



Luchtzuivering door kamerplanten

Een literatuurstudie

Pieter de Visser

Rapport WPR-695

Referaat

Binnen het project 'Plantkampioen luchtzuivering', een publiek-private samenwerking binnen de Topsector Tuinbouw en Uitgangsmaterialen, is door WUR Glastuinbouw een literatuurstudie uitgevoerd naar de meest recente bevindingen over de mogelijkheid van planten om lucht binnenshuis te zuiveren. Er is gezocht in wetenschappelijke publicaties, vakbladen en tuinbouwrapporten. Het algemene beeld is dat planten in zekere mate Vluchtige Organische Stof (VOS) kunnen opnemen zonder zelf schade te ondervinden. De opnamemechanismen verschillen tussen typen VOS. Hydrofiele VOS zoals formaldehyde worden vrij goed door het blad verwerkt, terwijl lipofiele componenten via andere routes worden opgenomen. Verschillen tussen plantensoorten houden verband met de hoeveelheid blad, de huidmondjesopening, de waslaag en de beharing. Naast de groene plantendelen spelen ook de wortels, de micro-organismen en het substraat een rol in de luchtzuivering. Het onderzoek in plantkamers leverde vooral resultaten over de kortdurende opnamen door planten, maar over de lange-termijn effecten en de onderliggende mechanismen is nog weinig bekend. Het onderzoek naar opschaling van lab- naar praktijksituaties maakt recentelijk een snelle ontwikkeling door. De eerste goede studies laten veelbelovende resultaten zien. Meer onderzoek is nodig om de labproeven goed te kunnen extrapoleren naar de praktijk.

Abstract

Within the project 'Plant champion air purification', a public-private cooperation within Topsector Horticulture and Starting materials, a literature survey was carried out by WUR Greenhouse Horticulture to explore recent findings on the possibilities of plants to purify indoor contaminated air. Literature was searched in academic journals, on the internet and within reports recently carried out for the horticultural sector. Here this knowledge is shortly described. Plants generally have the capacity to assimilate hydrophilic Volatile Organic Compounds (VOCs) like formaldehyde without harm. Lipophilic VOCs are less well assimilated and follow different uptake pathways. Differences between plant species can sometimes be related to amount of leaves, wax layer composition, stomatal conductance or hairs. Apart from the green plant parts, the roots, the micro-organisms and rooting medium have a role in air purification. The research in plant chambers mainly generated knowledge on short term uptake of volatiles, but the uptake mechanisms and the long-term performances of plants are only partly understood. The research on upscaling of lab results to air purification in rooms within buildings is currently rapidly evolving. A few good studies have been done and show promising results. More research is needed to extrapolate the findings from lab research to practice in a reliable way.

Rapportgegevens

Rapport WPR-695

Projectnummer: 3742241400

DOI nummer: 10.18174/429300



Dit project is mogelijk gemaakt door de bijdragen van 'TKI Tuinbouw en Uitgangsmaterialen', Royal FloraHolland, Air so Pure, KP Holland, Into Green VGB/VHG, Stichting De Groene Stad, Rabobank Westland en Stimuflori.

Disclaimer

© 2018 Wageningen Plant Research (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 20, 2665 MV Bleiswijk, Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk, T 0317 48 56 06, F 010 522 51 93, E glastuinbouw@wur.nl, www.wur.nl/plant-research. Wageningen Plant Research.

Wageningen University & Research, BU Glastuinbouw aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Adresgegevens

Wageningen University & Research, BU Glastuinbouw

Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk

Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk

T +31 (0)317 48 56 06

F +31 (0)10 522 51 93

Inhoud

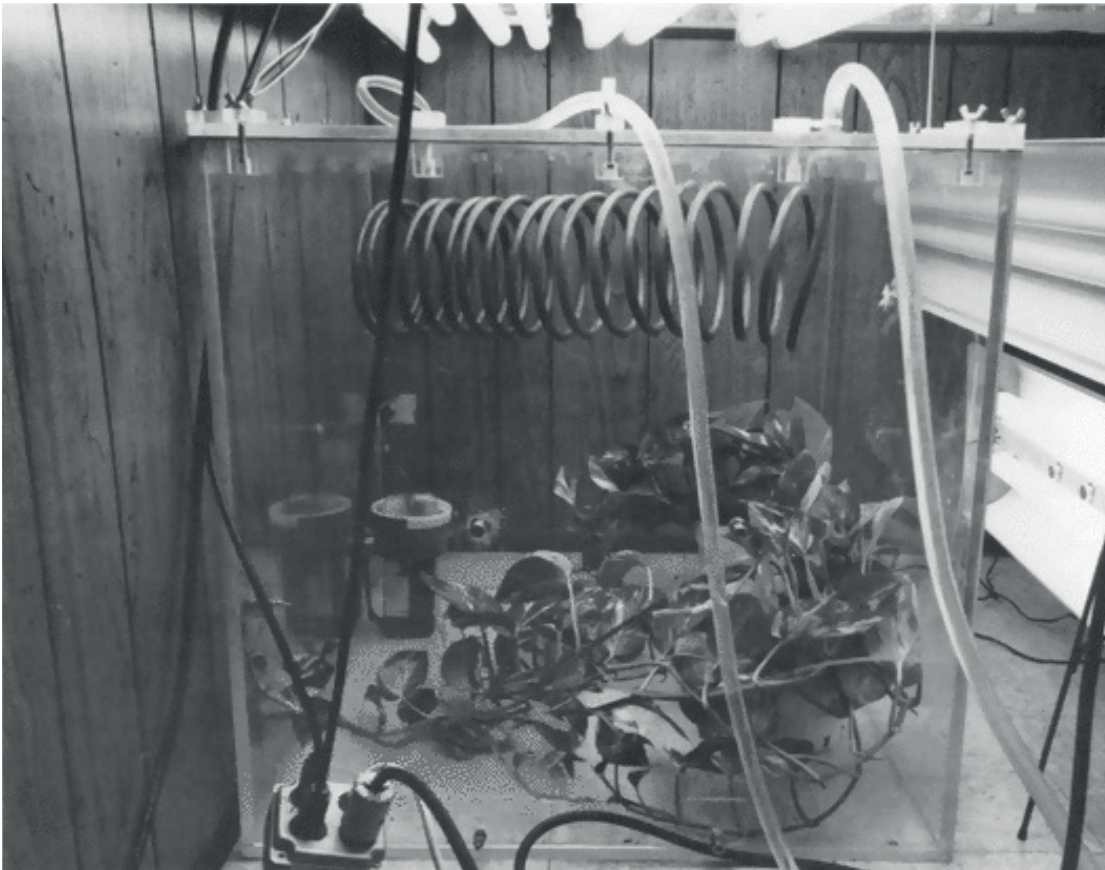
	Samenvatting	5
1	Introductie	7
2	Bovengrondse opname	9
	2.1 Verschillen tussen plantensoorten en tussen contaminanten	9
	2.2 Mechanismen van opname en vastlegging	12
3	Opname van luchtvervuiling in ondergrondse delen	15
	3.1 Rol van substraateigenschappen	15
	3.2 Rol van micro-organismen	15
	3.3 Praktische toepassingen	16
4	Luchtzuivering door planten onder praktijkomstandigheden	17
	4.1 Introductie	17
	4.2 Bevindingen	17
	4.3 Toekomstig perspectief	19
5	Conclusies	21
	Literatuur	23

Samenvatting

In de afgelopen 30-40 jaar is in de plantwetenschappen een breed assortiment aan kamerplanten onderzocht op de capaciteit om lucht te zuiveren. Planten hebben van nature enige capaciteit om lucht te zuiveren van vluchtig organische stoffen (VOS) en fijnstof. Hydrofiele VOS zoals aldehyden worden door het blad geassimileerd en bezorgen de plant weinig tot geen schade. Lipofiele VOS zoals benzeen worden vooral in de waslaag van het blad opgeslagen of door micro-organismen afgebroken. Verschillen in luchtzuivering tussen plantensoorten kunnen meestal worden herleid tot de hoeveelheid bladmassa, samenstelling van de waslaag, huidmondjesgeleidbaarheid of hoeveelheid haren. Naast de groene plantendelen spelen de wortels en het substraat ook een belangrijke rol in de luchtzuivering door adhesie aan koolstof en door microbiële verwerking. De vele plantkamermetingen hebben veel kennis over korte-termijn luchtzuivering door de plant opgeleverd maar aan de lange termijn prestaties is veel minder onderzoek gedaan. Het onderzoek naar opschaling van groeikamer naar praktijk behoeft nog aandacht. Enkele goede studies zijn verricht en laten veelbelovende resultaten zien, maar veel onderzoek is maar matig statistisch onderbouwd. Meer onderzoek is nodig om de labresultaten te kunnen extrapoleren naar de praktijk.

