



Säästva tehnoloogia õppetool

EHITUSMATERJALIDEST LENDUVATE ÜHENDITE  
EEMALDAMINE RUUMIÕHUST TOATAIMEDEGA  
FORMALDEHÜÜDI NÄITEL

REMOVAL OF VOLATILE COMPOUNDS THAT HAVE BEEN EMITTED BY BUILDING MATERIALS, BY HOUSE PLANTS – USING FORMALDEHYDE AS A TEST POLLUTANT

Üliõpilane: **Aili Animägi**

Juhendaja: **Illimar Kalk**

Kaasjuhendaja: **Kairit Laksberg**

Tartu, 2016

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.  
Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite  
tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt  
pärinevad andmed on viidatud.

..... (töö autori allkiri ja kuupäev)

Üliõpilase kood: 083392NAEI

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

..... (juhendaja allkiri ja kuupäev)

Kaitsmisele lubatud: ..... (kuupäev)

Kaitsmiskomisjoni esimees: ..... (allkiri)

## ABSTRACT

Animägi, A. Removal of volatile compounds that have been emitted by building materials, by house plants – using formaldehyde as a test pollutant. – Tartu, 2016. 87 pages, 22 figures, 40 tables. Format A4. In Estonian.

The aim of this paper is to determine whether the house plants *epipremnum pinnatum* and *chlorophytum variegatum* absorb formaldehyde from the air at a concentration of within the scope of occupational exposure limits, and to which extent.

The tests were conducted with two 60 µm film chambers with the volume of 1 m<sup>3</sup>, each of which was composed of one house plant. Tests took place for five days and at the beginning of each day 0.6 mg of formaldehyde were injected to the both chambers. On the fifth day of the experiment the pollutant exposure in the chambers were tested without house plants in order to find out any loss due photolysis or outflow of the pollutant inside of the chambers.

Given the actual amount of formaldehyde removal from the isolated chamber's air average calculated concentrations of 48.1 mg/m<sup>3</sup> per hour (without unexpected extra pollutant) for *chlorophytum variegatum* and 73.2 mg/m<sup>3</sup> per hour for *epipremnum pinnatum*. During the experiment formaldehyde concentrations in the chamber's air were 0.64 to 0.09 mg/m<sup>3</sup>. The findings of this research can be implemented on the empirical formaldehyde emission values from building materials of residential and public buildings to improve indoor air quality with house plants. This study has shown that the plants used in this research can remove formaldehyde within the scope of concentration real life examples. The hypothesis that pollutant removal rate of house plants will rise within the exposure time to the repeated pollutant injection was not proven.

**Keywords:** formaldehyde, *chlorophytum variegatum*, *epipremnum pinnatum*, indoor air, building materials, house plants, pollutant.

## SISUKORD

SISSEJUHATUS .....	5
1. OLUKORRA KIRJELDUS.....	7
1.1 Formaldehüüdi kontsentratsiooniga seotud normid töö- ja eluruumides .....	7
1.2 Olukorra kirjeldus elu- ja tööruumides.....	11
1.3 Olukorra kirjeldus tööalases riskikeskkonnas .....	13
1.4 Meetmed formaldehüüdi kontsentratsiooni vähendamiseks siseõhus .....	14
2. EHITUSMATERJALIDEST LENDUV FORMALDEHÜÜD.....	16
2.1 Peamised formaldehüüdi eraldavad ehitusmaterjalid .....	16
2.2 Ehitusmaterjalidest lenduva formaldehüüdiga seotud normid .....	16
2.3 Ehitusmaterjalidest lenduva formaldehüüdi määramine kambrimeetodiga .....	19
2.4 Lenduvaid orgaanilisi ühendeid ja formaldehüüdi akumulatsioonid ehitusmaterjalid.....	20
3. FORMALDEHÜÜD.....	22
3.1 Formaldehüüd keemilise ühendina.....	22
3.2 Formaldehüüd vabas õhus .....	23
3.3 Formaldehüüd siseruumiõhus.....	24
3.4 Formaldehüüdi mõju inimeste tervisele .....	24
4. Siseruumiõhust formaldehüüdi eemaldamine toataimedega... 27	
4.1 Ajaloost.....	27
4.2 Bioloogiline toimemehhanism formaldehüüdiga .....	28
4.3 Varasemate katsete meetodika .....	29
4.3.1 Kambrikatsed.....	29
4.3.2 Katsed elu- ja töökeskkonnas .....	30
4.4 Taime juurestiku ja maapealse osa efektiivsuse võrdlus .....	32
4.5 Kestva saasteaine mõju taime efektiivsusele ruumiõhust saasteaine eemaldamisel ..	36
5. KATSE .....	38
5.1 Katse eesmärk.....	38
5.2 Katse meetodika .....	38
5.3 Katses kasutatavad vahendid ja taimed .....	40
5.3.1 Katsevahendid .....	40
5.3.2 Katses kasutatavad taimed.....	42
5.4 Tulemused .....	46
5.4.1 Katse käik .....	46
5.4.2 Katsetulemused.....	49
5.5 Arutelu ja edasised uurimissuunad .....	59

5.5.1 Võrdlus varasemate katseandmetega.....	59
5.5.2 Rakendus ehitusmaterjalidest lenduva formaldehüüdi sidumiseks .....	61
5.5.3 Edasised uurimissuunad .....	62
KOKKUVÕTE .....	64
TÄNUAVALDUSED.....	66
KIRJANDUS .....	67
LISAD .....	71

## SISSEJUHATUS

Ehituses on taas jõutud faasi, kus üks võtmesõnadest on „energiatõhusus“. 1970. aastate energiakriisi ajal pani suurriikide ehitustööstus suurt rõhku energia tarbimisele ja säästmisele. Nii vanad kui uued hooned tehti energiasäästlikumaks, tihtipeale kasutades laialt levima hakanud sünteetilisi materjale. Kuigi saavutatud õhutihe maja oli energiatõhus, sai üsna pea selgeks, et kasutatud materjalidest lenduvad ja inimtekkelised ühendid muudavad ruumis olemise tekkinud halva õhukvaliteedi tõttu võimatuks.

Juba siis mõisteti, et ehitustööstus peab omaks võtma vajadust hoone õhku seesmiselt puhastada, taaselustada ja taaskasutada. See on oluline nii energia säästuks kui ka kaitseks väliste õhu kaudu levivate bioloogiliste ja/või keemiliste ohtude eest. Siis, kui kinnitati seos halva siseõhu kvaliteedi ja hingamisteede probleemide vahel, vallandus Ameerika Ühendriikides kohtuhagide laviin kahjuhüvitiste välja nõudmistega. Ajaloole vaatamata on tänaseni toimunud progress õhukvaliteedi parandamises olnud vähene. (Wolverton, 2012)

Levinud energiatõhusa hoone elemendid nagu hoonekarbi kõrge õhupidavus ja madala õhuvahetushulgaga ventilatsioon loovad soodsa olukorra saasteainete kuhjumiseks siseruumis. Tõhusaimad meetodid sisekliima saasteainete kontsentratsiooni kontrollimiseks on saastealika kõrvaldamine ja ventilatsiooni reguleerimine. Kontrolli raskendavad difuussed materjalid, mis käituvad saasteühenditele puhvrina.

Mitte alati pole ruumis viibijal võimalik muuta end ümbritsevat sisekliimat, seda mitmetel põhjustel; rahalistest füüsikaliste kuni juriidilisteni. Toataimed siseruumis saasteainete eemaldajatena pakuvad potentsiaalselt alternatiivi sisekliima kujundamisel.

Toataimedega ruumiõhust lenduvate orgaaniliste ühendite eemaldamise uurimine on algust saanud Ameerika Ühendriikide NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) laboritest. Pärast esimesi avaldatud uuringuid kaheksakümnendatest on teemaga tegeletud

teisteski laborites, Põhja-Ameerikas, Ida-Aasias ja Skandinaavias. Teadaolevalt ei ole Eestis seotud uurimusi teostatud.

Varasemalt on läbi viidud mitmeid laboratoorseid katseid erinevate taimeliikidega ja saasteainetega selgitamiseks välja keemilise ühendi kaupa kõige efektiivsemalt mõjuva taime, mis suudab võimalikult vähese ajaga eemaldada suletud ruumi õhust võimalikult suure koguse vaatlusalust ühendit. Katsetes on kasutatud saasteainete kontsentratsioone, mis ületavad korraldades kehtestatud normipiire sisekliimale. Sellistes tingimustes saadud tulemused ei iseloomusta tegelikes siseruumides eksisteerivat olukorda ja võimalikku kasu taimedest. On läbi viidud ka katseid elu- ja tööruumides, kuid saadud tulemused on mõjutatud teiste sisekliima omadusi moodustavate teguritega.

Käesolev uurimustöö koosneb teoreetilisest ja praktilisest osast. Teoreetiline osa annab ülevaate siseruumides formaldehüüdi kontsentratsioonidega seotud olukorrast ja seda eraldavatest ehitusmaterjalidest. Tutvustatakse formaldehüüdi ja varasemaid katseid selle eemaldamiseks siseruumiõhust toataimedega. Praktiline osa koosneb katsest, kirjeldatud on katse eesmärk, meetodika, katsevahendid, katse käik ja tulemused.

Laboratoorsed katsed viiakse samaaegselt läbi kahe kambriga, milledes on erinevat liiki vähenõudlikud toataimed. Testitavaks saasteaineks on siseruumides sagedasti esinev inimese tervisele kahjulik formaldehüüd. Saasteaine piirkontsentratsiooniks kambris on valitud  $0,6 \text{ mg/m}^3$ , mis on ühtlasi Eestis tööruumide õhu formaldehüüdi piirnormiks. Katsed viiakse läbi viiel päeval, et korraga uurida pikemaajalisi toimetehhanisme.

## **1. OLUKORRA KIRJELDUS**

### **1.1 Formaldehüüdi kontsentratsiooniga seotud normid töö- ja eluruumides**

Eesti Vabariigis on formaldehüüdi piirnormid tööruumides seatud „Töötervishoiu ja tööhutuse seaduse“ § 3 lõike 4 alusel kehtiva määrusega „Töökeskkonna keemiliste ohutegurite piirnormid“. Määrusega sätestatud tööruumide formaldehüüdi piirnormiks on  $0,6 \text{ mg/m}^3$ , kemikaali suurimaks lubatud sisalduseks töökeskkonna õhus on  $1,2 \text{ mg/m}^3$ . Normi määramisel on arvestatud kokkupuuteaja keskmiseks väärtuseks kaheksa tundi. Lühiajalise kokkupuute saasteaine keskmise kontsentratsiooni piirnormi aluseks on võetud 15- minutiline ajaperiood. Samas normis on formaldehüüd määratud ka kantserogeenseks ja sensibiliseerivaks aineks. (Töökeskkonna keemiliste ohutegurite piirnormid, 2001)

Siseõhu kvaliteedinõuete rahvusliku lisaga (2012) on määratud mõisted, mis aitavad mõista sisekliima saastekoormust. Alljärgnevalt on toodud peamised mõisted hoonete liigitamisel.

Väga madala saastekoormusega hooned on hooned, kuhu on eriti hoolikalt valitud madala emissioonitasemega materjalid ja kus saasteaineid eraldavad tegevused on keelatud ning varemalt ei ole esinenud saasteainete allikaid nagu tubakasuits.

Madala saastekoormusega hooned on hooned, kuhu on hoolikalt valitud madala emissioonitasemega materjalid ja kus saasteaineid eraldavad tegevused on piiratud või keelatud.

Piiramata saastekoormusega hooned on vanad või uued hooned, kus ei ole valitud madala emissioonitasemega materjale ja kus saasteaineid eraldavad tegevused ei ole keelatud.



Eluruumides on sisekliima parameetrid oluliselt seotud energiatõhususega, sest energiakulu sõltub nendes hoonetes otseselt temperatuurist, ventilatsioonist ja valgustusest, tehnosüsteemidest ja nende kasutusest. Hoonete sisekliima jaotub nelja erinevasse klassi. Tabel 1.1. annab ülevaate sisekliima klasside liigitumisest.

**Tabel 1.1.** Sisekliima klasside kirjeldus (EVS-EN 15251:2007)

Sisekliima klass	
I	Kõrged nõudmised sisekliima kvaliteedile. Soovitatav ruumides, kus viibivad väga tundlikud, nõrga tervisega ja erinõuetega inimesed, näiteks puuetega inimesed, haiged, väga väikesed lapsed ning eakad inimesed.
II	Tavapärased nõudmised sisekliima kvaliteedile. Tuleks rakendada uutes ja renoveeritavates hoonetes
III	Mõõdukad nõudmised sisekliimale. Võib rakendada olemasolevates hoonetes.
IV	Sisekliima kvaliteedi väärtused, mis jäävad väljapoole eelmainitud klasse. Antud klass võib olla vastuvõetav ainult piiratud ajal aastast.

Kuigi formaldehüüd on lenduv orgaaniline ühend, tuuakse see viimaste seast täiendavalt eraldi välja, sest tegu on ühe peamise hoonete ruumiõhus leiduva saasteainega. Tabelis 1.2. on toodud nii lenduvate orgaaniliste ühendite koondkogus kui formaldehüüdi eraldumise kogus pinnaühiku kohta ajaühikus madala ja väga madala saasteainete eraldumise tasemega hoones. Küsitavuse tekitab asjaolu, et kantserogeensete ainete piirnorm on madalam kui formaldehüüdil, kuigi ka formaldehüüdi liigitatakse kantserogeenseks.

**Tabel 1.2.** Madala ja väga madala saasteainete eraldumise tasemed (EVS-EN 15251:2007)

	Madala saasteainete eraldumise tasemega hoone	Väga madala saasteainete eraldumise tasemega hoone
Kogu lenduvate orgaaniliste ühendite eraldumine, mg/m <sup>2</sup> h	<0,2	<0,1
Formaldehüüdi eraldumine, mg/m <sup>2</sup> h	<0,05	<0,02
Ammoniaagi eraldumine, mg/m <sup>2</sup> h	<0,03	<0,01
Kantserogeensete ühendite eraldumine, mg/m <sup>2</sup> h	<0,005	<0,002
Lõhnaga rahulolematute osa, %	<15	<10

Jaotades hooned väga madala, madala ja mitte-madala saasteainete eraldumise järgi (Tabel 1.2.), on tarvis eesmärgijärgse sisekliima klassi saavutamiseks rakendada vastavat ventilatsiooni õhuvooluhulka. Tabelis 1.3. toodud ventilatsiooni õhuvooluhulgad aitavad värske õhuga kompenseerida hoonesisestest materjalidest lenduvate saasteainete määra ning hoida sisekliima saasteainete taseme normijärgsena.

