



# Plantkampioen luchtzuivering binnenruimtes

Eindrapport

Pieter de Visser en Esther Meinen

Rapport WPR-812



## Referaat

Binnen het project 'Plantkampioen luchtzuivering', een publiek-private samenwerking binnen de Topsector Tuinbouw en Uitgangsmaterialen, is door Wageningen University & Research BU Glastuinbouw een studie uitgevoerd naar de mogelijkheden van planten om lucht binnenshuis te zuiveren. In dit rapport wordt de experimentele toetsing van de luchtzuiverende eigenschappen gepresenteerd. Het algemene beeld is dat planten goed de Vluchtige Organische Stof (VOS) kunnen opnemen zonder zelf schade te ondervinden. Formaldehyde is als kenmerkende hydrofiële VOS onderzocht bij de kamerplanten Ficus, Spathiphyllum, Sansevieria en Cyperus. De Ficus neemt van deze soorten bovengronds met de hoogste snelheid formaldehyde op. Als we de pot ook meerekenen, is Cyperus de snelste luchtzuiveraar ten aanzien van formaldehyde. Daarbij bleek dat meer vocht in lucht of bodem de formaldehyde opname sterk bevordert. Als tweede type VOS is xyleen onderzocht, een lipofiele VOS die via een andere route in het plant en substraat systeem wordt opgenomen. Het bleek dat de xyleen opname aan het blad reversibel was en na plaatsing in schone lucht grotendeels weer wordt afgestaan. Het plantensubstraat is mogelijk meer relevant voor luchtzuivering met betrekking tot niet in water oplosbare, lipofiele VOS dan de plant zelf, wat ook blijkt uit vakliteratuur. Het onderzoek toont aan dat de inzet van plant en substraat ten behoeve van zuivering van VOS in binnenruimtes perspectief biedt.

## Abstract

Within the project 'Plant champion air purification', a public-private cooperation within Topsector Horticulture and Starting materials, research was carried out by Wageningen University & Research BU Greenhouse Horticulture on the possibilities of plants to purify indoor contaminated air. In this report the experimental findings are reported. The general conclusion is that plants can effectively remove Volatile Organic Compounds (VOCs) without causing plant injury. Formaldehyde is research being a typical hydrophilic VOC, for the ornamental plants Ficus, Spathiphyllum, Sansevieria en Cyperus. Ficus is the fastest in removing formaldehyde from the air by its aboveground leaves. Incorporating also the substrate, then Cyperus is the fastest. It was shown that the presence of water in air and/or substrate is a key factor in the rate of formaldehyde depletion. The second VOC examined was the lipophylic xylene which followed an uptake pathway other than formaldehyde. In the experiments it was shown that xylene was adsorbed to the leaf only temporarily, and was again mostly re-emitted when brought into clean air. Possibly the substrate is of bigger importance than the plant in removing xylene and other lipophilic VOC, as was also stated in literature. The research shows that plants clearly have the potential to purify the indoor air from VOC.

## Rapportgegevens

Rapport WPR-812

Projectnummer: 3742241400

TKI T&U nummer: KV1604-051

DOI nummer: 10.18174/456866

Thema: Kwaliteit en Productie



DE GROENE  
STAD

WONEN  
WERKEN  
LEVEN



Productschap  Tuinbouw

## Disclaimer

© 2018 Wageningen, Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business unit Glastuinbouw, Postbus 20, 2665 MV Bleiswijk T 0317 48 56 06, [www.wur.nl/plant-research](http://www.wur.nl/plant-research).

Kamer van Koophandel nr.: 09098104. BTW nr.: NL 8113.83.696.B07

Stichting Wageningen Research. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Stichting Wageningen Research.

Stichting Wageningen Research 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

# Inhoud

	<b>Voorwoord</b>	<b>5</b>
	<b>Samenvatting</b>	<b>7</b>
<b>1</b>	<b>Introductie</b>	<b>9</b>
	1.1 Voorgaand eigen onderzoek	9
	1.1.1 Literatuurstudie	9
	1.1.2 Aanbevelingen vanuit bestaande kennis	10
	1.2 Doelstelling	10
<b>2</b>	<b>Methode</b>	<b>11</b>
	2.1 Experimentele opzet	11
	2.1.1 Plantensoorten	11
	2.1.2 Behandelingen	12
	2.2 Meetopstelling	13
	2.2.1 Plantkamer en begassing	15
	2.2.2 Sensoren	15
<b>3</b>	<b>Resultaten</b>	<b>17</b>
	3.1 Luchtzuivering per plantensoort en behandeling	17
	3.1.1 Formaldehyde	17
	3.1.1.1 Plant	17
	3.1.1.2 Invloed van luchtvochtigheid, waterreservoir en watergehalte pot	19
	3.1.2 Xyleen	21
	3.1.2.1 Lege cuvet	21
	3.1.2.2 Plant	22
	3.1.2.3 Potgrond	24
	3.2 Vergelijking met overig onderzoek	26
	3.2.1 Formaldehyde	26
	3.2.2 Xyleen	28
	3.3 Gevonden mechanismen	28
	3.4 Doorvertaling naar binnenruimtes	28
<b>4</b>	<b>Discussie en conclusies</b>	<b>31</b>
	4.1 Discussie	31
	4.2 Conclusies	32
	4.2.1 Belangrijkste vondsten	32
	4.2.2 Projectresultaten in vergelijking met voorgaand onderzoek	32
	4.2.3 Toepasbaarheid van het resultaat	32
	<b>Literatuur</b>	<b>33</b>
	<b>Bijlage 1 Bladoppervlak</b>	<b>35</b>



# Voorwoord

Dit onderzoek is als publiek-private samenwerking (PPS) uitgevoerd binnen het onderzoeksprogramma van de koepel-PPS Groen voor een gezonde woon-, leef- en werkomgeving, gefinancierd door de TKI Tuinbouw en uitgangsmaterialen. De projectcommissie bestond naast de onderzoekers uit vertegenwoordigers van participerende bedrijven of financiers: Marco van Leeuwen (Air so Pure), Aad van der Knaap (KP Holland), Marc Custers (Into Green VHG/VGB), Cor Vonk Noordegraaf en Hermen de Graaf (Stimuflori), Leon Smet (Stichting De Groene Stad) en Albert Haasnoot (Royal FloraHolland). Zij worden van harte bedankt voor hun medewerking. Ook bedankt worden Claire van Haren (Master student van de UvA/VU Amsterdam), Joost Budding (stagiaire bij Tupola) en Wageningen University & Research medewerkers Ton van der Zalm en Roland Mumm voor hun noodzakelijke hulp bij de experimenten.



# Samenvatting

De lucht in binnenruimtes kan vervuild zijn met vluchtige stoffen die vrijkomen uit o.a. bouwmaterialen, meubels, bekleding, en door menselijke activiteit waaronder sigarettenrook en vervuilde buitenlucht. De laatste jaren worden steeds vaker planten ingezet om de lucht te zuiveren. De plantenleveranciers hebben echter de behoefte om deze luchtzuiverende capaciteit van planten wetenschappelijk te onderbouwen, en de opgedane kennis te benutten om deze waardevolle functie van planten nog beter in te zetten.

Deze studie toetst de luchtzuiverende werking van enkele uiteenlopende soorten kamerplanten. Er wordt gezocht naar verklaringen voor de verschillen tussen de soorten. De bevindingen moeten leiden tot een advies waaraan een plantkampioen luchtzuivering moet voldoen. Zuivering van de lucht betreft in deze studie de Vluchtige Organische Stoffen (VOS), waarbij formaldehyde en xyleen als vertegenwoordigers van de hydrofiele respectievelijk lipofiele VOS zijn getoetst. De metingen zijn verricht in een afgesloten glazen stolp waar alle in- en uitgaande lucht werd gecontroleerd. De omstandigheden in de meetruimte benaderden de condities in een kantoor qua licht en temperatuur. De luchtzuivering werd bepaald door de afname van de concentraties formaldehyde dan wel xyleen zoals geregistreerd met specifieke sensoren.

Van de geteste soorten had op plantbasis de *Cyperus* de hoogste capaciteit om formaldehyde uit de lucht op te nemen, gevolgd door *Ficus*, *Sansevieria* en *Spathiphyllum* respectievelijk. Omgerekend naar zuivering per eenheid bladoppervlak presteerde *Ficus* het beste, op afstand gevolgd door *Cyperus* en *Spathiphyllum*, en *Sansevieria* als laatste. Opmerkelijk was dat water een belangrijke rol in de formaldehyde afname speelde, hetgeen bleek bij plaatsing van een wateroplossing en verhoging van de luchtvochtigheid.

Elk van de soorten kon tijdelijk xyleen adsorberen maar bleek dit weer grotendeels af te geven als de omgevende lucht schoon was. Het substraat speelt een grote rol in het wegvangen van xyleen.





# 1 Introductie

Recentelijk is er veel aandacht in de maatschappij voor de schadelijke effecten van luchtverontreiniging op de gezondheid. Terwijl voor het buitenklimaat wordt gewezen op emissie door het verkeer en industrie, wijst men voor het binnenklimaat op de gebrekkige verversing van de lucht, meestal door de vele isolatiemaatregelen, in combinatie met emissie door bouwmaterialen en door menselijke activiteit. Al tussen 1980 en 1990 ontstond de notie van het 'sick building syndrome'. Het fenomeen werd vernoemd naar de klachten bij mensen als gevolg van de slechte luchtkwaliteit in gebouwen. In diezelfde tijd startte NASA onderzoek naar wooncabines voor gebruik in de ruimte, en deed met kleinere cabines uitgebreid onderzoek naar de rol van planten in de luchtzuivering (Wolverton *et al.*, 1984, 1989). Deze NASA-studies zijn gevolgd door een scala aan onderzoek waarbij maar in geringe mate nieuwe inzichten werden geleverd. In de praktijk van de inzet van kamerplanten om lucht te zuiveren wordt daarom vaak naar de jaren tachtig terug verwezen. Deze studie beoogt om de recente vorderingen op dit onderzoeksterrein te bundelen en een nieuwe stap te zetten door een gerichte experimentele aanpak. Die gerichtheid komt voort uit de kennis, opgedaan uit de eerdere literatuurstudie (De Visser, 2017, zie voor korte bespreking §1.1), aangevuld met praktijkervaring die we vanuit de business unit Glastuinbouw rijk zijn en die vaak via een nuchtere, no-nonsense aanpak tot handige, in de praktijk bruikbare adviezen leidt. Uitdaging daarbij is dat we willen vaststellen of de luchtzuivering slechts door adsorptie aan plantendelen optreedt, wat betekent dat de plant binnen afzienbare tijd verzadigd zijn, of ook door assimilatie. De assimilatie en dus verwerking van VOS betekent dat de plant langdurig in staat is om VOS te verwerken, mits de plant vitaal blijft en groeit. De vele reviews op dit terrein geven aan dat over het mechanisme en de mate van assimilatie door de plant van VOS nog weinig bekend is (zie o.a. Dela Cruz *et al.*, 2014). Een positieve uitzondering hierop vormt formaldehyde.

Voor de tuinbouwsector is het aantonen van de gezonde werking van planten in binnenruimten belangrijk om meer functionaliteit te leveren dan sierwaarde alleen, hetgeen na deze studie beter kan worden onderbouwd. Binnen het thema Gezondheid en welbevinden van de Topsector Tuinbouw is aantoonbare, heilzame werking van planten cruciaal en betreft een kerndoelstelling.