1 Introductie

Tussen 1980 en 1990 werd het 'sick building syndrome' actueel in de Westerse wereld. Het fenomeen werd vernoemd naar de klachten bij mensen als gevolg van de slechte luchtkwaliteit in gebouwen. In diezelfde tijd startte NASA onderzoek naar stand-alone wooncabines die mogelijk in de ruimte ingezet zouden kunnen worden, en waarbij het genoemde 'sick building syndrome' uitgesloten moest worden. In die cabines zouden planten van belang zijn voor zuurstofproductie, kooldioxide opname en luchtkwaliteitsverbetering. Op kleinere schaal is vervolgens door NASA uitgebreid onderzocht welke rol de planten kunnen hebben in luchtzuivering (Wolverton *et al.* 1984). Die experimenten gebruikten voor die tijd geavanceerde technologieën zoals inerte materialen, volledig verzegelde meetkamers, en nauwgezette verwarming en verlichting (Figuur 1). De studies aan luchtzuivering door planten van Wolverton waren de eerste en sindsdien volgden er vele studies.



Figuur 1 Plexiglas test kamer met Gouden pothos (*Scindapsus aureus*), zoals gebruikt door Wolverton *et al.* (1984) in zijn studies naar luchtzuivering door planten.

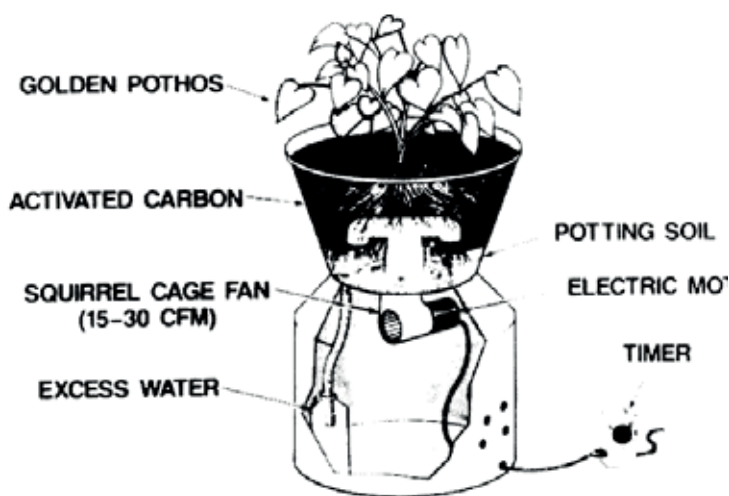
Tegenwoordig zijn de technieken aanzienlijk verbeterd, zodat bijvoorbeeld bij veel lagere concentraties kan worden gemeten. Zo zijn ook de materiaalkeuzen verruimd en zijn de doseringen van de te onderzoeken stof nauwkeuriger toe te dienen.

Naast de verbeterde techniek is ook het inzicht in plantprocessen aanzienlijk toegenomen. De kennis ten aanzien van o.a. groei, assimilatie, detoxificatie en stressfysiologie is door veel recent onderzoek sterk toegenomen. Deze wetenschappelijke ontwikkelingen motiveren ons om een overzicht te maken van het onderzoek van de laatste 3 decennia na Wolverton, ten aanzien van het vermogen van planten om lucht te zuiveren. Deze literatuurstudie probeert om de genoemde kennis van de afgelopen 20-30 jaar samen te vatten, aan te geven wat mogelijke kennishiaten zijn, en nieuw onderzoek aan te bevelen.

2 Bovengrondse opname

De plantopname van vluchtige organische stoffen (VOS) vindt plaats via een aantal routes. Hoewel nog niet alle routes bekend zijn, zijn de meest relevante de opname via de huidmondjes en via opname door wortels en het substraat zelf. De VOS opname wordt in experimenten meestal indirect bepaald, door verlaging van de concentratie in de lucht. Het lijkt moeilijk te zijn om de VOS te traceren in plant of bodem. De opnameroutes worden uitgebreid bediscussieerd in §2.2.

Eén van de pioniers op het gebied van plantopname van VOS was Wolverton, die in de jaren tachtig vele studies hieraan deed met behulp van klimaatkasten (e.g. Wolverton *et al.* 1984). Het betrof NASA onderzoek met het doel om lucht te zuiveren in afgesloten ruimten zoals die te verwachten zijn in ruimtestations of vestigingen op maan of planeten. De studies werden lange tijd in perspex groeikasten uitgevoerd (Figuur 1) maar later vervangen door plant-microcosmos systemen (Figuur 2.1) om daarmee expliciet de rol van de wortels en het substraat mee te nemen. Wolverton rangschikte de plantensoorten naar hun vermogen om lucht te zuiveren ten aanzien van formaldehyde, benzeen en trichlooretheen.



Figuur 2.1 Het veelgebruikte plant-microcosmos systeem (illustratie uit Wolverton *et al.* 1989).

2.1 Verschillen tussen plantensoorten en tussen contaminanten

Verschillen in de opname van VOS uit de lucht kunnen vaak gerelateerd worden aan de hoeveelheid blad, de huidmondjesgeleidbaarheid of de mate van beharing. In de begindagen van de studies aan VOS opname door planten werd hier maar deels aandacht aan besteed. Zo geven Wolverton *et al.* naast de opname per plant, ook wel aan hoeveel VOS per eenheid bladoppervlak werd opgenomen. Maar de meeste studies waren vooral gericht op het snel scannen van vele plantensoorten waarbij de opname alleen per plant werd gerapporteerd.

De eerste uitgebreide studies naar de plantprestaties ten aanzien van zuivering van VOS uit de lucht werden uitgevoerd door Wolverton *et al.* (1984, 1989). Zij gebruikten afgesloten groei- of klimaatkasten en bepaalden de opname van steeds een enkele VOS component, door het meten van de afname van de VOS concentratie in de lucht gedurende 24 uur. Zij stelden een Top10 van plantensoorten op (Tabel 1). De best presterende plantensoorten zijn niet de meest gangbare kamerplanten in Nederland: banaan, gerbera, chrysanthe, hederas. De belangrijkste sierplanten voor binnenshuis, die ook verder onderzocht werden, waren *Spathiphyllum*, *Dracaena*, *Chlorophytum* and *Sansevieria*. Na de studies in 1984, vergelijkbare plant-microcosmos systemen (Figuur 2.1) werden gebruikt voor de soorten *Dracaena* and *Spathiphyllum* (Wolverton *et al.* 1989; Wood *et al.* 2006). Reden was dat zij het best presteerden t.a.v. opname van toluen en benzeen. Sinds Wolverton, plant kamer experimenten zijn in vele landen uitgevoerd waaronder enkele in Azië.

Tabel 1

De luchtzuiverende plantensoorten onderzocht door Wolverton et al. (1984), gerangschikt van hoge naar lage opname per eenheid bladoppervlak.

Rang	Formaldehyde	Benzeen		Trichloorethyleen	
1	Banana	<i>Musa oriana</i>	Gerbera daisy	Gerbera jamesonii	Gerbera jamesonii
2	Mother-in-law tongue	<i>Sansevieria laurentii</i>	Pot mum	<i>Chrysanthemum morifolium</i>	<i>Hedera helix</i>
3	English ivy	<i>Hedera helix</i>	English ivy	<i>Hedera helix</i>	<i>Dracaena marginata</i>
4	Bamboe palm	<i>Chamaedorea seifrizii</i>	Mother-in-law tongue	<i>Sansevieria</i>	<i>Spatiphyllum "Mauna Loa"</i>
5	Heart Leaf philodendron	<i>Philodendron oxycardium</i>	Warneckeï	<i>Dracaena deremensis "Warneckeï"</i>	<i>Sansevieria</i>
6	Elephant ear philodendron	<i>Philodendron domesticum</i>	Peace Lily	<i>Spatiphyllum "Mauna Loa"</i>	<i>Dracaena deremensis "Warneckeï"</i>
7	Green spider plant	<i>Chlorophytum elatum</i>	Chinese evergreen	<i>Aglonema "Silver Queen"</i>	<i>Chamaedorea seifrizii</i>
8	Golden pothos	<i>Scindapsus aureus</i>	Marginata	<i>Dracaena marginata</i>	<i>Dracaena massangeana</i>
9	Janet craig	<i>Dracaena deremensis "Janet Craig"</i>	Bamboe palm	<i>Chamaedorea seifrizii</i>	<i>Dracaena deremensis "Janet Craig"</i>
10	Marginata	<i>Dracaena marginata</i>	Janet craig	<i>Dracaena deremensis "Janet Craig"</i>	Slechts 9 soorten onderzocht

Meer recent onderzoek naar de verschillen tussen plantensoorten is gedaan door Han en Lee (2002) door verschillende orchideeën te evalueren op hun vermogen vervuilende stoffen uit gebouwen te verwijderen. Laboratoriumtesten zijn uitgevoerd om 4 soorten orchideeën te evalueren. *Cymbidium rubrigemmum* was geschikt om een reeks stoffen te verwijderen, met opnamesnelheden voor de volgende stoffen: 2.66 mg koolstofdioxide, 155 mg stikstofoxide, 87 mg formaldehyde en 230 mg cm⁻² min⁻¹ benzeen. Ammoniak werd ook verwijderd, vooral door *Cymbidium virensence*. *Cymbidium sinense* was het beste in het verwijderen van trichloorethyleen. De gassen die het meest efficiënt werden verwijderd waren degene die zich aan bodemdeeltjes vasthechtten, waarschijnlijk door toedoen van micro-organismen in de rhizosfeer. Het vermogen om gassen op te nemen hing ook sterk af van de fysiologische status van de plant, i.e. hoge fotosynthesesnelheid en/of hoge huidmondjesgeleidbaarheid. Dit sluit aan bij ander onderzoek naar effecten van lichtintensiteit op de opname van formaldehyde (zie §2.2).