**Tabel 1.3.** Vajalikud ventilatsiooni õhuvooluhulgad ( $q_B$ ) lähtuvalt hoone materjalidest eralduvatest saasteainetest (EVS-EN 15251:2007)

Sisekliima klass	Õhu vooluhulk hoonest eralduvatele saasteainetele, l/(s*m <sup>2</sup> )		
	Väga madala saasteainete eraldumisega hooned	Madala saasteainete eraldumisega hooned	Mitte-madala saasteainete eraldumisega hooned
I	0,5	1,0	2,0
II	0,35	0,7	1,4
III	0,3	0,4	0,8

Standardi järgi peab uute ja renoveeritavate hoonete puhul olema sisekliima klassiks I või II. Kui energiatõhusa hoone projekteerimisel ei võeta arvesse kasutatavate materjalide saasteainete eraldumise taset ja arvestatakse ainult energiatõhususe miinimumnõuetest lähtuvaid ventilatsioonitasemeid (Tabel 1.4.), võib tekkida olukord, kus sisekliima saasteainete määr ületab seatud norme väikeelamutes ja korterelamutes.

**Tabel 1.4.** Ventilatsiooni välisõhu vooluhulga miinimumväärtused (Hoone energiatõhususe miinimumnõuded, 2015)

Hoone kasutusotstarve	Välisõhu vooluhulk, l/(s m <sup>2</sup> )
Väikeelamutes ja korteripõhise ventilatsioonisüsteemiga korterelamutes	0,42
Korterelamutes	0,5
Büroohoonetes, teenindushoonetes, raamatukogudes ja teadushoonetes	2
Kaubandushoonetes ja terminalides	2
Ärihoonetes, v.a kaubandushoonetes ja teenindushoonetes	1,5
Avalikes hoonetes, v.a spordihoonetes ja raamatukogudes	2
Spordihoonetes	2
Haridushoonetes	3
Tervishoiuhoonetes	4

Sisekliima mõjutab otseselt hoones viibivate inimeste tervist, mugavust ja tootlikkust. Viimased uuringud näitavad, et normidele mittevastava sisekliima poolt tekitatud kahju ületab tunduvalt hoone energiakasutuse maksumust. Hoone kasutajad, kes tunnevad end hoones ebamugavalt, leiavad üldjuhul võimaluse olukorra parandamiseks, mis seejuures suurendavad hoone energiakasutust. (EVS-EN 15251:2007)

Regulatsioonid, mis määravad lubatud formaldehüüdi taseme siseruumides on Euroopas erinevad. Samal ajal liiguvad pingutused formaldehüüdi kontsentratsiooni vähendamiseks

kõikjal samas suunas. Määratud direktiivid jäävad üldjuhul 0,12 ja 0,15 mg/m<sup>3</sup> vahele, ainult mõni kuni 0,48 mg/m<sup>3</sup>. Vaatamata seatud formaldehüüdi kontsentratsiooni normidele, pole kaasnevalt määratud ruumide täpsemaid parameetreid: ruumi tüüp, ruumis viibivate isikute arv, temperatuur, keskmine õhuniiskus ja ventilatsioonimäär. (European Commission, 1990)

## **1.2 Olukorra kirjeldus elu- ja tööruumides**

Hoone sisekliima mõjutab seal viibijate tervist, töötotlikkust ja mugavust. Standardites toodud parameetreid järgiv sisekliima parandab õppimise või töötamise tulemuslikkust ja vähendab haigestumist. (EVS-EN 15251:2007)

Tavaliselt ei ulatu eluruumides formaldehüüdi tase kontsentratsioonideni, mis teadaolevalt tekitaksid terviseprobleeme, siinkohal on ülitundlikud inimesed välja arvatud. Kokkupuude eluruumides on peamiselt tingitud ehitusmaterjalide emissioonidest, kõige sagedamini karbamiidformaldehüüdvaike sisaldavatest materjalidest. Kokkupuude aktiivsest või passiivsest suitsetamisest on võrreldav kokkupuutega ehitusmaterjalide emissioonidest.

Mõõtmised mitmetes Euroopa riikides näitavad tendentsi formaldehüüdi kontsentratsiooni tõusule siseruumides suveperioodidel, see tähendab kõrgema niiskuse ja temperatuuri juures. See tendents toetab leide, et karbamiidformaldehüüdvaigud on peamised siseruumiõhu formaldehüüdi allikateks. Kõrgendatud formaldehüüdi kontsentratsioonid on tihti seotud defektsete ehitustoodete kasutamisega, mittesihotstarbelise materjalikasutusega, materjalide märgumise või üle ujutamisega.

Tavapäraselt moodustub inimeste kokkupuude formaldehüüdiga õhu kaudu levivast reostusest ja sisse söödavast saastest, mida võib kokku olla 1-14 mg/päevas. (European Commission, 1990)

Viimase 10-15 aasta jooksul on mitmetes Euroopa riikides vähenenud ruumiõhus formaldehüüdi kontsentratsioon, sest on vähenenud ühendit sisaldavate materjalide kasutus. Samal ajal on formaldehüüdi kontsentratsioon tõusnud hoonete energiatõhusamaks muutmise tõttu, see tähendab hoonekarbi tihendamise ja ventilatsiooni määra vähendamise tõttu. (Air Quality Guidelines for Europe, 2000) Üldiselt on formaldehüüdi emissioon vastvalminud majades mitmeid kordi kõrgem kui vanades hoonetes. (Efficiency of Volatile Formaldehyde Removal by Indoor Plants: Contribution of Aerial Plant Parts versus the Root Zone, 2008). Täiendavaid andmeid formaldehüüdi kontsentratsioonide mõõtmise tulemustest elu- ja avalike hoonete siseruumides on toodud lisas A.

**Tabel 1.5.** Keskmised formaldehüüdi kontsentratsioonid elu- ja töökeskkondades, keskmised sisse hingatavad formaldehüüdi kogused päevas (Air Quality Guidelines for Europe, 2000)

Allikas	Kontsentratsioon, mg/m <sup>3</sup>	Sisse hingatava formaldehüüdi kogus, mg/päev
Välisõhk (10% ajast; 2m <sup>3</sup> päevas)	0,001 - 0,02	0,002 - 0,04
Siseõhk		
Eluruumis, 65% ajast, 10m <sup>3</sup> päev		
-tavaeluruumid	0,03 - 0,06	0,3 - 0,6
-mobiilne elukoht	0,1	1,0
-suitsetamine siseruumis	0,05 - 0,35	0,5 - 3,5
Töökoht (25% ajast; 8m <sup>3</sup> päevas)		
-tööalase kokkupuuteta	0,03 - 0,06	0,2 - 0,5
-tööalase kokkupuutega	1,0	8,0
-suitsetamine siseruumis	0,05 - 0,35	0,4 - 2,8
Suitsetamine (20 sigaretti päevas)	60 - 130	0,9 - 2,0

### 1.3 Olukorra kirjeldus tööalases riskikeskkonnas

Üldistatult esineb kolm peamist tööalast kokkupuudet formaldehüüdiga. Esimene on seotud formaldehüüdi vesilahuse, formaliini, tootmisega ja selle kasutamisega keemiatööstuses. Näiteks mitmete vaikude sünteesis, säilitusainena meditsiinilaborites, balsameerimisvahendina ja desinfektsioonivahendina.

Teine grupp on seotud formaldehüüdi emissiooniga formaldehüüdipõhistest vaikudest, milles see esineb jäägina ja/või vaikude hüdrolüüsi või termilise lagunemise kaudu. Kokkupuuteprotsessideks on puidupõhiste toodete, tekstiilide, sünteetiliste isolatsioonitoodete ja plastikute tootmine. Üldiselt annavad fenool-formaldehydvaigud võrreldes melamiinipõhiste ja karbamiid-formaldehydvaikudega palju vähem emissioone.

Kolmas grupp on seotud orgaanika pürolüüsi või põlemisega, näiteks mootori väljaheitegaasidest või tulekahjust. (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2006)

Ehitustööstuses võib kokkupuude formaldehüüdiga olla suhteliselt kõrge. Näiteks karbamiid-formaldehydlakiga töötades võib formaldehüüdi kontsentratsioon õhus olla 2.5-6,2 mg/m<sup>3</sup>. Teine sage kokkupuude tekib saagides või lihvides formaldehüüdi sisaldavaid puidupõhiseid materjale. Ehitusprotsessi käigus on üks peamistest formaldehüüdiga kokkupuute allikaks karbamiidformaldehydvaiku sisaldavate soojustusmaterjalide paigaldamine. (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2006)

Tabelis 1.6. on toodud riigiti tööalasel formaldehüüdiga kokkupuutekeskkondade normkontsentratsioonid, Tabelis 1.7. reaalselt tööstustes mõõdetud väärtused. Võrreldes toodud andmeid, on näha, et reaalses töötingimustes võib formaldehüüdi kontsentratsioon töökeskonna õhus ületada normpiire mitmekordselt.

**Tabel 1.6.** Töölased kokkupuutenormid formaldehüüdiga erinevates riikides (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2006)

Riik	Formaldehüüdi kontsentratsioon, mg/m <sup>3</sup>
Austraalia	1,2-2,5
Belgia, Malaisia, Hispaania	0,37
Brasiilia	2
Hiina	0,5
Taani	0,4
Soome	0,37-1,2
Eesti, Prantsusmaa, Rootsi	0,6-1,2
Iirimaa, Mehhiko, Lõuna-Aafrika, Suurbriitannia	2,5
Jaapan	0,6
Uus-Meremaa	1,2

**Tabel 1.7.** formaldehüüdi mõõdetud kontsentratsioonid erinevate materjalide tootmistööstustes üle maailma (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2006)

Tööstus	Formaldehüüdi kontsentratsioon, mg/m <sup>3</sup>
Lamineeritud toodete tööstus	0,5-1,1
Lamineeritud kiudplaadi tööstus	0,1-1,1 maksimaalselt 5
Formaldehüüdi ja sellest toodetud vaigu tööstus	0,6-2,4
Lamineeritud toodete vaikude tööstus	0,05-0,5 maksimaalselt 1
Vineeritööstus	0,1-0,39

#### 1.4 Meetmed formaldehüüdi kontsentratsiooni vähendamiseks siseõhus

Planeerides ennetavaid meetmeid formaldehüüdiga kokkupuute vähendamiseks siseruumides tuleb arvestada mitmeid asjaolusid. Siseõhu formaldehüüdi kontsentratsiooni sõltuvus

saasteallikate emissioonikogustest ja ruumi ventilatsioonimäärast teeb üsna keerukaks täpselt ennustada igasuguse meetme efektiivsust vähendada formaldehüüdi kogust õhus. (European Commission, 1990)

Üldiselt on kõige efektiivsemaks formaldehüüdi sisalduse kontrolliks võimalike saasteallikate vältimine. Formaldehüüdi kontsentratsioon ruumiõhus sõltub saasteallika omadustest. Täpsemalt selle formaldehüüdi emissioonihulgast pinnauhiku kohta, allika mõõtmetest, kokuupuutepindalast õhuga ning selle temperatuurist ja niiskusest. Temperatuuri ja niiskuse tõusuga tõuseb ka formaldehüüdi eraldumise hulk saasteallikast. Kui formaldehüüdi eraldavate materjalide vältimine on võimatu, tuleb suurendada ventilatsiooni õhuvooluhulkasid ja asendada saastunud ruumiõhk pidevalt värske õhuga.

Kuna ruumiõhu temperatuur, niiskus, õhuvahetustegur ja õhu liikumise kiirus mõjutavad otseselt ruumis viibivate inimeste heaolu ja tervist, ei ole nende parameetrite muutmine formaldehüüdi kontsentratsiooni kontrollimiseks siiski sobiv. Kõrvaldades küll saasteainete probleemi, muutub sisekliima teiste toodud parameetrite tõttu ruumis viibijatele ebasobivaks. (European Commission, 1989)

Alternatiivseks võimaluseks saasteaine kontsentratsiooni ohutus tasemes hoida, on kasutada selleks toataimi, mis seovad endaga lenduvaid orgaanilisi ühendeid ja formaldehüüdi. (Efficiency of Volatile Formaldehyde Removal by Indoor Plants: Contribution of Aerial Plant Parts versus the Root Zone, 2008)



## **2. EHITUSMATERJALIDEST LENDUV FORMALDEHÜÜD**

### **2.1 Peamised formaldehüüdi eraldavad ehitusmaterjalid**

Kõige laiaulatuslikum formaldehüüdi kasutus toimub vaikude tootmisel karbamiidi, fenooli, melamiini, ja polüatsetaaliga. Formaldehüüdi baasil toodetud vaike kasutatakse liimidena ja immutusvaikudena mitmete puidupõhiste materjalide tootmisel. Needsamad materjalid on ka peamisteks formaldehüüdi eraldavateks ehitusmaterjalideks: puitlaastplaadid, vineer ja teised puidupõhised komposiittooted. (WHO, 1989; IARC, 1995; Reuss et al., 2003; Gerberich & Seaman, 2004)

Formaldehüüdi kasutatakse ka tekstiili-, naha-, kummi- ja tsemenditööstuses. Veel kasutusalasid hõlmavad siduvained valuliivas, kivivillas, klaasvillas ja teistes soojustusmaterjalides ja liivapaberis. (WHO, 1989; IARC, 1995)

### **2.2 Ehitusmaterjalidest lenduva formaldehüüdiga seotud normid**

Euroopas toodetakse enamasti vineerplaate, mille formaldehüüdi emissioon perforaatormeetodil on kuni 8,0 mg 100 g kuiva vineerplaadi kohta. Tendents on emissioonide vähendamise suunas ja saavutada perforaatormeetodil maksimaalseks emissiooniks 4,0 mg 100 g kuiva plaadi kohta. (Roffael, 2006)

Tabelis 2.1. ja Tabelis 2.2. on toodud vineerist formaldehüüdi emissiooni piirväärtused 100 g materjali kohta vastavalt Euroopa standardite järgi ja GOST põhjal.