## 1.1 Voorgaand eigen onderzoek

### 1.1.1 Literatuurstudie

Uit de in dit project eerder uitgevoerde literatuurstudie bleek dat sinds het pioniersonderzoek van Wolverton *et al.*, (1984) al veel onderzoek aan luchtzuiverende planten is uitgevoerd. Voor formaldehyde assimilatie zijn de mechanismen nu redelijk bekend (Schmitz *et al.*, 2000), voor de overige, veelal lipofiele VOS is opslag in de waslaag gevonden alsmede verwerking in de rhizosfeer in het substraat (zie het overzicht in Dela Cruz *et al.*, 2014). Toch is er zeer weinig bekend over de vitaliteit en de zuiverende prestaties van planten bij lange blootstelling, en is opschaling van lab- naar praktijksituaties pas recentelijk op gang gekomen (De Visser, 2017). 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 cm<sup>2</sup> 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 CO<sub>2</sub> is zonder twijfel goed mogelijk door planten, ten aanzien van fijnstof is het effect niet duidelijk. Op week- tot maanbasis onder praktijkomstandigheden laten studies ook afnamen van VOS zoals formaldehyde zien, al zijn de verschillen tussen typen gebouw en type VOS groot.

### 1.1.2 Aanbevelingen vanuit bestaande kennis

Er is nog het nodige onbekend van de assimilatie route van VOS in de plant en van de lange termijn effecten op de plantprestaties. Zowel als de inname van VOS vooral door adsorptie plaats vindt als door assimilatie en verwerking, is het de vraag is of planten de luchtzuivering kunnen blijven realiseren. Het is mogelijk dat de plant verzadigd raakt of schade ondervindt en het wellicht niet overleeft. 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 VOS of door het meten van de transcriptieniveaus van de betrokken genen kan meer worden gezegd over de verwerkingsmechanismen per plantensoort en type VOS.

De 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.

## 1.2 Doelstelling

De algemene doelstelling van het project is om kennis op te leveren welke plantensoorten de kantoorlucht het beste zuiveren, met welke capaciteit en of de prestatie van planten op lange termijn verzekerd is. Binnen dit onderzoek selecteren we gangbare kamerplanten met uiteenlopende eigenschappen om zo sneller een 'plantkampioen' luchtzuivering te kunnen vinden.

Vraagstelling is hoeveel VOS de betreffende plantensoort opneemt uit een afgesloten ruimte, waarbij de beginconcentratie 250 ppb is en de meting doorgaat tot geen aantoonbare afname meer plaats vindt. De concentraties van 250 ppb aan VOS komen regelmatig voor in kantoor situaties maar zijn wel bovengemiddeld (zie o.a. Wood *et al.*, 2006).

Een afgeleide vraag is welke plantensoort de beste luchtzuiverende prestaties vertoont, de 'plantkampioen', en waarom, zodat we eventueel suggesties kunnen doen om een nog beter presterende soort te vinden.

## 2 Methode

Recentelijk is er veel aandacht in de maatschappij voor de schadelijke effecten van luchtverontreiniging op de gezondheid. Terwijl voor het buitenklimaat wordt gewezen op emissie door het verkeer en industrie, wijst men voor het binnenklimaat op de gebrekkige verversing van de lucht, meestal door de vele isolatiemaatregelen, in combinatie met emissie door bouwmaterialen en door menselijke activiteit. Al tussen 1980 en 1990 ontstond de notie van het 'sick building syndrome'. Het fenomeen werd vernoemd naar de klachten bij mensen als gevolg van de slechte luchtkwaliteit in gebouwen. In diezelfde tijd startte NASA onderzoek naar woencabines voor gebruik in de ruimte, en deed met kleinere cabins uitgebreid onderzoek naar de rol van planten in de luchtzuivering (Wolverton *et al.*, 1984, 1989). Deze NASA-studies zijn gevolgd door een scala aan onderzoek waarbij maar in geringe mate nieuwe inzichten werden geleverd. In de praktijk van de inzet van kamerplanten om lucht te zuiveren wordt daarom vaak naar de jaren tachtig terug verwezen. Deze studie beoogt om de recente vorderingen op dit onderzoeksterrein te bundelen door middel van een literatuurstudie (De Visser, 2017) en een nieuwe stap te zetten t.a.v. het begrip van de luchtzuiverende werking van planten door een gerichte experimentele aanpak. Uitdaging daarbij is dat we willen vaststellen of de luchtzuivering niet slechts door adsorptie aan plantendelen, maar in belangrijke mate door assimilatie plaats vindt waartoe de plant langdurig in staat is. De vele reviews op dit terrein geven aan dat de onderbouwing van de belangrijkste plantenfysiologische processen nog ontbreekt.

Voor de tuinbouwsector is het aantonen van de gezonde werking van planten in binnenruimten belangrijk om meer functionaliteit te leveren dan sierwaarde alleen, hetgeen na deze studie beter kan worden onderbouwd. Binnen het thema Gezondheid en welbevinden van de Topsector Tuinbouw is aantoonbare, heilzame werking van planten cruciaal en betreft een kerndoelstelling.

### 2.1 Experimentele opzet

Er is in de meetopstelling een variatie aan plantensoorten (§2.1.1), type VOS en grond- en plantmanipulaties (§2.1.2) getoetst.

#### 2.1.1 Plantensoorten

De keuze voor een beperkt aantal maar wel zeer uiteenlopende kamerplant soorten is in overleg met de begeleidingscommissie tot stand gekomen, en was de volgende (zie ook Figuur 2.1):

Soort	Uitzonderlijke eigenschap(en)	Potdiameter (cm)
Spathiphyllum	Glad blad, staat bekend als goede luchtzuiveraar	11
Ficus	Leerchtig blad	11
Sansevieria	CAM-plant, leerchtig blad	14
Cyperus	Waterplant	15



**Figuur 2.1** De onderzochte plantensoorten. Vlnr: *Ficus*, *Spathiphyllum*, *Sansevieria*, *Cyperus*.

Er zijn ook plantensoorten overwogen met andere typen blad (behaard, gegroefd, etc.) maar deze konden binnen het gegeven tijdsbestek niet worden onderzocht.

### 2.1.2 Behandelingen

In de meetstolp werd het tijdsverloop gemeten van de concentratie van de VOS formaldehyde (250 ppb) respectievelijk xyleen (500 ppb) tot het moment dat de concentratie niet meer aantoonbaar wijzigde. Hiervoor werd elk van de vier de plantensoorten in drievoud getoetst. Daarnaast werd een blanco meting gedaan zonder plant, maar met formaldehyde dan wel xyleentoediening.

Aanvullende behandelingen bestonden uit bepalen van depletiecurven van:

- Plant in het donker (geen fotosynthese, wel open huidmondjes en CO<sub>2</sub>-vastlegging bij CAM-plant).
- Plant met ingepakte pot.
- Plant met 50% van het blad verwijderd.
- Pot met geheel verwijderd blad.
- Idem, met gestoomde grond (dus afgedode micro-organismen en wortels).
- Idem, met schone, verse potgrond.
- Petri-schaaltje water (volumes 75 en 150 cc, en diameters 9, 11 en 14 cm).
- RV-niveaus in de lucht van de meetstolp: 15%, 57% en 95%.

Deze aanvullende behandelingen kunnen informatie geven over in welk compartiment (blad, bodem, wortels, micro-organismen, water, vochtige lucht) de VOS wordt opgenomen.

## 2.2 Meetopstelling

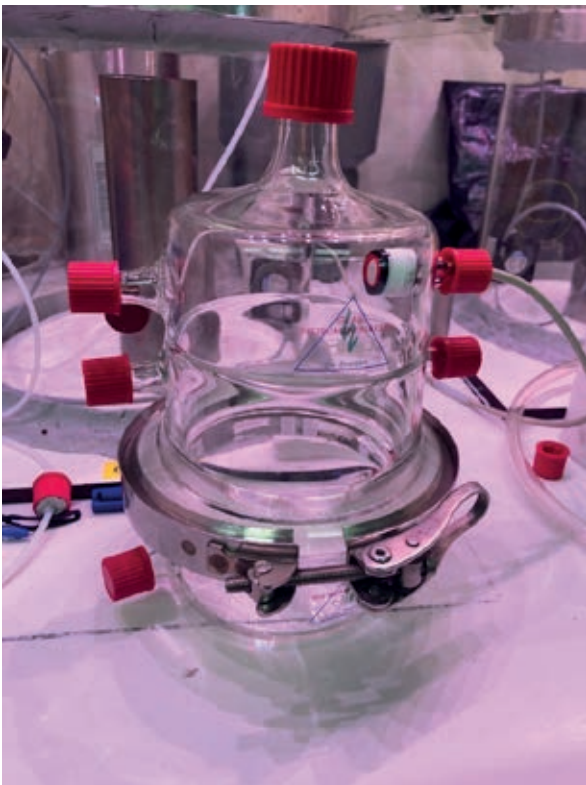
De meetopstelling bestond uit:

- Glazen stolp van 26 L.
- CO<sub>2</sub>-doseereenheid (=gasfles met 1000 ppm CO<sub>2</sub>, mengkraan).
- LED-belichting (60 μmol PAR licht boven de plant).
- Sensoren voor temperatuur, relatieve luchtvochtigheid (RV), CO<sub>2</sub> (zie §2.2.2).
- VOS-sensoren voor formaldehyde en xyleen (zie §2.2.2).
- Verwarmingselement (voor verdampen van formaldehyde of water).
- Kleine ventilators (2x).
- Terostat materiaal (voor dichten van de naden).
- Extern luchtpompje voor sampling met Tenax-buisjes.

A



B



**Figuur 2.2** De gebruikte meetstolpen: (A) de 26L stolp voorzien van sensoren (binnenin) en LED-belichting, en (B) de 1.4L stolp.

### 2.2.1 Plantkamer en begassing

De meetplant werd voorafgaand aan de meting goed voorzien van water, en na het uitlekken van de pot in de meetstolp geplaatst. De plant werd pas na 2 uur hierna aan de behandeling onderworpen zodat eventueel door verplaatsing van de plant gesloten huidmondjes weer geopend waren. Vervolgens werd gewacht met toediening van de VOS tot dat de RV door plantverdamping was gestegen tot 95%, om alle plantbehandelingen bij dezelfde RV te laten starten.

Formaldehydetoediening vond plaats door een specifieke hoeveelheid formaldehyde-2,4-DNPH oplossing (Merck) met een micropipet te druppelen op een verhittingsplaatje waarna de oplossing onmiddellijk verdampte tot een concentratie van ca. 250 ppb.

Xyleentoeediening vond plaats met meta-xyleen van het merk Praxair, met concentratie van 1 ppm, welke werd gedoseerd in de schone lucht van de meetstolp totdat de PID-sensor 500 ppb aangaf, waarna de meting van xyleendepletie startte.

De xyleentoeediening werd voor *Spathiphyllum* herhaald in een veel kleinere cuvet van 1.4 L waar veel vrijwel geen xyleenadsorptie aan glaswand en, vanwege het beperkte volume, afwezigheid van het merendeel van de slangen en sensoren. In de cuvet werd slechts één blad geplaatst, waarna de enige aanwezige sensor, de PID (zie §2.2.2), bij een aanvangsconcentratie van 500 ppb vervolgens de concentratiewijzigingen registreerde. De gemeten planten dan wel blaadjes werden na de begassing gemeten ten aanzien van bladoppervlak en versgewicht, en drooggewicht na droging in een geventileerde oven bij 105°C gedurende 48 uur. Het watergehalte in de potgrond werd na de begassing bepaald door het gemeten verschil tussen versgewicht en gewicht na droging bij 70°C gedurende 5 dagen.