In een plantenwand systeem in Norrköping, Zweden, is de opname van VOS door *Nephrolepis exaltata* *Bostoniensis* bestudeerd (bron onbekend). Het systeem liet een hogere CO₂ assimilatie zien bij toename van de luchtuitwisseling door ventilatie, en dit correspondeerde met toename van formaldehyde. De helft van de planten was na de proef zichtbaar beschadigd door de blootstelling aan 1.55 ppm formaldehyde gedurende 24 uur. Naast formaldehyde is er ook plantopname van aceton en methylacetaat, verdampend uit lijm, gevonden.

In de concentratie range van 43 tot 300 µg m⁻³ formaldehyde, de depletie door *Nerium indicum* nam lineair toe bij verhoging van de initiële concentratie. Voor *Chlorophytum comosum*, *Alow vera* en *Epipremnum aureum*, verwijderingssnelheden voor formaldehyde namen ook toe in de concentratie range van 1,000 tot 11,000, van 1,000 tot 8,000 en van 1,000 tot 6,000 µg m⁻³, respectievelijk (Xu *et al.* 2011).

Dela Cruz *et al.* (2014) laat zien dat VOS verwijderingssnelheden goed gedocumenteerd zijn en vooral afhangen van plantensoort (Liu *et al.* 2007; Orwell *et al.* 2004; Wolverton en McDonald, 1982; Yang *et al.* 2009). Zelfs tussen rassen zijn verschillen waargenomen (Kim *et al.* 2011b; Orwell *et al.* 2004; Zhou *et al.* 2011). Twee studies hebben onderzocht wat de relatie tussen taxonomie en VOS verwijdering is (Kim *et al.* 2010; Yang *et al.* 2009). Onderzoek aan 28 plantensoorten van 15 families naar verwijdering van benzeen, toluen, octaan, trichloorethyleen en α-pineen liet zien dat leden van de Araliaceae familie de tendens vertoonden tot gemiddelde tot hoge verwijderingssnelheden, terwijl leden van de Araceae familie juist lage snelheden lieten zien. Toch was er geen significant verschil tussen de families. In de onderzoeksopzet waren zes soorten van de Araliaceae familie, vier van de Araceae familie, en de laatste 18 soorten van een totaal van 13 families (Yang *et al.* 2009).

Kim *et al.* (2010) onderzochten formaldehyde verwijdering door 86 plantensoorten, opgedeeld in vijf categorieën. Varens lieten de hoogste snelheden zien voor formaldehyde verwijdering, gevolgd door kruiden. Houtige bladgewassen, grasachtigen en inheems Koreaanse planten presteerden ongeveer hetzelfde, maar wel lager dan de varens en kruiden (Kim *et al.* 2010). De variatie binnen de categorieën was groot en vooral daardoor waren de verschillen tussen die categorieën niet significant.

De groepering van bovengenoemde studies is wellicht te breed geweest om significante verschillen tussen de groepen aan te tonen. Beter zou men een onderscheid tussen groepen kunnen maken t.a.v. relevante bladparameters zoals stomataire kenmerken, waslaag, en beharing, welke allen een effect hebben op de opname van VOS. Jin *et al.* (2013) rapporteerden dat hoge huidmondjes (stomataire) dichtheid en een verhoogde catalase activiteit na blootstelling aan formaldehyde de belangrijkste redenen waren voor hoge formaldehyde verwijdering door *Melissa officinalis* ten opzichte van *Hedera helix*. Helaas hadden de controle planten niet aan dezelfde experimentele condities bloot gestaan als de testplanten. Dus was het niet mogelijk om de waargenomen effecten toe te schrijven aan het vermogen van de planten tot sterke formaldehyde opname.

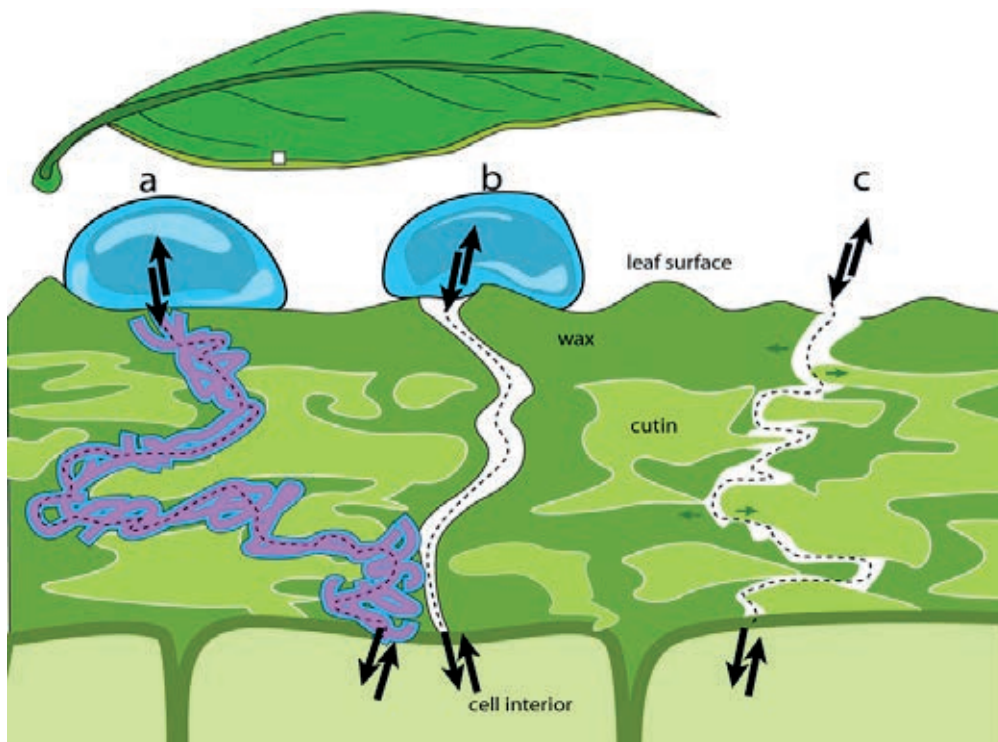
Plantensoorten kunnen ook verschillen in hun ondergrondse werking m.b.t. luchtzuivering, door de mate van de wortelgroei en het vermogen om microbiële groei te stimuleren met wortellexudaten. Dit zijn aspecten waarmee indirect een verschil in VOS opname te zien zal zijn. Inderdaad toonde Zhang *et al.* (2013) aan dat *Fittonia verschaffeltii* var. *argyroneura* in staat was een meer diverse gemeenschap van toluen afbrekers te onderhouden dan *Hoya carnosa*, dit na een blootstelling aan toluen gedurende 2 maanden.

Het vermogen om binnenshuis ultrafijne deeltjes te verwijderen werd bij 11 commerciële sierplanten onderzocht onder laboratoriumomstandigheden. Alle soorten behalve *Dracaena deremensis* compacta,) reduceerden de aanwezige ultrafijne deeltjes (<100 nm diameter) met 5.5% binnen 3 uur (Stapleton and Ruiz-Rudolph, 2016).

Het experiment werd gedaan in groeikamers van 114 liter met een luchtvervangingsnelheid van 4.67 per uur, hetgeen erg hoog is t.o.v. een gangbaar binnenklimaat. Voor *Juniperus chinensis* toonden ze aan dat de deeltjesabsorptie lineair toenam met het bladoppervlak.