**Tabel 2.1.** Klassifikatsioon Euroopa standardite järgi (EVS-EN 717-1:2004)

Plaaditüüp	Klassifikatsiooni meetod	Emissiooni väärtus	Märkused
E1 puitlaastplaat, vineer	Kambermeetod EN 717-1	$\leq 0,1$ ppm	Püsivad emissioonid. Kontsentratsioon põhineb 6,5% niiskusesisaldusel, keskmine emissioon 6 kuu jooksul
	Perforaatormeetod EN 120	$\leq 6,5$ mg/	

**Tabel 2.2.** GOST 3916.1-96-põhised vineeri emissiooniklassid

Liimi emissiooni klass	Formaldehüüdi sisaldus 100 grammis kuivas vineerimassis, mg
E1	<10
E2	10-30

Karbamiid- ja fenoolformaldehüüdvaikude kasutamisel erinevates tehnoloogiaprotsessides, nagu puitlaastplaatide, vineeri, ja teiste liimitud puidu eri liikide, näiteks parketi valmistamisel arvutatakse välisõhku eralduva formaldehüüdi heitkogused tonnides aastas kasutades järgmist valemit (Puidu töötlemisel välisõhku eralduvate saasteainete heitkoguste määramismeetodid, 2004):

$$M = 10 - 3 * G_v * k_1 * (1 - k_2) * k_3 * t, \quad (2.1)$$

kus

$G_v$  – vaigu kulu, kg tunnis;

$k_1$  – lenduva formaldehüüdi sisaldust vaikudes arvestav tegur. Lenduva formaldehüüdi sisaldus puidu töötlemisel kasutatavates vaikudes on toodud Tabelis 2.3. Tabelis on arvestatud Eestis toodetavate vaikudega, muu vaigu kasutamisel leitakse selle koostis pakendil olevast või materjali tootja või müüja esitatud info alusel;

$k_2$  – valmistootesse jäänud lenduva formaldehüüdi kogust arvestav tegur  $k_2$ , mis on esitatud Tabelis 2.4.;

$k_3$  – eri tehnoloogiaprotsessidest ja -seadmetest lenduvaid formaldehüüdi koguseid arvestav tegur  $k_3$ , mis on esitatud Tabelis 2.4.;

t – tehnoloogiaprotsessi kestus, tundi aastas.

**Tabel 2.2.** Lenduva formaldehüüdi sisaldus vaikudes (Puidu töötlemisel välisõhku eralduvate saasteainete heitkoguste määramismeetodid, 2004)

Vaigu tüüp	Formaldehüüdi sisaldus, %
Karbamiidformaldehüüdvaik KF-15	0,15
Karbamiidformaldehüüdvaik KF-30	0,30
Vedel fenoolformaldehüüdvaik SFZ-3014	0,10
Melamiin-formaldehüüd-immutusvaik SPMF-5 „KM“	0,50

**Tabel 2.3.** Valmistootesse jäänud ning eri tehnoloogiaprotsessidest ja -seadmetest lenduvaid formaldehüüdi koguseid arvestavad tegurid (Puidu töötlemisel välisõhku eralduvate saasteainete heitkoguste määramismeetodid, 2004)

Tehnoloogiaprotsess	Tegur k <sub>2</sub>	Tehnoloogiaprotsess ja -seadmed	Tegur k <sub>3</sub>
Naturaalsele ja sünteetilisele spoonile liimi pealekandmine ja vineerimine mööbli tootmisel	0,1	Liimi pealekandmise valtsseadmed ja kuumpressid	0,83
		Spoonitud toote hoidmine	0,17
Paberi immutamine (lamineerimine)	0,5	Immutamine	1,0
Puitlaastu immutamine kuumpressimisvaiguga; puitlaastplaatide jahutamine	0,6	1. Peakonveier ja -press	0,9
		2. Sideainete valmistamine	0,09
		3. Valmistoodanguladu	0,01
Spoonile liimi pealekandmine, kuivatamine, spooni kuumliimimine ja jahutamine peale pressimist	0,5	1. Liimimisvaltsseadmed	0,1
		2. Liimiga kaetud spooni kuivatid; kuumpressid	0,75
		3. Jahutuskambrid	0,15

### 2.3 Ehitusmaterjalidest lenduva formaldehüüdi määramine kambrimeetodiga

Puidupõhistest paneelidest formaldehüüdi lendumise määramist rakendatakse erinevate meetmetega. Allpool on kirjeldatud kambrimeetodi toimimismehhanismi.

Teatud pindalaga testtooted asetatakse kambrisse, milles on reguleeritud temperatuur, suhteline niiskus, õhu liikumise kiirus ja õhuvahetus, toodud Tabelis 2.4. Euroopa kambrimeetodi puhul asetatakse puitlaastplaadi katsekeha kambrisse, mille maht on 1 või 0,225 m<sup>3</sup>. (EVS-EN 717-1:2004) Materjalidest eralduv formaldehüüd seguneb liikuva õhuga ja õhku testitakse kaks korda päevas. Formaldehüüdi kontsentratsiooni määratakse läbi absorbeerimisanumate tõmmatud õhu nendes asuvasse vette. Seejärel määratakse formaldehüüdi kogus vees fotomeetriselt, mille põhjal arvutatakse formaldehüüdi kontsentratsioon kambriõhus arvestades välja pumbatud õhu kogust. Saadud kontsentratsiooni väljendatakse ühikuga mg/m<sup>3</sup> või ppm. Teste korratakse ühtlaste vahedega seni, kuni saavutatakse ajas muutumatu formaldehüüdi kontsentratsiooni tase kambris. (Wood-based panels – Determination of formaldehyde release- Part 1: Formaldehyde emission by the chamber method, 2004)

**Tabel 2.4.** Formaldehüüdi emissiooni määramiskambri parameetrid (EN 717-1:2004)

Temperatuur	23±0,5°C
Keskmine niiskus	45±3%
Õhuvahetus	1± 0,1h <sup>-1</sup>
Õhu liikumise kiirus	0,3 - 0,1m/s
Täitmistegur	1±0,02 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Õhuvahetustegur	1,0±0,05/h

Kambriehituseks kasutatavad materjalid peaksid olema võimalikult inertsed, sileda pinnaga ja testimisele eelnevalt pestavad. Kamber peab olema õhutihe, sisestatava õhu hulk peab olema kontrollitav maksimaalse 5 % veaprotsendiga. Sisse lastavas õhus võib olla formaldehüüdi kontsentratsioon maksimaalselt 0,0006 mg/m<sup>3</sup>.

Proove soojendatakse 15 minutit  $40 \pm 1$  °C juures. Seejärel lastakse proovidel jahtuda ruumitemperatuuril 1h, kaitstuna valguse eest. Absorbeerunud formaldehüüdi kogus määratakse 412nm juures kasutades spektrofotomeetrit. Koos proovidega määratakse standardlahuste väärtused spektrofotomeetriga. (Wood-based panels – Determination of formaldehyde release- Part 1: Formaldehyde emission by the chamber method, 2004)

Eesti standardikeskuse andmetel on koostatud standardid veel kahele meetodile formaldehüüdi emissiooni määramiseks:

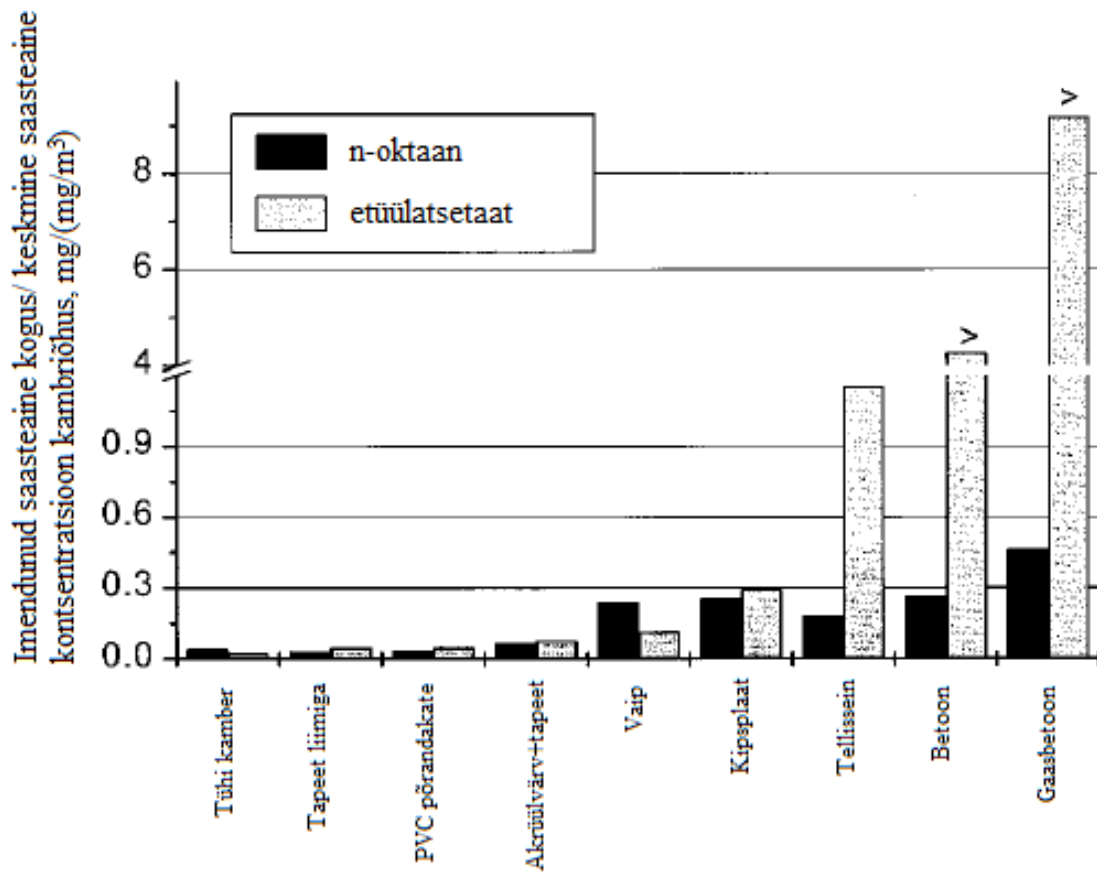
- EVS-EN 717-2:1999 Puitplaadid. Formaldehüüdi eraldumise määramine. Osa 2: Formaldhüüdi eraldumise määramine gaasanalüüsimeetodiga.
- EVS-EN 717-3:2003 Puitplaadid – Formaldhüüdi eralduse määramine. Osa 3: Formaldehüüdi eraldumine kolbmeetodil.

## **2.4 Lenduvaid orgaanilisi ühendeid ja formaldehüüdi akumulatsioonid ehitusmaterjalid**

Mitmed ehitusmaterjalid võivad käituda puhvritena lenduvatele orgaanilistele ühenditele ja ka formaldehüüdile. Nende materjalide olemasolu ruumis vähendab kõrgkontsentratsioone, kuid pikendavad saasteaine esinemisaega ruumis. Girman, Phillips ja Levin (2009) uurisid erinevate ehitusmaterjalide käitumist puhvritena n-oktaani ja etüülatsetaadi näitel. Eksperimenti valitud materjalideks olid tapeet liimiga, PVC põrandakate, akrüülvärv tapeediga, vaip, kipsplaat, tellissein, betoon ja gaasbetoon.

Katse käigus ventileeriti kambreid 24 tunni jooksul n-oktaani sisaldava õhuga ja teisi kambreid 48 tunni vältel etüülatsetaadiga saastatud õhuga. Kontsentratsioonid olid seatud 11 mg/m<sup>3</sup> ja 15 mg/m<sup>3</sup> n-oktaanile ja 21 mg/m<sup>3</sup> ja 28 mg/m<sup>3</sup> etüülatsetaadile. Kõikide kambrite õhuvahetuskiirus oli kaks h<sup>-1</sup>. Katsetulemusi iseloomustab Joonis 2.1., kus on toodud ehitusmaterjalidesse absorbeerunud saasteainete kogused kambriõhu kontsentratsiooni kohta.

Saasteperioodile järgnes puhta õhuga ventileerimise periood. Katse käigus selgus, et ehitusmaterjali kogunenud saasteaine kontsentratsiooni vähenemine kestab kauem kui selle kogunemine. Näiteks oli etüülatsetaadi kogus gaasbetoonis vähenenud 50 % võrra 72 tundi pärast värsket õhuga ventileerimisega alustamist. Teiste materjalidega täheldati sarnast käitumist.



**Joonis 2.1.** Ehitusmaterjalidesse absorbeerunud ainete kogused kambriõhu saasteaine kontsentratsiooni kohta (Girman, J., Phillips, T., Levin, H., 2009)

### 3. FORMALDEHÜÜD

#### 3.1 Formaldehüüd keemilise ühendina

Formaldehüüd on lihtsaim aldehüüd, seejuures on see enimlevinud ja kõige tähtsam tööstuslikult toodetud aldehüüd. Formaldehüüdi keemiline valem on HCHO ja seda tuntakse ka kui metanaali. Tabelis 3.1. on toodud teised formaldehüüdi keemilised parameetrid. Inimeste elukeskkonnaga arvestades suhteliselt madala keemistemperatuuri tõttu puututakse formaldehüüdiga kokku gaasilises vormis, mis on värvitu, aga kirbe lõhnaga. HCHO on vees hästi lahustuv, vesilahus on tuntud formaliinina. Tavaliselt on formaldehüüd kommertslikult saadaval formaliinina, 30–50% massijärgse lahusega. Peale vee lahustub formaldehüüd hästi ka veel etanoolis ja kloroformis, seguneb atsetooni, benseeni ja dietüüleetri. (Lebowitz, Quackenboss, 1993)

**Tabel 3.1.** Formaldehüüdi keemilised parameetrid (Lebowitz, Quackenboss, 1993)

Parameeter	Väärtus
Suhteline molaarmass	30,03
Tihedus 20 °C juures	0,815g/m <sup>3</sup>
Sulamistemperatuur	-92 °C
Keemistemperatuur	-19,1 °C

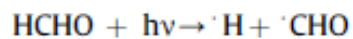
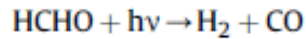
Formaldehüüdi kontsentratsiooni esitatakse nii ühikuga ppm kui mg/m<sup>3</sup>. Tavatingimustes, temperatuuri 23°C ja rõhu 1013 hPa juures kehtib järgnev teisendus:

$$1\text{ppm} = 1,24\text{ mg/m}^3 \quad (3.1)$$

(EN 717-1:2004)

Mõõtmistehnikate erisuste tõttu ei loeta formaldehüüdi ühtse määratlusena lenduvate orgaaniliste ühendite hulka, kuigi see on nii lenduv kui ka orgaaniline ühend. (Asthmatic symptoms and volatile organic compounds, formaldehyde, and carbon dioxide in dwellings, 1995)