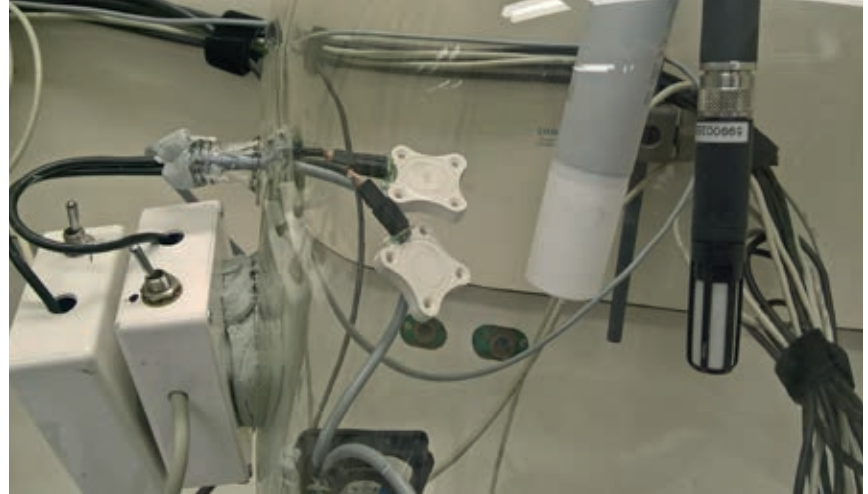
### 2.2.2 Sensoren

De opstelling bevatte een DART-sensor t.b.v. meting van formaldehyde concentraties. Laagst waarneembare concentratie: 10 ppb. Gevoelig voor vocht boven 90% RV. Niet gevoelig voor de toegepaste temperatuur range (20-22 graden Celsius). De DART-sensor werd geijkt door toediening van een formaline-oplossing van formaldehyde-2,4-DNPH van Merck in 10 stappen van 100 ppb, overeenkomend met formaldehydeconcentraties van 0 t/m 1000 ppb.

Voor lipofiele VOSs zoals xyleen is een PID-sensor gebruikt, type mini-PID-2 van Ion Science, versie HS (high sensitive). De PID-sensor is voor xyleen gecalibreerd m.b.v. 100ppm xyleengas van Praxair, welke geleidelijk werd gedoseerd.

Voor CO<sub>2</sub> is gebruikt een GMP252 - CO<sub>2</sub> probe met een meetgevoeligheid van 0 tot 3000 ppm.

Voor temperatuur en RV een sensor van het merk Rotronic HC2-sh, met RV-range 0-100%, en temperatuur range -50 tot 100°C.



**Figuur 2.3** Gebruikte sensoren. Links, CO<sub>2</sub>-sensor, mini-PID en sensor voor temperatuur en luchtvochtigheid (zwart); rechts, in het midden de DART-sensoren (wit).



## 3 Resultaten

De opname door de diverse plantensoorten van de VOS zoals gemeten met de meetstolp worden in §3.1 voor formaldehyde en xyleen respectievelijk gerapporteerd. Vervolgens wordt in §3.2 het resultaat vergeleken met metingen uit eerdere studies zoals vermeld in de literatuur. In §3.3 evalueren we welke mechanismen waarschijnlijk verantwoordelijk zijn voor dit resultaat, al hebben we naast depletie (i.e. verdwijning) van VOS niet gemeten wat het lot van de VOS is geweest, i.e. opgeslagen of ook verwerkt (gemetaboliseerd) in het blad, in de wortels of grond, of alleen geadsorbeerd. In §3.4 vertalen we de resultaten naar luchtzuiverende werking op kamerschaal.

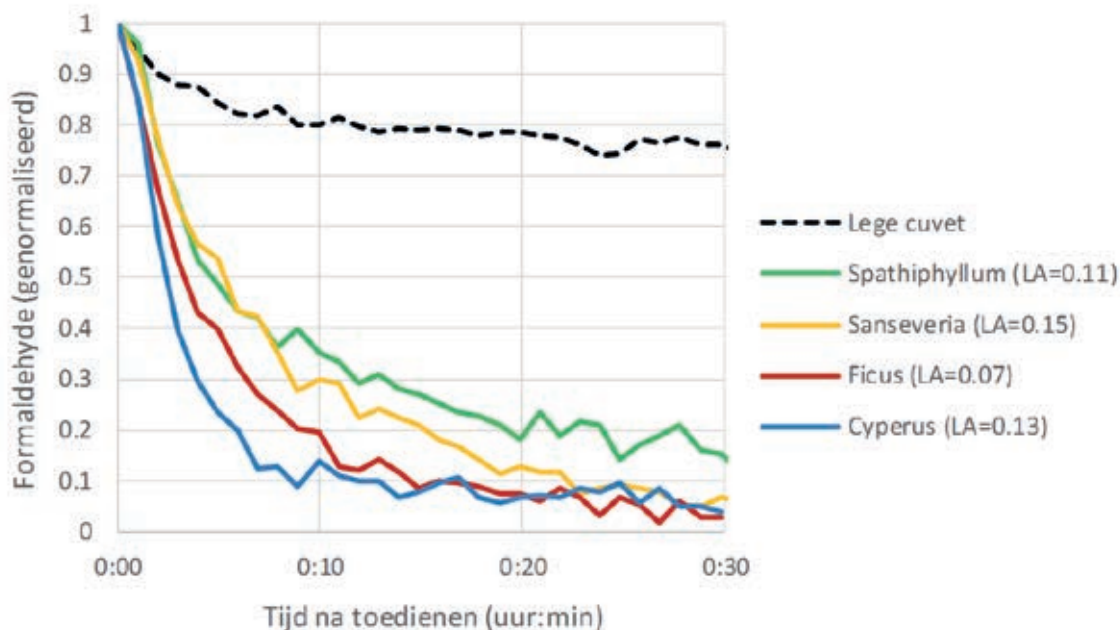
### 3.1 Luchtzuivering per plantensoort en behandeling

De zuivering van de lucht is bepaald door de afname van respectievelijk formaldehyde en xyleen te meten in de meetstolp.

#### 3.1.1 Formaldehyde

##### 3.1.1.1 Plant

Er is volledige depletie van formaldehyde gemeten, binnen een tijdsbestek van 1 uur, voor alle onderzochte plantensoorten (Figuur 3.1). De metingen geven aan dat *Cyperus* de formaldehyde het snelst opneemt.



**Figuur 3.1** Depletie van formaldehyde door de 4 plantensoorten. De gepresenteerde curves zijn één van de drie herhalingen die zijn gemeten voor alle soorten.

Uit de curven werd de T50 berekend, i.e. de tijdsduur waarbinnen de formaldehydeconcentratie in de meetstolp halveert, en deze laat zien dat *Cyperus* slechts 2.5 minuten nodig heeft om de stolp te ontdoen van 50% van de 250 ppb formaldehyde (Tabel 3.1). De T50 is op plantbasis, dus niet gecorrigeerd voor hoeveelheid bladoppervlak. Dit betekent dat *Ficus*, die gemiddeld met een bladoppervlak (LA) van 0.07 m<sup>2</sup> de helft van het bladoppervlak heeft als *Cyperus* (LA 0.13), met een dubbele T50 toch, verrekend per m<sup>2</sup> blad, eigenlijk op zijn minst net zo snel formaldehyde verwerkt als *Cyperus*. Dit geldt niet voor de twee overige soorten die duidelijk slechter presteren. Een uitwerking per eenheid blad en eenheid luchtvolume wordt gepresenteerd in §3.2.

In de formaldehyde-depletie speelt de pot, met substraat dat voorafgaand aan de meetserie optimaal bevochtigd was, een belangrijke rol. De T50 (Tabel 3.1) verdubbelt indien bij Cyperus de pot met plastic is ingepakt. Pot en plant met de gebruikte grootte nemen ongeveer gelijke hoeveelheden formaldehyde op aangezien beiden een T50 van ca. 8 minuten hebben, en samen geeft dit dan een T50 van 4 tot 5 minuten (Tabel 3.1). De plant met ingepakte pot neemt in het donker net zo veel formaldehyde op als in het licht, wat betekent dat formaldehyde opname niet wordt bespoedigd door de open huidmondjes.

Tabel 3.1

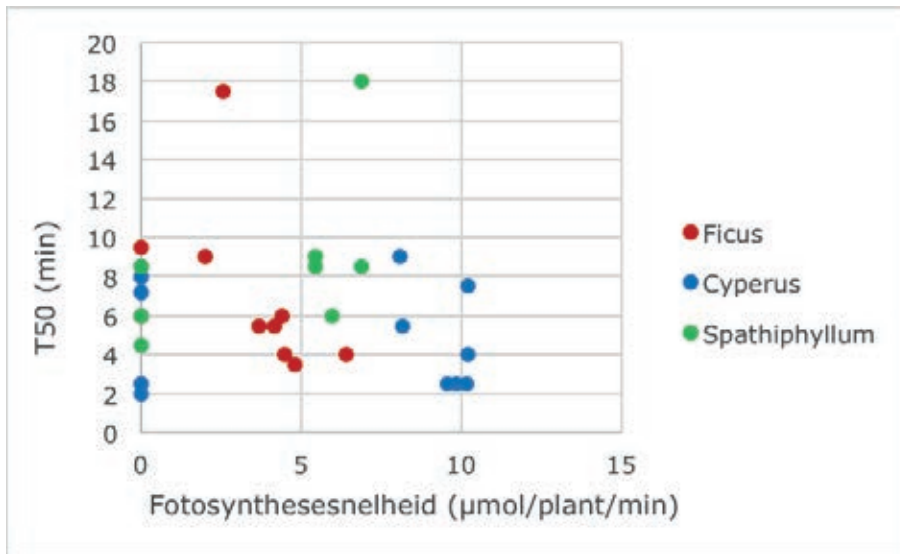
*Gemiddelde tijdsduur waarin helft van formaldehyde is verdwenen uit de meetstolp. Naast planten met pot (niet ingepakt, n=3) zijn ook andere testen gedaan, waaronder Cyperus met ingepakte pot, in donker (geen fotosynthese) of alleen de pot met nat substraat (zie onderste tabelrijen). N.a.=niet aanwezig want daar was n=1.*

Soort	T50 (minuten)
Cyperus	3.4±1.3
Ficus	4.5±1.3
Sansevieria	5.7±1.3
Spathiphyllum	7.5±2.2
Extra behandelingen:	
Cyperus	
Alleen plant (pot ingepakt)	8.1±1.1
Alleen plant & donker	8.0±n.a.
Alleen donker (pot niet ingepakt)	2.3±0.3
Alleen pot	7.2±n.a.
Spathiphyllum, donker	6.3±2.0
Ficus, alleen plant (pot ingepakt)	5.0±0.9
Ficus, alleen pot	8.0±1.8

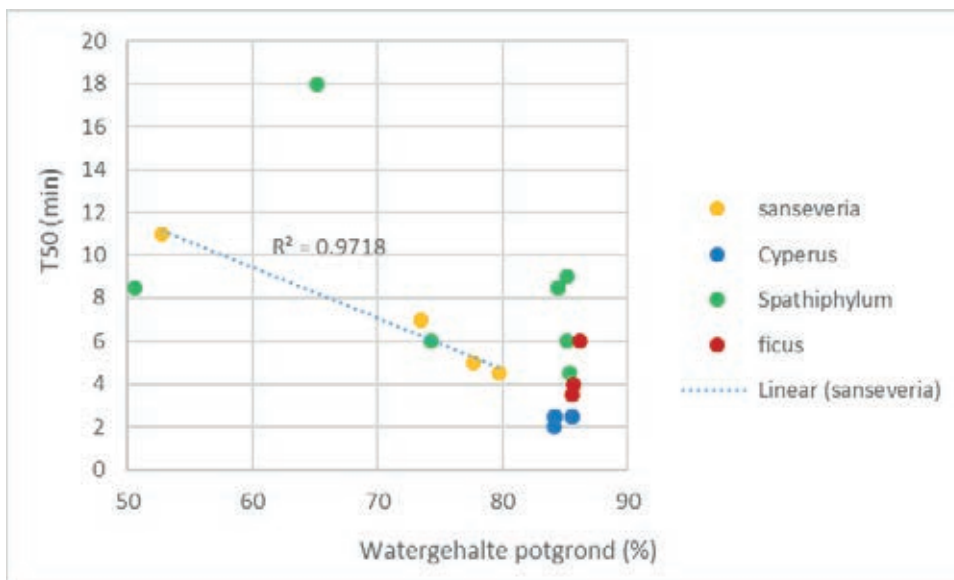
Er is geen relatie gevonden tussen fotosynthese en T50, wat er op duidt dat de CO<sub>2</sub> opname en formaldehyde opname niet gekoppeld zijn (Figuur 3.2.A). Voor Ficus lijkt er een lichte stijging van T50 te zijn bij afnemende fotosynthesesnelheid maar dit verband is niet significant (R<sup>2</sup> 0.21). In Tabel 3.1 lijkt de T50 zelfs verlaagd in de tests in het donker (zie Spathiphyllum en Cyperus zonder ingepakte pot) hetgeen suggereert dat lichtomstandigheden zelfs een nadeel zijn voor formaldehyde verwijdering. Het licht versus donker effect is echter niet significant.

