

2017 • 2018
Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Masterthesis

Een review paper met tool voor het berekenen van de efficiëntie en haalbaarheid van luchtzuivering op industriële en residentiële toepassingen

PROMOTOR :
Prof. dr. ir. Michael DAENEN
dr. ir. Johan BAETEN

Bram Cools

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



2017 • 2018

Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Masterthesis

Een review paper met tool voor het berekenen van de efficiëntie en haalbaarheid van luchtzuivering op industriële en residentiële toepassingen

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Michael DAENEN

dr. ir. Johan BAETEN

Bram Cools

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektromechanica



KU LEUVEN

Woord vooraf

Dit is een review paper met tool voor het berekenen van de efficiëntie en haalbaarheid van luchtzuivering op industriële en residentiële toepassingen. Deze thesis is geschreven in de master van de gezamenlijke opleiding industriële ingenieurswetenschappen elektromechanica aan de universiteit Hasselt en KU Leuven.

Het onderwerp van deze master thesis is ontstaan tijdens het nadenken over creatieve manieren om op groene energie de luchtkwaliteit te verbeteren. Tijdens deze zoektocht was er een overaanbod van opties. Daardoor kwam het idee om een tool te maken die helpt met het kiezen van de juiste technieken in luchtzuivering voor de gevraagde toepassing.

Ik wil graag een aantal personen bedanken die deze thesis mogelijk hebben gemaakt. Mijn promotoren, prof. dr. ir. Michaël Daenen en dr. ir. Johan Baeten voor de steun en motivatie in dit onderwerp en de vele kennis die ze mij door de jaren heen hebben bijgebracht.

Daarnaast wil ik mijn ouders bedanken voor de kansen en steun die ze me gegeven hebben doorheen heel mijn opleiding. Dankzij hun motiverende woorden en kansen ben ik hier geraakt.

Inhoudsopgave

WOORD VOORAF	1
INHOUDSOPGAVE.....	3
LIJST MET TABELLEN.....	5
LIJST MET FIGUREN	7
ABSTRACT	9
ABSTRACT IN ENGLISH	11
1. INLEIDING:	13
1.1. ONDERWERP	13
1.2. DOELSTELLING.....	15
1.3. AANPAK	15
2. WAT IS LUCHTKWALITEIT?	17
2.1. LUCHTVERVUILENDE STOFFEN	18
2.2. NORMEN EN VOORSCHRIFTEN	19
3. LUCHTVERVUILING	21
3.1. BRONNEN.....	21
3.1.1. INDOOR.....	21
3.1.2. OUTDOOR.....	22
3.2. GEVOLGEN	23
3.2.1. GEZONDHEID.....	23
3.2.2. ECONOMIE.....	24
3.2.3. ECOSYSTEEM	24
4. ZUIVERINGSTECHNIEKEN.....	25
4.1. FILTRATIE.	26
4.2. ABSOLUUT FILTER	27
4.3. DOEKENFILTER	30
4.4. ADSORPTIE.....	33
4.5. GASWASSEN	35
4.6. ELEKTROSTATISCH SCHEIDEN.....	37
4.7. FOTO-OXIDATIE	39
4.8. ANDERE TECHNIEKEN	41
5. AANDRIJVING.....	43
5.1. EFFICIËNTIE.....	44
5.2. ECOLOGISCHE VOETAFDRIJF.....	44
5.3. ECONOMISCH	44
6. IMPACT LUCHTZUIVERING.....	45
6.1. TEMPERATUUR.....	45
6.2. SNELHEID	45
6.3. GELUID	45

7. TECHNIEK KEUZE	47
7.1. TOEPASSING	47
7.2. PARAMETERS	47
7.3. VOORBEELD	48
8. CONCLUSIE	51
BIBLIOGRAFIE	52

Lijst met tabellen

TABEL 1: COMMON AIR QUALITY INDEX (CAQI) TABLE.[2].....	17
TABEL 2: EUROPEAN AIR QUALITY INDEX TABEL (EAQI).[3].....	17
TABEL 3: VERGELIJKING TUSSEN DE OUDE EN 779 NORM EN DE NIEUWE ISO 16890.[9].....	20
TABEL 4: SAMENVATTING PER TECHNIEK WELKE PRODUCTEN ELK KAN FILTEREN.....	25
TABEL 5: ALGEMENE RANDVOORWAARDES PER TECHNIEK	25
TABEL 6: SAMENVATTING VAN DE GESCHATTE KOSTEN PER TECHNIEK.....	25
TABEL 7: EIGENSCHAPPEN DOEKENFILTER PER MATERIAALSOORT.[16].....	31
TABEL 8: PRIJS PER MATERIAALSTOF.[16]	32
TABEL 9: RELATIEVE INVESTERINGSKOST INSTALLATIE DOEKENFILTER.	32
TABEL 10: GELUIDSINTENSITEIT PER DEBIET.[25]	46
TABEL 11: DE TE FILTEREN STOFFEN OPGEGEVEN ALS VOORBEELD.	48
TABEL 12: GEVRAAGDE RANDVOORWAARDES.....	48
TABEL 13: RENDEMENTEN TOTAAL INSTALLATIE.....	49
TABEL 14: KOSTEN VAN GEKOZEN INSTALLATIE.	49

Lijst met figuren

FIGUUR 1: NEW WIND TREE, PRODUCEERT GROENE ENERGIE. [1].....	13
FIGUUR 2: VISUEEL BEELD VAN PM DEELTJES. [4]	18
FIGUUR 3: PM10 UITSTOOT PER SECTOR.[9].....	20
FIGUUR 4: BRONNEN VAN INDOOR LUCHTVERVUILING: 1) ROOKGASSEN 2) ALLERGENEN 3) CARBONMONOXIDE CO EN STIKSTOFDIOXIDE NO ₂ 4) VOCHT, BEVAT BACTERIËN EN SCHIMMELS DIE BINNENSHUIS KUNNEN GROEIEN 5) SYNTHETISCH CHEMISCHE STOFFEN UIT HUISHOUDELIJKE PRODUCTEN 6) RADON.[10]	21
FIGUUR 5: BRONNEN VAN OUTDOOR LUCHTVERVUILING: 1) LANDBOUW OMSLUIT 90% VAN DE AMMONIAK VERVUILING EN 80% VAN DE METHAAN GASSEN 2) ENERGIE PRODUCTIE EN DISTRIBUTIE 3) NATUURLIJKE FENOMENEN ZOALS VULKANISCHE UITBARSTINGEN, BOSBRANDEN, STOMEN 4) AFVALVERBRANDING, KOOLMIJNEN EN LANGE AFSTAND GASTRANSPORT ZIJN BRONNEN VAN METHAAN 5) WEGTRANSPORT ZORGT VOOR MEER DAN 40% VAN DE STIKSTOFDIOXIDE EN BIJNA 40% VAN PRIMAIR PM _{2,5} 6) VERBRANDING VAN BRANDSTOF, DRAGEN BIJ VOOR 50% VAN DE PM _{2,5} EN CO. [11]	22
FIGUUR 6: VISUELE WEERGAVE DOORDRINGBAARHEID.[8]	23
FIGUUR 7: SCHEMATISCHE WEERGAVE FILTER. [16].....	26
FIGUUR 8: VOORSTELLING ABSOLUUT OF HEPA FILTER.[16]	28
FIGUUR 9: SCHEMATISCHE WEERGAVEN DOEKENFILTER.[16]	30
FIGUUR 10: ADSORPTIE SCHEMATISCHE VOORSTELLING.[16].....	33
FIGUUR 11: SCHEMATISCHE WEERGAVEN GASWASSEN.[16]	35
FIGUUR 12: SCHEMATISCHE WEERGAVEN IONISATIE.[16]	37
FIGUUR 13: SCHEMATISCHE WEERGAVEN FOTO-OXIDATIE.[16].....	39
FIGUUR 14: BOTANISCHE LUCHTFILTER MET ZIJ EN BOVENAANZICHT.[19]	41
FIGUUR 15: INDOOR BIO LUCHTFILTERSYSTEEM.[19]	41
FIGUUR 16: BOUW EC MOTOR.[22]	43
FIGUUR 17: OWLED SCHOEPDESIGN.[23]	44
FIGUUR 18: WEERGAVE VAN INDOOR LUCHTSTROMING DOOR VENTILATIE. [25]	45
FIGUUR 19: VERDELING GELUIDSNIVEAU (DB).[25].....	46

Abstract

Door het grote aanbod aan luchtzuiveringstechnieken ontstaat de vraag naar duidelijkheid in de keuze van juiste technieken voor specifieke toepassingen.

Deze masterproef omvat een review paper van de actuele stand van zaken in luchtzuivering. Verschillende processen worden duidelijk naast elkaar gezet om een beeld te schetsen van welke techniek voor welke toepassingen geschikt is. Elk proces heeft een andere economische waarde en verschillende ecologische gevolgen. Voor iedere techniek is de efficiëntie, m.a.w. in welke mate bepaalde producten ontnomen worden, van groot belang. Daarnaast wordt nagegaan waar de grootste rendementsverliezen zitten, deze verliezen omvatten zowel energie, stroming en mechanische verliezen. En wat zijn de uiteindelijke ecologische en economische gevolgen als verbruik en opbrengsten allemaal in kaart gebracht worden?

Om voor specifieke noden de juiste technieken te kiezen is er een tool voorzien. Met randvoorwaarden en gevraagde grenswaardes wordt er een opeenvolging van processen geselecteerd die aan de grenswaardes voldoen. Het resultaat geeft verschillende toepassingen. Zo zijn er mogelijk goedkopere, efficiëntere of ecologisch voordeligere aspecten. Elke optie heeft dan ook een specifieke efficiëntie, rendement, verbruik, grenswaardes in zowel investering als onderhoudskosten.

Abstract in English

There is demand for clarity in the choice of air purification techniques for specific applications.

This master's thesis contains a review paper of the current state in air purification techniques. The different techniques are clarified to create a clear image of each's purpose. Every process has different economical values and different ecological outcomes. The filter efficiency for each technique is of importance, meaning how much polluting products are filtered out. Next the total energy efficiency is discussed, this contains electrical, mechanical and flow losses. And what are the final ecological and economical effects if all these losses and filtered pollutants are taken in account.

The goal of the tool is to get the right technique for specific requirements. The tool requires certain conditions and values to produce the right techniques to meet the requirements. The result can be of cheap, efficient or ecological interesting aspect. Therefore each outcome has its own specific values like efficiency, limits, energy consumption and costs.

1. Inleiding:

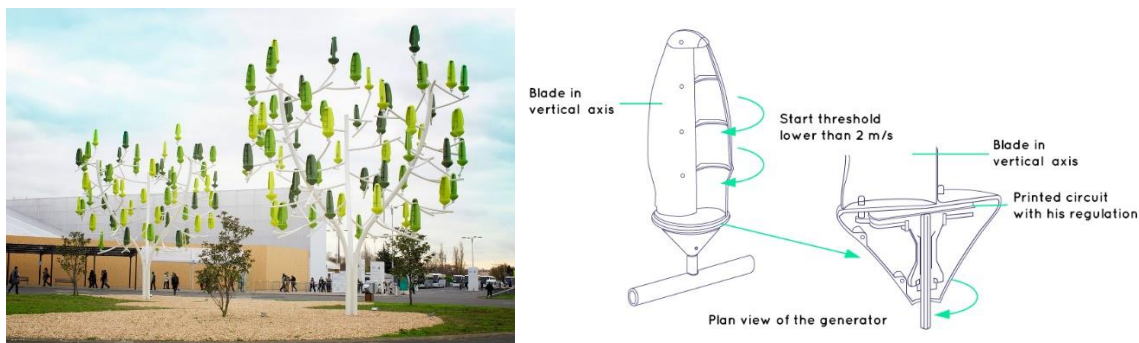
Als master thesis is een eigen onderwerp ingediend. Dit bevatte een brede basis van zowel energie, materiaalkunde, mechanisch ontwerp en milieu.

Prof. dr. ir. Michaël Daenen, en prof. dr. ir. Johan Baeten, docenten en onderzoekers aan de universiteit Hasselt en KU Leuven, begeleiden mij in deze masterthesis.

1.1. Onderwerp

Zoals de eerste titel duidelijk maakte, ging het om een zelfvoorzienend systeem dat op een zo constant mogelijke manier en zo efficiënt mogelijk de lucht filtert.

Het idee is begonnen met een structuur die er uitziet als een boom, zodat deze esthetisch zonder problemen op alle locaties, dus ook in bewoonde gebieden, geplaatst kan worden. De boom is een mechanische structuur die bezet is met kleine verticale windturbines in de vorm van bladeren. De eerste gedachte was dat door de kleinere omvang van de turbines, ze ook bij lichtere winden moeten opbrengen en dus in meer residentiële gebieden geplaatst kunnen worden waar ze een meer turbulente wind hebben. De groene energie die hieruit wordt opgewekt, wordt opgeslagen op een interne batterij of naar het net gestuurd.