Formaldehüüd laguneb valguse mõjul. Fotolüüsi poolajaks on 1,6 kuni 6 tundi olenevalt fotolüüsi reaktsioonist. Lagunemine toimub peamiselt kahel viisil:



Siseruumides on võimalused fotolüüsiks piiratud, sest 80 % lainepikkustest alla 360 nm ei jõua siseruumi. Formaldehüüdi fotolüüsi toimumisel ongi valguslainete lainepikkus ülempiiriks 360nm. (Atkinson, Hester, Harrison, 1995)

### 3.2 Formaldehüüd vabas õhus

Looduslik formaldehüüdi kontsentratsioon välisõhus on umbes üks  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Linnakeskkonnas on aasta keskmine kontsentratsioon ligikaudu 5-10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Lühiajalised tippkontsentratsioonid on umbes 10 korda kõrgemad ja esinevad linnades näiteks liikluse tipp tundidel ja suduperioodidel. Veelgi kõrgemaid kontsentratsioone esineb tavaliselt tööstusprotsesside käigus. (Lebowitz, Quackenboss, 1993)

Formaldehüüd esineb vabas looduses gaasilises vormis naturaalse ja inimtekkeliste ühendite oksüdatsiooni ja taimede ainevahetustegevuse tulemusena. Loodulikest põlemisprotsessidest üks ulatuslikum on metsatulekahju. Inimtekkelisena lisandub loodusesse formaldehüüdi autode heitgaasidest, põlemisprotsessidest ja tööstuslikest tegevustest nagu vaikude tootmisest. (European Commission, 1990, IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2006)



### **3.3 Formaldehüüd siseruumiõhus**

Siseruumides toimub inimestel põhiline kokkupuude formaldehüüdiga, sest saasteainet sisaldavad tooted on hoonetes sagedasti kasutatavad. Formaldehüüdi kontsentratsioon siseruumis sõltub temperatuurist, niiskusest, ventilatsioonist ja reaktiivsetest gaasidest nagu vääveldioksiid. (Lebowitz, Quackenboss, 1993)

Siseruumide formaldehüüdi saaste määrast moodustab välisõhu reostus piiratud väikese osa. Peamiselt lendub formaldehüüd ruumi otse seal asuvatest allikatest. Siseõhku eraldub formaldehüüd peamiselt karbamiidformaldehüüdvaikudest ja tubakasuitsust. Formaldehüüdi eraldub siseruumidesse ka gaasi põlemisel.

Mitte arvestades suitsetamist, võivad formaldehüüdi reostusallikad nagu puitlaastplaadid, mööbliesemed, karbamiidformaldehüüdlakid ja karbamiidformaldehüüdisolatsioonivahud täielikult domineerida üle teiste ruumisestest reostusallikate nagu tekstiilid, liimid või kosmeetika. (European Commission, 1990)

### **3.4 Formaldehüüdi mõju inimeste tervisele**

Formaldehüüd satub inimkehasse peamiselt sisse hingamise teel, lisaks sellele jõuab formaldehüüd inimkehasse läbi toidu. (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2006) Kuna formaldehüüd võib esile kutsuda allergilise dermatiidi, võib järeldada, et formaldehüüd või selle metaboliit läbib ka inimese nahka. (Maibach, 1983; IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2006)

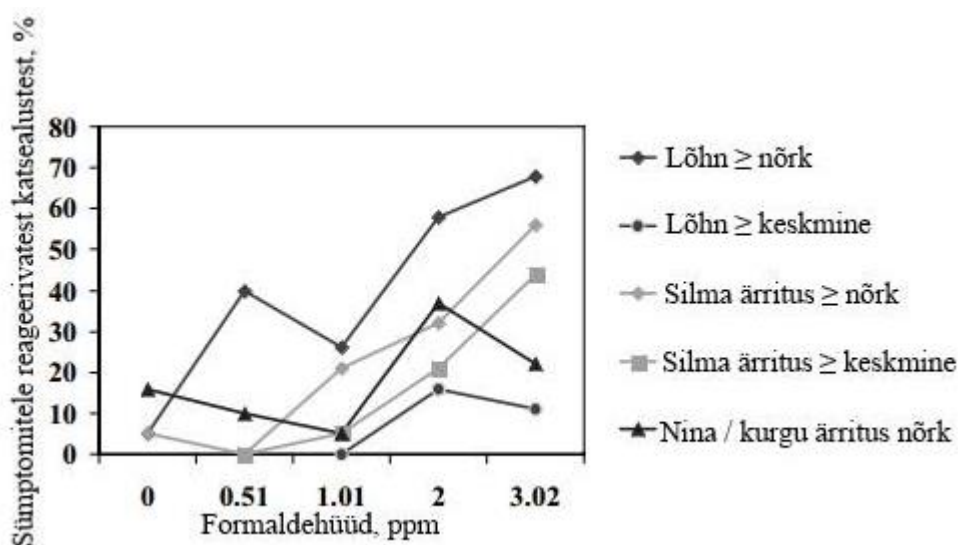
Tabelis 3.2. on toodud formaldehüüdi erinevate õhukontsentratsioonide ja kokkupuute aja-perioodide mõju inimese tervisele. Võttes vaatluse alla Eestis tööruumide formaldehüüdi piirnормi ja suurima lubatud sisalduse töökeskkonna õhus, saame vahemiku 0,6 mg/m<sup>3</sup> kuni

1,2 mg/m<sup>3</sup>. Toodud vahemikus võib formaldehüüdi lõhn olla tuntav, võib esineda kurgu-, nina- ja silmaärritust ning võib olla vähenenud eritus ninalimaskestast.

**Tabel 3.2.** Formaldehüüdi mõju inimesele (Air Quality Guidelines for Europe, 2000)

Kontsentratsioon, mg/m <sup>3</sup>	Sümptomite ilmnemise vahemik, mg/m <sup>3</sup>	Kokkupuute ajaperiood	Mõju tervisele
0,03	0,06-1,2	Korduv kokkupuude	Lõhna tuvastuslävi, 1. detsiil
0,18		Korduv kokkupuude	Lõhna tuvastuslävi, 5. detsiil
0,6		Korduv kokkupuude	Lõhna tuvastuslävi, 9. detsiil
0,1 - 3,1	0,1-3,1	Ühekordne ja korduv kokkupuude	Kurgu- ja ninaärrituslävi
0,6 - 1,2	0,01-1,9	Ühekordne ja korduv kokkupuude	Silmaärrituslävi
0,5 - 2,0	-	3 - 5 tundi	Vähenenud eritus ninalimaskestast
2,4	-	40 minutit kahel järgneval päeval	Pärast kokkupuudet (kuni 24 tundi) peavalu
2,5 - 3,7	2,5-3,7	-	Näpistav tunne silmades ja ninas
3,7	-	Ühekordne ja korduv kokkupuude	Vähenenud kopsutegevus kõrge füüsilise aktiivsuse juures
5 - 6,2	5 - 6,2	30 minutit	Pisaraeritus, talutav kuni 30 minutit
12 - 25	12-25	-	Tugev pisarate eritus kestvusega 1 tund
37 - 60	37-60	-	Kopsuödeem, kopsupõletik, eluohtlik
60 - 125	60-125	-	Surm

Inimestel on reageerimine erinevatele ärritustele laialt varieeruv. Seetõttu iseloomustatakse sisekliima parameetreid sageli testgrupi rahulolu või ärrituse kaudu protsentuaalselt. Joonisel 3.1. on toodud vastav graafik formaldehüüdi erinevatel kontsentratsioonidel.



**Joonis 3.1.** Testgrupis erinevate formaldehüüdi kontsentratsioonidel ärrituste sümptomite esinemise osakaal (Asthmatic symptoms and volatile organic compounds, formaldehyde, and carbon dioxide in dwellings, 1995 (Kulle 1993))

On leitud oluline suhe öise õhupuuduse ja formaldehüüdi ning lenduvate orgaaniliste ainete vahel. Formaldehüüd on osutunud olema genotoksiliseks erinevates mikro- ja makroorganismides. On ka epidemioloogilisi tõendeid formaldehüüdirikkas töökeskkonnas nii nina-neeluvähi kui siinusvähi vahel. (Asthmatic symptoms and volatile organic compounds, formaldehyde, and carbon dioxide in dwellings, 1995)

## 4. SISERUUMIÕHUST FORMALDEHÜÜDI EEMALDAMINE TOATAIMEDEGA

### 4.1 Ajaloost

1937. NASA *Skylab* II missiooni ajal avastati, et kosmoseparaadis kasutatud sünteetilisest materjalidest eralduvad suletud ruumiõhku lenduvad orgaanilised ühendid. Seejärel mõistsid NASA uurijad, et emissioonid suletud konstruktsioonis võivad kujutada endast tõsist ohtu inimeste tervisele ja sellega peab tegelema.

Suletud ökoloogiliste tugisüsteemide uurimise käigus hakkas NASA lähemalt uurima taimede ja nende juurestikumikroobide õhupuustuse omadusi. 1984. aastal avalikustati esimene uurimus, mis kirjeldas taimede omadusi eemaldada suletud kambri õhust lenduvaid orgaanilisi ühendeid.

Järgmise sammuna ehitati sünteetilisest materjalidest hermeetiline ja soojapidav maja ühe elaniku tarbeks, mida kutsuti „*Biohome*“. Hoone oli sisustatud täisfunktsionaalselt, seal oli kõik eluks vajalik. Enne kui hoonesse paigaldati taimed, näitasid analüüsid kõrgeid lenduvate orgaaniliste ühendite tasemeid. Majja sisenedes oli tunda tugevat põletavat tunnet silmades ja hingamisteede ebamugavust, mõlemad klassikalised haige maja sündroomi sümptomid.

Seejärel paigaldati majja ökosüsteemi loomiseks rohkelt lehtedega toataimi. Pärast taimede majja paigaldamist muutusid testitulemused märgatavalt – enamus lenduvaid orgaanilisi ühendeid oli õhust eemaldatud. Olulisema näitajana leiti, et majas viibides ei ilmnenud enam haige maja sündroomi sümptomeid. „*Biohome*“ oli esimene päriseluline katse kasutada toataimi siseruumiõhu reostuse vähendamiseks.

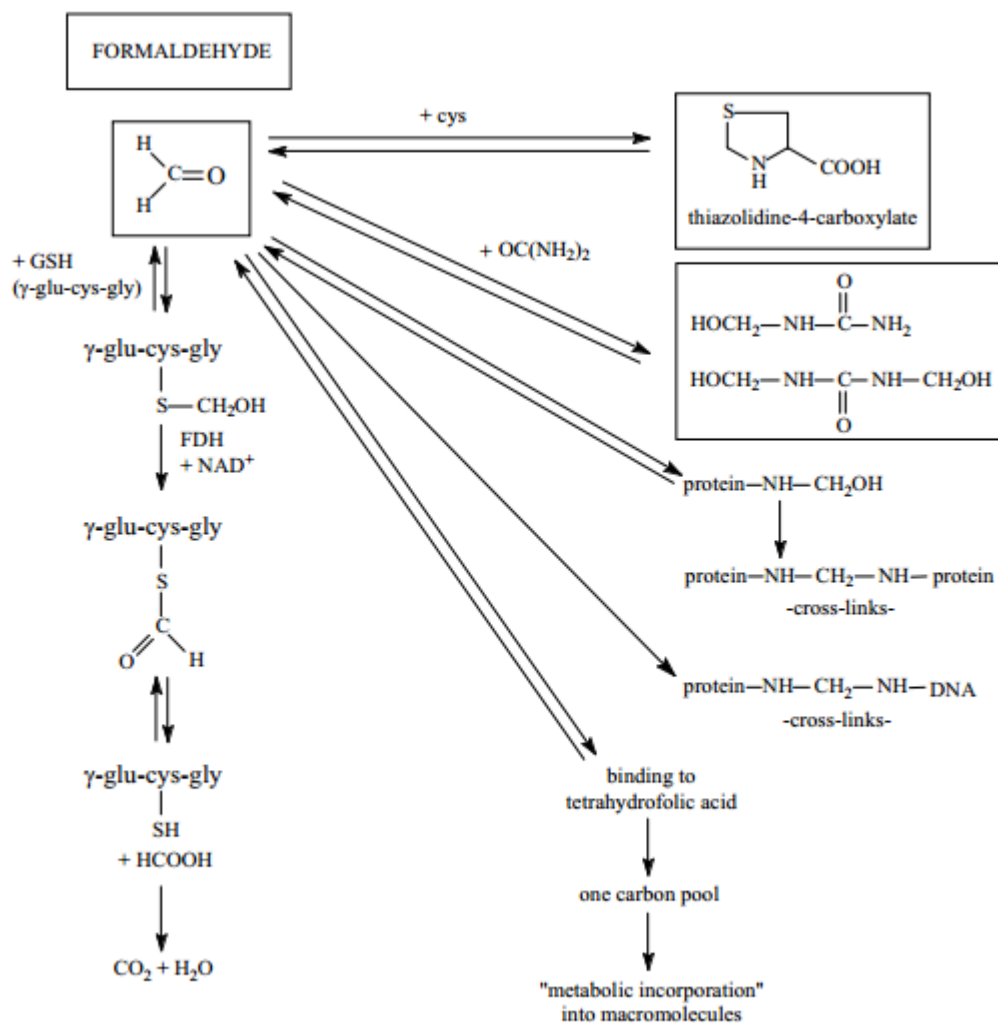
„Biohome“ testiti suletud ökosüsteemina toimimisele. Seal sees elas ühe suve vältel inimene, kelle jäätmed söögi valmistamisest, pesemisest ja muust töödeldi ümber majas endas bioloogiliste abivahenditega. Kogu suletud majas elamise vältel ei esinenud majaanikil mitte ühtegi siseõhu kvaliteediga seonduvat kaebust. (Wolverton Environmental Services, 2012)

#### **4.2 Bioloogiline toimemehhanism formaldehüüdiga**

Taimed on tuntud gaasilise formaldehüüdi absorbeerija ja metaboliseerijana. Formaldehüüd siseneb taime lehtedesse läbi õhulõhede ja kutiikula ja seda pigem läbi lehe ülemise külje ja läbi nooremate lehtede. (Giese et al., 1994; Ugrekhelidze et al., 1997). Kui aine on absorbeerunud läbi lehtede, siis tavaliselt siseneb see Calvini tsükliks pärast kaheastmelist ensümaatilist oksüdatsiooni süsihappegaasiks. On täheldatud, et protsess toimub päevavalguses viis korda kiiremini kui pimedas. (Schmitz, 1995).

