij bekeken worden, valt op dat de NO_2 -concentraties voor het overgrote deel van de tijd gelegen zijn boven de interventiewaarde van $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Hierdoor zal deze stof een doorslaggevende rol spelen op deze locatie voor de verschillende sturingen. Daar staan tegenover dat op figuur 23 de ozonconcentraties zich voornamelijk onder de richtwaarde bevinden van $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en maar slechts enkele keren licht boven de interventiewaarde uitsteekt. Deze stof heeft hierdoor een zeer geringe invloed op de sturingen in dit onderzoek. In figuren 24 en 25 valt op te merken dat het verloop van de concentraties van de stoffen $\text{PM}_{2.5}$ en PM_{10} vergelijkbaar zijn. Dit fenomeen komt telkens terug bij de verschillende andere locaties en is te wijten aan het specifieke verband dat aanwezig is tussen $\text{PM}_{2.5}$ en PM_{10} .



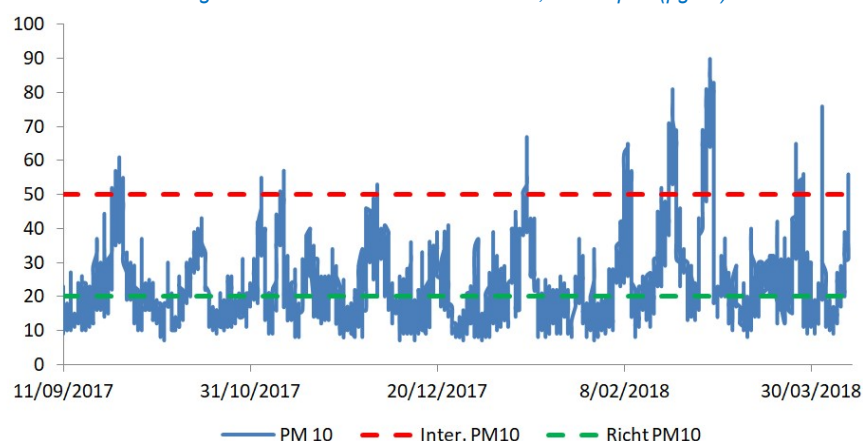
Figuur 22: Buitenconcentratie NO_2 , Antwerpen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



Figuur 23: Buitenconcentratie O_3 , Antwerpen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



Figuur 24: Buitenconcentraties PM2.5, Antwerpen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



Figuur 25: Buitenconcentraties PM10, Antwerpen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

4.1.3 Classificatie

10	Excellent
9	Good
8	Quite good
7	Acceptable
6	Moderate
5	Insufficient
4	Rather poor
3	Poor
2	Bad
1	Very bad
0	Extremely bad

In tabel 23 is voor elke maand de indeling van de buitenluchtpolluenten weergegeven in het classificatiesysteem van Aircheckr. In deze tabel is te zien dat de NO_2 waarden in de buitenlucht slechts matig tot acceptabel zijn in tegenstelling tot de andere drie polluenten waarvan de maandelijkse concentraties best goed tot uitstekend zijn. Vervolgens scoort ook PM10 minder dan het geval is bij O_3 en PM2.5. De algemene kwaliteit van de buitenlucht kan als best goed ingeschat worden.

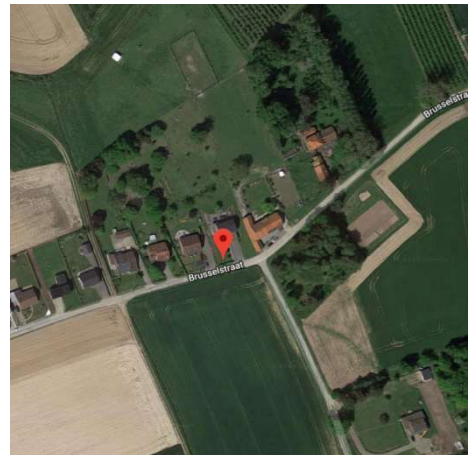
Tabel 23: Indeling buitenlucht volgens Aircheckr, Antwerpen

	NO_2	O_3	PM10	PM2.5
September	Acceptable	Good	Quite good	Good
Oktober	Acceptable	Good	Good	Excellent
November	Acceptable	Good	Quite good	Good
December	Acceptable	Good	Quite good	Good
Januari	Acceptable	Good	Quite good	Good
Februari	Acceptable	Good	Quite good	Quite good
Maart	Acceptable	Quite good	Quite good	Quite good
April	Acceptable	Acceptable	Quite good	Good

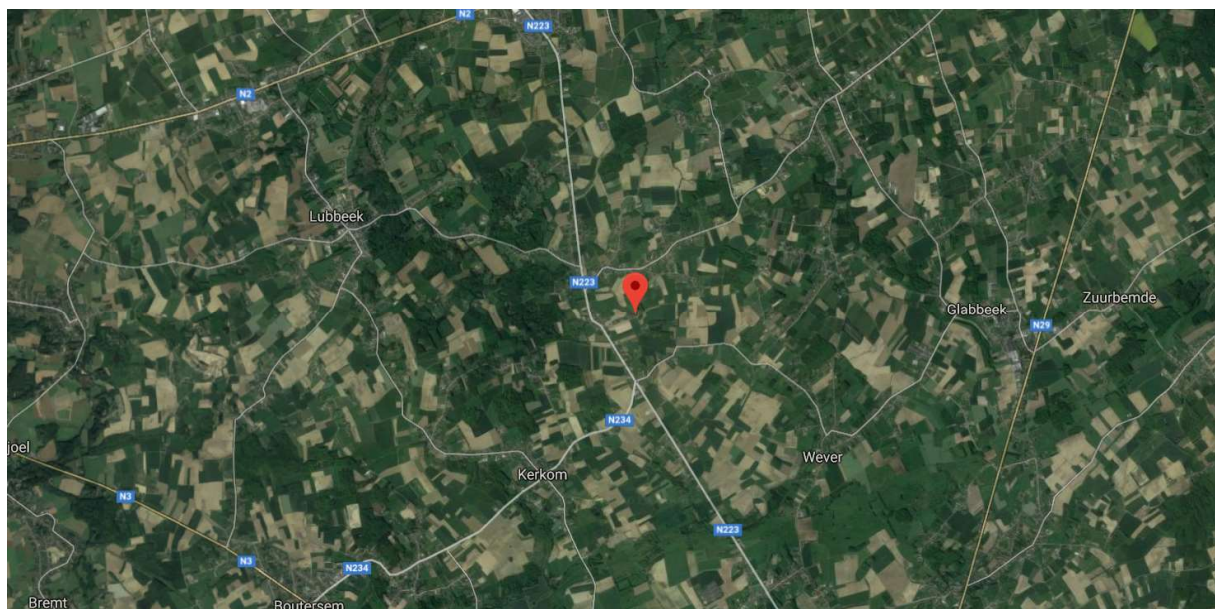
4.2 Binkom

4.2.1 Ligging

De tweede locatie die geselecteerd werd heeft als coördinaten 50.872100 noorderbreedte, 4.890290 zuiderbreedte. Deze coördinaten zijn gelegen op de Brusselstraat in het dorp Binkom. Het is een deelgemeente van Lubbeek en behoort tot de provincie Vlaams-Brabant. Zoals op figuur 26 te zien is, ligt deze locatie in een zeer landelijk gebied met veel groen en slechts enkele alleenstaande woningen. De Brusselstraat dient voornamelijk voor de ontsluiting van de verschillende wooneenheden waardoor het dagelijkse verkeer beperkt is. Wanneer figuur 27 in beschouwing genomen wordt is in de wijde omgeving van de locatie geen enkele vorm van grootschalige industrie te bespeuren. Enkel de aanwezigheid van enkele landbouwbedrijven zijn waar te nemen. De belangrijkste bronnen van verontreiniging voor deze locatie zijn enerzijds de landbouwactiviteiten en anderzijds de wooneenheden, maar over het algemeen kan men hier een relatief gunstig buitenluchtklimaat verwachten.



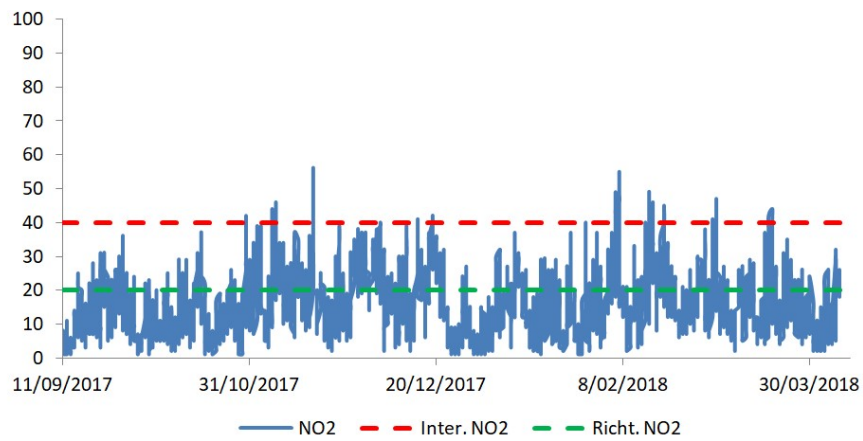
*Figuur 26: Brusselstraat, Binkom
(Google Maps, 2019)*



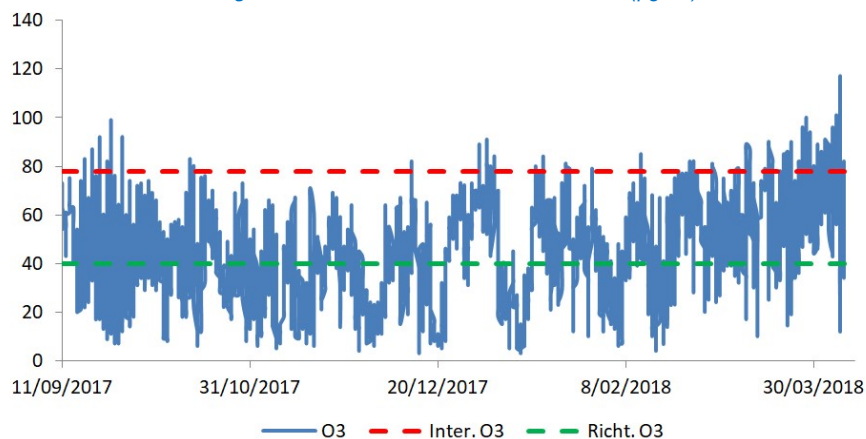
*Figuur 27: Ruime omgeving Brusselstraat, Binkom
(Google Maps, 2019)*

4.2.2 Buitenconcentraties

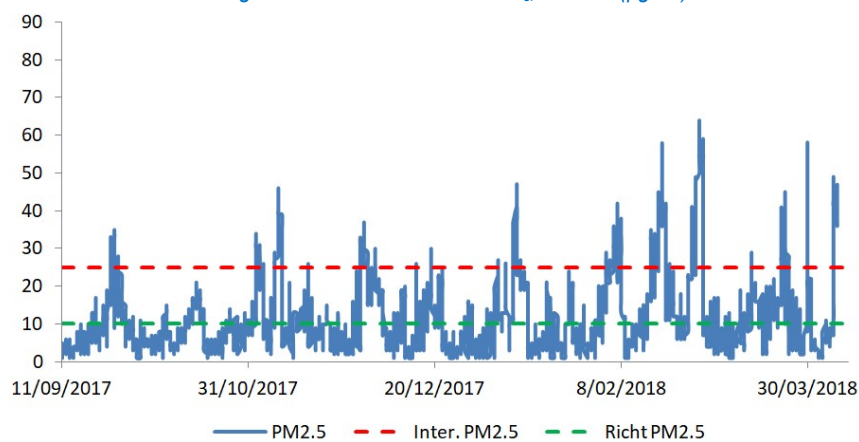
In figuur 19 is te zien dat de buitenluchtconcentraties voor NO_2 het laagst zijn, samen met lage waarden voor PM_{10} en $\text{PM}_{2.5}$, maar met een gemiddelde concentratie aan ozon in de buitenlucht die maximaal is in vergelijking met de andere locaties. Het is algemeen gekend dat de ozonwaarden in landelijke gebieden hoger zijn en dan ook vaker de normwaarde overschrijden. De voornaamste reden hiervoor is het feit dat de afbraak van ozon zeer sterk gelinkt is aan de lokale aanwezigheid van stikstofmonoxide (NO). Deze stikstofmonoxide wordt voornamelijk uitgestoten door het wegverkeer. Dit NO breekt ozon af door de omzetting tot stikstofdioxide (NO_2). Het gevolg is dat de ozonconcentraties meestal lager zijn op plaatsen met veel verkeer, zoals bij de locatie Antwerpen het geval is, en hoger zijn in landelijke omgevingen zoals hier het geval is. Hiernaast is ook te verwachten dat methaan, afkomstig van de landbouwactiviteiten, een belangrijke invloed zal spelen op de hoge concentraties ozon. De lage concentraties NO_2 kunnen dan ook verklaard worden aan de hand van de hierboven al reeds beschreven omzettingsreactie. De lage waarden voor fijn stof zijn dan weer te verklaren door enerzijds de afwezigheid van een dichte bebouwing, waardoor de uitstoot door verwarming van gebouwen miniem is. Maar anderzijds zou men hier verwachten dat de landbouw zorgt voor hoge hoeveelheden fijn stof. Dit is niet het geval omdat gedurende de geanalyseerde periodes de landbouwactiviteiten grotendeels stopgezet zijn door het koude weer. Deze activiteiten herstarten voornamelijk ongeveer in april, maar de concentraties voor deze maand zijn relatief beperkt waardoor dit fenomeen niet zichtbaar is in de resultaten. Door beide redenen zijn de fijn stof concentraties relatief laag op deze locatie. Op de figuren 28, 29, 30 en 31 zijn de concentraties voor deze locaties in functie van de tijd weergegeven. Hierop is te zien dat de NO_2 -concentraties slechts enkele keren boven de interventiewaarden uitkomen. Hiernaast komen de O_3 -concentraties veel meer boven de richt- en interventiewaarde uit, waardoor het een belangrijker pollutant vormt van de buitenlucht op de locatie Binkom. Op de laatste twee figuren zien we dat, in vergelijking met de locatie Antwerpen, het belang van $\text{PM}_{2.5}$ en PM_{10} zal afnemen door lagere concentraties.



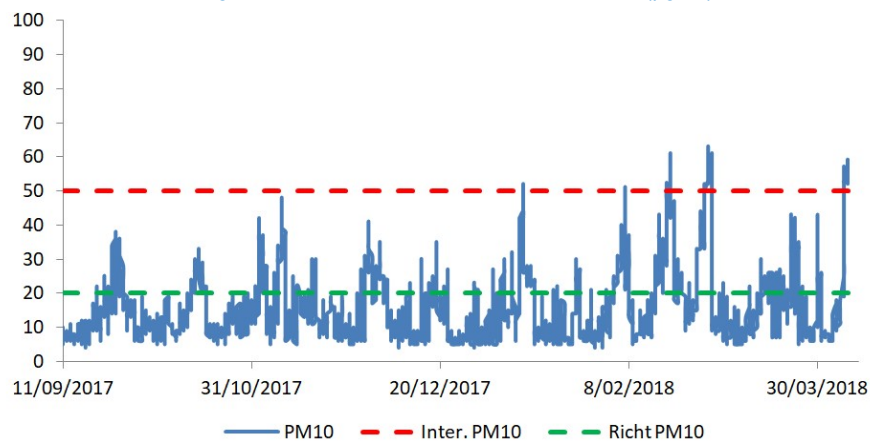
Figuur 28: Buitenconcentratie NO₂, Binkom (µg/m³)



Figuur 29: Buitenconcentratie O₃, Binkom (µg/m³)



Figuur 30: Buitenconcentraties PM2.5, Binkom (µg/m³)



Figuur 31: Buitenconcentraties PM10, Binkom (µg/m³)

4.2.3 Classificatie

10	Excellent
9	Good
8	Quite good
7	Acceptable
6	Moderate
5	Insufficient
4	Rather poor
3	Poor
2	Bad
1	Very bad
0	Extremely bad

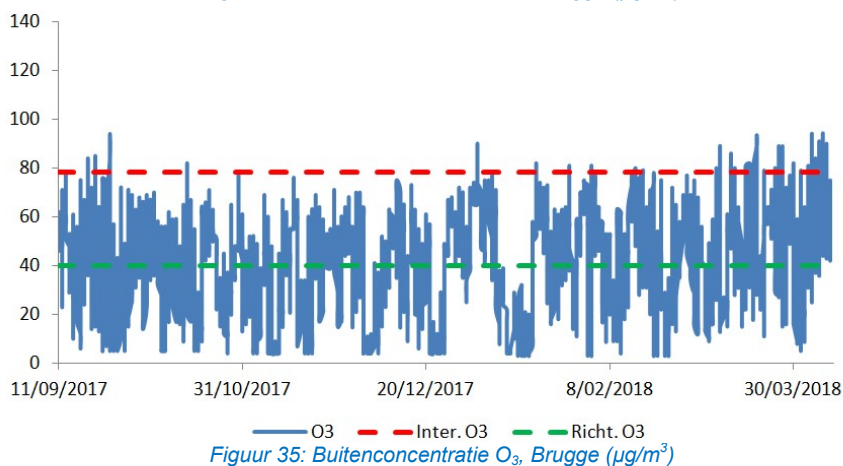
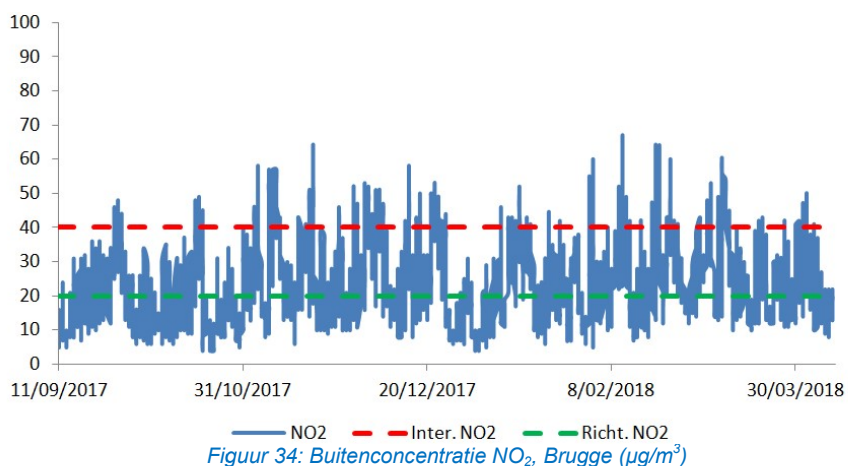
In tabel 24 wordt een maandelijkse beoordeling weergegeven van de vier buitenluchtpolluenten. Hierbij scoren de ozonwaardes opvallend lager dan de overige polluenten, met een algemene indeling van aanvaardbaar. De concentratie van de andere drie polluenten scoren veel beter met een opvallend goede beoordeling voor PM2.5 waarbij enkele maanden een excellente indeling verkrijgen. Algemeen kan voor deze locatie een goede kwaliteit van de buitenlucht toegekend worden.

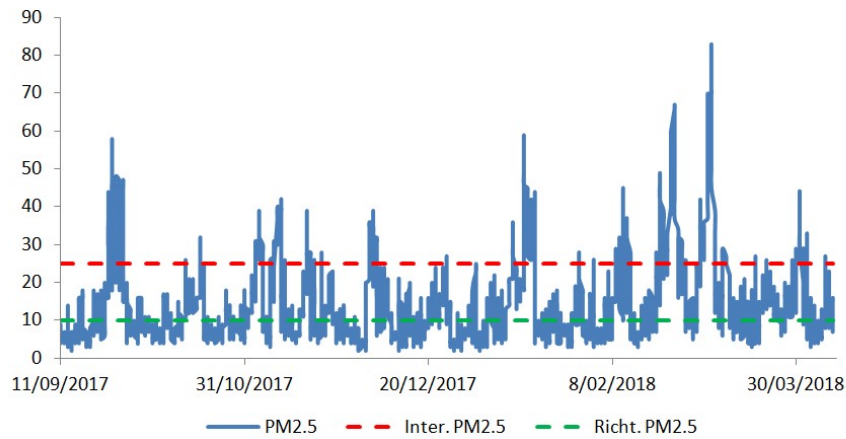
Tabel 24: Indeling buitenlucht volgens Aircheckr, Binkom

	NO ₂	O ₃	PM10	PM2.5
September	Good	Acceptable	Good	Excellent
Oktober	Good	Acceptable	Good	Excellent
November	Good	Quite good	Good	Good
December	Good	Quite good	Good	Good
Januari	Good	Acceptable	Good	Excellent
Februari	Good	Acceptable	Quite good	Quite good
Maart	Good	Acceptable	Good	Good
April	Good	Moderate	Good	Good

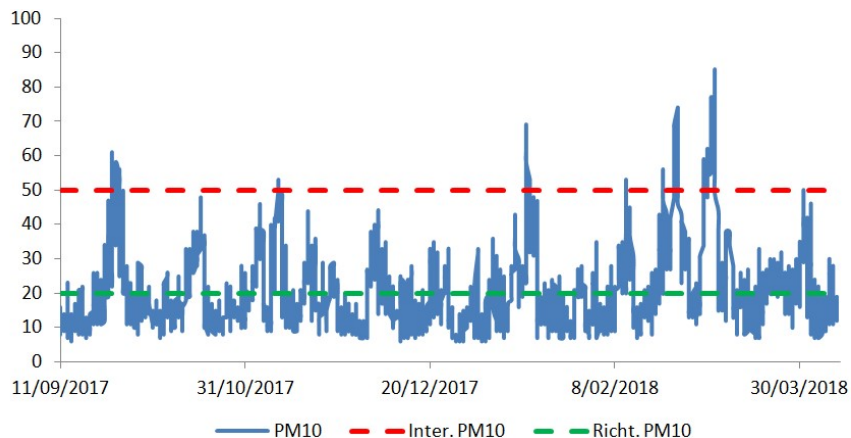
4.3.2 Buitenconcentraties

Voor de locatie Brugge kan in figuur 19 over het algemeen besloten worden dat de concentraties van de polluenten op deze locatie tussen deze van de andere locaties gelegen zijn. Eventueel kan nog opgemerkt worden dat de gemiddelde waarde aan PM10 en PM2.5 relatief hoog liggen. Dit valt opnieuw, zoals bij de locatie in Antwerpen, te verklaren door de hoge dichtheid van de gebouwen in de stad waardoor de uitstoot van fijn stof door deze huishoudens hoog ligt. Op de figuren 34, 35, 36 en 37 zijn de concentraties in functie van de tijd weergegeven. Hieruit valt te constateren dat voor de locatie Brugge het belang van NO₂ en O₃ evenwaardig zal zijn. De locatie Brugge schommelt voor de concentraties van deze twee polluenten tussen de locaties Antwerpen en Binkom. Dit valt ook te bevestigen door het enerzijds stedelijke karakter van de stad Brugge in combinatie met het vele groen in de stad met slechts matig verkeersdrukke. De concentraties aan PM2.5 en PM10 op deze locatie zijn vergelijkbaar met deze van Antwerpen.





Figuur 36: Buitenconcentratie PM2.5, Brugge ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



Figuur 37: Buitenconcentratie PM10, Brugge ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

4.3.3 Classificatie

10	Excellent
9	Good
8	Quite good
7	Acceptable
6	Moderate
5	Insufficient
4	Rather poor
3	Poor
2	Bad
1	Very bad
0	Extremely bad

Als de buitenluchtpolluenten per maand beoordeeld worden aan de hand van het classificatiesysteem van Aircheckr bekomt men tabel 25. Hierop is te zien dat, opnieuw zoals bij de locatie Binkom, de ozonconcentraties het slechts scoren ten opzichte van de andere polluenten met een beoordeling als acceptabel. Vervolgens volgt bij deze locatie NO_2 , met een algemene beoordeling van best goed, PM10 gevolgd door PM2.5 met de hoogste beoordeling. Over het algemeen kan voor deze locatie een best goede kwaliteit van de buitenlucht geconcludeerd worden.

Tabel 25: Indeling buitenlucht volgens Aircheckr, Brugge

	NO2	O3	PM10	PM2.5
September	Quite good	Quite good	Quite good	Good
Oktober	Good	Acceptable	Good	Excellent
November	Quite good	Quite good	Quite good	Good
December	Quite good	Quite good	Good	Good
Januari	Quite good	Acceptable	Good	Good
Februari	Quite good	Acceptable	Quite good	Quite good
Maart	Quite good	Acceptable	Quite good	Quite good
April	Quite good	Acceptable	Good	Good

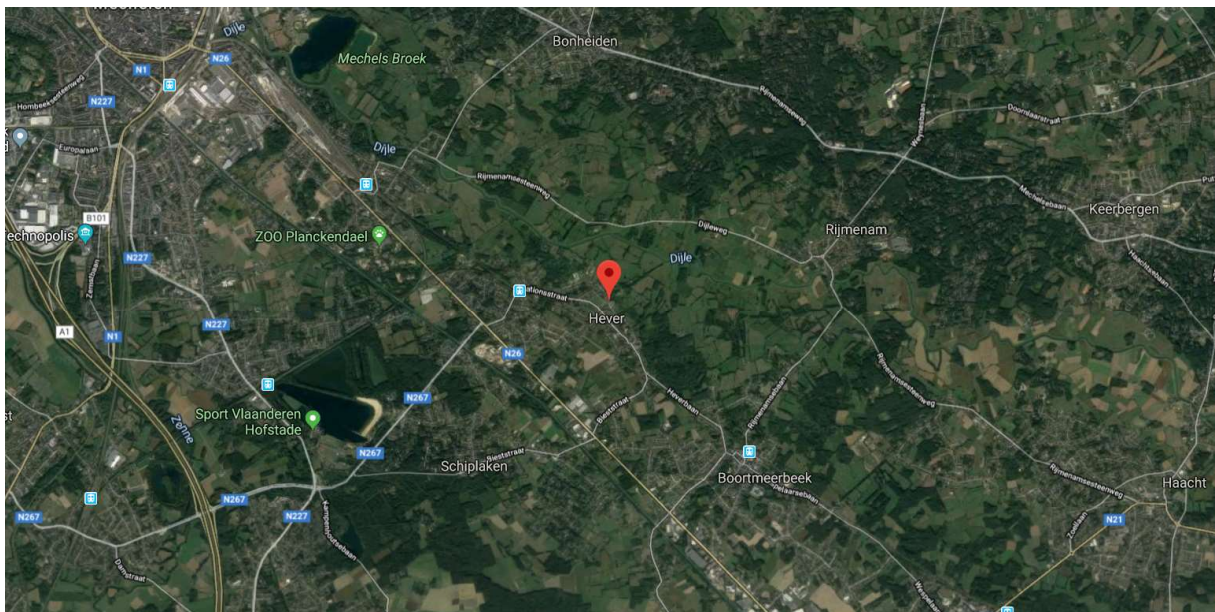
4.4 Hever

4.4.1 Ligging

De voorlaatste locatie bezit de coördinaten 50.996557 N en 4.551676 Z. Het is de Ravesteinstraat in Hever (figuur 38), een deelgemeente van Boortmeerbeek, gelegen in de provincie Vlaams-Brabant. Deze locatie is semi-landelijk omdat het zich bevindt aan de rand van het dorp Hever. De bebouwing is hier aan de lage kant en de hoeveelheid wegverkeer is laag. In de ruime omgeving ligt de stad Mechelen (figuur 39) die eventueel een invloed kan uitoefenen op de luchtkwaliteit van deze locatie. Overigens zijn er geen grootschalige bedrijventerreinen of landbouwactiviteiten in de directe omgeving van deze locatie. De buitenluchtkwaliteit op deze locatie kan hierdoor relatief gunstig ingeschat worden.



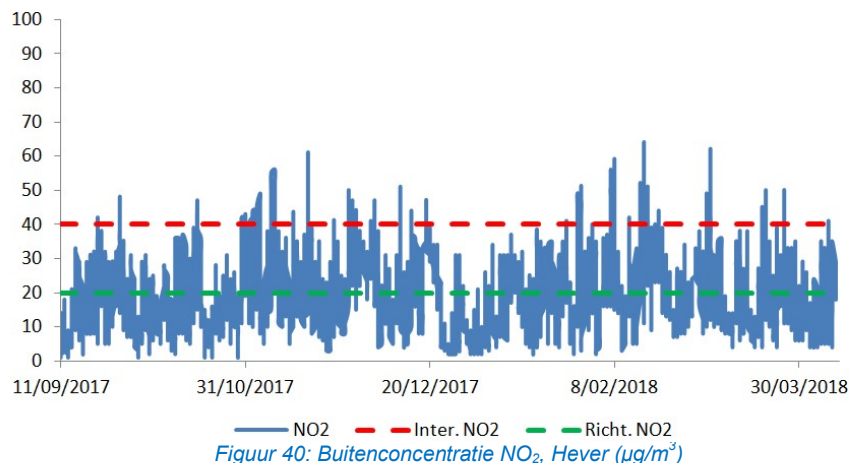
*Figuur 38: Ravesteinstraat, Hever
(Google Maps, 2019)*



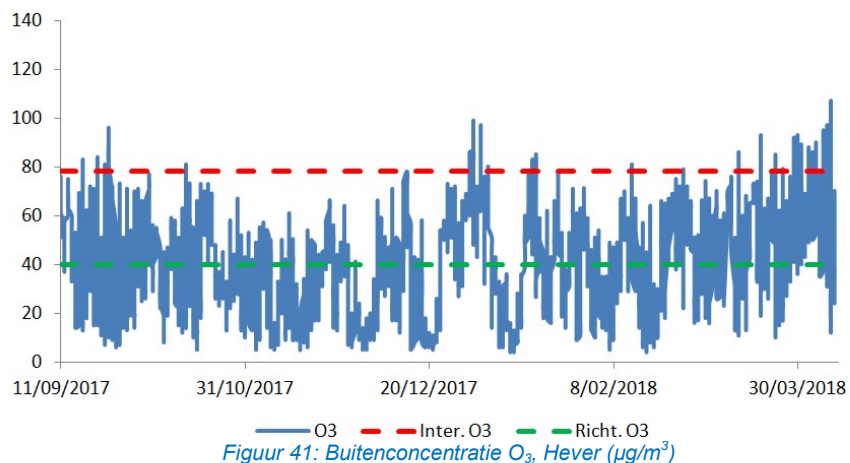
*Figuur 39: Ruime omgeving Ravesteinstraat, Hever
(Google Maps, 2019)*

4.4.2 Buitenconcentraties

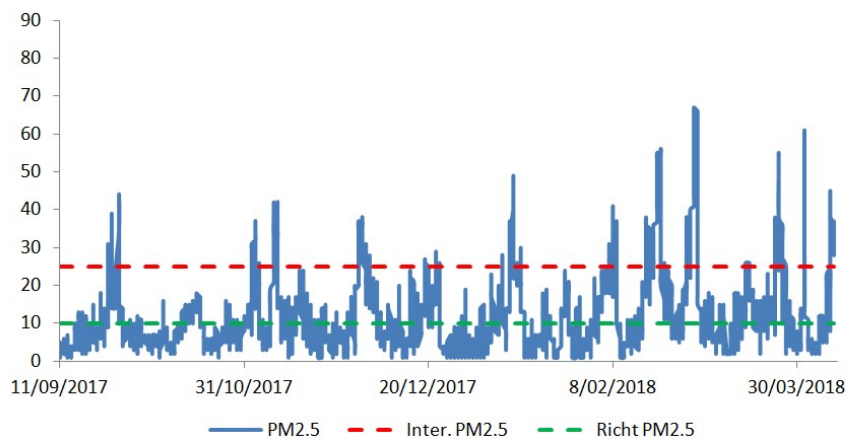
De locatie Hever kent een matig buitenluchtklimaat, figuur 19, met lage waarden voor PM10 en PM2.5 en een lage waarde voor NO₂ ten op zichte van de andere locaties. De relatief lage NO₂-concentraties kunnen toegeschreven worden aan het landelijke dorpskarakter van de locatie waar druk verkeer ongekend is. Omwille van de afwezigheid van dit verkeer, is ook de uistoot van NO in deze omgeving relatief laag waardoor ozon weinig afgebroken wordt. Hierdoor zijn de ozonconcentraties aan de iets hogere kant, net zoals bij de sterk landelijke locatie van Binkom het geval was. De lage waarden voor fijn stof zijn te verklaren door enerzijds de lage dichtheid van de bebouwing en anderzijds door de landbouwactiviteiten die gedurende de onderzochte periode volledig stil liggen. De figuren 40, 41, 42 en 43 duiden terug aan dat NO₂, O₃ en PM2.5 de belangrijkste stoffen zullen zijn voor de sturingen van deze locatie omdat hun concentraties veel tussen of boven de richt- en interventiewaarde gelegen zijn.



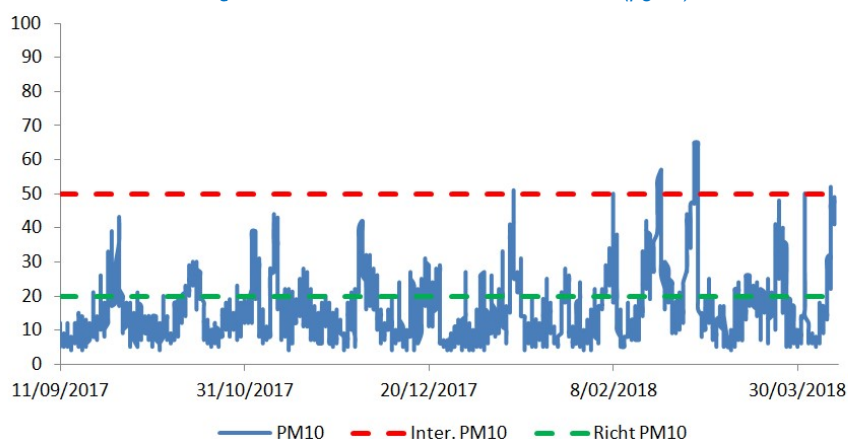
Figuur 40: Buitenconcentratie NO₂, Hever (µg/m³)



Figuur 41: Buitenconcentratie O₃, Hever (µg/m³)



Figuur 42: Buitenconcentratie PM2.5, Hever ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



Figuur 43: Buitenconcentratie PM10, Hever ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

4.4.3 Classificatie

10	Excellent
9	Good
8	Quite good
7	Acceptable
6	Moderate
5	Insufficient
4	Rather poor
3	Poor
2	Bad
1	Very bad
0	Extremely bad

Een beoordeling van de kwaliteit van de buitenlucht van de locatie Hever, tabel 26, leert ons dat ozon het slechtst scoort bij deze beoordeling, maar dat de andere pollutanten, met op kop PM2.5 en PM10, een goede beoordeling krijgen tot zelfs excellent. Hierdoor kan algemeen gesteld worden dat de kwaliteit van de buitenlucht als goed beoordeelt kan worden.

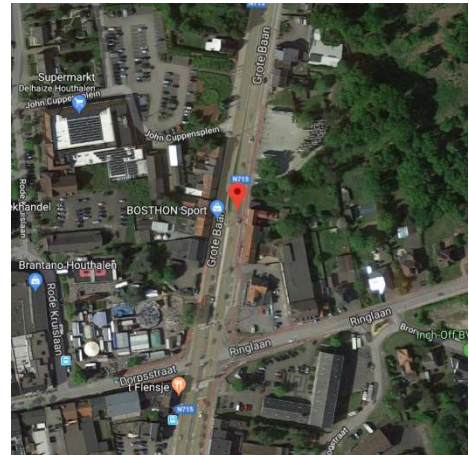
Tabel 26: Indeling buitenlucht volgens Aircheckr, Hever

	NO ₂	O ₃	PM10	PM2.5
September	Good	Acceptable	Good	Excellent
Oktober	Good	Acceptable	Good	Excellent
November	Quite good	Good	Good	Good
December	Quite good	Quite good	Good	Good
Januari	Good	Acceptable	Good	Good
Februari	Quite good	Quite good	Quite good	Quite good
Maart	Good	Acceptable	Good	Good
April	Good	Moderate	Good	Good

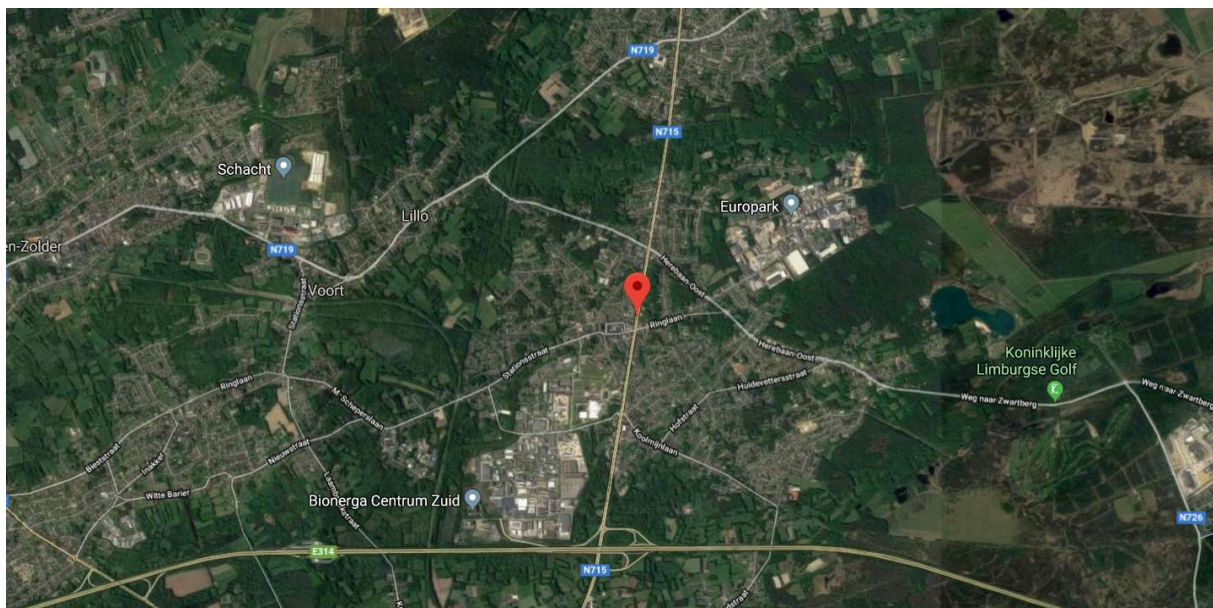
4.5 Houthalen-Helchteren

4.5.1 Ligging

De laatste geselecteerde locatie is de Grote Baan in Houthalen-Helchteren, figuur 44, gelegen in de provincie Limburg, met als coördinaten 51.032146 N en 5.376869 Z. Een element dat onmiddellijk opvalt bij deze locatie, en wat een belangrijke invloed zal hebben op de luchtkwaliteit, is de grote hoeveelheid aan wegverkeer. Dit bestaat uit doorgaand verkeer van zowel personenwagens als vrachtwagens. Hiernaast bevindt de locatie zich in het centrum van de gemeente Houthalen-Helchteren met in de directe omgeving, figuur 45, de ligging van twee grote bedrijventerreinen. Voorgaande elementen zullen zorgen voor een negatieve impact op de luchtkwaliteit waardoor de te verwachten buitenlucht minder gunstig kan ingeschat worden.



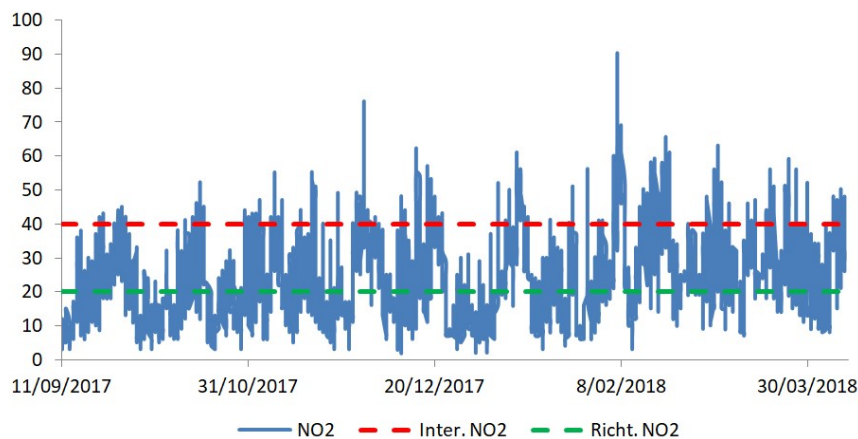
Figuur 44: Grote Baan, Houthalen-Helchteren (Google Maps, 2019)



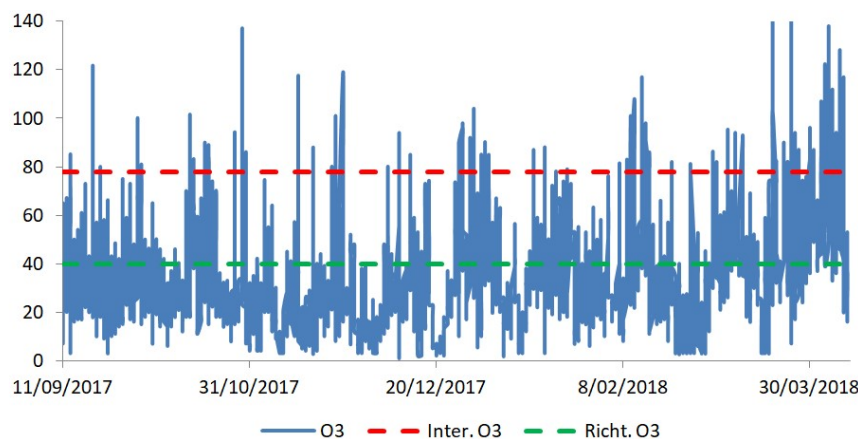
Figuur 45: Ruime omgeving Grote Baan, Houthalen-Helchteren (Google Maps, 2019)

4.5.2 Buitenconcentraties

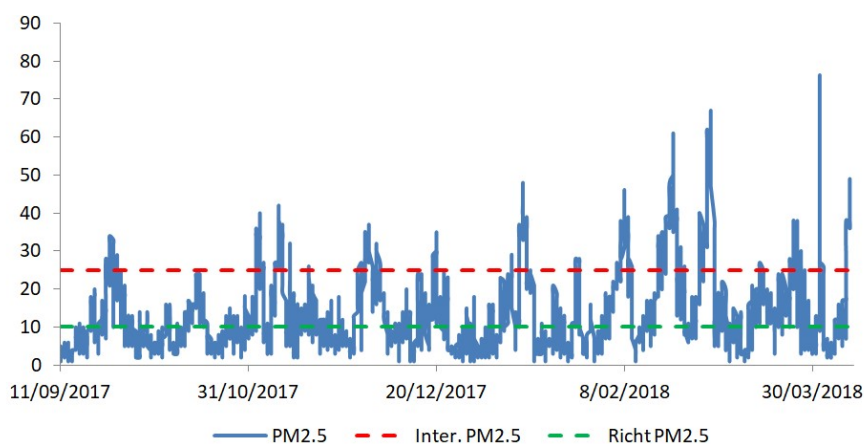
Houthalen-Helchteren kent in figuur 19 een vergelijkbaar toestand met de andere locaties. Op het vlak van ozon doet deze locatie het beter dan de meeste andere, in tegenstelling tot het pollutant NO_2 waar de gemiddelde concentratie hoger is. Deze vaststellingen kunnen ook gemaakt worden wanneer figuur 46 en 47 bekeken worden. De concentraties aan NO_2 bevinden zich gedurende langere periodes boven de richtwaarde. De redenen voor deze concentraties aan NO_2 en O_3 zijn identiek aan deze die bij de vorige locaties aan bod kwamen. De hoge NO_2 -waarden zijn ten gevolge van het drukke verkeer op de locatie, wat vervolgens ook leidt tot lage O_3 -waarden door de afbraak onder invloed van NO . Vervolgens is nog op te merken dat een zeer hoge concentratie zich voordoet voor O_3 , met een waarde van $231 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De iets hogere gemiddelde waarden voor de fijn stof componenten, figuur 48 en 49, voor deze locatie in vergelijking met Binkom en Hever kunnen waarschijnlijk toegeschreven worden aan het verkeer in combinatie met de industriële activiteiten.



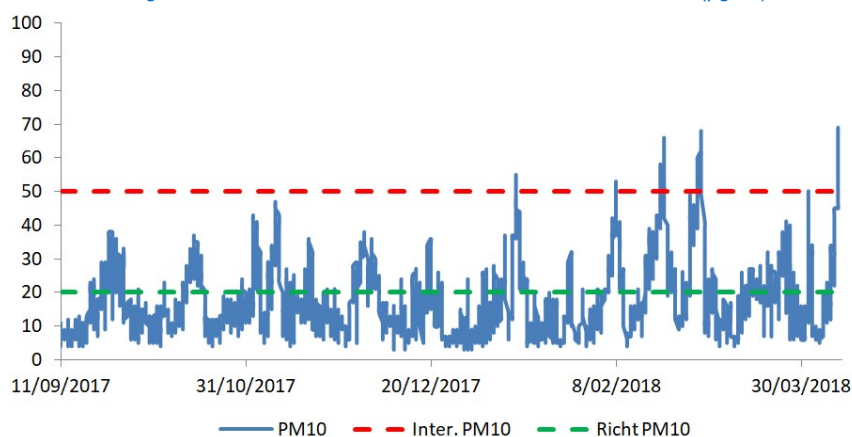
Figuur 46: Buitenconcentratie NO_2 , Houthalen-Helchteren ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



Figuur 47: Buitenconcentratie O_3 , Houthalen-Helchteren ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



Figuur 48: Buitenconcentratie PM2.5, Houthalen-Helchteren ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



Figuur 49: Buitenconcentratie PM10, Houthalen-Helchteren ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

4.5.3 Classificatie

10	Excellent
9	Good
8	Quite good
7	Acceptable
6	Moderate
5	Insufficient
4	Rather poor
3	Poor
2	Bad
1	Very bad
0	Extremely bad

Een maandelijkse beoordeling van de vier buitenluchtpolluenten volgens het classificatiesysteem van Aircheckr is weergegeven op tabel 27. Hierop zijn NO_2 en O_3 evenwaardig aan elkaar met een algemene beoordeling van best goed, net zoals PM10 en PM2.5 dit zijn met een beoordeling van goed. De algemene beoordeling van de kwaliteit van de buitenlucht is relatief goed.