Figuur 1: New wind tree, produceert groene energie. [1]

Afhankelijk van het vermogen die de turbines opleveren, wordt al de energie of een deel hiervan gebruikt voor het aandrijven van het filtersysteem. Dit filtersysteem heeft als doel de vervuilde lucht van de omgeving te zuiveren en deze gezuiverd weer uit te zenden naar de omgeving. Het doel is om hieruit een haalbaar model te creëren gebaseerd op bestaande systemen. Om dit te vinden is er eerst heel wat literatuuronderzoek nodig naar groene energie, omzetting en opslag van energie, luchtkwaliteit, luchtfilters/filtersystemen en luchtventilatie.

De rendabiliteit van groene energie hangt van verschillende zaken af. Vooral in residentiële gebieden kunnen niet zomaar windmolens gezet worden. Daarnaast is deze omgeving ook niet altijd optimaal voor windmolens en zeker niet voor kleinere gevoelige windturbines. Hoe is het mogelijk om dit toch met kleine verticale turbines te doen? Hoe kan er verzekerd worden dat het systeem rendabel zal zijn in deze omgeving? Is photo voltaic (PV) een betere oplossing voor dit systeem? Of is het nodig om de energieopwekking en het filteren van lucht te scheiden van elkaar voor de haalbaarheid van het systeem? Naast de zorg voor een rendabel systeem is er nog een ander belangrijk punt: is het nog ecologisch? Zal de volledige levenscyclus een voordelige bijdrage leveren op ecologisch vlak? De levenscyclus bestaat uit drie fasen: de productie, de inwerkstelling en de ontmanteling. Bij deze fasen wordt er CO₂ uitgestoten en enkel tijdens de inwerkstelling zal er groene energie geproduceerd kunnen worden. De vraag hierbij is dus of er een voordelige bijdrage mogelijk is.

Om de luchtkwaliteit te verbeteren, moet eerst duidelijk zijn wat de luchtkwaliteit bepaalt. In de lucht zitten meerdere stoffen die vervuילend zijn. Welke zijn volgens de Europese richtlijnen de meest zorgwekkende vervuilers?

Naast de energieopwekking is er ook het filteren van de lucht. Nu duidelijk is welke de vervuïlende stoffen zijn, wordt er onderzoek gedaan naar manieren om deze te scheiden van de lucht. Welke stoffen kunnen gefilterd worden en welk soort filters zullen hiervoor nodig zijn? Welke capaciteit kan behaald worden? Is er voldoende opgewekt vermogen om dit te realiseren? Naast het maken van de filter, moet deze ook gezuiverd worden. Wat is het voordeligste proces? En wat zijn hier de ecologische gevolgen van? Hoe kunnen deze stoffen verder verwerkt worden?

Op welke schaal kunnen de grootheden die behaald worden, een positief effect hebben op de omgeving en zo voor een betere leefwereld zorgen in de residentiële gebieden?

Vergelijk andere systemen zoals organische bomen met dit model, hoe leveren deze verschillende systemen een bijdrage aan de luchtkwaliteit? Zijn ze vervangbaar of verschillend in rendabiliteit? Wat zijn goede locaties om zo'n mechanische boom optimaal te laten werken?

Uit bovenstaande onderzoeken uit de literatuur moet blijken of het theoretisch model hiervan rendabel is. Afhankelijk van de beschikbare middelen is het doel om een prototype uit te werken of een testopstelling van een prototype te maken, om deze vervolgens te testen in een labo of in de praktijk. Zo kunnen we de theoretische waardes vergelijken met de gemeten resultaten, zowel op vlak van rendabiliteit in opgewekte energie als op vlak van zuiverheid en debiet van de gefilterde lucht.

Dit was de eerste onderzoeksopzet. Daarom is de eerste literatuurstudie begonnen over groene energie en kleinschalige windturbines. Snel werd duidelijk dat hier heel veel verschillende mogelijkheden zijn en dat er een breed gamma aan modellen bestaat. Daarnaast is er een groot verschil in meningen over rendabiliteit van micro windturbines. Het resultaat is dat ze zeer afhankelijk zijn van de omgeving, meer bepaald de luchtstromen

die invloed uitoefenen waardoor bepaalde toepassingen in bebouwde gebieden dus mogelijk niet rendabel zijn.

Vervolgens startte de literatuurstudie over luchtzuivering. Ook hier bleek het niet zo eenvoudig om een bepaald systeem te kiezen. Alle applicaties bevatten meerdere technieken die gecombineerd worden tot een geheel om bepaalde rendementen en resultaten in luchtkwaliteit te halen. Na overleg was dan ook duidelijk het onderwerp van deze master thesis een nieuwe wending zou krijgen naar één specifiek deel uit dit concept.

1.2. Doelstelling

In deze reviewpaper wordt dan ook een korte opsomming gemaakt van wat de actueel gebruikte technieken omtrent luchtzuivering zijn en waarvoor welke technieken gebruikt worden. Daarnaast zal er nagegaan worden welke factoren voor de rendementsverliezen zorgen. En wat de ecologische voetafdruk is van filtersystemen.

Om dit aan te vullen wordt er een tool geschreven waarmee, afhankelijk van opgegeven parameters, berekend kan worden wat de nodige technieken zijn voor de gevraagde luchtkwaliteit te bekomen. Wat de efficiëntie is, wat de kostprijs zou zijn en wat de ecologische voetafdruk is van dit systeem.

1.3. Aanpak

Omdat het gaat om een reviewpaper zal het grootste deel bestaan uit literatuuronderzoek. Dit literatuuronderzoek zal bestaan uit het zoeken naar technieken om de lucht te zuiveren. Om te weten wat luchtkwaliteit is, wordt dit als eerste puntje aangehaald. Daarnaast worden de bronnen, gevolgen en normen beschreven.

Na dit literatuuronderzoek kan er een tool geschreven worden. Hiervoor moet een verzameling van specifieke parameters gemaakt worden van alle soorten. Deze worden in een database gestoken voor de rekentool.

2. Wat is luchtkwaliteit?

De uitdrukking ‘luchtkwaliteit’ bepaalt niet hoe goed de lucht is, maar eerder hoeveel minder schadelijk de lucht is. Dit betekent dus hoe lager deze factor is, hoe beter de luchtkwaliteit is. De luchtkwaliteit wordt uitgedrukt in een index omdat deze van meerdere metingen afhangt. Zo heeft Europa de Common Air Quality Index (CAQI). Deze werd vernieuwd in november 2017 tot de European Air Quality Index (EAQI) door de European Environment Agency (EEA)[2].

Index Class	Grid	ROADSIDE INDEX						BACKGROUND INDEX							
		Mandatory pollutant			Auxiliary pollutant			Mandatory pollutant			Auxiliary pollutant				
		NO2	PM10		PM2.5		CO	NO2	PM10		O3	PM2.5		CO	SO2
			1 hour	24 hours	1 hour	24 hours			1 hour	24 hours		1 hour	24 hours		
Very High	>100	>400	>180	>100	>110	>60	>20000	>400	>180	>100	>240	>110	>60	>20000	>500
High	100	400	180	100	110	60	20000	400	180	100	240	110	60	20000	500
Medium	75	200	90	50	55	30	10000	200	90	50	180	55	30	10000	350
	50	100	50	30	30	20	7500	100	50	30	120	30	20	7500	100
Low	50	100	50	30	30	20	7500	100	50	30	120	30	20	7500	100
	25	50	25	15	15	10	5000	50	25	15	60	15	10	5000	50
Very Low	25	50	25	15	15	10	5000	50	25	15	60	15	10	5000	50
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabel 1: Common Air Quality Index (CAQI) table.[2]

De nieuwe EAQI index is per locatie online te vinden. Elke locatie op de kaart geeft een meetstation weer. Locaties krijgen elk een kleur gelinkt aan onderstaande Tabel 2. De index hangt van de vijf belangrijkste vervuilingen af: PM_{2.5}, PM₁₀, stikstofdioxide (NO₂), Ozon (O₃) en zwaveldioxide (SO₂).

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

Tabel 2: European Air Quality Index tabel (EAQI).[3]

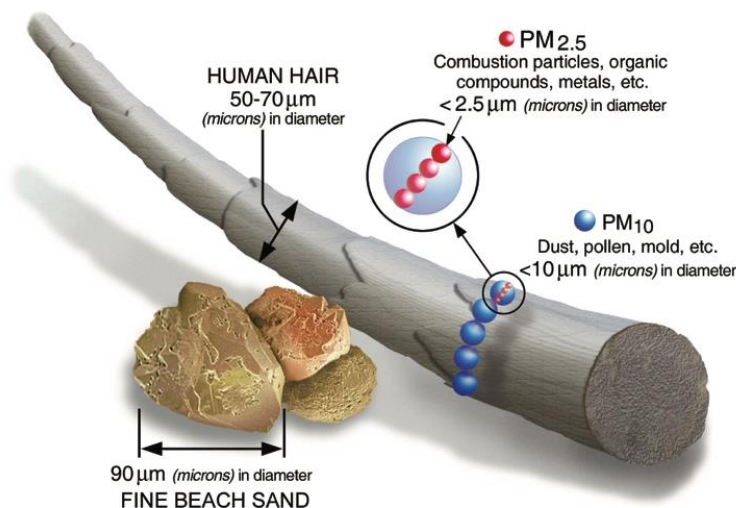
2.1. Luchtvervuilende stoffen

Luchtvervuiling kan voorkomen in verschillende vormen: vaste deeltjes, vloeibare deeltjes of in gasvorm. Onzuiverheden kunnen onder twee groepen gebracht worden: primaire en secundaire onzuiverheden. De primaire onzuiverheden kunnen zowel een antropogene of natuurlijke oorsprong hebben. Secundaire onzuiverheden zijn uitgangspunten van processen die zich in de lucht voordoen.

Daarnaast kunnen onzuiverheden ook opgedeeld worden in drie categorieën. De eerste omvatten de Particulate Matter (PM), de tweede groep zijn de Volatile Organic Compounds (VOC's) of vluchtige organische stoffen (VOS) en de derde groep zijn alle micro-organismen.

2.1.1. Particulate Matter

Particulate matter (PM) of fijn stof zijn zeer kleine deeltjes die zich in de lucht bevinden. Ze kunnen zelden met het blote oog waargenomen worden. Om hier een beeld van te maken, wordt een elektronenmicroscop gebruikt. Ze worden opgedeeld in groepen afhankelijk van hun grootte. [4]



Figuur 2: Visueel beeld van PM deeltjes. [4]

2.1.2. VOS

VOS zijn vluchtige organische stoffen. Ze worden door vaste of vloeistoffen afgegeven. Ook verschillen ze soms in oorsprong. Sommige hebben een antropogene afkomst. Deze zijn afkomstig van raffinage of oplossing van organische oplosmiddelen, etc. Daarnaast zijn er ook stoffen die een natuurlijke oorsprong hebben en uitgestoten worden door planten of ander processen. Er is een lange lijst van VOS producten die hebben allemaal verschillende gevolgen voor de gezondheid en het milieu. [5]

Ze beschikken allemaal over koolstof- en waterstofmoleculen en door hun vluchtig karakter kunnen ze op kamertemperatuur verdampen. Ze zijn niet allemaal even schadelijk. In normale concentraties is bijvoorbeeld ethanol ongevaarlijk. Andere stoffen daarentegen kunnen in normale concentraties reeds een effect hebben op de gezondheid. Zo zijn formaldehyde, allergeen, benzeen, etc. schadelijk voor de luchtwegen en kankerverwekkend. Iedere stof heeft dus mogelijk zijn eigen risico's.

2.1.3. Micro organisme

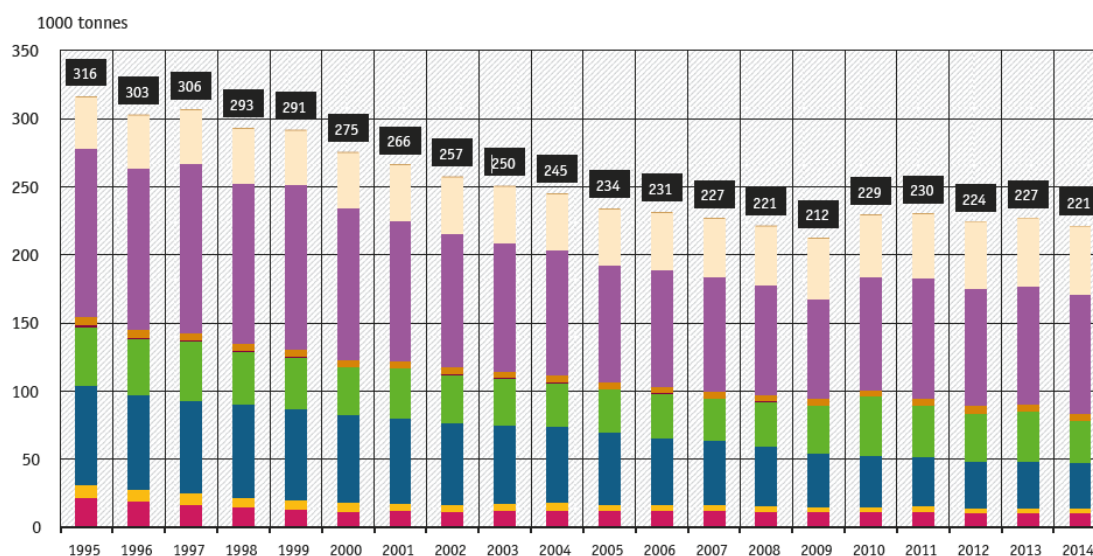
Door bepaalde factoren, zoals de vochtigheid en temperatuur, maakt lucht een goede omgeving voor het verplaatsen van micro organismen.