Osa formaldehüüdist töödeldakse ümber S-metüülmetioniiniks ja transporditakse floemi kaudu mitmetesse organitesse, näiteks seemnetesse ja juurtesse. (Hanson and Roje, 2001).

Inimkehasse sisse hingamise teel sattunud formaldehüüdiga toimuvaid protsesse kirjeldab Joonis 4.1. Formaldehüüdiga toimuvaid protsesse on mitmeid ning pole täpselt ette ennustatav, millised protsessid ja millistel tingimustel kindlalt toimuvad.



**Joonis 4.1.** Formaldehüüdi bioloogilised reaktsioonid ja metabolism (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2006 (Bolt 1987))

### 4.3 Varasemate katsete meetodika

#### 4.3.1 Kambrikatsed

1984. aasta Wolverton, B.C., McDonald, R. C., Watkins, Jr. E. A esimeses taimedega kambrikatses avaldatud uuringust saati on toimunud vähe muutuseid. Mainitud katses kasutati

kambrina kuubikukujulist pleksiklaasist kuubikut, mille serva pikkus oli 73,3 cm. Pleksiklaas ise oli 12,7 mm paksune. Kuubiku kaas oli eemaldatav ja õhutiheduse tagasid kummitihendid. Läbi kambri oli ühendatud vasktoru, kust läbi ringles vesi temperatuuriga 20 °C. Kasutati kunstlikku taimekasvatust lampi valgustusega 3500 lx, tuled oli sisse lülitatud kogu katseperioodi vältel. Kambrisse paigaldati patareipõhine ventilaator, mis hoidis kambrisisesel õhu ringluses.

Kambriõhku sisestati formaldehüüdi pumbates välisõhku läbi 37 % formaliini ja seejärel kambrisse. Sisestatud formaldehüüdi kogust kontrolliti pumpamise ajaga. Seejärel lasti kambris viie minuti jooksul õhul seguneda. Õhuproovid võeti 6 ja 24 tundi pärast saasteaine sisestamist. Enne katseid taimedega kontrolliti kambri püsivust õhupüsivusele testides 24 tunni järel, kas õhus sisalduv formaldehüüdi kogus on ühtlane.

Girman, Philips ja Levin (2009) on välja toonud kambrikatsete meetodikaalased probleemid. Kambrikatsed on staatilised katsed, kus saasteaine süstitakse kambrisse ja seejärel mõõdetakse saasteaine kontsentratsiooni vähenemist ajas. See mudel ei jäljenda saasteainete, eriti formaldehüüdi käitumist, mis emiteerub õhukeskkonda pidevalt. Saasteaine kontsentratsiooni vähenemine oleks sel juhul tunduvalt madalam. Katsetulemusi esitatakse põhiliselt protsentides, kuid see lähenemine ei anna võrreldavaid tulemusi. Rakendatavust reaalsesse olukorda saaks hinnata tulemuste kaudu, mis toovad välja eemaldatud saasteaine koguse massina ühes tunnis ühe taime kohta. Nii on võimalik hinnata, kas efektiivsem on õhu puhastamisel kasutada ventilatsiooni, toataimi, filtreid või absorbereid. Samuti peaks märkima, et kasutatud saasteaine kontsentratsioonid on tunduvalt kõrgemad kui reaalses olukorras esineb. Kasutades kambris ventilaatoreid suurendatakse saasteaine ladestumist kambri pindadele.

#### **4.3.2 Katsed elu- ja töökeskkonnas**

Tihti on ruumiõhu parameetrid muutuvad ja see on tingitud mitte ainult ruumis hetkel tingitud oludest, vaid ka seal eelnevalt toimunud tegevustest ja tingimustest. Seetõttu peavad õhu

parameetrid ruumis olema säilitatud ühtlastena piisavalt pika aja jooksul, et määrata seal sisalduva formaldehüüdi kontsentratsiooni. Veelgi enam, kui soovitakse võrrelda erinevate materjalide omadusi või soovitakse võrdlust standardiga, peavad olema loodud ühtlaste tingimustega keskkonnad, mis sarnaneksid võimalikult palju tegelikult esinevatele olukordadele. (European Commission, 1989)

Seni ei ole määratud elu- ja töökeskkonnas taimedega lenduvate orgaaniliste ühendite vähendamise katsetoodikat. Tänapäevani läbi viidud uurimused on aset leidnud nii kontori- kui eluruumides, kuid hoonetega seotud täpseid tingimusi pole kirjeldatud.

Kuigi ventilatsioon domineerib saasteaine eemalduse tegurina pea kõikides tegelikes hoonetes, ei tooda seni läbi viidud uurimustes hoone ventilatsioonimäära või õhulekkearve katsetel välja. Üldiselt pole läbi viidud katsetes toataimede abil märgatavat efekti lenduvate orgaaniliste ainete hulga vähendamisel ruumiõhust. (Girman, Phillips, Levin, 2009)

Ainult Woodi ja teiste uuringus on lenduvate orgaaniliste ühendite kogukontsentratsiooni vähenemine toataimede mõjul märgatav, kuigi seda ainult siis, kui kontsentratsioon on üle 100 ppb. Kuigi samas uuringus ei toonud taimede arvu kahekordistamine oodatud efektiivsuse tõusu. Samuti ei vähenenud individuaalsete lenduvate orgaaniliste ühendite kontsentratsioonid. Ilmnunud probleemidest võib eeldada, et katsete jooksul toimunud kontsentratsioonimuutused on tingitud muutustest ventilatsioonis. Pidades seda silmas, tuleb ka märkida, et süsihappegaasi kontsentratsioonid varieerusid 285 ppm kuni 420 ppm, välisõhu süsihappegaasi tase oli seejuures määramata. Süsihappegaasi tase viitab kõrgele ventilatsioonimäärale või vähesele ruumis viibivate isikute arvule või mõlemat samal ajal. Samuti on tõenäoline, et kogu lenduvate orgaaniliste ühendite kontsentratsiooni adekvaatseks määramiseks ei piisa viiest katseminutist nädalas. (Girman, Phillips, Levin, 2009)



#### 4.4 Taime juurestiku ja maapealse osa efektiivsuse võrdlus

Teatud mikroorganismid, mida leidub toataimede kasvusubstraadis, osalevad samuti lenduvate orgaaniliste ühendite eemalduses ruumiõhust. Seda, et saasteaine kontsentratsioon õhust väheneb ainuüksi substraadi mõjul, on näidanud nii Godish ja Guindon (1989), Wolverton jt (1993) (Tabel 4.2. ja Tabel 4.3.) ja Wood jt (2002). Samuti eemaldavad taimed lenduvaid orgaanilisi ühendeid pimedas, katsetega on seda tõestanud Orwell jt (2006), Wolverton jt (1989) ja Yoo jt (2006). Mainitud Orwelli ja Wolvertoni uurimustes selgus ka, et taimede omadus siduda orgaanilisi lenduvaid ühendeid paranes ajas kestva saasteallika olemasolul.

**Tabel 4.2.** Istutuspinnase ja selle mikroosakeste formaldehüüdi eemaldus õhust (Wolverton, Wolverton, 1993)

Istutuspinnase tüüp	Eemaldatud formaldehüüdi kogus, µg/h	Keskmine temperatuur, °C	Substraadi bakteriaalne kogum, cfu/g
Steriliseeritud pinnas	<0,05	25,8	0
Steriliseerimata pinnas	188,0	25,0	235
Steriliseerimata pinnas kaetud steriliseeritud liivaga	<0,05	26,8	0 (ainult liiv)

**Tabel 4.3.** Formaldehüüdi eemaldus õhust katmata istutussubstraadi ja steriliseeritud liivaga kaetud istutussubstraadiga (Wolverton, Wolverton, 1993)

Taimeliik	Substraat kaetud/ katmata steriliseeritud liivaga	Õhust eemaldatud formaldehüüdi kogus, µg/h	Formaldehüüdi eemaldus pinnase mikroobidega, %	Formaldehüüdi eemaldus lehtedega, %	Keskmine temperatuur, °C
<i>Aglaonema</i> „Silver Queen“	Katmata	564	67	33	25,3
	Kaetud	188			
<i>Dieffenbachia</i> „Exotica Compacta“	Katmata	754	63	37	25,4
	Kaetud	281			
<i>Nephrolepis exaltata</i> „Bostoniensis“	Katmata	1027	60	40	25,3
	Kaetud	409			

Teatud hulk pinnase mikroorganisme on võimelised lagundama inimestele mürgiseid kemikaale (Darlington et al., 2000; Wolverton et al., 1989), kuigi paljud mikroobid, mida on otseselt seostatud lenduvate orgaaniliste ühendite eemaldamisega, pole veel identifitseeritud. Taimed eritavad juuretsooni märgatavaid koguseid süsinikku, mis stimuleerib mikroorganismide arengut juurte ümber. (Krafczyk et al., 1984; Schwab et al., 1998)

Samuti on fülloosfäär koloniseeritud mitmekülgse mikroorganismide hulgaga (Mercier and Lindow, 2000). Kempeneer et al. (2004) raporteeris, et inokuleerides lehepinda mikroorganismidega, suurenes lenduva tolueni eraldamise kiirus õhust. Seetõttu, risosfäärilised ja fülloosfäärilised mikroorganismid, ja ka õhupiludest tingitud absorbeerumine, tekitavad biofiltri lenduvate orgaaniliste ühendite eemaldamiseks siseruumi õhust. Järeldusena on toataimede kasutamine potentsiaalselt toimiv õhu fütostaastuseks kodudes ja kontorites. (Darlington et

al., 1998; Giese et al., 1994; Kempeneer et al., 2004; Salt et al., 1998; Wolverton et al., 1989; Wood et al., 2002)

Teadustöö siseruumiõhu fütotaastuse vallas on fokuseeritud õhupilude kaudu absorbeerunud saasteaine eemaldamisele, kuigi on saanud selgeks, et juurestik on tähtis panustaja lenduvate orgaaniliste ühendite eemaldamisel ruumiõhust. (Efficiency of Volatile Formaldehyde Removal by Indoor Plants: Contribution of Aerial Plant Parts versus the Root Zone, 2008)

Viidi läbi uuring, kus võrreldi taime maapealse osa ja juurestiku panust õhust formaldehüüdi eemaldamisel kahe dekoratiivtoataime näitel. Uurimuse all olevateks taimedeks olid Jaapani fatsia, *Fatsia japonica* ja Benseo viigipuu, *Ficus benjamina*. Taimi jälgiti nii päeval kui öösel. Formaldehüüdi eemaldamise mahtu kogu taime, maapealse osa ja juurestiku kohta määrati soovitud piirkonna eksponeerimisega gaasilisele formaldehüüdile. Õhutihedas kambris ruumalaga üks m<sup>3</sup> oli formaldehüüdi kontsentratsioon 2 µl/l. Kamber oli valmistatud formaldehüüdi suhtes inertsetest materjalidest. Algselt oli formaldehüüdi eemaldus mõlemal taimel kiire, kuid saasteaine eemaldamise poolajad olid Jaapani fatsia puhul 96 minutit ja Benseo viigipuul 123 minutit.

Mõlema liigi puhul täheldati, et taime maapealsed osad eemaldasid formaldehüüdi päeval, kuid väga vähe öösel. Juurestik aga eemaldas õhust märkimisväärse koguse formaldehüüdi nii öösel kui ka päeval. Mõlema taimeliigi puhul täheldati taime maapealse osa ja juurestiku efektiivsuse suhet samasugusena, 1:1 päeval ja 1:11 öösel. Juurestiku efektiivsus formaldehüüdi eemaldamisel seisnes põhiliselt mikroorganismide ja juurte koosmõjul (90 %) ja ainult 10 % moodustus tänu kasvavale meediumile. Graafiliselt on tulemused näha Joonisel 4.2. Tulemused viitavad sellele, et juurestik on põhiline panustaja formaldehüüdi eemaldamisel õhust. Juurestiku ja selles paikava mikrofloora parem mõistmine ja edasine uurimine aitab kaasa fütotaastuse efektiivsuse tõstmisele. (Efficiency of Volatile Formaldehyde Removal by Indoor Plants: Contribution of Aerial Plant Parts versus the Root Zone, 2008)