Tabel 27: Indeling buitenlucht volgens Aircheckr, Houthalen-Helchteren

	NO_2	O_3	PM10	PM2.5
September	Quite good	Quite good	Good	Good
Oktober	Good	Quite good	Good	Excellent
November	Quite good	Good	Good	Good
December	Quite good	Quite good	Good	Good
Januari	Quite good	Quite good	Good	Good
Februari	Acceptable	Quite good	Quite good	Quite good
Maart	Quite good	Acceptable	Quite good	Quite good
April	Quite good	Moderate	Good	Good

5 GEBRUIKTE METHODE

De bedoeling van dit onderzoek is om de drie verschillende types sturingen van het ventilatiesysteem op te bouwen in het programma contam en deze vervolgens te simuleren in de tijd. Contam is een simulatieprogramma voor binnenluchtkwaliteit en ventilatie waarbij gegevens over luchtstromingen, verontreinigingconcentraties en persoonlijke blootstellingen van personen kunnen verkregen worden uit de simulaties.

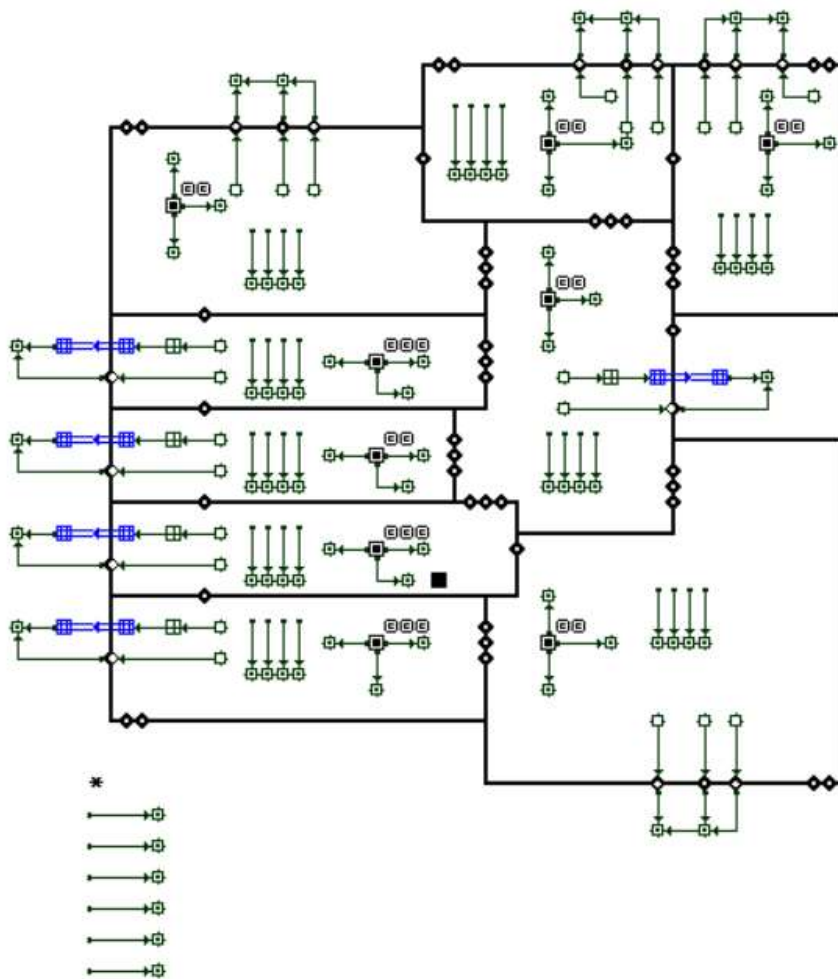
5.1 Simulatiemodel

De simulatie in het programma contam is toegepast op een modelwoning met één enkele verdieping waarin negen verschillende ruimtes gecreëerd werden, waaronder vier ruimtes met aanvoer, vier ruimtes met afvoer en 1 ruimte met doorvoer van lucht. Deze ruimtes worden in tabel 28 weergegeven samen met hun nominaal debiet.

Tabel 28: Ruimtes in het model

Ruimte	Type luchtstroom	Nominaal debiet (m ³ /h)
Living	aanvoer	108.32
Bedroom 1	aanvoer	43.82
Bedroom 2	aanvoer	35.28
Bedroom3	aanvoer	38.88
Hall	doorvoer	
Kitchen	afvoer	72.48
Serviceroom	afvoer	72.48
Toilet	afvoer	36.24
Bathroom	afvoer	72.48

In de ruimtes worden sensoren voorzien voor het opmeten van de concentraties van de verschillende pollutanten in de lucht. Hiernaast zijn bronnen van CO₂ en H₂O geplaatst in het gebouw, die zorgen voor het afgeven en opnemen van deze stoffen uit de lucht, samen met verschillende doorstoomopeningen tussen de verschillende lokalen onderling en de buitenomgeving. Op figuur 50 zijn deze verschillende componenten te onderscheiden, met hierop linksonder enkele sensoren om de buitenluchtparameters die ingebracht werden te controleren.



Figuur 50: Simulatiemodel woning in contam

Om ervoor te zorgen dat de uitstoot van polluenten door de bewoners (CO_2 en H_2O) in rekening gebracht wordt, dienen personen toegevoegd te worden in dit model. In contam is het mogelijk om verschillende personen te definiëren die elk op zich een verschillende daginvulling kennen. De personen die in dit onderzoek in beschouwing genomen worden zijn twee volwassenen samen met twee kinderen waarvan telkens 1 persoon bijna de hele dag thuis blijft en de andere naar het werk of naar school gaat.

Een fundamenteel element voor dit onderzoek zijn de concentraties van de buitenluchtpolluenten. Voor dit onderzoek wordt de data voor de polluenten NO_2 , CO_2 , $\text{PM}_{2.5}$ en PM_{10} vanaf 11 september 2017 tot 8 april 2018 ter beschikking gesteld. Vooraleer deze ingebracht kunnen worden in contam dienen deze stoffen aangemaakt te worden in het programma. Hierbij werden verschillende eigenschappen toegekend aan deze stoffen, zoals in de tabel 29 weergegeven wordt.

Tabel 29: Stofeigenschappen buitenluchtpolluenten
(GSI environmental, 2018; National Center for Biotechnology Information, 2018; Elizabeth, L., Roy, E., 2000)

NO₂	
Molecular weight	46,005 kg/kmol
specific heat	0,8066 kJ/KgK
default concentration	20 µg/m ³
O₃	
Molecular weight	47,997 kg/kmol
specific heat	0,8042 kJ/KgK
default concentration	40 µg/m ³
PM2.5	
Mean diameter	2 µm
Decay Rate	0,39 1/s
default concentration	10 µg/m ³
PM10	
Mean diameter	9 µm
Decay Rate	0,65 1/s
default concentration	20 µg/m ³

Enkele belangrijke eigenschappen hierbij zijn enerzijds de “decay rate”, hoe snel stofdeeltjes zullen neerslaan, en de “mean diameter”, de gemiddelde diameter van de deeltjes. Omdat het niet mogelijk is om voor PM2.5 en PM10 in contam verschillende deeltjesgroottes toe te kennen wordt hiervoor een sterke vereenvoudiging doorgevoerd. Eenmaal deze stoffen aanwezig zijn in het programma kan de data door middel van een CTM-file in het programma contam verwerkt worden. Naast de concentraties van deze polluenten in de buitenlucht kunnen ook nog andere parameters van het buitenklimaat in rekening gebracht worden tijdens de simulaties. Dit gebeurt door middel van een WTH-file die de omgevingstemperatuur, barometrische druk, windsnelheid, windrichting,... bevatten.

De Sturingen in contam zijn opgebouwd uit zogenoemde controllers. Dit zijn een soort van bouwstenen die, onder de vorm van vierkantjes, in het programma in een welbepaalde volgorde geplaatst worden. Aan elke controller kan er vervolgens een wiskundige bewerking of dergelijke plaatsvinden al dan niet met de verkregen gegevens uit voorafgaande controllers. Hierdoor kan een algoritme opgebouwd worden om aan het einde van de rit een factor *f* te bekomen die gelegen is tussen 0 en 1. Deze factor wordt vervolgens vermenigvuldigd met het nominale ventilatiedebiet van de kamer om dan uiteindelijk het werkelijke ventilatiedebiet te bekomen.

5.2 Filters

In het programma contam is het mogelijk om filters te plaatsen in de af- en aanvoerkanalen van het ventilatiesysteem. Filters zorgen voor het deels verwijderen van welbepaalde pollutanten uit de lucht, afhankelijk van het type filter en zijn werkingsprincipe. In dit onderzoek is het enkel belangrijk om een filter te plaatsen in de aanvoerkanalen, omdat deze een belangrijke invloed zullen uitoefenen op het binnenklimaat. De filters die toegevoegd worden in het model zijn deeltjesfilters van het type MERV12. Voor een welbepaalde filter van dit type is het mogelijk om zijn filterefficiëntie in functie van elke deeltjesgrootte in te geven in contam. Maar het grote probleem hierbij is het feit dat aan de pollutanten PM2.5 en PM10 slechts één enkele deeltjesgrootte kan toegekend worden, terwijl deze alle deeltjes omvatten met een deeltjesgrootte kleiner dan respectievelijk 2.5 en 10 μm . Hierdoor wordt aan het pollutant PM2.5 een deeltjesgrootte van 2 μm toegekend en aan PM10 een deeltjesgrootte van 9 μm . Hiervoor zal de filter van het type MERV12 een minimale filterefficiëntie hebben van 80% voor de PM2.5 deeltjes en minimaal 90% voor de PM10 deeltjes. Deze waarden worden dan ook ingegeven voor de filters. Deze werkwijze is een sterke vereenvoudiging van de werkelijkheid en zal dus zeker zijn invloed hebben op de resultaten van het onderzoek waarbij de filters aan bod komen.

6 VERSCHILLENDE TYPES STURINGEN

Voor dit onderzoek worden drie verschillende sturingen opgebouwd in contam. Elke sturing heeft hierbij zijn eigen principes en methodes waaruit ze zijn opgebouwd en worden geplaatst in een gebalanceerd ventilatiesysteem D. De drie sturingen zijn:

1. Traditionele sturing op basis van H₂O en CO₂
2. Sturing enkel en alleen op basis van de buitenluchtparameters
3. Traditionele sturing op basis van H₂O en CO₂ met een extra controle van de buitenluchtparameters

Hieronder wordt per sturing besproken hoe ze opgebouwd werd in het programma Contam samen met de toegepaste limietwaarden.

6.1 Sturing 1: Traditionele sturing (H₂O, CO₂)

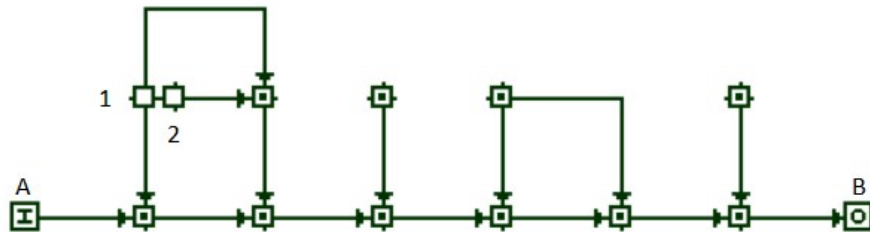
In de eerste sturing zijn de buitenluchtparameters nog niet opgenomen. Deze sturing dient voornamelijk als referentiesysteem om te bepalen of de andere twee sturingen zorgen voor een vooruitgang van de binnenluchtkwaliteit of net niet. Het is een sturing die zich baseert op enerzijds de H₂O-concentraties in de ruimtes voor luchtafvoer en anderzijds de CO₂-concentraties in de ruimtes voor luchttoevoer.

De sturing kan opgedeeld worden in drie componenten: de basissturing, de verwerking en de systeemkeuze. De basissturing en de verwerking worden individueel per kamer verwerkt waarna ze bij de systeemkeuze samen verwerkt worden. Alles gaat van start met de basissturing waarin voor alle toevoerruimtes de opgemeten CO₂-waardes en voor alle afvoerruimtes de opgemeten H₂O-waardes getoetst worden aan hun twee opgegeven richtwaardes. Er wordt gebruik gemaakt van een onderste en bovenste richtwaarde voor zowel H₂O en CO₂, deze waardes zijn aanwezig in tabel 30.

Tabel 30: Ingevoerde constanten in contam

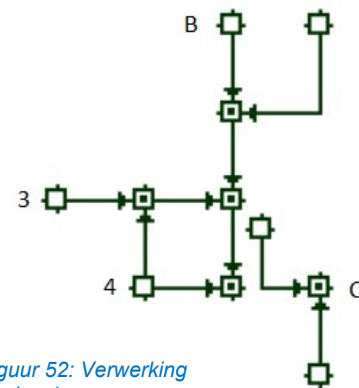
Nummer constante	Inhoud	H ₂ O	CO ₂
1	Onderste richtwaarde	0,35%	350 ppm
2	Bovenste richtwaarde	0,70%	950 ppm
3	Maximaal ventilatiedebiet	1	1
4	Minimaal ventilatiedebiet	0,1	0,1
5	Keuze gebalanceerd systeem	0 of 1	
6	Keuze systeem C of D	0 of 1	
7	Keuze met of zonder filter	0 of 1	

De basissturing die gebruikt wordt in deze eerste sturing is weergegeven in figuur 51. Hierin worden de eerste twee constanten in rekening gebracht, namelijk de onderste richtwaarde, nummer 1, en de bovenste richtwaarde, nummer 2. Deze basissturing zorgt voor een lineair verloop tussen enerzijds de binnenconcentratie van de stoffen H_2O of CO_2 (Input A) en anderzijds de factor f (het ventilatiedebiet, Output B). De uitkomst van deze basissturing is de factor f met een waarde tussen -1 en 1.



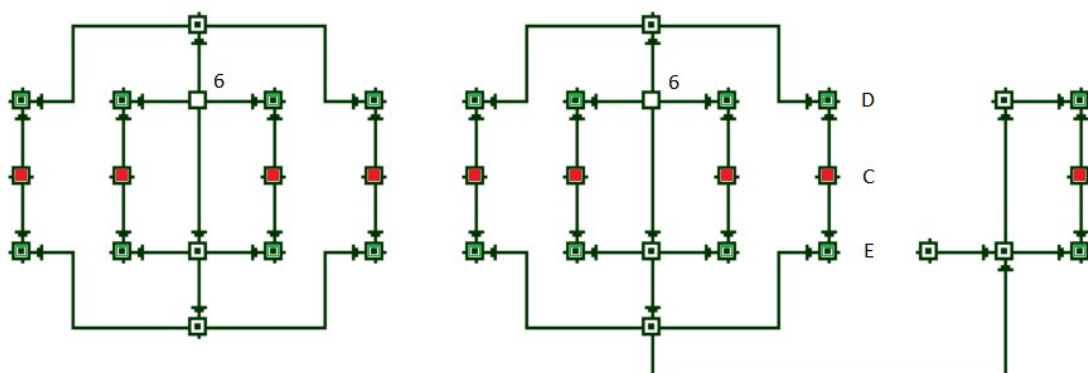
Figuur 51: Basissturing sturing 1

Het volgende deel in deze sturing is de verwerking (figuur 52). In deze fase worden het maximaal ventilatiedebiet, nummer 3, en het minimaal ventilatiedebiet, nummer 4 in rekening gebracht. Hierbij zal input A gecontroleerd worden en indien nodig aangepast worden om te voldoen aan de voorwaarden van de constanten 3 en 4. Vervolgens wordt, door een extra component in Contam, de som genomen van enerzijds alle toevoerdebieten en anderzijds alle afvoerdebieten waarna door middel van constante 5 beslist wordt als deze gelijkgesteld dienen te worden of niet. Na dit alles vormt de output C de factor f met een waarde tussen 0 en 1 die doorheen het overige deel van de sturing onveranderd blijft.



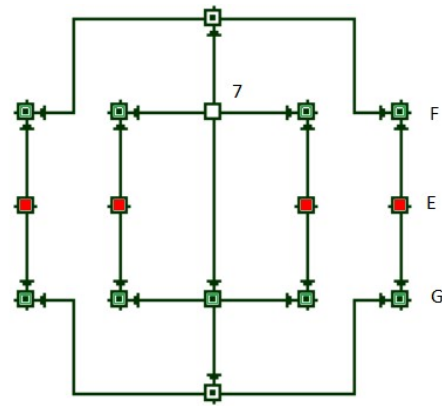
Figuur 52: Verwerking sturing 1

Het derde en laatste deel van de sturing is de systeemkeuze. Hierin komen de constanten 6 en 7 aan bod en kan het type systeem eenvoudig aangepast worden. Voor de keuze te maken tussen een ventilatiesysteem C of D wordt het element op figuur 53 gebruikt. Hierbij zijn de rode controllers (C) de input waardes die de factor f bevat van de verschillende kamers en zijn de output waardes D en E de factoren f van de verschillende kamers voor respectievelijk het systeem C en systeem D. Als constante 6 de waarde 0 heeft komt dit overeen met een ventilatiesysteem D en bij de waarde 1 is dit het ventilatiesysteem C.



Figuur 53: Keuze systeem C of D

Voor een keuze te kunnen maken tussen het al dan niet gebruik maken van filters in het ventilatiesysteem wordt gebruik gemaakt van het element dat afgebeeld wordt op figuur 54. In de praktijk is het gebruik van filters slechts van toepassing op een ventilatiesysteem D en is voor het binnenklimaat de filter in de aanvoerelementen alleen maar van belang. Hierdoor wordt in deze sturing deze keuzemogelijkheid enkel gegeven voor de ruimtes waar lucht aangevoerd wordt en wanneer gekozen is voor een ventilatiesysteem D. Wanneer constante 7 een waarde 0 heeft wordt er gebruik gemaakt van een systeem zonder



Figuur 54: Keuze systeem zonder of met filter

filter en bij een waarde 1 wordt er gebruik gemaakt van een systeem met filters in de aanvoerelementen. De groene outputelementen F of E, respectievelijke zonder filter en met filter, bevatten de factor f van de aanvoerruimtes. Wanneer geopteerd wordt voor een simulatie van sturing 1 gebruik makende van filters worden er geen andere aanpassingen doorgevoerd aan de systeem.

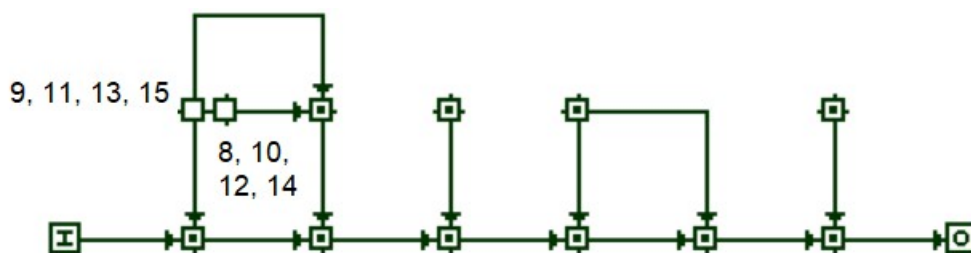
Na het doorlopen van bovenstaande elementen wordt de factor f naar de modelwoning gestuurd in contam waar het als inputwaarde gebruikt wordt bij de af- en aanvoerelementen.

6.2 Sturing 2: Sturing op basis van buitenluchtparameters

Bij deze tweede sturing zal er een belangrijke wijziging plaatsvinden aan het traditionele model. Deze wijziging houdt in dat de basissturing zich niet zal baseren op de H_2O - en CO_2 -concentraties binnenshuis, maar op de buitenluchtpolluenten. Om de concentraties van de vier polluenten in de buitenlucht te kunnen beoordelen dienen eerst en vooral evaluatiecriteria opgesteld te worden. Deze werden gevonden in de richt- en interventiewaarden van het binnenmilieubesluit, voor NO_2 en O_3 , en de richtlijn van het WHO, voor $PM_{2.5}$ en PM_{10} . Deze waarden zijn aanwezig in tabel 31. De basissturing, figuur 55, verloopt wel nog steeds met dezelfde drie componenten maar de constante 1 wordt nu vervangen door 9, 11, 13 of 15 en de constante 2 vervangen door 8, 10, 12 of 14 afhankelijk van het pollutent. Door deze basissturing zal een stijging in de concentraties van het beschouwde element zorgen voor een daling van het ventilatiedebiet tussen de opgestelde limietwaarden.

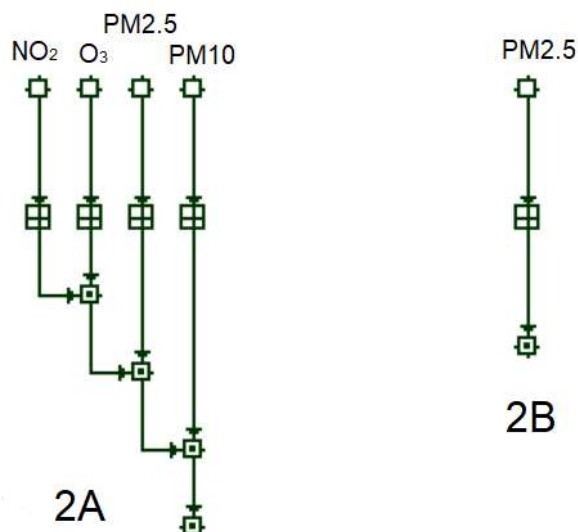
Tabel 31: Interventie- en richtwaardes buitenluchtparameters
(Squilbin & Davesne, 2015; Federale overheidsdienst justitie, 2018)

Nummer constante	Polluent	Type	$\mu g/m^3$
8	NO_2	Richtwaarde	20
9		Interventiewaarde	40
10	O_3	Richtwaarde	40
11		Interventiewaarde	78
12	$PM_{2.5}$	Richtwaarde	10
13		Interventiewaarde	25
14	PM_{10}	Richtwaarde	20
15		Interventiewaarde	50



Figuur 55: Basissturing sturing 2

Er worden twee types ontworpen voor deze tweede sturing, figuur 56. Het eerste type is een sturing die zich baseert op alle vier de buitenluchtpolluenten, waarbij het minimale debiet genomen wordt van de vier elementen. Het tweede type baseert zich enkel en alleen op PM 2.5. De overige elementen in deze sturingen 2A en 2B zijn identiek aan deze die aanwezig zijn in de eerste sturing.



Figuur 56: Sturing 2A en 2B

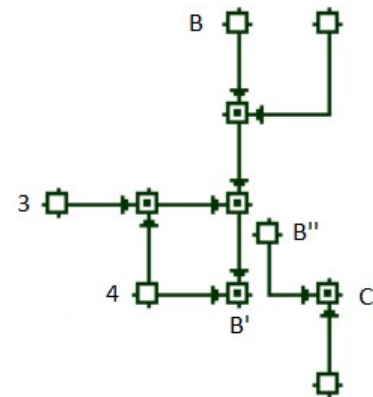
Wanneer bij deze sturingen gekozen wordt om gebruik te maken van de filters kunnen in principe de richt en interventiewaarden voor PM2.5 en PM10 gewijzigd. De traditionele waarden worden vermeerderd met de efficiëntie waarmee de filters deze twee polluenten uit de lucht kunnen verwijderen, namelijk 80% voor PM2.5 en 90% voor PM10. De waarden die men hierbij bekomt werden opgenomen in tabel 32 samen met de andere gebruikte richt- en interventiewaarden van de andere polluenten. Door het wijzigen van deze waarden wordt de werking van deze sturing gewijzigd en wordt het interessant om te zien welke gevolgen dit heeft.

Tabel 32: Interventie- en richtwaardes buitenluchtparameters (met filter)
(Squilbin & Davesne, 2015; Federale overheidssdienst justitie, 2018)

Nummer constante	Polluent	Type	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
8	NO ₂	Richtwaarde	20
9		Interventiewaarde	40
10	O ₃	Richtwaarde	40
11		Interventiewaarde	78
12	PM2.5	Richtwaarde	18
13		Interventiewaarde	45
14	PM10	Richtwaarde	38
15		Interventiewaarde	95

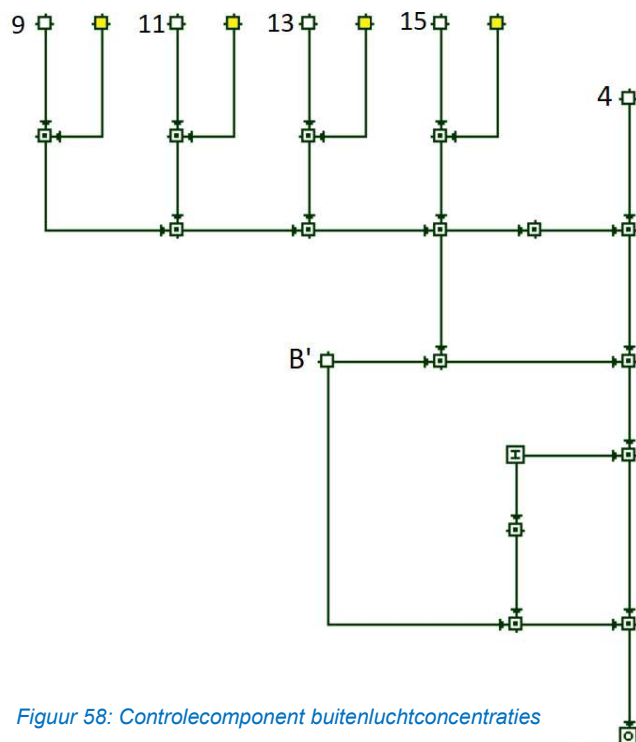
6.3 Sturing 3: Traditionele sturing (H_2O , CO_2) + extra controle buitenluchtparameters

De derde sturing is bijna identiek aan de eerste sturing met als enige verschil dat er een controle uitgevoerd wordt van de buitenluchtconcentraties van de vier ingebrachte stoffen (NO_2 , O_3 , $PM_{2.5}$ en PM_{10}). Deze controle gebeurt, voor de ruimtes waar verse lucht toegevoerd wordt, ter hoogte van de tweede component (figuur 57), de verwerking. Hierbij wordt, na de controle aan de maximale en minimale ventilatiedebieten, ter hoogte van B' overgegaan naar de controlecomponenten voor buitenluchtconcentraties vooraleer overgegaan wordt naar B'' waarna de aanpassing naar een al dan niet gebalanceerd systeem plaatsvindt.



Figuur 57: Verwerking sturing 3

Aan de hand van de interventiewaarde van het binnenmilieubesluit en de richtlijn van de WHO, tabel 31, zal gecontroleerd worden als het ventilatiedebiet, bekomen uit de traditionele sturing, aangepast dient te worden naar het minimale debiet of behouden mag blijven. Het ventilatiedebiet daalt naar het minimale debiet vanaf het moment dat de buitenconcentratie van één pollutant of meerdere de interventiewaarde overschrijdt. Indien dit niet het geval is blijft het ventilatiedebiet uit de traditionele sturing behouden. Dit alles gebeurt door middel van de controlecomponent die afgebeeld is op figuur 58. Hierop is bovenaan te zien dat de interventiewaarden, constanten 9,11,13,15, in beschouwing genomen worden samen met het minimale ventilatiedebiet, constante 4, aan de rechterkant. De input van deze component is B' afkomstig van de verwerking en de output is B'' die terug als input dienst doet in de verwerking (figuur 57).



Figuur 58: Controlecomponent buitenluchtconcentraties

Ook in deze derde sturing kan de keuze gemaakt worden tussen met of zonder filters te werken in de aanvoerkanalen. Hierbij zal terug de interventiewaarde vermeerderd worden met respectievelijk 80% voor $PM_{2.5}$ en 90% voor PM_{10} , tabel 32.

7 RESULTATEN

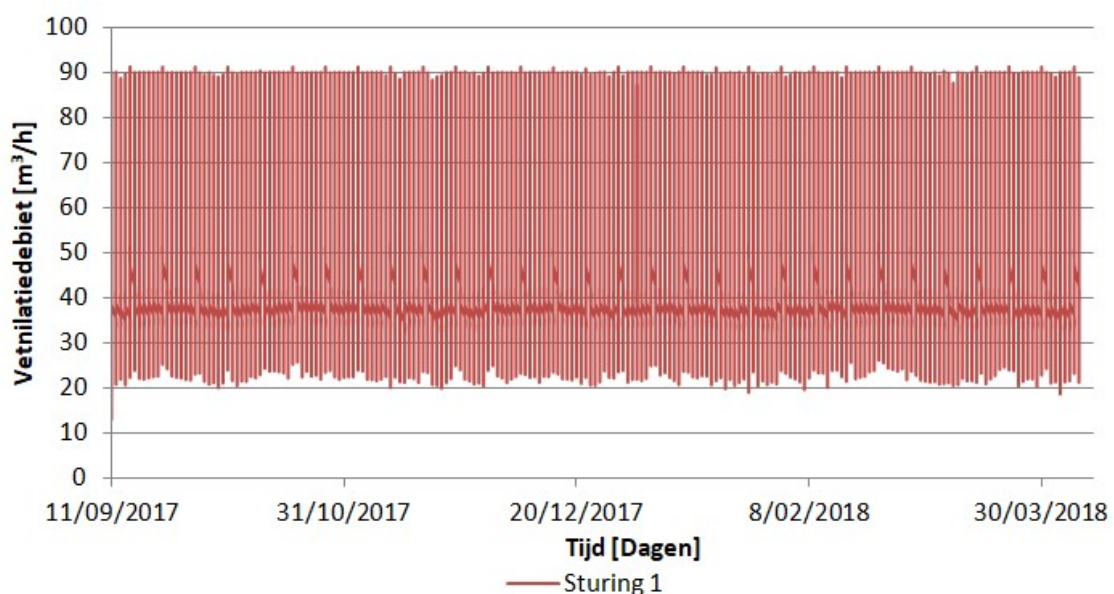
In dit onderdeel zullen de resultaten die verkregen werden door het uitvoeren van de verschillende simulaties in detail geanalyseerd en besproken worden. Er wordt gestart met een bespreken van de ventilatiedebieten en de CO₂- en H₂O-concentraties. Vervolgens zullen de verschillende sturingen ten opzichte van elkaar vergeleken worden waarbij de drie verschillende evaluatiecriteria, die al eerder besproken werden, aan bod komen. Gedurende deze vergelijking zal enkel en alleen gebruik gemaakt worden van de locatie Antwerpen. Om het aantal grafieken in dit gedeelte te beperken worden enkel deze van de living (aanvoerruimte) en eventueel nodig de badkamer (afvoerruimte) afgebeeld. Gedurende deze vergelijking wordt gefocust op een geselecteerde week, dit om een gedetailleerder beeld te krijgen over de concentraties en ventilatiedebieten die zich voordoen in de woning. De geselecteerde week start op maandag 9 oktober en eindigt op zondag 15 oktober. Voor deze week staat telkens in de grafieken het aantal dagen op de X-as. Als laatste zal bij dit onderdeel de vergelijking gemaakt worden tussen de verschillende locaties. Hierbij wordt eerste en vooral gekeken per sturing wat de verschillen zijn waarna overgegaan wordt naar een analyse per locatie met de drie sturingen.

7.1 Resultaten van elke sturing

7.1.1 Sturing 1

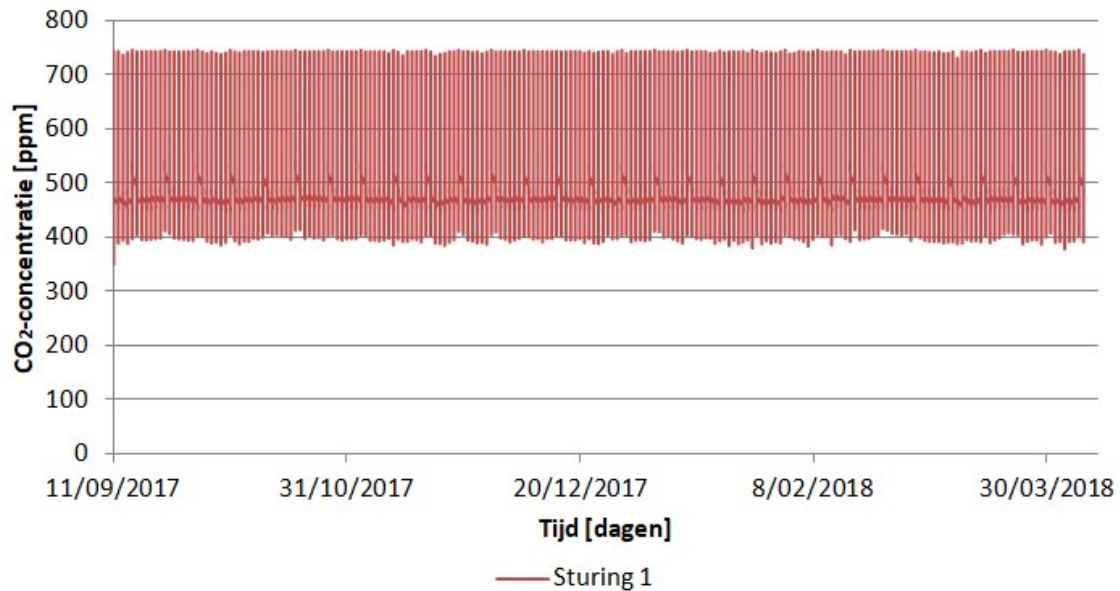
Deze eerste sturing is de traditionele sturing die voornamelijk zal dienst doen als referentiesturing om de resultaten van de andere sturingen mee te vergelijken. Hierdoor zullen voor deze sturing enkel en alleen meer de algemene trends in de resultaten besproken worden.

Algemene trends



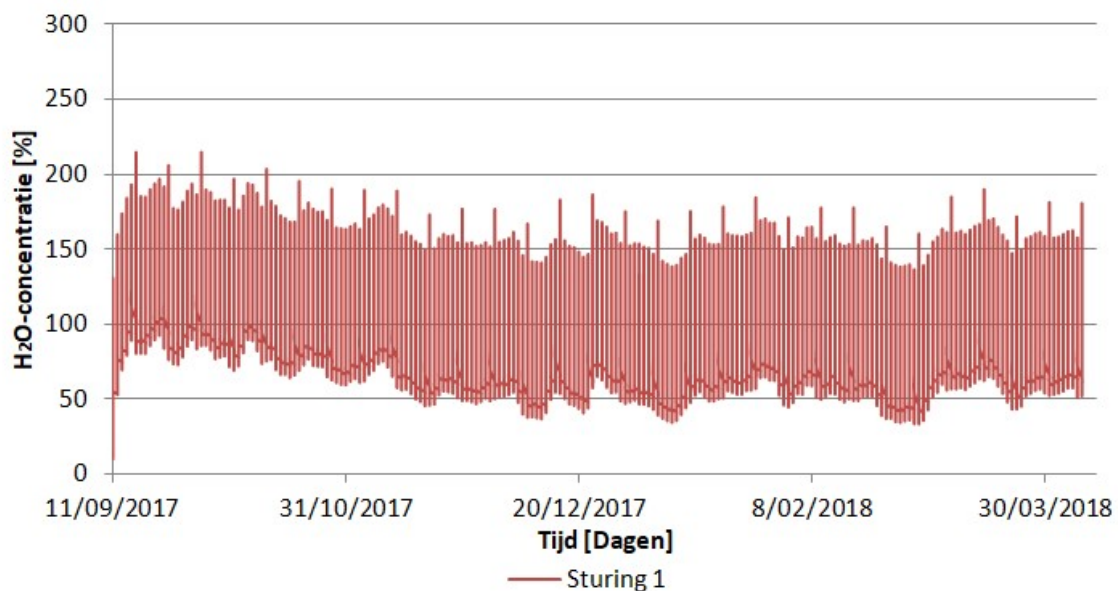
Figuur 59: Verloop ventilatiedebieten [m³/h] living, Antwerpen, sturing 1

Sturing 1, de traditionele sturing, heeft ventilatiedebieten (figuur 59) die variëren tussen twee uiterste waarden. Deze twee uitersten liggen, bij de ruimtes waarbij lucht aangevoerd wordt, tussen 0,75 en 0,15 keer het nominaal debiet per kamer en, bij de ruimtes waar lucht afgevoerd wordt, tussen 0,5 en 0,2 keer het nominaal debiet per kamer.



Figuur 60: Verloop CO₂-concentraties [ppm] living, Antwerpen, sturing 1

De CO₂-concentraties (figuur 60) aanwezig in de verschillende ruimtes zijn waarden waar weinig grote variaties op te merken zijn in een bereik die geen negatieve gevolgen heeft voor de mens. Hiernaast zijn de schommelingen in CO₂-concentraties repetitief doorheen de tijd.



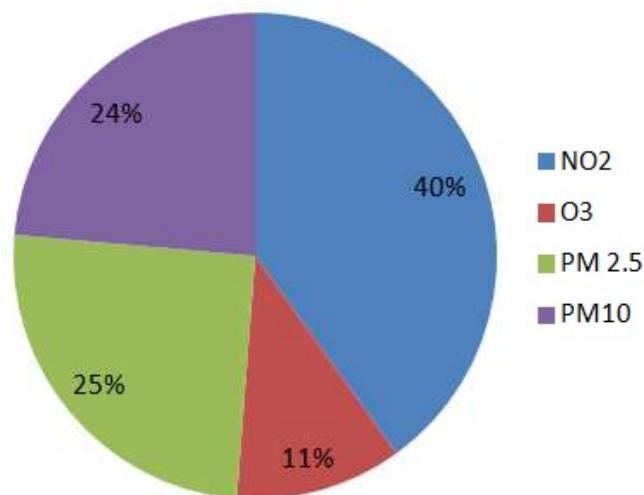
Figuur 61: Verloop H₂O-concentraties [%] badkamer, Antwerpen, sturing 1

De relatieve vochtigheid bij deze sturing, figuur 61, varieert geleidelijk aan doorheen de tijd. Bij sommige ruimtes voor afvoer overschrijden deze concentraties de maximale waarde van 100%. Dit fenomeen is in de praktijk niet mogelijk. Het is te wijten aan een tekortkoming van het model waarin gesimuleerd wordt. In de praktijk zal, wanneer de relatieve vochtigheid 100% wordt, condensatie ontstaan. Doordat in dit model geen rekening gehouden wordt met deze condensatie blijft de relatieve vochtigheid oplopen tot waarden hoger dan de bovengrens van 100%. Maar het is wel nog altijd nuttig om de vochtigheid in rekening te brengen om de kans op microbiologische polluenten in de lucht te kunnen inschatten.

7.1.2 Sturing 2A

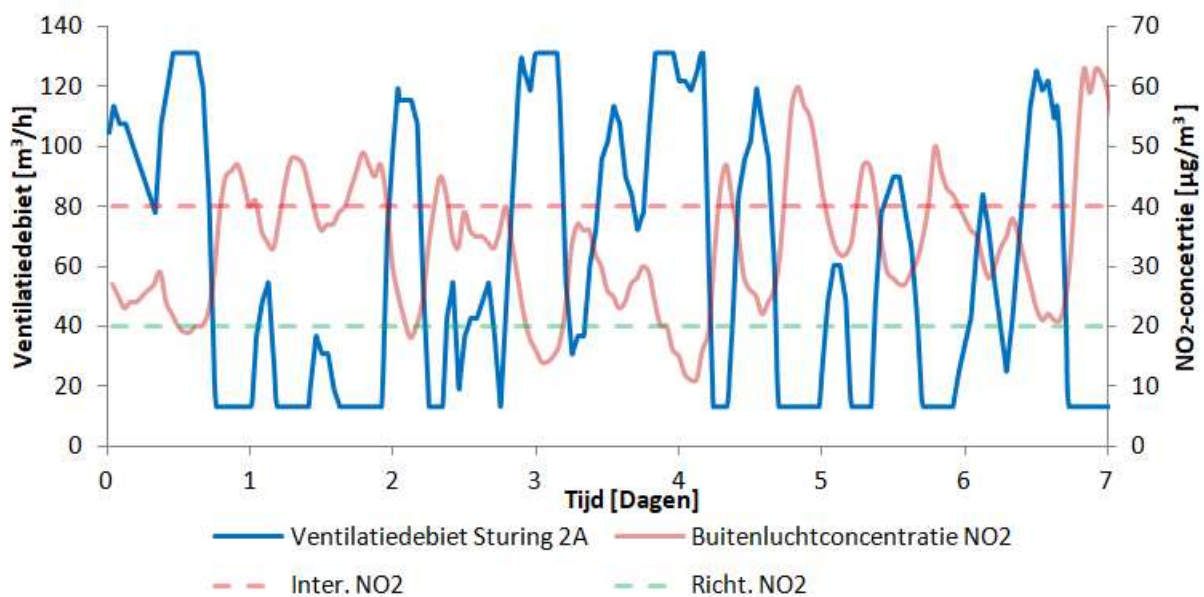
Weringsprincipe

De Sturing 2A is een sturing die functioneert op basis van alle vier de buitenluchtpolluenten. Hierbij zijn bij elke stof drie elementen belangrijk, namelijk de concentratie buiten, de richtwaarde en de interventiewaarde. Deze elementen werden al reeds eerder voor de locatie Antwerpen gevisualiseerd op figuur 22, 23, 24 en 25. Hierbij werd opgemerkt dat O_3 weinig tot geen invloed zal uitoefenen op deze sturing 2A maar voor de andere stoffen is het moeilijk uit te maken op deze figuren hoe groot het belang van hen zal zijn. Om dit beter te kunnen inschatten komt figuur 62 aan bod. Hierin wordt weergegeven hoe bepalend een welbepaalde stof is voor deze sturing. Hieruit blijkt dat voornamelijk NO_2 de belangrijkste parameter zal zijn waarmee deze sturing rekening zal houden, gevolg door het duo $PM_{2.5}$ en PM_{10} met als laatste O_3 . Omdat NO_2 een doorslaggevende rol speelt op deze locatie wordt op de secundaire as van figuur 63 de buitenconcentratie in functie van de tijd uitgezet om de werking van deze sturing later toe te lichten.



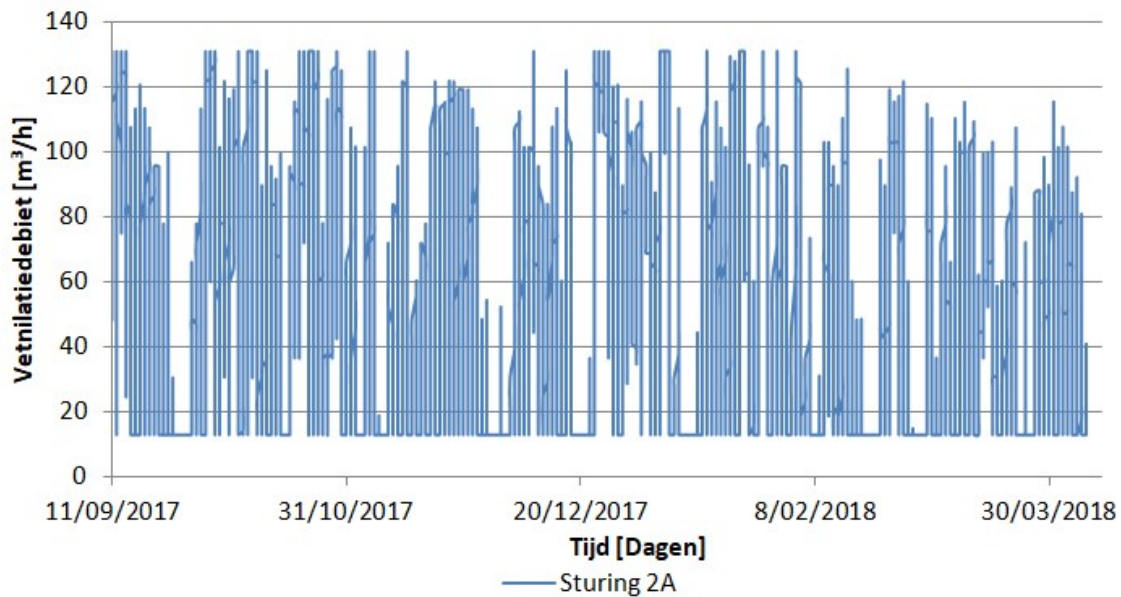
Figuur 62: Belang polluenten op sturing 2A [%]

Om de werking van deze sturing toe te lichten wordt in figuur 63 het ventilatiedebiet (m^3/h) op de primaire as en de buitenluchtconcentraties voor NO_2 samen met zijn bijhorden richt en interventiewaarde op de secundaire as ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) uitgezet voor de geselecteerde week. Hierop is te zien dat er een verband teruggevonden kan worden tussen de NO_2 -concentraties en het ventilatiedebiet. Dit is te wijten aan het feit dat NO_2 een doorslaggevend rol speelt in deze sturing op de locatie Antwerpen. Hierdoor mag er voor de geselecteerde week vanuit gegaan worden dat wanneer de concentraties van deze stof laag zijn in de buitenomgeving, er sterk geventileerd dient te worden om deze propere lucht binnen te brengen in de woning. Op figuur 63 is te zien dat in het begin van de week de NO_2 -concentraties net onder de richtwaarde komen waardoor het ventilatiedebiet nominaal is. Vervolgens stijgen de NO_2 -concentraties naar de interventiewaarde, waardoor het ventilatiedebiet lineair daalt tot het minimale debiet. Vervolgens liggen de concentraties van NO_2 boven de interventiewaarde waardoor aan het minimale ventilatiedebiet geventileerd wordt.