2.2 Mechanismen van opname en vastlegging

De plant heeft een aantal mogelijkheden om vluchtige stoffen uit de lucht te onttrekken. De meest voor de hand liggende wijze is opvang op blad en bloem via depositie. Een tweede mechanisme is de absorptie in de cuticula, de bovenste laag aan de bovenzijde van het blad. Een derde mechanisme is opname via de huidmondjes (stomata), mits de deeltjes klein genoeg zijn. Als de stoffen eenmaal in de stomataire holte zijn, is de opname in de weefsels afhankelijk van de verwerkingsnelheid: vervolgens is de snelheid van diffusie afhankelijk van de grootte van de concentratiegradient tussen buitenlucht en weefsel. Puur gebaseerd op de oplosbaarheid in de water fase van het blad cytoplasma, worden de aldehydes maar slecht opgenomen uit de lucht: de stomataire opname is wel een factor 30-100 hoger als de aldehydes vervolgens worden geassimileerd of getransporteerd binnen de plant, en daarmee de concentratiegradient bouwen zoals boven genoemd (Tani en Hewitt, 2009).



Figuur 2.2 Op de bovenzijde van het blad zit de cuticula, bestaande uit cutine en was. De cuticula vormt een slimme barrière door een selectieve permeabiliteit voor lipofiele dan wel hydrofiele moleculen.

Lipofiele VOSs worden minder goed geassimileerd door planten dan hydrofiele VOSs. Hun opnameroute volgt meestal via bodem en micro-organismen, hoewel dit vaak wordt verward met plantopname want het meetsysteem betreft vaak plant EN substraat. Gemiddeld 10^7 micro-organismen verblijven op 1 cm^2 blad, meestal in de waslaag en zich voedend met bladexudaten (Lindow and Brandl, 2003). De opname door het microbiom op het blad is wel veel lager dan dat via de huidmondjes als die zich, onder optimale groeiomstandigheden, goed hebben opengesteld. Onder suboptimale omstandigheden, bijv. bij vaak voorkomende beperkte lichtniveaus of droogte, wordt de opname via de cuticula relatief belangrijker.

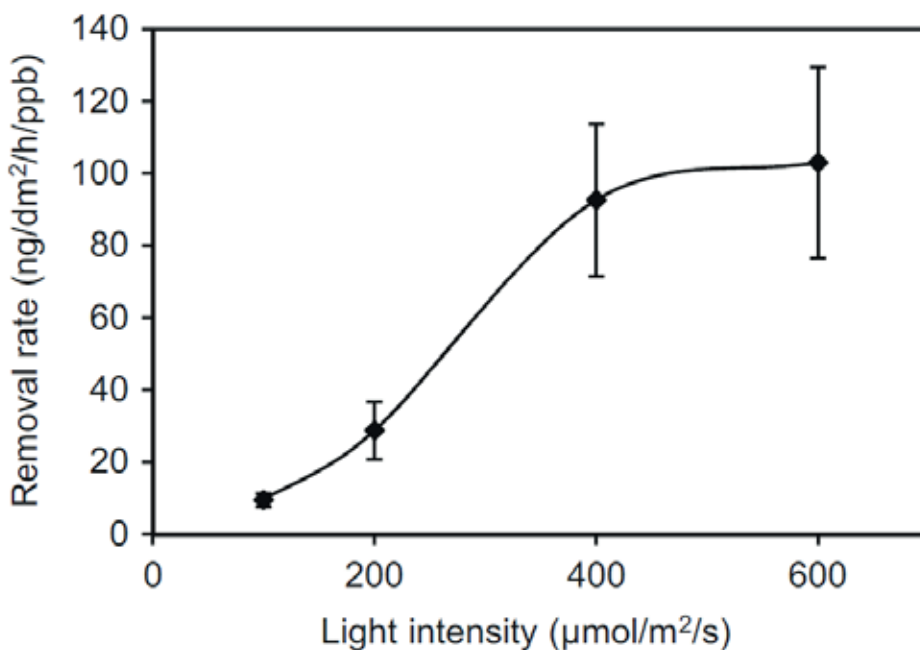
De formaldehyde assimilatie vindt plaats via de glutathion-afhankelijke formaldehyde dehydrogenase (Giese, 1994). Deze assimilatieroute is aanwezig in de meeste planten en volstaat om formaldehyde tot concentraties van 8 ppm te verwerken. Het onderzoek van Giese baseerde zich op ^{14}C -gelabelde formaldehyde dat in al de compartimenten van de cel (eiwitten, cytoplasma, cel membraan, etc.). De meest aangerijkte moleculen waren serine en fosfatidylcholine. Giese stelde *Glycine max* cellen bloot aan ^{14}C gelabelde formaldehyde, en de allocatie van de ^{14}C gaf aan dat de formaldehyde eerst werd ontgiftigd door oxidatie en dan in het gangbare C1 metabolisme werd verwerkt (Giese *et al.* 1994). Dit werd bevestigd door onderzoek aan opname en transformatie van ^{14}C gelabelde formaldehyde door *Epipremnum aureum* en *Ficus benjamina*, waar formaldehyde werd getransformeerd in CO_2 en dan ingebouwd in plantmateriaal via de Calvin cyclus (Schmitz *et al.* 2000).

Tegengesteld aan de bevindingen van Giese en Schmitz, beweren Chen *et al.* (2010) dat planten normaal helemaal niet in staat zijn tot assimilatie van formaldehyde. Zij claimen dat het verdwijnen van formaldehyde waarschijnlijk plaats vindt door activiteit van micro-organismen die in symbiose leven met de plant. Dit is al eerder beweerd, maar nooit aangetoond, door Wolverton and Wolverton (1993). Deze micro-organismen hebben enzymen die de formaldehyde kunnen assimileren volgens de Calvin-Bensson metabolische route. Chen *et al.* hebben dit bewezen door het genoemde enzym via GMO (Genetically Modified Organism) genetisch in te bouwen in *Arabidopsis*. Praktische toepassingen van zulke GMO planten zijn sociaal-maatschappelijk (nog) onacceptabel in Europa, dus is men weer aangewezen op de nuttige micro-organismen.

Sawada *et al.* (2007) deed vergelijkbaar GMO werk als Chen *et al.* maar dan aan tabak, waarbij ze een nieuwe metabole route voor monofosfaat assimilatie inbouwden: de planten assimileerden 20% meer VOSs dan de referentie, i.e. de niet-GMO planten.

Dus het standpunt dat planten geen mechanisme hebben om formaldehyde te verwerken lijkt onhoudbaar, aangezien veel experimenten in recente jaren hebben aangetoond dat vele plantensoorten deze mogelijkheid hebben. Hierbij is het van belang te melden dat formaldehyde daarbij eerst geoxideerd moet worden tot CO_2 voor het alsnog via de C1 route verwerkt wordt ten behoeve van groeiprocessen.

Assimilatie van formaldehyde verhoogt bij verhoogde lichtintensiteit (Figuur 2.2), hetgeen aangeeft dat formaldehyde voor een bepaald deel fungeert als vervanger van CO_2 als electronenacceptor in de fotosynthese.



Figuur 2.3 Effekt van lichtintensiteit op formaldehyde verwijderingssnelheid bij *Nerium indicum*. Figuur is aangepast vanuit Kondo *et al.* (1995) door Dela Cruz (2014); staafjes zijn gemiddelden \pm SD, $n=4$.

Ondanks alle waarnemingen dat formaldehyde uit de lucht wordt verwijderd door plantactiviteit waarbij een hoger lichtniveau dit stimuleert, wordt formaldehyde ook door het licht zelf fotochemisch afgebroken (Horowitz en Calvert, 1978).

Een substantieel gedeelte van de plantopname van benzeen en toluen komt op het conto van hypostomataire opname, i.e. door de cuticula, zoals gemeten bij *Vitis vinifera*, *Malus domestica*, en *Acer campestre*. De degradatie van deze stoffen gebeurt via splitsing van de aromatische koolstofring en incorporatie in niet-vluchtige organische zuren (Ugrekheldze *et al.* 1997). 46% van de geabsorbeerde benzeen werd terug gevonden in de waslaag van de cuticula van *Dracaena sanderiana* na een expositie aan benzeen gedurende 120 uur (Treesubsuntorn en Thiravetyan, 2012). Er kon echter geen relatie worden vastgesteld tussen cuticulaire en stomataire opname, want daarvoor is een dynamische opnamestudie nodig en die zijn experimenteel zeer complex om op te zetten. Toluen werd ook sterk geabsorbeerd in de cuticulaire was en dan vooral gebonden aan de veel aanwezige hexadecanoïde stoffen, terwijl ethylbenzeen ook in de waslaag terecht kwam maar het fotosynthetisch apparaat negatief beïnvloedde (Sriprapat *et al.* 2014). Hun studie aan twaalf plantensoorten toonde aan dat *Sansevieria trifasciata* de meeste toluen verwijderde terwijl *Chlorophytum comosum* het beste presteerde in benzeenverwijdering.

Opname door blad gevolgd door excretie door wortels is waargenomen voor trichloorethyleen en 1,2,3-trichloorbenzeen in tarwe, tomaat en mais (Su en Liang, 2013, in de review door Dela Cruz *et al.* 2014). Als de genoemde stoffen in de bodem kwamen, werden ze vervolgens gedegradeerd door micro-organismen. Monooxygenases en dioxygenases zijn onderdeel van het bacteriële multicomponent enzymstelsel, en zijn in staat om stoffen als benzeen, toluen, ethylbenzeen en xyleen af te breken in het milieu (Jindrova *et al.* 2002).