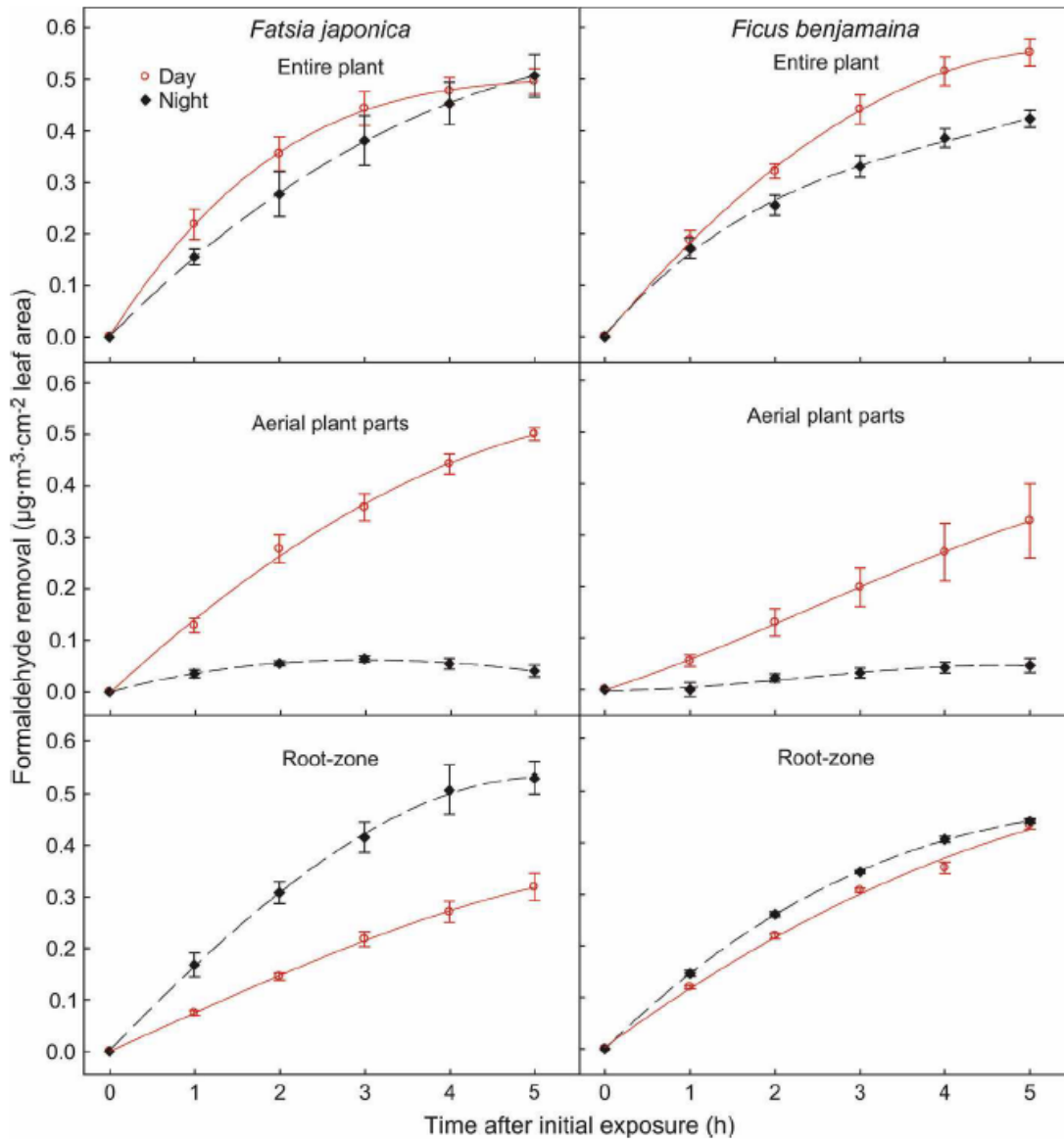
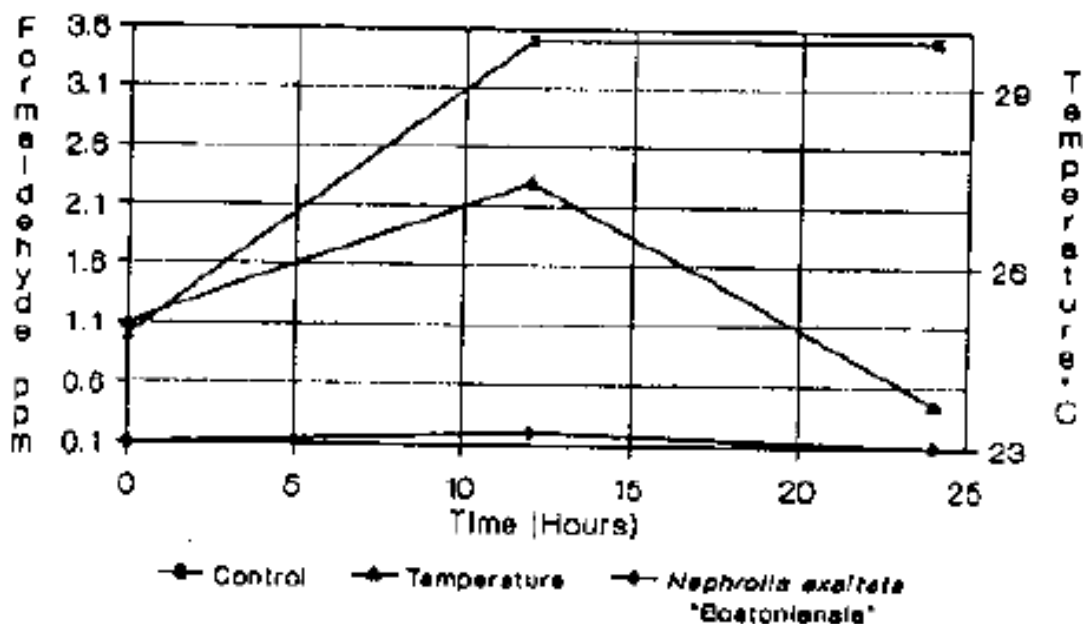


Fig. 1. Formaldehyde removal by potted *Fatsia japonica* and *Ficus benjamina* plants when exposed to formaldehyde gas ( $2 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ ) for 5 h during the day ( $\circ$ ) and night ( $\blacklozenge$ ): entire potted plant (top); aerial plant parts (middle); and the root-zone (bottom). Vertical bars denote the SE.

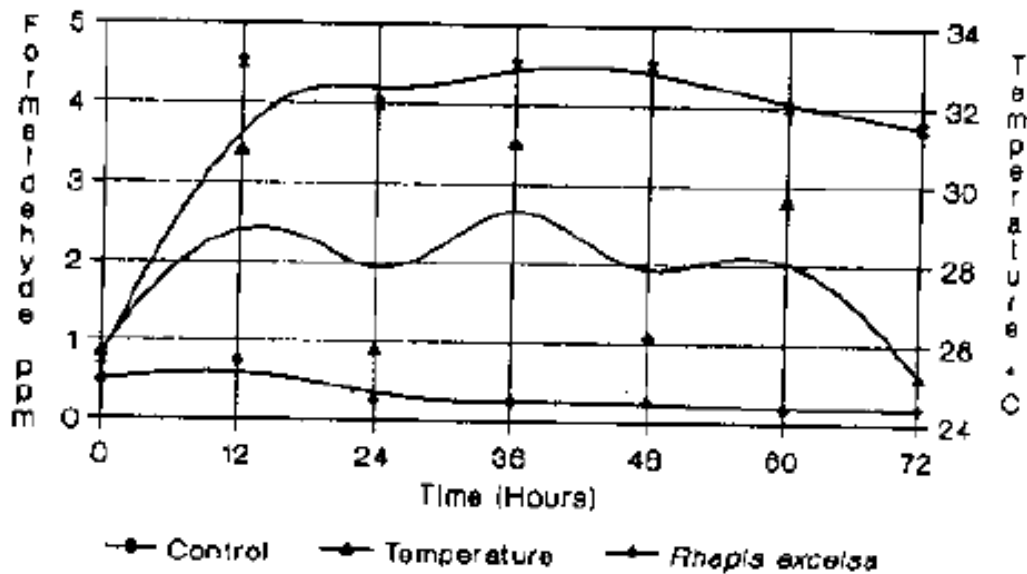
**Joonis 4.2.** Formaldehüüdi eemaldus õhust *Fatsia japonica* ja *Ficus benjamina* poolt päeval ja öösel (Efficiency of Volatile Formaldehyde Removal by Indoor Plants: Contribution of Aerial Plant Parts versus the Root Zone, 2008)

#### 4.5 Kestva saasteaine mõju taime efektiivsusele ruumiõhust saasteaine eemaldamisel

B. C. Wolverton ja J. D. Wolvertoni (1993) uuringus, leiti, et *Rhapis excelsa*, *Lady palm*, ja *Nephrolepis exalta*, *Boston fern*, mitte ainult ei eemalda puitlaastplaadist õhku pidevalt liisanduvat formaldehüüdi, vaid ka, et taimedega kaasnevad mikroorganismid kohanduvad olukorraga ja suudavad aja jooksul vajadusel rohkem formaldehüüdi lagundada. Joonisel 4.3. on toodud formaldehüüdi kontsentratsioon suletud kambris puitlaastplaadiga ilma ja koos *Nephrolepis exalta*'ga. Joonisel 4.4 on toodud samad näitajad *Rhapis excelsa*'ga.



**Joonis 4.3.** Formaldehüüdi kontsentratsioon suletud kambris puitlaastplaadiga ilma ja koos *Nephrolepis exalta*'ga (Wolverton, Wolverton, 1993)



**Joonis 4.4.** Formaldehüüdi kontsentratsioon suletud kambri puitlaastplaadiga ilma ja koos *Rhapis excelsa*'ga (Wolverton, Wolverton, 1993)

Mõlemalt jooniselt on näha, et pärast teatud aja möödumist suureneb vahe ainult puitlaastplaadiga kambri ja puitlaastplaadi ja taimega kambri formaldehüüdi kontsentratsiooni vahel. See tähendab, et ajas kasvab taime omadus eemaldada õhust formaldehüüdi. Leitud omadus lubab oletada, et formaldehüüdi pideval lisandumisel ruumiõhku, nagu toimub ehitusmaterjalidest lenduvate ühenditega, pareneb toataimede omadus eemaldada õhust reostusainet. Samas on katsetes toodud formaldehüüdi kogused märkimisväärselt kõrged ja kahtluse alla jääb, kas sama efekt on saavutatav ka elu- ja töökeskkondades esinevate kontsentratsioonidega.

## 5. KATSE

### 5.1 Katse eesmärk

Katse käigus testitakse, kas ja millisel määral eemaldavad õhust formaldehüüdi toataimed sulgja nõelkõie, *epipremnum pinnatum* ja tups-rohtliilia, *chlorophytum variegatum* näitel.

Samuti on katse eesmärgiks Wolverton ja Wolverton, 1993 uuringu eeskujust välja selgitada, kas ja millisel määral muutub valitud taimede võime eemaldada ruumiõhust formaldehüüdi ajas. Saasteaine kontsentratsioon kambris matkib töökeskkonnas lubatud maksimaalset normi.

### 5.2 Katse meetodika

Katsed viiakse läbi kahe 1 m<sup>3</sup> suuruse kilest kambriga, mõlema sisse on paigutatud üks toataim. Katseid viiakse läbi kokku viiel päeval. Iga päeva alguses süstitakse kambrisse 0,6 ml 1%-list formaldehüüdi lahust, mis loob iga päeva lähtekontsentratsiooniks kambris ligikaudu 60 mg/m<sup>3</sup>. Lähtekontsentratsioon on valitud EV töökeskkonna piirnormi 60 mg/m<sup>3</sup> järgi.

Viis minutit pärast formaldehüüdi sisestamist võetakse kambriõhust esimene proov, mis näitab katsepäeva kõrgeimat kontsentratsiooni. Päeva jooksul toimub veel kaks katset, mõlema katse vaheline aeg on 2 tundi ja 20 minutit. Proovid võetakse vähemalt 12 minuti jooksul paralleelselt õhupumpadega, mille õhuvoolu maht on 4-5 l/min ning mille täpne õhuvooluhulk määratakse vahetult enne ja pärast proov pumpamist. Proovis sisalduva formaldehüüdi koguse ja kambrist väljapumbatava õhu kiiruse ja pumpamise aja kaudu arvutatakse kontsentratsioon valemi 5.1 põhjal. Alates teisest katsepäevast võetakse esimesed õhuproovid enne formaldehüüdi kambrisse süstimist. Eeldusel, et need proovid on lahjema kontsentratsiooniga, pikendatakse vastavalt proovi võtmise aega.

$$\rho = \frac{m}{t \cdot v}, \quad (5.1.)$$

kus

m – määratud formaldehüüdi mass proovis, mg;

t – pumbaga proovi võtmise aeg, min;

v – pumba õhuvooluhulk, m<sup>3</sup>/min.

Katsetulemuste täpsuse kinnitamiseks võetakse proovid kahe paralleelproovina ning tulemused esitatakse paralleelproovide keskmisena Igal päeval valmistatakse esimese proovi võtu ajal standardlahused, mida määratakse koos esimeste proovidega. Standardlahused valmistatakse absorptsioonilahusest ja formaldehüüdi vesilahusest. Lahused valmistatakse formaldehüüdi kontsentratsioonidega: 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10 µg/10 ml.

Standardlahuste lugemist spektrofotomeetrilt koostatakse tabel ning sirge võrrand (lisa B). Abstsissiks on formaldehüüdi kontsentratsioon ning ordinaadiks on lugem spektrofotomeetrilt. Saadud joone tõus on tegur, millega läbi korrutades proovi lugem spektrofotomeetrilt, saadakse formaldehüüdi sisaldus massina proovis.

Proove soojendatakse 15 minutit 40±1 °C juures. Seejärel lastakse proovidel jahtuda ruumitemperatuuril ühe tunni jagu kaitstuna valguse eest. Absorbeerunud formaldehüüdi kogus määratakse 412 nm juures kasutades spektrofotomeetrit. Meetod on enimkasutatav formaldehüüdi kontsentratsiooni määramiseks õhus, sellega on saavutatav 0.01–0.03 mg/m<sup>3</sup> täpsus. Koos proovidega määratakse spektrofotomeetriga standardlahuste väärtused. (Wood-based panels – Determination of formaldehyde release- Part 1: Formaldehyde emissioon by the chamber method, 2004)



Katsete puhul on uudseks aspektiks kasutada kambrina elastset membraani, proovide võtul väheneb kambri ruumala ja värske õhu pealevoolu ei toimu. Seetõttu ei toimu ka saasteaine kontsentratsiooni muutust värske õhu lisandumisest.

### **5.3 Katses kasutatavad vahendid ja taimed**

#### **5.3.1 Katsevahendid**

Katsete läbiviimisel kasutati kaht kasvuhoonekilest valmistatud kambrit. Mõlema kambri maht oli üks kuupmeeter, seejuures kambrite kuju oli kuubikuline külje pikkuseks üks meeter. Valitud kile oli läbipaistev tagamaks taimedele päevavalguse juurdepääs, kile paksuseks oli 60 µm. Kilekambrid valmistati võimalikult väheste liitekohtadega. Servade liitmiseks kasutati termoplastilist liimi. Pärast liimimist sulatati kile liitmisvarud kokku tagamaks õhulekkekindlad liited.

Mõlemale kambrile oli paigaldatud kolm läbiviiguvoolikut: üks saasteaine sisestusvoolik ja kaks proovivõtuvoolikut. Kõik voolikud olid läbipaistvast elastsest plastikmaterjalist. Saasteaine sisestusvooliku sisediameeter oli viis mm, vooliku välimisest otsast viie cm kaugusele paigaldati kahe cm pikkune avatud pooridega materjali tükk vältimaks voolikusse süstitava formaldehüüdi tilgastumist. Proovivõtuvoolikute sisediameeter oli 9 mm, mõlema pikkuseks 50 cm.