2.2. Normen en voorschriften

De Europese wetgeving heeft standaarden geïmplementeerd om de luchtkwaliteit te waarborgen op internationaal vlak. Daardoor zijn er richtlijnen over vervuilingen die voor de bescherming van andere sectoren moeten zorgen.

Daarnaast is er een programma opgesteld 'living well within the limits of our planet' [6] dat lange termijn doelen oplegt. De doelen of waardes zijn zo gesteld dat ze geen significante impact zullen hebben op de gezondheid of een risico voor de gezondheid kunnen veroorzaken voor de mens als voor de omgeving. Deze omvatten de Ambient Air Quality Directives (EU, 2004, 2008) en de National Emission Ceilings (NEC) Directive (EU, 2016). [7]

Er bestaat een Europese norm, namelijk de EN 779. Deze heeft betrekking op luchtfilters (grove alsook fijne filtratie) en legt eisen op die gebaseerd zijn op hun gemiddelde rendement. Deze norm is ruim 40 jaar geleden opgesteld. Toen was de industrie ook 40 jaar ouder. Deze hebben ook verbeteringen ondergaan. De norm is met de tijd wel mee geüpdatet maar nog steeds is deze norm een beetje omstreden. Hij houdt rekening met de grove en fijne vervuiling. Tegenwoordig is door de vooruitgang in de industrie de hoeveelheid grotere deeltjes gedaald, zoals weergegeven is in volgende grafiek. Hierin zie je per sector de hoeveelheid PM₁₀ die uitgestoten wordt. Hierin is blauw transport, paars industrie en groen huishoudens. [6], [8]



Figuur 3: PM10 uitstoot per sector.[9]

Mits deze vooruitgang en andere nieuwe eisen is er een nieuwe ISO norm gevormd. Namelijk de ISO16890. Deze beschrijft nieuwe testprocedures voor filtermedia's. Daarnaast zijn de filterclasses opnieuw opgedeeld. Zo is er nu de ISO PM₁, ISO PM_{2,5}, ISO PM₁₀ en ISO Coarse. [9]

	EN 779:2012	ISO 16890
Particle size for classification	• 0.4 µm	<ul style="list-style-type: none"> • 0.3 to 1 µm (PM1) • 0.3 to 2.5 µm (PM2.5) • 0.3 to 10 µm (PM10)
Test aerosol	DEHS (di-ethylhexyl sebacate)	DEHS for 0.3 to 1 µm KCl (potassium chloride) for 2.5 µm and 10 µm
Electrostatic discharge with IPA (isopropanol)	• Sample is fully immersed	• Sample (entire filter) is conditioned with IPA vapour
Efficiency of discharged filter	• Comparison of sample and filter	• Average efficiency of treated and untreated (conditioned) filter
Dust feed for classification	• Incremental dust feed	• Classification without dust feed
Test dust for ISO Coarse and energy efficiency	• ASHRAE	• ISO fine
Dust feed	• 70 mg/m ³	• 140 mg/m ³
Test final differential pressure	<ul style="list-style-type: none"> • G1, G2, G3, G4 = 250 Pa • M5, M6, F7, F8, F9 = 450 Pa 	<ul style="list-style-type: none"> • PM 10 < 50% = 200 Pa • PM10 ≥ 50% = 300 Pa
Classification	<ul style="list-style-type: none"> • G1 to G4 • M5 to M6 • F7 to F9 	<ul style="list-style-type: none"> • ISO Coarse • ISO ePM10 • ISO ePM2.5 • ISO ePM1

Tabel 3: Vergelijking tussen de oude EN 779 norm en de nieuwe ISO 16890.[9]

3. Luchtvervuiling

3.1. Bronnen

3.1.1. Indoor

De luchtkwaliteit in gebouwen is van groot belang. Er wordt gemiddeld 90% van de tijd binnen gesloten muren gependend. Dit kunnen heel veel verschillende soorten gebouwen zijn zoals huizen, burelen, industrie, scholen, winkels, restaurants en andere publieke gebouwen.

Daarom kan een goede indoor luchtkwaliteit de levenskwaliteit aanzienlijk verbeteren. Binnenhuis zijn een aantal bronnen die zorgen voor een verontreinigde lucht. [10]



Figuur 4: Bronnen van indoor luchtvervuiling: 1) rookgassen 2) allergenen 3) carbonmonoxide CO en stikstofdioxide NO₂ 4) vocht, bevat bacteriën en schimmels die binnenshuis kunnen groeien 5) synthetisch chemische stoffen uit huishoudelijke producten 6) radon.[10]

3.1.2. Outdoor

Naast het belang van de indoor luchtkwaliteit spendeert men de andere 10% buiten. Deze 10% heeft dus ook een invloed maar in mindere mate op onze gezondheid. Daarnaast is de luchtkwaliteit buiten van groot belang op ecologisch vlak. Zo is er de opwarming van de aarde als eerste grote voorbeeld hetgeen een gevolg is van de luchtvervuiling. Daarnaast hebben ze een invloed op de beplanting. Oogsten zullen verslechteren en de economie wordt beïnvloed. Er zijn dus zowel gevolgen indoor als outdoor. Outdoor of buitenhuis verontreinigende bronnen (zie Figuur 5) [11]



Figuur 5: Bronnen van outdoor luchtvervuiling: 1) Landbouw omsluit 90% van de ammoniak vervuiling en 80% van de methaan gassen 2) energie productie en distributie 3) natuurlijke fenomenen zoals vulkanische uitbarstingen, bosbranden, stomen 4) afvalverbranding, koolmijnen en lange afstand gastransport zijn bronnen van methaan 5) Wegtransport zorgt voor meer dan 40% van de stikstofoxide en bijna 40% van primair $PM_{2,5}$ 6) verbranding van brandstof, dragen bij voor 50% van de $PM_{2,5}$ en CO. [11]

3.2. Gevolgen

Al deze onzuiverheden in de lucht hebben een grote impact op allerlei vlakken. Ze zijn zeer ongezond en zullen zorgen voor vroegtijdige sterfte door cardiovasculaire aandoeningen. Ze kunnen de longen aantasten, astma veroorzaken en tevens zijn ze een grote oorzaak voor vroegtijdige sterfte. Verbonden aan deze vele gezondheidsproblemen zijn natuurlijk economische kosten. Alle ziekte of vroegtijdige sterfte resulteert rechtstreeks in een vermindering in werkkrachten en een toename in kosten aan mensen die zorg nodig hebben.

Los van bovenstaande heeft de luchtvervuiling ook een invloed op het ecosysteem. Vegetatie en biodiversiteit zullen afnemen door een overmaat aan luchtvervuiling en natuurlijke filtratie door bomen en andere vegetatie zal verminderen.

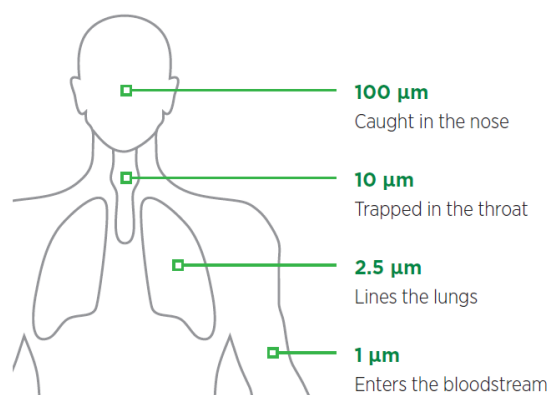
3.2.1. Gezondheid

Luchtvervuiling heeft een grote invloed op de levenskwaliteit. Afhankelijk van de geografische ligging kan de luchtkwaliteit enorm verschillen. Op het platteland vind je vanzelfsprekend betere luchtkwaliteit dan in steden. Daar waar meer bebouwing is, minder vegetatie, meer industrie en transport zal de luchtkwaliteit dalen.

De meest schadelijke producten in luchtvervuiling zijn PM, NO₂ en VOS. Daarom zijn deze reeds aangehaald ter verduidelijking.

In 2014 was PM_{2.5} de oorzaak voor de sterfte van 428 000 prematuren door blootstelling op lange termijn. Daarnaast waren de concentraties NO₂ en O₃ de oorzaak van 78 000 en 14 400 premature sterfte per jaar. [7]

Ook micro-organismen hebben een invloed op de gezondheid. Gevolgen zijn geïrriteerde luchtwegen, allergieën, astma, hoofdpijn en ziektes of infecties. Zowel mensen op oudere leeftijd als kinderen zijn gevoelig. Daarnaast is luchtvervuiling een grote oorzaak voor cardiovasculaire aandoeningen, kanker en vergiftiging. [12], [13]



Figuur 6: Visuele weergave doordringbaarheid.[8]

3.2.2. Economie

Naast de effecten op de gezondheid is er ook een invloed op de economie. Door de luchtvervuiling is er een afname van werkkraft. Het eerste gevolg is dat dit minder werkkraft oplevert. Dit wil zeggen dat ondernemingen een deel inkomsten moet laten liggen. Naast werkkraft is er ook een verlies door bijvoorbeeld slechte oogsten die men hierdoor behaald. Daarnaast zijn er extra kosten door gezondheidsproblemen die vergoed moeten worden. Deze gevolgen kunnen leiden tot stagnatie van de economie. Het zal de economische groei beperken. [7]

3.2.3. Ecosysteem

Bomen en andere vegetatie zijn belangrijk voor het opnemen van bepaalde stoffen uit de lucht. Ze zijn één van de belangrijkste zuiveringsmechanismen op aarde die zorgen voor een betere kwaliteit van de lucht. Maar ook voor bomen is een te hoge concentratie aan sommige stoffen schadelijk. Zo wordt door te veel aan ozon de membranen van de cellen beschadigd en de capaciteit om de belangrijkste chemische processen uit te voeren beperkt. De vermindering van bodembedekking zal ook zorgen voor minder filteren van de omgeving. Ozon (O_3), NO_2 en PM die normaal worden opgenomen door vegetatie zal in de lucht blijven hangen.

Het water wordt door zwavel en stikstof dioxide vervuild, waardoor de gekende zure regen ontstaat. De stijging van zuurtegraad zorgt voor een omgekeerd effect op fauna en flora.

Het effect op water is ook aanzienlijk. Door een toename van stikstof in water worden veel voedingsstoffen gevormd die in water zorgen voor een grote algengroei en dus afname van zuurstofgas. Daardoor ontstaat er een vermindering aan biodiversiteit in het water. Ook de voorraad aan kwalitatief drinkwater zal afnemen[14].

4. Zuiveringstechnieken

Er bestaan verscheidene zuiveringstechnieken. Dit is logisch aangezien er een breed gamma is aan mogelijke contaminaties en niet alle contaminaties op dezelfde manier gefilterd kunnen worden. Daarom zal er vaak een combinatie gemaakt worden van verschillende technieken. Afhankelijk van de nodige zuivering en efficiëntie zal er een andere combinatie van technieken gekozen worden.

Techniek	Grofvuil	PM	VOS	NO _x	H ₂ S	NH _x	Geur	Dioxines	micro organisme	Solventen	Zuur/basisch	metalen
Absoluutfilter		x							x			x
Doekenfilter	x	x										
Adsorptie		x	x		x	x	x	x		x		
Gaswassen		x	x		x		x				x	
Elektrostatisch		x	x				x		x			
Foto-oxidatie			x	x	x	x	x					

Tabel 4: samenvatting per techniek welke producten elk kan filteren

Techniek	debiet (Nm ³ /h)	temperatuur (°C)	relatieve vochtigheid (%)	druk (bar)
Absoluutfilter	100 - 3600	<200 of <500	<95	1
Doekenfilter	300 - 1 800 000	<280	-	-
Adsorptie	-	<50	<70	1 - 20
Gaswassen	50 - 500 000	5 - 80	-	-
Elektrostatisch	20 - 200 000	20 - 80	laag	-
Foto-oxidatie	1000 - 58000	<60	<85	1

Tabel 5: algemene randvoorwaardes per techniek

Techniek	investeringskost (€)	onderhoudskost/jaar (€)	Energiekost (€)	Totaal (€)
Absoluutfilter	2400	120	193	2713
Doekenfilter	5000	250	3854	9104
Adsorptie	10000	900	0	10900
Gaswassen	30000	5000	1927	36927
Elektrostatisch	1300	400	5782	7482
Foto-oxidatie	7000	1777	2891	11668

Tabel 6: samenvatting van de geschatte kosten per techniek

Deze kosten zijn berekend per 1000 Nm³/h geïnstalleerde capaciteit. De prijzen zoals investeringskost en onderhoudskost hebben een bepaalde marge. Hiervoor zijn de bovenste grenzen genomen. Daarnaast is er bij de absoluut- en doekenfilter geen filtermedium in rekening gebracht omdat deze moeilijk op voorhand te bepalen zijn. De energie is berekend voor de installatie als die vol continu zou draaien. De prijs per kWh komt overeen met 0.22 euro/kWh. [15]

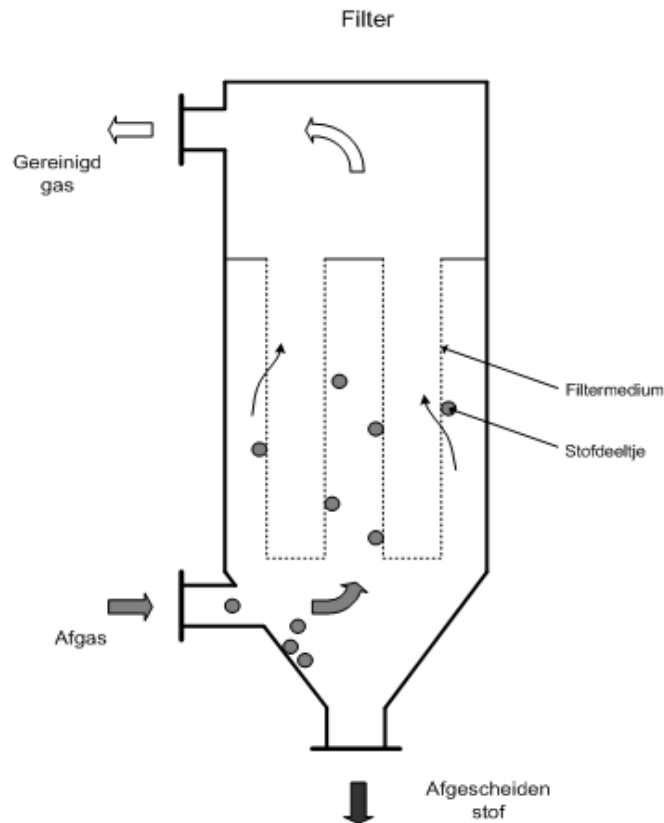
4.1. Filtratie.