Een hoger vochtgehalte van de potgrond heeft voor Sansevieria een positief effect op de formaldehyde afname (R<sup>2</sup> 0.97) (Figuur 3.2.B). Dit effect is bij de andere plantensoorten mogelijk afwezig doordat daar andere behandelingen het beeld vertroebelen, terwijl dat bij Sansevieria minder een rol speelt omdat de spruit van deze plant vrij weinig aan de formaldehyde depletie bijdraagt (zie eerder). Dit speelt mogelijk ook bij Spathiphyllum maar door een uitbijter en het beperkte aantal vochtigheidsniveau is dit niet aantoonbaar.

A



B

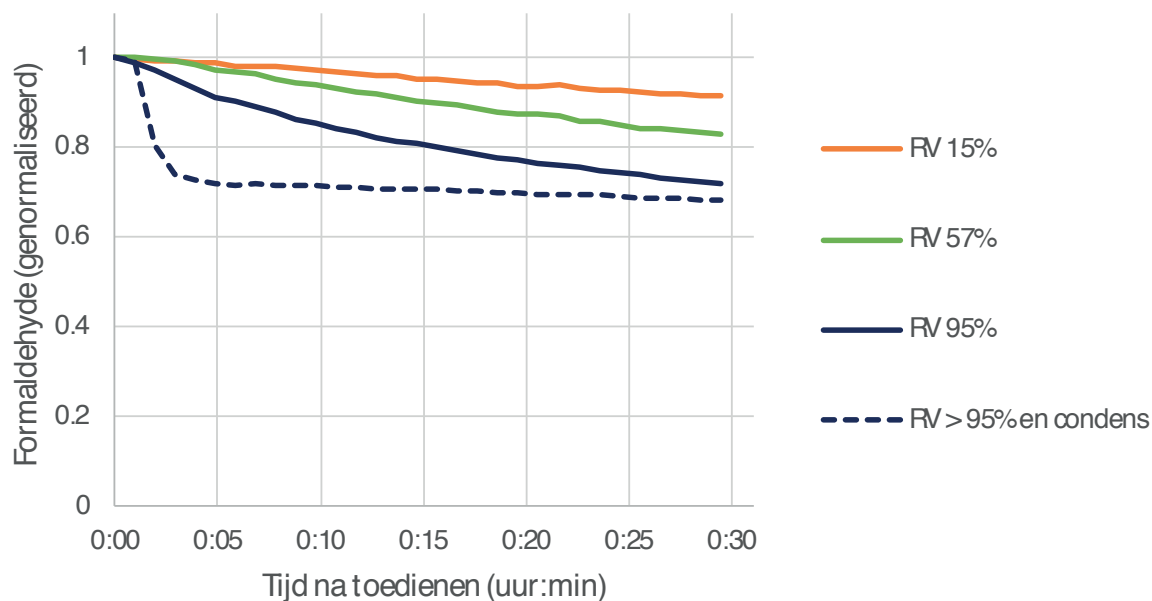


**Figuur 3.2** T50 uitgezet tegen de fotosynthese plant (A) en het watergehalte van de potgrond (B), voor de 4 onderzochte plantensoorten.

### 3.1.1.2 Invloed van luchtvochtigheid, waterreservoir en watergehalte pot

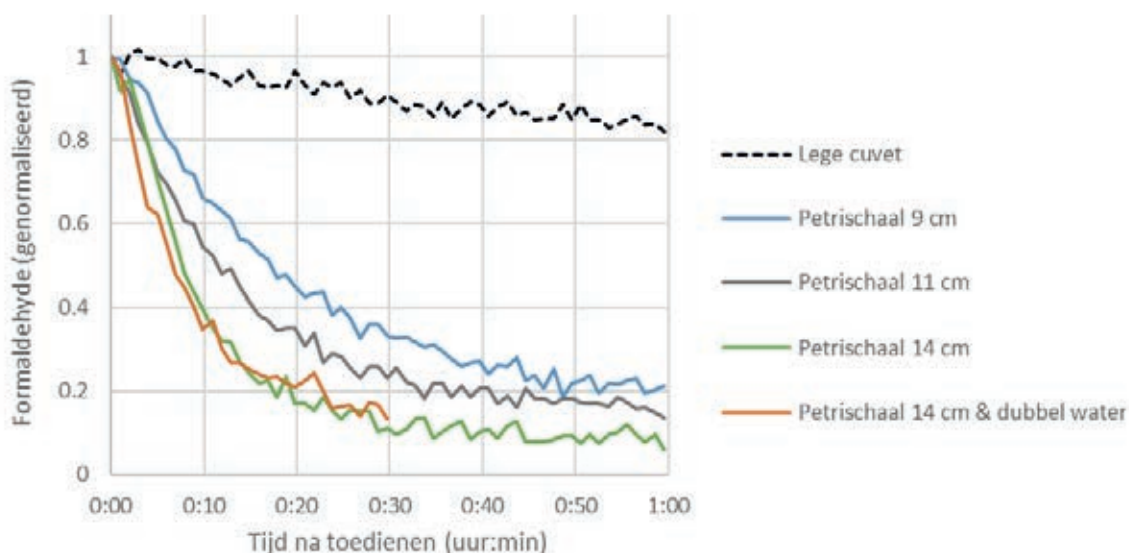
Aangezien formaldehyde goed oplost in water tot formaline, zijn er proeven gedaan waar de invloed van aanwezig water is bepaald op de formaldehyde afname.

Verhoging van de luchtvochtigheid werd door verdamping uit een waterreservoir gerealiseerd, waarna het reservoir snel werd verwijderd uit de meetstolp en vervolgens formaldehyde werd toegediend. Er werd vervolgens een substantiële formaldehyde afname van 15 (RV 57%) tot ruim 25% (RV 95%) gemeten (Figuur 3.3). De extra afname bij "RV>95% en condens" t.o.v. 95% RV werd waarschijnlijk gerealiseerd door oplossing van formaldehyde in de condensdruppels.



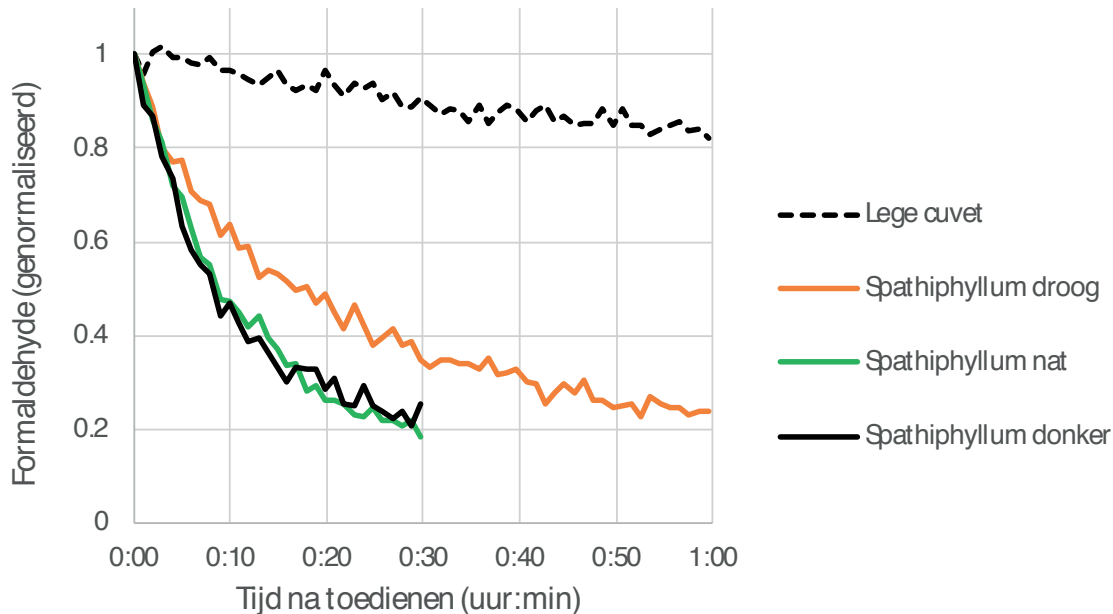
**Figuur 3.3** Invloed van de relatieve luchtvochtigheid (RV in procenten) op de afname van formaldehyde in een cuvet zonder plant.

De afname kan uiteraard vergroten als meer water als voorraad wordt aangeboden. Dit is gerealiseerd door drie maten petri schaal (9, 11 en 14 cm diameter) in de meetstolp te plaatsen, gevuld met gelijke niveaus water met uitzondering van de grootste schaaldiameter, waar ook een verdubbeld volume werd aangelegd. De diameter van de petri schaal heeft een opvallend sterk effect op de afname van formaldehyde, terwijl verdubbeling van het volume bij gelijkblijvend expositie oppervlak geen effect sorteerde (Figuur 3.4). De T50 is bij de grootste diameter 8 minuten, en gelijk aan die van de losse potten, vermeld in Tabel 3.1. De snelheid van formaldehyde opname is dus afhankelijk van het oppervlak van de overgang tussen lucht en vloeistof.



**Figuur 3.4** Invloed van oppervlak (uitgedrukt in cm diameter) en volume van waterreservoir op formaldehyde afname.

Een groter vochtgehalte van het substraat vergrootte de formaldehyde afname (Figuur 3.5). Een vochttoename van 43% naar 84% g water per g versgewicht gaf een halvering van de T50, dus een tweemaal zo snelle formaldehyde afname. Als vervolgens het meetsysteem in het donker werd gezet gedurende twee uur (zodat de huidmondjes goeddeels gesloten zijn) was de afname ongewijzigd hoog, en dus niet afhankelijk van de huidmondjesopening.



**Figuur 3.5** Effect van vochtigheid van het substraat en van de afwezigheid van licht op de afname van formaldehyde bij *Spathiphyllum*. Droog: 43% vocht (g/g); nat: 84% vocht.

### 3.1.2 Xyleen

Resultaten voor xyleen betreffen de toedieningen in een schone cuvet. Herhaald gebruik van de cuvet ging gepaard met langdurig schoonspoelen aangezien na elke toediening er opbouw van xyleen aan cuvetglas en sensormateriaal plaats vond. Een herhaling van de xyleentoediening vond plaats in een veel kleinere cuvet (1.4 L volume) waar opbouw van xyleen aan het glasmateriaal goed reproduceerbaar is.