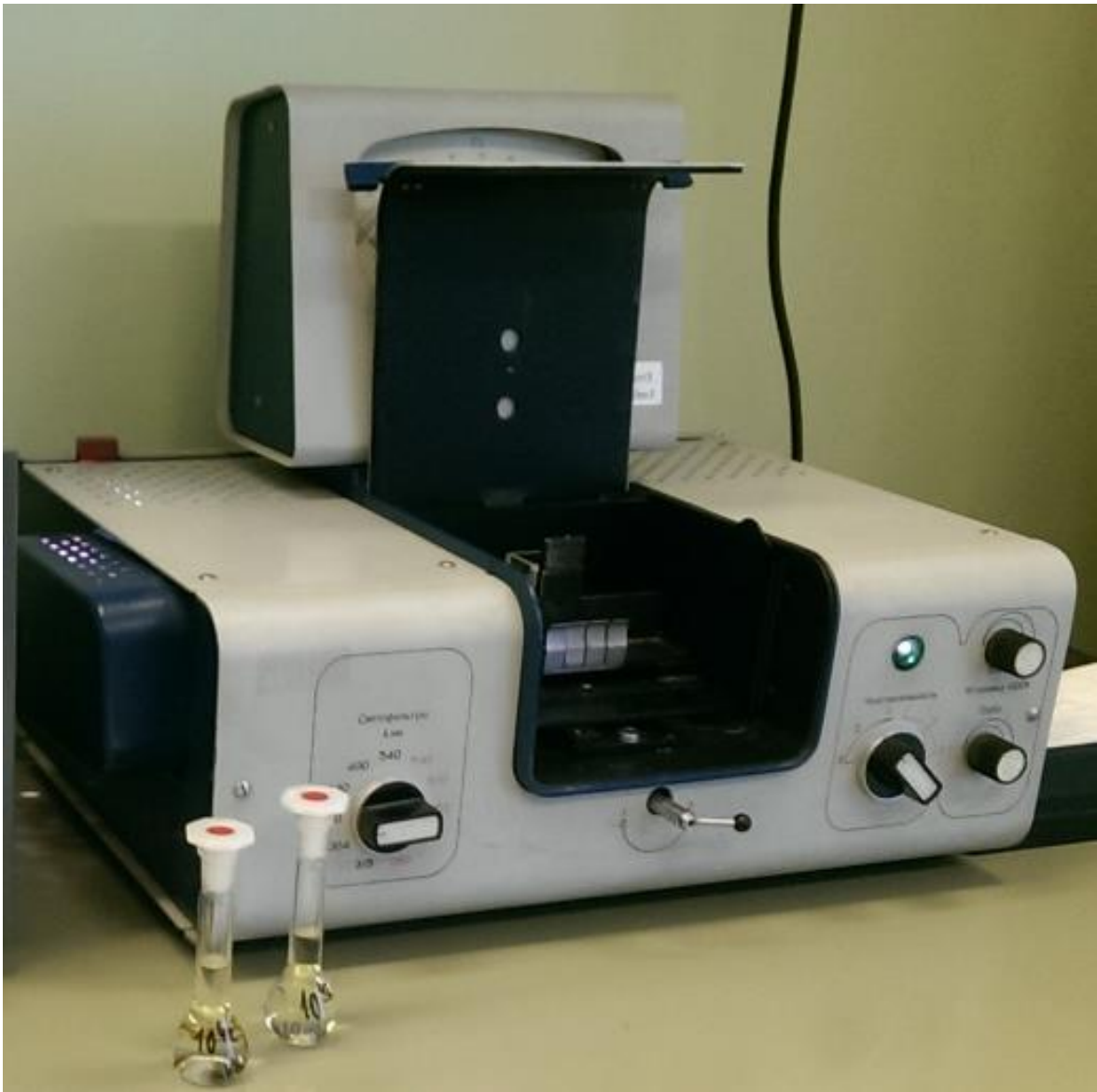
Kambri sisse paigaldati polüvinüülkloriid torudest valmistatud kuubikujuline karkass servapikkusega 40 cm. Karkassi eesmärgiks oli pakkuda läbiviiguvoolikele ja ventilaatoritele fikseeritud ja mõlemale kambrile sama asukohaga kinnituspunkti. Karkassi külge kinnitatud sisestus- ja sissevõtutorude otsad paigutati nii, et oleks tagatud saasteaine sisestamisel selle ühtlane jaotumine kambris ja proovivõttudel ühtlane tulemus. Raami eesmärgiks oli ka takistada õhu väljapumpamisel kile langemist taimele.

Raamide külge kinnitati 12 V ventilaatorid, mis töötasid kogu katseperioodi vältel, mitte ainult proovivõttudel, ja mis hoidsid kambrisest õhku pidevas ringluses. Ventilaatorid paigaldati mõlemasse kambrisse keskele raami külge suunates õhuvoolu vertikaalselt üles. Raamide alla asetati katsetaimed.

Saasteaine sisestamisel pumbati kambrisse õhku pumbaga, mille õhuvooluhulk oli kaks liitrit minutis. Proovivõttudel kasutati kahte pumpa, mille õhuvooluhulk oli neli kuni viis liitrit minutis. Pumpade õhuvooluhulka kontrolliti igale proovivõtule eelnevalt ja järgnevalt tulemuse täpsuse kontrolliks. Proovide kestusaega mõõdeti stopperkellaga.

Mõlemad paralleelsed õhuproovid pumbati läbi kahe 30 ml absorptsioonivedeliku mahutavusega absorptsioonikolvi. Paaris kolvid olid väljatõmbevoolikuga, omavahel ja pumbaga ühendatud jadamisi kahe sentimeetri pikkuste kummivoolikujuppidega.

Proovilahuste soojendamisel kasutati katseklaase, elektripliiti ja soojendusnõud. Proovide jahutamisel paigutati need statiivi. Lahjendatud proovid valmistati mõõtekolvidesse. Lahuste valmistamisel kasutati automaatpipetti. Proovilahuseid testiti spektrofotomeetriga (Joonis 5.1.) lainepikkusel 412 nm.



**Joonis 5.1.** Proovide määramisel kasutatud spektrofotomeeter proove sisaldavate mõõtkolvidega

### 5.3.2 Katses kasutatavad taimed

Katsealusteks taimedeks valiti sulgjas nõelkõis, *epipremnum pinnatum* ja tups-rohtliilia, *chlorophytum variegatum* nende sageda esinemise tõttu kodumajapidamistes ja kontorites. Taimed on vähenõudlikud ja lihtsalt hooldatavad. Taimi on enne katseid hoitud koos samades elutoa ruumitingimustes ja sama kastmisrežiimiga kaks kuud enne katsete toimumist.

Kastmine toimus iga seitsme päeva järel toasooja veega küllastumiseni liigvee dreenimisega. Mõlema taime ligikaudne vanus katsete läbiviimise ajal oli üks aasta.

Pärast katsete läbiviimist mõõdeti taimede maapealse osa ja maa-aluse osa massid. Juurestiku massi mõõtmiseks puhastati see eelnevalt harja kasutades ettevaatlikult mullasegust. Lillepottide mahud leiti määrates suletud lillepoti valatud vee kogus. Mõlemad lillepotid olid valmistatud plastikust. Tabelis 5.1. on toodud tupsrohtliiliat ja nõelkõit iseloomustavad massiandmed. Toodud massid on mõõdetud kohe pärast katsete läbiviimist ilma eelneva kastmiseta. Vaatluse all olevad taimed on erinevad juurestiku ja maapealse osa massisuhte osas. Tups-rohtliilial on lihavad juured ja peened õhukesed lehed, seevastu nõelkõie lehed ja varred on tugevad ja massiivsed, juured on võrreldes tups-rohtliiliaga niitjamad.

**Tabel 5.1.** Katsetaimede andmed

Parameeter	Tups-rohtliilia	Sulgjas nõelkõis
Lillepoti maht, ml	720	1350
Maapealse osa mass, g	61	145
Juurestiku mass, g	312	175
Taime kogumass, g	373	320

Tupsrohtliilia (Joonis 5.2.) kuulub liilialiste, *liliaceae* sugukonda ja rohtliiliate, *chlorophytum* perekonda. Esimest korda tutvustati taime 1850. aastal, aianduskultuuris hakkas tups-rohtliilia levima 19. sajandi keskpaigus. Tups-rohtliilia on tuntud vähenõudlik toataim. Looduses on see Lõuna-Aafrika igihaljastes lähistroopilistes mussoonmetsades oluline osa rohurindes, mõnikord esineb seda ka epifüüdina puuokstel ja koorepragudes. (Stenman ja Wennström, 2008; Roost, 1995)



**Joonis 5.2.** Katses kasutatud tups-rohtliilia

Lehed on tups-rohtliilial kitsad, joonjad, tumerohelised, kultuurvormidel ka valgete pikitriipudega, 20-40 cm pikkused ja kuni paari sentimeetri laiused. Õisikuvarb on nõtkes, 30-60 cm, harva ka ühe meetri pikkune. Õied on valged ja tähekujulised. Õiepungade kõrval on õisikuvarval ka kasvupungi, millest arenevad tütaraimed. Tütaraimede kasvades muutuvad need raskeks, õisikuvarb langeb maale, tütaraim juurdub ning taim paljundab populatsiooni kiirelt. Tütaraimedele kasvavad juba õhus olles juured alla, mõnel juhul arenevad neile enda tütaraimed enne pinnasega juurdumist. (Roost, 1995) Sel juhul võib tütaraimet lihtsalt lahti murda ja otse mulda istutada. (Stenman ja Wennström, 2008)

Rothliiliad lepivad kergelt talviste madalamate toatemperatuuridega ja ka keskküttega, mis üldiselt taimedele soodus pole. Taim eelistab toas valgemat kohta, kuid kasvab ka põhjapoolsel aknal. Liiga pimedas ja soojas ruumis jääb taim nõrgaks. Suviti sobib taimele rikkalik kastmisrežiim, talvel mõõdukas. Taimel on lihavad juured, mis aitavad üle elada põuasemaid perioode. Ümberistutust soovib taim igal kevadel mõõduka suurusega potti ja toitainete rikkasse mulda. Tütartaimi võib istutada pottidesse aasta ringi, kuigi eelistatum on kevad. Rothliiliad ei ole pikaealised taimed, enamasti muutub taim juba paari-kolme aastaga kahvatukollaseks. (Roost, 1995) Hoolimata aastaajast kasvavad taimed toitainete rikkas mullas aastaringselt. (Stenman ja Wennström, 2008)

Sulgjas nõelkõis (Joonis 5.3.) kuulub võhaliste (*aracae*) sugukonda ja nõelkõite (*epipremum*) perekonda. Kokku tuntakse kaheksat liiki nõelkõit, mis looduslikult kasvavad Aasias ja Okeaanias. Looduses elavad need ronivate liaanidena liikudes mööda tüve juurtega edasi. Lehed on südamekujulised ja nahkjad, õitsevad toas väga harva. Sulgjas nõelkõis *Epipremnum pinnatum* on täpsemalt pärit Saalomoni saarelt. Looduses on taimel suured sakilised lehed, mis tubastes tingimustes jäävad väikseks ja sakke nähtavalt välja ei kasvata. (Stenman ja Wennström, 2008)



**Joonis 5.3.** Sulgja nõelkõie oks

Sulgja nõelkõie näol on tegu vastupidavate toataimedega, mis taluvad nii varjulist kui päikselist keskkonda. Liiga tugeva otsese päikesevalgusega hakkavad lehed pleekima. Lihavad ja nahkjad lehed elavad üle ka pinnase läbikuivamise. Enne kastmist ongi soovitatud potimullal läbi kuivada. Paljundada on kerge pistikutega, mis ajavad juured alla nii vees kui mullas. Soovituslik on palju väikseid pistikuid istutada ühte potti, sest need on väheharunevad. (Stenman ja Wennström, 2008)

## **5.4 Tulemused**

### **5.4.1 Katse käik**

Katsed viidi läbi ajavahemikel 04.03.2015 – 07.03.2015 ja 09.03.2015 – 10.03.2015 Terviseameti Tartu laboris. Katsetele eelneval päeval paigaldati taimed katsekambritesse, ühte tups-rohtliilia ja teise sulgjas nõelkõis. Kambrid suleti õhutihedalt ja pumbati õhku täis saasteainet lisamata. Käivitati mõlema kambri ventilaatorid, mis hoidsid kambrisisesse õhu pidevas ringluses. Kilest katsekambrid paigutati laboriruumidesse kõrvuti samadesse tingimustesse, katseperioodi keskmine temperatuur oli 26 °C ja proovivõtuaegadel naturaalse valgustusega 550 kuni 1500 lx.

Katsealuseid taimi kasteti enne teste viimati neli päeva enne katseid, 01.03.2015. Taimi kasteti toatemperatuuril kraaniveega küllastumiseni ja liigvesi lasti ära drenida. Kambrisse paigutati taimed plastikust potiga, ilma potialuseta. Tups-rohtliilia 720 ml mahtuvusega potis ja sulgjas nõelkõis 1350 ml ruumalaga potis.

Esimesel katsepäeval, 04.03.2015, alustati katsepäeva esimesse kambrisse saasteaine süstimisega. Kambrisse number üks sissepuhkevooliku otsa süstiti 0,6 ml formaldehüüdi üheprotsendilist lahust. Vooliku otsa kinnitati seejärel õhupump, mis poole tunni jooksul puhus värsket õhku läbi vooliku ja sellesse paigaldatud poorse materjali, kust formaldehüüd

segunes sisestatava õhuga. Seejärel korrati sama protsessi teise kambriga. Esimese ja teise kambri protseduuride ajavahe oli kõikidel katsepäevadel 30 minutit.

Pärast formaldehüüdi sisestamise lõpetamist lasti kambrisisesel õhul veel viis minutit seguneda ning seejärel alustati proovivõtuga. Õhku pumbati kambrist välja läbi kahe absorberi (Joonis 5.4.) vähemalt 12 minuti jooksul, protsessi kirjeldav foto on kujutatud Joonisel 5.4.



**Joonis 5.4.** Proovid vahetult pärast katse lõppu. Esimesena pumbatakse õhk läbi vasakpoolse absorberi. Lahuse kollakam värvus viitab kõrgemale formaldehüüdi sisaldusele





**Joonis 5.5.** Proovivõtmise protsess. Esiplaanil õhupumbad, ühendatud absorberitega

Saadud proovid valati absorberitest ümber katseklaasidesse ning need asetati statiiviga keedunõusse, kus proove soojendati 40 °C juures 15 minuti jooksul. Seejärel tõsteti katseklaasid teisele statiivile ümber ning asetati valguse eest kaitstuna jahtuma. Järgnevate proovidega toimiti samamoodi.

Esimese proovi võtmise ajal valmistati sama absorptsioonilahust kasutades katseklaasidesse standardlahused ning neid soojendati ja jahutati toatemperatuurini nagu proovilahuseidki. Standardlahuseid hoiti kuni määramiseni pimedas.

Teine proov esimesest kambrist võeti 2 tundi ja 20 minutit pärast esimese proovi võttu. Kolmas proov võeti 4 tundi ja 40 minutit pärast esimese proovi võttu.