Door filtratie wordt stof verwijderd, het afgas, of vervuilde lucht gaat door een filtermedium. Er bestaan verscheidene filtermedia zoals textiel, kunststof, etc. Deze filtertechniek wordt gebruikt om stof en deeltjes te verwijderen. Dit principe bestaat in allerlei vormen en afmetingen afhankelijk van de toepassing. Deze toepassing heeft ongeveer een rendement tussen de 99 en de 99,9% en kan werken tot een debiet van $1,8 \cdot 10^6 \text{ Nm}^3/h$

Door variëteit in filtermedia is er de mogelijkheid om in verschillende omstandigheden te filteren. Zo bestaan er varianten op dit basisprincipe met elk hun eigen voor- en nadelen als specifieke randvoorwaarden.

Varianten zijn absoluut filter, doekfilter, keramische filter of mistfilter.

Omdat al deze filtermedia hetzelfde principe omvatten, maar zeer verschillende rendementen en werkingsgebied hebben, worden deze apart besproken. [16]



Figuur 7: Schematische weergave filter. [16]

4.2. Absoluut filter

Een andere benaming voor een absoluut filter is de HEPA-filter. In 1940 is de eerste glasvezel filter gepatenteerd geweest. Daarna ontwikkelde de luchtfilter naar de bekende HEPA-filter. High efficiency particle air filter, deze bestaat uit heel fijne vezels die een efficiëntie van 99,9998% kan behalen voor deeltjes $\geq 3 \mu m$ fijnstof. Doordat de vellen van bijvoorbeeld glasvezels zo dicht zijn, gaat er weinig lucht door. Als je dan een groter debiet wilt filteren is het nodig om het te filteren oppervlak zo groot mogelijk te maken. Hiervoor gebruikt men het principe van een accordeon en zijn er veel vouwen die dicht bij elkaar liggen. Als men deze zou uittrekken krijgt men een aanzienlijk groter oppervlak dan blijkt verwerkt te zit in de toepassing. De vorm van deze filtermedia zijn voornamelijk rechthoekig of cirkelvormig.

Sinds 1950 bestaat de ACF (activated carbon fiber), dit is een zeer goede luchtfilter. Naast mechanische filtering van PM heeft deze een grote adsorptie capaciteit en een uniforme poriegrootte. Daarnaast is hij makkelijk te regenereren.

ULPA (ultra low penetration air filter) bestaat sinds 1990 en heeft een efficiëntie van 99,99999% voor PM $\geq 0,1 \mu m$ fijnstof. Deze wordt gebruikt voor toepassingen waar uiterst hoge luchtkwaliteit vereist is zoals in ruimtevaart, nauwkeurige werktuigen en elektronica.

Nog fijnere filters zijn ook mogelijk maar dan daalt het rendement, zo haalt een filter die PM $\geq 0,01 \mu m$ kan filteren nog een rendement van 99,99%.

De veelgebruikte glasvezel filters hebben een temperatuur bestendigheid tot 280°C. Andere, meer specifieke hittebestendige filtermedia, kunnen gaan tot 530°C.

Naargelang de levensduur van de filter gaat deze meer verzadigd zijn met (fijne) stofdeeltjes. Dit is daarom niet slecht. Naarmate deze meer verzadigd is, zal het filterrendement toenemen. Natuurlijk kan dit niet blijven doorgaan omdat de druk eveneens mee zal stijgen waardoor de nodige energie voor de aandrijving zo zal toenemen dat het ongunstig wordt. Het is dan beter om de filter te vervangen/reinigen. Standaard wordt in dit principe de filter vervangen omdat een HEPA filter reinigen mogelijks beschadigingen kan opleveren wat natuurlijk het filterrendement zwaar omlaag zal halen.

De randvoorwaardes voor deze toepassing:

Debiet: 100 – 3600 Nm³/h

Temperatuur: <200°C of <500°C (indien hittebestendige uitvoering)

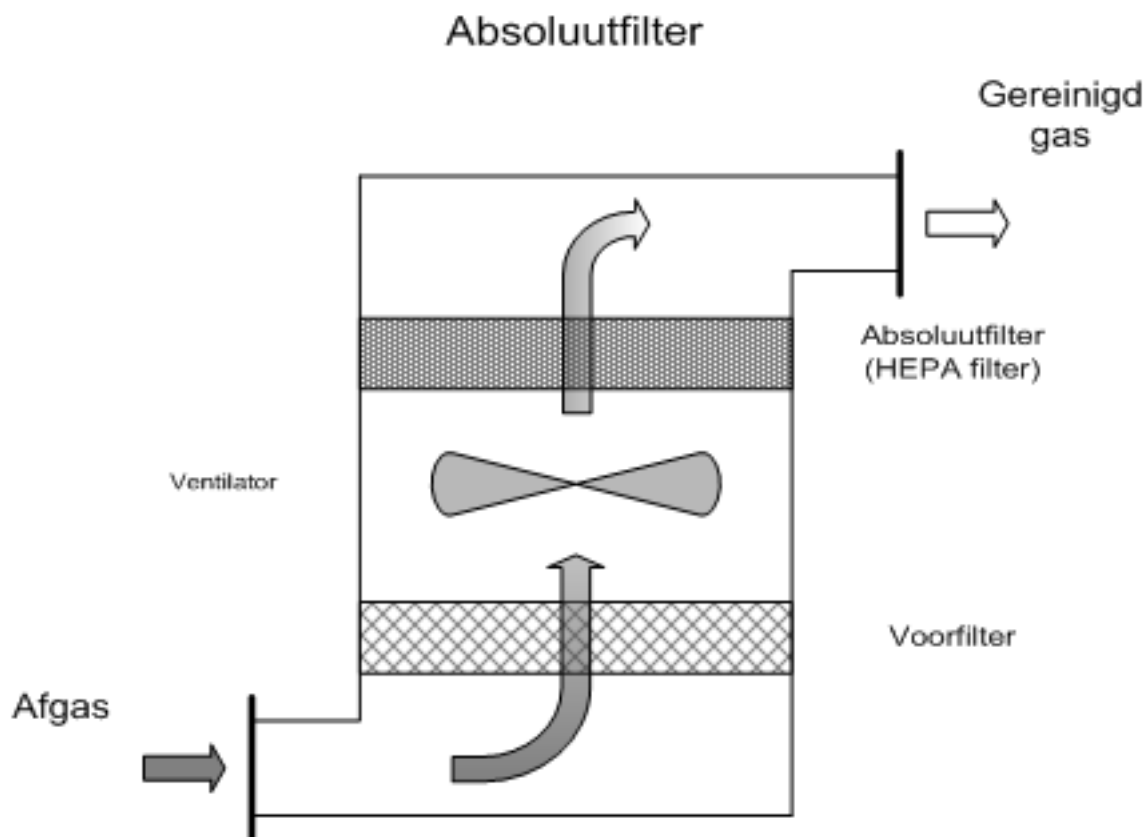
Vochtigheid: <95 %

Druk: atmosferedruk

Binnenkomende pollutie: <30g/Nm³

Indien dit hoger ligt wordt, is het aangeraden een voorafgaande filterstap te zetten vb. doekenfilter.

Deze techniek wordt vaak in combinatie gebruikt met elektrostatische of doekenfilter en vooral bij indoor luchtzuivering waar hoge luchtkwaliteit vereist is. Dit kan gaan tot op sub-micron niveau. [16]



Figuur 8: Voorstelling absoluut of HEPA filter.[16]

4.2.1. Efficiëntie

De efficiëntie van de filtermedia varieert afhankelijk van de fijnheid van de filter. Zoals uitgelegd heeft een normale HEPA filter een efficiëntie tot 99,9998% voor deeltjes $\geq 3 \mu m$. Daarnaast zijn er de ULPA's die veel fijner kunnen filteren en gaan tot 99,999999% voor deeltjes $\geq 0,1 \mu m$.

4.2.2. Ecologische voetafdruk

Deze filter heeft een ventilator aandrijving nodig. Daarnaast is het energieverbruik zeer laag, namelijk 0,1kW per 1000 Nm³/h.

Daarnaast zijn er de filterelementen die opgevangen stofdeeltjes bevatten. Dit wordt gezien als een afvalproduct mits ze zelden hergebruikt worden.

4.2.3. Economisch

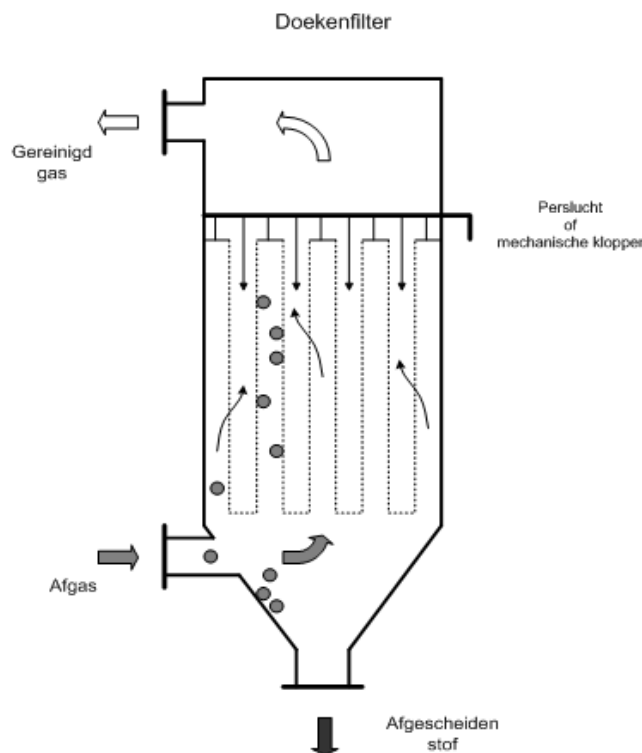
De kosten voor deze installatie zijn op te delen in de investeringskosten en werkingskosten. Voor een installatie varieert de prijs tussen de 1800 en de 2400 € per 1000 Nm³/h.

Daarnaast zijn er, afhankelijk van de grootte, onderhoudskosten. Deze omvatten afvalstoffen en personeelskosten. De afvalstoffen kosten 60 – 120€ per jaar per 1000 Nm³/h. En de personeelskosten hangen van de grootte af en kunnen oplopen tot 2500€ per jaar.

De energiekost ligt bij deze installatie behoorlijk laag. Zoals al vermeld werd is het verbruik per 1000 Nm³/h slechts 0,1 kW voor een installatie van 1000 Nm³/h.

4.3. Doekenfilter

Een doekenfilter is een simpel principe. Hier wordt in een behuizing een filtermedium aangebracht. De behuizing wordt in twee compartimenten verdeeld door een filterdoek. Dit scheidt de zuivere kant van de vuile kant. Vaak wordt voor continue bedrijfszekerheid deze stap verdeeld over verschillende kanalen via een aftakking. De drukverdeling wordt geopteerd zo evenredig mogelijk te zijn. Daarnaast wordt door deze scheidingskanalen of platen de kinetische energie verlaagd en ondergaat de lucht een eerste afscheiding van onzuiverheden door de zwaartekracht.



Figuur 9: Schematische weergave doekenfilter.[16]

De filter heeft periodieke reiniging nodig voor het ontdoen van grofvuil en stof. Het kan op verscheidene wijzen gereinigd worden. Bijvoorbeeld door middel van schudden, perslucht, terugblazen, etc.