#### 3.1.2.1 Lege cuvet

Er zijn 2 maten cuvet gebruikt, 26 L en 1.4 L respectievelijk. De grote maat cuvet laat een aanzienlijke xyleenadsorptie zien als er geen plant in de cuvet is (zwarte lijn in Figuur 3.6). Deze geadsorbeerde xyleen komt wat langzamer vrij dan het is geadsorbeerd, zie de re emissie curve in Figuur 3.6. De kleine cuvet laat geen xyleenadsorptie zien maar juist een lichte verdere stijging van de sensorwaarde na toediening (Figuur 3.8B). vermoedelijk komen er andere VOCs vrij uit het glas en de sensor, maar het gaat om zeer lage hoeveelheden.

### 3.1.2.2 Plant

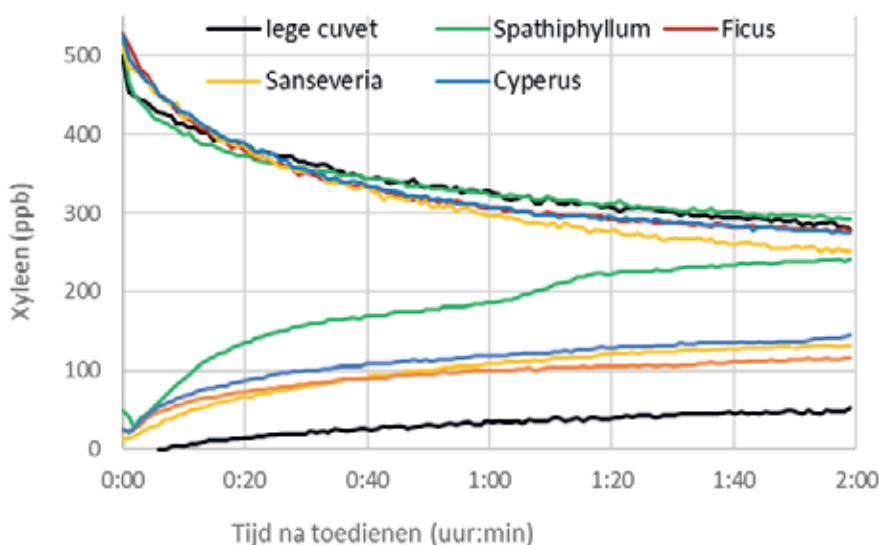
De opname door de plant is moeilijk te herleiden uit de metingen met de grote stolp van 26 L. Dit komt doordat een bepaald deel van de afname van de xyleenconcentratie te wijten is aan tijdelijke adsorptie aan glas en meetapparatuur, maar in nog grotere hoeveelheden slechts tijdelijk aan de plant is gehecht. Dit is aangetoond door, ca. 4-5 uur na toediening en halvering van de concentratie, de stolp leeg te blazen met schone lucht, vervolgens weer af te sluiten met de plant er nog in, en de xyleen weer te meten. Er blijkt een aanzienlijk re-emissie van xyleen te zijn (stijgende curven in Figuur 3.6). De re-emissie is met plant ca. 2-3x zo hoog als zonder plant, hetgeen aantoont dat de plant de meeste xyleen slechts kort kan vasthouden. Het verschil tussen depletie en re-emissie geeft de wel gebonden xyleen fractie aan. De meetperioden waren echter te kort om dit goed aan te tonen. Voor *Spathiphyllum* lijkt het curveverloop aan te geven dat bij een iets langere (bv. 1 uur meer) meetperiode de cumulatieve re-emissie gelijk lijkt te worden aan de cumulatieve depletie, dus alle geadsorbeerde xyleen is dan weer terug in de lucht. *Ficus* en *Sansevieria* tonen relatief de minste re-emissie, en hebben mogelijk de lipofiele xyleen in hun relatief dikke waslaag verwerkt.

Als we de xyleen depletie van de 4x herhaalde experimenten met lege cuvet en *Spathiphyllum* middelen, laat de grote stolp een cuvet-depletie zien van 61 ppb per 10 minuten, en cuvet + *Spathiphyllum* een depletie van 74 ppb per 10 minuten. Het netto effect van *Spathiphyllum* is dan 13 ppb/10 min/plant, en 0.0074 ppb/10 min/cm<sup>2</sup> blad (zie Tabel 3.2)(gemeten bladoppervlak van alle meetplanten staat in Bijlage 1). Het netto effect bij *Sansevieria* is aanzienlijk hoger: 98 ppb per plant per 10 minuten, dit is 0.0130 ppb/10 min/cm<sup>2</sup> blad. De soorten *Cyperus* en *Ficus* vertonen geen netto opname die hoger is dan de cuvetadsorptie, dus de plantadsorptie is verwaarloosbaar.

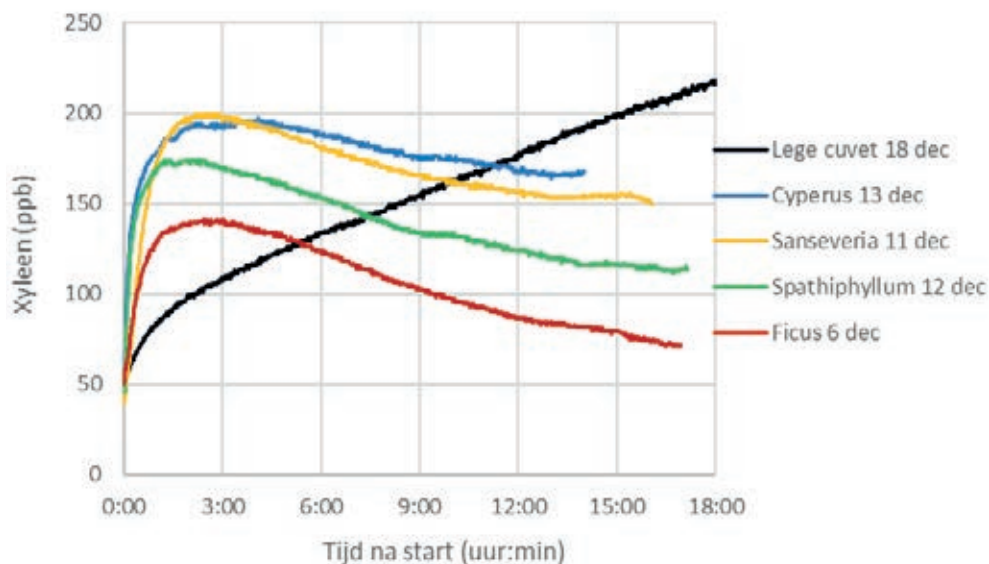
Tabel 3.2

Gemiddelde xyleendepletie (n=4) van de vier plantensoorten in de eerste 10 minuten.

Soort	Xyleendepletie (ppb/cm <sup>2</sup> blad per 10 min.)
<i>Ficus</i>	0.0161
<i>Sansevieria</i>	0.0206
<i>Spathiphyllum</i>	0.0074
<i>Cyperus</i>	0.0



**Figuur 3.6** Xyleen depletie met plant (bovenste, dalende curven), en re emissie zonder plant na vervanging cuvet lucht met schone lucht. De zwarte lijn is de controle zonder plant.

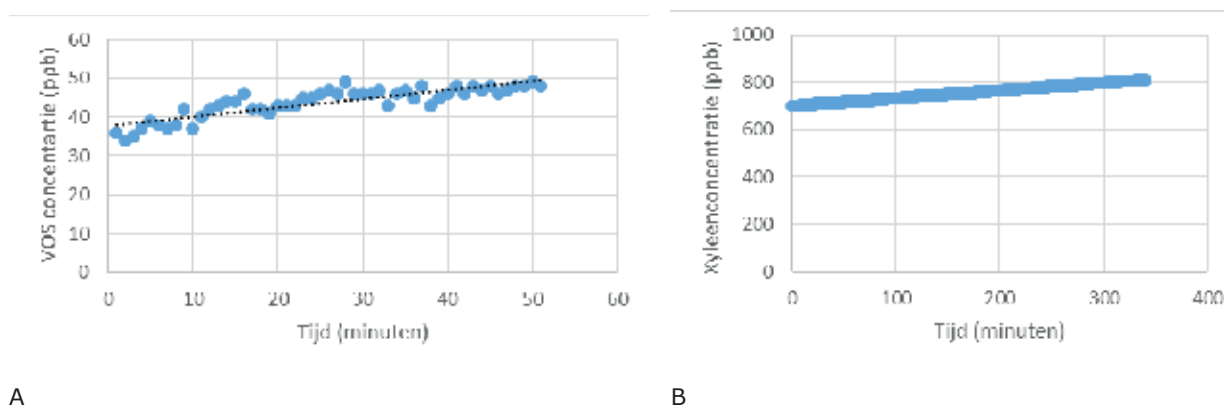


**Figuur 3.7** Xyleen re emissie met plant, na vervanging van de lucht in de cuvet met schone lucht. De zwarte lijn is de controle zonder plant. Dag van waarneming (in 2017) is toegevoegd.

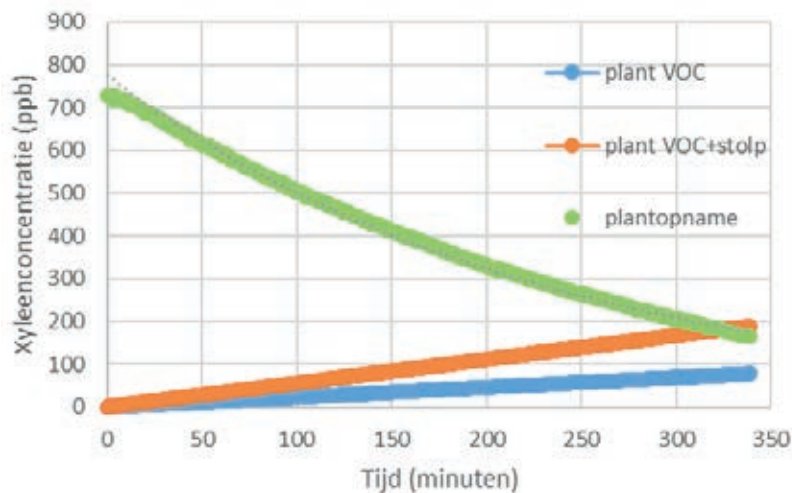
Er is voor elke plantensoort eenmalig een lange meetperiode aangehouden om de re-emissie te bestuderen. Hierbij bleek dat de weer geëmitteerde xyleen toch weer wordt opgenomen in de plant. Voor Cyperus was die re-adsorptie erg laag, terwijl Ficus een sterke opname toonde (Figuur 3.7). De plantprestaties zijn evenwel moeilijk te interpreteren, want (a) niet herhaald, (b) de re-emissie lijkt met de tijd toe te nemen (van 140 ppb op 6 december tot 200 ppb op 13 december) hetgeen duidt op aan de cuvet geaccumuleerde xyleenresten. Er is niettemin wel plant-gerelateerde xyleendepletie, bij drie van de vier plantensoorten ongeveer 50 ppb in 17 uur tijd.

De opnamecurven in Figuur 3.7 zijn de netto xyleendepletie: de werkelijke plantopname was hoger aangezien dan ook de door de cuvet geëmitteerde xyleen (zwarte curve in Figuur 3.7) meegeteld moet worden, deze bedraagt 200 ppb in 17 uur. Dan komt de plantopname niet op 50 ppb maar op ca.  $200 + 50$  is 250 ppb in 17 uur tijd, met de aanname dat de cuvet re-emissie bij elke proef 200 ppb was.

Vervolgens zijn xyleen depleties gemeten met de kleine cuvet van 1.4 L. Gezien de beschikbare tijd is dit alleen voor Spathiphyllum uitgevoerd. Voor deze soort zijn resultaten van grote en kleine stolp vergeleken, zie onder.