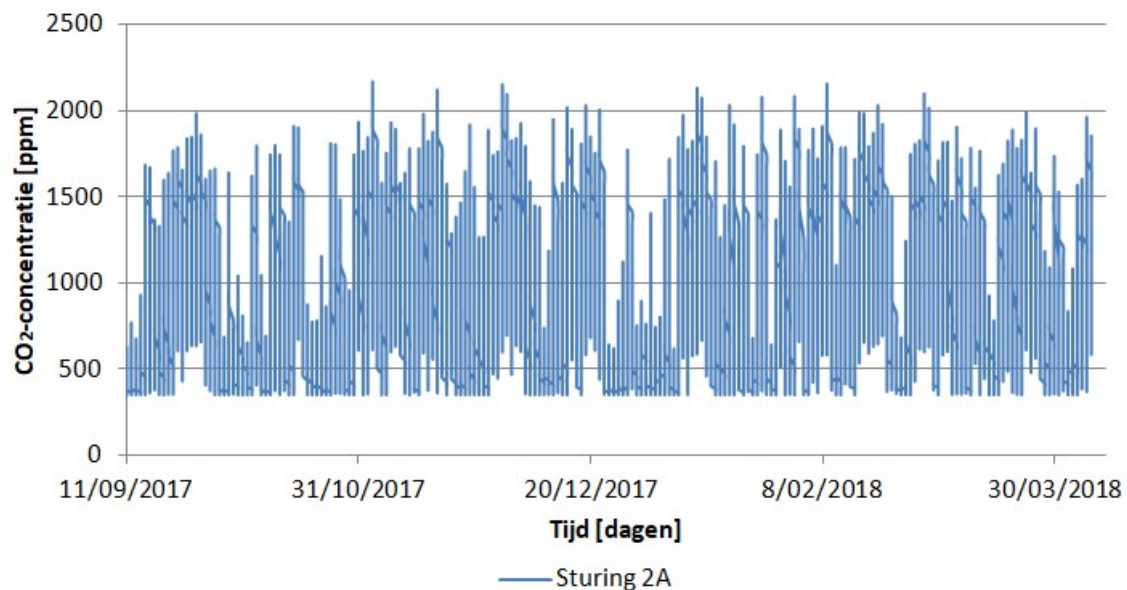
Figuur 63: Werkingsprincipe sturing 2B

Algemene trends



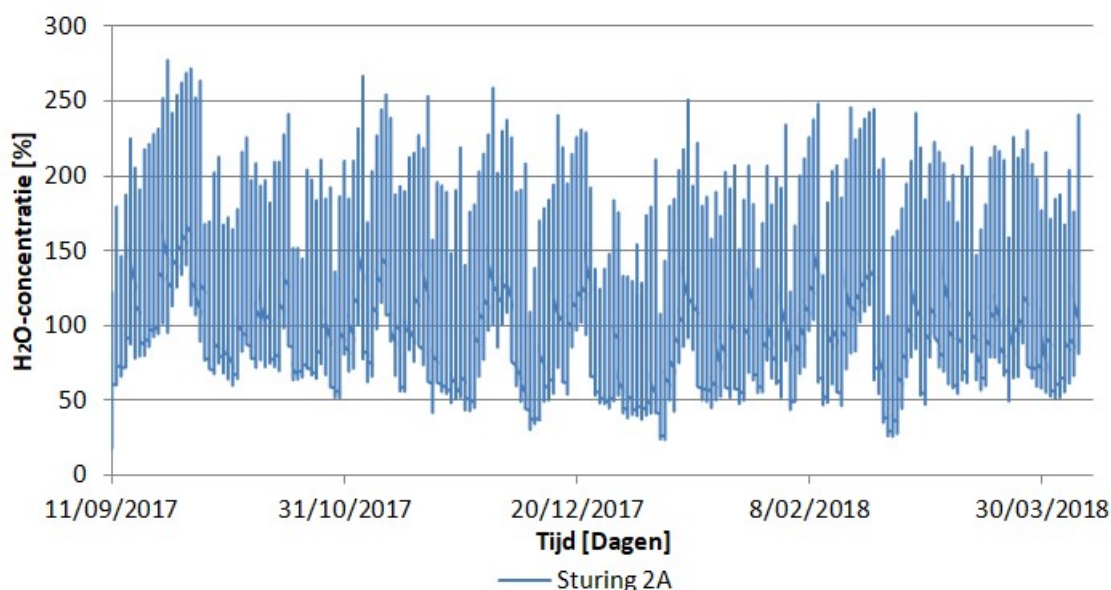
Figuur 64: Verloop ventilatiedebieten [m³/h] living, Antwerpen, sturing 2A

Het verloop van de ventilatiedebieten in de tijd van de sturing 2A (figuur 64) varieert sterk doorheen de tijd. Hierbij zijn verschillende periodes van goede buitenluchtkwaliteit te onderscheiden, ventileren aan het nominale debiet, en verschillende periodes van slechte buitenluchtkwaliteit te onderscheiden, ventileren aan het minimale debiet.



Figuur 65: Verloop CO₂-concentratie [ppm] living, Antwerpen, sturing 2A

De CO₂-concentraties in de living van het simulatiemodel met sturing 2A zijn in figuur 65 weergegeven. Hierop zijn sterke variaties zichtbaar die schommelen tussen de concentratie in de buitenlucht (350ppm) tot zeer hoge waarden. Deze maximale concentraties kunnen oplopen tot 2100ppm en soms meer in verschillende andere ruimtes. Deze hoge concentraties zijn te wijten aan periodes waarin het ventilatiedebiet sterk gereduceerd werd ten gevolge van een slechte kwaliteit van de buitenlucht. Hierdoor stapelen binnenshuis geproduceerde polluenten zich op in de woning.



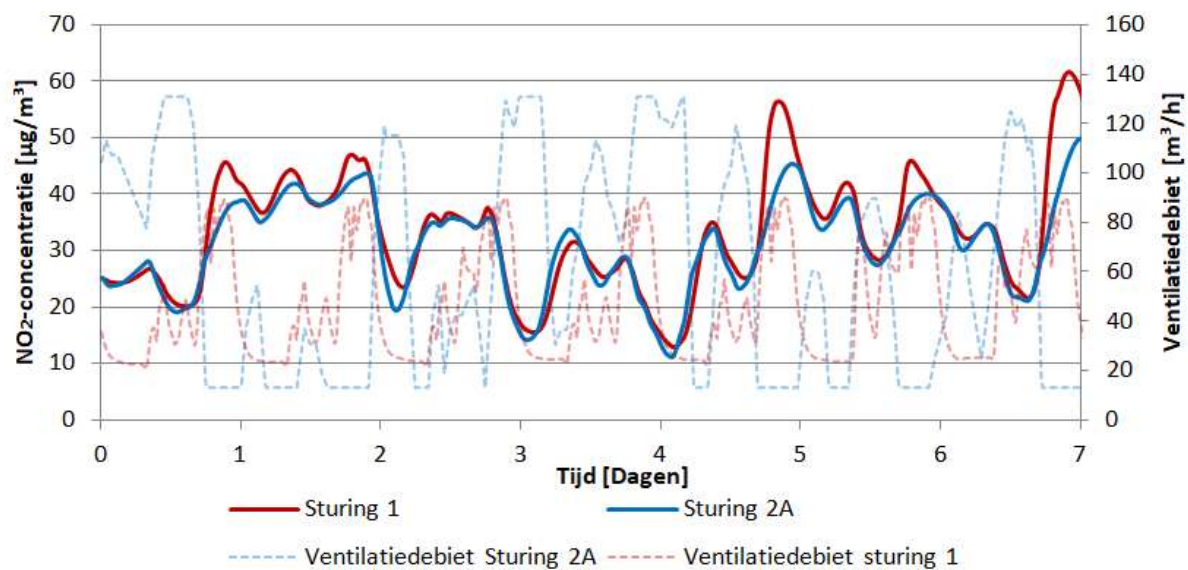
Figuur 66: Verloop H_2O -concentratie [%] badkamer, Antwerpen, sturing 2A

Ook in de H_2O -concentraties is dezelfde trend zichtbaar als bij de CO_2 -concentraties met hoge waardes die te wijten zijn aan de periodes met lage ventilatiedebieten.

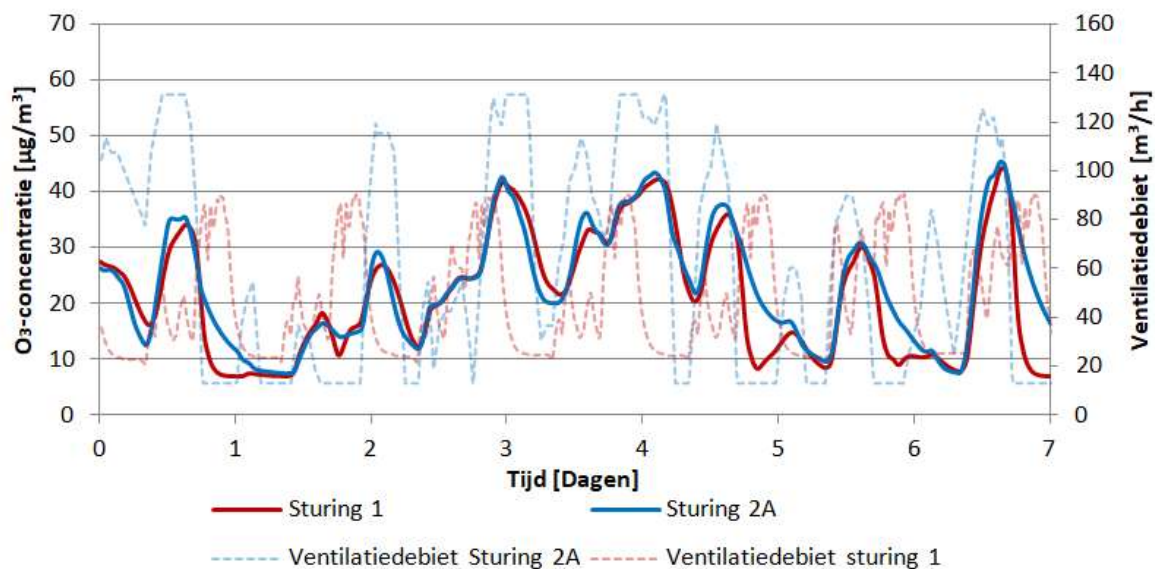
Gezondheid

De binnenconcentraties van de vier pollutanten NO_2 , O_3 , $PM_{2.5}$ en PM_{10} zullen bepalend zijn in welke mate de binnenlucht gezond is of niet. De concentraties van deze vier pollutanten in functie van de tijd zijn voor de geselecteerde week weergegeven op figuur 67, 68, 69 en 70 met telkens de ventilatiedebieten op de secundaire as. Hierop kan afgeleid worden dat voor de stoffen NO_2 , $PM_{2.5}$ en PM_{10} op elk moment een verlaging in de concentraties kan waargenomen worden bij sturing 2A. Hierbij worden pieken sterk afgevlakt.

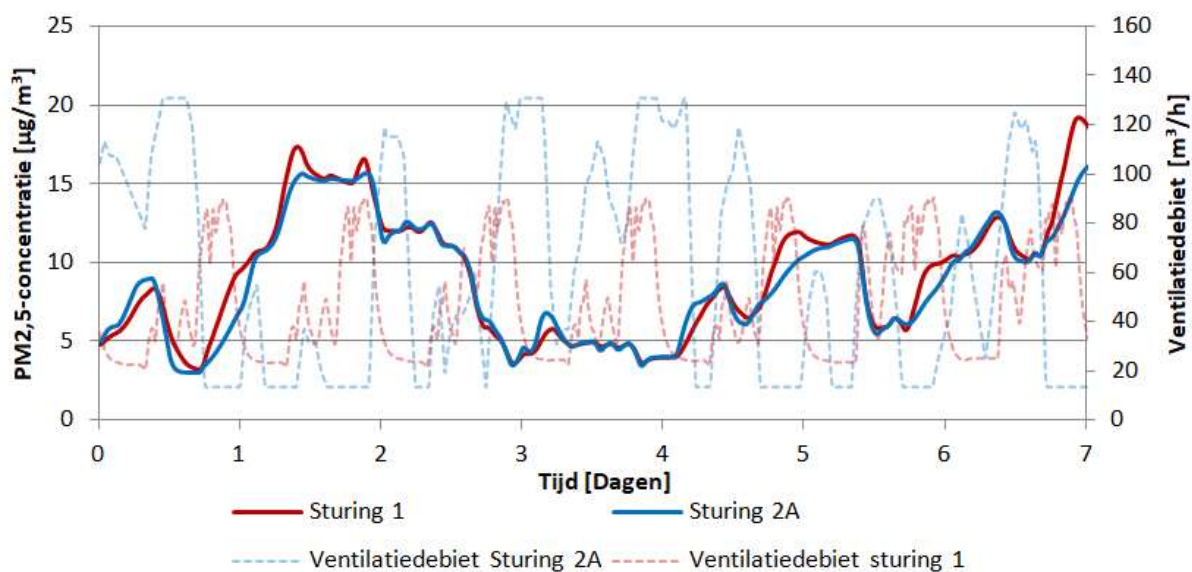
Deze bovenstaande conclusie is minder toepasselijk bij ozon (figuur 68). Bij deze stof valt op dat op verschillende tijdstippen de concentratie O_3 opmerkelijk hoger ligt bij de sturing op basis van de buitenluchtpolluenten in vergelijking met de traditionele sturing. De reden voor het concentratieverloop van deze stof is voornamelijk toe te wijzen aan twee oorzaken. Als eerst is er het feit dat bij deze locatie de ozonwaardes relatief laag liggen waardoor ze grotendeels onder de richtwaarde gelegen zijn. Hierdoor wordt weinig rekening gehouden met deze stof in de sturing, wat leidt tot geen verbeteringen in de O_3 -concentraties. Als tweede element is er de relatie tussen ozon en stikstofdioxide in de troposfeer. Ozon wordt gevormd uit onder andere stikstofdioxide onder invloed van zonlicht. Hierdoor zal, wanneer meer ozon gevormd wordt uit stikstofdioxiden, het gehalte aan stikstofdioxiden dalen en andersom. Door een combinatie van de twee bovengenoemde oorzaken zal sterk geventileerd worden bij lage concentraties NO_2 en hogere concentraties O_3 in de buitenlucht en zal er minimaal geventileerd worden bij hoge NO_2 -concentraties in de buitenlucht waardoor de reeds binnengebrachte hogere concentraties ozon minder snel uit de woning geventileerd kunnen worden. Dit wordt bevestigd op figuur 68 waarop te zien is dat de tijdstippen waarop de hoge concentraties O_3 zich voordoen gepaard gaan met periodes waarin minimaal geventileerd wordt.



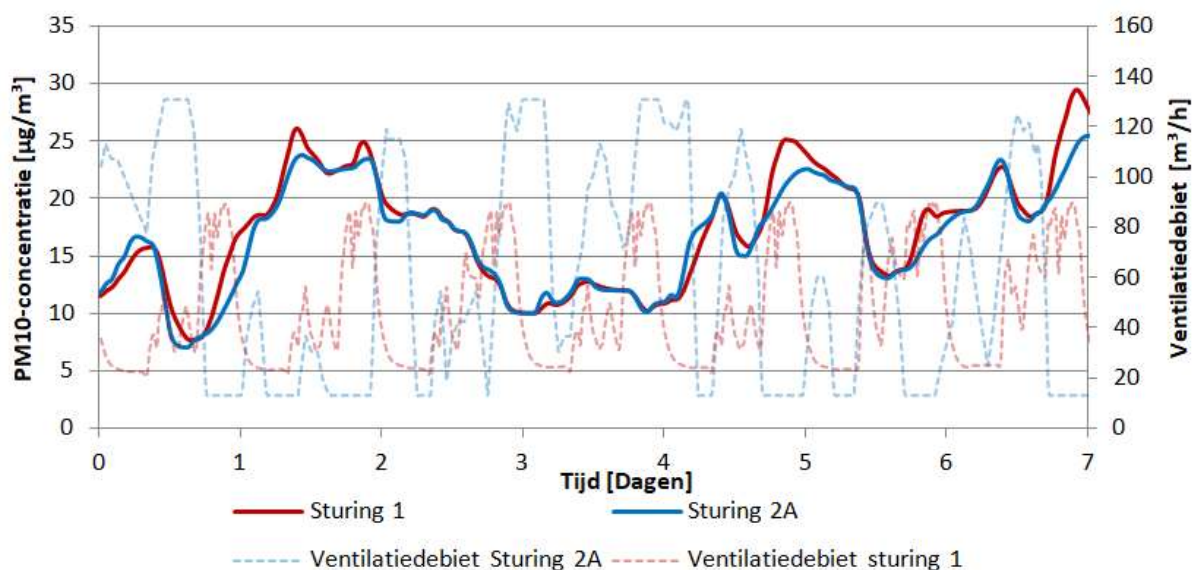
Figuur 67: Weekverloop NO₂-concentraties [µg/m³], Sturing 2A, Living, Antwerpen



Figuur 68: Weekverloop O₃-concentraties [µg/m³], Sturing 2A, Living, Antwerpen

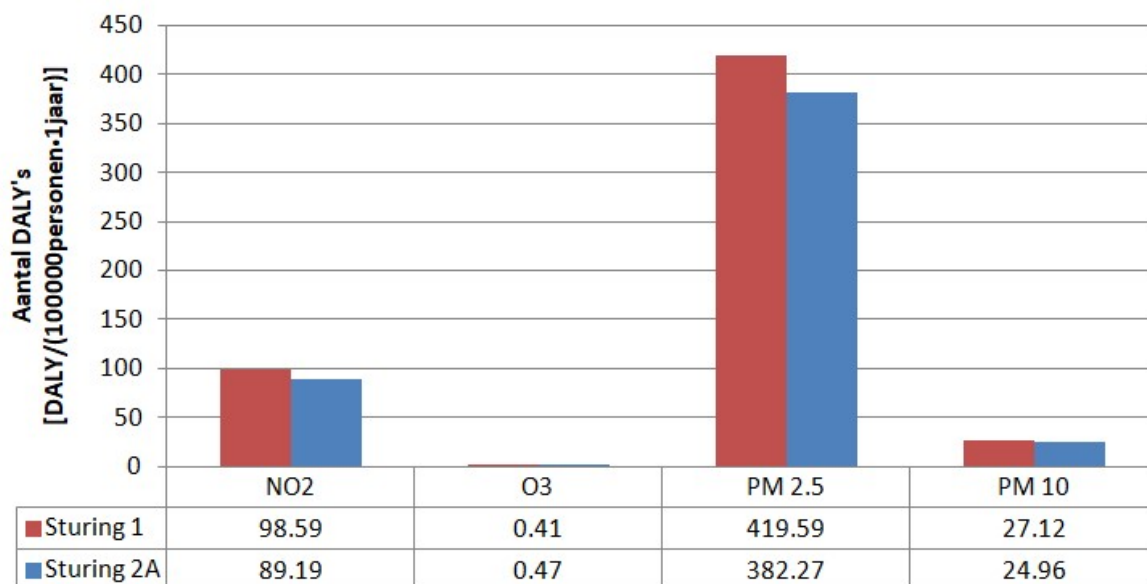


Figuur 69: Weekverloop PM_{2.5}-concentraties [µg/m³], Sturing 2A, Living, Antwerpen



Figuur 70: Weekverloop PM10-concentraties [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], Sturing 2A, Living, Antwerpen

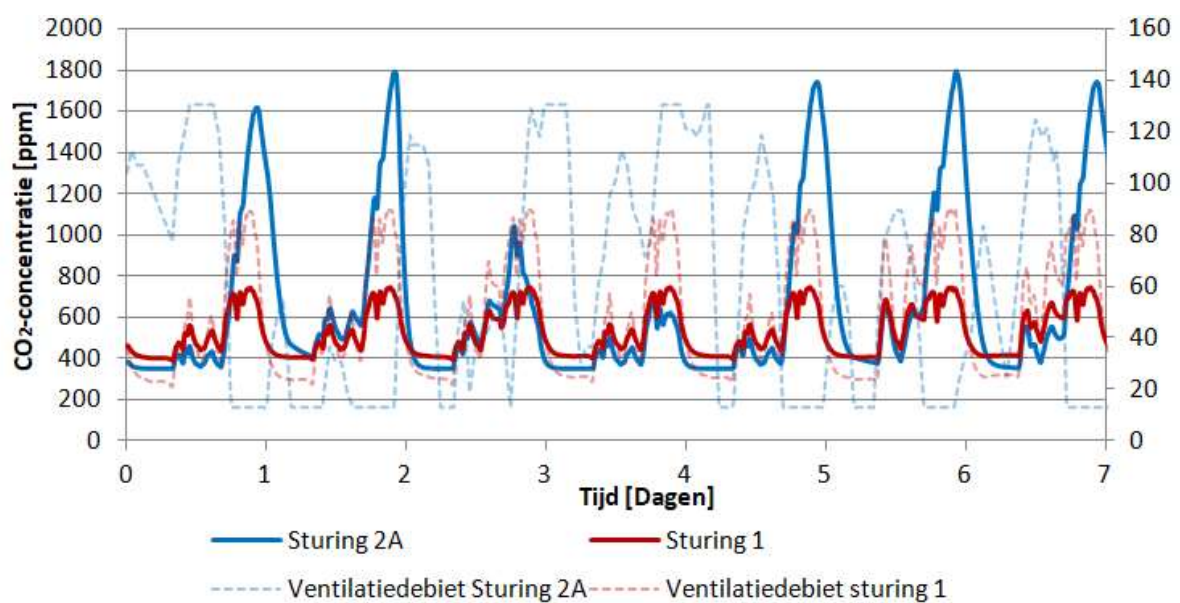
Een vertaling van bovenstaande grafieken in vergelijkbare en eenduidige waarden wordt weergegeven op figuur 71. Hierop zijn het aantal DALY's aanwezig voor de vier buitenluchtpolluenten binnenshuis, zoals eerder al besproken werd in dit verslag. Over de volledige lijn is een daling van het aantal DALY's waar te nemen van 9% met de sterkste daling bij PM2.5 met 38 DALY's. Enkel de waarde van ozon blijft zo goed als constant. Over het algemeen kan dan ook besloten worden dat op het vlak van gezondheid, de sturing 2A gezonder is dan een traditionele sturing voor deze locatie Antwerpen.



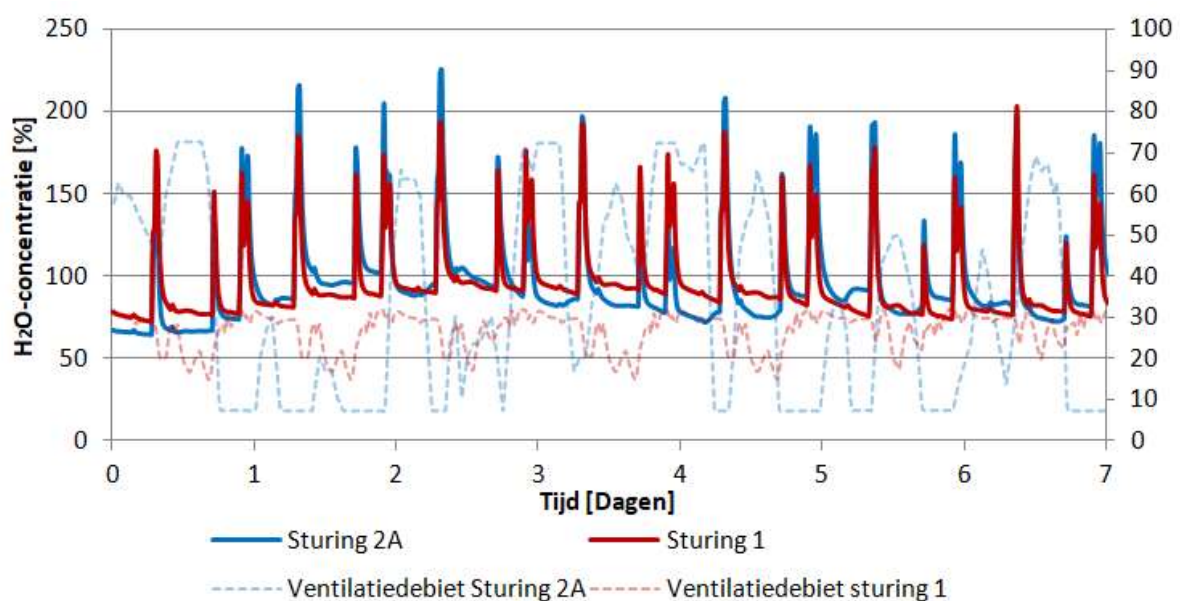
Figuur 71: Beoordeling gezondheid [DALY/(100000personen•1jaar)], Sturing 2A, Antwerpen

Comfort

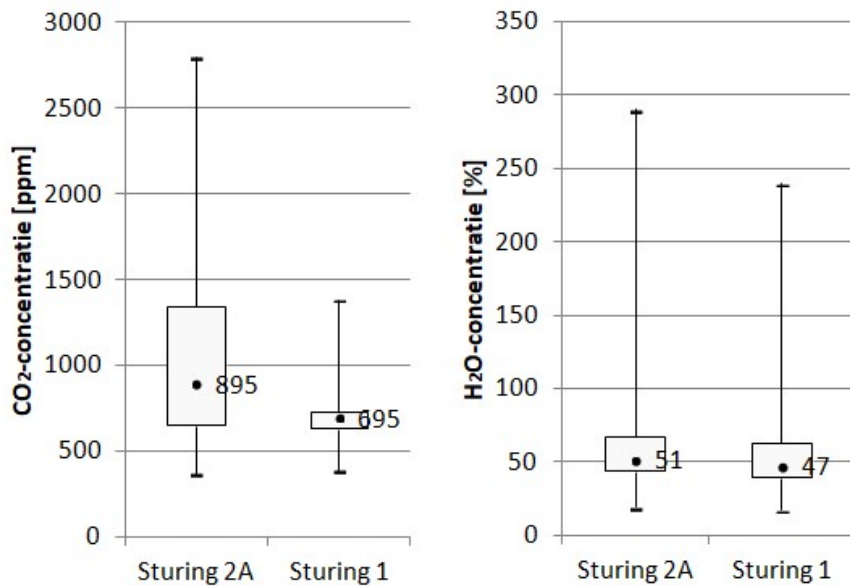
De tweede parameter voor het evalueren van het ventilatiesysteem is comfort. De CO_2 - en H_2O -concentraties zijn hiervoor bepalend. Beide zijn weergegeven in functie van de tijd in figuur 72 en 73 voor de geselecteerde week met op de achtergrond opnieuw de ventilatiedebieten. Er is duidelijk waar te nemen dat de CO_2 -concentraties sterke pieken vertonen gedurende de periodes met een minimaal ventilatiedebiet. Hiernaast liggen de algemene waarden (dag 4) net iets lager dan in de traditionele sturing het geval is. Voor H_2O kan hetzelfde fenomeen waargenomen worden, maar hierbij zijn de pieken minder uitgesproken. Als de CO_2 - en H_2O -concentraties beschouwd worden over de volledige periode (figuur 74) valt het opnieuw op dat de maximale waarde sterk verhoogd is en dat het aantal pieken in de CO_2 -concentratie sterk toegenomen is ten opzichte van de traditionele sturing. Voor H_2O kan hetzelfde fenomeen opgemerkt worden, maar blijven de verschillen eerder beperkt.



Figuur 72: Weekverloop CO_2 -concentraties [ppm], Sturing 2A, Living, Antwerpen



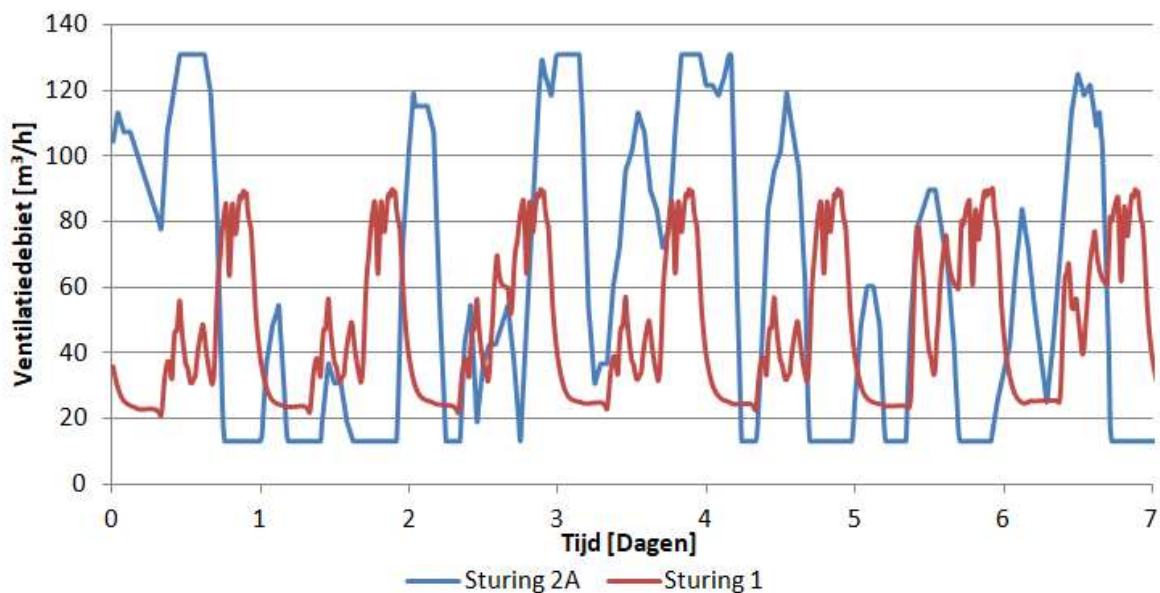
Figuur 73: Weekverloop H_2O -concentraties [%], Sturing 2A, Badkamer, Antwerpen



Figuur 74: Boxplot CO₂-concentraties [ppm] (Links) en H₂O-concentraties [%] (Rechts), Sturing 2A, Antwerpen

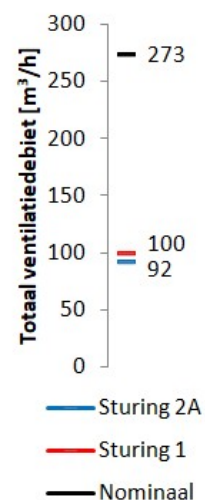
Energie

Om het energetische aspect van deze sturing te bespreken wordt eerste en vooral gekeken naar het verloop van het ventilatiedebiet gedurende de geselecteerde week in figuur 75. Hierop valt op te merken dat de ventilatiedebieten sterk variëren doorheen de tijd, waarin een regelmaat niet terug te vinden is zoals in sturing 1. Het is dan ook moeilijk om in te schatten als deze sturing beter of slechter scoort op energetisch vlak. Hierdoor wordt in figuur 76 de ventilatiedebieten samengebracht tot 1 waarde.



Figuur 75: Weekverloop ventilatiedebieten sturing 2A [m³/h] living, Antwerpen

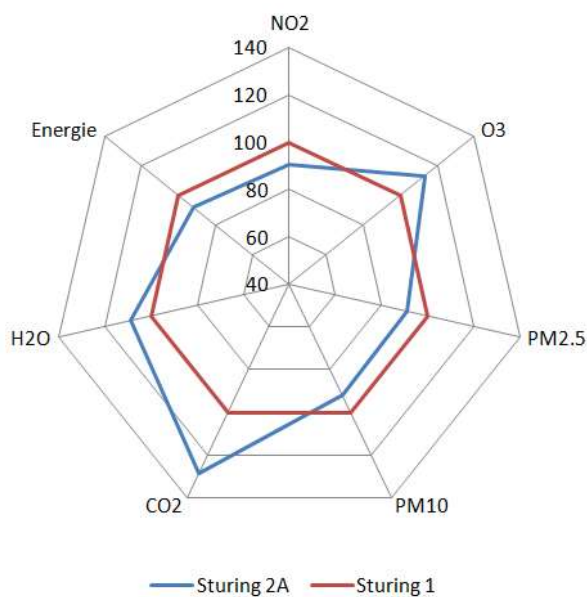
Het gemiddelde debiet van sturing 2A bedraagt 92 m³/h. Deze waarde ligt net onder de waarde van sturing 1 (figuur 76). Dit betekent dat het systeem bij sturing 2A een licht voordeel heeft op energetisch vlak ten opzicht van de traditionele sturing bij deze locatie Antwerpen. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat deze parameters sterk afhankelijk is van locatie tot locatie.



Figuur 76: Energieverbruik [m³/h], Sturing 2A, Antwerpen

Globaal overzicht

Wanneer voorgaande evaluatieparameters samengenomen worden in één enkel overzicht bekomt met figuur 77. Hieruit kan geconcludeerd worden dat sturing 2A beter scoort op de parameter gezondheid voor NO₂-, PM2.5- en PM10- en hierbij ook minder energie verbruikt dan het traditionele systeem. Vervolgens presteert deze nieuwe sturing 2A minder goed op het vlak van H₂O- en O₃-concentraties binnenshuis en opmerkelijk veel minder op het vlak van de CO₂-concentraties.

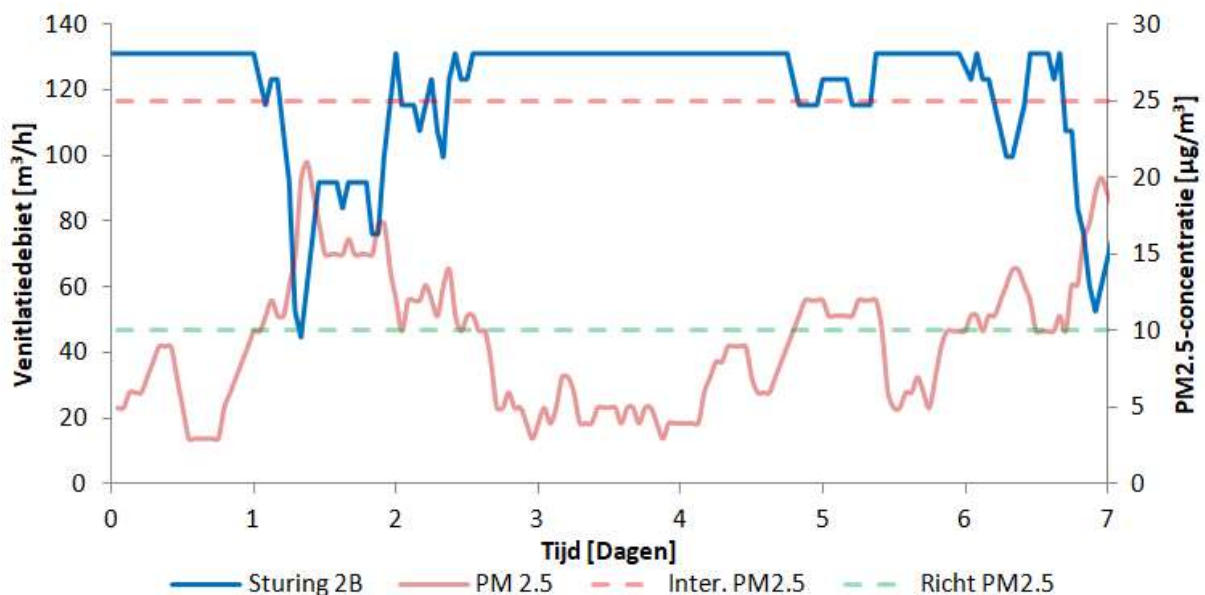


Figuur 77: Algemene evaluatie sturing 2A [%], Antwerpen

7.1.3 Sturing 2B

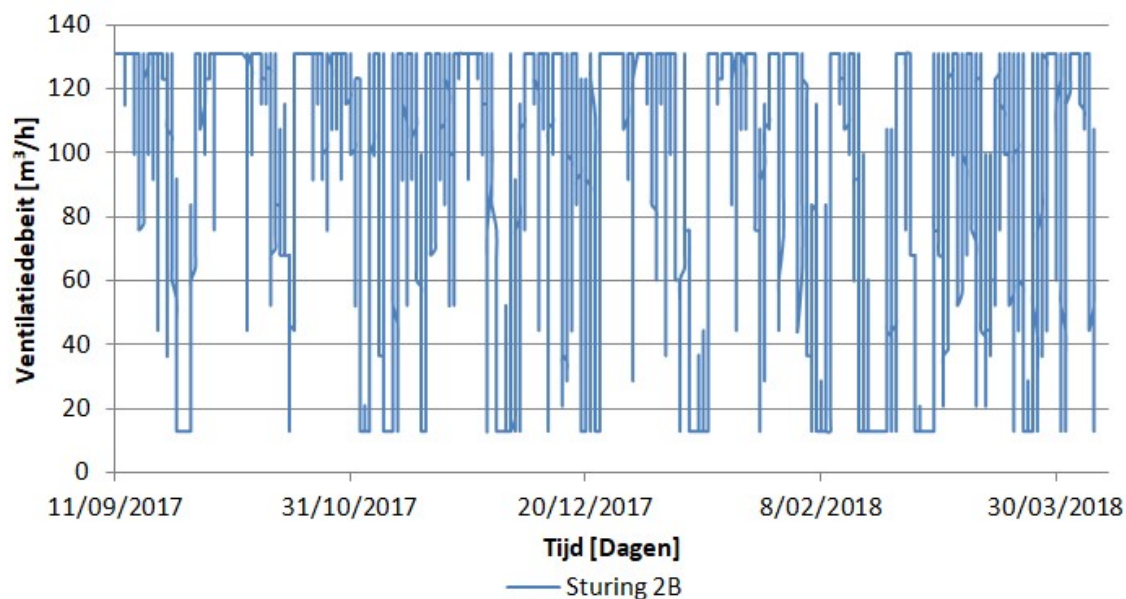
Werkingsprincipe

De sturing 2B is een sturing die enkel en alleen maar aandacht heeft voor het pollutant PM2.5. Om de algemene werking van deze sturing beter toe te lichten wordt op figuur 78 het ventilatiedebiet op de primaire as en de PM2.5-concentraties, samen met de richt- en interventiewaarde van dit pollutant, op de secundaire as uitgezet voor de geselecteerde week. Wanneer eerst en vooral gekeken wordt naar het buitenmilieu is te zien dat gedurende deze week de concentraties aan PM2.5 verschillende malen boven de richtwaarde van 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ uitsteken maar geen enkele keer de interventiewaarde van 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ overschrijden. Op de figuur is er een duidelijk verband zichtbaar tussen PM2.5 en het ventilatiedebiet. Vanaf het moment dat de PM2.5-concentraties boven de richtwaarde uitkomen, daalt het ventilatiedebiet lineair met een stijging van de PM2.5-concentraties. Indien deze concentratie afnemen gebeurt het omgekeerde effect en stijgt opnieuw het ventilatiedebiet.



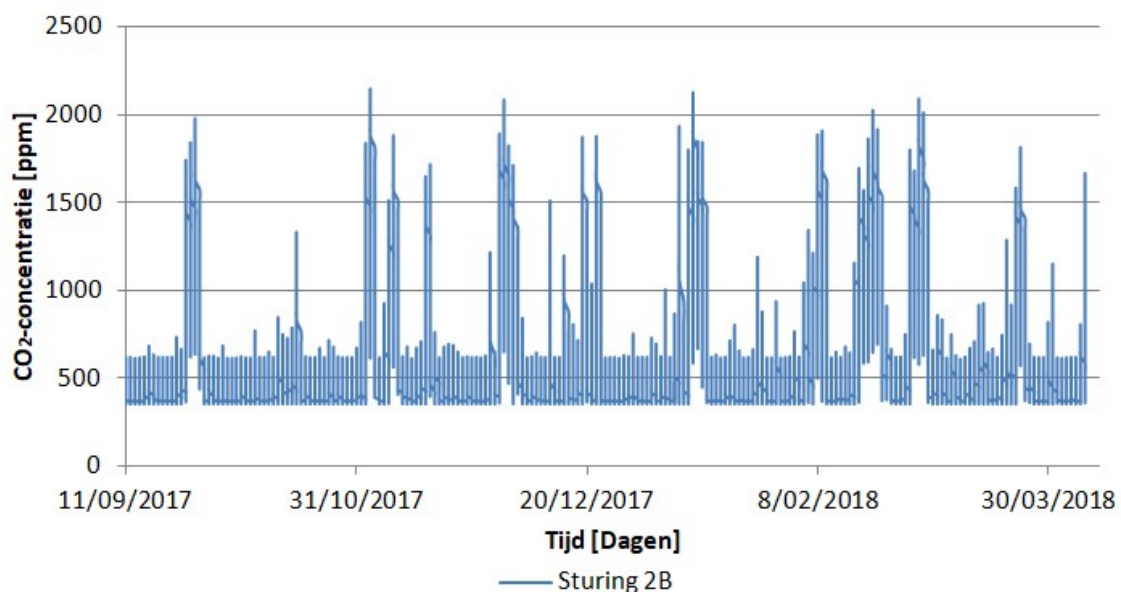
Figuur 78: Werkingsprincipe sturing 2B

Algemene trends



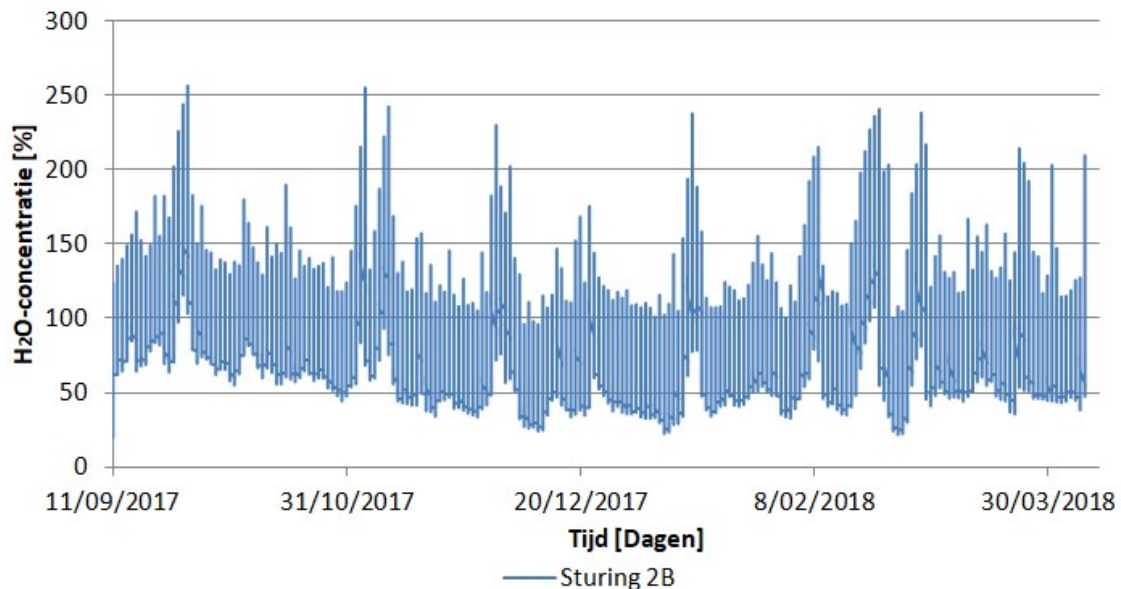
Figuur 79: Verloop ventilatiedebieten [m³/h] living, Antwerpen, sturing 2B

Op figuur 79 is het ventilatiedebiet in de living van sturing 3B aanwezig. Hierin is duidelijk te zien dat het vertrekpunt van deze sturing het nominaal debiet is. Hier wordt van afgeweken wanneer het gehalte aan PM2.5 in de buitenlucht zich boven de richtwaarde bevindt. Verschillende malen leidt deze daling tot het minimale ventilatiedebiet van 0,1 keer het nominaal ventilatiedebiet. Dit is ten gevolge van een periode waarin het gehalte aan PM2.5 in de buitenlucht zich boven de interventiewaarde bevindt. Omdat het vertrekpunt van deze sturing het nominaal debiet is van het ventilatiesysteem zal deze sturing verder in dit onderdeel niet vergeleken worden met een vraaggestuurde sturing maar met een nominale sturing. Dit is een sturing die zorgt voor een continue ventilatie aan het nominale debiet van elke ruimte.



Figuur 80: Verloop CO₂-concentratie [ppm] living, Antwerpen, sturing 2B

De CO₂-concentraties van sturing 2B, figuur 80, zijn over het algemeen relatief laag, tussen 350ppm en 600ppm. Maar deze curve kent enkele hoge pieken, die in sommige ruimtes aanleidingen geven tot waarden van 2700ppm. Dit is dan ook te wijten aan periodes waaraan geventileerd wordt aan het minimale debiet en waar binnenshuis geproduceerde pollutanten zich opstapelen in de woning.