Ook planten op hydrocultuur kunnen benzeen assimileren ondanks het ontbreken van een organisch substraat en bijbehorend microbioom. Dit werd aangetoond door Irga *et al.* (2013) die benzeen degraderende bacteriën vond op de wortels van de planten op hydrocultuur, terwijl de in substraat gepotte planten dezelfde soorten van benzeen afbrekende micro-organismen in de bodem hadden maar daarnaast tevens een veel rijkere microbiële gemeenschap bevatten.

Bij de gasopname door planten waarbij een combinatie van VOSs componenten wordt aangeboden (eg. mengsels van toluen en benzeen) is er geen interactie in de opname gevonden, en was de opname per VOS proportioneel aan diens concentratie.

Genetische modificatie van planten om de VOS assimilatie van benzeen en toluen is al eens gerealiseerd door inbouw van het zoogdier cytochrom P450 2E1. Dit construct verhoogde daadwerkelijk de opname van een reeks VOS waaronder benzeen (James *et al.* 2008).

De mechanismen van formaldehyde opname werden bestudeerd aan *Spatiphyllum* in een klimaatkast door Fyttagoras (van der Meulen & van Duijn, 2014). De opname van formaldehyde was verhoogd indien de stomataire opening verhoogde door blauw licht, en nam af wanneer het hormoon abscisine zuur (ABA) werd toegediend om de huidmondjes gedeeltelijk te doen sluiten. Opname van formaldehyde werd ook verlaagd als de planten watergebrek kenden en dan de huidmondjes deels sloten. De resultaten laten zien dat de stomataire opening een belangrijke regelfunctie heeft t.a.v. de formaldehyde opname. Hun controle experimenten laten zien dat formaldehyde opname door grond en wortels naar verhouding veel lager was. Er zijn echter geen testen gedaan van het effect van hoge luchtvochtigheid (>99%) in de klimaatkast op de mate van formaldehyde verwijdering. Het is bekend dat formaldehyde snel oplost in water, condensatiedruppels en zelfs in mist. Hierbij ontstaat het minder schadelijke formaleen.

3 Opname van luchtvervuiling in ondergrondse delen

Aangezien kamerplanten normaliter geleverd worden met pot en bijbehorend substraat, is de rol van het ondergrondse gedeelte ook van belang bij het zuiveren van de lucht. Het substraat kan daarnaast ook VOS afgeven. Daarnaast is al vroeg ontdekt dat het substraat vaak een essentiële zo niet de belangrijkste rol speelt in de luchtzuivering. Al in de jaren tachtig bestudeerde Wolverton bodem-plant systemen, en claimde dat hij de setup had bedacht op grond van experimenten in afvalwaterbehandeling. De redenering was dat als er grote volumes aan vervuilde lucht door een koolstofbed getrokken worden, dat dan de rook, de organische chemicaliën, en de pathogene micro-organismen (indien aanwezig), en mogelijk radon worden geabsorbeerd door het koolstoffilter. Vervolgens vernietigen de plantenwortels en de in symbiose daarmee levende micro-organismen de pathogene virussen, bacteriën, en de organisch-chemische bestanddelen, en converteren de afvalstoffen eventueel naar nieuw plantweefsel (Wolverton *et al.* 1989).

3.1 Rol van substraateigenschappen

Bij de opname van luchtverontreiniging in wortels en substraat zijn de drie meest invloedrijke factoren het watergehalte, het koolstofgehalte en de porositeit. Hydrofiële VOS zoals formaldehyde zullen snel oplossen in water en overgaan in formaline. Lipofiele VOS zullen makkelijk adsorberen aan koolstof zoals aanwezig in organische stof. De koolstoffractie kan zich zowel in opgeloste als in vaste organische materialen bevinden, waarbij de laatste fractie vaak een enorm uitwisselcomplex met koolstof- en waterstofbruggen vormt t.b.v. adsorptie en afgifte van ionen. Een hoge porositeit vergemakkelijkt de doorstroming van water en lucht, en verhoogt tevens de uitwisselsnelheid met de externe lucht met daarin aanwezige VOS. Actieve koolstof combineert de eigenschappen 'koolstof' en 'porositeit' en heeft bewezen vele contaminanten goed te kunnen vastleggen (zie ook §3.2). Een vergelijkende studie naar opname van formaldehyde door bodem en door wortels met en zonder een *Spatiphyllum* plant gaf aan dat het bovengrondse deel verantwoordelijk is voor het grootste deel van de formaldehyde opname (>80% op basis van de depletie curven) (van der Meulen & van Duijn, 2014). Bij die studie waren echter geen herhalingen gerapporteerd, en tevens was onbekend of het vochtgehalte van de potgrond en de microbiële biomassa representatief waren voor de standaard thuis situatie. Los van deze natuurkundige aspecten zijn ook de biologische van belang. Bij een optimale interactie tussen wortels en micro-organismen (zie §3.2) zullen wortels exudaten afgeven waarvan de micro-organismen leven en hun werk t.b.v. VOS assimilatie goed uitvoeren, en anderzijds kunnen de wortels zelf ook VOS opnemen. De rol van de rhizosfeer is aangegeven door Han and Lee (2002), die aangaven dat VOS gassen die opgesloten werden in bodemdeeltjes op den duur effectief werden verwijderd, waarschijnlijk door de grote microbiële populaties die werden gevoed door de wortels in de rhizosfeer.

3.2 Rol van micro-organismen

Tijdens zijn NASA studies ontdekte Wolverton al dat microben, die samen leefden met het wortelstelsel van kamerplanten, het vermogen hadden om toxinen uit de lucht te verwerken (Wolverton *et al.* 1984). De aanname was dat de bijproducten van dit proces voedsel verschafden voor de microben en de gastheer plant, i.e. de afbraak van de toxinen gebeurde niet zomaar maar had een bepaalde ecologische relevantie. Wolverton onderzocht ook het effect van actieve koolstof, hetgeen een extreem poreus materiaal is dat de verontreiniging uit de lucht adsorbeert door "moleculaire aantrekking", i.e. de Van der Waals krachten. Als actieve kool was gemengd met het groeimedium (bijv. compost), dan nam de hoeveelheid opgenomen verontreiniging drastisch toe. De geadsorbeerde toxinen werden vervolgens geconsumeerd door de microben. Deze bevindingen resulteerden twintig jaar later in een commercieel product, zie 3.3.

3.3 Praktische toepassingen

Het bedrijf U.S. Health Equipment Company claimt dat zij met hun Plant Air Purifier® de verontreinigingen in de lucht verwijderen door de lucht door hun systeem te leiden, i.e. een substraat waarin de plant groeit. Het bedrijf werkt samen met de voormalige autoriteit op gebied van luchtzuiverende planten, , B.C. Wolverton. Zoals boven vermeld, adsorberen de bodem aggregaten vluchtige stoffen, en de aanwezige micro-organismen zijn in staat die VOS te metaboliseren.

4 Luchtzuivering door planten onder praktijkomstandigheden

4.1 Introductie

Gebaseerd op de goede resultaten van luchtzuivering in plant kabinetten of cuvetten, besloten wetenschappers om de stap te maken naar zuivering in woonkamers, klaslokalen en kantoren. Vrij degelijk onderzoek werd verricht in Portugese klaslokalen (Pegas *et al.* 2012) waarin planten de gehalten aan CO₂, PM10 (fijnstofdeeltjes die maximaal 10 um diameter hebben) en VOS significant omlaag kregen. Hieronder worden de bevindingen van een reeks van situaties in klaslokalen, woningen, kantoorruimten en, kort, in de buitenlucht, beschreven.