**Figuur 3.8** Emissie van natuurlijke VOS door niet-begaste Spathiphyllum (A) en xyleenemissie in lege stolp na toediening (B).



**Figuur 3.9** Xyleen depletie door *Spathiphyllum*, inclusief verrekening van VOC emissie uit plant (blauwe lijn: plant VOC in xyleen-eenheden) en cuvet (oranje lijn: plant VOC en emissie uit cuvet opgeteld, dus totale toename zoals te zien in Figuur 3.8).

De opname door de plant is dan groter dan de gemeten, netto xyleenafname. De gemeten VOC emissie uit het blad van *Spathiphyllum* en de emissie van de cuvet zelf moeten opgeteld worden bij de gemeten xyleenafname. De resulterende opname door de plant (groene lijn in Figuur 3.9) kan in een formule worden weergegeven:  $\text{opname} = A * e^{(-B * t)}$  (t in minuten na toediening), en worden geëxtrapoleerd tot aan het tijdstip dat de xyleen geheel is verdwenen uit de stolp: de gegeven xyleen (700 ppb in 1.4 liter) komt na ca. 33 uur onder 1 ppb (met deze exponentiele functie wordt de concentratie pas nul in de oneindigheid).

De depletie door plantopname was 566 ppb gedurende de meetperiode van 5.67 uur. Het bladoppervlak binnen de kleine stolp bedroeg 105.3 cm<sup>2</sup>. Deling van 566 ppb door bladoppervlak en tijdsduur betekent een depletie van 0.95 ppb per cm<sup>2</sup> per uur. De gangbare eenheid voor luchtzuivering door planten is opname in microgram VOS per m<sup>2</sup> blad per m<sup>3</sup> luchtvolume: als we dit stapsgewijs voor *Spathiphyllum* uitrekenen:

- 0.95 ppb per uur per cm<sup>2</sup> uit stolp van 1.4L.
- 0.00133 ppb per uur per cm<sup>2</sup> per m<sup>3</sup> lucht (concentratieafname gaat veel langzamer in 1 m<sup>3</sup>).
- 0.00584 µg per uur per cm<sup>2</sup> per m<sup>3</sup> (1 ppb = 4.4 µg voor xyleen).
- 58.4 µg per uur per m<sup>2</sup> blad per m<sup>3</sup> lucht (naar 1 m<sup>2</sup> blad: x 10000).

Deze waarde geldt voor het gemiddelde gedurende de meetperiode van 5.67 uur, waarin grofweg een gemiddelde xyleenconcentratie van ca. 450 ppb werd aangeboden.

#### Vergelijking opnameschatting kleine versus grote stolp:

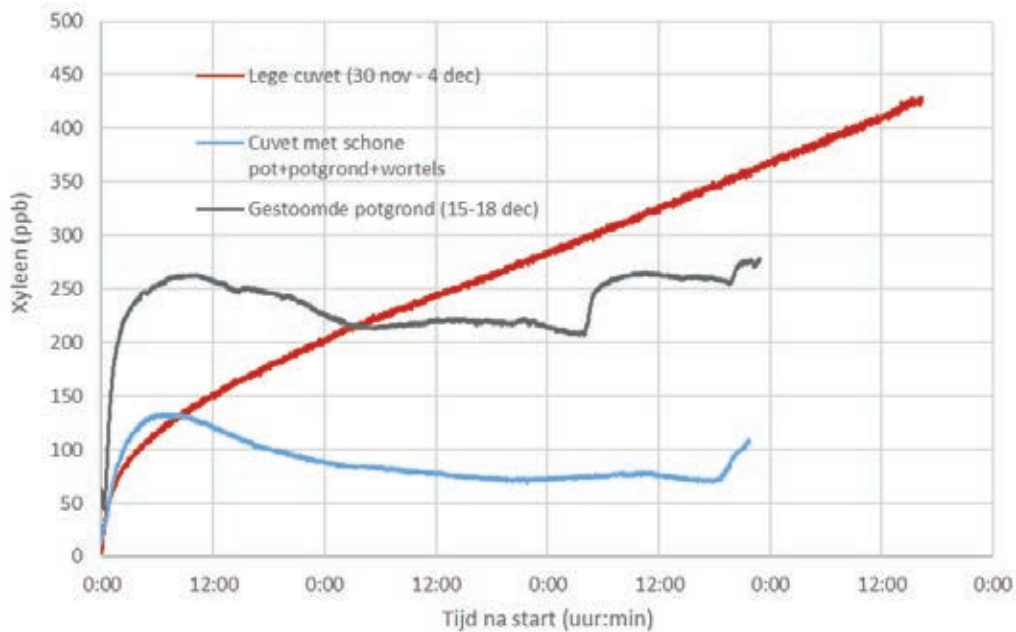
In de kleine stolp van 1.4 L bedroeg volgens het gemeten concentratieverschil de netto opname in de eerste 10 minuten 0.186 ppb per cm<sup>2</sup> blad (de uropname is bijna het zesvoudige, er is dus bijna een lineaire opname in die tijdspanne). Dit is redelijk vergelijkbaar met de opnamesnelheid berekend voor de grote stolp van 26 L, aangezien daar 0.0074 ppb per cm<sup>2</sup> blad vanuit 26 L werd opgenomen: doorberekenend zou deze hoeveelheid in de veel kleinere stolp dan tot  $0.0074 \times 26 / 1.4 = 0.138$  ppb concentratieverlaging leiden, slechts iets minder dan de 0.186 ppb zoals gemeten.

Dat de gemeten plantopname in de grote stolp wat lager is dan in de kleine stolp kan mogelijk komen door de sterke adsorptie aan de stolp, slangen en sensoren, dit zorgt voor een concurrentie tussen stolp-adsorptie en plantopname. De kleine stolp adsorbeert geen xyleen, en scheidt zelfs in kleine mate wat VOC uit (Figuur 3.8B).

### 3.1.2.3 Potgrond

Gestoomde potgrond is minder goed in staat de xyleen uit de lucht te verwijderen dan ongestoomde potgrond met wortels (Figuur 3.10), mogelijk doordat een deel van de microflora dood is door de verhitting (niet geheel dood, er werd nog CO<sub>2</sub> productie gemeten wat duidt op leven) en deze de xyleen niet kunnen opnemen en assimileren.





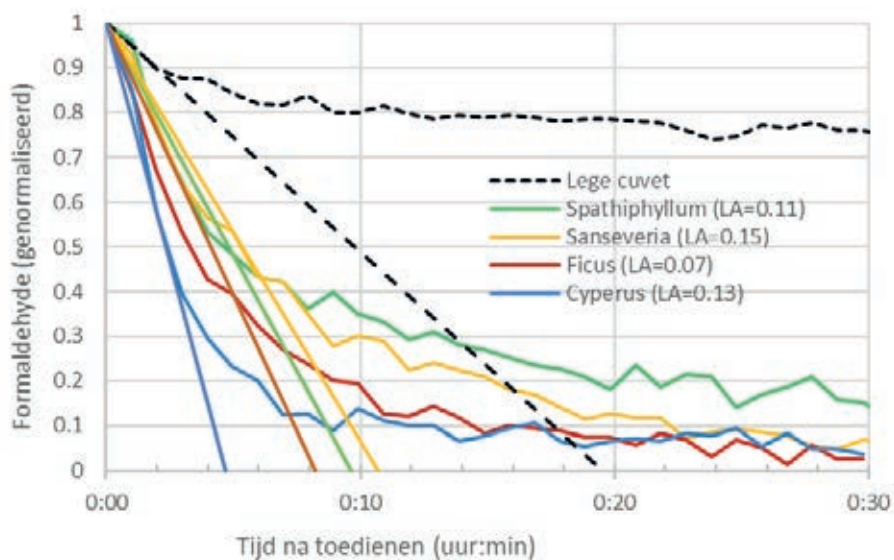
**Figuur 3.10** Xyleen welke vrijkomt na schoonblazen cuvet, en vervolgens wordt opgenomen door potgrond die wel of niet gestoomd is om micro-organismen af te doden.

De cuvet die gebruikt was voor een xyleentoediening van 500 ppb laat een re emissie van xyleen zien die tot hoge concentraties leidt als er maar lang genoeg wordt doorgemeten (Figuur 3.7). Het is opmerkelijk dat in ruim 3.5 dag de concentratie al 450 ppb bedraagt, terwijl bij spoelen toch het grootste deel van de toegediende xyleen zou zijn verwijderd. Blijkbaar had zich na enkele toedieningsproeven cumulatief zoveel xyleen aan de cuvet, sensoren en slangen gehecht dat dergelijke hoge concentraties door uitdamping ontstaan.

## 3.2 Vergelijking met overig onderzoek

### 3.2.1 Formaldehyde

De formaldehyde opnamesnelheid zoals gepresenteerd in §3.1 kan worden vergeleken met het vele eerdere onderzoek aan formaldehyde opname. De resultaten moeten dan beperkt worden tot de eerste minuten van de metingen, aangezien daar een vergelijkbare concentratie heerste als in de veel grotere plantkamers (vaak 1 m<sup>3</sup>) waar de concentratie ook niet zo snel zakt vanwege de veel grotere formaldehydehoeveelheid. Wij bepaalden de maximale snelheid door de raaklijn te bepalen bij de concentratie van ca. 250 ppb zoals initieel was aangebracht (zie Figuur 3.11). Veel studies werken met nog hogere initiële concentraties wat een verhogend effect op de opnamesnelheid heeft doordat er dan een grotere concentratiegradiënt met het bladweefsel aanwezig is. De mate van luchtbeveiliging verschilt tussen alle opname studies en daarmee de contacttijd met het blad. De afstand van de VOS tot de plant in proeven met de gebruikelijke 1 m<sup>3</sup> plantkamer is groter dan bij onze stolp van 26 L maar door de algemeen toegepaste intensieve luchtcirculatie is er optimaal contact tussen blad, substraatoppervlak en formaldehyde. Door deze actieve luchtcirculatie wordt de VOS feitelijk naar het blad 'gebracht' met de luchtstroom, dit wordt ook wel beschouwd als 'mass flow', i.t.t. transport door diffusie wat bij grotere plantkamers wel degelijk voor limitering van de VOS aanvoer naar de plant kan zorgen. Door deze goede circulatie zouden de verschillen tussen de studies met verschillende grootten van meetkamer beperkt moeten zijn de opnames variëren van 0.02 tot 0.053 µg/cm<sup>2</sup>/uur, een orde van grootte lager dan gevonden in de uitgebreide studie van Kim *et al.*, (2010) (Tabel 3.3). De plantensoort *Osmunda* vormt helemaal een grote uitzondering: deze soort vertoont een bijzonder grote formaldehyde opnamesnelheid (2.8 µg). Ook bij ander varenssoorten blijkt de opname hoog. Het blijkt echter dat de top-4 bij Kim *et al.*, (2010), die snelheden hebben boven 1.2 µg, de 4 kleinste plantensoorten betroffen. Dit betekent dat die soorten 2 voordelen hebben: (a) er is in verhouding veel substraat in de plantkamer, dat tevens erg vochtig is (de kleinste plantjes verdampen het minste per pot binnen de dag na bevoeiing en hebben dus een nattere pot, i.e. een sterke sink voor formaldehyde), (2) de formaldehydeconcentratie in de plantkamer blijft relatief hoog omdat een klein bladoppervlak minder opneemt dan een groot oppervlak. Punt (1) betekent een sterke opname in het vochtige substraat, zoals ook in onze proeven met potten die NIET ingepakt waren, punt (2) betekent dat de gradiënt tussen lucht en bladweefsel vrij groot blijft en dat bevordert de opnamesnelheid. Punt (2) speelt minder mee als het bewuste natte substraat relatief veel formaldehyde opneemt, maar dat geldt ook voor alle 86 geteste plantensoorten mits de specifieke soort weinig water verdampte. Daarnaast is het mogelijk dat de varens, als schaduwminners bij uitstek, relatief weinig verdampten en dus een relatief natte pot hadden. Kim *et al.*, (2010) lijken dus vooral artefacten te hebben gevonden, en zij hadden het pot-effect apart moeten testen. Proeven bij onderzoeksbureau Fytagoras laten grotere formaldehyde opnamen zien met afnamen uit een ruime klimaatkast (1 m<sup>3</sup> ?) van ca. 0.5 ppm (van der Meulen en Van Duijn, 2014), maar de wijzigende luchtvochtigheid maakt de waarden moeilijk vertaalbaar naar onze metingen bij constante luchtvochtigheid. In de grote plantkamers van Wolverton werden WEL met onze studie vergelijkbare opnamesnelheden gevonden van 20.4–25.3 mg/m<sup>2</sup> blad/dag, oftewel 0.08–0.10 µg/cm<sup>2</sup>/uur (Wolverton en McDonald, 1982).