Het doek of filtermedia kan bestaan uit verscheidene materialen en wordt opgedeeld in 2 grote groepen. Weefsel doeken zijn tweedimensionale netwerken die op geweven manier door mekaar gaan. Deze hebben een hoge plooibaarheid en permeabiliteit. De andere zijn vilten doeken met een driedimensionaal netwerk van vezels. Deze doeken hebben een betere filterwerking en zijn mechanisch sterker. Andere eigenschappen hangen af van de soort vezel die gebruikt wordt. [16]

De mogelijke materialen zijn vervolgens in de volgende tabel weergegeven met hun randvoorwaarde.

filtermateriaal	Dralon-T	Nomex	PTFE	Glasvezel
Max. temperatuur (°C)	130 °C	200 °C	260 °C	220 - 280 °C
Vochtbestendigheid	goed	matig	uitstekend	goed
Zuurbestendigheid	goed	matig	uitstekend	goed
Base bestendigheid	matig	goed	uitstekend	matig
Mechanische sterkte	goed	goed	redelijk	redelijk
Brandgevoeligheid	brandbaar	Niet brandbaar	Niet brandbaar	Niet brandbaar
Relatieve prijs	1	2,5 - 3,5	10-15	4-6

Tabel 7: Eigenschappen doekenfilter per materiaalsoort.[16]

Randvoorwaardes voor het dimensioneren en ontwerpen van een installatie zijn het debiet, de werkingstemperatuur, de samenstelling van de te zuiveren lucht en het filter-ratio(m²/h). De drukval bij deze installatie is afhankelijk van het filterontwerp, filtermedium en de neerzetting op de filter.

Debieten: 300 m³/h – 1,8 · 10⁶ m³/h

Contaminatie (voor filteren) 0,1- 230 g/Nm³

Volgens volgende vergelijking kan de drukval over een zuiver filterdoek beschreven worden:

$$\frac{\Delta p_m}{\Delta l} = 64 \cdot (1 - \varepsilon)^{1,5} \cdot [(1 + 56 \cdot (1 - \varepsilon)^3)] \cdot \frac{\eta \cdot \nu}{D_f^2}$$

hierin is:

Δp_m = de drukval over het vezeldoek

Δl = de dikte van de vezeldoek

ε = de filterdoekbelasting

η = de porositeit van het filtermedium

ν = de dynamische viscositeit

D_f = de vezeldiameter

Volgens volgende vergelijking kan de drukvariatie benaderd worden na neerzetting van deeltjes op de filter:

$$\Delta p_s = K_s \cdot \eta \cdot \nu \cdot W(t)$$

$$W(t) = E \cdot c \cdot \nu \cdot t$$

hierin is:

Δp_s = de druk val over het vezeldoek

K_s = de weerstand van de neerslag op de filter

ν = de dynamische viscositeit
 W = de massa van neergezette stof
 c = de stofconcentratie
 E = de afscheidingsgraad
 t = de tijd

4.3.1. Efficiëntie

De efficiëntie van deze filters ligt tussen de 99 en 99,9 %. Gewoonlijk hebben overblijvende contaminaties een concentratie van $< 10 \text{ mg/Nm}^3$.

4.3.2. Ecologische voetafdruk

Naast de filterdoeken en filterbehuizing is er enkel de energie die verbruikt wordt door de filter. Dit verbruik varieert tussen de 0,2 en 2 kWh/1000 Nm³

4.3.3. Economisch

De energie die verbruikt wordt, varieert tussen de 0,2 en 2 kWh/1000 Nm³. Investeringskosten van deze installatie zijn afhankelijk van de capaciteit die de installatie moet aankunnen. Deze kosten liggen tussen de 1500 -13700 €. Daarnaast is er de investering van het filtermateriaal dat afhankelijk is van de oppervlakte die nodig is (zie Tabel 8).

Filtermateriaal	Richtprijs (€/m ²)
Dralon-T	15
Nomex	60
PTFE	80
glasvezel	180

Tabel 8: Prijs per materiaalstof.[16]

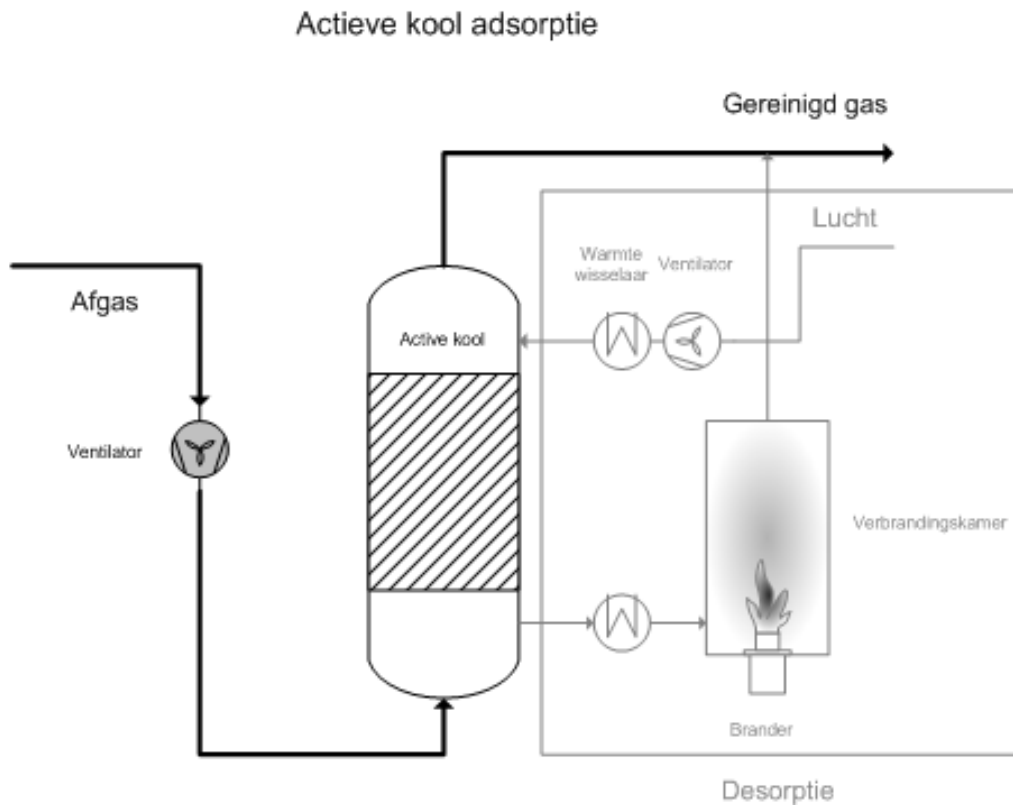
Reststoffen die afgevoerd moeten worden, kosten 100-140€ per jaar aan transport voor een installatie van 1000Nm³/h, en afhankelijk van de soort stof 75-250€ /ton om het afval te verwerken. Tijdens in bedrijfsstelling heeft de installatie nog een bedrijfskost van rond de 0,2€ per Nm³/h

Capaciteit in m ³ /h	Relatieve Investeringskosten (€)
> 100 000	1 – 4
10 000 – 100 000	4 – 7
1 000 – 10 000	7 – 13
< 1 000	> 13

Tabel 9: Relatieve investeringskost installatie doekenfilter.

4.4. Adsorptie

Dit is een techniek waarbij producten zoals VOS, H₂S, NH₃, metalen, geur, dioxines en andere oplossingen gescheiden worden van de lucht. Een zeer veel gebruikte methode is actieve koolstof adsorptie. Een schematische weergave is hieronder in Figuur 10 weergegeven. Door het micro-poreuze koolstofmatrix ontstaat er een zeer groot oppervlak. Dit oppervlak kan variëren tussen de 700 en 1500 m²/g. Daardoor is dit product ideaal voor adsorptie. [16]



Figuur 10: Adsorptie schematische voorstelling.[16]

In dit proces is de verzadigingsgraad van belang. Deze wordt uitgedrukt in gram opgevangen producten over kg actieve koolstof. Hoe meer de lucht vervuild is, hoe sneller de verzadigingsgraad zal toenemen. De capaciteit voor actieve koolstof ligt tussen de 20 en 25 gram gefilterde producten per 100 gram van het filtermedia, in dit geval actieve kool.

Dit principe van zuivering wordt vaak in combinatie gebruikt met absoluutfilters, doekenfilters of andere technieken. Er zijn ook mogelijke hulpstoffen die toegevoegd kunnen worden afhankelijk van het debiet, temperatuur, ect. [17]

De randvoorwaardes voor dit proces zijn:

Temperatuur: <50 °C

Relatieve vochtigheid: <70 %

Stofgehalte: laag

Druk: 1 – 20 bar

VOS 10 – 100 000 mg/Nm³

4.4.1. Efficiëntie

Afhankelijk van de graad en soort van verontreiniging kunnen rendementen tussen de 95% en 98% behaald worden. Een verhoging in ofwel de temperatuur of vochtigheid zullen het rendement negatief beïnvloeden. Voor geur en H₂S worden rendementen tussen de 80% en 95% behaald.

4.4.2. Ecologische voetafdruk

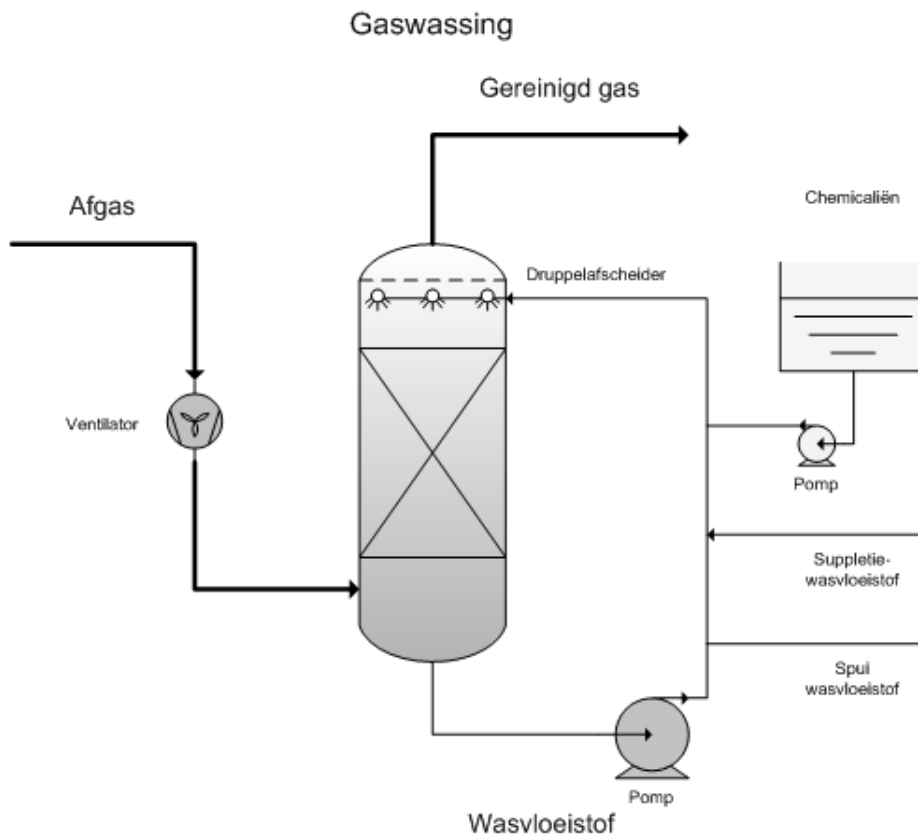
De gebruikte actieve kool kan ofwel worden geregenereerd ofwel beschouwd worden als afval. Het regenereren is meestal eveneens de economisch voordeligste oplossing. Buiten dit regeneratie of productieproces is er geen energieverbruik in deze techniek.

4.4.3. Economisch

Een installatie kan variëren, met of zonder regeneratiesysteem. De kostprijs voor het zetten van een installatie zonder regeneratiesysteem ligt tussen de 5 000 en 10 000 € per 1 000 Nm³/h. De bedrijfskost ligt tussen de 20 en 100 € per 1 000 m³ die gefilterd wordt. De aankoop van de actieve kool ligt rond de 900 € per ton en kan duurder oplopen indien dit opgehaald en verwerkt of geïmpregneerd moet worden.

4.5. Gaswassen

Een andere benaming voor dit proces is absorptie. In dit proces wordt een gasstroom in contact gebracht met een vloeistof. Hierdoor zullen specifieke componenten in dit gas overgaan naar de vloeistof. Deze componenten ondervinden dus een overgang van gasfase naar vloeistoffase. Voor iedere component is deze oplosbaarheid anders. [16]



Figuur 11: Schematische weergave van gaswassen. [16]

Met de wet van Henry kan bepaald worden welke concentratie maximaal kan oplossen in het wasmiddel. Hoe hoger de druk, hoe meer producten zullen opgevangen worden door de vloeistoffase.

$$p = H \cdot x$$

p = partiële druk in pascal

x = molfractie

H = Henryconstante in pascal

Naast de druk, kan ook de temperatuur de oplosbaarheid beïnvloeden. Hoe lager de temperatuur, hoe meer producten in de vloeistoffase worden opgenomen.

De hoeveelheid wasvloeistof (water) is afhankelijk van het debiet dat opgegeven wordt om te filteren en de concentratie van de in en uitgaande gasvormige componenten die men wenst weg te filteren.

In de wasvloeistof worden vaak chemicaliën toegevoegd. Deze zorgen dat de geabsorbeerde componenten omgezet zullen worden zodat de concentratie van het product in de vloeistof laag blijft wat het proces gunstig beïnvloed.

De randvoorwaarden voor deze techniek zijn debiet, temperatuur en er is een maximale hoeveelheid aan contaminanten in de luchtstroom.