4.2 Bevindingen

Studies in klaslokalen

In Portugal is de lucht in een klaslokaal gevolgd ten aanzien van de gehalten aan VOS, CO₂, PM10 na plaatsing van zes kamerplanten (Pegas *et al.* 2012). De monitoring duurde 9 weken, waarbij eerst een controle situatie van 3 weken, gevolgd door een 6-weeks periode met planten. De planten hadden een significant effect op de luchtkwaliteit: er was een 30% afname van PM10, een drievoudige reductie van VOS concentraties en een tweevoudige reductie in CO₂ gehalten. Het aantal planten in de klas was vrij laag, omdat elke plant een aanbevolen oppervlak in moest nemen van ca. 9.25 m². De drie gebruikte plantensoorten waren *Dracaena deremensis* (Janet Craig), *Dracaena marginata* (Madagascar drakenboom of Marginata), en *Spathiphyllum* (Mauna Loa). Deze soorten waren geselecteerd omdat in eerdere testkamer studies deze soorten goed presteerden in de opname van benzeen, toluen, ethylbenzeen, en xyleen (BTEX) (Orwell *et al.* 2004; Tarran *et al.* 2002; Wolverton *et al.* 1989; Wood *et al.* 2002; 2006). Hoewel de Pegas studie slechts één klaslokaal monitorde, was de statistiek afdoende omdat (1) luchtkwaliteit buiten en binnen werd gelijktijdig en frequent gemeten, (2) de tijdseries van controle en behandeling lang genoeg waren om een consistent patroon in de tijd te ontdekken. Bovendien waren de VOS concentraties met precieze technieken uitgevoerd zodat de individuele VOSsen bepaald konden worden. Zij kwamen tot de interessante conclusies dat planten de volgende dalingen tot gevolg hadden: toluen zakte van $7.62 \pm 1.73 \mu\text{g m}^{-3}$ tot $4.09 \pm 0.66 \mu\text{g m}^{-3}$, m+p-xyleen en o-xyleen zakten met 80%, en ethylbenzeen zakte van $1.09 \pm 0.21 \mu\text{g m}^{-3}$ tot $0.84 \pm 0.03 \mu\text{g m}^{-3}$, een verlaging van 15%. De genoemde VOSsen waren allen hoger dan in de buitenlucht, waar echter de VOS als aceton, methanol, en 1,1,1-trichloroethaan weer hoger waren.

Het project "Planten in de klas" (Duijn *et al.* 2011). Dit project werd uitgevoerd door Fytagoras en gefinancierd door de telersvereniging "Air so Pure". De resultaten lieten zien dat planten de volgende contaminanten in een tijdsbestek van 2 maanden konden verlagen: (1) vieze luchtjes, (2) CO₂ en – mogelijk – VOS (niet gemeten), (3) 7% minder gezondheidsproblemen. De scholieren scoorden beter in de testen (+35% bij planten die genoeg PAR ontvingen, 20% bij PAR niveaus < 15 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Resultaten zijn niet statistisch getoetst; het is waarschijnlijk dat verschillen van maximaal 5-10% niet significant zijn, gelet op de kleine sample grootte en de meestal grote variatie die tussen leerling populaties kan optreden (12 klassen in een totaal van 4 scholen, waarvan 6 klassen met, en 6 klassen zonder planten. Natuurlijk is het jammer dat er geen VOS is gemeten.

Studies in woningen en kantoren

In Japan, is er vrij veel onderzoek gedaan naar luchtzuivering door planten in woningen. Lim (2009) vond een afname in formaldehyde en xyleengehalten in huizen, maar niet van toluen en ethylbenzeen. De 2-jarige studie betrof 82 huishoudens. Kim *et al.* (2011) nam een afname van alle vier genoemde stoffen weer in kantoren, zowel door toedoen van planten als, apart, door ventilatie. Deze effecten werden zowel in oude als in nieuwe gebouwen geconstateerd, maar de resultaten waren niet statistisch getoetst. Het ontbreken van statistische tests komt regelmatig voor in dit vakgebied, zodat geen conclusies over de werking van planten op luchtkwaliteit kan worden vastgesteld. Een belangrijke uitzondering is de studie door Pegas *et al.* (2012) die op zich de juiste statistiek gebruikten hoewel het maar één klas betrof en de herhaling van de proef in de tijd moest plaatsvinden.

Hun studie was ook een van de weinige luchtzuiveringsstudies waarin het effect van ventilatie expliciet werd meegenomen, waardoor het resterende effect op het conto van de luchtzuivering door planten geschreven kon worden (zie ook boven).

Resultaten van Japans onderzoek aan oude en nieuwe gebouwen laat verschillen zien tussen de diverse VOS. In deze studie waren twee kamers van ruim 100 m² geselecteerd in zes nieuwe dan wel oude gebouwen. Na selectie werden er 22–25 planten van zes soorten geplaatst in de helft van de kantoren. Formaldehyde- en toluenconcentraties in kantoren van nieuwe gebouwen verminderden van 80.8 naar 66.4 µg m⁻³ en van 275 naar 106 µg m⁻³ respectievelijk, door een combinatie van ventilatie en aanwezigheid van planten (Kim *et al.* 2011a). De combinatie van planten en ventilatie resulteerde ook in een afname van benzeenconcentraties van 7.20 tot 1.96 µg m⁻³ in kantoren in oudere gebouwen. In dezelfde oudere gebouwen resulteerde het gebruik van planten in een afname van formaldehyde van 23.2 naar 16.5 µg m⁻³ in de periode zonder ventilatie en van 28.8 tot 18.6 µg m⁻³ in de periode met ventilatie (Kim *et al.* 2011a). Er waren geen wijzigingen in ethylbenzeen- en xyleenconcentraties door het inzetten van planten, onafhankelijk van de factoren ventilatie en ouderdom van het gebouw (Kim *et al.* 2011a). Het was op basis van de gebruikte statistiek helaas niet mogelijk om de reducties van VOS op significantie te toetsen.

In een studie naar het effect van planten in woningen zijn twee jaar lang VOS concentraties gemeten. Hierbij daalden de formaldehydeconcentraties door planten van 72.0 naar 33.7 µg m⁻³ in een periode zonder ventilatie en van 70.6 naar 10.7 µg m⁻³ in een periode met ventilatie, dit alles in het eerste jaar. In het tweede jaar daalden door inzet van de planten de concentraties van 85.1 naar 44.7 µg m⁻³ en van 54.0 naar 11.9 µg m⁻³, bij ventilatie of zonder ventilatie respectievelijk (Lim *et al.* 2009). Xyleenconcentraties daalden ook door toedoen van planten in woningen, van 12.3 naar 2.4 µg m⁻³ zonder, en van 10.7 naar 1.0 µg m⁻³, met ventilatie, maar alleen in het eerste jaar. In het tweede jaar waren de xyleenconcentraties te laag om enige tendens aan te geven (Lim *et al.* 2009). Toluene en ethylbenzeenconcentraties wijzigden niet door inzet van planten noch door ventilatie.

Een goed uitgevoerde studie door Wood *et al.* (2006) werd uitgevoerd in nieuwe, oude en opgeknapte Australische gebouwen. Er waren 0, 3 of 6 *Dracaena deremensis* 'Janet craig' planten (potgrootte 30 cm) in kantoorkamer van 10-12 m² (ca. 30-50 m³ volume) geplaatst. Boven een concentratie van 100 ppb werden de totale VOCs significant verlaagd door planten, tot 50-70% van de startwaarde, gegeven een negen weekse observatieperiode. Wood *et al.* vond geen afname onder deze drempel van 100 ppb en nam aan dat de planten dan niet metabolisch gestimuleerd werden om de VOC actief op te nemen.

In Nederland vond het bedrijf IB Kwadraat dat een plantenwand voorzien van een ventilator de luchtkwaliteit verbeterde door afname van een toegediende VOS combinatie van alkanen en organische polycarbonaten. Zij vonden een afname van 60 naar 15 ppm in 28 uur, en van methaan en ureum in de zelfde concentratie range in 13.5 uur (Ballieux, 2016). De testen waren uitgevoerd bij een afgesloten systeem van 7 m³. De initiële VOC concentraties, 60 ppm, zijn veel hoger dan in de praktijk meestal voorkomen maar worden soms in fabriekshallen e.d. gevonden.

Het Nederlandse adviesbureau Fytagoras claimt dat circa 350 gram verse bladmassa per persoon voldoende is om de lucht binnenskamers schoon te houden. Dit houdt in dat er 3 planten van gemiddelde grootte in ruimten van 75 m³ volstaan om binnen vier uur de gehalten aan formaldehyde in de lucht te halveren. Deze schattingen zijn gebaseerd op hun eigen metingen in aanvulling op de resultaten van Wolverton. Een dergelijke aanpak is erg handig om het inzetten van planten in de praktijk uit te rollen, maar er kleeft de nodige onzekerheid aan de berekeningen. Wolverton vond dan inderdaad wel afnamen van formaldehyde gedurende 24 uur van 47 tot 70%, maar er was daar veel meer bladmassa per eenheid lucht. Dit wordt ook bevestigd door actieve monitoring in praktijkomstandigheden door Dingle *et al.* (2000), waar slechts een reductie met 11% werd bereikt bij gebruik van 1 plant m⁻³ of 2.4 planten m⁻² hetgeen veel meer is dan Fytagoras adviseert.