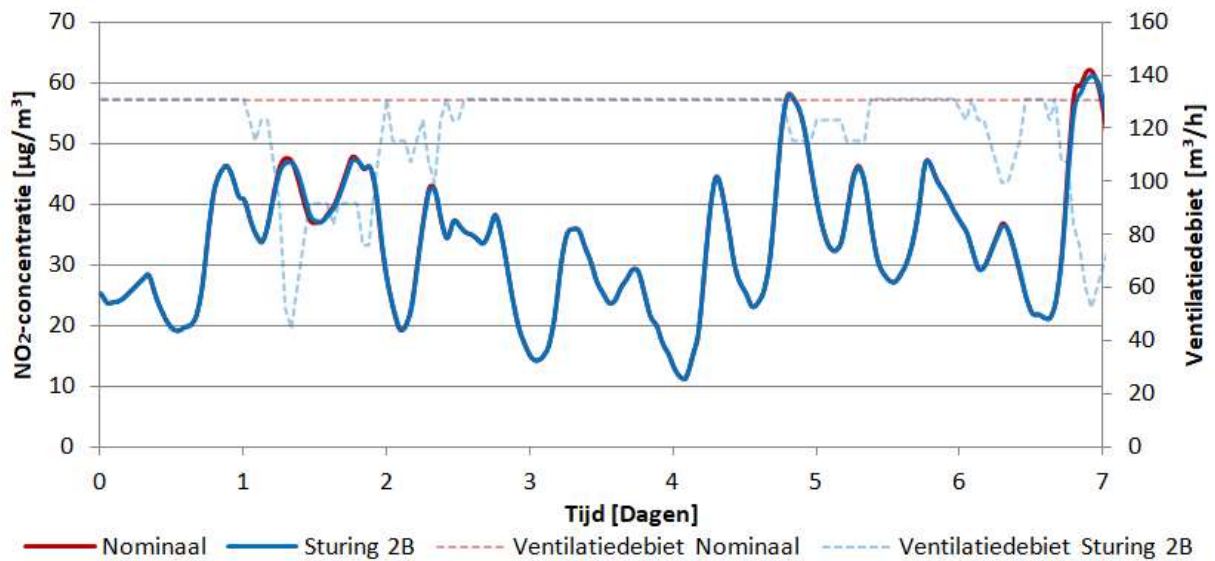


Figuur 81: Verloop H₂O-concentratie [%] badkamer, Antwerpen, sturing 2B

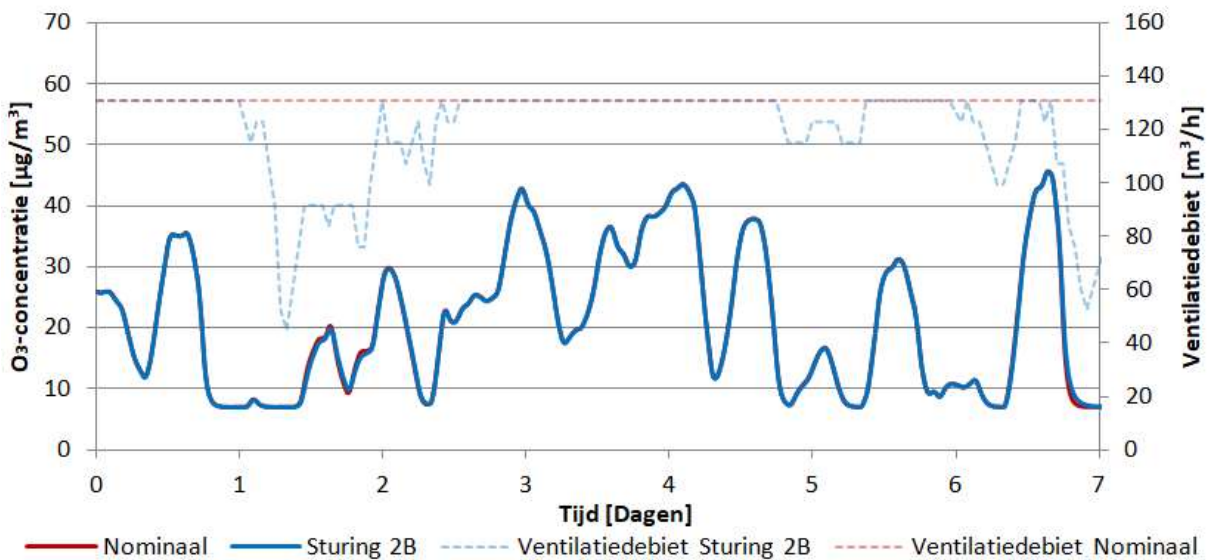
Hetzelfde fenomeen als bij de CO₂-concentraties wordt waargenomen op figuur 81 voor de relatieve vochtigheid. Hierin zijn opnieuw enkele hoge pieken aanwezig in de H₂O-concentraties ten gevolge van het ventileren aan het minimale debiet.

Gezondheid

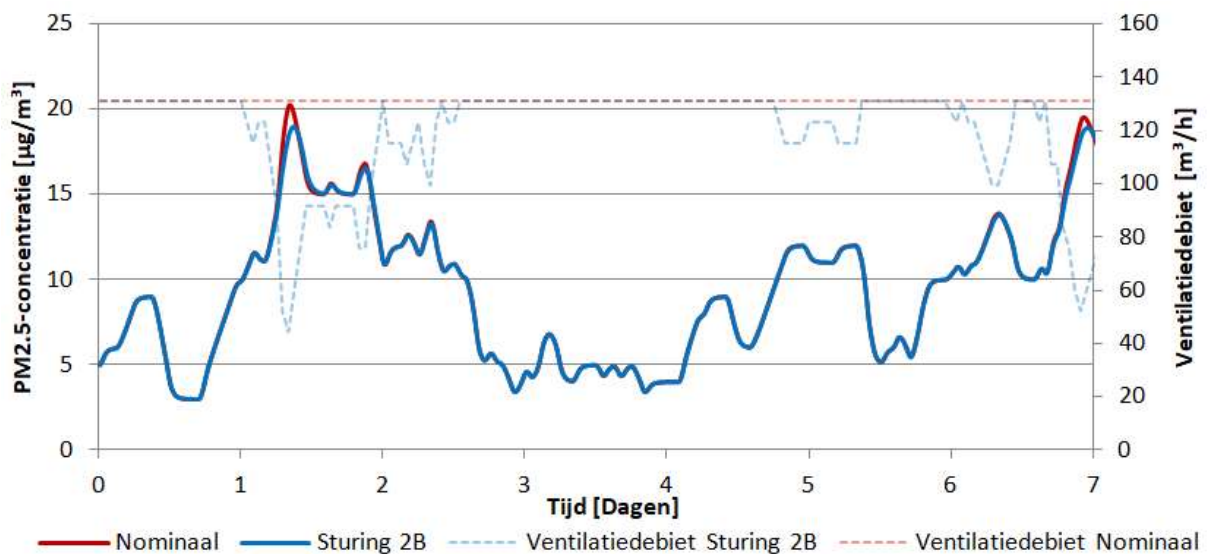
De parameter gezondheid zal geanalyseerd worden op basis van de vier pollutanten NO₂, O₃, PM_{2.5} en PM₁₀. Deze worden in functie van de tijd weergegeven op figuur 82, 83, 84 en 85 met op de achtergrond het ventilatiedebiet. In de eerst twee figuren blijkt duidelijk dat de NO₂ en O₃-concentraties nagenoeg identiek zijn voor de nominale sturing en de sturing 2B. Voor de laatste twee figuren is dit voor het overgrote deel van de tijd ook het geval. Het enige verschil is het feit dat de pieken in de concentraties PM_{2.5} en PM₁₀ bij de nominale sturing worden afgerond bij de sturing 2B. Dit is voor PM_{2.5} het geval omdat deze sturing werkt op basis van dit pollutant. Voor PM₁₀ valt dit gedrag te verklaren door het lineair verband tussen PM_{2.5} en PM₁₀. Als de PM_{2.5}-waarden stijgen, stijgen ook de PM₁₀-waarden, waardoor hoge PM₁₀-concentraties ook niet in de woning gebracht worden.



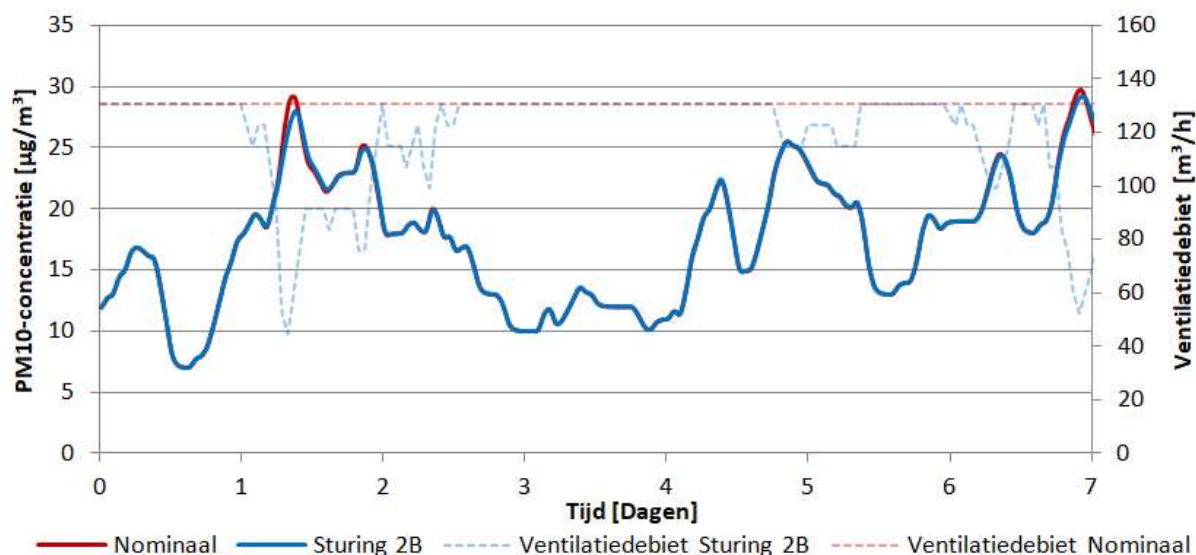
Figuur 82: Weekverloop NO₂-concentraties [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], Sturing 2B, Living, Antwerpen



Figuur 83: Weekverloop O₃-concentraties [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], Sturing 2B, Living, Antwerpen

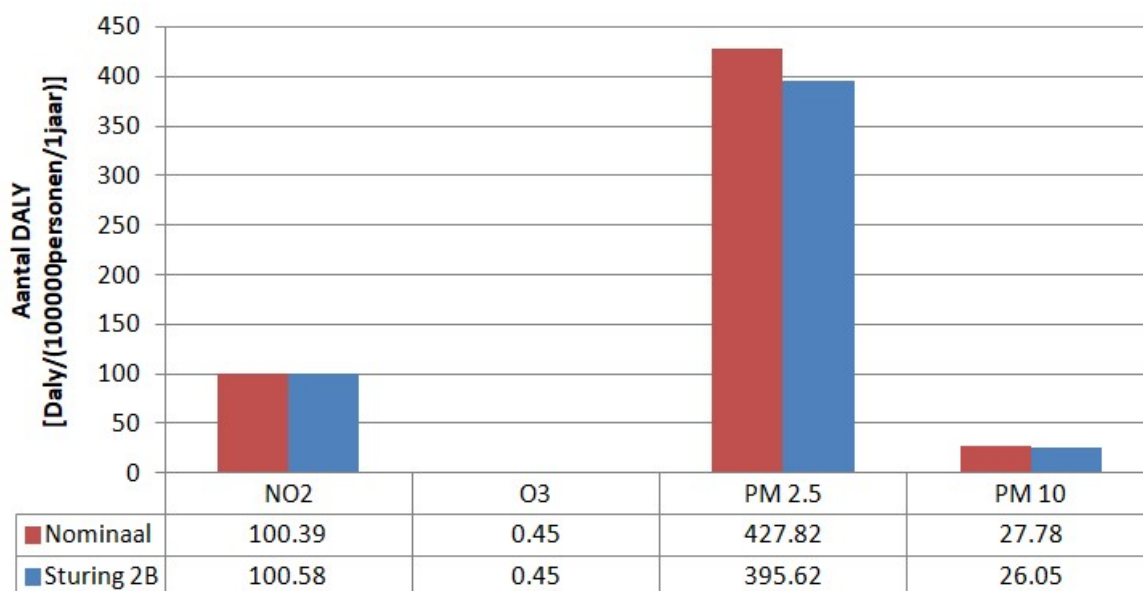


Figuur 84: Weekverloop PM2.5-concentraties [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], Sturing 2B, Living, Antwerpen



Figuur 85: Weekverloop PM10-concentraties [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], Sturing 2B, Living, Antwerpen

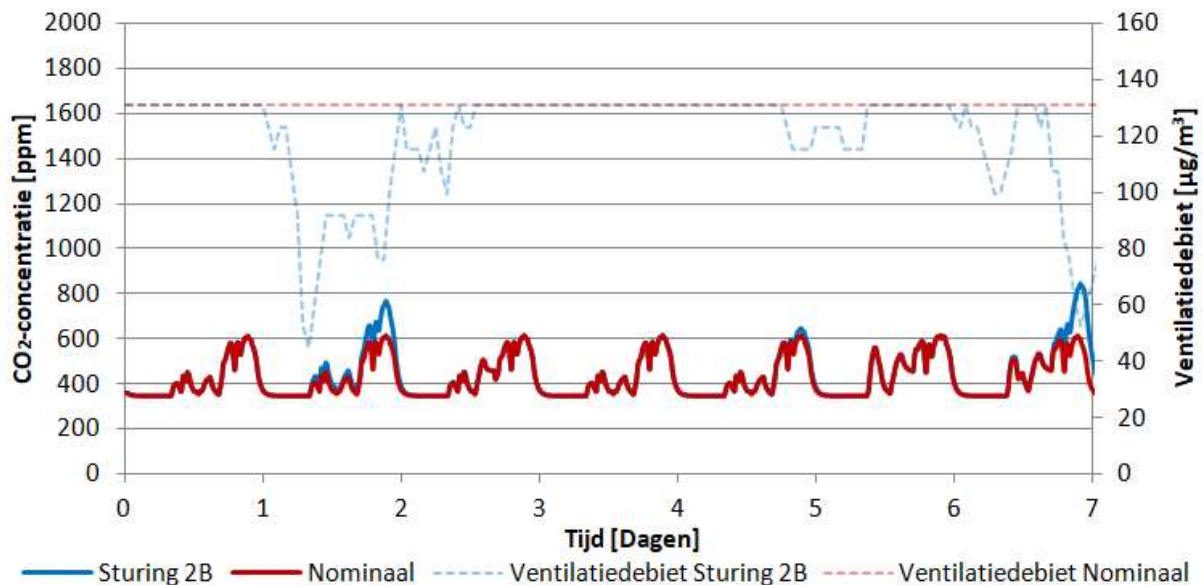
Een vertaling van bovenstaande grafieken uitgedrukt in het aantal DALY's is weergegeven in figuur 86. De waarden voor O_3 zijn bij beide sturing gelijk, maar de waarden voor NO_2 , $\text{PM}_{2.5}$ en PM_{10} verschillen. Er wordt een verbetering waargenomen van 7,5% voor het pollutant $\text{PM}_{2.5}$ en 7% voor het pollutant PM_{10} . Hiernaast is een lichte achteruitgang op te merken bij het pollutant NO_2 voor de sturing 2B ten opzichte van de traditionele sturing. Over het algemeen kan besloten worden dat de sturing 2B zal leiden tot een gezondere binnenomgeving dan een sturing die zorgt voor een continu nominaal debiet.



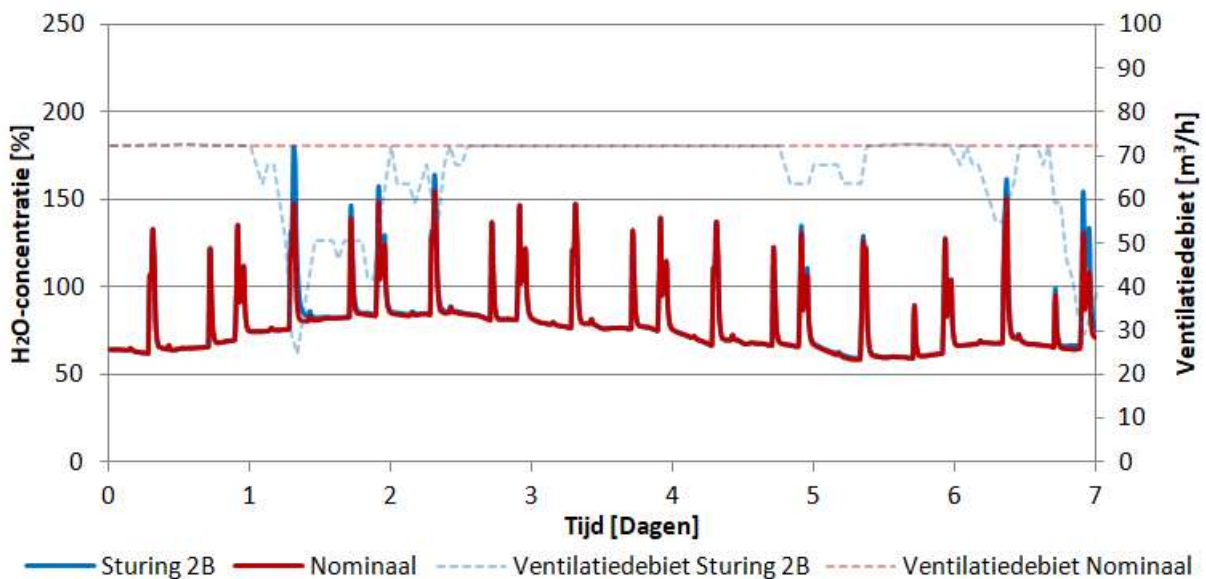
Figuur 86: Beoordeling gezondheid [DALY/(100000personen·1jaar)], Sturing 2B, Antwerpen

Comfort

De eisen die gesteld worden aan comfort hebben betrekking op de stoffen CO_2 en H_2O , waarvan hun concentratie voor de geselecteerde week zijn weergegeven in figuur 87 en 88 met op de achtergrond de ventilatiedebieten op de secundaire as. Hierop is voor beide stoffen waar te nemen dat de concentraties stijgen wanneer het ventilatiedebiet daalt.

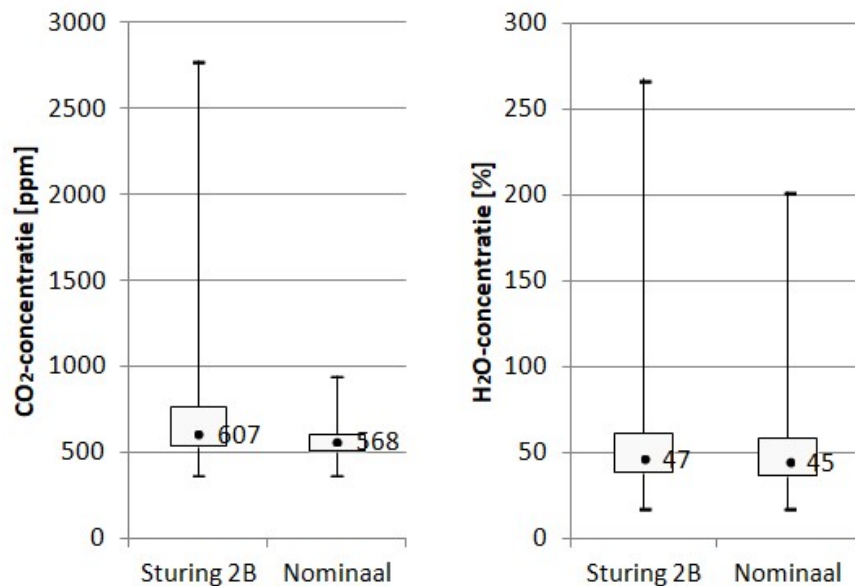


Figuur 87: Weekverloop CO_2 -concentraties [%], Sturing 2B, Badkamer, Antwerpen



Figuur 88: Weekverloop H_2O -concentraties [%], Sturing 2B, Badkamer, Antwerpen

Als de concentraties van beide stoffen voor de volledige periode samengebracht worden tot een Boxplot per stof bekomt men figuur 89. Op basis van deze figuur valt af te leiden dat voor beide stoffen de gemiddelde waarde min of meer gelijk blijven, maar dat hoge piek waargenomen worden, voornamelijk voor CO_2 . Hiernaast zorgt sturing 2B voor een grote spreiding in de CO_2 -concentraties. Dit is voornamelijk te wijten aan de grote hoeveelheid piekconcentraties.

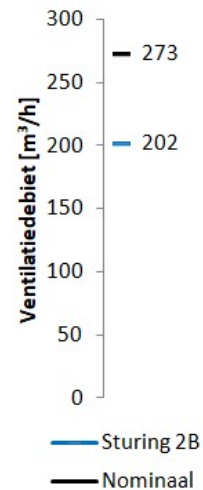


Figuur 89: Boxplot CO₂-concentraties [ppm] (Links) en H₂O-concentraties [%] (Rechts), Sturing 2B, Antwerpen

Energie

Voor het energetische aspect wordt opnieuw gekeken naar het ventilatiedebiet dat gecreëerd wordt door de sturing 2B. Uit figuur 78 is duidelijk dat deze sturing gedurende verschillende periodes onder het nominale debiet ventileert waardoor te verwachten is dat het energieverbruik van deze sturing lager zal liggen dan deze van het nominale systeem.

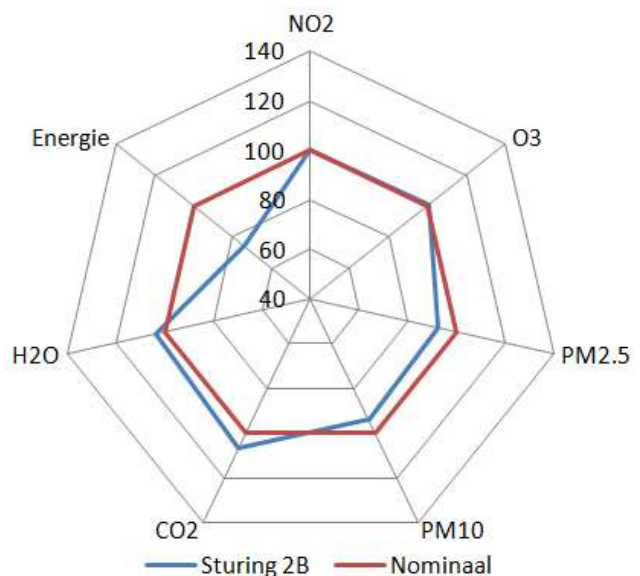
Voorgaande conclusie wordt bevestigd door figuur 90, die het gemiddeld ventilatiedebiet weergeeft van beide sturingen. De waarde van sturing 3B is 202, 35% lager dan de waarde van het nominale debiet. Dit betekent dat de sturing 3B zal leiden tot een sterk reductie van de benodigde energie tot maar liefst 35 procent.



Figuur 90: Energieverbruik [m³/h], Sturing 2B, Antwerpen

Globaal overzicht

Het samenbrengen van de drie besproken evaluatieparameters leidt tot figuur 91. Uit de bovenstaande analyses en deze figuur kan algemeen besloten worden voor sturing 2B, toegepast op de locatie Antwerpen, dat ze zorgt voor gezondere binnenlucht met een lager energieverbruik. Maar deze sturing leidt ook tot een daling van het comfort met de hoge concentraties die voor CO₂, en in mindere mate H₂O bekomen worden.

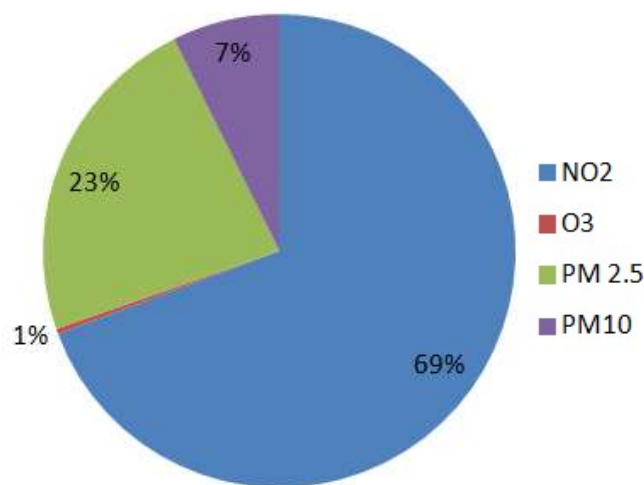


Figuur 91: Algemene evaluatie sturing 2B [%], Antwerpen

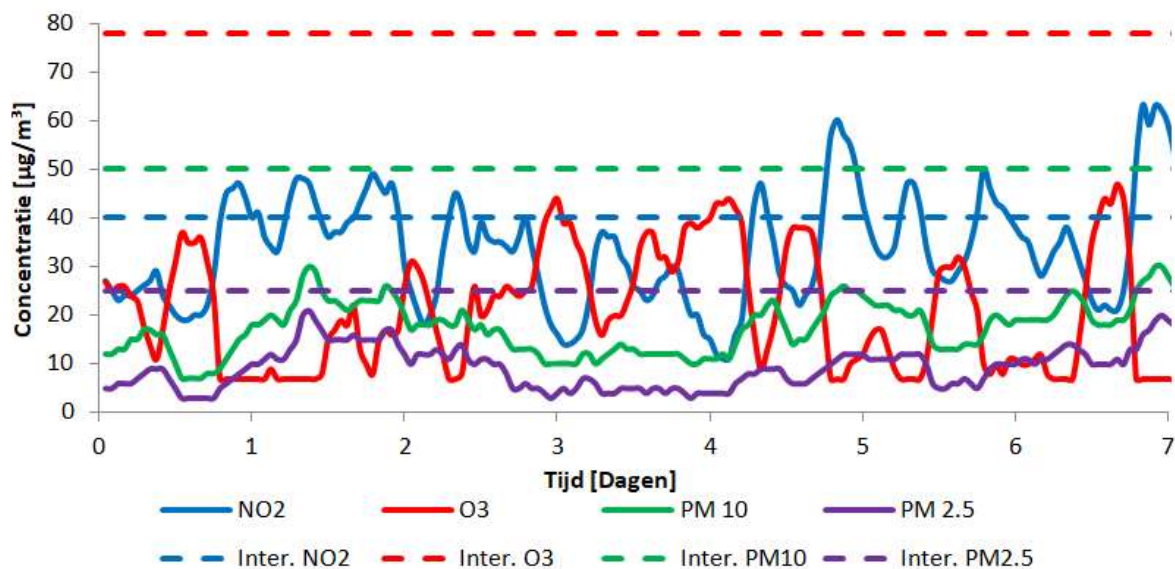
7.1.4 Sturing 3

Werkingsprincipe

Vooraleerst er gestart kan worden met de vergelijking van deze twee verschillende systemen dienen de buitenluchtconcentraties geanalyseerd te worden. Figuur 92 geeft in percentages weer welke stof bepalend zal zijn voor de werking van deze derde sturing op de locatie Antwerpen voor de volledige periode. Hieruit komt duidelijk dat NO_2 de bepalende factor zal zijn. Als we kijken naar het verloop van de buitenconcentraties samen met de interventiewaarde in functie van de tijd van de vier buitenluchtpolluent op figuur 93 is terug duidelijk te zien dat enkel de concentratie NO_2 verschillende malen boven de interventiewaarde uitsteken. Enkel op de vierde dag, de donderdag, blijft de NO_2 -concentratie gedurende de volledige dag onder de interventiewaarde.

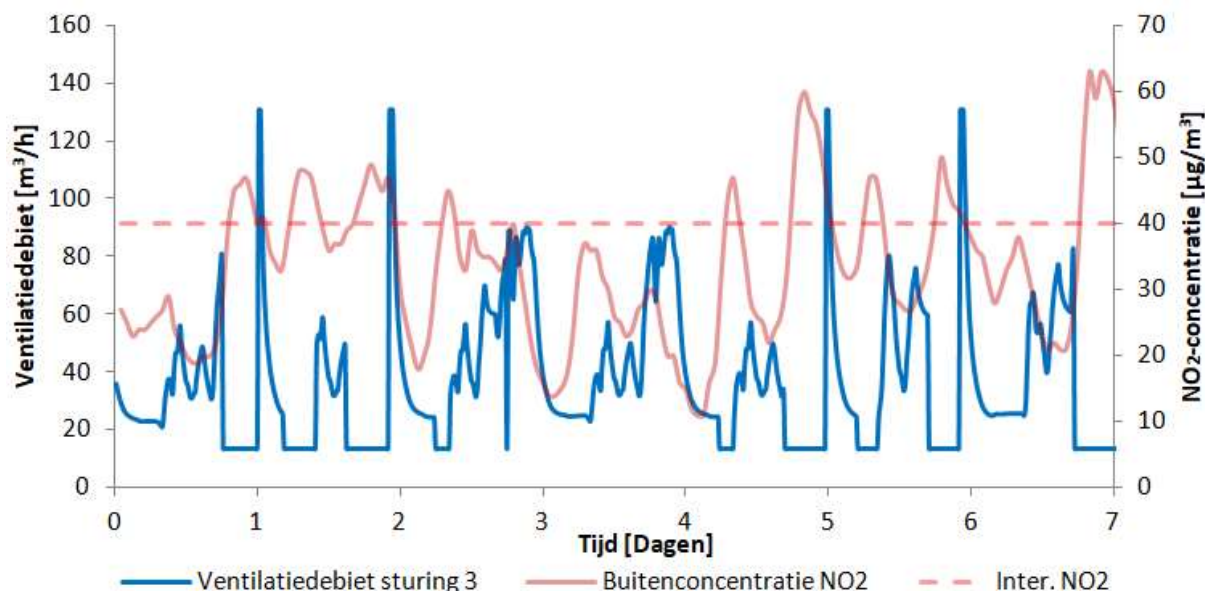


Figuur 92: Belang polluenten op sturing 3 [%]



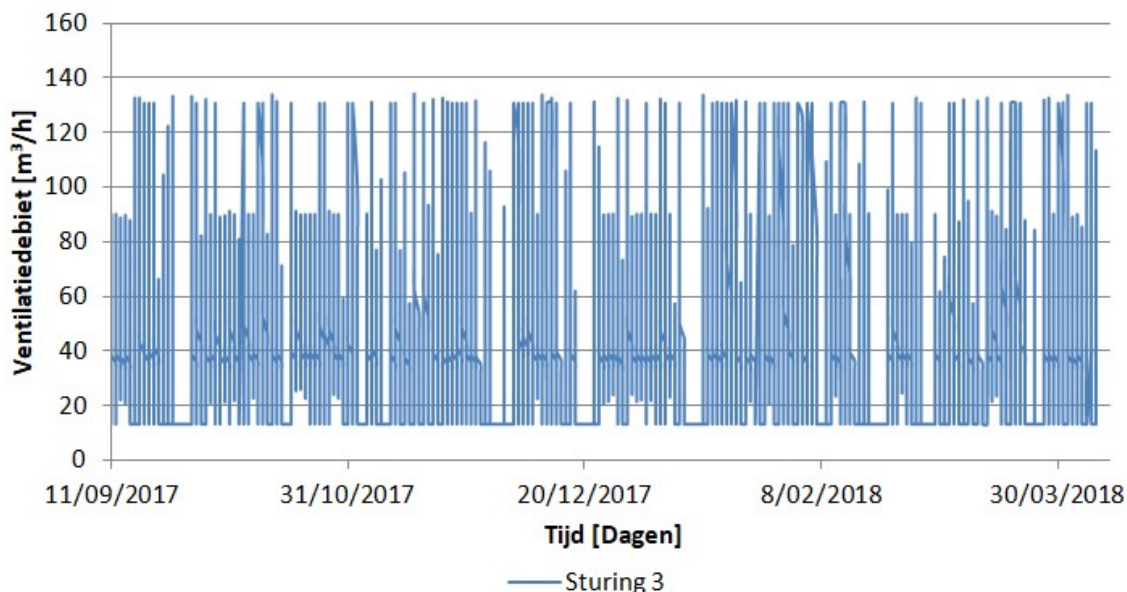
Figuur 93: Weekverloop concentraties buitenluchtpolluenten [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], Antwerpen

Op figuur 94 wordt het verloop van het ventilatiedebiet weergegeven op de primaire as samen met de NO₂-concentraties en zijn interventiewaarde op de secundaire as. In deze figuur wordt de werking van deze derde sturing duidelijk. Bij elke piek van de NO₂-concentraties boven de interventiewaarde daalt het ventilatiedebiet naar de minimale waarde. Deze periode van minimaal ventilatiedebiet wordt vervolgens gevolgd door hoge ventilatiedebieten in de meeste gevallen. Dit om de opgestapelde, binnenshuis geproduceerde polluenten weg te ventileren. In de overige gevallen volgt het ventilatiedebiet van de tweede sturing deze van de traditionele sturing.



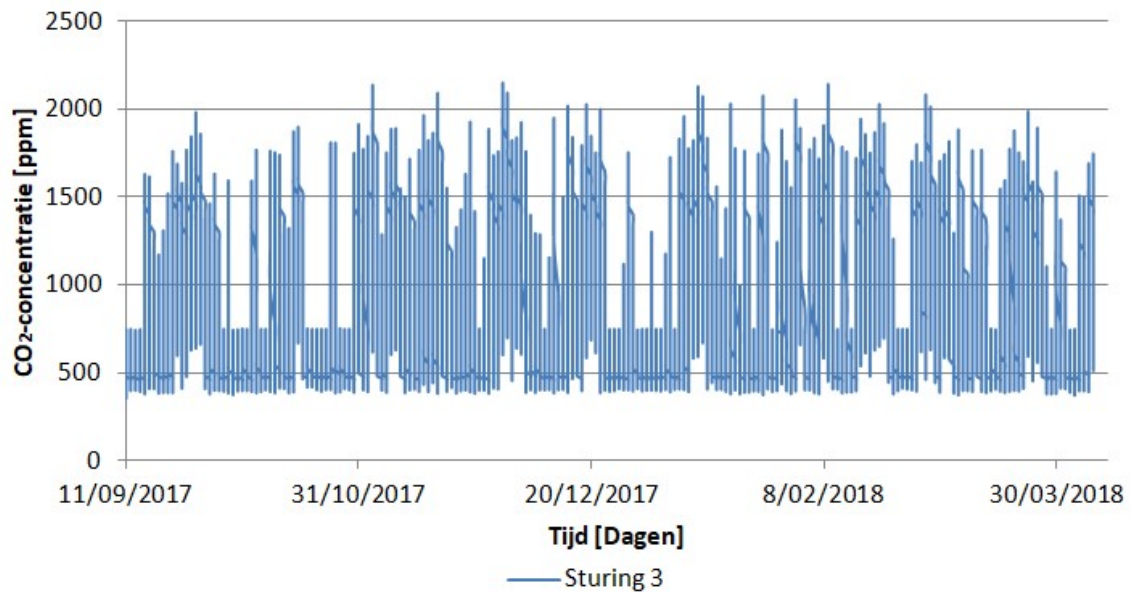
Figuur 94: Weringsprincipe sturing 2B

Algemene trends



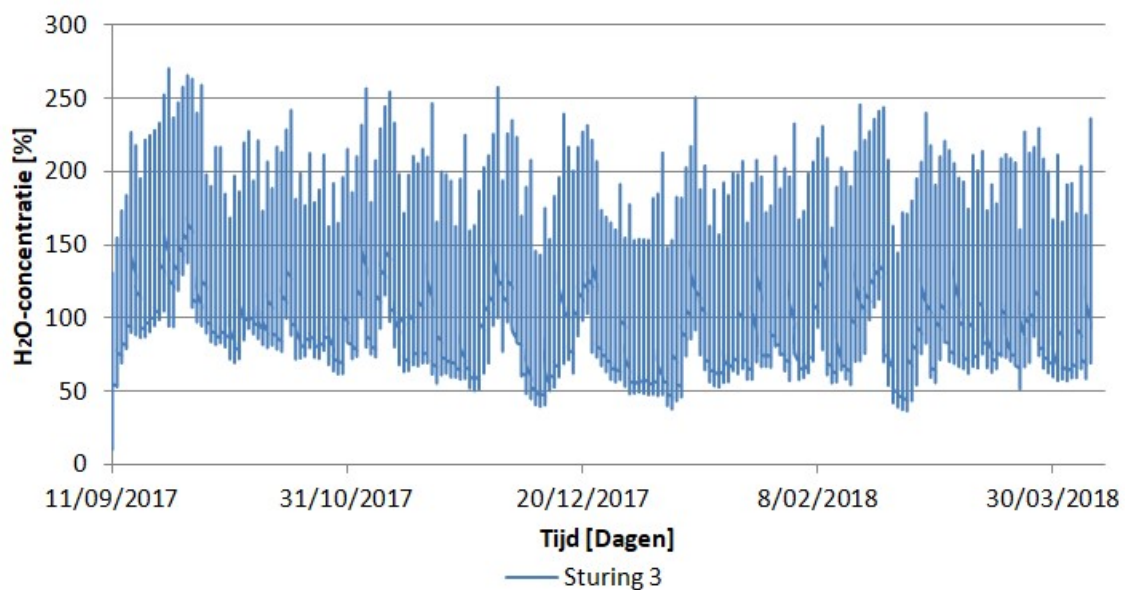
Figuur 95: Verloop ventilatiedebieten [m³/h] living, Antwerpen, sturing 3

In het verloop van de ventilatiedebieten van de derde sturing, figuur 95, zijn de twee werkingsregimes te onderscheiden. Er zijn periodes waar er aan 0,1 keer het nominaal ventilatiedebiet geventileerd wordt, gevolgd door een piek in het ventilatiedebiet en periodes waarbij geventileerd wordt zoals bij de traditionele sturing.



Figuur 96: Verloop CO₂-concentraties [ppm] living, Antwerpen, sturing 3

Wanneer de CO₂-concentraties van deze derde sturing bekeken worden op figuur 96 kan opgemerkt worden dat er een groot aantal pieken aanwezig zijn in deze curve. Deze pieken zijn te wijten aan de werking die schuilt achter deze sturing. Door het ventileren aan het minimale debiet stapelen stoffen, die binnenshuis geproduceerd worden, zich op in de binnenlucht waardoor deze concentraties de hoogte in schieten.



Figuur 97: Verloop H₂O-concentraties [%] Badkamer, Antwerpen, sturing 3

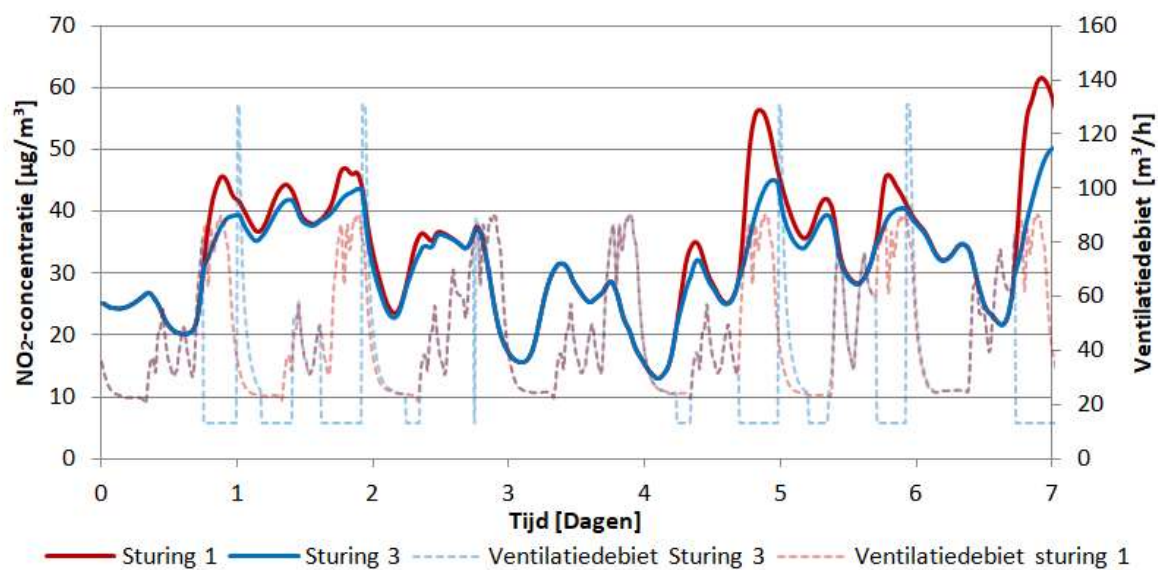
Omdat H₂O ook een stof is die binnenshuis geproduceerd wordt is hetzelfde fenomeen aanwezig als bij CO₂ (figuur 97). Hierbij zijn de maxima minder hoog dan bij CO₂ het geval is.

Gezondheid

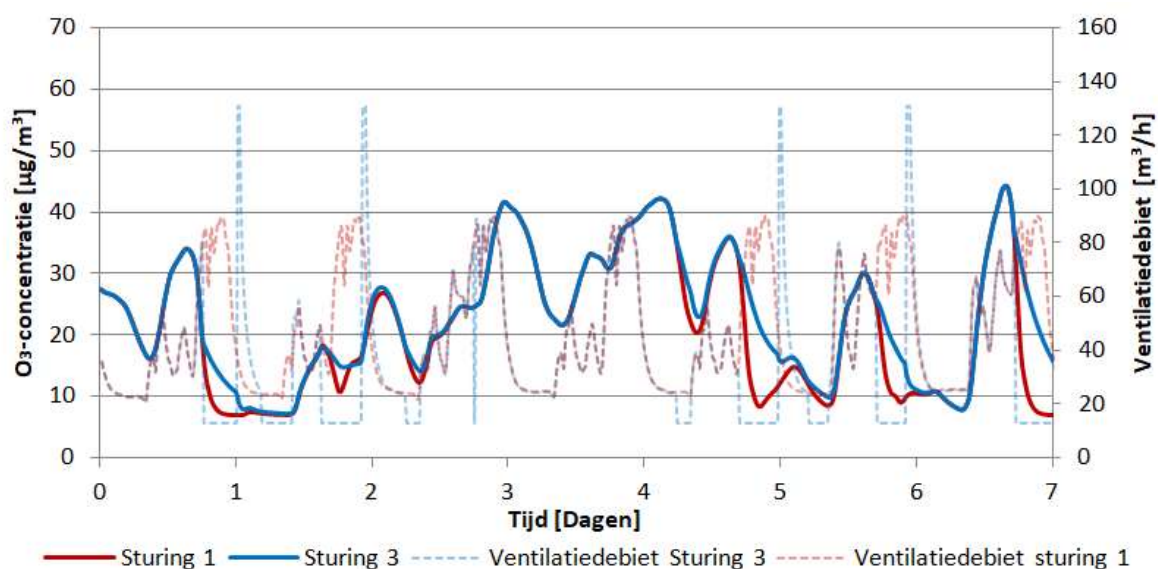
Het verloop van deze concentraties bij sturing 3 wordt weergegeven op figuur 98, 99, 100 en 101, waarop respectievelijk de NO_2 -, O_3 -, $\text{PM}_{2.5}$ - en PM_{10} -concentraties op afgebeeld staan. Hierbij werd op de achtergrond het verloop van het ventilatiedebieten toegevoegd van beide sturingen op de secundaire as. Hierop kan voor de stoffen NO_2 , $\text{PM}_{2.5}$ en PM_{10} opgemerkt worden dat hun concentraties in de binnenlucht lager zijn bij de traditionele sturing met controle van de buitenluchtconcentraties (sturing3), gedurende de periodes met een minimaal ventilatiedebiet. Telkens wanneer zich een piek voordoet in de concentraties bij de traditionele sturing, wordt deze piek bij de derde sturing sterk ingeperkt. Dit kan leiden tot een verlaging van de concentraties in de pieken tot $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Voor de stof O_3 geldt dit principe niet. Hierbij is te zien dat de concentraties gedurende de dalen hoger liggen bij de sturing 3 dan de traditionele sturing. Gedurende de andere periodes zijn deze gelijklopend met elkaar. De redenen voor dit gedrag van ozon is gelijkaardig aan deze die al reeds aan bod kwamen bij sturing 2A. De ozonwaardes liggen bij de locatie Antwerpen relatief laag waardoor deze zelden de interventiewaarde bereiken. Hierdoor wordt er in deze derde sturing bijna nooit aandacht gehecht aan deze stof waardoor de pieken niet worden ingeperkt. De hogere concentraties aan ozon bij de derde sturing zijn een gevolg van twee elementen. Het eerste element is het omgekeerde verband tussen ozon en NO_2 . Wanneer de ozonconcentraties stijgen, daalt de concentratie stikstofdioxiden en andersom. De tweede reden is het verloop van de ventilatiedebieten. In deze derde sturing wordt bij goede luchtkwaliteit hogere O_3 -concentraties binnengebracht uit de buitenlucht, zoals in het traditionele systeem. Vervolgens stijgt de buitenconcentratie van NO_2 tot boven de interventiewaarde en daalt de O_3 -concentratie door het lineair verband tussen beide. Door de hoge NO_2 -concentraties gaat het ventilatiesysteem van sturing 3 naar een minimaal debiet, waardoor de reeds hogere binnengebrachte hoeveelheden ozon slechts zeer geleidelijk worden afgevoerd uit de kamers. Dit is in de traditionele sturing niet het geval. Hierbij reageert het ventilatiesysteem niet op het feit dat de NO_2 -concentraties boven de interventiewaarde gaan, en blijft het systeem ventileren op een hoger debiet. Hierdoor worden de ozonconcentraties sneller afgevoerd uit de kamers waardoor de concentraties sterker dalen. Deze verschillende elementen verklaren dan ook het verloop van de O_3 -concentraties in deze sturing.