Debiet: 50 – 500 000 Nm³/h

Temperatuur: 5 - 80 °C

Deeltjes: < 10 mg/m³

Tijdens het proces is de L/G verhouding van belang. (Liquid/Gas)

Deze techniek is geschikt om stof, geur en andere gasvormige componenten te verwijderen.

4.5.1. Efficiëntie

Met dit proces kunnen rendementen van >99% gehaald worden.

4.5.2. Ecologische voetafdruk

Dit proces maakt gebruik van een vloeistof om lucht te reinigen. Deze vloeistof, vaak water, wordt soms als afvalwater gezien maar kan ook hergebruikt worden door het in te dampen.

Indien door reacties de pH niet meer goed ligt kan er gedeeltelijk gespuid worden.

Naast deze afvalproducten is er het energieverbruik. Dit ligt tussen de 0,2 en de 1,0 kWh per 1000 Nm³.

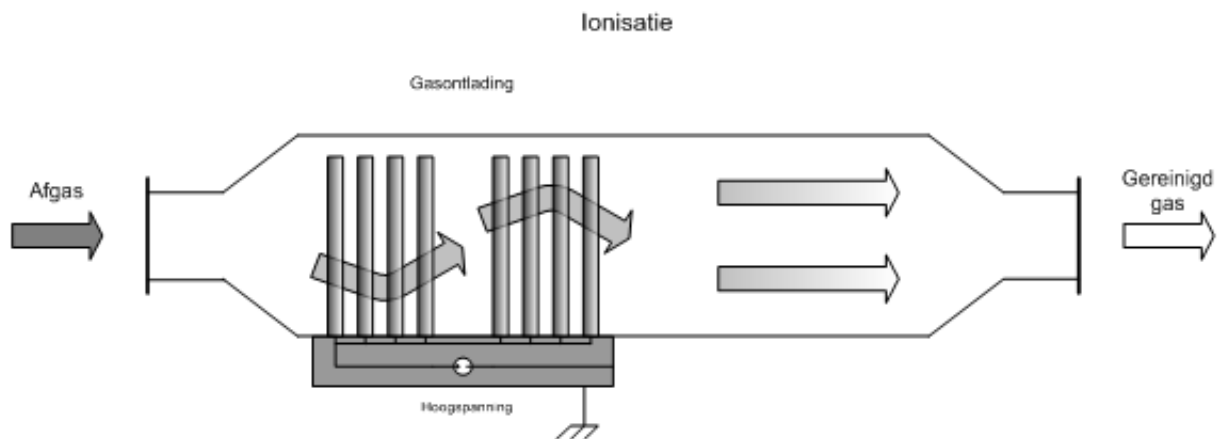
4.5.3. Economisch

De energie die verbruikt wordt door de toepassing. Dit verbruik varieert tussen de 0,2 en 1,0 kWh/1000 Nm³.

De investeringskosten van deze installatie zijn sterk variërend (door grote verschillende soorten recirculatie wassers afhankelijk van de toepassing). Deze kosten liggen tussen de 2000 en de 30 000 €. Daarnaast is dit een techniek die relatief veel onderhoud vraagt en een kost met zich meebrengt van ongeveer 5000 €/jaar voor 4 werkuren per week.

4.6. Elektrostatisch scheiden

Deze techniek is een zeer veel gebruikte techniek. Het principe is ontstaan in 1907 door Dr Frederick Cottrell. De deeltjes in de lucht die deze filter binnen komen verplaatsen zich tussen de platen door. Deze platen verschillen in polariteit. Om zo veel mogelijk oppervlakte te creëren, worden lamellen gebruikt voor de efficiëntie te verhogen. Daarnaast kan de efficiëntie ook verhoogd worden door hogere spanningsverschillen tussen de platen. Maar dit heeft ook een bijkomend nadeel. Door het verhogen van deze spanning, zal de ozonvorming door ionisatie toenemen.



Figuur 12: Schematische weergave ionisatie.[16]

De lamellen of elektrodes ondervinden dus een elektrisch veld. Dit kan tussen de 20-30 kV liggen. Door dit elektrisch veld verandert de toestand van de binnenkomende lucht. Deze lucht wordt geïoniseerd (koud plasma). De gasmoleculen zijn nu reactief. De hoog reactieve componenten in deze lucht zorgen voor een afbraak (oxidatie) van de verontreiniging. In dit proces wordt voornamelijk N_2 , O_2 en H_2O gevormd.

Deze installaties beschikken meestal over een systeem dat zichzelf reinigt. Dit kan op verschillende manieren gebeuren door zowel perslucht, water, of trillingen. De verontreinigingen worden dan onderaan of op andere plaatsen opgevangen en verwijderd.

Deze toepassing kan gebruikt worden voor het filteren van geuren, stof en VOS.

Door de oxidatie kan er als bijproduct ozon gevormd worden. Afhankelijk van waar de techniek gebruikt wordt kan dit schadelijk zijn. Daarom wordt soms een katalysator toegevoegd die op kamertemperatuur deze ozon kan verwijderen. [16] [18]

Een veelgebruikte katalysator is hier actieve kool.

De randvoorwaardes voor deze techniek:

Debiet: 20 – 200 000 m³/h

Temperatuur: 20 – 80 °C

VOS concentratie: Laag

Relatieve vochtigheid: Laag

Druk: Atmosferisch

Fijnstof: laag

4.6.1. Efficiëntie

De efficiëntie van deze installatie hangt af van de configuratie en toepassing.

Voor stofverwijdering loopt dit van 90 tot 99,0%. De geurverwijdering ligt tussen de 80 en 99,7%. En VOS verwijdering haalt een rendement van 97 tot 99,9%.

4.6.2. Ecologische voetafdruk

Afhankelijk van de ingestelde ionisatiegraad kan er een grotere hoeveelheid ozon (O₃) geproduceerd worden. Hierin wordt vooral op indoor filtratie gekeken omdat het in bepaalde concentraties schadelijk en storend (geur) kan zijn. In andere (atmosferische) omstandigheden wordt hier geen groot probleem van gemaakt mits dit snel terug omgezet wordt tot zuurstof.

Naast Ozon zijn er nog twee bijproducten die gevormd worden. NO_x en SO_x. Deze concentraties zijn zo laag dat ze bijna niet detecteerbaar zijn en dus mogen verwaarloosd worden. [18]

De gefilterde polluties worden tijdens de reiniging ontdaan van de filter door water of een ander reinigingsproduct. In dit water bevindt zich dan een hoeveelheid afval.

De filterinstallaties hebben voornamelijk een energieverbruik rond de 0,5-3kWh per 1000 m³ gefilterde lucht.

4.6.3. Economisch

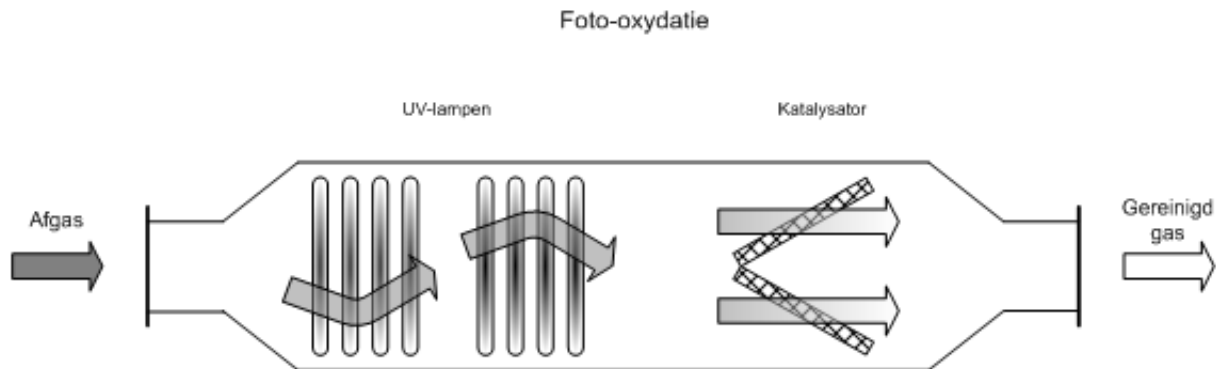
Zoals net vermeld heeft deze techniek een energieverbruik rond de 0,5-3kWh per 1000 m³ gefilterde lucht.

Deze techniek heeft een investeringskost voor rechtstreekse ionisatie op de luchtstroom en ligt rond de 1300€ per 1000 Nm³/h geïnstalleerde capaciteit. Daarbij komen nog de onderhoudskosten van 400€ per jaar voor een installatie van 1000 Nm³/h.

4.7. Foto-Oxidatie

Een andere benaming voor Foto-oxidatie is UV-oxidatie. Tijdens dit proces wordt de vervuilde lucht door een reactorkamer gestuurd. In deze reactorkamer zitten UV-lampen. Deze lampen zijn UVC-lampen en hebben een golflengte tussen de 80 en de 280 nm.

Dit proces is geschikt voor het afbreken van zowel organische als anorganische stoffen of organismen. Daarnaast is dit proces geschikt voor het verwijderen van geuren.



Figuur 13: Schematische weergave foto-oxidatie.[16]

De UV-oxidatie bevat twee mechanisme of reacties. Rechtstreekse fotolyse: tijdens dit proces zal door de specifieke golflengte van de UVC-lampen componenten zoals VOS, NH₃, H₂S, amines, etc. afgebroken worden.

Een tweede mechanisme dat plaatsvindt, is een oxidatiereactie door de aanwezigheid van hoog reactieve zuurstofradicalen. Hierbij worden andere aanwezige componenten alsook reactieproducten van de voorgaande fotolyse verder geoxideerd tot CO₂, H₂O, N₂ en SO₂.

Voordelen van deze toepassing zijn dat ze zowel binnen als buiten toegepast kunnen worden en weinig extra verliezen hebben bij het opstarten.

Om dit proces toe te passen zijn er natuurlijk randvoorwaarden. Deze bepalen in welke omstandigheden deze techniek toegepast kan worden.

Debiet: 1 000 tot 58 000 m³/h

Temperatuur: <60 °C

Relatieve vochtigheid: <85%

Druk: atmosferisch

VOS concentratie: <500 mg/m³

Concentratie H₂S, NH₃, amines, mercaptanen, etc.: <50 ppm

Fijnstof: indien hoge concentratie is een voorfilter nodig

Net zoals andere toepassingen wordt ook dit proces gebruikt in combinatie met andere. Bij te hoge vochtigheid kan voor de oxidatie-eenheid bv. een demister geplaatst worden. Om de overgebleven ozon verder te laten reageren tot zuurstof kan een tweede lamp gezet worden

met een andere golflengte. Vaak wordt dit proces vervolgt met een katalysator zoals actieve kool. Daardoor zal overgebleven ozon verder omgevormd worden tot zuurstof.

4.7.1. Efficiëntie

Het rendement voor vluchtige organische stoffen (VOS) ligt hier op 95%. Indien de startconcentratie <math><500\text{mg}/\text{m}^3</math> is.

Voor geurverwijdering zijn er rendementen tot 90% mogelijk. En voor H_2S (ook geurverwijdering) is er een rendement van 98% haalbaar. Hierbij liggen de grenswaardes voor beginconcentratie op <math><50\text{ppm}</math>

4.7.2. Ecologische voetafdruk

De lampen hebben een levensduur van ca. 8000 u, hierna wordt deze lamp als afval of vervuiling beschouwd.

Mogelijk bevat de gezuiverde lucht een restproduct namelijk ozonmoleculen. In hoge concentraties kan dit schadelijk zijn voor de gezondheid en een geur geven. Daarom wordt dit in combinatie geplaatst met andere technieken zoals reeds vermeld. Echter moet hier enkel rekening gehouden worden bij binnenhuis installaties. In normale atmosferische condities wordt dit snel omgevormd tot zuurstofgas.

De gebruikte lampen hebben een vermogen van 0,3kW per 1000m³/h en kan oplopen tot 1,5kw per 1000 m³/h indien de lucht moeilijk oxideerbare producten bevat.

4.7.3. Economisch

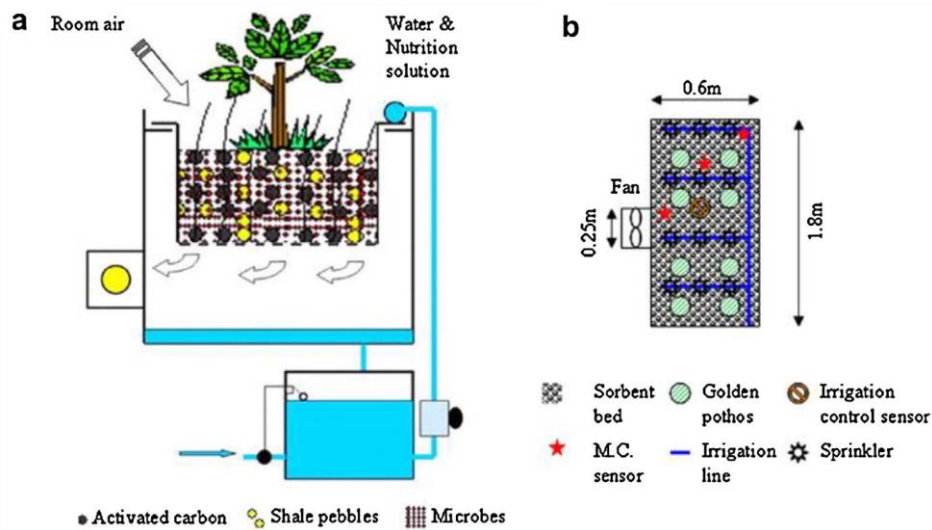
De investeringskosten van deze installatie variëren tussen de 5000 en 7000 € per 1000 Nm³/h.