Studies buiten

In een onderzoekssamenwerking tussen AMS Institute (Amsterdam Institute for Advanced Metropolitan Solutions) en WUR is de afname van fijnstof kleiner dan 2.5 µm diameter (PM2.5) door planten onderzocht in 2016. In betrekkelijk harige cultivar van de kamperfolieplant, genaamd 'Green Junkie' en geleverd door de veredelaar MyEarth, werd verondersteld veel deeltjes in zijn beharing te kunnen opvangen. In de windtunnel proef, gepositioneerd langs een straat in Amsterdam, bleke de planten de PM2.5 gehalten niet significant te verlagen (pers. comm. B. Heusinkveld, WUR). Door de grote variatie in experimentele condities (luchtsnelheid, luchtwervelingen, concentraties) zijn uit dergelijke proeven soms lastig conclusies te trekken.

Darlington *et al.* (2002) bediscussiëren het gebruik van planten en hun substraat om VOS uit de lucht in gebouwen te halen in plaats van grote bio-infiltratie installaties die veel organische stof verbruiken en mogelijk ook weer veel vluchtige stoffen emitteren. Planten hebben het voordeel dat ze wel VOS assimileren maar er niet van afhankelijk zijn voor hun koolstofvoorziening aangezien daarvoor de fotosynthese gebruikt wordt.

4.3 Toekomstig perspectief

Om de labproeven te extrapoleren naar praktijkomstandigheden, zouden de tests in meer realistische omstandigheden moeten plaatsvinden. Dit kan worden geïllustreerd door een vertaalde passage uit het uitstekende review artikel van Dela Cruz *et al.* (2014):

"Voor nabootsing van realistische praktijkomstandigheden zijn de juiste VOS concentratie en het juiste lichtniveau van belang. De meeste laboratoriumstudies zijn uitgevoerd bij lichtniveaus van of 5.45–600 µmol m⁻² s⁻¹ waarvan er dus veel de gebruikelijke waarden in kantoren van 9–14 µmol m⁻² s⁻¹ (Akashi and Boyce 2006; Nicol *et al.* 2006) ruim overschrijden. VOS concentraties van 1000 µg m⁻³ zoals die vaak in labstudies worden gebruikt zijn substantieel hoger dan de 100 µg m⁻³ die in binnenruimten meestal voorkomen (Zabiegala 2006)".

Daarenboven zouden de metingen in praktijkomstandigheden ook de luchtverplaatsing, de emissie door aanwezige objecten en andere co-factoren moeten meenemen in een statistisch robuust meetschema. Alleen een goed onderbouwde meetstrategie kan aantonen dat de plant een significante rol speelt in wijzigingen van de luchtsamenstelling.

De praktijkomstandigheden qua luchtkwaliteit zijn zeer divers en maken het niet altijd noodzakelijk om de lucht te zuiveren, gelet op de volksgezondheid. Voor benzeen geldt dat elke concentratie wordt afgeraden aangezien het zelfs bij de laagste concentraties een mogelijk carcinogeen effect kan hebben (WHO, 2010). Toch is de samenleving al jaren blootgesteld aan benzeen, dat door twee veel voorkomende bronnen, i.e. het verkeer en sigarettenrook, overal wel meer of minder voorkomt. De drempelwaarde voor formaldehyde, een van de componenten die het 'sicjk building syndrome' kan veroorzaken, is daarentegen betrekkelijk hoog (80 ppb of 0.1 mg m⁻³, zie WHO, 2010). Deze waarden zullen meestal lokaal en tijdelijk, bijvoorbeeld bij nieuw geplaatst bouw materiaal, optreden. Onder andere om die reden wordt in de Verenigde Staten een luchtkwaliteitsmeting vereist in nieuwe gebouwen, voordat het gebouw in gebruik mag worden genomen. Het is echter evident dat gelet op deze twee veel voorkomende VOCs de relevantie groot is om luchtkwaliteit in binnenruimten in acht te nemen, en indien nodig preventieve en/of curatieve maatregelen te nemen.

5 Conclusies

Literatuur

De wetenschappelijke literatuur laat duidelijk zien dat planten de lucht kunnen zuiveren van VOS, maar wijst niet zondermeer één plantensoort aan die het beste presteert. Volgens Kim *et al.* (2011a, b) presteert de klimopfamilie (Araliaceae) het beste in de opname van lipofiele VOS zoals benzeen, hoewel dit niet sterk statistisch is onderbouwd. Interessant dat de klimop ook hoog scoort op de lijstjes van Wolverton *et al.* (1989) voor zowel formaldehyde als benzeen verwijdering per eenheid bladoppervlak. Aangezien sommige kamerplanten een bijzonder groot oppervlak hebben, kunnen zij eventuele lage opnamensnelheden per cm² compenseren, zoals bij soorten als *Dracaena* en *Spatiphyllum*, die dus dan ook goed presteren op plantbasis. Er zijn de nodige technische uitdagingen om de daadwerkelijke plantopname van VOS experimenteel te bepalen. Veel studies maken geen onderscheid tussen boven- en ondergrondse opname, maken geen melding van toegepaste luchtcirculatiesnelheden of lichtniveau 's, zodat de resultaten lastig te extrapoleren zijn naar praktijkomstandigheden. Het algemene beeld is echter dat een heel scala aan plantensoorten in kort tijdbestek significant VOS kunnen opnemen. Opname van CO₂ is zonder twijfel goed mogelijk door planten, ten aanzien van fijnstof is het effect niet duidelijk. Op week- tot maandbasis onder praktijkomstandigheden laten studies ook afnamen van VOS zoals formaldehyde zien, al zijn de verschillen tussen typen gebouw en type VOS groot.

Aanbevelingen

Er is nog het nodige onbekend van de assimilatie-route van VOS in de plant en van de lange termijn effecten op de plantprestaties, waardoor het de vraag is of planten de luchtzuivering blijven realiseren en of er geen re-emissie zal plaatsvinden. Over formaldehyde is wel al veel bekend en dit kan als voorbeeld dienen voor al de andere VOS typen. Met recent ontwikkelde technieken als radioactieve labeling van de VOC of door het meten van de transcriptieniveaus van de betrokken genen kan meer worden gezegd over de verwerkingsmechanismen per plantensoort en type VOS.

E grootste uitdaging is wellicht om te onderbouwen hoeveel lucht de planten in praktijksituaties feitelijk kunnen zuiveren. Er zijn al enkele waardevolle studies met meetperioden van maanden en jaren bekend, maar deze resultaten zijn evenwel moeilijk door te vertalen naar andere gebouwen met andere kenmerken, ander buitenklimaat, etc. Voor elke nieuwe situatie zal dus proefondervindelijk moeten worden aangetoond hoe goed de planten ter plekke presteren.

Literatuur

Akashi Y, Boyce PR, 2006.

A field study of illuminance reduction. *Energy Build* 38:588–599

Ballieux, M.J.B., 2016.

Luchtzuiverend ventilatiesysteem met plantenwand. IB Kwadraat.

Li-mei Chen, Hiroya Yurimoto, Kun-zhi Li, Izumi Orita, Motomu Akita, Nobuo Kato, Yasuyoshi Sakai & Katsura Izui 2010.

Assimilation of formaldehyde in transgenic plants due to the introduction of bacterial ribulose monophosphate pathway genes. *Biosci.Biotech. Biochem.* 74, 627-263

Darlington A, Llewellyn D, Mallany J. & Dixon M., 2002.

Horticultural biofiltration systems improve indoor air quality. Division of Horticultural Science, Department of Plant Agriculture, University of Guelph, Guelph, Ontario, Canada. In: : Proceedings of the XXVIth International Horticultural Congress, Toronto Canada. August 15-16, 2002. Symposium 7, Expanding roles for Horticulture in Improving Human Well-Being and Life Quality. *Acta Horticulturae* xxx.

Dela Cruz, M., Jan H. Christensen, J.H., Thomsen, J.D., & Müller, R., 2014.

Can ornamental potted plants remove volatile organic compounds from indoor air? — a review. *Environm. Sci. Pollut. Res.* 21:13909–13928. DOI 10.1007/s11356-014-3240-x.

Dingle, P., Tapsell, P., and Hu, S., 2000.

Reducing formaldehyde exposure in office environments using plants. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 64, 302–308.

Duijn, B., van, Klein Hesselink, J., Kester, M., Janse, J. en Spitters, H., 2011.

Planten in de Klas, PT-rapport 13908.

Giese M, Bauerdoranth U, Langebartels C, Sandermann H (1994).

Detoxification of formaldehyde by the spider plant (*Chlorophytum comosum* L.) and by soybean (*Glycine max* L.) cell-suspension cultures. *Plant Physiol* 104:1301–1309

Han, S. and Lee, J., 2002.

Removal efficiency of indoor air pollutant gases by oriental orchids. Department of Horticultural Science, Seoul Woman's University, Seoul, South Korea. In: Proceedings of the XXVIth International Horticultural Congress, Toronto Canada. August 15-16, 2002. Symposium 7, Expanding roles for Horticulture in Improving Human Well-Being and Life Quality. *Acta Horticulturae* 639, 383 pp.

Horowitz A, Calvert JG, 1978.