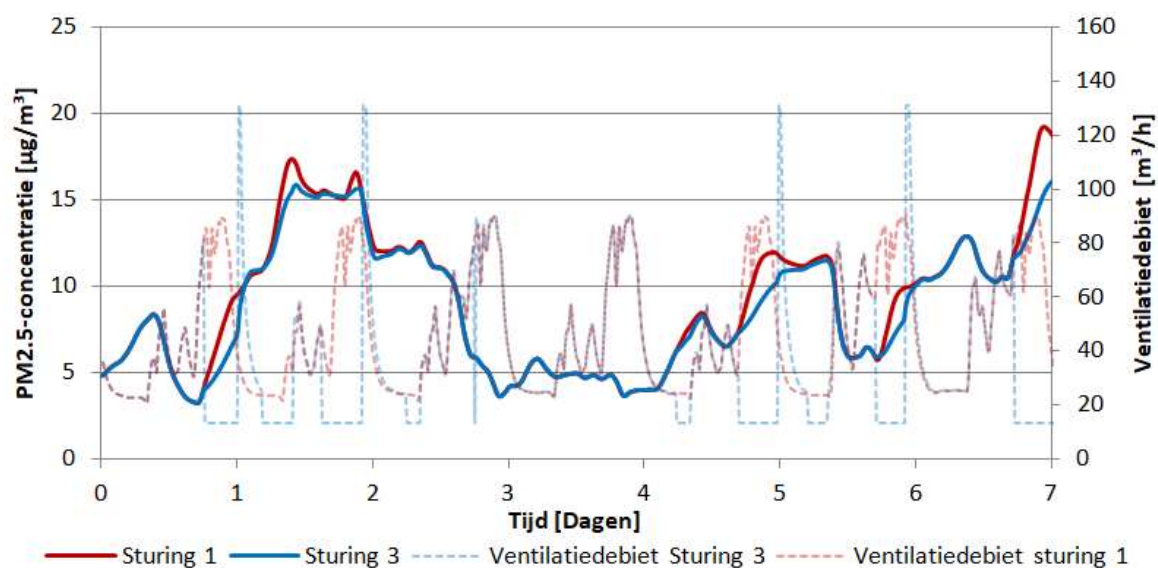
Gedurende de periodes waarin geen van de vier polluenten de interventiewaarde overschrijd evolueren de binnenconcentraties van de vier polluenten terug naar de waardes van de traditionele sturing. Dit is duidelijk te zien op de vierde dag van de weeksimulatie.



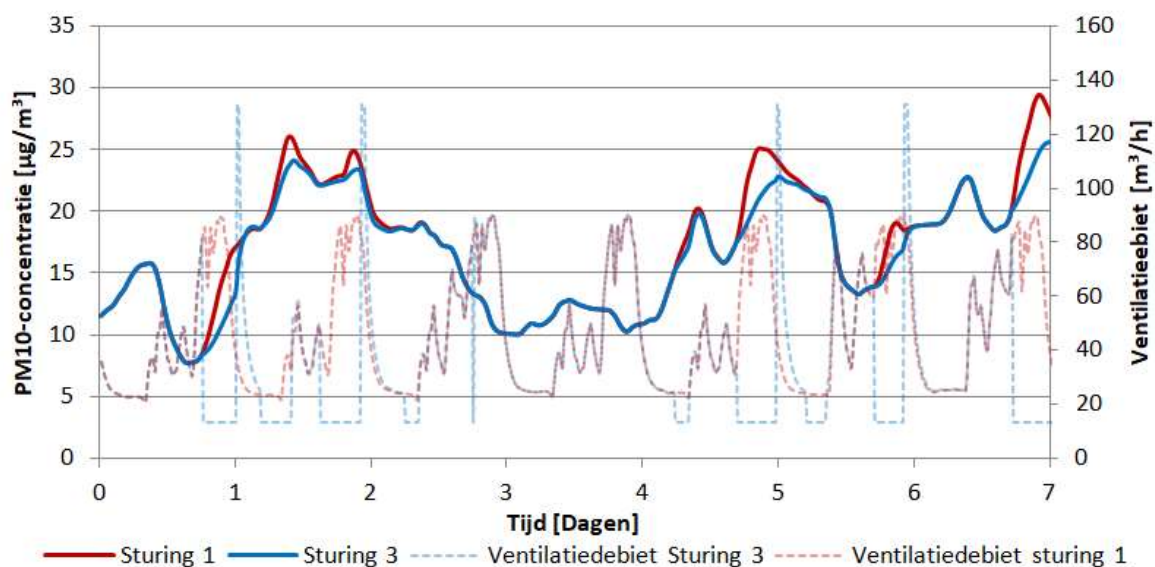
Figuur 98: Weekverloop NO₂-concentraties [µg/m³], Sturing 3, Living, Antwerpen



Figuur 99: Weekverloop O₃-concentraties [µg/m³], Sturing 3, Living, Antwerpen

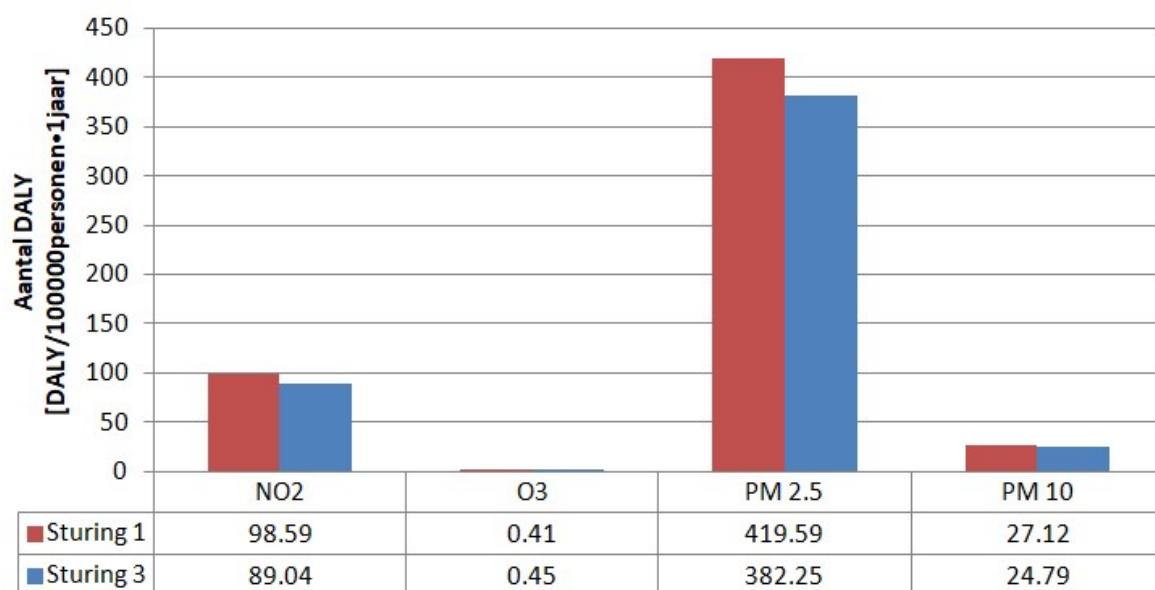


Figuur 100: Weekverloop PM_{2.5}-concentraties [µg/m³], Sturing 3, Living, Antwerpen



Figuur 101: Weekverloop PM10-concentraties [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], Sturing 3, Living, Antwerpen

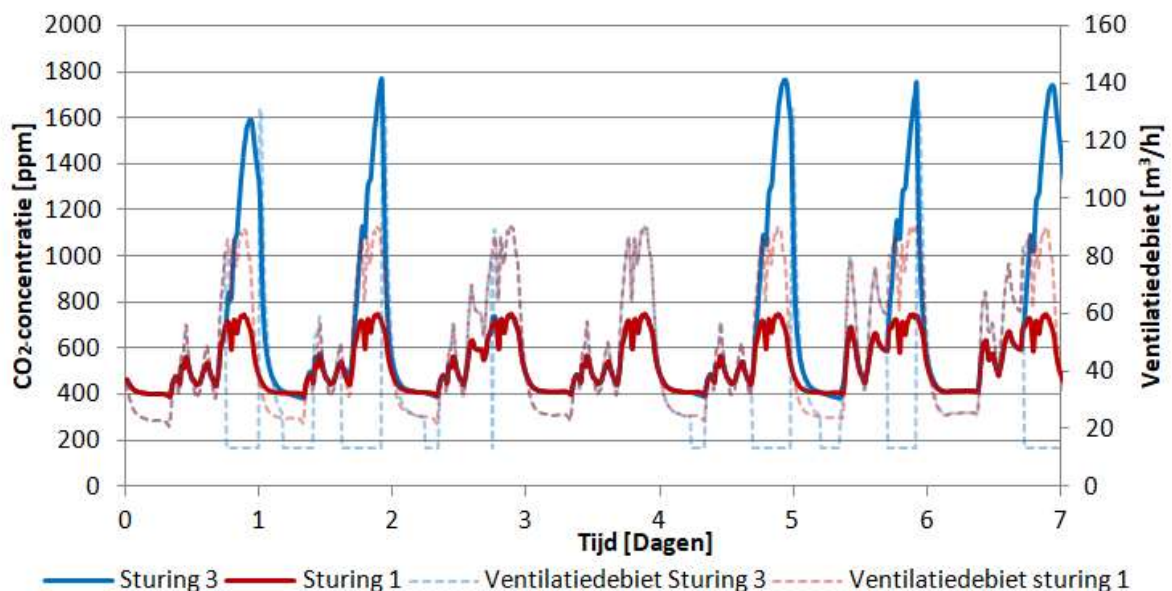
Wanneer bovenstaande grafieken omgezet worden naar het aantal DALY's bekomt men figuur 102. De sturing waarbij een controle werd uitgevoerd van de buitenluchtkwaliteit levert voor NO_2 , $\text{PM}_{2.5}$ en PM_{10} een lager aantal DALY's op, en zorgt dus voor een gezonder binnenklimaat. Enkel het aantal DALY's voor ozon bleef constant. Als de totale balans opgemaakt wordt voor deze tweede sturing kan op het vlak gezondheid besloten worden dat het zorgt voor een verbetering van de gezondheid van het binnenklimaat met ongeveer 9% in vergelijking met de traditionele sturing.



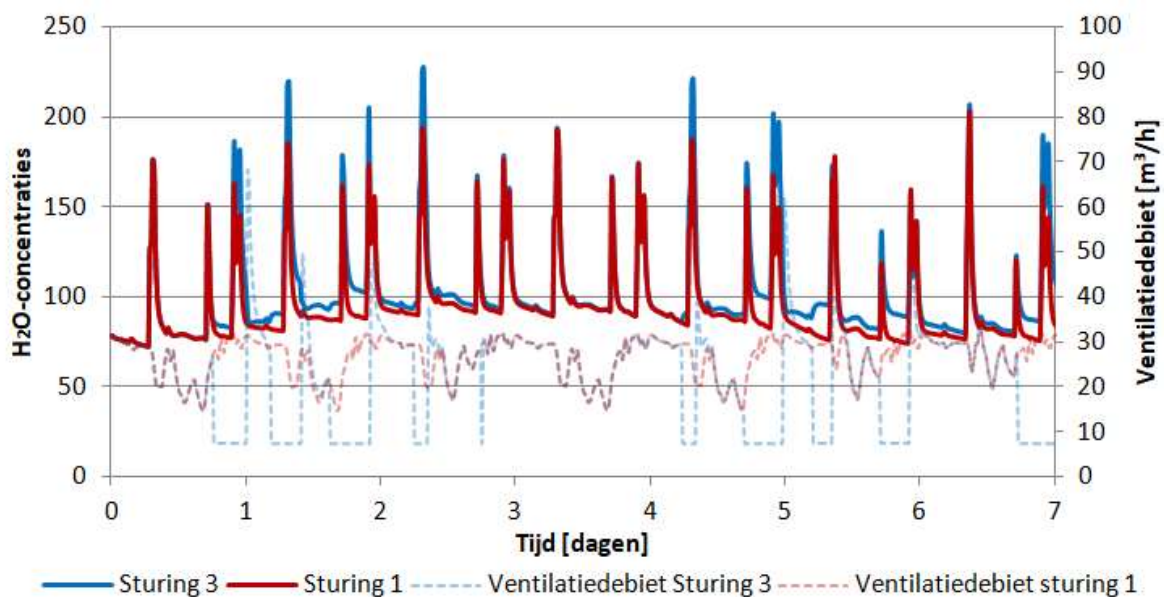
Figuur 102: Beoordeling gezondheid [$\text{DALY}/(100000\text{personen}\cdot 1\text{jaar})$], Sturing 3, Antwerpen

Comfort

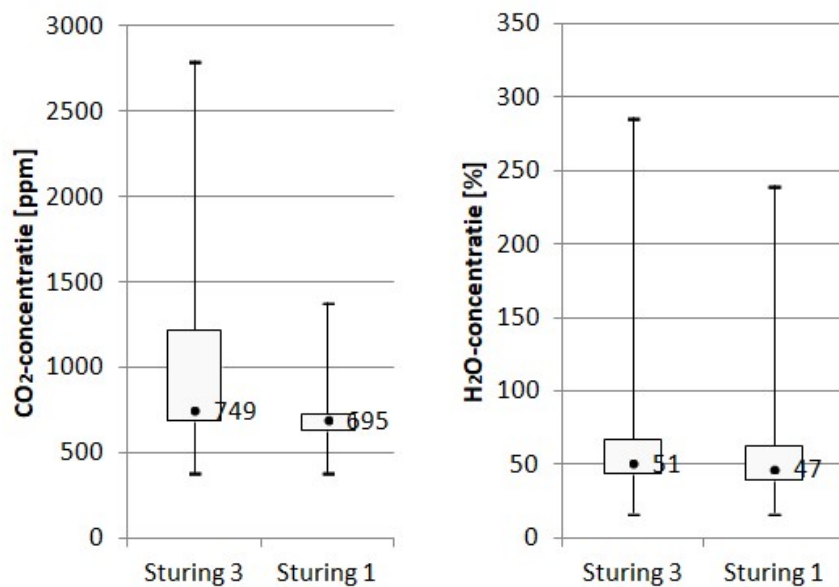
Voor de evaluatie van de laatste parameter, het comfort, worden de CO₂- en H₂O-concentraties weergegeven in functie van de tijd in figuur 103 en 104 met op de achtergrond opnieuw de ventilatiedebieten. Op beide figuren is te zien dat bij sturing 3, gedurende de periodes waarin minimaal geventileerd wordt, CO₂ en H₂O zich opstapelen in de woning. Dit leidt vooral tot zeer hoge pieken in de CO₂-concentraties tot wel bijna 2700ppm (figuur 105). Deze waarden zijn zodanig hoog dat ze aanleiding kunnen geven tot gezondheidsklachten, wat natuurlijk vermeden dient te worden. Hiernaast zijn ook pieken aanwezig in de H₂O-concentraties (figuur 105), maar dit in mindere mate. Vervolgens kan uit figuur 105 afgeleid worden, uit de grote afstand tussen gemiddelde en derde kwartiel, dat het aantal pieken in de CO₂-concentraties sterk toeneemt bij de tweede sturing, zoals al werd vastgesteld bij algemene resultaten. Uit deze verschillende figuren valt dan ook duidelijk af te leiden dat de derde sturing zorgt voor een daling van het comfort in de woning.



Figuur 103: Weekverloop CO₂-concentraties [ppm], Sturing 3, Living, Antwerpen



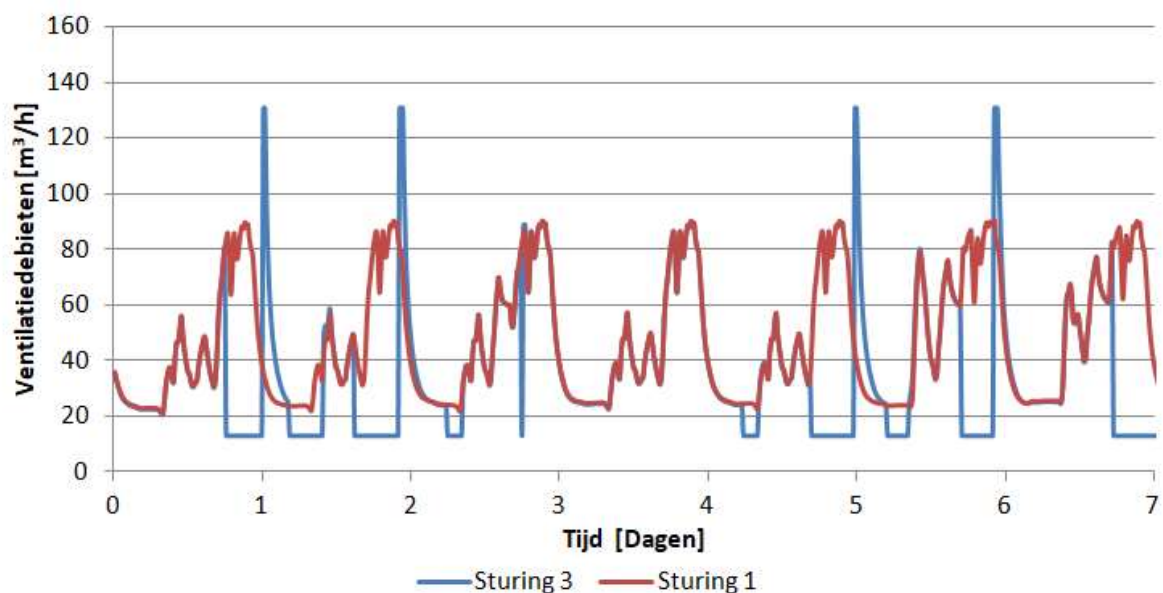
Figuur 104: Weekverloop H₂O-concentraties [%], Sturing 3, Badkamer, Antwerpen



Figuur 105: Boxplot CO₂-concentraties [ppm] (Links) en H₂O-concentraties [%] (Rechts), Sturing 3, Antwerpen

Energie

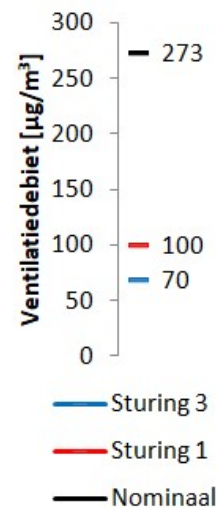
Op figuur 106 zijn de ventilatiedebieten weergegeven van de basissturing samen met sturing 3. Hierop is duidelijk te zien dat het ventilatiedebiet van sturing 3 deze van de traditionele sturing grotendeels volgt, behalve op momenten waar de buitenluchtkwaliteit niet goed is. Gedurende deze periodes wordt er overgegaan op het minimale ventilatiedebiet. Omdat er gedurende langere periodes aan een minimaal debiet geventileerd wordt een lager energieverbruik van deze sturing verwacht.



Figuur 106: Weekverloop ventilatiedebieten sturing3 [m³/h] living, Antwerpen

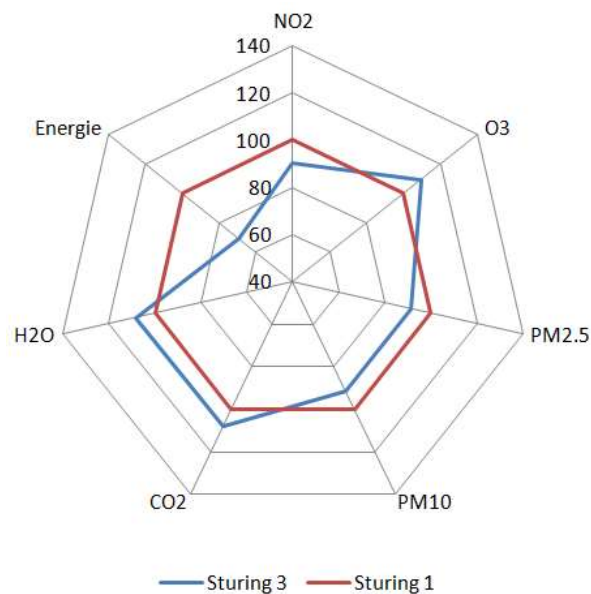
Op figuur 107 is duidelijk dat het energieverbruik van deze tweede sturing significant kleiner is dan dit voor de standaard sturing. Dit kan toegewezen worden aan de lange periodes waarbij het ventilatiesysteem van sturing 3 aan het minimale debiet van 0,1 keer het nominale debiet ventileert. De pieken, die volgen achter deze periodes van minimaal debiet, in het debiet (figuur 106) zorgen slechts deels voor het tenietdoen van dit effect.

Figuur 107: Energieverbruik [m^3/h], Sturing 3, Antwerpen



Globaal overzicht

Om een samenvattend beeld te krijgen over hoe goed de traditionele sturing met een controle van de buitenluchtpolluenten (Sturing 3) scoort, dient naar onderstaande figuur 108 gekeken te worden. Hierop zijn de verschillende onderzochte elementen aanwezig die ten opzichte van een traditionele sturing (Sturing 1) vergeleken worden. Onmiddellijk valt op dat het energetische aspect van deze sturing opmerkelijk beter scoort. Hiernaast wordt ook op het vlak van NO_2 , $\text{PM}_{2.5}$ en PM_{10} beter gescoord dan de traditionele sturing. Hiernaast heeft deze sturing ook verschillende nadelen. De waarden voor O_3 , H_2O en CO_2 zijn hoger in vergelijking met sturing 1.



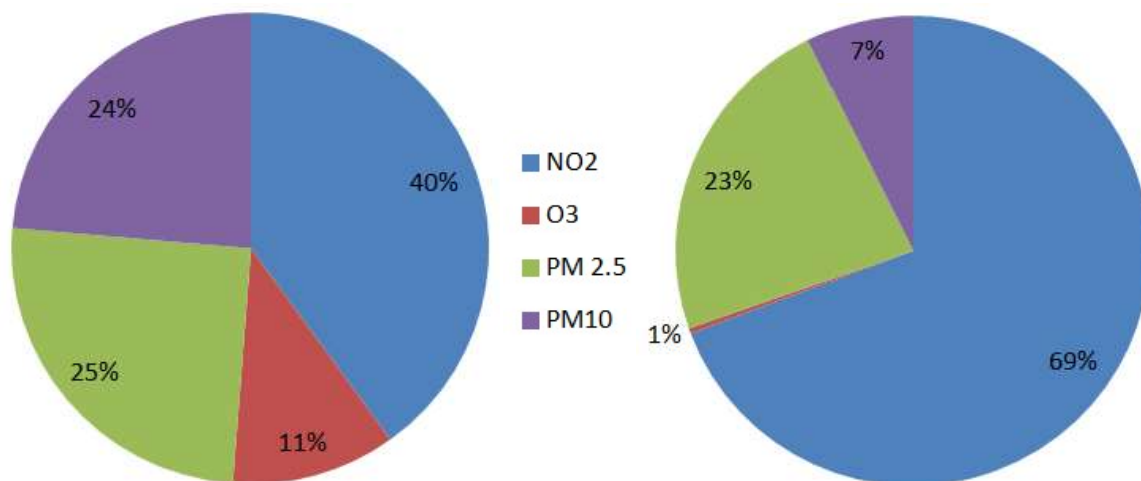
Figuur 108: Algemene evaluatie sturing 3 [%], Antwerpen

7.2 Resultaten sturingen toegepast bij de verschillende locaties

In dit onderdeel worden de drie verschillende sturingen toegepast op elke locatie. Hierbij wordt er gebruik gemaakt van het globaal overzicht om de verschillende parameters snel te kunnen evalueren. De referentiesturing is telkens de traditionele vraaggestuurde sturing 1. Naast het globale overzicht dat kan in bijlage 2 de gedetailleerde waarden teruggevonden worden van de drie evaluatiecriteria. Voorafgaand wordt er eerst en vooral voor elke locatie kort besproken welke stoffen doorslaggevend zullen zijn voor de sturingen.

7.2.1 Antwerpen

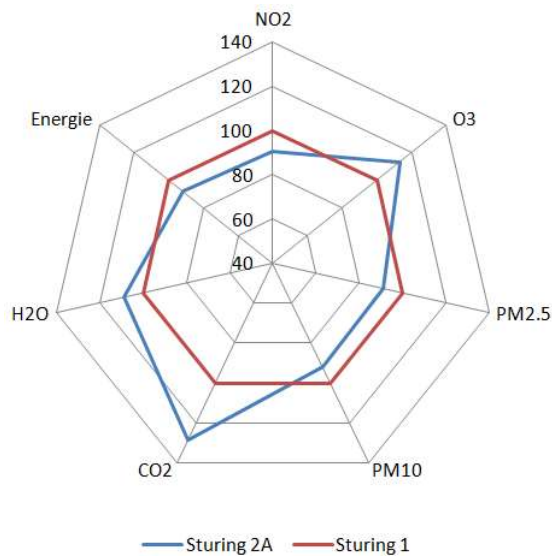
De locatie Antwerpen kwam al reeds uitgebreid aan bod gedurende de algemene besprekingen van de verschillende sturingen. Hier zal er nog een kort overzicht gegeven worden welke stoffen belangrijk zijn voor de sturingen en tot welke resultaten ze zullen leiden. De werking van sturing 2A zal voornamelijk gedomineerd worden door NO₂, gevolgd door een gelijk aandeel van ongeveer 25% voor PM_{2.5} en PM₁₀, zoals te zien is op het linkse taartdiagram van figuur 109.



Figuur 109: Belang van de buitenluchtpolluenten op sturing 2A (links) en op sturing 3 (rechts) [%], Antwerpen

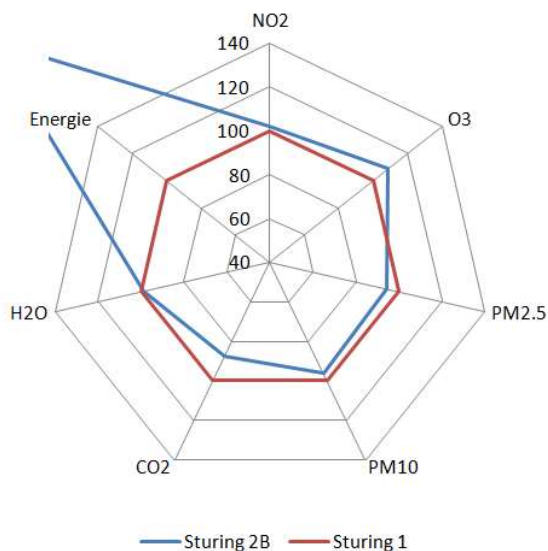
Het rechtse taartdiagram van figuur 109, dat het belang van de polluenten op de werking van sturing 3 weergeeft, maakt al snel duidelijk dat de sturing 3 in Antwerpen bijna hoofdzakelijk zal moeten rekening houden met het pollutent NO₂.

Overzicht resultaten



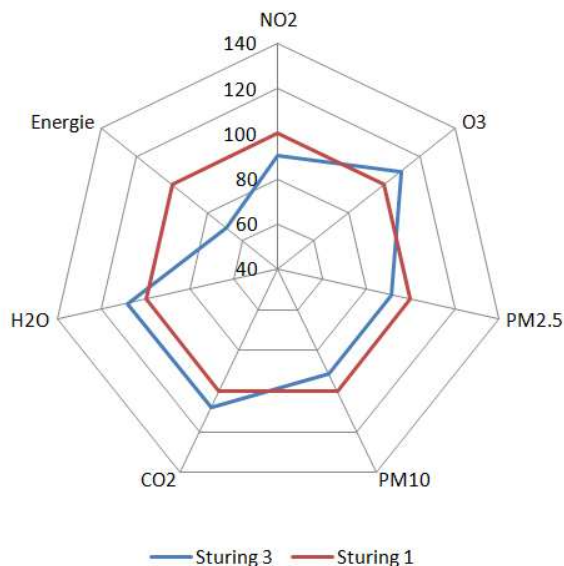
Figuur 110: Globaal overzicht [%], Sturing 2A, Antwerpen

Sturing 2A (figuur 110) scoort beter op het vlak van NO₂-, PM2.5- en PM10-waarden en ook op het energieverbruik in vergelijking met het traditionele systeem. Maar op het vlak van H₂O- en O₃-concentraties binnenshuis scoort deze sturing 2A slechter dan de traditionele sturing. Een opmerkelijk slecht resultaat wordt bekomen voor de CO₂-concentraties. Hierdoor kan het systeem niet als een optimaal ventilatiesysteem beschouwd worden voor deze locatie.



Figuur 111: Globaal overzicht [%], Sturing 2B, Antwerpen

Sturing 2B (figuur 111) zorgt voor een zeer hoog energieverbruik in combinatie met een verbeterd comfort. Maar op het vlak gezondheid zorgt het slechts voor een kleine daling in het aantal DALY's voor PM2.5 en PM10, maar leidt het ook tot een stijging in het aantal DALY's voor NO₂ en O₃. Hierdoor kan opnieuw besloten worden dat deze sturing tot geen goede resultaten leidt.

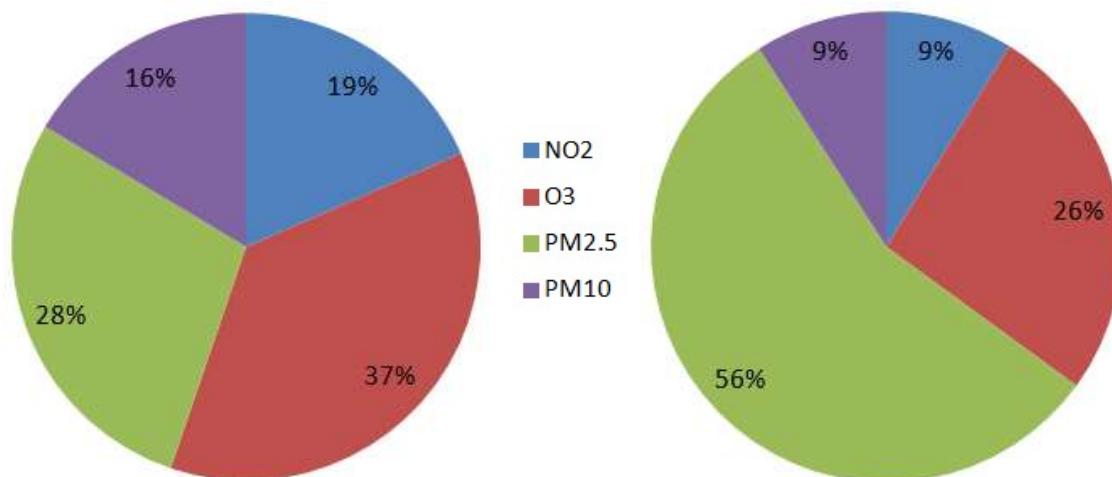


Figuur 112: Globaal overzicht [%], Sturing 3, Antwerpen

De derde sturing (figuur 112) zorgt voor een hoge reducering in het energieverbruik ten opzichte van de traditionele sturing. Dit lager energieverbruik gaat dan ook gepaard met hogere H₂O- en CO₂-concentraties. Op het vlak van gezondheid doet deze sturing het relatief goed met een verbetering voor NO₂, PM2.5 en PM10 en een achteruitgang voor O₃. Maar door het zeer kleine aantal DALY's dat aan O₃ wordt toegeschreven is dit verwaarloosbaar. Algemeen kan gesteld worden dat dit een relatief goede sturing is, indien er extra aandacht besteed wordt aan de comfortparameters.

7.2.2 Binkom

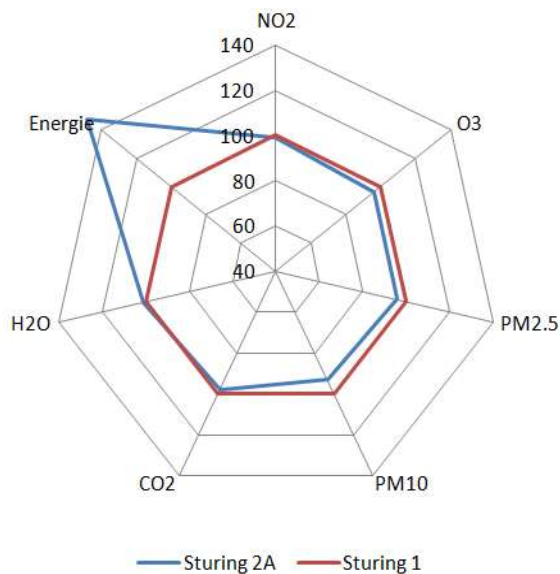
Op het linkse taartdiagram in figuur 113 is het procentueel belang aanwezig van elk pollutant op sturing 2A voor de locatie Binkom. Voornamelijk O₃ zal hierbij sterk doorwegen op deze sturing, maar ook de andere drie pollutanten hebben een belangrijk aandeel in zijn werking.



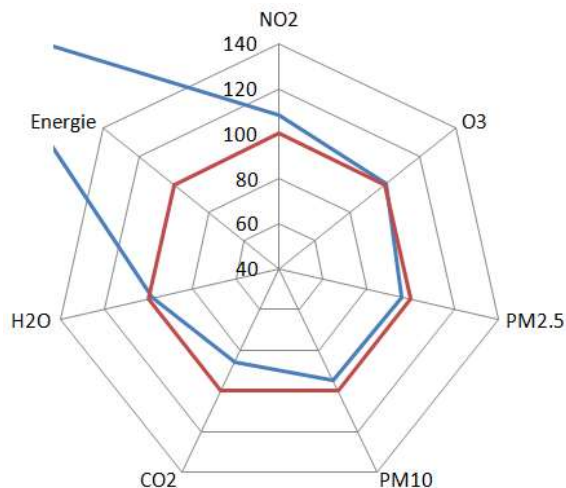
Figuur 113: Belang van de buitenluchtpolluenten op sturing 2A (links) en op sturing 3 (rechts) [%], Binkom

Het rechtse taartdiagram van figuur 113 toont het procentueel belang van de pollutanten op sturing 3 aan van de locatie Binkom. Hieruit kan voornamelijk besloten worden dat PM_{2.5} de belangrijkste invloedsfactor zal zijn waarmee de sturing 3 rekening dient te houden. Hiertegenover staan NO₂ en O₃ waarvan het belang beperkt blijft tot elk 9%.

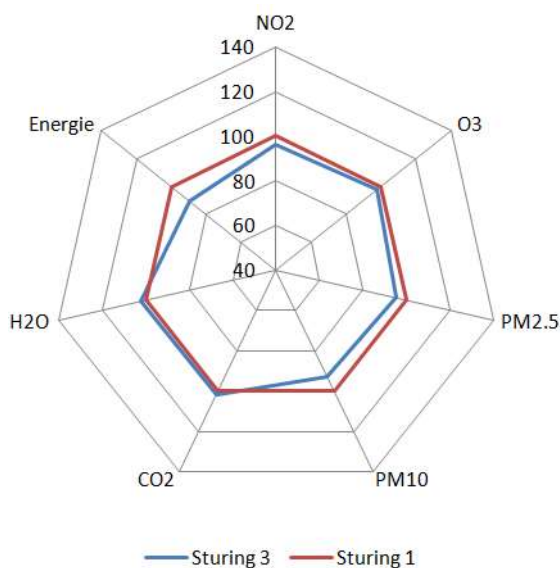
Overzicht resultaten



Figuur 114: Globaal overzicht [%], Sturing 2A, Binkom



Figuur 115: Globaal overzicht [%], Sturing 2B, Binkom



Figuur 116: Globaal overzicht [%], Sturing 3, Binkom

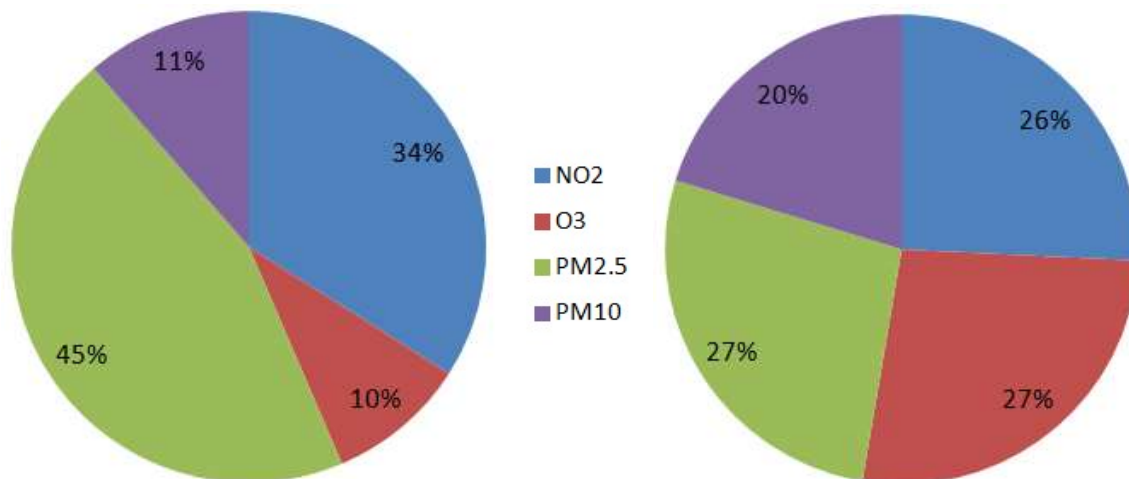
De sturing 2A (figuur 114) bij de locatie Binkom wordt gekenmerkt door één criteria waarop slecht gescoord wordt namelijk het energieverbruik. Overigens doet deze sturing het op alle vlakken van het gezondheidsaspect beter met een totale daling van het aantal DALY's tot 4%. De comfortparameters zijn vergelijkbaar met deze van sturing 1 maar vertonen wel een groter aantal pieken. Algemeen kan gesteld worden dat deze sturing, ondanks het hogere energieverbruik, goede resultaten boekt.

Sturing 2B (figuur 115) heeft, zoals al eerder vastgesteld werd, een hoog energieverbruik waardoor op het vlak van comfort goede resultaten bekomen worden. Op het vlak van gezondheid worden goede waardes bekomen voor PM2.5 en PM10, maar een slechtere waarde voor NO₂. Uit deze wisselvallende resultaten kan besloten worden dat deze sturing ongunstig is.

Sturing 3 (figuur 116) scoort op elke vlak, behalve comfort, beter dan de traditionele sturing. Het energieverbruik ligt veel lager en de gezondheidsrisico's dalen voor alle vier de buitenluchtpolluenten, wat leidt tot een verbetering van het aantal DALY's tot 5%. Het enige nadeel is de licht negatieve resultaten voor CO₂ en H₂O met hun bijhorende hoge pieken.

7.2.3 Brugge

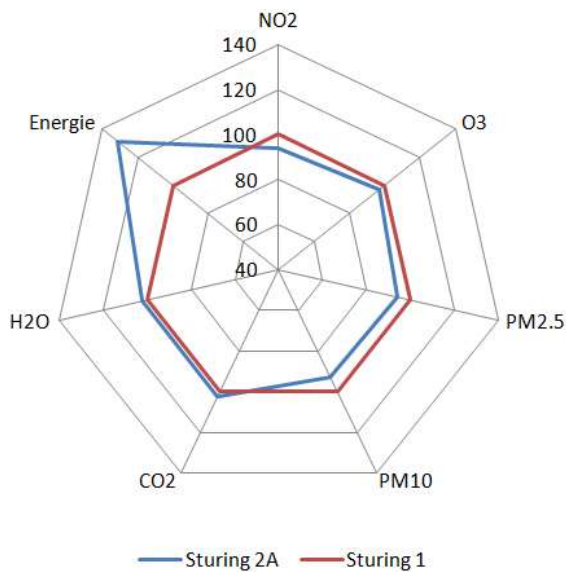
Om te kunnen inschatten welke stoffen belangrijk zijn voor de sturingen wordt hun aandeel voor elke sturing weergegeven in figuur 117. Op het taartdiagram aan de linkerkant wordt het aandeel op sturing 2A weergegeven. Hierop is te zien dat PM2.5 het belangrijkste pollutent zal vormen samen met NO₂. Het aandeel van PM10 en O₃ is relatief beperkt.



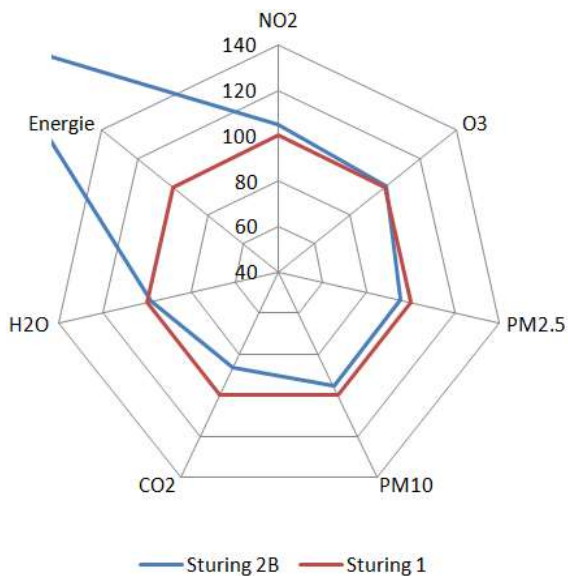
Figuur 117: Belang van de buitenluchtpolluenten op sturing 2A (links) en op sturing 3 (rechts) [%], Brugge

Aan de rechterzijde van figuur 117 is het taartdiagram aanwezig waarin het belang van elk pollutent op sturing 3 aanwezig is. Alle vier de polluenten hebben hierin ongeveer een aandeel van 25% waardoor hun invloed op deze derde sturing gelijk is.

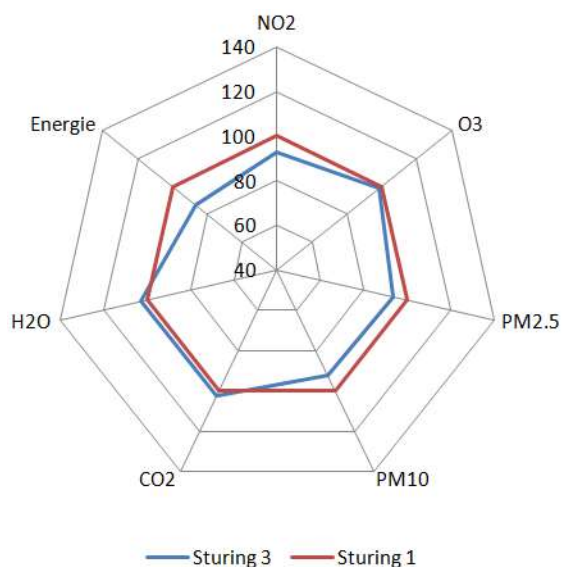
Overzicht resultaten



Figuur 118: Globaal overzicht [%], Sturing 2A, Brugge



Figuur 119: Globaal overzicht [%], Sturing 2B, Brugge



Figuur 120: Globaal overzicht [%], Sturing 3, Brugge

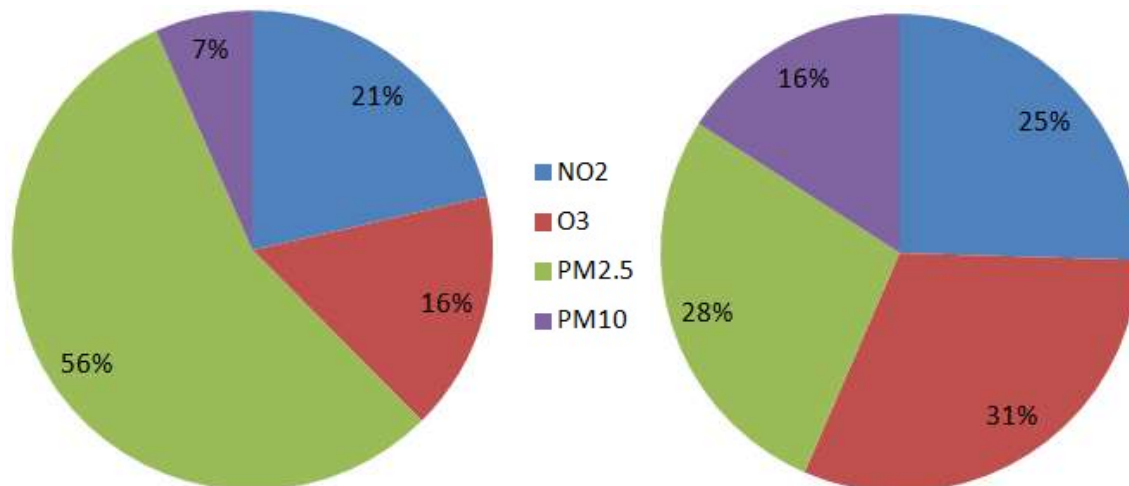
Sturing 2A (figuur 118) heeft zoals voorheen opnieuw een hoger energieverbruik dan de traditionele sturing, maar zorgt ook voor een verbetering van de gezondheid binnenshuis. Deze verbetering houdt een daling van het aantal DALY's in van 6%. Hiernaast is er een lichte stijging waar te nemen voor de comfortparameters waarbij hoge pieken waarneembaar zijn in CO₂- en H₂O-concentraties. Algemeen kan besloten worden dat deze sturing relatief gunstig is voor de locatie Brugge.