De productiekosten van deze installatie omvatten enkel het verbruik van de lamp en onderhoud zoals de lamp vervangen (0,06-0,2 € per 1000Nm³/h). Indien er een katalysator gebruikt wordt kunnen deze een extra kost van 0,06-0,12 € per 1000Nm³/h opleveren.

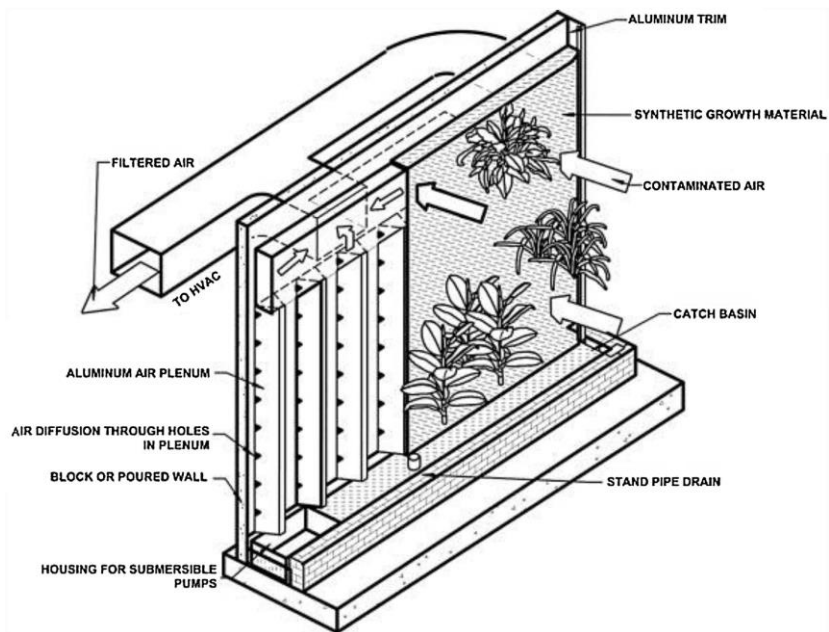
Deze kosten kunnen uitgedrukt worden in euro per kg VOS verwijderd, en zal tussen de 3-25 €/kg VOS.

4.8. Andere technieken

Buiten de besproken technieken zijn er nog andere die minder bekend of in ontwikkeling zijn. Zo is er bijvoorbeeld de botanische luchtfilter (zie Figuur 14) en de bio luchtfilter (zie Figuur 15). Deze technieken werken reeds maar hebben nog ruimte voor optimalisatie. Ze beschikken nog over een laag rendement. Maar er zijn natuurlijk andere voordelen bij deze technieken. Zo is hun ecologische voetafdruk kleiner, verbruiken ze minder energie en zijn ze in bebouwde omgevingen aangenaam omdat het meer groen meebrengt. [19] Omdat over deze technieken niet dezelfde parameters te vinden waren die nodig zijn voor de tool zijn deze hier niet geïmplementeerd.



Figuur 14: Botanische luchtfilter met zij en bovenaanzicht.[19]

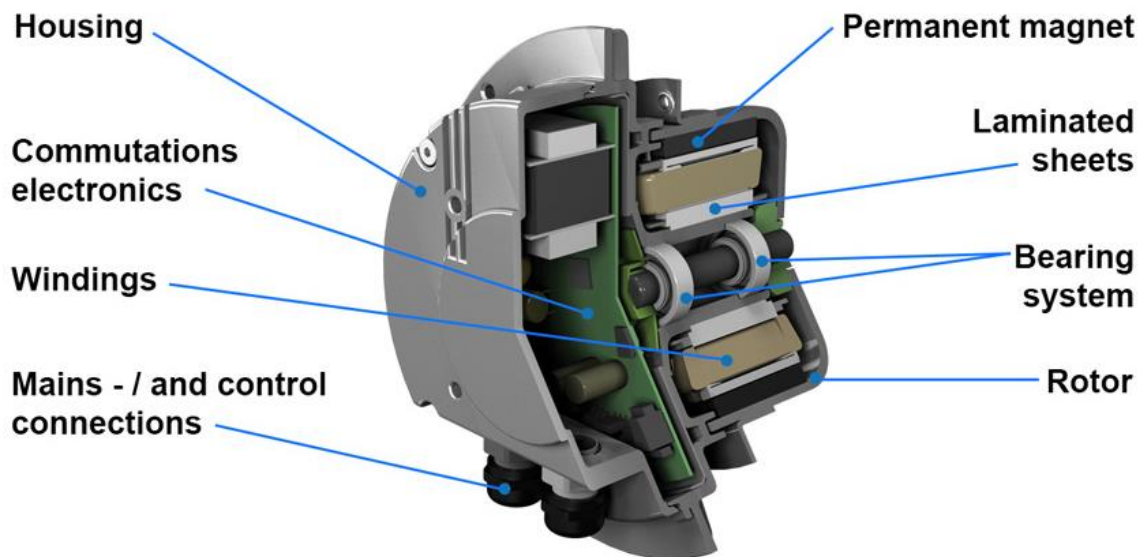


Figuur 15: Indoor bio luchtfiltersysteem.[19]

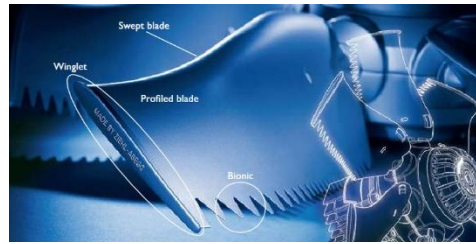
5. Aandrijving

In de meeste technieken is de aandrijving de enige of grootste verbruiker. Daarom is de efficiëntie van dit onderdeel van groot belang in zowel ecologisch als economisch opzicht. De efficiëntie hangt van een aantal componenten af. Het totaal rendement omvat stromingsverliezen, rendement van de motor en het rendement van de schoepen.

Er bestaan verschillende soorten motoren en er is een grote variatie in het ontwerpen van de schoepen. EC ventilatoren hebben algemeen een beter rendement. Hun motorisch rendement ligt tussen de 10 en 15% hoger op hogere toerentallen dan dat van een AC-motor met sinusregeling. Naarmate het toerental daalt, zal het verschil in rendement ook dalen tot 2%. De EC motoren zijn electronic commutation motoren. Ze gebruiken ook een permanente magneet en gelijkspanning zoals DC motoren. Naast het hoge rendement van deze motoren hebben ze ook het voordeel dat ze zeer weinig lawaai maken en een lange levensduur met weinig onderhoud hebben. Er wordt steeds gestreefd naar lage toerentallen, aangezien de elektrische motor dan minder energie verbruikt. De schoepen zijn dan ook zo ontworpen dat ze aan deze lage toerentallen toch een hoog debiet kunnen verplaatsen. Een van deze zijn Owllet schoepen (zie Figuur 17). [20],[21]



Figuur 16: Bouw EC motor.[22]



Figuur 17: Owled schoepdesign.[23]

5.1. Efficiëntie

Zoals reeds vermeld wordt de efficiëntie van een ventilator uitgedrukt in totaal rendement. Door de motor wordt het elektrische vermogen dat binnenkomt in de vorm van AC omgezet naar mechanisch vermogen. Het verschil in vermogen van de ingang tot het vermogen op de as is te wijten aan inductieverliezen en mechanische wrijvingsverliezen. Deze inductie verliezen zijn hier slechts minimaal in verhouding met de andere type motoren. De stromingsverliezen kunnen berekend worden met het drukverschil. De verhouding van statische druk over de dynamische druk geeft de stromingsverliezen weer. Het schoepenrendement is afhankelijk van de gekozen soort schoepen.

Een voorbeeld:

Schoepen: 0,7

Motor: 0,7

Stroming: 0,6

Totaal rendement is dan slechts $\eta_{tot} = 0,7 \cdot 0,7 \cdot 0,6 = 0,29$

Voor een efficiënte installatie kan het totaal rendement oplopen tot 0,53%.

EC motoren hebben een rendement variërend tussen de 84 en 95%. Owlet of andere hoog technologische ontwerpen kunnen een rendement halen van 80%. En afhankelijk van het ontwerp is er een drukverhouding van 0,7. Uitgerekend geeft dit een totaalrendement $\eta_{tot} = 0,53$ of 53%.

5.2. Ecologische voetafdruk

De ecologische voetafdruk is natuurlijk afhankelijk van de grootte van de installatie. Over de uitstoot die plaatsvindt tijdens het maken van deze producten is weinig informatie beschikbaar.

De energie die deze installaties verbruiken kunnen wel in acht gebracht worden.

5.3. Economisch

De aankoop van een aandrijving kost rond de 1000€ voor een aandrijving met een maximaal debiet van 2200 Nm³/h. [24]

6. Impact luchtzuivering

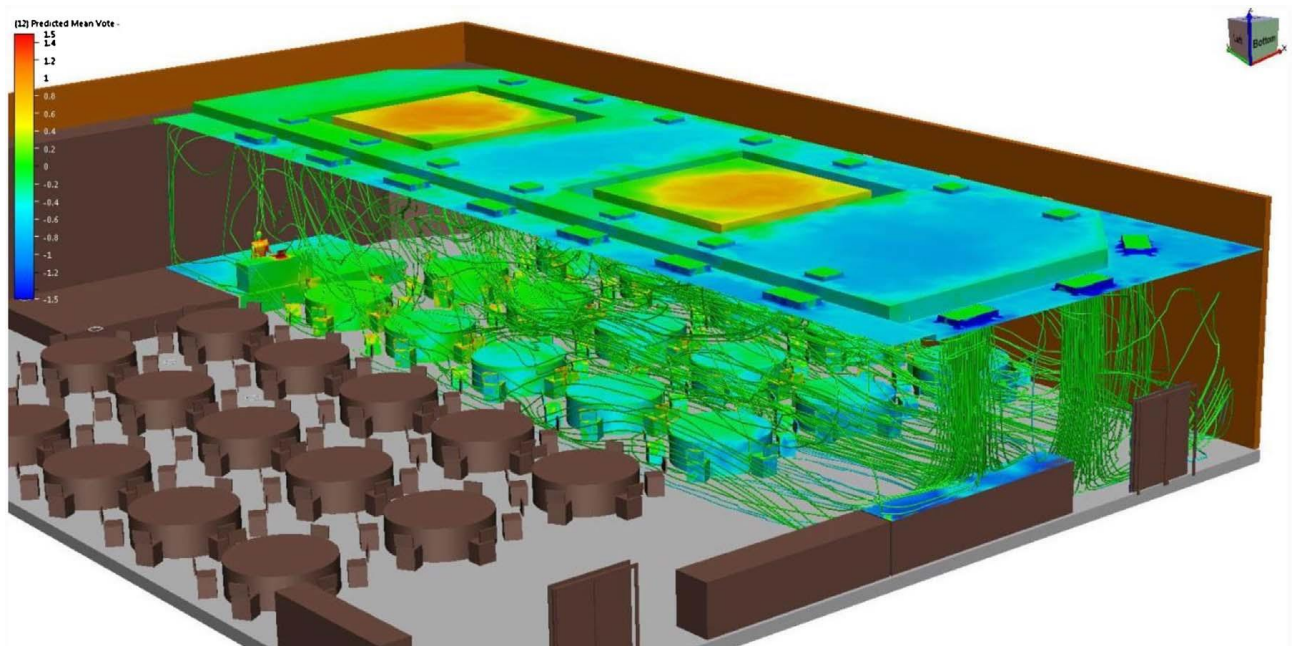
Naast de verbetering in luchtkwaliteit hebben luchtzuiveringsinstallaties ook andere gevolgen waar niet direct aan gedacht wordt.

6.1. Temperatuur

De temperatuur van de gefilterde lucht kan beïnvloed worden door de luchtzuivering. Maar dit zal slechts een minimaal effect hebben. Het temperatuurverschil zal niet opgemerkt worden indien er geen specifieke verwarmings- of koelelementen inzitten zoals een airco. Wat wel opgemerkt zal worden is de afkoeling door de luchtsnelheid. De gevoelstemperatuur zal dalen door de toenemende luchtsnelheid. Daardoor zal het comfort in de ruimte afnemen.