Wavelength dependence of the quantum efficiencies of the primary processes in formaldehyde photolysis at 25 °C. *Int J Chem Kinet* 10:805–819

Irga, P.J., Torpy, F.R. and Burchett, M.D., 2013. Can hydroculture be used to enhance the performance of indoor plants for the removal of air pollutants? *Atmospheric Environment* 77: 267-271.

James, CA, Xin, G, Doty, SL, Strand SE, 2008.

Degradation of low molecular weight volatile organic compounds by plants genetically modified with mammalian cytochrome P450 2E1. *Environ Sci Technol* 42: 289-293.

Jindrova E, Chocova M, Demnerova K, Brenner V, 2002.

Bacterial aerobic degradation of benzene, toluene, ethylbenzene and xylene. *Folia Microbiol* 47:83–93

Kierkels, Th. en Heuvelink, E., 2016.

Planten zuiveren lucht, maar praktische invulling stuit op gebrek aan kennis. *Onder Glas*, juni 2016.

Kim KJ, Il Jeong M, Lee DW, Song JS, Kim HD, Yoo EH, Jeong SJ, Han SW, Kays SJ, Lim YW, Kim HH, 2010.

Variation in formaldehyde removal efficiency among indoor plant species. *Hortscience* 45: 1489–1495

Kim HH, Lee JY, Yang JY, Kim KJ, Lee YJ, Shin DC, Lim YW, 2011a.

Evaluation of indoor air quality and health related parameters in office buildings with or without indoor plants. *J Jpn Soc Hortic Sci* 80:96–102

Kim KJ, Yoo EH, Jeong MI, Song JS, Lee SY, Kays SJ, 2011b.

Changes in the phytoremediation potential of indoor plants with exposure to toluene. *Hortscience* 46:1646–1649

Lim YW, Kim HH, Yang JY, Kim KJ, Lee JY, Shin DC, 2009.

Improvement of indoor air quality by houseplants in new-built apartment buildings. *J Jpn Soc Hortic Sci* 78:456–462

- Lindow, S.E. and Brandl, M.T., 2003.
Microbiology of the phyllosphere. *Appl Environ Microbiol* 69:1875-1883.
- Meulen, R. van de, Duijn, B. van, 2014.
Fysiologische aspecten van luchtzuivering door planten. Fytagoras report, Leiden.
- Nicol F, Wilson M, Chiancarella C, 2006.
Using field measurements of desktop illuminance in European offices to investigate its dependence on outdoor conditions and its effect on occupant satisfaction, and the use of lights and blinds. *Energy Build* 38:802–813
- Orwell RL, Wood RL, Tarran J, Torpy F, Burchett MD, 2004.
Removal of benzene by the indoor plant/substrate microcosm and implications for air quality. *Water Air Soil Poll* 157: 193–207.
- Pegas, P.N., Alves, C.A., Nunes, T., Bate-Epey, E.F., Evtugina, M. & Pio, C.A., 2012.
Could Houseplants Improve Indoor air Quality in Schools? *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 75:22-23, 1371-1380.
- Sawada A, Oyabu T, Chen LM, Li KZ, Hirai N, Yurimoto H, Orita I, Sakai Y, Kato N, Izui K, 2007.
Purification capability of tobacco transformed with enzymes from a methylophilic bacterium for formaldehyde. *Int J Phytoremediat* 9:487–496
- Schmitz H, Hilgers U, Weidner M, 2000.
Assimilation and metabolism of formaldehyde by leaves appear unlikely to be of value for indoor air purification. *New Phytol* 147:307–315
- Stapleton, E. and Ruiz-Rudolph, P., 2016.
The potential for indoor ultrafine particle reduction using vegetation under laboratory conditions. *Indoor and Built Environment* DOI: <https://doi.org/10.1177/1420326X16668388>
- Su YH, Liang YC, 2013.
The foliar uptake and downward translocation of trichloroethylene and 1,2,3-trichlorobenzene in air-plant-water systems. *J Hazard Mater* 252–253:300–305
- Tani, A. and Hewitt, C.N., 2009.
Uptake of Aldehydes and Ketones at Typical Indoor Concentrations by Houseplants. *Environ. Sci. Technol.* 2009, 43, 8338–8343
- Tarran, J., Orwell, R., Burchett, M., Wood, R., and Torpy, F., 2002.
Quantification of the capacity of indoor plants to remove volatile organic compounds under flow-through conditions. Final Report to Horticulture Australia Ltd, HAL, Sydney, NSW, Australia.
- Treesubstantorn C, Thiravetyan P, 2012.
Removal of benzene from indoor air by *Dracaena sanderiana*: effect of wax and stomata. *Atmos Environ* 57:317–321
- Ugrekheldze D, Korte F, Kvesitadze G, 1997.
Uptake and transformation of benzene and toluene by plant leaves. *Ecotoxicol Environ Saf* 37:24–29
- WHO, 2010. WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. World Health Organization rapport. ISBN 978 92 890 0213 4, 494 pp.
- Wolverton, B. C., McDonald, R. C., and Watkins, E. A., Jr., 1984.
Foliage plants for removing indoor air pollutants from energy efficient homes. *Econ. Bot.* 38: 224–229.
- Wolverton, B. C., Johnson, A., and Bounds, K., 1989. Interior landscape plants for indoor air pollution abatement. Final report, NASA. Stennis Space Center, MS: NASAS.
- Wolverton BC and Wolverton JD, 1993.
Plants and soil microorganisms: removal of formaldehyde, xylene, and ammonia from the indoor environment. *J Miss Acad Sci* 38:11–15
- Wood, R. A., Orwell, R. L., Tarran, J., Torpy, F., and Burchett, M., 2002.
Potted-plant/growth media interactions and capacities for removal of volatiles from indoor air. *J. Horticult. Sci. Biotechnol.* 77: 120–129.
- Wood, R. A., Burchett, M. D., Alquezar, R., Orwell, R. L., Tarran, J., and Torpy, F., 2006.
The potted-plant microcosm substantially reduces indoor air VOC pollution: I. Office field-study. *Water Air Soil Pollut.* 175: 163–180.
- Yang DS, Pennisi SV, Son K-C, Kays SJ, 2009.
Screening indoor plants for volatile organic pollutant removal efficiency. *HortScience* 44: 1377–1381.
- Xu ZJ, Wang L, Hou HP, 2011.
Formaldehyde removal by potted plant-soil systems. *J Hazard Mater* 192:314–318

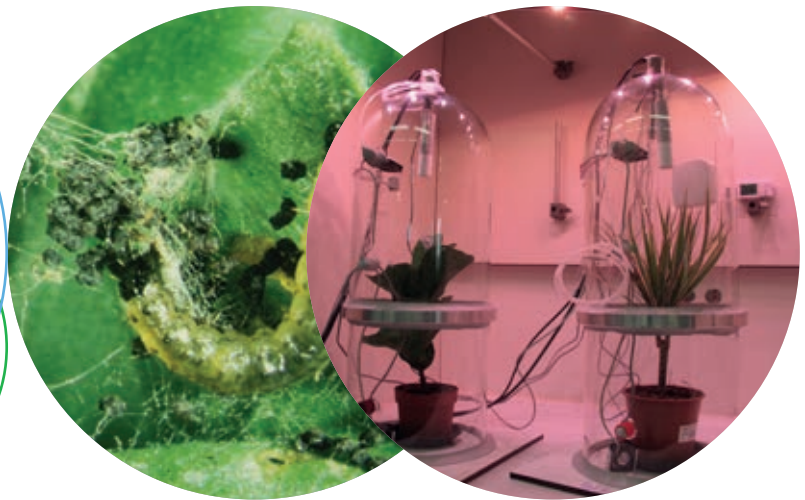
Zabiegala, B., 2006.

Organic compounds in indoor environments. *Pol J Environ Stud* 15:383–393

Zhang H, Pennisi SV, Kays SJ, Habteselassie MY, 2013.

Isolation and identification of toluene-metabolizing bacteria from rhizospheres of two indoor plants. *Water Air Soil Pollut* 224:1–14

To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life



Wageningen University & Research,
BU Glastuinbouw
Postbus 20
2665 ZG Bleiswijk
Violierenweg 1
2665 MV Bleiswijk
T +31 (0)317 48 56 06
F +31 (0) 10 522 51 93
www.wur.nl/glastuinbouw

Glastuinbouw Rapport WPR-695

Wageningen University & Research, BU Glastuinbouw initieert en stimuleert de ontwikkeling van innovaties gericht op een duurzame glastuinbouw en de kwaliteit van leven. Dat doen wij door toepassingsgericht onderzoek, samen met partners uit de glastuinbouw, toeleverende industrie, veredeling, wetenschap en de overheid.

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen WUR bundelen 9 gespecialiseerde onderzoeksinstituten van stichting DLO en WUR hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.000 medewerkers en 9.000 studenten behoort WUR wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.