Sturing 2B (figuur 119) kent een zeer hoog gemiddeld ventilatiedebiet, waardoor ruimschoots beter gepresteerd wordt op het vlak van comfort. Op het vlak van gezondheid is er een lichte totale verbetering merkbaar maar hierbij stijgt wel het aantal DALY's voor NO₂. Deze sturing kan in Brugge in het algemeen beschreven worden als ongunstig.

Sturing 3 (figuur 120) zorgt voor een verbetering van de traditionele sturing op het vlak van gezondheid (6,5%) en energie (13%), maar niet op het vlak van comfort. Voor de comfortparameter liggen de gemiddelde CO₂- en H₂O-concentraties net iets hoger, maar het zijn vooral de hoge pieken in CO₂-concentraties die het grootste probleem vormen.

7.2.4 Hever

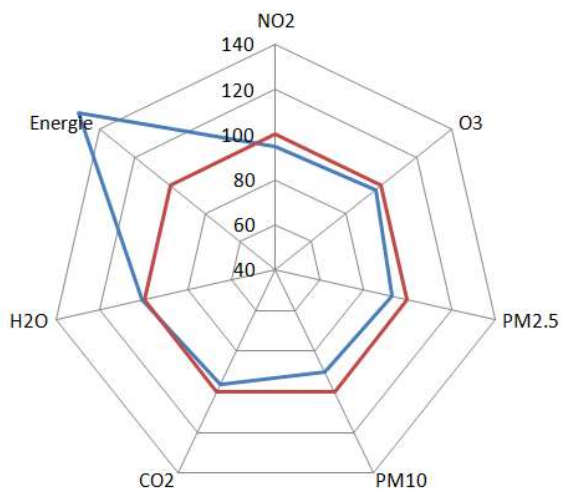
Voor de locatie Hever wordt de invloed van de verschillende polluenten op de sturingen 2A en 3 weergegeven in figuur 121, respectievelijk links en rechts. Hieruit valt af te lezen dat het voornamelijk PM2.5 is die bepalend zal zijn voor de werking van sturing 2A, gevolgd door O₃ en NO₂. De invloed van PM10 is relatief klein ten opzichte van de andere.



Figuur 121: Belang van de buitenluchtpolluenten op sturing 2A (links) en op sturing 3 (rechts) [%], Hever

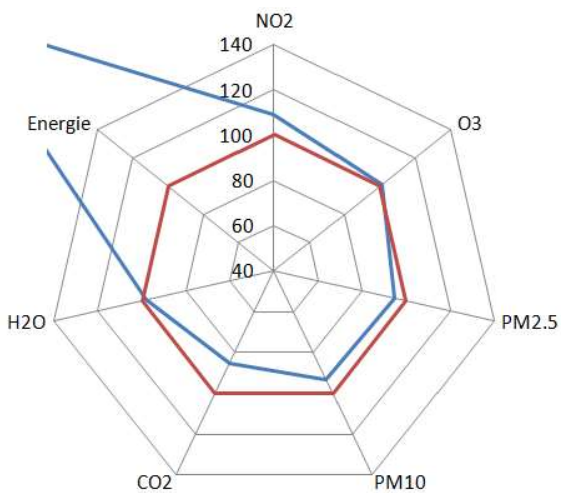
De sturing 3 van de locatie Hever wordt ongeveer gelijkmatig beïnvloed door alle vier de polluenten, met O₃ het pollutent met de grootste invloed.

Overzicht resultaten



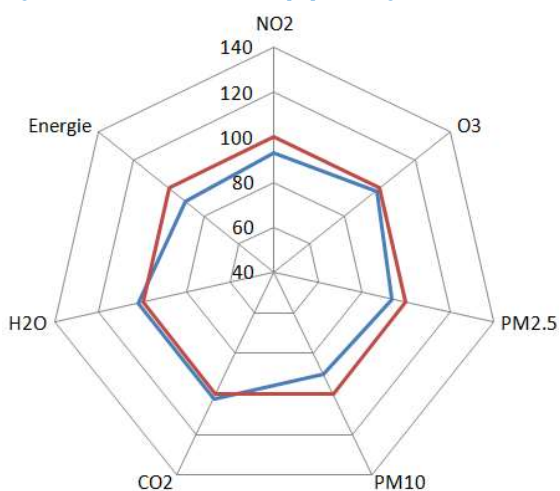
— Sturing 2A — Sturing 1
 Figuur 122: Globaal overzicht [%], Sturing 2A, Hever

Sturing 2A (figuur 122) zorgt voor een verbetering van het criteria gezondheid met 7%. Hiernaast zijn de comfortparameters vergelijkbaar met deze van de traditionele sturing, maar het energieverbruik van deze sturing is wel relatief hoog. Desondanks kan algemeen voor deze sturing besloten worden dat ze leidt tot goede resultaten voor de locatie Hever.



— Sturing 2B — Sturing 1
 Figuur 123: Globaal overzicht [%], Sturing 2B, Hever

Sturing 2B (figuur 123) kent, zoals gewoonlijk, een zeer hoog energieverbruik dat gepaard gaat met een verbetering op het vlak van comfort in het gebouw. Op het criteria gezondheid scoort deze sturing beter voor PM2.5 en PM10, maar opmerkelijk slechter voor NO₂. Hierdoor is deze sturing minder geschikt om te gebruiken in een ventilatiesysteem.

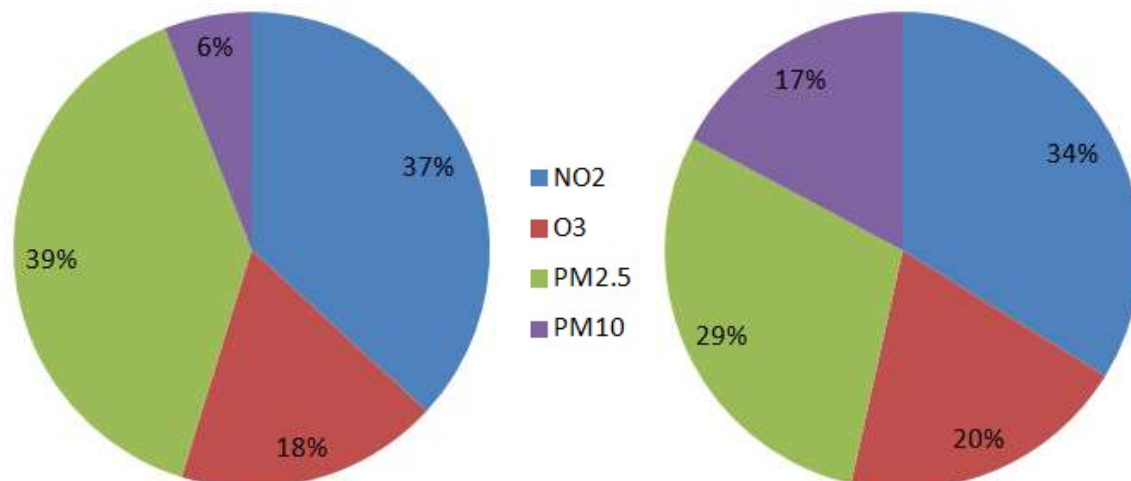


— Sturing 3 — Sturing 1
 Figuur 124: Globaal overzicht [%], Sturing 3, Hever

Sturing 3 (figuur 124) zorgt voor de locatie Hever voor goede resultaten. Het totale aantal DALY's daalt met 6,5 tot 7% en de energievraag daalt ook met 10%. Hiernaast kent deze sturing gelijkwaardig comfort met het comfort gecreëerd met een traditionele sturing. Enkel de hoge pieken in vooral CO₂-concentraties vormen nog een groot probleem.

7.2.5 Houthalen-Helchteren

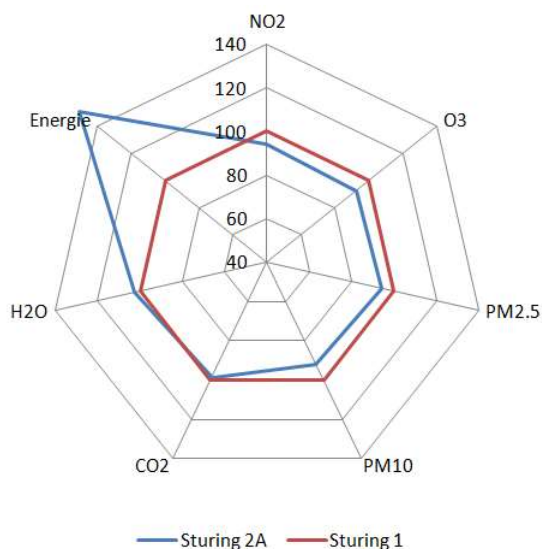
Figuur 125 geeft het aandeel van de verschillende polluenten in de werking van sturing 2A (links) en sturing 3 (rechts). De werking van sturing 2A wordt voornamelijk bepaald door twee polluenten PM2.5 en NO₂. Het belang van PM10 is slechts zeer gering.



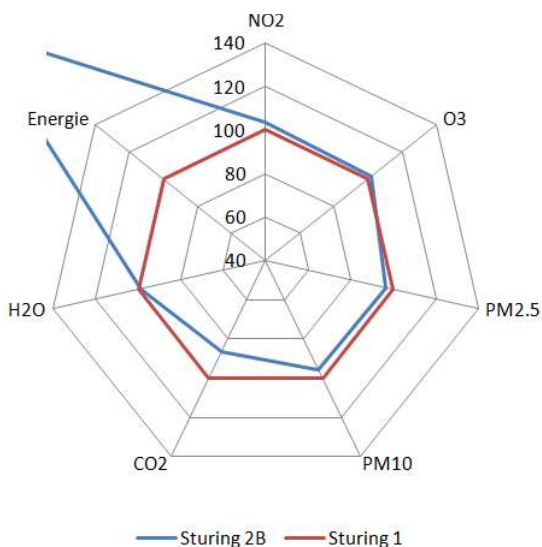
Figuur 125: Belang van de buitenluchtpolluenten op sturing 2A (links) en op sturing 3 (rechts) [%], Houthalen-Helchteren

Voor de sturing 3 zien we dat voornamelijk NO₂ bepalend is voor de werking van deze sturing, maar hiernaast hebben ook de andere polluenten een niet te verwaarlozen invloed.

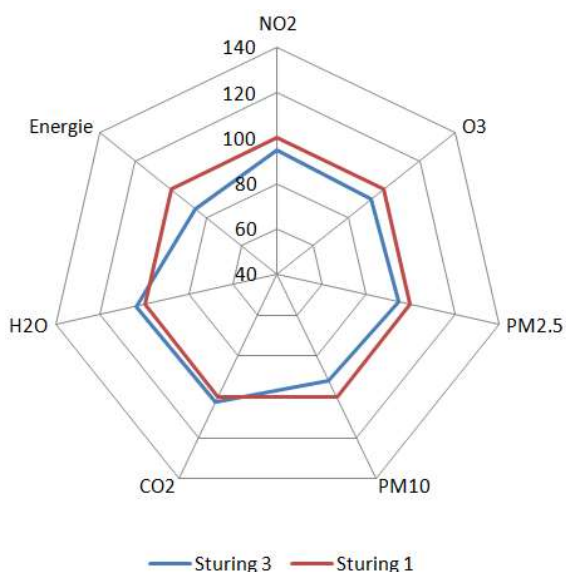
Overzicht resultaten



Figuur 126: Globaal overzicht [%], Sturing 2A, Houthalen-Helchteren



Figuur 127: Globaal overzicht [%], Sturing 2B, Houthalen-Helchteren



Figuur 128: Globaal overzicht [%], Sturing 3, Houthalen-Helchteren

Sturing 2A (figuur 126) zorgt op de locatie Houthalen-Helchteren voor een verbetering van het gezondheidsaspect voor elk pollutant, met een totale daling van het aantal DALY's van 6%. Vervolgens zijn de comfortparameters vergelijkbaar met deze van de traditionele sturing, met als enige verschil de hoge pieken in voornamelijk de CO₂-concentraties, maar ook in de H₂O-concentraties. Het enige nadeel aan dit model is het grote energieverbruik.

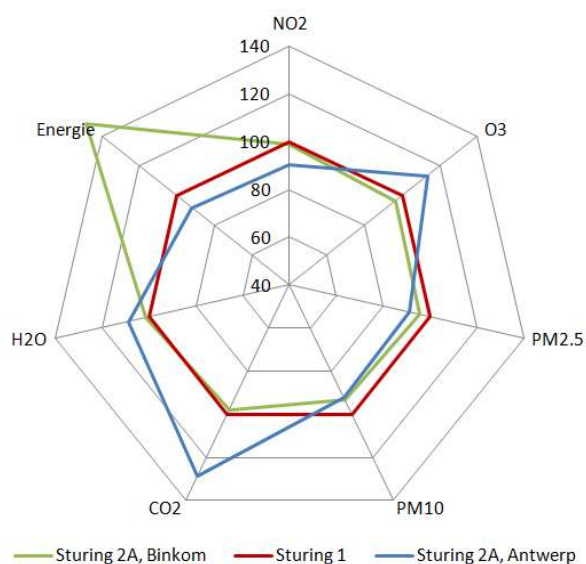
Sturing 2B (figuur 127) zorgt voor het evaluatiecriterium gezondheid slechts voor een kleine vooruitgang van 2,5%. Hiernaast heeft het een zeer hoog energieverbruik, waardoor het voor de comfortparameters goede resultaten kan voorleggen. Deze eerder negatieve resultaten geven aan dat deze sturing meer negatieve dan positieve effecten heeft.

Sturing 3 (figuur 128) kan voor alle evaluatiecriteria gelijkmatige of betere resultaten voorleggen dan de traditionele sturing. De grootste vooruitgang wordt geboekt op het energetische aspect, gevolg door gezondheid. Op dit laatste aspect zorgt het voor een daling van het aantal DALY's van 5,5%. Opnieuw zijn hoge pieken in de concentraties van CO₂ en H₂O aanwezig. Deze kunnen voor CO₂ oplopen tot 2700 ppm.

7.3 Vergelijking tussen verschillende locaties

In dit onderdeel zal er getracht worden om de invloed van de verschillende locaties op eenzelfde sturing in rekening te brengen. Dit gebeurt opnieuw door gebruik te maken van de globale overzichten met hierop de beschouwde evaluatiecriteria. Omdat een vergelijking van de vijf locaties met elkaar zou leiden tot weinig duidelijke resultaten, worden voor deze vergelijking de twee uiterste locaties geselecteerd. Uit de analyse in onderdeel 4 van dit verslag blijkt dat Antwerpen en Binkom twee locaties zijn die op alle vier de buitenluchtpolluenten sterk van elkaar verschillen. De locatie Antwerpen kent hoge concentraties aan NO₂, PM_{2.5} en PM₁₀ maar lage concentraties aan O₃. Hiertegenover staat de locatie Binkom met lage concentraties aan NO₂, PM_{2.5} en PM₁₀ maar hoge concentraties O₃. Er wordt vooral aandacht besteed aan de polluenten NO₂ en O₃ omdat de concentraties bij deze locaties veel verder uit elkaar liggen dan bij PM_{2.5} en PM₁₀ het geval is. Er dient hierbij wel opgemerkt te worden dat in de gebruikte figuren de referentie voor de vier buitenluchtparameters verschillend is voor elke locatie.

Sturing gebaseerd op de vier buitenluchtpolluenten (Sturing 2A)

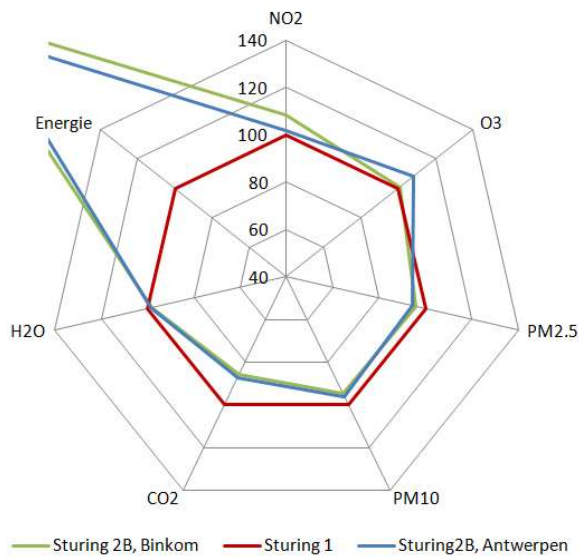


Figuur 129: Globaal overzicht [%], Sturing 2A, Antwerpen en Binkom

De resultaten van de locaties Antwerpen en Binkom verschillen op bijna alle vlakken sterk van elkaar voor deze sturing 2A (figuur 129). Als eerste opvallende element is er het hogere energieverbruik bij de locatie Binkom. Dit is te wijten aan de betere luchtkwaliteit. Hierdoor liggen de concentraties van de buitenluchtpolluenten voornamelijk onder de richt- en interventiewaardes, waardoor meer aan het nominaal debiet geventileerd wordt. Dit hoge ventilatiedebiet heeft dan ook tot gevolg dat de comfortparameters veel lager liggen dan bij de locatie Antwerpen het geval is. Wat betreft het gezondheidsaspect, hoe hoger de concentratie in de buitenlucht, hoe groter het positieve effect is

van de sturing op het aantal DALY's. Het aantal DALY's van NO₂ daalt sterk voor locatie Antwerpen, met hoge buitenconcentraties, voor de locatie Binkom blijven deze ongewijzigd. Het aantal DALY's van O₃ daalt voor de locatie Binkom, met hoge concentraties O₃, terwijl een lichte stijging wordt waargenomen voor de locatie Antwerpen. Het effect van de sturing bij O₃ is minder groot dan bij NO₂ omdat de richt- en interventiewaardes relatief hoger gelegen zijn in vergelijking met de gemiddelde buitenconcentratie O₃ dan dit bij NO₂ het geval is. De reden voor de stijging in het aantal DALY's van O₃ werd al reeds besproken in onderdeel 7.1.1 maar is niet zo groot zoals figuur 129 doet vermoeden. Deze bedraagt slechts enkele 0,01 DALY's.

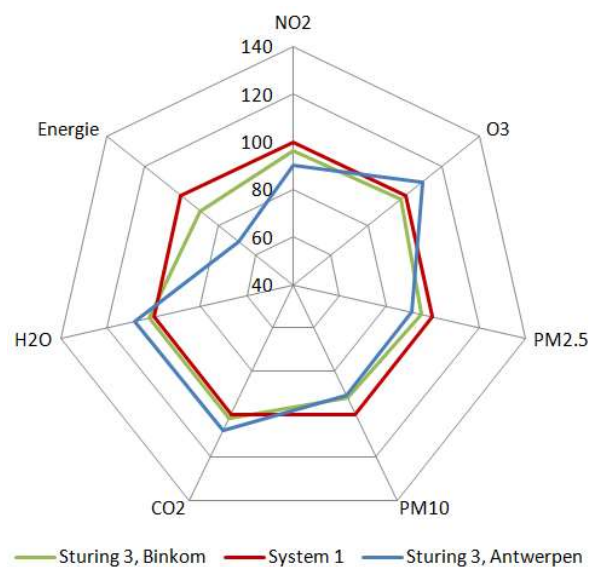
Sturing gebaseerd op PM2.5 (Sturing 2B)



Figuur 130: Globaal overzicht [%], Sturing 2B, Antwerpen en Binkom

waargenomen voor Antwerpen. Dit is een opmerkelijk fenomeen omdat hier zou verwacht worden dat, bij een systeem dat uitgaat van een nominaal ventilatie-debiet, het aantal DALY's sterk zou stijgen voor het pollutanten dat in de buitenlucht de hoogste concentraties heeft. Dit is het pollutant NO_2 voor Antwerpen en het pollutant O_3 voor Binkom. Wat de reden hiervoor is, is moeilijk te verklaren.

Traditionele sturing + extra controle buitenluchtpolluenten (Sturing 3)



Figuur 131: Globaal overzicht [%], Sturing 3, Antwerpen en Binkom

hogere buitenconcentraties van dit pollutant. De oorzaak de negatieve resultaten voor ozon werden al reeds besproken in het onderdeel 7.1.4, maar bedraagt slechts enkele 0,01 DALY's.

Bij deze sturing zijn de resultaten van de locaties Binkom en Antwerpen op verschillende vlakken gelijkaardig. Dit is te wijten aan het feit dat voor $\text{PM}_{2.5}$, hoewel beide locaties de twee uitersten zijn van alle locaties, de verschillen niet enorm groot zijn. Op figuur 130 is te zien dat de sturing bij beide locaties leidt tot een zeer hoog energieverbruik waardoor ook de comfortparameters bijna identiek zijn. Hiernaast scoren de sturinge vrijwel gelijkaardig wat betreft de verbetering in het aantal DALY's bij PM_{10} en $\text{PM}_{2.5}$. Het verschil tussen beide locaties is aanwezig bij de procentuele stijgingen van het aantal DALY's bij NO_2 en O_3 . Deze is voor het pollutant O_3 groter voor Antwerpen en kleiner voor Binkom. Het omgekeerde effect wordt

De derde sturing toegepast bij de locaties Antwerpen en Binkom levert de resultaten in figuur 131 op. Hierbij is een duidelijk verschil aanwezig in het energieverbruik. De locatie Antwerpen heeft een veel lager energieverbruik dan de locatie Binkom. Dit is te wijten aan het feit dat de luchtkwaliteit slechter is in de stad Antwerpen waardoor het systeem veel meer functioneert op het minimale debiet. Deze lagere ventilatie-debieten leiden dan ook tot een grotere achteruitgang op het vlak van comfort dan bij de locatie Binkom. Op het vlak van gezondheid is opnieuw het principe van toepassing waarbij de grootste procentuele daling voor het aantal DALY's van een pollutant verwezenlijkt wordt bij

7.4 Samenvatting resultaten locaties en sturingen

In dit onderdeel wordt een samengevat beeld geschept over de resultaten bekomen van de verschillende sturingen bij de verschillende locaties. In tabel 33 werden alle individueel besproken resultaten samengebracht in 1 tabel. Naast deze resultaten wordt ook het percentage van toename of afname weergegeven ten opzichte van het traditionele vraaggestuurde ventilatiesysteem. Als deze tabel van dichtbij bestudeerd wordt kunnen verschillende algemene vaststelling geformuleerd worden.

Als eerste kan voor elke sturing in het algemeen opgemerkt worden dat de daling van het aantal DALY's voor een welbepaald pollutant van de buitenlucht evenredig is met de stijging van de buitenluchtconcentraties van dat pollutant, op voorwaarde dat de sturing rekening houdt met dit pollutant.

De tweede algemene conclusie voor de drie sturingen is het feit dat het energieverbruik van de sturingen toeneemt naarmate de buitenluchtkwaliteit stijgt. Dit reden hiervoor is omdat er meer geventileerd wordt wanneer de buitenluchtkwaliteit stijgt.

Uit de gemiddelde resultaten onderaan tabel 33 kan vervolgens opgemerkt worden dat de sturing 2B in vergelijking met sturing 2A en 3 algemeen minder goed presteert. Deze sturing, die zich enkel en alleen maar baseert op de PM_{2.5}-concentraties in de buitenlucht, ventileert bij elke locatie aan zeer hoge ventilatiedebieten waardoor een hoog energieverbruik wordt bekomen. Dit hoge ventilatiedebiet zorgt wel voor een grotere daling van de gemiddelde CO₂- en H₂O-concentraties, maar omdat de gemiddelde waarden bij de andere sturingen niet boven de kritische waarde van 950 of 1200 ppm komen weegt deze factor maar weinig door in de totale analyse. Wanneer specifiek naar de vier buitenluchtpolluenten gekeken wordt kan voor deze sturing enkel dalingen voor PM_{2.5} en meestal ook PM₁₀ waargenomen worden. Voor de andere twee componenten kan in sommige gevallen zelfs een stijging waargenomen worden in het aantal DALY's.

Als laatste conclusie, die kan opgemaakt worden uit de gegevens in tabel 33, is het feit dat sturing 2A en sturing 3 sterk vergelijkbare resultaten opleveren, voornamelijk op het evaluatiecriteria gezondheid. De resultaten voor beide sturingen zijn nagenoeg identiek. Er is wel een klein verschil aanwezig op het vlak van de comfortcriteria. Beide leiden hierbij tot hogere concentraties aan CO₂ en H₂O dan in het traditionele systeem, maar voor sturing 2 zijn deze gemiddeld iets hoger dan voor sturing 3. Het grote verschil in beide sturingen zit voornamelijk in het energieverbruik. Sturing 2A zorgt over het algemeen voor een hoger energieverbruik dan sturing 1 van gemiddeld 35%. Sturing 3 zorgt voor een lager energieverbruik van -15% ten opzichte van sturing 1. Dit leidt tot een totaal verschil tussen beide van 50%, een waarde die eventueel de doorslag kan geven in de keuze van de optimale sturing uit dit onderzoek.

Uit de bovenstaande twee laatste vaststellingen kan besloten worden dat sturing 3 de meest ideale sturing is van de drie onderzochte sturingen. Maar deze sturing heeft nog een belangrijk nadeel, namelijk de hoge pieken in CO₂-concentraties. Om ervoor te zorgen dat deze derde sturing eventueel later kan ingezet worden in de praktijk is het vereist om dit probleem te verhelpen. Een oplossing voor deze tekortkoming samen met een onderzoek naar de gevolgen van deze wijziging wordt in hoofdstuk 7 van dit verslag uitgewerkt.

Tabel 33: Samenvatting resultaten sturingen en locaties

		Sturing 1	Sturing 2A	Sturing 2B	Sturing 3	St. 2A %	St. 2B %	St. 3 %
Antwerpen	NO2	98.59	89.19	100.58	89.04	-10	2	-10
	O3	0.41	0.47	0.45	0.45	15	10	10
	PM2.5	419.59	382.27	395.62	382.25	-9	-6	-9
	PM10	27.12	24.96	26.05	24.79	-8	-4	-9
	CO2	695	895	607	749	29	-13	8
	H2O	47	51	47	51	9	0	9
	Energie	100	92	202	70	-8	102	-30
Binkom	NO2	11.3	11.16	12.24	11.86	-1	8	5
	O3	1.99	1.91	2.01	1.95	-4	1	-2
	PM2.5	321.44	306.85	307.49	305.98	-5	-4	-5
	PM10	11.86	11.05	11.22	11.99	-7	-5	1
	CO2	695	680	595	710	-2	-14	2
	H2O	47	48	46	48	2	-2	2
	Energie	100	148	217	90	48	117	-10
Brugge	NO2	30.34	28.48	31.8	28.2	-6	5	-7
	O3	1.8	1.75	1.81	1.77	-3	1	-2
	PM2.5	389.62	365.41	371.32	364.26	-6	-5	-7
	PM10	20.04	18.62	19.17	18.55	-7	-4	-7
	CO2	695	712	603	711	2	-13	2
	H2O	47	48	46	49	2	-2	4
	Energie	100	131	206	87	31	106	-13
Hever	NO2	19.46	18.39	21.27	18.13	-5	9	-7
	O3	1.52	1.47	1.54	1.49	-3	1	-2
	PM2.5	308.49	287.34	292.5	287.95	-7	-5	-7
	PM10	10.6	9.56	9.87	9.59	-10	-7	-10
	CO2	695	672	594	710	-3	-15	2
	H2O	47	47	46	48	0	-2	2
	Energie	100	152	220	90	52	120	-10
Houthalen-Helchteren	NO2	37.39	35.29	38.66	35.44	-6	3	-5
	O3	1.16	1.07	1.18	1.08	-8	2	-7
	PM2.5	356.44	335.08	343.68	336.42	-6	-4	-6
	PM10	13.18	12.12	12.64	12.12	-8	-4	-8
	CO2	695	685	601	713	-1	-14	3
	H2O	47	48	47	49	2	0	4
	Energie	100	151	210	86	51	110	-14
Totaal					NO2	-6	6	-5
					O3	-1	3	-1
					PM2.5	-6	-5	-6
					PM10	-8	-5	-7
					CO2	5	-14	3
					H2O	3	-1	4
					Energie	35	111	-15

7.5 Gebruik filters

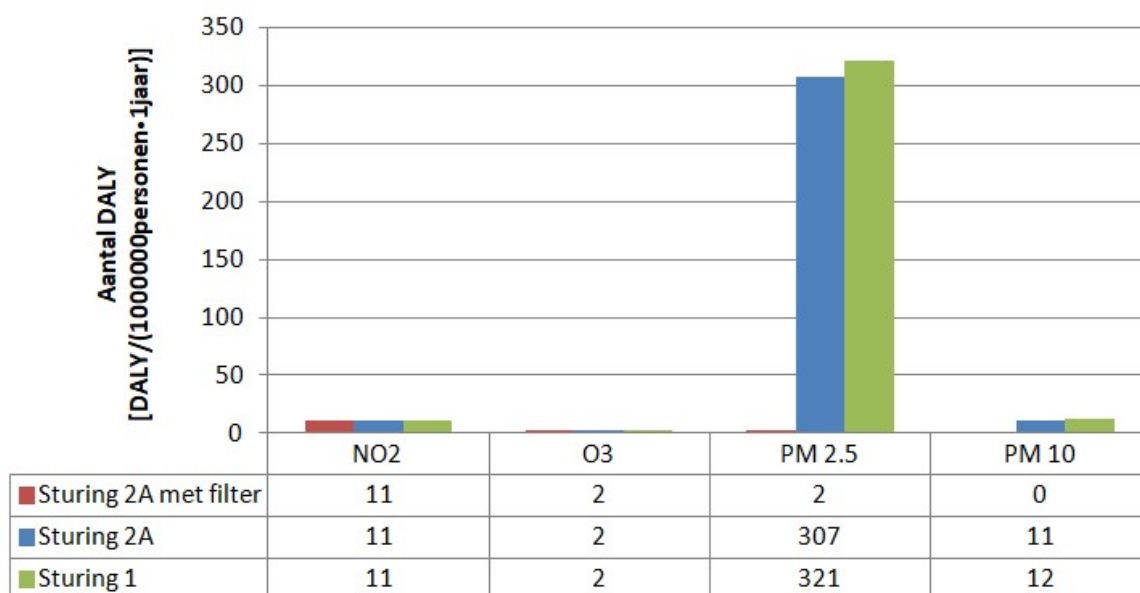
In contam is er de mogelijkheid om filters toe te passen in de aanvoerkanalen van het ventilatiesysteem. De hoofdfunctie van deze filters is de hoeveelheid deeltjes PM2.5 en PM10 in de verse aangevoerde lucht sterk te reduceren. Hierdoor kunnen de richt- en interventiewaardes sterk verhoogd worden voor de stoffen PM2.5 en PM10. De invloed van deze verhoogde waardes worden hieronder besproken voor sturing 2A en Sturing 3. Sturing 2B wordt hier achterwege gelaten omdat deze sturing enkel en alleen stuurt op basis van PM2.5, waarvan de richt- en interventiewaardes zondanig hoog zouden komen te liggen door het gebruik van de filters waardoor ze bijna identiek wordt aan een sturing met nominaal debiet. De onderstaande resultaten worden besproken voor de locatie Binkom omdat bij deze locatie het belang van PM2.5 en PM10 het grootst zijn op beide sturingen (figuur 113). De conclusies bij deze locatie kunnen veralgemeend worden voor de verschillende andere locaties.

7.5.1 Sturing 2A zonder filter ⇔ Sturing 2A met filter

Sturing 2A baseert zich voor de werking van het ventilatiesysteem enkel en alleen maar op de vier buitenluchtpolluenten. Hierbij heerst een recht evenredig verband tussen enerzijds het ventilatiedebiet en de buitenluchtkwaliteit.

Gezondheid

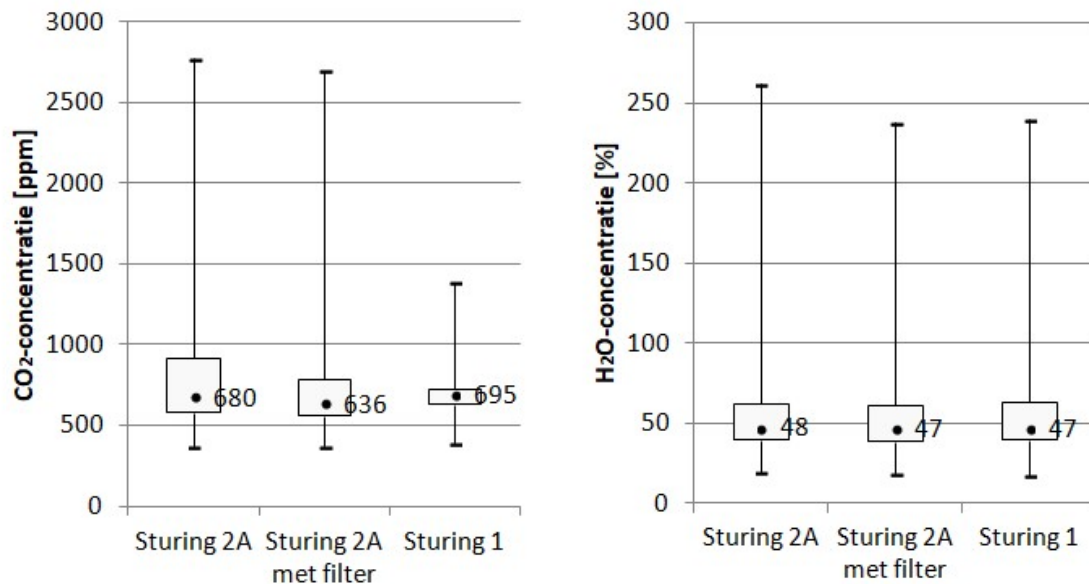
Op het vlak van gezondheid (figuur 132) zorgt het gebruik van een filter bij de sturing die zich enkel en alleen baseert op de buitenluchtconcentraties van de vier buitenluchtpolluenten voor geen wijzigingen in vergelijking met deze sturing zonder filter, buiten de sterke dalingen voor PM2.5 en PM10.



Figuur 132: Beoordeling gezondheid [DALY/(100000personen•1jaar)], Sturing 2A met filter en zonder filter, Binkom

Comfort

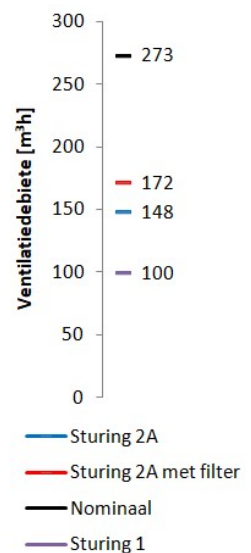
Voor beide comfortparameters (figuur 133) is een lichte daling waar te nemen in de gemiddelde waarden en in die maximale waarde. Overigens valt op dat de gemiddelde concentratie aan CO₂ lager ligt dat dit het geval is bij de traditionele sturing



Figuur 133: Boxplot CO₂-concentraties [ppm] (Links) en H₂O-concentraties [%] (Rechts), Sturing 2A met en zonder filter, Binkom

Energie

Het energieverbruik van de verschillende sturingen wordt in figuur 134 voorgesteld. Hieruit blijkt dat het plaatsen van een filter bij deze tweede sturing aanleiding geeft tot een hoger energieverbruik. Hiernaast zal ook het energieverlies door de filter zelf zorgen voor het verhogen van het algemene energieverbruik.



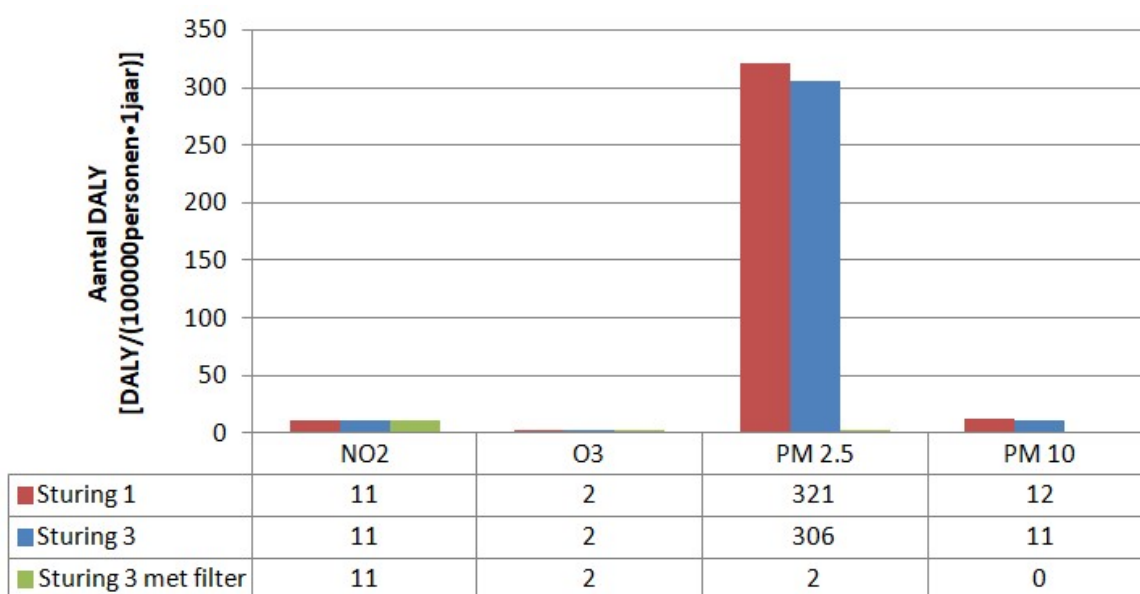
Figuur 134: Energieverbruik [m³/h], Sturing met en zonder filter, Binkom

7.5.2 Sturing 3 zonder filter ⇔ Sturing 3 met filter

Sturing 3 is de sturing die zicht baseert op de traditionele sturing maar enkel en alleen als de buitenluchtkwaliteit goed is. Als deze slecht wordt, wordt er overgegaan op het minimale ventilatiedebiet.

Gezondheid

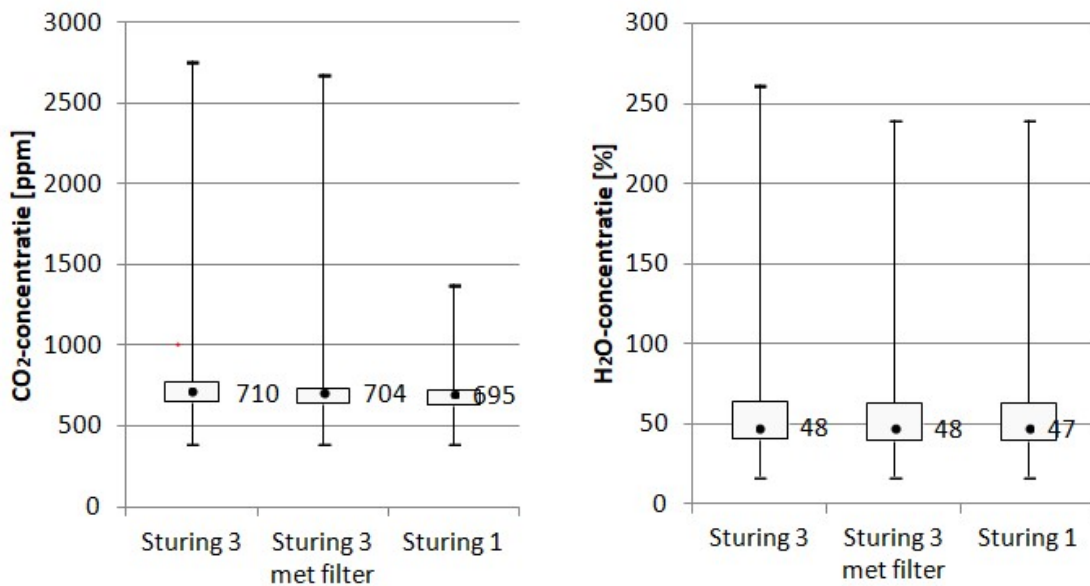
Het aantal DALY's van elk buitenluchtpolluent wordt weergegeven in figuur 135 van de traditionele sturing met een controle van de buitenluchtkwaliteit zonder filter en met filter samen met de gewone traditionele sturing. Hierin valt eerst en vooral op dat het aantal DALY's van PM2.5 en PM10 sterk gereduceerd wordt, maar naast deze reductie zijn er geen wijzigingen waar te nemen tussen de verschillende sturingen.



Figuur 135: Beoordeling gezondheid [DALY/(100000personen•1jaar)], Sturing 3 met filter en zonder filter, Binkom

Comfort

De boxplots van de traditionele sturing samen met de twee andere onderzochte sturingen 3 zijn weergegeven in figuur 136. De wijzigingen die zich voordoen tussen sturing 3 zonder filter en sturing 3 met filter zijn zeer klein. Er is een kleine daling op te merken van de gemiddelde waardes samen met een lichte daling van de maximale concentraties.

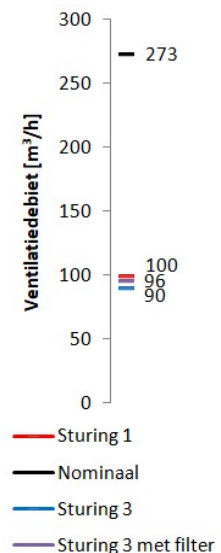


Figuur 136: Boxplot CO₂-concentraties [ppm] (Links) en H₂O-concentraties [%] (Rechts), Sturing 3 met en zonder filter, Binkom

Energie

In figuur 137 zijn de energievereisten van de verschillende sturingen voorgesteld. Hierin is te zien dat de derde sturing met filter zorgt voor een groter energieverbruik zonder dat hierbij de energieverliezen van de filter zelf in rekening gebracht zijn.

Figuur 137: Energieverbruik [m³/h], Sturing 3 met en zonder filter, Binkom



7.5.3 Algemene vaststellingen

Uit voorgaande analyses van zowel sturing 2A als sturing 3 kan besloten worden dat het toevoegen van filters aan de sturingen, waarbij rekening gehouden wordt met de buitenluchtkwaliteit, naast een sterke daling van het aantal DALY's ten gevolge van PM_{2.5} en PM₁₀, weinig veranderingen met zich meebrengen. Als deze sturingen met filters vergeleken worden met de oorspronkelijk traditionele sturingen zonder filters zorgen ze voor een sterk verminderd comfort door middel van hoge pieken in de concentraties van voornamelijk CO₂, samen met hoogstwaarschijnlijk een hoger energieverbruik door toedoen van de verliezen door de filter zelf.

8 OPTIMALISEREN STURINGEN

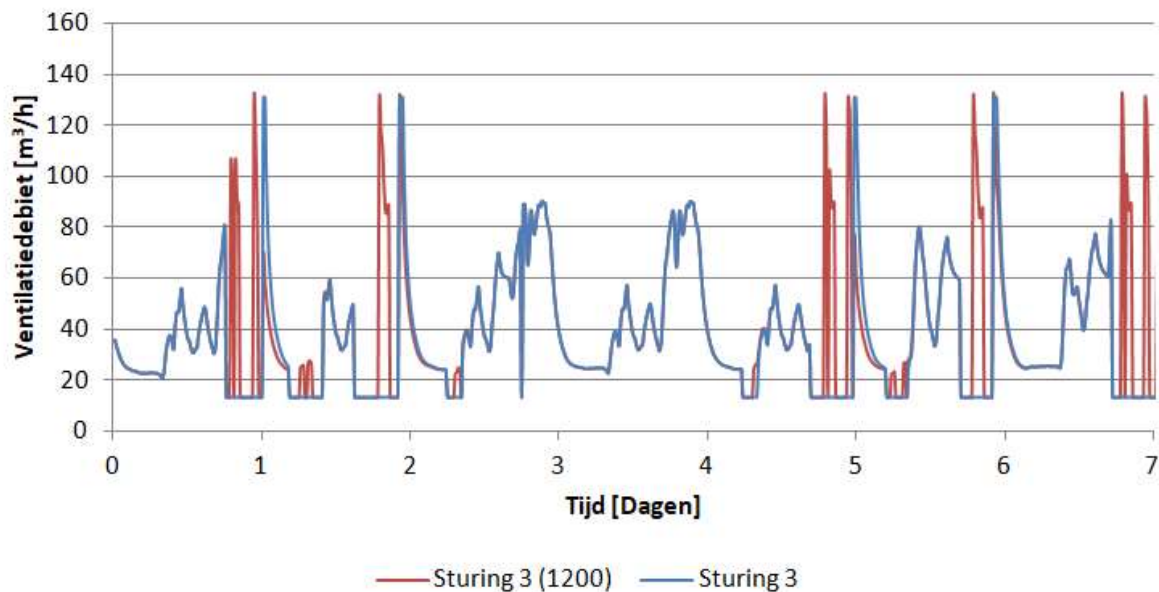
Uit voorgaand onderzoek bleek dat alle drie de gecreëerde sturingen aanleidingen gaven tot zeer hoge pieken in de CO₂-concentraties. Deze hogere pieken zijn ook het geval voor de H₂O-concentraties maar omdat deze concentraties al reeds in de traditionele sturingen waarden bereiken hoger dan 100% relatieve vochtigheid is het niet mogelijk om dit probleem bij de andere sturingen op te lossen. De pieken in CO₂-concentraties kunnen oplopen tot 2700ppm. Deze hoge concentraties geven aanleidingen tot verschillende gezondheidsklachten zoals hoofdpijn, slaperigheid en duizeligheid. Om deze hoge concentraties te vermijden kunnen de sturingen uitgerust worden met een extra controle op de CO₂-concentraties. Hierbij wordt de grenswaarde van 950ppm gebruikt, de waarde die al reeds in de sturingen aanwezig is maar die genegeerd werd omdat de buitenluchtkwaliteit voorrang kreeg. Vervolgens wordt ook een hogere limietwaarde toegepast, namelijk 1200ppm. Deze waarde is aanwezig in het arbeidsreglement en is de limietwaarde voor blootstelling gedurende een korte periode. Hieronder zal kort geschetst worden hoe dit in contam verwezenlijkt zal worden, gevolgd door een bespreking van de gevolgen van deze extra controle op CO₂. De limietwaarde zal enkel en alleen maar toegepast worden op de derde sturing, de traditionele sturing met een extra controle van de buitenluchtconcentraties, omdat deze de gunstige sturing was uit de voorgaande analyses. Hieronder worden enkel de resultaten voor de locatie Antwerpen besproken, omdat de bemerkingen identiek zullen zijn bij de andere locaties. Opnieuw zullen we deze derde sturing trachten te beoordelen op basis van de drie vooropgestelde evaluatiecriteria.