**Figuur 3.11** Depletie van formaldehyde inclusief berekende raaklijn welke de maximale depletiesnelheid weergeeft per soort.

Tabel 3.3

Opnamesnelheid formaldehyde ( $\mu\text{g cm}^{-2}$  blad  $\text{m}^{-3}$  uur $^{-1}$ ) zoals in deze en een recente andere studie (uit Kim et al., (2010) de waarden van het 1ste meetuur) gemeten.

Plantensoort	Onze studie	Kim et al., (2010)
Cyperus	0.011 (0.072 incl. pot)	-
Ficus	0.053 (excl. pot)	0.19
Sanseveria	0.030 (incl. pot)	0.08
Spathiphyllum	0.023 (excl. pot)	0.13
Osmunda japonica	-	2.8

### 3.2.2 Xyleen

Volgens onze proeven is de xyleemopname door de plant grotendeels tijdelijk van aard: het grootste deel emitteert weer als de omgevende lucht schoon is. Deze 're-emissie' wordt nergens in de vakliteratuur beschreven, en naar onze mening zijn alle gerapporteerde opnamen voor een aanzienlijk deel adsorptie en slechts tijdelijk uit de lucht opgenomen. Ook wij rapporteren hieronder de tijdelijke opname; de re-emissie is gemeten maar moeilijk te reproduceren.

De (tijdelijke) xyleenopname is voor alle plantensoorten, met en zonder pot, gemeten in de grote cuvet, maar kon alleen in de kleine cuvet goed gekwantificeerd worden: deze opname bedroeg voor *Spathiphyllum* 58.4 µg per m<sup>2</sup> blad per m<sup>3</sup> lucht. Voor xyleenopname door planten is er geen wetenschappelijke literatuur te vinden met afdoende informatie, zoals opname per eenheid blad. Wolverton & Wolverton (1993) vermelden alleen de opname per plant en de potmaat, en bovendien zijn die proeven bij hoge concentraties uitgevoerd (de detectielimiet was 1 ppm!). Als we de verwante VOSsen benzeen en toluen als vergelijking nemen, is onze xyleenopnamesnelheid iets hoger dan in de literatuur wordt vermeld: Yoo et al (2006) vinden voor benzeen en toluen bij *Spathiphyllum*, *Hedera* en *Cissus* waarden van 2 tot 22, terwijl Yang et al (2009) een gemiddelde noemt voor benzeen, octaan, toluen en trichloroethyleen, bij o.a. *Anturium*, *Asparagus*, *Ficus*, en *Hedera*, van 13 µg VOS per m<sup>2</sup> blad per m<sup>3</sup> lucht. De betreffende waarden zijn bij een vergelijkbare meetperiode van 6 uur vastgesteld: als we de meting in de kleine stolp bv. 1 a 2 uur langer hadden gecontinueerd was er waarschijnlijk nauwelijks extra xyleen opgenomen, en zou de gemiddelde snelheid dus lager zijn uitgevallen en meer vergelijkbaar zijn geweest met de literatuur. Daar staat tegenover dat de genoemde literatuurwaarden bepaald zijn bij veel hogere aanbodconcentraties (boven de 3000 ppb VOS). Dus de feitelijke xyleenopname hangt af van meerdere factoren.

## 3.3 Gevonden mechanismen

De depletie van formaldehyde is zeer aanzienlijk voor de diverse plantensoorten, maar ook bijna zo groot indien er water in de stolp wordt aangeboden in een petri-schaal met dezelfde diameter als de plantpot. Vocht in de gasfase in de lucht vangt ook formaldehyde weg, maar in veel mindere mate dan plant en water. Condens op het glas is ook een sterke sink voor formaldehyde. De depletie werd ook door de plant gerealiseerd in het donker, dus deze is onafhankelijk van de fotosynthese en huidmondjesopening, wat betekent dat deze forse depletie het resultaat is van fysieke opslag in het aanwezige plantmateriaal en niet zozeer van lichtafhankelijke assimilatie en verwerking. Aangezien de plant vooral uit water bestaat, is de sterk in water oplosbare formaldehyde hoogstwaarschijnlijk in het water in de symplast (cytoplasma binnen de cellen) en apoplast (water buiten de cellen, in de intercellulaire ruimte) opgelost. De verdere verwerking en assimilatie door de plant hebben we niet gemeten, voor het mechanisme hiervan verwijzen we naar o.a. Giese *et al.*, (1994) en Schmitz *et al.*, (2000).

## 3.4 Doorvertaling naar binnenruimtes

De metingen aan depletie van formaldehyde en xyleen zijn verricht in een glazen stolp van 26 liter wat uiteraard zeer klein is t.o.v. een gemiddelde werkkamer van 50 m<sup>3</sup>. Het opnamemechanisme is in principe hetzelfde, maar naar verhouding zit in de stolp veel blad t.o.v. het volume lucht. Dit betekent dat er (a) veel contact is tussen lucht en plant, wat in een kantoorruimte alleen door gerichte luchtbeweging mogelijk is, (b) de concentratie aan VOS snel daalt wat de concentratiegradiënt tussen lucht en blad verkleint en dus de opnamesnelheid verlaagt.

Bezwaar (b) is niet relevant als we de opnames vergelijken m.b.t. de concentraties zoals meestal in studies gebruikt, i.e. 250-1000 ppb, oftewel in de eerste minuten na de VOS toediening (zie Tabel 3.3). Het is dus waarschijnlijk dat de opnamesnelheid sterk afhangt van de heersende formaldehydeconcentratie, hetgeen wordt bevestigd door Kim et al (2010), Dit wordt ook bevestigd doordat een hernieuwde toediening van 250 ppb bij de eerder blootgestelde plant weer eenzelfde curve laat zien (resultaten niet getoond), m.a.w. er is (nog) geen sprake van verzadiging in de plant welke de opname zou kunnen afremmen. Doorvertaling naar opname snelheid in binnenruimtes moet dan altijd gedaan worden voor de concentraties die onderzocht werden. Daarbij nemen we ook aan dat er voldoende contacttijd is in grotere ruimtes en het diffusie transport naar de plant dus niet de limiterende factor is. De doorvertaling van onze proeven naar een kantoor situatie kan geïllustreerd worden met het volgende rekenvoorbeeld:

1. De Ficus neemt zeer snel formaldehyde op: 150 ppb plant<sup>-1</sup> in 10 min per 26L meetstolp#.
  2. Dit is 23 ppb per m<sup>3</sup> per uur (lager, want het kleine plantje moet nu 1 m<sup>3</sup> i.p.v. 26L zuiveren).
  3. Doorvertaald naar 1 cm<sup>2</sup> blad per m<sup>3</sup> lucht: 0.033 ppb of 0.042 µg.
  4. Met een forse plant (0.7m<sup>2</sup> blad) is de zuivering ca. 234 ppb per uur per m<sup>3</sup>.
  5. Die plant zuivert dan 3.7 ppb per uur in een kamer van 50 m<sup>3</sup>.
  6. Deze snelheid is afgeleid uit een blootstelling bij 250 ppb formaldehyde.
  7. Als we een regelmatig voorkomende concentratie van 160 ppb willen halveren naar de veilige WHO limiet van 80 ppb (WHO, 2010), doet die grote plant daar toch nog ruim 21 uur over.
- # bij 95% luchtvochtigheid en 60 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> PAR licht.

Fyttagoras berekende een snellere zuivering: zij veronderstellen dat 1 grote Ficus, waarschijnlijk equivalent aan 350 g vers blad volgens onze metingen, de norm-concentratie in een kamer in 4 uur kan halveren. Onze inschatting komt uit op 3 van dergelijke planten, gesteld dat de norm van 80 ppb is bedoeld.

Hoewel de door ons berekende opnamesnelheid lager is dan van Fyttagoras, is uiteindelijk de verwerking in de plant het meest limiterende mechanisme. De belangrijke studie van Schmitz *et al.*, (2000) toonde aan dat slechts 25 µg (20 ppb) formaldehyde per uur per m<sup>2</sup> blad uit een m<sup>3</sup> lucht enzymatische verwerkt kan worden, dit is 0.0025 µg per cm<sup>2</sup> m<sup>3</sup>, terwijl dit rapport, Wolverton en McDonald (1982), en deels door Kim *et al.*, (2010) een orde van grootte van 0.08-0.10 µg vinden. Schmitz *et al.*, zitten dus een factor 40 lager. Zij berekenden deze opschaling vanuit de door hen gemeten opname in vitro (bladweefsel in petri-schalen). De opname lijkt dus veel groter dan de echte verwerking, zodat zich tijdelijk formaldehyde accumuleert. De grote vraag is hoeveel opslagcapaciteit de plant heeft voordat de formaldehydeconcentratie, in waterfase opgelost als formaline, toxisch wordt. Als die grens bij planten in binnenruimtes in zicht is, zal de plant toch eerst enzymatisch de formaldehyde moeten verwerken voordat hij opnieuw de lucht kan zuiveren t.a.v. formaldehyde. Inschatting van dit opslagvermogen en de mogelijke toxiciteit vergt nader onderzoek.

Belangrijk aandachtspunten: (1) onze proeven zijn gedaan met een adequate luchtcirculatie, terwijl in binnenruimten de lucht meestal slechts weinig in beweging is, hetgeen het contact van de plant met de formaldehyde uiteraard sterk verminderd, (2) uitgangspunt was eenzelfde luchtvochtigheid in alle proeven van 95%, omdat een voor kantoren representatieve lagere luchtvochtigheid in dit systeem niet te handhaven is doordat de plantverdamping dan als cofactor de formaldehyde depletie onbeheersbaar gaat beïnvloeden.



## 4 Discussie en conclusies

### 4.1 Discussie

Wij hebben geen verband gevonden tussen de grootte van de formaldehydeopname en de activiteit van de plant, i.e. transpiratie (Van der Meulen & van Duin, 2014) dan wel fotosynthese (Dela Cruz *et al.*, 2014). Het is redelijk te veronderstellen dat per plantensoort de fotosynthese en transpiratie gekoppeld zijn bij constante niveaus van licht, temperatuur en CO<sub>2</sub>-concentratie. Een verhoogde fotosynthese en dus transpiratie betekent een grotere huidmondjesgeleidbaarheid, waardoor meer formaldehyde via de huidmondjes opgenomen zou kunnen worden. Daarnaast zou een verhoogde vochtaccumulatie in de lucht van de plantkamer tot meer formaldehyde opslag in die vochtige lucht kunnen leiden. Dit lijkt allemaal niet het geval door het ontbreken van een verband tussen fotosynthese en formaldehyde opname (Figuur 3.2.A). De formaldehyde blijkt in onze studie ook bij gesloten huidmondjes in het weefsel te kunnen dringen, mogelijk via de onderkant van het blad waar de waslaag nagenoeg ontbreekt. Formaldehyde opname via de cuticula is al eerder aangetoond (Giese *et al.*, 1994; Schmitz *et al.*, 2000; Ugrehelidze *et al.*, 1997).