6.2. Snelheid

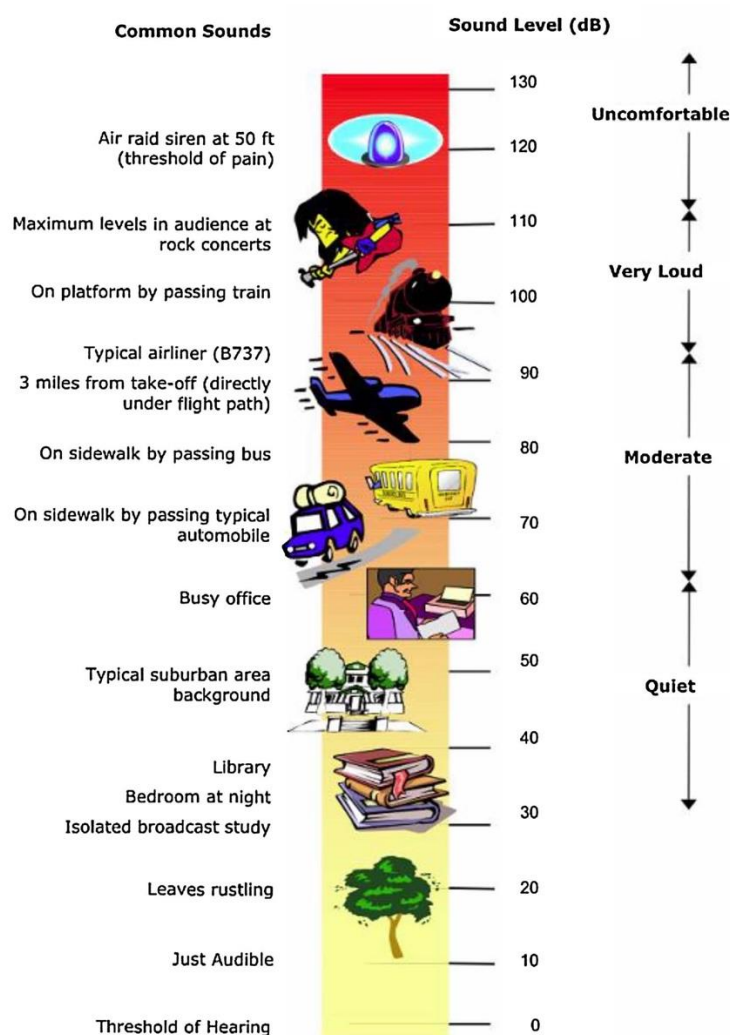
Output snelheden van indoor luchtzuiveringsinstallaties variëren tussen de 0,8 en 8,3 m/s. Buiten het effect op gevoelstemperatuur heeft dit ook andere gevolgen. Indien er veel indoor luchtcirculatie is kunnen ogen sneller vermoeid raken.



Figuur 18: Weergave van indoor luchtstroming door ventilatie. [25]

6.3. Geluid

Naast luchtsnelheid en temperatuur is er ook de factor van geluid dat in rekening gebracht moet worden. Deze installaties draaien voornamelijk volcontinu waardoor dit een belangrijke factor kan zijn. Geluid kan in vier categorieën verdeeld worden (zie Figuur 19). Indien het geluid te intens is kan dit neveneffecten veroorzaken.



Figuur 19: Verdeling geluidsniveau (dB).[25]

Afhankelijk van de CADR (clean air delivery rate) zal het geluid variëren. Een installatie met een CADR >150 m³/h zou onder de 55 dB moeten blijven. Een installatie met een CADR tussen de 150 en 300 m³/h zou onder de 61 dB moeten blijven. Een CADR van 300 tot 450 m³/h moet onder de 65 dB blijven. Indien de installatie boven de 450 m³/h gaat, zou die nog steeds onder de 70dB moeten blijven. Dit ligt al in de tweede categorie van de indeling geluid op intensiteit en kan op lange termijn onaangenaam gevonden worden. [25]

CADR of air filters	Noise Level (dB)
< 150 m ³ /h	< 55
150 m ³ /h–300 m ³ /h	< 61
300 m ³ /h–450 m ³ /h	< 65
> 450 m ³ /h	< 70

Tabel 10: Geluidsintensiteit per debiet.[25]

7. Techniek keuze

De meest gebruikte technieken werden reeds aangehaald. Zoals uit de literatuurstudie blijkt zijn er een heel aantal verschillende technieken. Deze hebben elk eigen voor- en nadelen. Ze ontnemen andere onzuiverheden, hebben verschillen in rendementen en hebben mogelijk verschillende randvoorwaarden zoals temperatuur, debiet, ect.

Om de juiste keuze te maken in welke technieken er nodig zijn en in welke maten er gefilterd moet worden is er een tool voorzien. Deze vraagt specifiek naar alle nodige parameters om de juiste keuze te kunnen maken.

7.1. Toepassing

Eerst wordt er een keuze gemaakt of het om een industriële of residentiële toepassing gaat. Voor residentiële toepassingen zijn er een aantal randvoorwaarden die reeds vastliggen. Er is een maximale luchtstromingssnelheid voor het comfort. De luchttemperatuur en filtertemperatuur liggen op de standaard kamertemperatuur van 20°C. De relatieve vochtigheid ligt tussen de 30 en 80% afhankelijk van het seizoen.

7.2. Parameters

Eenmaal de keuze gemaakt is voor residentiële toepassing, komen de volgende parameters aan bod. Het gewenste debiet moet aangegeven worden. Afhankelijk van het soort gebouw en de hoeveelheid personen kan dit variëren. De aanwezigheid van fijn stof bevestigen en de concentratie opgeven. De aanwezigheid van NO_x, CO_x en VOS. Daarnaast kan er ook aangeduid worden of er op geur gefilterd moet worden. Als laatste moet hier de hoeveelheid uren/dag en dagen/week aangeduid worden dat de filter in werking zal zijn.

Voor industriële toepassingen zijn er meerdere parameters die aangevuld moeten worden. In bepaalde sectoren komen chemische of organische stoffen vrij die verplicht opgevangen moeten worden. Daarnaast zijn de bronnen aan fijn stof en andere luchtvervuilingen hier groter. In residentiële gebouwen of burelen zijn een aantal randvoorwaarden reeds gegeven. In de industrie is het soms nodig om deze aan te passen. De lucht kan droger of vochtiger zijn en de temperaturen verschillend.

Als er gekozen wordt voor een industriële toepassing, worden er dus meer parameters gevraagd. Zo worden de luchttemperatuur en de vochtigheidsgraad gevraagd. De aanwezigheid van stof en de concentratie ervan. Of er geur, NO_x, CO_x, VOS, zure of basische aard, metalen, micro organisme of ander chemische producten aanwezig zijn in de lucht. Omdat deze installaties ook aanzienlijk grotere debieten moeten kunnen filteren, is er een bredere keuze aan debieten. Als laatste moet hier de hoeveelheid uren/dag en dagen/week aangeduid worden dat de filter in werking zal zijn. Dit kan zowel continu als discontinu zijn.

7.3. Voorbeeld

Als voorbeeld wordt een installatie beschouwd voor een industrieel gebouw. De parameters op wat gefilterd moet worden zijn gegeven (zie Tabel 11). Randvoorwaardes zijn ook reeds bepaald (zie Tabel 12). Met deze waarde is de input volledig voor de tool.

Te filteren		Eenheid
Stof	3-100	mg/Nm ³
Geur	Ja	
VOS	Ja	
Nox	Ja	
Metalen	Neen	
Zuur	Neen	
Basisch	Neen	

Tabel 11: De te filteren stoffen opgegeven als voorbeeld.

Toestand		Eenheid
Debiet	1000	Nm ³ /h
Temperatuur	0-50	°C
Vochtigheid	<70	%
Werkings ­ tijd	8	u/dag

Tabel 12: Gevraagde randvoorwaardes.

Met de tool kan nu berekend worden welke processen het mogelijk maken om aan deze randvoorwaarden te voldoen. Een optie was om een opeenvolging te doen van eerst een doekenfilter vervolgens een absoluutfilter en daarna een actieve koolstoffilter. Deze drie technieken zorgen voor een ecologisch interessante installatie. De behaalde rendementen van deze installatie zijn allen aan de hoge kant (zie Tabel 13). Hier zie je dat iedere filterstap zijn eigen efficiëntie heeft om bepaalde producten te ontnemen van de lucht. De kostprijs is ook berekend aan de hand van de beschikbare processen. Deze totale kostprijs is een optelling van de drie verschillende technieken met elk hun eigen investering, onderhoud en energiekost (zie Tabel 14)

Rendement	Doekenfilter	Absoluutfilter	Actieve koolfilter	Totaal
Stof	99,90%	99,9998%	98	99,9998%
Geur	-	-	95%	95%
VOS	-	-	95%	95%
Micro-organisme	-	Ja	-	Ja

Tabel 13: Rendementen totaal installatie.

Techniek	investeringskost (€)	onderhoudskost/jaar (€)	Energiekost (€)	Totaal (€)
Doekenfilter	5000	250	3854	9104
Absoluutfilter	2400	120	193	2713
Adsorptie	10000	900	0	10900
Totaal	17400	1270	4047,12	22717

Tabel 14: Kosten van gekozen installatie.

8. Conclusie

Luchtzuivering is niet goedkoop en ook niet simpel. Zoals uit studies blijkt, is het van levensbelang hier voldoende aandacht aan te hechten. De normen en doelstellingen zijn reeds in plaats maar toch worden deze grenzen soms overschreden. Afhankelijk van de situering en omgeving kan de ernst van luchtkwaliteit variëren.

Er bestaan voldoende technieken die reeds ver genoeg ontwikkeld zijn om de luchtkwaliteit tot onder de grenswaarden te zuiveren. Natuurlijk is er altijd ruimte voor verbetering en ontwikkeling naar nieuwe technieken van welke de ecologische voetafdruk kleiner is in productie en energiezuiniger zijn.

Uit de tool blijkt dat er soms mogelijke combinaties zijn om tot een installatie te komen die voldoet aan de gevraagde parameters. Deze verschillende combinaties kunnen aanzienlijk afwijken in prijs en efficiëntie. Daarnaast hebben sommige een grotere ecologische voetafdruk. Er is ook altijd een meest efficiënte oplossing. Het kan ook zijn dat deze overeenkomen indien niet voordehand liggende producten ontnomen moeten worden.

Bibliografie

- [1] "New wind tree." [Online]. Available: <http://newworldwind.com/wind-tree/>.
- [2] European Union, "CAQI Air quality index: Comparing Urban Air Quality across Borders," no. October 2008, pp. 1–38, 2012.
- [3] "European Air Quality Index." [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality-index>.
- [4] "Particulate Matter (PM)." [Online]. Available: <https://www.epa.gov/pm-pollution>.
- [5] "VOS - Vluchtige organische stoffen." [Online]. Available: <https://www.health.belgium.be/nl/vos-vluchtige-organische-stoffen>.
- [6] E. Commission, "Living well, within the limits of our planet," *COM(2012) 710 Final*, p. 37, 2012.
- [7] European Environment Agency, *Air quality in Europe – 2017 report*, no. 5. 2017.
- [8] "ISO 16890 The new standard for classifying air filters ."
- [9] "ISO 16890 presentation," 2016.
- [10] P. Brimblecombe and M. Cashmore, "Indoor Air Pollution," *Springer*, vol. 64, pp. 209–221, 2018.
- [11] European Energy Agency, "Sources of Air Pollution in Europe," pp. 1–2, 2016.
- [12] "Gezondheidsraad INDOOR AIR QUALITY IN BELGIUM SEPTEMBER 2017," no. 8794, 2017.
- [13] World Health Organization, "Health risks of air pollution in Europe – HRAPIE project," p. 60, 2013.
- [14] "Air pollution, ecosystems and biodiversity." [Online]. Available: <http://www.unece.org/info/ece-homepage.html>. [Accessed: 15-May-2018].
- [15] "Evolutie van de elektriciteitsfactuur van kleine professionele afnemers (all in, excl)." .
- [16] "VITO-LUSS." [Online]. Available: <https://emis.vito.be/nl>.
- [17] Z. Xu and B. Zhou, *Fundamentals of air cleaning technology and its application in cleanrooms*, vol. 9783642394. 2014.
- [18] D. Berry, G. Mainelis, and D. Fennell, "Effect of an Ionic Air Cleaner on

- Indoor/Outdoor Particle Ratios in a Residential Environment," *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 41, no. 3, pp. 315–328, 2007.
- [19] Z. Wang and J. S. Zhang, "Characterization and performance evaluation of a full-scale activated carbon-based dynamic botanical air filtration system for improving indoor air quality," *Build. Environ.*, vol. 46, no. 3, pp. 758–768, 2011.
- [20] R. C. C. Koude, "Effectieve toepassing van energiebesparende ventilatoren," 2007.
- [21] C. Lanzerstorfer, F. Neder, and R. Schmied, "Constant design air flow industrial ventilation systems with regenerative dust filters: Economic comparison of fan speed-controlled, air damper controlled and uncontrolled operation," *Energy Build.*, vol. 128, pp. 503–510, 2016.
- [22] "EC fans: Overview." [Online]. Available: <https://www.airtecnicos.com/technology/ec-fans-overview>.
- [23] "owlet fan design." [Online]. Available: <http://www.moduflow.co.uk/owlet-fans/>.
- [24] M. C. Technology and M. C. Technology, "België Product- en prijscatalogus," 2017.
- [25] G. Liu *et al.*, "A review of air filtration technologies for sustainable and healthy building ventilation," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 32, no. April, pp. 375–396, 2017.

Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:
Een review paper met tool voor het berekenen van de efficiëntie en haalbaarheid van luchtzuivering op industriële en residentiële toepassingen

Richting: **master in de industriële wetenschappen: elektromechanica**
Jaar: **2018**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

Cools, Bram

Datum: **20/08/2018**