8.1 Optimalisering uitgewerkt in contam

De optimalisering in contam werd verwezenlijkt door gebruik te maken van twee nieuwe componenten. De eerste component staat los van de sturing en heeft als functie om op elk moment de maximale CO₂-concentratie in de woning te bepalen. Deze maximale waarde wordt gebruikt in de tweede component. Deze tweede component wordt wel in de sturing 3 ingevoegd net na de controle van de buitenluchtconcentraties. In deze tweede component wordt gecontroleerd of de maximale CO₂-concentratie, verkregen uit de eerste component, hoger is dan de vooropgestelde limietwaarde van 950 of 1200 ppm. Indien dit niet het geval is veranderd er niets aan de sturing. Indien dit wel het geval is wordt afgestapt van sturing 3 en teruggekeerd naar het traditionele systeem voor een korte periode tot de maximale CO₂-concentratie opnieuw lager is dan de limietwaarde.

8.2 Resultaten optimalisering

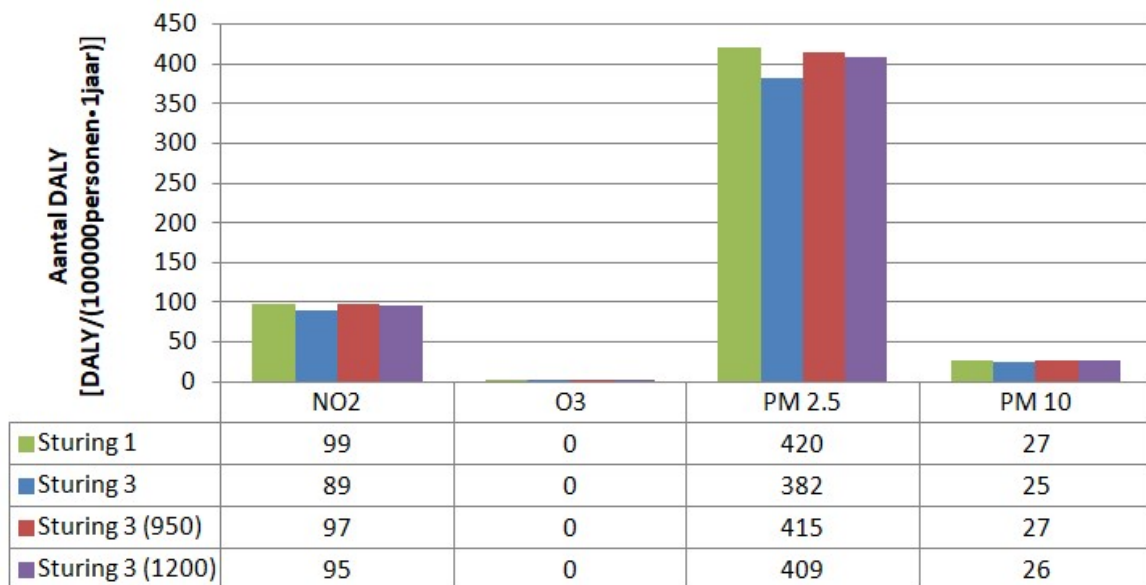
Het gebruik van de limietwaarden voor CO₂ hebben niet enkel en alleen een invloed op de CO₂-concentraties maar ook op de verschillende andere aspecten. De totale invloed van deze ingreep op de verschillende evaluatiecriteria worden in dit onderdeel toegelicht. Vooraleerst wordt er gekeken naar het verloop van de ventilatiedebieten (figuur 138). Deze ventilatiedebieten volgen hetzelfde verloop als de derde sturing, maar gedurende periodes van minimaal debiet stijgt het ventilatiedebiet explosief naar hoge waarden, in de meeste gevallen tot aan het nominaal debiet. Deze plotselinge wijzigingen in het ventilatiedebiet zijn te wijten aan het overschrijden van de maximale CO₂-concentratie in de woning.



Figuur 138: Weekverloop ventilatiedebiet Sturing 3 (1200) [m³/h], Living, Antwerpen

Gezondheid

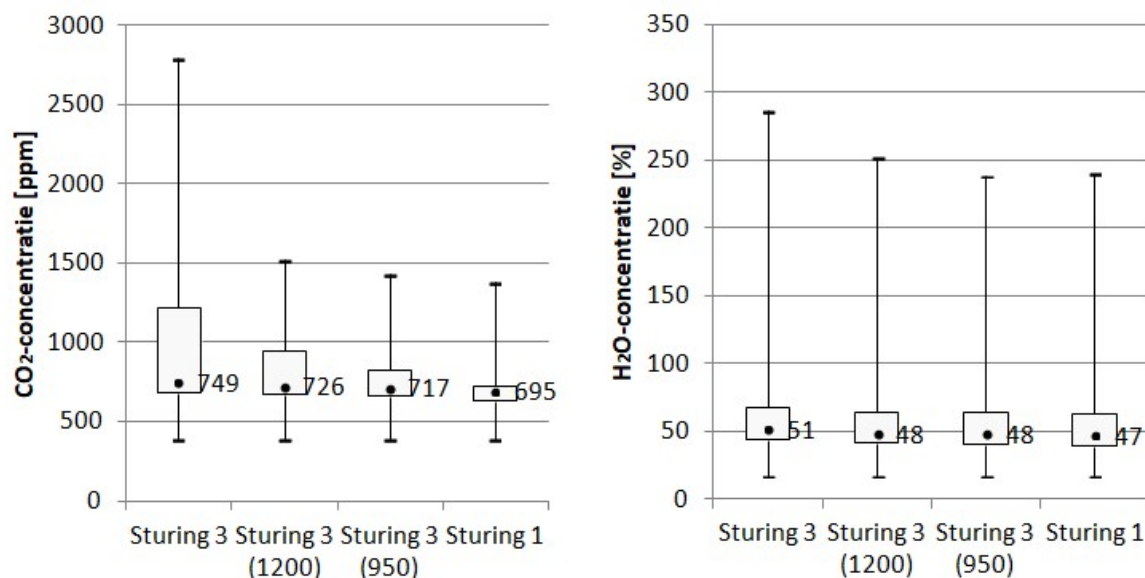
Het invoegen van een maximale CO₂-concentratie heeft een belangrijke invloed op het gezondheidsaspect. Zo is te zien op figuur 138 dat de sturingen met een beperking op de CO₂-concentraties gelegen zijn tussen de twee uitersten, namelijk de traditionele sturing en de sturing met enkel en alleen een controle van de buitenluchtkwaliteit. Hiernaast stijgt het aantal DALY's naarmate de limietwaarde voor CO₂ opgetrokken wordt. Het plaatsen van de limietwaarde lijdt dus tot een achteruitgang op het vlak van gezondheid.



Figuur 139: Beoordeling gezondheid [DALY], Sturing 3 (1200) en Sturing 3 (950), Antwerpen

Comfort

De comfortparameters van de verschillende sturingen zijn weergegeven in figuur 140. Hierop is te zien dat het gebruik van de limietwaarde ervoor zorgt dat de hoge piekwaarden in CO₂-concentraties sterk gereduceerd worden tot 1500ppm en 1450ppm voor respectievelijk een limietwaarde van 1200ppm en 950ppm. Het feit dat de maximale waarden hoger liggen dan de limietwaarden is te wijten aan de tragere reactiesnelheid van het systeem. Als nu gekeken wordt naar de H₂O-concentraties zijn ook hier dalingen waar te nemen, maar dit in mindere mate.

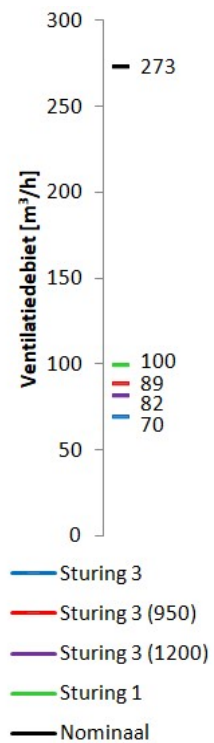


Figuur 140: Boxplot CO₂-concentraties [ppm] (Links) en H₂O-concentraties [%] (Rechts), Sturing 3 (1200) en Sturing 3 (950), Antwerpen

Energie

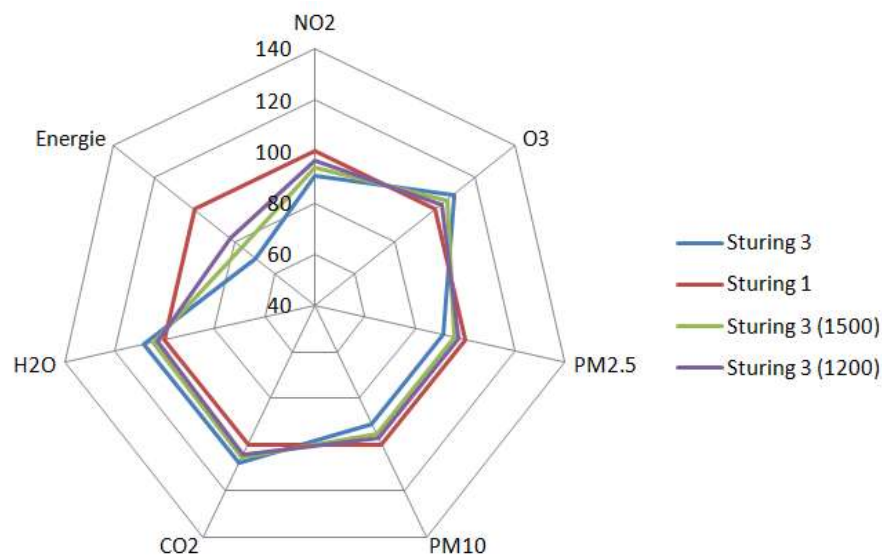
Op figuur 141 wordt het energieverbruik van de verschillende sturingen weergegeven. De twee sturingen met een limietwaarde voor CO₂ hebben een energieverbruik dat tussen de twee basissturingen ligt, met hogere waarden voor het energieverbruik voor een dalende limietwaarde voor CO₂.

Figuur 141: Energieverbruik [m³/h], Sturing 3 (1200) en Sturing 3 (950), Antwerpen



Globaal overzicht

Het algemeen overzicht van de vier sturingen is weergegeven in figuur 142. Hieruit kan algemeen besloten worden dat het plaatsen van een maximale limietwaarde voor CO₂ leidt tot een sterke vooruitgang van het comfort waarbij zeer hoge CO₂-concentraties vermeden worden. Maar deze vooruitgang in comfort gaat wel ten koste van de twee andere evaluatiecriteria gezondheid en energie.



Figuur 142: Algemene evaluatie sturing 3 (1200) en sturing 3 (950) [%], Antwerpen

9 CONCLUSIE

Het in rekening brengen van de buitenluchtkwaliteit in een ventilatiesysteem heeft een invloed op verschillende factoren van het binnenklimaat. Gedurende dit onderzoek werden drie sturingen opgebouwd en gesimuleerd in contam, waarbij rekening gehouden wordt met de kwaliteit van de buitenlucht. De eerste sturing (sturing 2A) is een sturing die zich enkel en alleen focust op de buitenluchtkwaliteit van de vier buitenluchtpolluenten NO_2 , O_3 , $\text{PM}_{2.5}$ en PM_{10} . De tweede sturing (sturing 2B) houdt enkel rekening met het pollutant $\text{PM}_{2.5}$ omdat deze de grootste impact heeft op onze gezondheid. De laatste sturing (sturing3) is een traditionele sturing op CO_2 en H_2O , maar met een extra controle op de buitenluchtkwaliteit.

Bij elke van bovenstaande gecreëerde sturing werd opgemerkt dat hoge concentraties van de stoffen CO_2 en H_2O zich voordeden. Deze zijn te wijten aan periodes waarbij weinig geventileerd wordt ten gevolgen van een slechte buitenluchtkwaliteit. Hierdoor worden hoge concentraties van de buitenluchtpolluenten slechts minimaal in het binnenklimaat gebracht. Maar gedurende deze periodes stapelen binnenshuis geproduceerde stoffen, CO_2 en H_2O , zich op in de woning wat leidt tot hoge concentraties voor deze stoffen. Dit is voornamelijk het geval voor CO_2 en in mindere mate voor H_2O .

Om deze hoge concentraties CO_2 te vermijden kan een extra limietwaarde ingevoegd worden waardoor concentraties boven deze waarde vermeden worden. Hierbij wordt er een middenweg gevormd tussen een traditionele vraaggestuurde sturing en een sturing waarbij de buitenluchtkwaliteit in rekening gebracht wordt. Het toevoegen van deze limietwaardes vermijden hoge pieken in de CO_2 -concentraties maar zorgen voor een stijging in de piekconcentraties van de buitenluchtpolluenten.

Vervolgens werd ook algemeen opgemerkt dat de sturingen betere resultaten leverden bij slechtere buitenluchtkwaliteiten. Dit betekent dat de sturingen een groter daling van de piekconcentratie van de buitenluchtpolluenten binnenshuis kon bereiken bij hogere concentraties van deze pollutanten in de buitenlucht, op voorwaarde dat de sturing rekening hield met het buitenluchtpolluent. Het in rekening brengen van de buitenluchtkwaliteit bij locaties met slechte luchtkwaliteiten is voordeliger dan dit bij locaties met een goede luchtkwaliteit.

In dit onderzoek kwam ook het gebruik van filters aan bod. Deze zorgen voor een sterke daling in de concentraties, en dus ook het effect op de gezondheid, van $\text{PM}_{2.5}$ en PM_{10} . Het verschil tussen de traditionele vraaggestuurde sturing met filter en de sturing waarbij rekening gehouden wordt met de buitenluchtkwaliteit met filter wordt door het gebruik van de filters tenietgedaan. Hierdoor is het, bij het gebruik van filters, niet meer interessant om gebruik te maken van een systeem die de buitenluchtkwaliteit in rekening brengt.

Wanneer de drie sturingen met elkaar in vergelijking gebracht werden kon besloten worden dat de derde sturing, de traditionele sturing waarbij een extra controle uitgevoerd werd van de buitenluchtkwaliteit, de beste resultaten kon voorleggen. Deze sturing zorgde voor een algemene daling van het aantal DALY's met bijna 5%, bij een lager energieverbruik van ongeveer 15%. De gemiddelde waarden voor de comfortparameters zijn hierbij slechts lichtjes gestegen. Een belangrijk nadeel aan deze sturing blijft het aantal grote pieken in CO₂-concentraties die weggewerkt kan worden ten koste van de gezondheid ten gevolge van de buitenluchtpolluenten.

REFERENTIES

Aircheckr (2018). aircheckr Air Quality Index. Geraadpleegd op 18 december 2018 via <https://www.aircheckr.com/help-and-guides/air-quality-index>.

Airsan (2018) Luchtmetingen, waarden in lucht. Geraadpleegd op 02 november 2018 via <https://www.airsain.nl/samenstelling-ideale-lucht>.

Berglund, M. (1993). Health risk evaluation of nitrogen oxides. Geraadpleegd op 23 november 2019 via http://www.sjweh.fi/show_abstract.php?abstract_id=1520.

Bluyssen P, De Richemont S, Crump D, Maupetit F, Witterseh T & Gajdo P. (2010). Actions to reduce the impact of construction products on indoor air : outcomes of the European project Healthy Air. Indoor Built Environ.

Bureau voor normalisatie (2010). NEN-EN 13779. Geraadpleegd op 18 december 2018 via <https://edu.mynbn.be/nbnframework/index.php/pdfMeta/readonly/346364?I=N>.

Bureau voor Normalisatie (2018). NBN. Geraadpleegd op 10 december 2018 via <https://www.nbn.be>.

Camfil (2018) Filtratieprincipes. Geraadpleegd op 28 december 2018 via <https://www.camfil.nl/Luchtfiltertechnologie/Filtratieprincipes/>.

Charles J. W. (2000). Ozone in Indoor Environments: Concentration and Chemistry. Geraadpleegd op 08 november 2018 via <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1034/j.1600-0668.2000.010004269.x>.

De Gids, E., Jacobs, P., Phaff, J., & de Jong, P. (2012) Effecten en gevolgen van ventilatie.

Destailats, H., Maddalena, R.L., Singer, B.C., Hodgson, A.T. & McKone, T.E. (2008). Indoor pollutants emitted by office equipment. A review of reported data and information needs. Geraadpleegd op 14 november 2018 via <https://www.osti.gov/servlets/purl/924853>.

Devree, J. (2018). Warmtewisselaar. Geraadpleegd op 28 december 2018 via <http://www.joostdevree.nl/shtmls/warmtewisselaar.shtml>.

EDF (2018). Health impacts of air pollution. Geraadpleegd op 25 november 2018 via <https://www.edf.org/health/health-impacts-air-pollution>.

Eduardo de Oliveira, F., Jantunen, M., Carrer, P., Sepanen, O., Harrison, P & Kephelopoulou S. (2009). ENVIE: Co-ordination Action on Indoor Air Quality and Health Effects.

Elizabeth, L., Roy, E. (2000) Risk Assessment and Indoor Air Quality. Geraadpleegd op 28 december 2018 via <file:///C:/Users/Kenneth/Documents/unif%20gent/4de/Masterproef/Onderzoek/Gebruikte%20documenten/Risk%20Assessment%20and%20Indoor%20Air%20Quality%20-%20Elizabeth%20L.%20Anderson,%20Roy%20E.%20Albert%20-%20Google%20Boeken.html>

European Chemicals Bureau (2004). European Union risk assessment report. Trichloroethylene. Geraadpleegd op 23 november 2019 via <https://echa.europa.eu/documents/10162/83f0c99f-f687-4cdf-a64b-514f1e26fdc0>.

European Environment Agency (2018). Geraadpleegd op 18 december 2018 via <http://airindex.eea.europa.eu/>.

Federale overheidsdienst justitie (2018). Belgische Staatsblad. Geraadpleegd op 10 december 2018 via http://www.ejustice.just.fgov.be/mopdf/2018/09/07_1.pdf#page=201.

Federale overheidsdienst volksgezondheid: veiligheid van de voedselketen en leefmilieu (2016) VOS - Vluchtige organische stoffen.

Gezondheid en milieu (2018) Wat is benzeen? Geraadpleegd op 05 november 2018 via <http://www.gezondheidenmilieu.be/nl/subthemas/benzeen-281.html>

Gezondheid en milieu (2018) Wat is formaldehyde? Geraadpleegd op 05 november 2018 via <http://www.gezondheidenmilieu.be/nl/subthemas/formaldehyde-447.html>).

Gezondheid en milieu (2018) Wat is koolstofdioxide? Geraadpleegd op 05 november 2018 via <http://www.gezondheidenmilieu.be/nl/subthemas/koolstofdioxide-533.html>.

Gezondheid en milieu (2018) Wat is koolstofmonoxide? Geraadpleegd op 05 november 2018 via <http://www.gezondheidenmilieu.be/nl/subthemas/koolstofmonoxide-462.html>

Gezondheid en milieu (2018). Fijn stof. Geraadpleegd op 25 november 2018 via http://www.gezondheidenmilieu.be/nl/subthemas/fijn_stof-438.html.

Gezondheid en Milieu (2018). Tetrachloorethyleen. Geraadpleegd op 12 november 2018 via <http://www.gezondheidenmilieu.be/nl/subthemas/tetrachloorethyleen-291.html>.

GHS (2018) Lijst carcinogeniteit GHS.

Google Maps (2019) Google maps. Geraadpleegd op 5 februari 2019 via <https://www.google.be/maps>.

GSI environmental (2018) chemical properties database. Geraadpleegd op 28 december 2018 via <https://www.gsi-net.com/en/publications/gsi-chemical-database>.

Habitatos (2018). De verschillende filters voor een woningventilatiesysteem.

Geraadpleegd op 29 december 2018 via <https://www.habitos.be/nl/bouwen/de-verschillende-filters-voor-een-woningventilatiesysteem-8295/>.

Hazardous Substances Data Bank (2010). Bethesda, MD, National Library of Medicine. Geraadpleegd op 08 november 2018 via <http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/htmlgen?HSDB>.

Health Canada (2010) Residential Indoor Air Quality Guideline: Ozone

Het Vlaams energieagentschap (2018). Overzicht van de ventilatie-eisen. Geraadpleegd op 10 december 2018 via <https://www.energiesparen.be/bouwen-en-verbouwen/epb-pedia/epb-plichtig-toepassing-en-eisen/e-peil-s-peil-hernieuwbare-energie-en-andere-epb-eisen/ventilatie-eisen/overzicht-van-de-ventilatie-eisen>.

Hoge gezondheidsraad (2017). Indoor air quality in Belgium.

HSDB (2003). Hazardous Substances Data Bank. Specialised Information Services. National Library of Medicine. Geraadpleegd op 05 november 2018 via <http://toxnet.nlm.nih.gov/>.
<https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=21006>

Jacobs, P. (2017). Fijnstof bronnen in en rondom woningen.

Kotzias, D., Koistinen, K., Kephelopoulos, S., Schlitt, C., Carrer, p., Maroni, M., Jantunen, M., Cochet, C., Kirchner, S., Lindvall, T., McLaughlin, J., Mølhave, L., Eduardo de Oliveira, F. & Seifert, B. (2005) The INDEX project: Critical Appraisal of the Setting and Implementation of Indoor Exposure Limits in the EU.

Lehtomäki, H., Korhonen, A., Asikainen, A., Karvosenoja, N., Kupiainen, K., Paunu, V., Savolahti, M., Sofiev, M., Palamarchuk, Y., Karppinen, A., Kukkonen, J. & Hänninen, O. (2018) Health Impacts of Ambient Air Pollution in Finland

Lenntech (2018) Chemische Samenstelling van Lucht. Geraadpleegd op 02 november 2018 via <https://www.lenntech.nl/lucht-samenstelling.htm>.

Livos (2018). Het alfabet: A, B, C en D. Geraadpleegd op 28 december 2018 via <https://www.livos.be/nl/bouwinformatie/techniek/ventilatie/het-alfabet-a-b-c-en-d/>

Milieusite (2018). Ozon. Geraadpleegd op 14 november 2018 via <http://www.milieusite.be/start/klimaat/ozon/verschijnselen/>.

National Center for Biotechnology Information (2018) Explore chemistry. Geraadpleegd op 28 december 2018 via <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>.

Prevent agri (2018). Strengere voorschriften voor luchtverversing in arbeidsplaatsen. Geraadpleegd op 10 december 2018 via <https://www.preventagri.vlaanderen/nl/nieuwsbericht/119/strengere-voorschriften-voor-luchtverversing-in>.

Raja, S., Laing, J., Ferro, A.R., Hopke, P.K, Wetzel, L.E. & Gressani, C.(2011). Improving indoor air quality and asthmatic children's health using a window mounted ventilation/filtration unit. Geraadpleegd op 28 december 2018 via https://www.isiaq.org/docs/presentations/0789_Raja.pdf.

Renovatie elektro delbeke bvba (2018) Ventilatie. Geraadpleegd op 28 december 2018 via <https://www.redbvba.be/ventilatie>

robatherm Nederland (2019) 49 in plaats van 9 filterklassen. De luchtfilternorm ISO 16890 in een overzicht.

Sherman, M. H., Walker, I.S. & Lo. J.M. (2011) Equivalence in Ventilation and Indoor Air Quality.

SIS (2003). Specialised Information Services. Geraadpleegd op 05 november 2018 via <http://chem2.sis.nlm.nih.gov/chemidplus/jsp/chemidlite/ChemFull.jsp>.

Squilbin, M & Davesne S., (2015) De richtlijnen voor de luchtkwaliteit van de wereldgezondheidsorganisatie

Stranger, M., Verbeke, S., Täubel, M., Laverge, J., Wuyts, D., Geyskens, F., Swinnen, R., Verbeke, L., Poelmans, D., Boonen, F., Lauwers, J., De Brouwere, K., Goelen, E., Hyvärinen, A., Janssens, A. & Ingelaere, B. (2012) Exploratory research on the quality of the indoor environment in energyefficient buildings: the influence of outdoor environment and ventilation.

U.S.EPA (1993). Air quality criteria for oxides of nitrogen. Geraadpleegd op 23 november 2019 via <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/30001LZT.PDF?Dockkey=30001LZT.PDF>.

Uebelacker, M. & Lachenmeier, D. (2011). "Quantitative Determination of Acetaldehyde in Foods Using Automated Digestion with Simulated Gastric Fluid Followed by Headspace Gas Chromatography". Geraadpleegd op 06 november 2018 via https://www.researchgate.net/publication/51484343_Quantitative_Determination_of_Acetaldehyde_in_Foods_Using_Automated_Digestion_with_Simulated_Gastric_Fluid_Followed_by_Headspace_Gas_Chromatography

Ukkel (2018) Ozon : vriend of vijand? Geraadpleegd op 15 november 2018 via <http://www.ukkel.be/bestuur/milieu/lucht-en-klimaat/luchtkwaliteit/ozon-vriend-of-vijand>

Van Dijken, F., Balvers, J.R. & Boerstra, A.C. (2011) The quality of mechanical ventilation systems in newly built Dutch dwellings. Geraadpleegd op 29 december 2018 via https://www.isiaq.org/docs/presentations/0372_Dijken.pdf.

Vlaamse milieumaatschappij (2018) Wat zijn VOS? Geraadpleegd op 02 november 2018 via <https://www.vmm.be/lucht/vos/wat-zijn-vos>.

Vlaamse Milieumaatschappij (2018). Jaarrapport Lucht. Emissies 2000-2016 en luchtkwaliteit 2017. VMM (2016) Inschatting van de bijdrage van houtverbranding door burgers aan luchtverontreiniging in Vlaanderen: Eindrapport.

VMM (2018) Jaargemiddelde concentratie zwarte koolstof in de lucht. Geraadpleegd op 15 november 2018 via <https://www.milieurapport.be/milieuthemas/luchtkwaliteit/fijn-stof/jaargemiddelde-concentratie-zwarte-koolstof>.

VMM (2018) Wat is fijn stof? Geraadpleegd op 15 november 2018 via <https://www.vmm.be/lucht/fijn-stof/wat-is-fijn-stof>

VMM (2018). Luchtkwaliteitsindex per regio. Geraadpleegd op 18 december 2018 via <http://www.vmm.be/data/luchtkwaliteitsindex-per-regio>.

VMM (2018). Verzuring en vermesting. Geraadpleegd op 15 november 2018 via <https://www.vmm.be/lucht/verzuring-en-vermesting>.

Wagner, H. M. (1985). Update of a study for establishing criteria dose/effect relationships for nitrogen oxides. Geraadpleegd op 23 november 2019 via http://publications.europa.eu/resource/cellar/684e3d81-104b-4b97-aa80-bfd9ab0ab50.0001.02/DOC_1.

WHO (1985) Trichloorethyleen. Geraadpleegd op 28 december 2018 via <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc50.htm>.

WHO (1989). World Health Organization, Formaldehyde. Geraadpleegd op 5 november 2018 via <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc89.htm>

WHO (1995) Acetaldehyde. Geraadpleegd op 28 december 2018 via <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc167.htm>

WHO (1997). Environmental Health Criteria. Nitrogen Oxides. Geraadpleegd op 05 november 2018 via <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc188.htm>.

WHO (1999). Environmental Health Criteria 213, Carbon Monoxide Second Edition.

WHO (2000). Air Quality Guidelines for Europe. WHO Regional Publications. Geraadpleegd op 05 november 2018 via <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/pre2009/who-air-quality-guidelines-for-europe,-2nd-edition,-2000-cd-rom-version>

WHO (2009). WHO guidelines for indoor air quality: Dampness and mould.

WHO (2018). Metrics: Disability-Adjusted Life Year (DALY). Geraadpleegd op 25 november 2018 via https://www.who.int/healthinfo/global_burden_disease/metrics_daly/en/.

WHO: International agency for research on cancer (2018). Agents classified by the IARC monographs, volumes 1-123. Geraadpleegd op 20 november 2018 via <https://monographs.iarc.fr/agents-classified-by-the-iarc/>.

Wikipedia (2018). Europese richtlijn energieprestatie van gebouwen. Geraadpleegd op december via https://nl.wikipedia.org/wiki/Europese_richtlijn_energieprestatie_van_gebouwen

World Health Organization (2010) WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants.

Zorg en gezondheid (2018). Binnenmilieubesluit: Besluit van de Vlaamse Regering van 11 juni 2004 houdende maatregelen tot bestrijding van de gezondheidsrisico's door verontreiniging van het binnenmilieu. Geraadpleegd op 10 december 2018 via <https://www.zorg-en-gezondheid.be/binnenmilieubesluit-besluit-van-de-vlaamse-regering-van-11-juni-2004-houdende-maatregelen-tot>.

BIJLAGEN

Bijlage 1: Analyse onderzochte stoffen in de verschillende onderzoeken

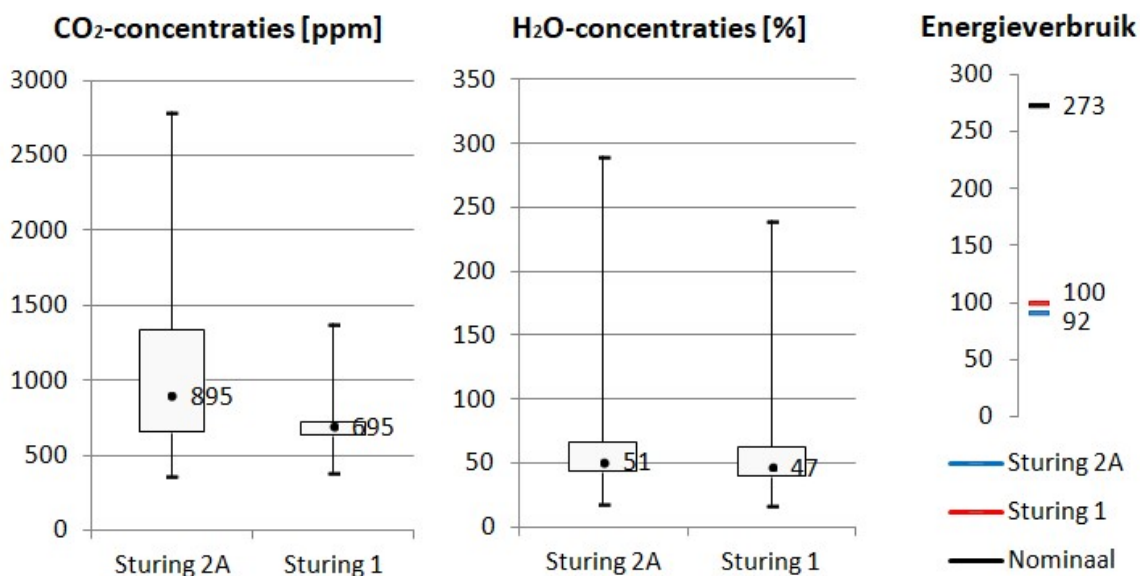
	WGO	Binnenmilieubesluit	EU Index-project	EU INVIE-project	NEHAP-project	schone lucht lage energie	effecten en gevolgen van ventilatie
Benzeen	x	x	x	x	x		
Koolstofmonoxide	x	x	x	x		x	
Formaldehyde	x	x	x	x	x	x	x
Naftaleen	x	x	x	x			
Stikstofdioxide	x	x	x	x			x
Benzo(a)pyreen	x						
Radon	x			x			x
Trichloorethyleen	x	x			x		
Tetrachloorethyleen	x	x					
Acetaldehyde		x	x		x	x	
Alle aldehyden**		x				x	
Asbest		x					
Koolstofdioxide		x					x
Ozon		x					
Tolueen		x	x		x		
VOS (totaal)**		x					
PM 2,5		x		x		x	x
PM 10		x		x		x	x

Xylenen			X				
Styreen			X				
Alfa-pineen			X		X		
Limoneen			X		X		
Ammoniak			X				
1,2,4-trimethylbenzeen					X		
Triclosan					X		
Methyleen-di-isocyaanat					X		
Glycolethers					X		
Permethrin					X		
Vinylchloride					X		
Broomhoudende vlamvertragers					X		
VOC						X	X

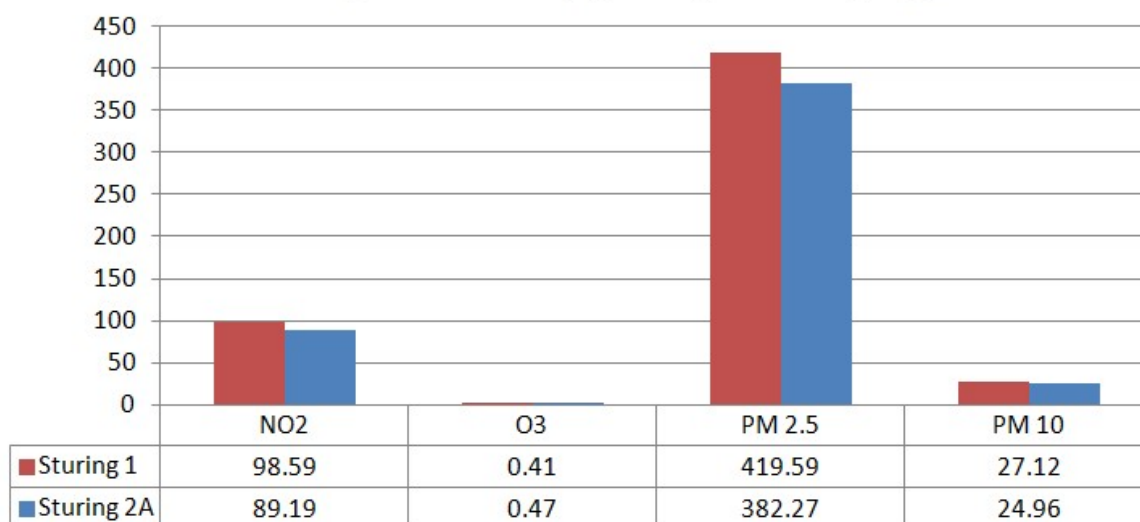
Bijlage 2: Gedetailleerde gegevens van de evaluatiecriteria voor de verschillende locaties

Antwerpen

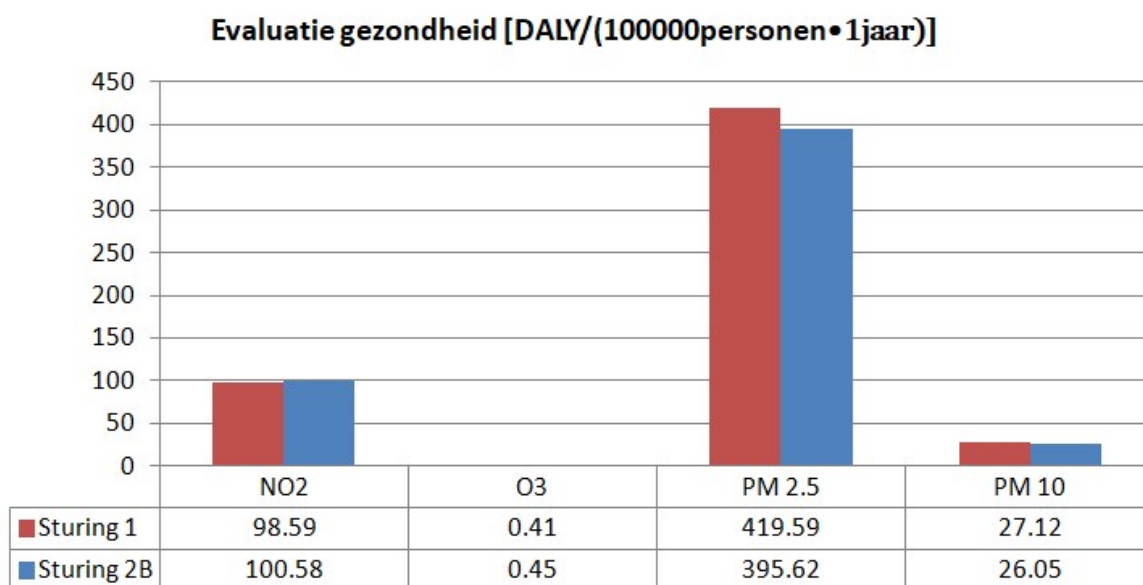
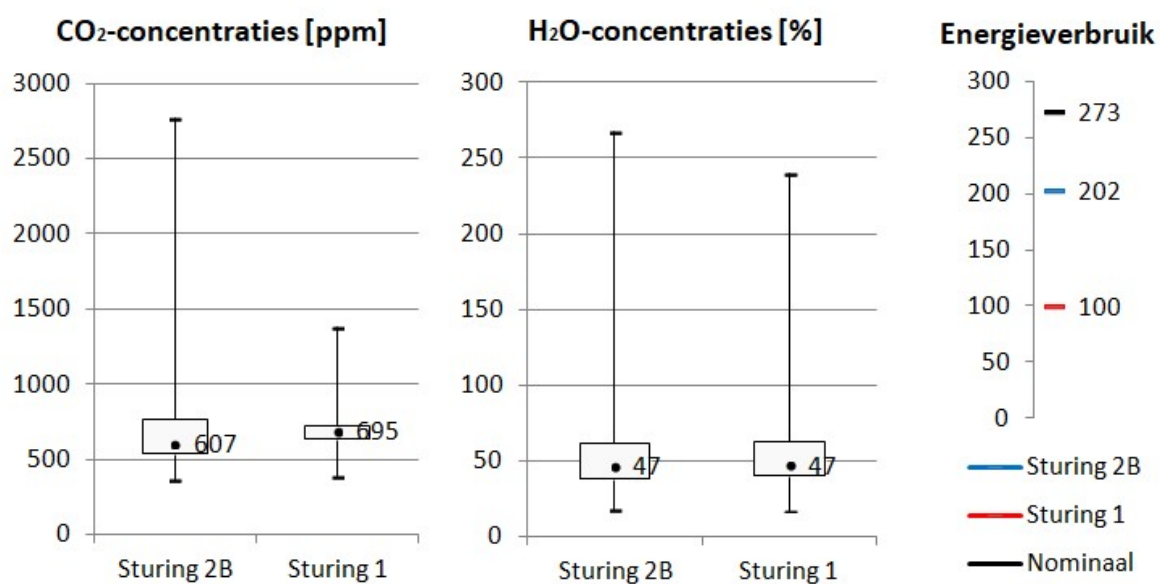
Sturing 2A



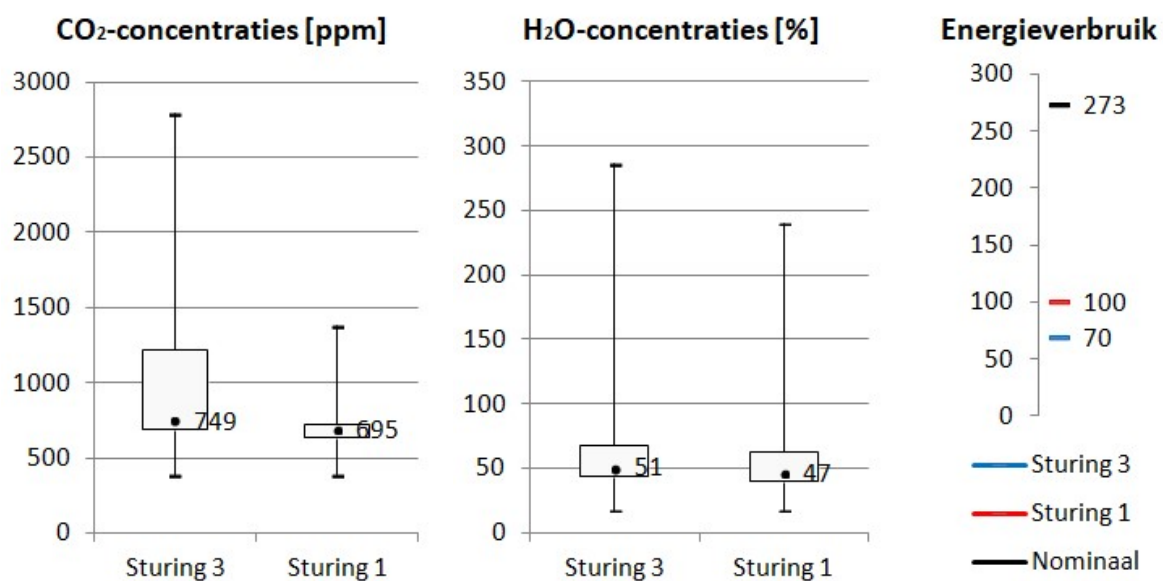
Evaluatie gezondheid [Daly/(100000personen•1jaar)]



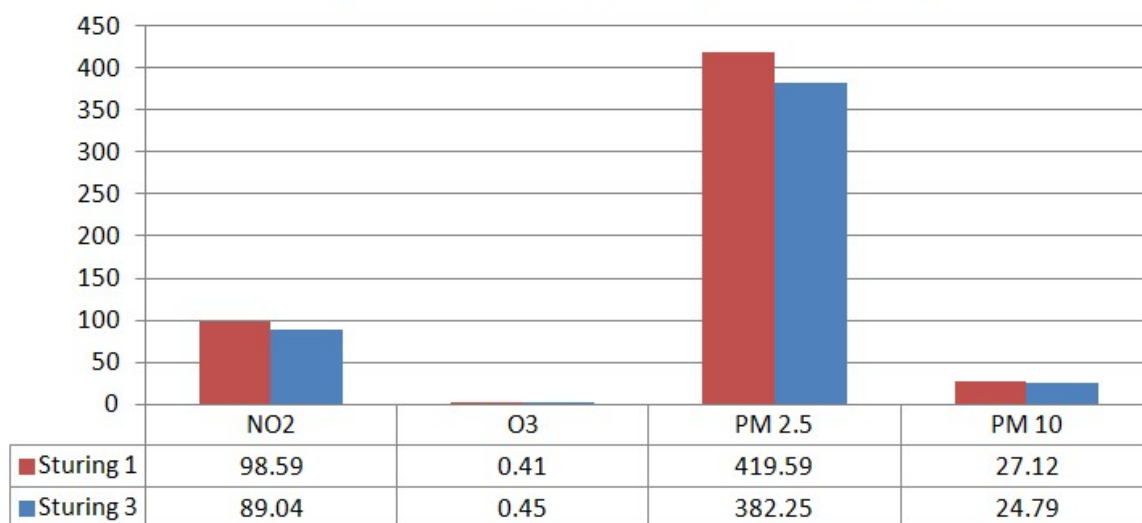
Sturing 2B

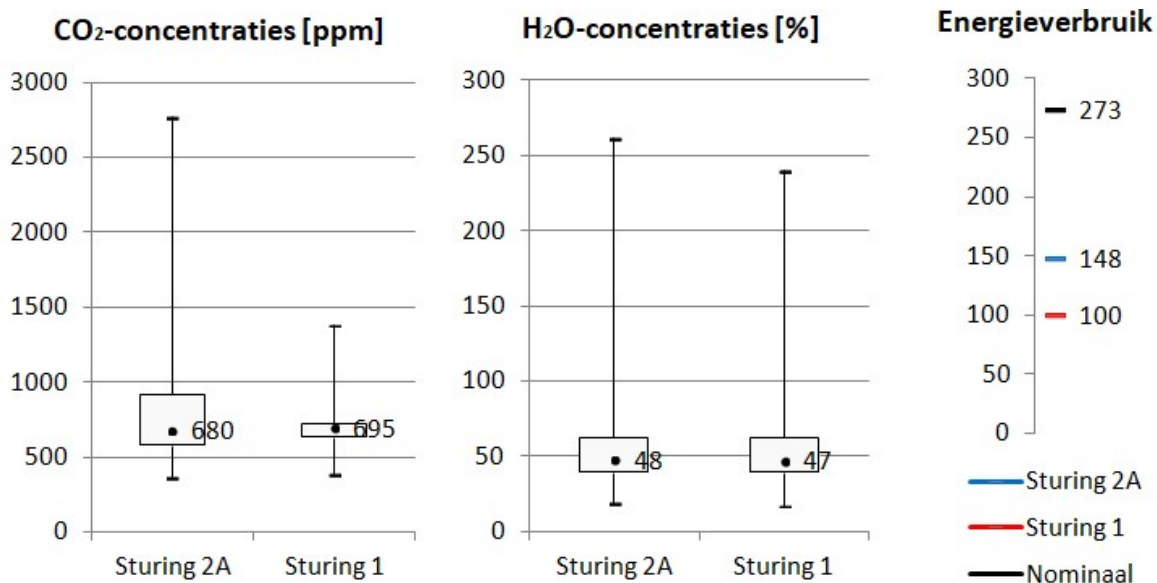
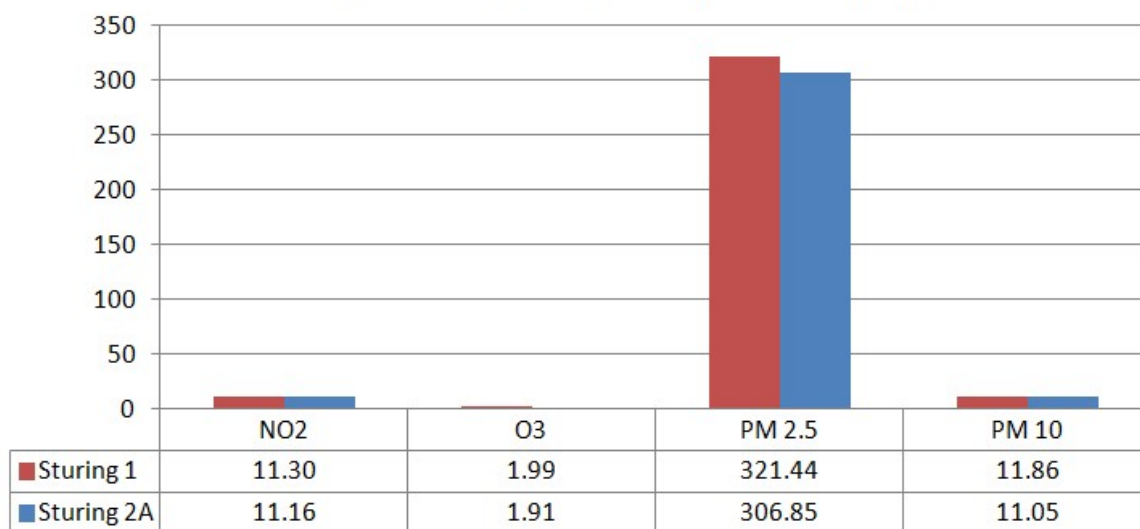