De formaldehyde opname is afhankelijk van de beschikbaarheid van water: de proeven met petrischalen gevuld met water geven dit duidelijk aan. Ook de Fytagoras proeven met verschillende bevochtigingen (Van der Meulen & van Duin, 2014) en, indirect (zie §3.2.1), de proeven van Kim *et al.*, (2010) met de potten van de kleine varens, geven aan dat verhoogde waterbeschikbaarheid formaldehyde sneller doet verdwijnen. Helaas laten onze detailproeven met verschillende watergehalten per pot dit niet goed zien, m.u.v. de Sansevieria (Figuur 3.2). Verder onderzoek met meer herhalingen en met controle van zowel potwatergehalte als waterbuffer in het blad zelf is nodig om grip te krijgen op het precieze effect van waterbeschikbaarheid op formaldehyde zuivering. Ten aanzien van de mechanismen van formaldehyde opname geeft onze studie aan dat in korte meetseries van 1-2 uur de opname waarschijnlijk vooral een opslag is in waterig weefsel en substraat. Het meeste onderzoek noemt dit dus abusievelijk opname en verwerking. Op één onderzoek na (Schmitz *et al.*, 2000) is ook nooit gepoogd formaldehyde in de plant te traceren, dus is de vermeende assimilatie slechts een aanname. Er treedt echter zeker assimilatie op, mogelijk met door de enzymen gelimiteerde snelheid (Schmitz *et al.*, 2000), wat indirect bleek uit onze elke dag herhaalde formaldehydedosering aan eenzelfde plant: na drie keer was er nog steeds geen zichtbare schade, en had de formaldehyde depletie nog steeds hetzelfde verloop. Er is nog steeds een kans aanwezig dat de enige studie aan de enzymwerking (Schmitz *et al.*, 2000), met veel lagere snelheden dan er in de meeste studies door de plant uit de lucht wordt opgenomen, toch een onderschatting is geweest. Enzymen kunnen afhankelijk van de omgevingscondities hun werking verhogen of verlagen. Daarnaast is het de vraag of open huidmondjes wel nodig zijn want de depletie was in langdurig donker net zo groot, en of licht in de verwerkingsreactie nodig is. Dit vraagt om verdiepend fysiologisch onderzoek. Hiermee kunnen dan beter gefundeerde randvoorwaarden voor een optimale inzet van planten voor luchtzuivering t.a.v. formaldehyde worden gedefinieerd.

Ten aanzien van xyleen zijn er nog veel vragen of en hoe de plant deze VOS goed kan verwerken. Er is een daadwerkelijke afname van xyleen door aanwezigheid van blad in de kleine meetopstelling gevonden, maar het is niet duidelijk of dit (a) opname of (b) tijdelijke adsorptie betreft. Indien (b) dan zal het blad de xyleen weer afgeven als de lucht weer schoner is, zoals in de grote stomp inderdaad gemeten, vermoedelijk via een evenwichtsreactie. De vraag is dan hoeveel schoner de lucht kan worden door adsorptie alleen. Daarnaast wordt er zowel in onze proef als in de literatuur flinke opname van xyleen in de bodem gevonden, mogelijk door verwerking door micro-organismen. Dit is niet verder onderzocht in onze studie, en de literatuur is er maar sporadisch bewijs dat de micro-organismen deze VOS ook daadwerkelijk afbreken (Jindrova *et al.*, 2002). Indirect bewijs wordt in onze studie geleverd doordat gestoomde grond met gereduceerd bodemleven de xyleen aanmerkelijk minder goed opneemt (tot 90% minder) dan de niet gestoomde grond.

Er is voor formaldehyde wel een goed presterende luchtzuiveraar gevonden in dit onderzoek (Cyperus, oftewel de 'parapluplant'), maar een uitspraak over de 'Plantkampioen luchtzuivering' kan in dit beperkte onderzoek niet gedaan worden. Voor het screenen van het plantenrijk is uitgebreid, meerjarig onderzoek nodig. Wel zijn er leads naar de mechanismen die ten grondslag liggen aan de beste luchtzuiveraars: die met veel vocht in het systeem bodem-plant (formaldehyde en andere hydrofiele VOS) of een dikke waslaag en/of bodemleven (xyleen en andere lipofiele VOS).

## 4.2 Conclusies

### 4.2.1 Belangrijkste vondsten

De belangrijkste conclusies op een rij:

- Ficus neemt per m<sup>2</sup> blad bovengronds de meeste formaldehyde op t.o.v. de andere geteste plantensoorten (Cyperus, Sansevieria, Spathiphyllum).
- Als we plant EN pot beschouwen, neemt Cyperus in totaal de meeste formaldehyde op.
- Water kan snel en veel formaldehyde opslaan, hetgeen een belangrijke factor is in de mate van de luchtzuivering door plant plus substraat.
- Xyleen wordt vooral tijdelijk geadsorbeerd en komt in een schonere lucht weer grotendeels vrij.
- In alle gerapporteerde experimenten die wij hebben bestudeerd ontbreken er altijd wel relevante metingen om een volledig inzicht te verkrijgen in de belangrijkste processen in de luchtzuivering door planten en substraat (bv. onderscheid tussen plant en pot, bladoppervlak, etc.).

### 4.2.2 Projectresultaten in vergelijking met voorgaand onderzoek

Het algemene beeld is dat de meetresultaten en de daaruit berekende opnamesnelheden van dezelfde orde van grootte zijn als gerapporteerd in voorgaand onderzoek. Enkele eerdere studies laten hogere (Fytagoras) tot relatief zeer hoge (6 tot 10 keer hoger, in Kim *et al.*, 2010) opnamen van formaldehyde zien, maar meestal is daar sprake van (a) aanbodconcentraties die 5 tot 10 keer hoger zijn dan in onze proeven en niet tot nauwelijks in de praktijk voorkomen, (b) extra waterbeschikbaarheid waar de formaldehyde in verdwijnt. Als we in ons resultaat de formaldehyde opname door de pot wel meenemen, dan is de opname qua orde grootte WEL vergelijkbaar met Kim *et al.*, (2010). De opnamesnelheden kunnen dan nog wel verschillen in afhankelijkheid van de aangehouden vochtgehalten in de pot.

Ten aanzien van xyleen zijn geen recente opnamestudies per eenheid bladoppervlak bekend; in vergelijking met opname van toluen en benzeen lijkt onze schatting van xyleen door het blad aan de hoge kant. Opname door het wortelmedium is door ons voor xyleen niet, maar voor formaldehyde wel onderzocht. Het medium neemt snel en veel formaldehyde op indien het veel water bevat. Dergelijke bevindingen zijn niet gerapporteerd in voorgaand onderzoek.

### 4.2.3 Toepasbaarheid van het resultaat

Planten kunnen aantoonbaar de concentraties van de wateroplosbare VOS formaldehyde in de lucht verlagen en zijn zodoende bruikbaar voor luchtzuivering in binnenruimten. De plant lijkt bij herhaalde blootstelling aan formaldehyde niet in zijn functioneren verstoord, zodat planten c.q. plantenwanden duurzaam ingezet kunnen worden in kantoren en huiskamers. Een opvallende factor in de formaldehyde opname blijkt de beschikbaarheid van vocht te zijn. De vochthoeveelheid in de pot is d.m.v. irrigatie en geactiveerde plantverdamping goed te sturen, en levert mogelijkheden op voor versterkte luchtzuivering. Men kan ook in het interieur waterbassins of stromend water aanbrenen.

Ten aanzien van xyleen is er maar beperkt inzicht in de zuivering door planten verkregen. Aangezien het blad veel van de geadsorbeerde xyleen weer makkelijk aan de lucht kan verliezen zijn de bovengrondse delen maar beperkt luchtzuiverend, en zal de luchtzuivering wellicht meer via het substraat moeten verlopen. Dit is in onze studie niet uitgebreid onderzocht, maar blijkt wel uit eerder onderzoek (o.a. Wolverton *et al.*, 1984; Jindrova *et al.*, 2002).

Zowel de zuiveringsmechanismen voor formaldehyde als xyleen, representatief voor respectievelijk hydrofiele en lipofiele VOS, wijzen op een belangrijke rol voor het substraat, en dan met name de micro-organismen die deze stoffen kunnen assimileren (zie o.a. de review van Dela Cruz *et al.*, 2014). In de praktijk zal dus de te zuiveren lucht ook in contact moeten komen met het substraat. In navolging van de resultaten van eerdergenoemde Wolverton *et al.*, (1984) zijn er al meerdere systemen hiervoor op de markt gebracht, o.a. door Wolverton zelf.



# Literatuur

- 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.
- De Visser, P.H.B., 2017.  
Luchtzuivering door planten; een literatuurstudie. Rapport WPR-695, Wageningen Research.
- Duijn, B., van, Klein Hesselink, J., Kester, M., Janse, J. en Spitters, H., 2011.  
Planten in de Klas, PT-rapport 13908.
- Giese, M., U. Bauer-Doranth, C. Langebartels, and H. Sandermann, 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.
- Jindrova, E., Chocova, M., Demnerova, K., Brenner, V., 2002.  
Bacterial aerobic degradation of benzene, toluene, ethylbenzene and xylene. *Folia Microbiol* 47:83–93
- Kim, K.J., Il Jeong, M., Lee, D.W., Song, J.S., Kim, H.D., Yoo, E.H., Jeong, S.J., Han, S.W., Kays, S.J., Lim, Y.W., Kim, H.H., 2010.  
Variation in formaldehyde removal efficiency among indoor plant species. *Hortscience* 45: 1489–1495
- Kim, H.H., Lee, J.Y., Yang, J.Y., Kim, K.J., Lee, Y.J., Shin, D.C., Lim, Y.W., 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, K.J., Yoo, E.H., Jeong, M.I., Song, J.S., Lee, S.Y., Kays, S.J., 2011b.  
Changes in the phytoremediation potential of indoor plants with exposure to toluene. *Hortscience* 46:1646–1649
- Meulen, R. van de, Duijn, B. van, 2014.  
Fysiologische aspecten van luchtzuivering door planten. Fytagoras report, Leiden.
- 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
- 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., 1982.  
Foliage plants for removing formaldehyde from contaminated air inside energy-efficient homes and future space stations. National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC.
- 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, B.C. and Wolverton, J.D., 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., 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, D.S., Pennisi, S.V., Son, K-C., Kays, S.J., 2009.  
Screening indoor plants for volatile organic pollutant removal efficiency. *HortScience* 44: 1377–1381.
- Yo Yoo, M.H., Kwon, Y.J., Son, K.C., Kays, S.J., 2006.  
Efficacy of indoor plants for the removal of single and mixed volatile organic pollutants and physiological effects of the volatiles on the plants. *J Am Soc Hortic Sci* 131:452–458



# Bijlage 1 Bladoppervlak

Tabel 1

*Bladoppervlak (cm<sup>2</sup>) van de meetplanten.*

	1	2	3	Gemiddeld
Cyperus	1573	1621	1733	1642
Ficus	588	652	674	638
Sansevieria	1431	1273	1442	1382
Spathiphyllum	1714	1438	2004	1719









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](http://www.wur.nl/glastuinbouw)

Rapport WPR-812

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 5.000 medewerkers en 10.000 studenten behoort Wageningen University & Research 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.