Sturing 3

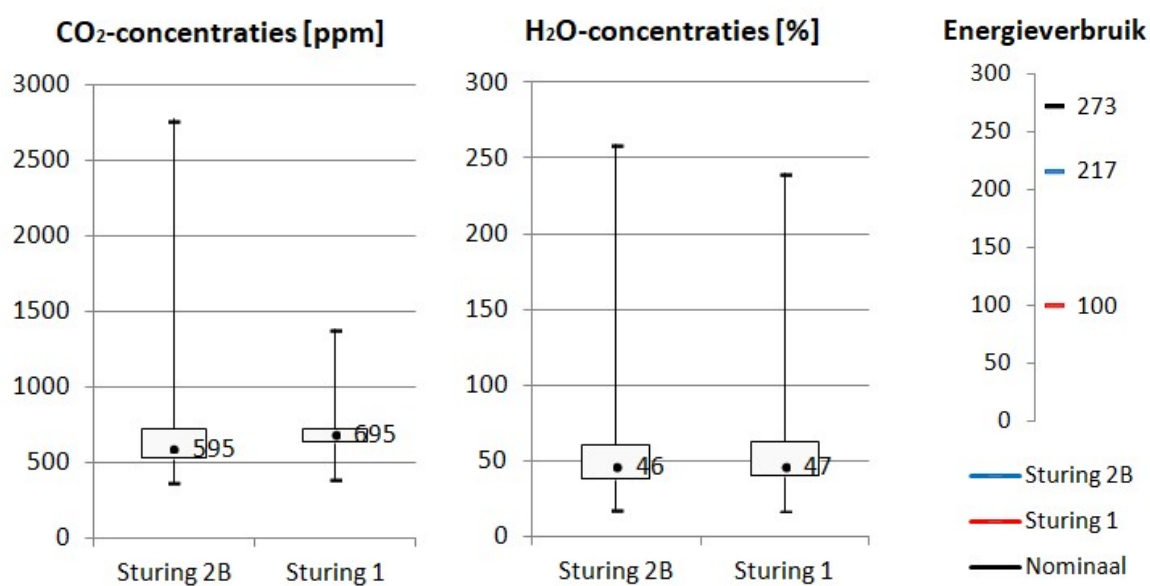


Evaluatie gezondheid [DALY/(100000personen•1jaar)]

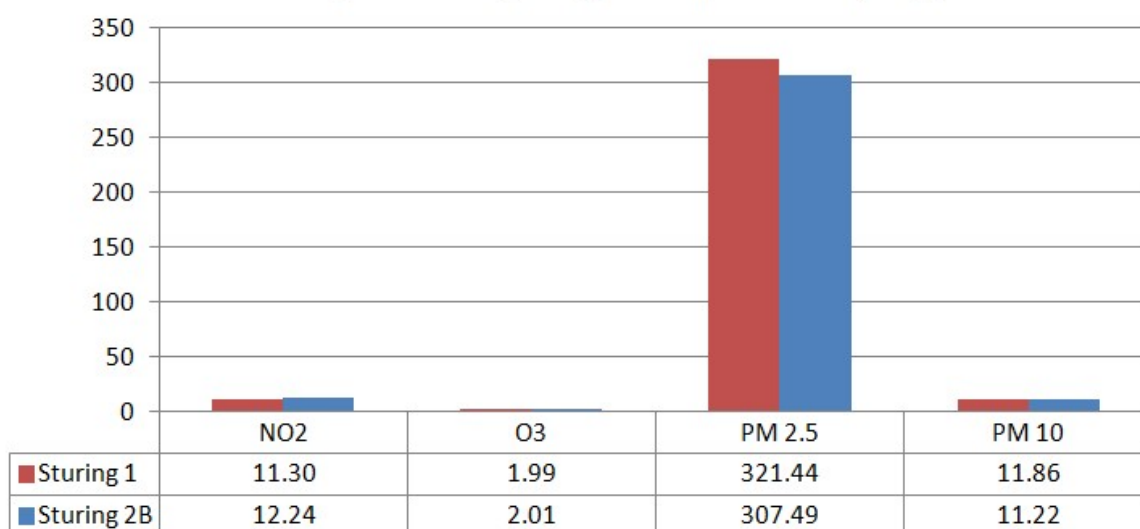


Sturing 2A**Evaluatie gezondheid [DALY/(100000personen•1jaar)]**

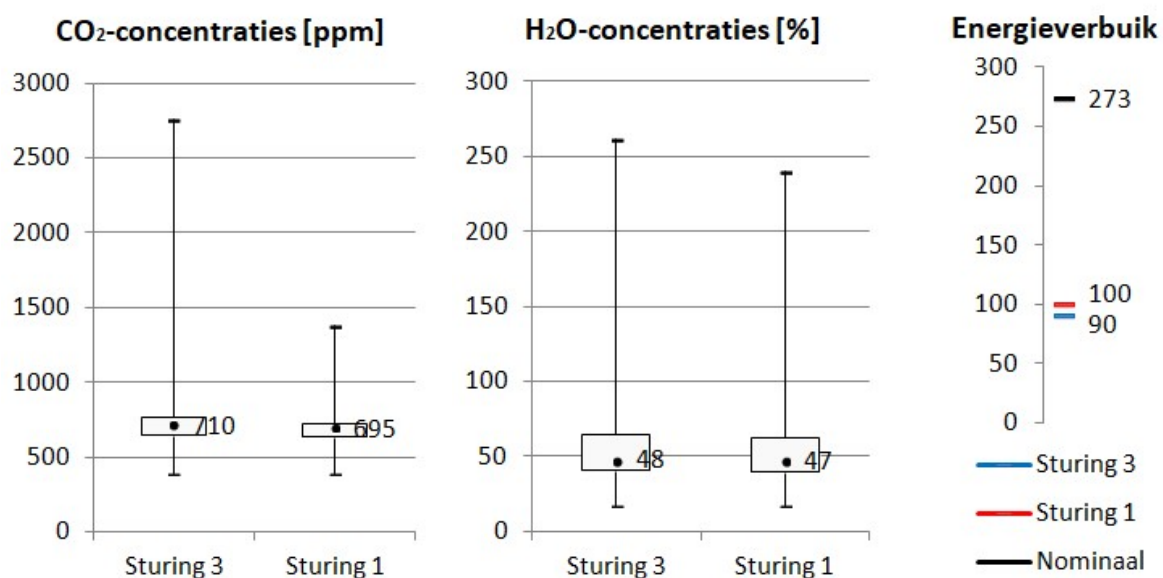
Sturing 2B



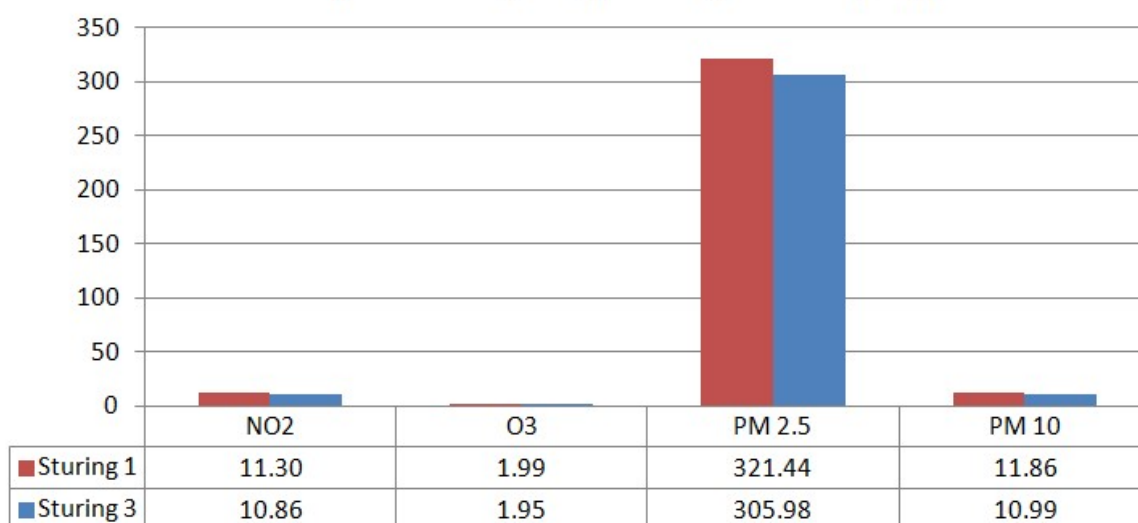
Evaluatie gezondheid [DALY/(100000 personen•1jaar)]



Sturing 3

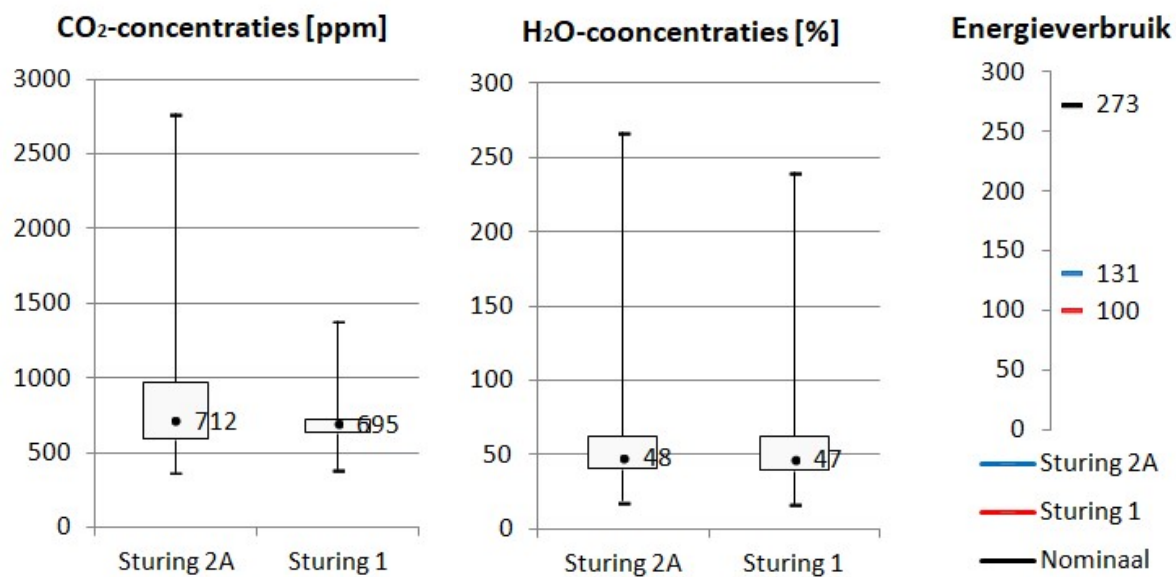


Evaluatie gezondheid [DALY / (100000 personen·1jaar)]

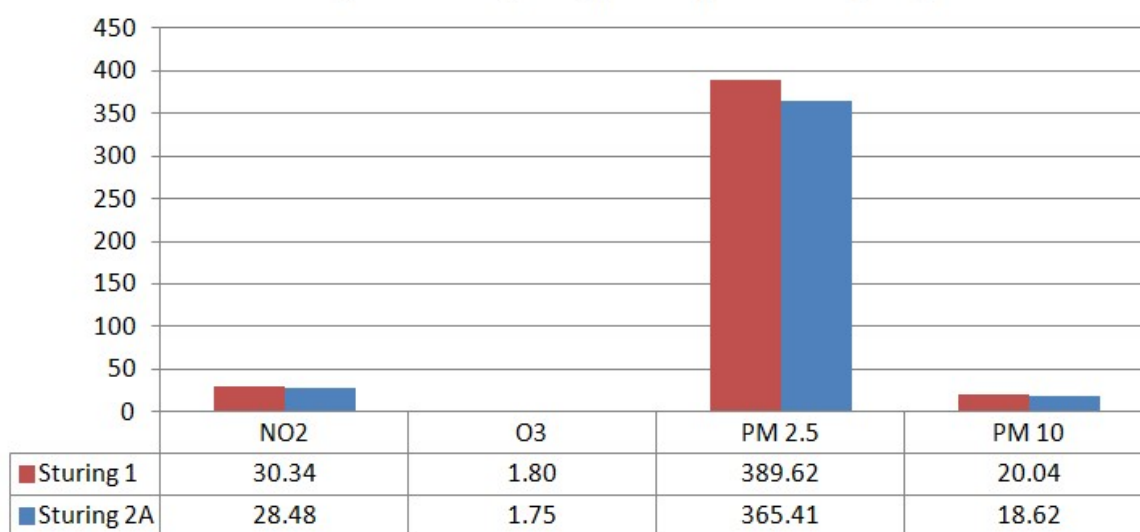


Brugge

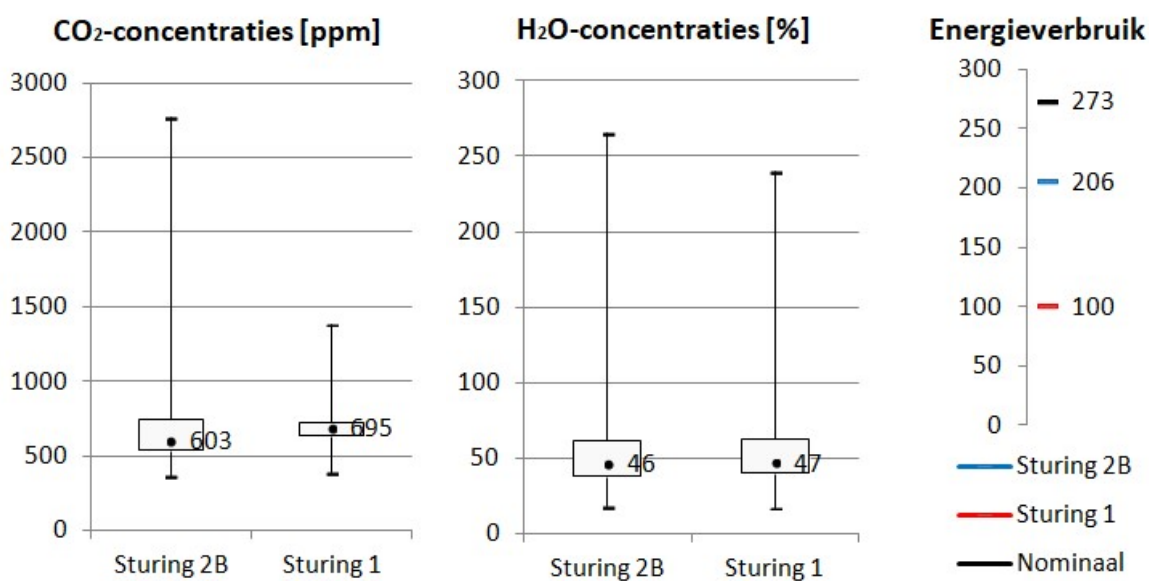
Sturing 2A



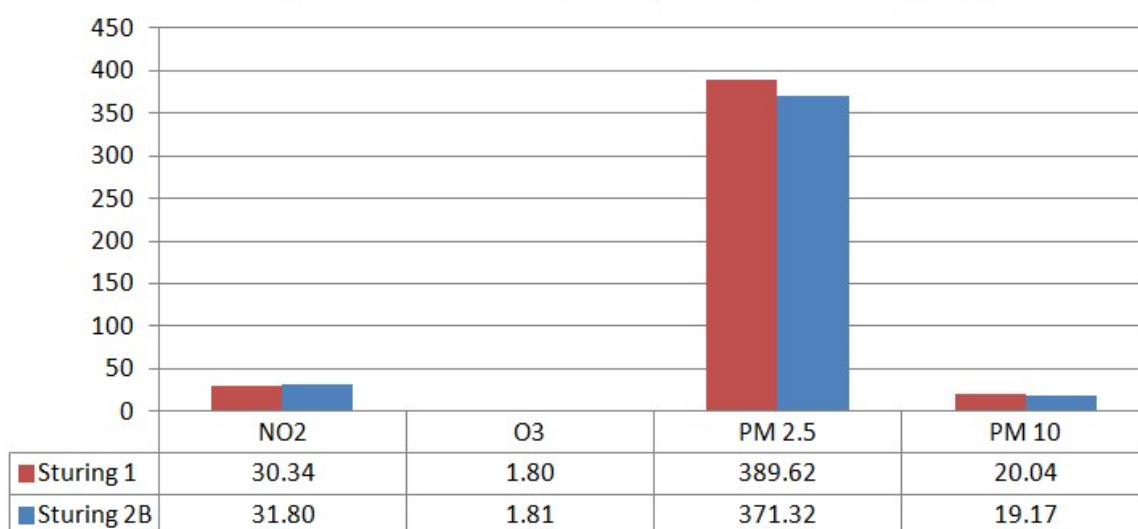
Evaluatie gezondheid [DALY/(100000personen•1jaar)]



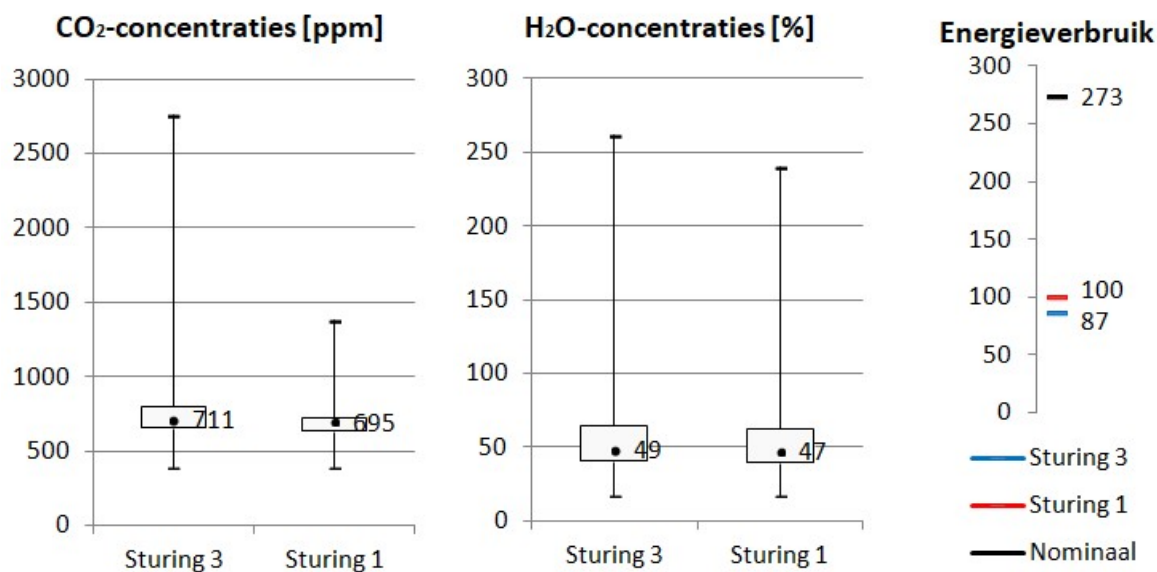
Sturing 2B



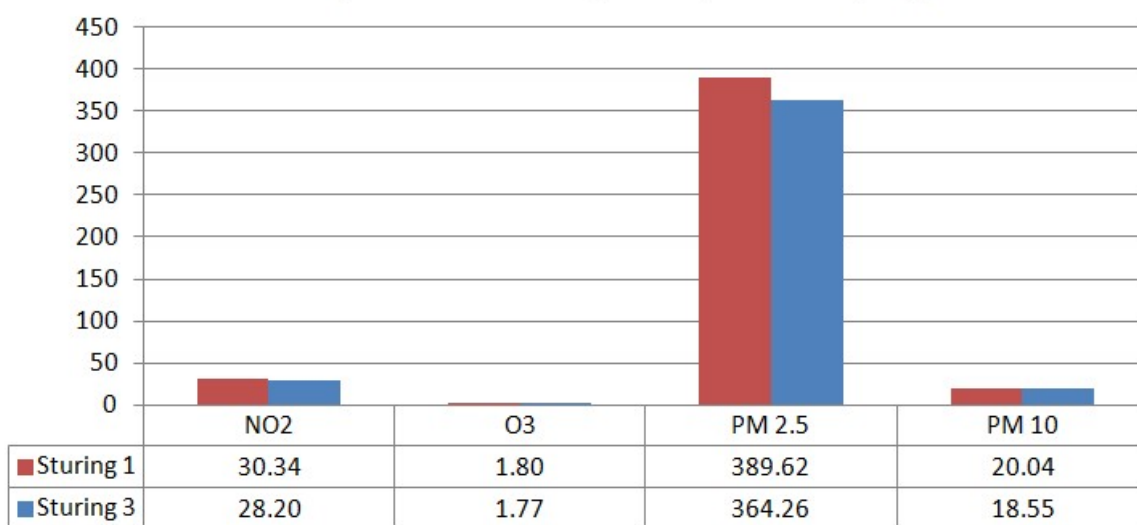
Evaluatie gezondheidscriteria [DALY*(100000personen•1jaar)]



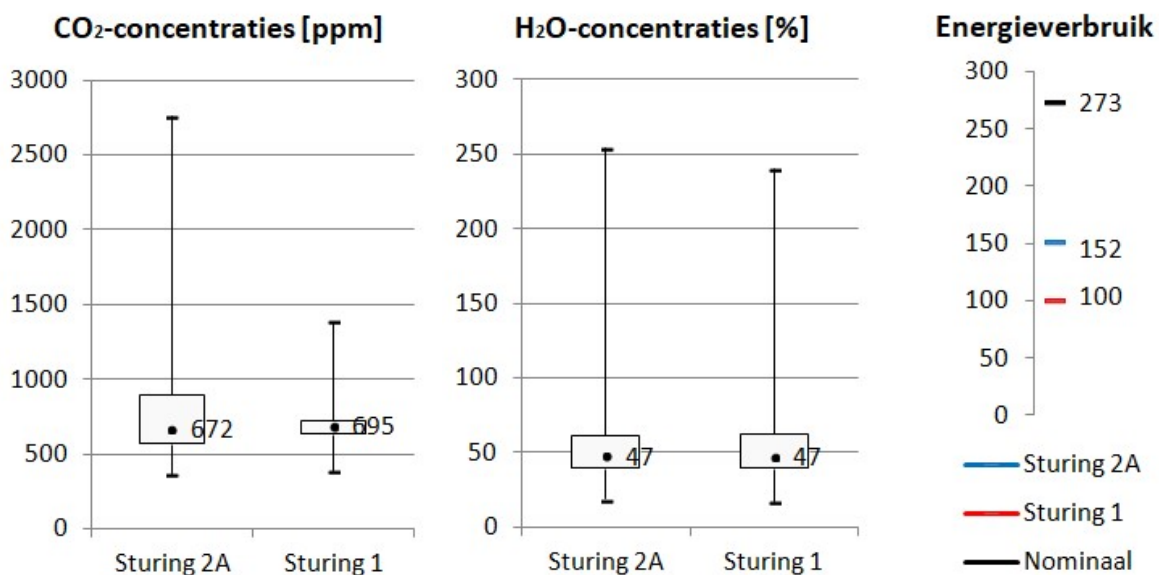
Sturing 3



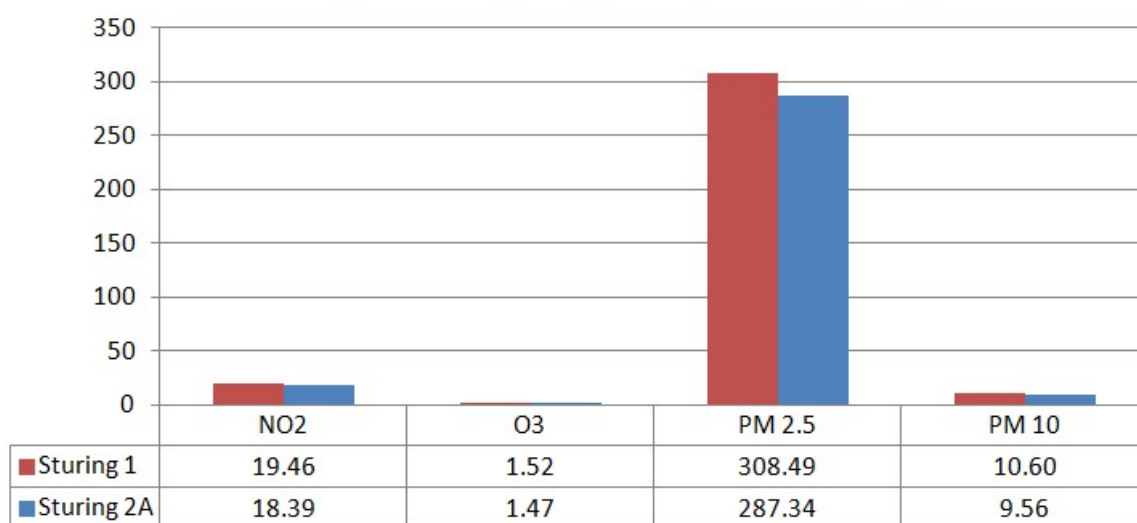
Evaluatie gezondheid [DALY/(100000personen•1jaar)]



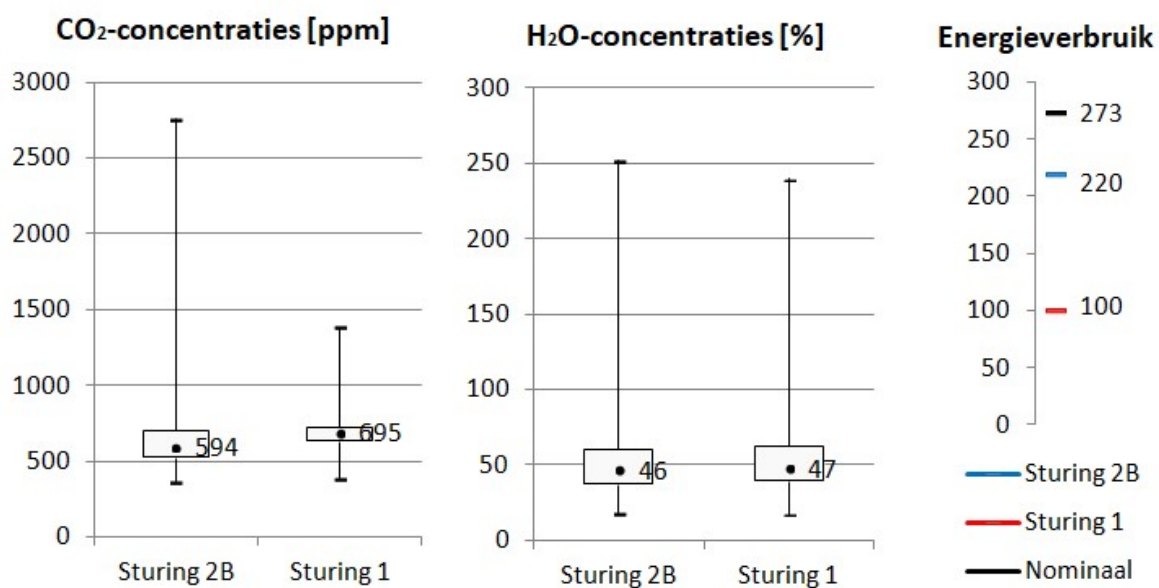
Sturing 2A



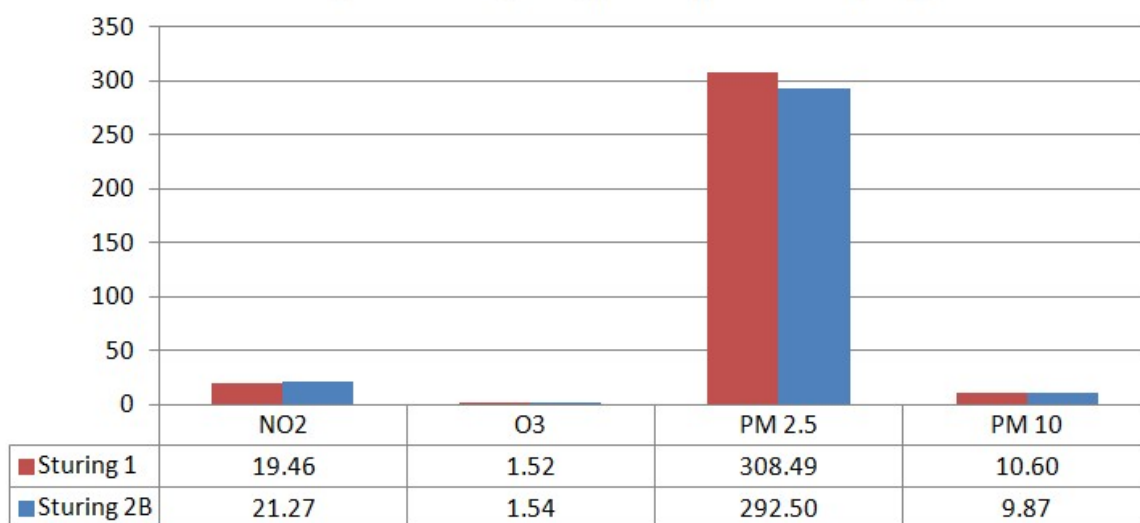
Evaluatie gezondheid [DALY/(100000personen•1jaar)]



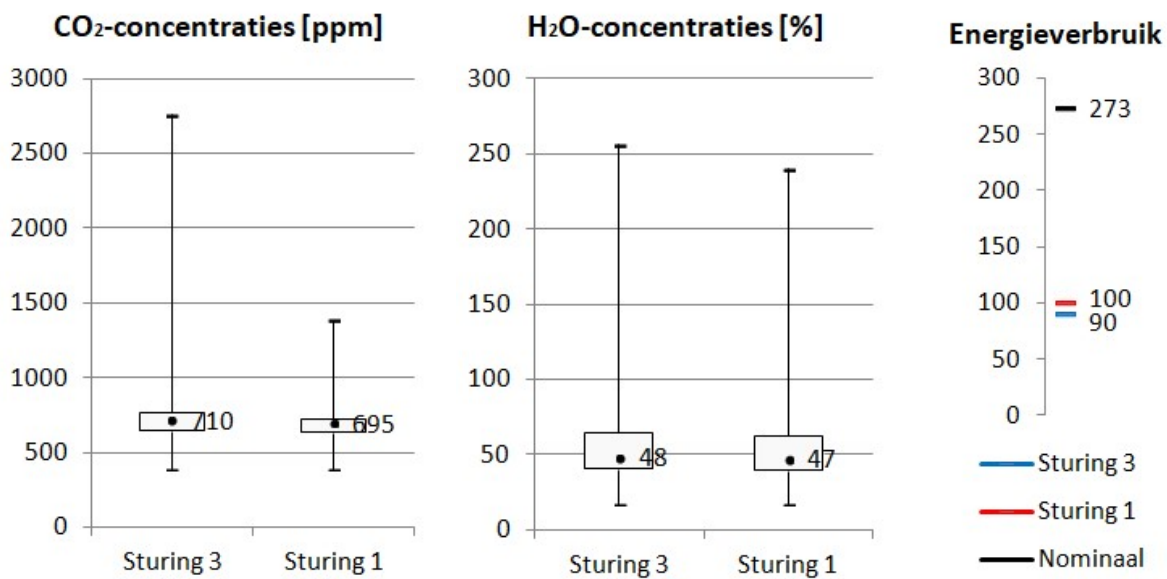
Sturing 2B



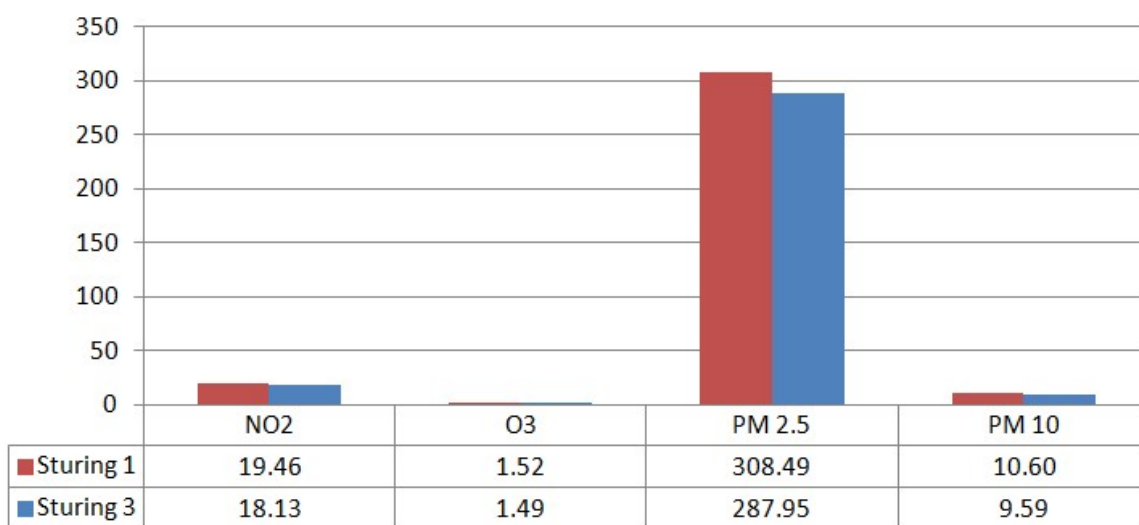
Evaluatie gezondheid [DALY/(100000personen•1jaar)]



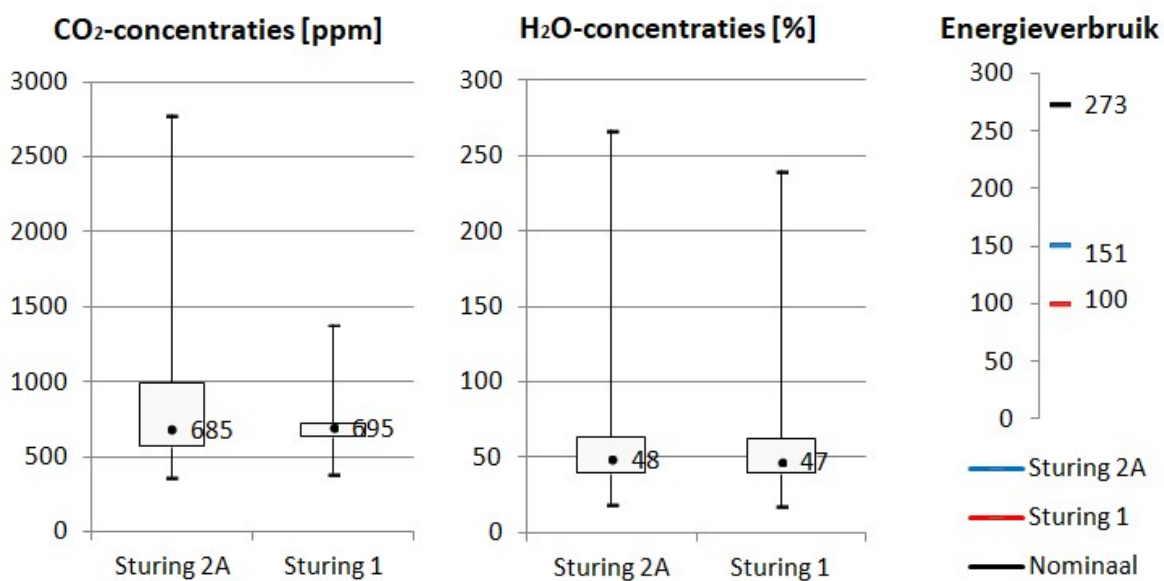
Sturing 3



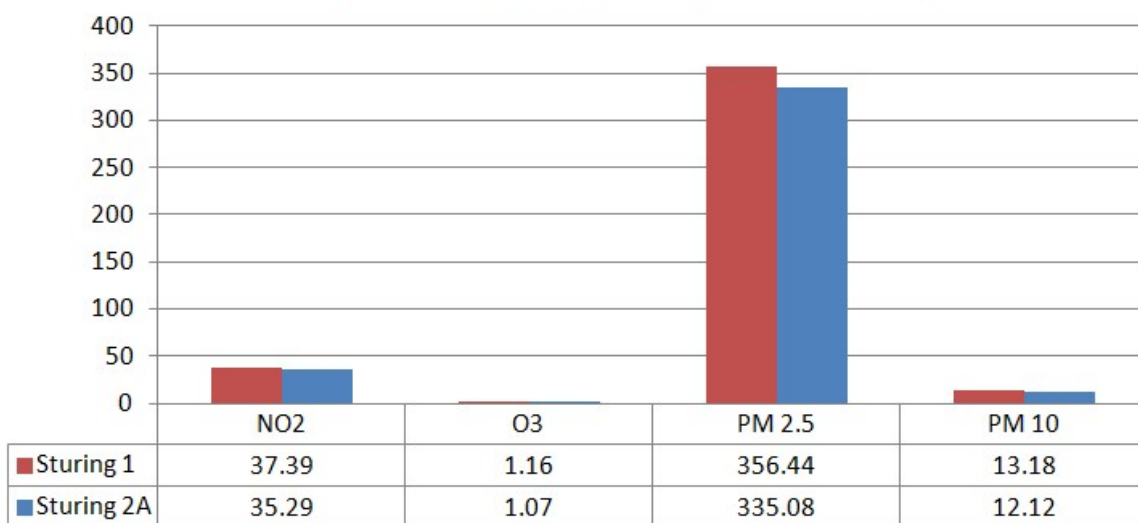
Evaluatie gezondheid [DALY/(100000personen•1jaar)]



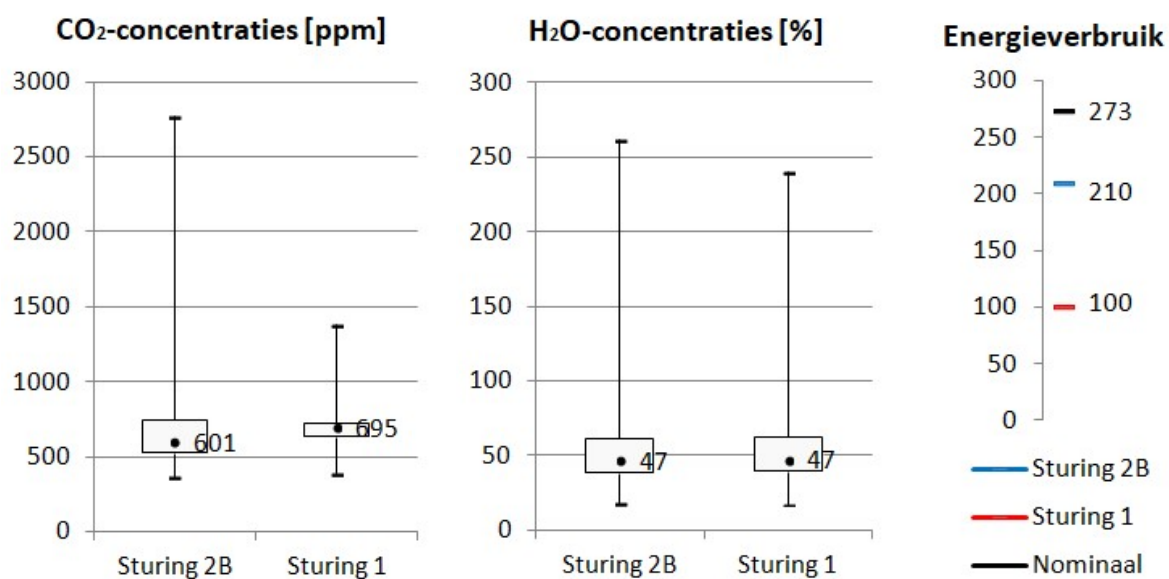
Sturing 2A



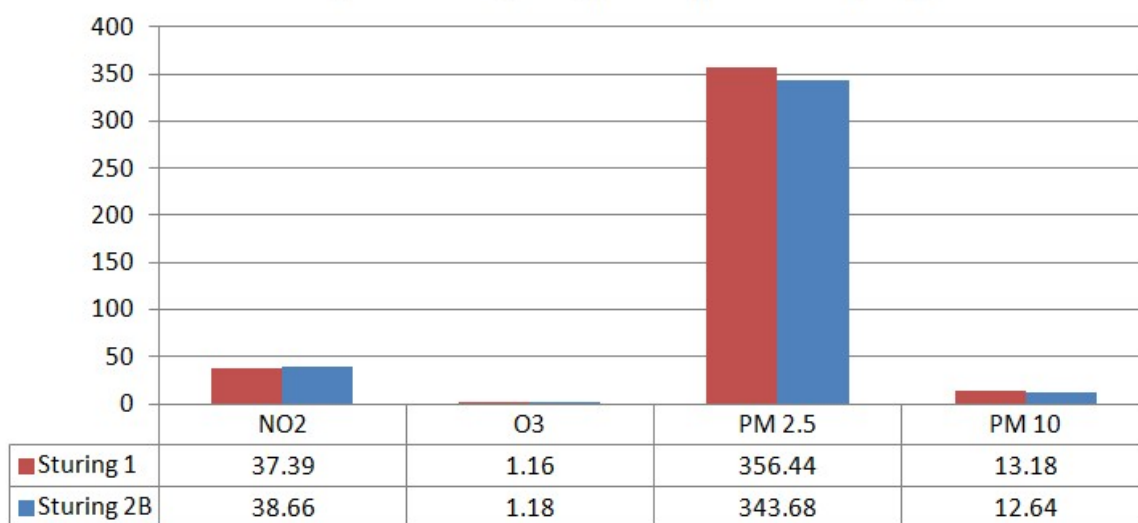
Evaluatie gezondheid [DALY/(100000personen•1jaar)]



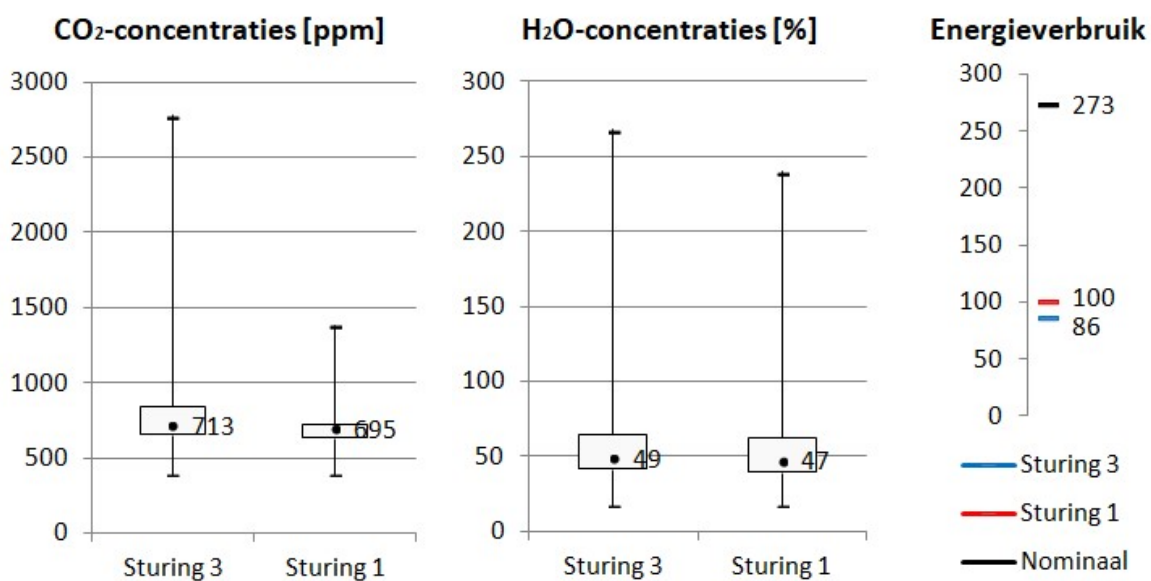
Sturing 2B



Evaluatie gezondheid [DALY/(100000personen•1jaar)]



Sturing 3



Evaluatie gezondheid [DALY/(100000personen•1jaar)]