Esimese katsepäeva järel selgus proovitulemustest, et tups-rohtliilia kambris on planeerimata lisa saasteallikas, mis tingib eeldatust ligi kuus korda kõrgemat formaldehüüdi kontsentratsiooni. Hilisema vaatluse käigus järeldati, et formaldehüüdiga oli saastunud kambri-sisene raam, millega oli varasemalt eelkatseid tehtud kõrgemate formaldehüüdi kontsentratsioonidega. Vaatamata planeerimata situatsioonile, otsustati olukorda mitte sekkuda ja vaadelda katsetega formaldehüüdi kontsentratsiooni muutust kambris, kus esineb kestav saasteaine eraldumine kambriõhku. Tups-rohtliilia kambri kõrge formaldehüüdi kontsentratsiooni tõttu ei lisatud teise katsepäeva hommikul, 6. märtsil, kambrisse 0,6 ml formaldehüüdi 1% lahust. Kõikidel ülejäänud päevadel toimus formaldehüüdi sisestamine mõlemasse kambrisse.

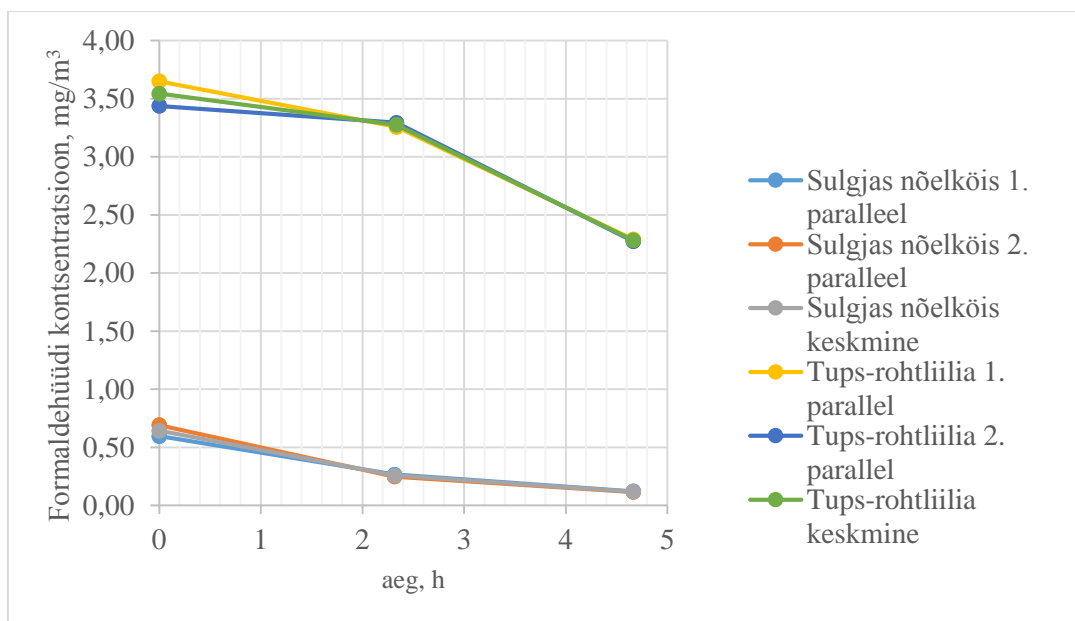
Järgnevatel katsepäevadel võeti mõlemast kambrist umbes tund aega enne formaldehüüdi sisestamist lisaproov. Proovi tulemusega oli määratav formaldehüüdi kontsentratsioon enne täiendava saasteaine sisestamist.

Viimasel katsepäeval, 10. märtsil testiti kambrit tühjana; eemaldati taimed ja määrati formaldehüüdi kontsentratsiooni muutus. Enne 0,6 ml formaldehüüdi 1% lahuse sisestamist, vahetult pärast sisestamist ning 4 tundi ja 40 minutit pärast teist proovi.

#### **5.4.2 Katsetulemused**

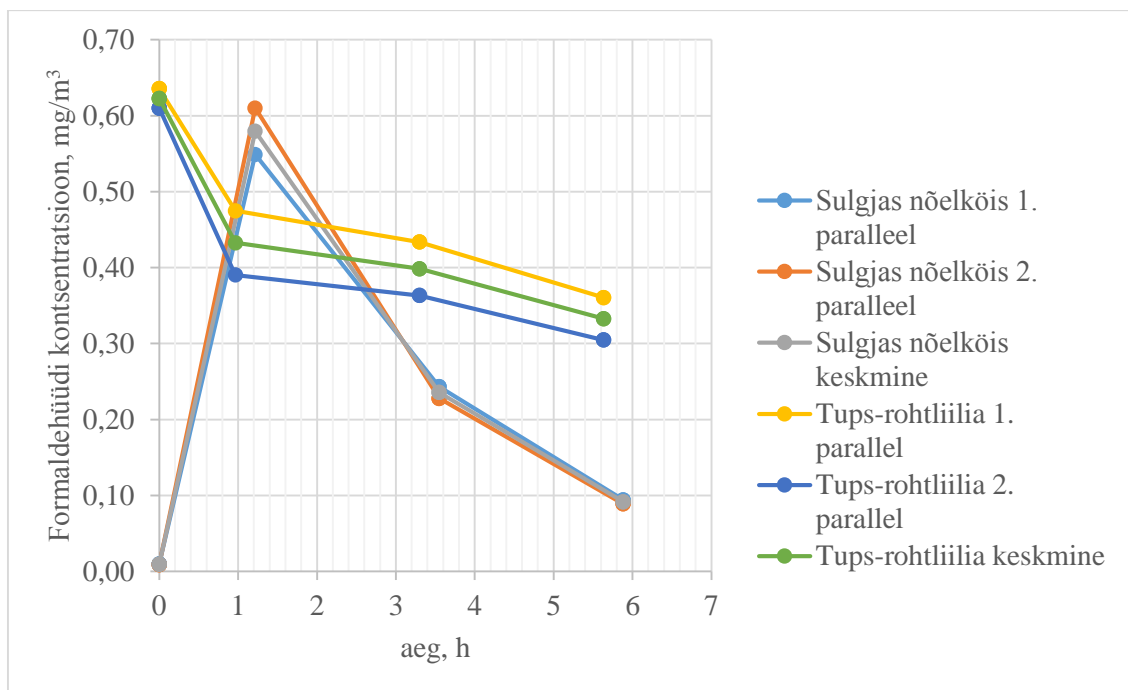
Esimesel katsepäeval süstiti mõlemasse kambrisse 0,6 ml 1%-list formaldehüüdi lahust. Sulgja nõelkõiega kambris algas katse kontsentratsiooniga 0,64 mg/m<sup>3</sup>, kuid tups-rohtliilia kambris varasemalt teadmata saaste tõttu oli kontsentratsiooniks 3,54 mg/m<sup>3</sup>. Teise katsega

langes formaldehüüdi tase nõelkõie kambris kontsentratsioonini  $0,26 \text{ mg/m}^3$  ning tups-rohtliilia kambris tasemeni  $3,28 \text{ mg/m}^3$ , vastavad vähenemisprotsendid on  $60,1 \%$  ja  $7,6 \%$ . Kolmanda katsega vähenes kontsentratsioon esimeses kambris tasemeni  $0,12 \text{ mg/m}^3$  ning teises kambris  $2,28 \text{ mg/m}^3$ , päeva kontsentratsioonid vähenesid vastavalt  $81,7\%$  ning  $35,6\%$ . Graafiliselt on 5. märtsil läbi viidud katsete tulemused Joonisel 5.6..



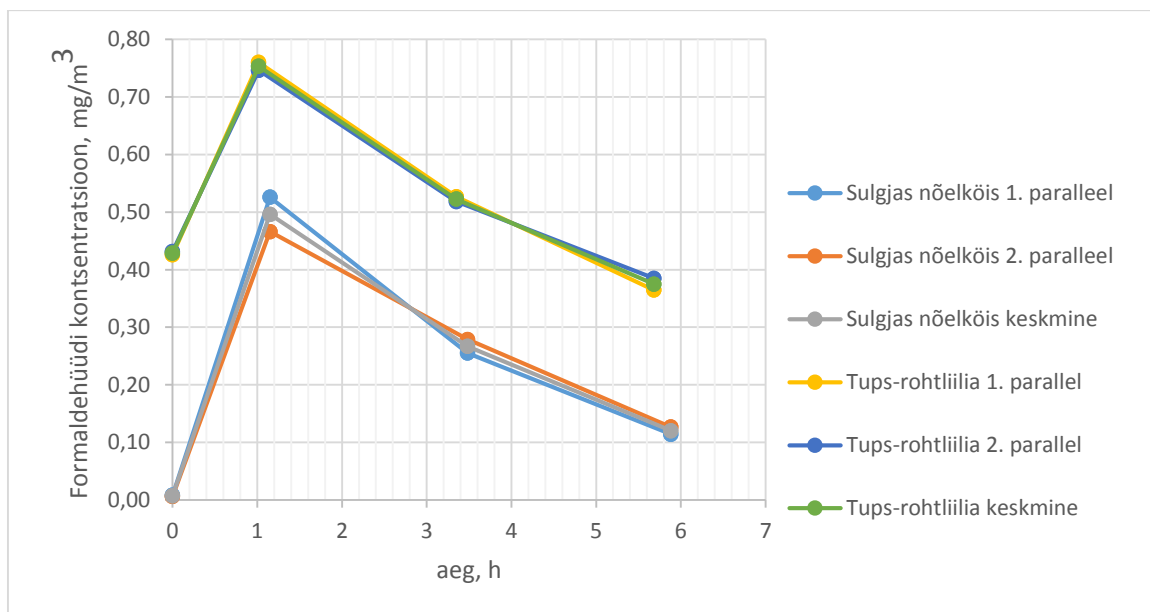
**Joonis 5.6.** Formaldehüüdi kontsentratsioonid kambrites esimesel katsepäeval, 05.03.2015

Teise katsepäeva alguseks oli selge, et tups-rohtliilia kamber on saastunud liigse formaldehüüdiga ning seetõttu sel päeval formaldehüüdi sellesse kambrisse ei lisatud. Enne formaldehüüdi sisestust oli sulgja nõelkõie kambris formaldehüüdi tase vähenenud kontsentratsioonini  $0,01 \text{ mg/m}^3$ , tups-rohtliilial samal ajal  $0,62 \text{ mg/m}^3$ . Pärast formaldehüüdi sisestust oli sama kambri formaldehüüdi tase  $0,58 \text{ mg/m}^3$  ning tups-rohtliilia kambri proov näitas tulemuseks  $0,43 \text{ mg/m}^3$ . Järgmise proovi näidud olid esimeses kambris  $0,24 \text{ mg/m}^3$  ning teises kambris  $0,40 \text{ mg/m}^3$ , näidud vähenesid vastavalt  $59,4 \%$  ja  $7,9\%$ . Viimaste proovide tulemusteks olid nõelkõiel  $0,09 \text{ mg/m}^3$  ja  $84,2\%$  ning tups-rohtliilial  $0,33 \text{ mg/m}^3$  ja  $22,1\%$ . Andmed on toodud graafiliselt Joonisel 5.7.



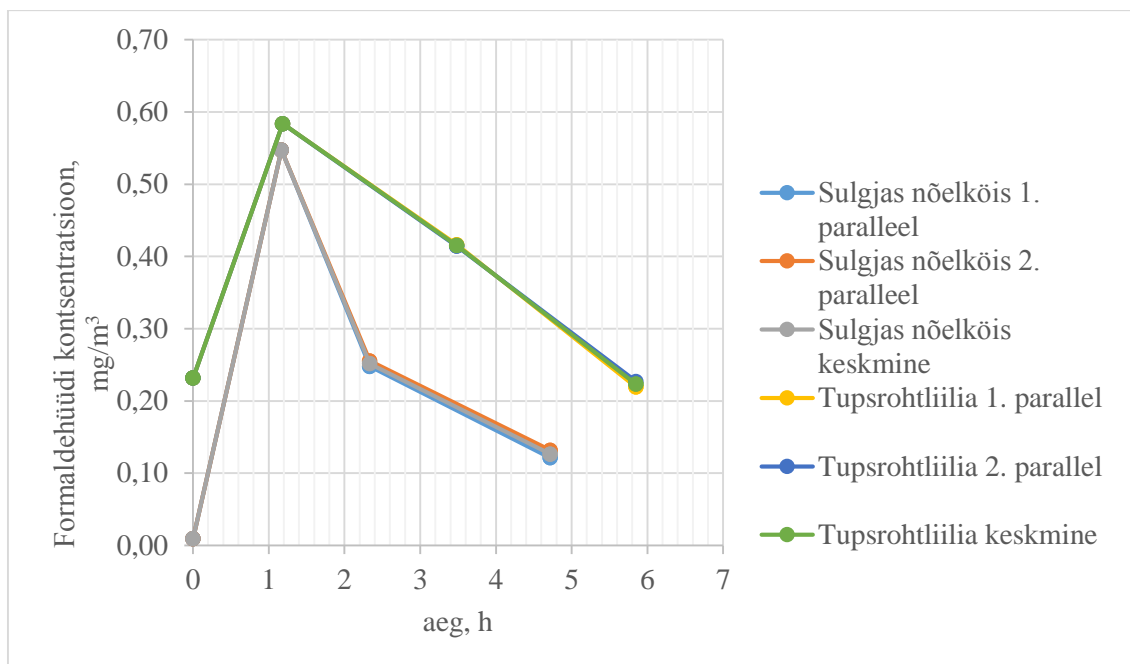
**Joonis 5.7.** Formaldehüüdi kontsentratsioonid kambrites teisel katsepäeval, 06.03.2015

Kolmanda katsepäeva hommikul oli sulgja nõelkõie kambris formaldehüüdi kontsentratsiooniks  $0,01 \text{ mg/m}^3$  ja tups-rohtliilia kambris kontsentratsiooniks  $0,43 \text{ mg/m}^3$ . Pärast  $0,6 \text{ ml } 1\%$  formaldehüüdi lahuse sisestamist tõusid kontsentratsioonid vastavalt tasemetele  $0,50 \text{ mg/m}^3$  ja  $0,75 \text{ mg/m}^3$ . Järgmise katsega langesid kontsentratsioonid tasemetele  $0,27 \text{ mg/m}^3$  ja  $0,52 \text{ mg/m}^3$ , kontsentratsioonid langesid vastavalt  $46,2 \%$  ja  $30,6 \%$ . Päeva viimase katsega määrati nõelkõie kambris formaldehüüdi kontsentratsiooniks  $0,12 \text{ mg/m}^3$  langusega  $75,8 \%$ , tups-rohtliilia kambris  $0,37 \text{ mg/m}^3$  langusega  $50,2 \%$ . Joonisel 5.8. on kujutatud kolmanda katsepäeva tulemused graafiliselt.



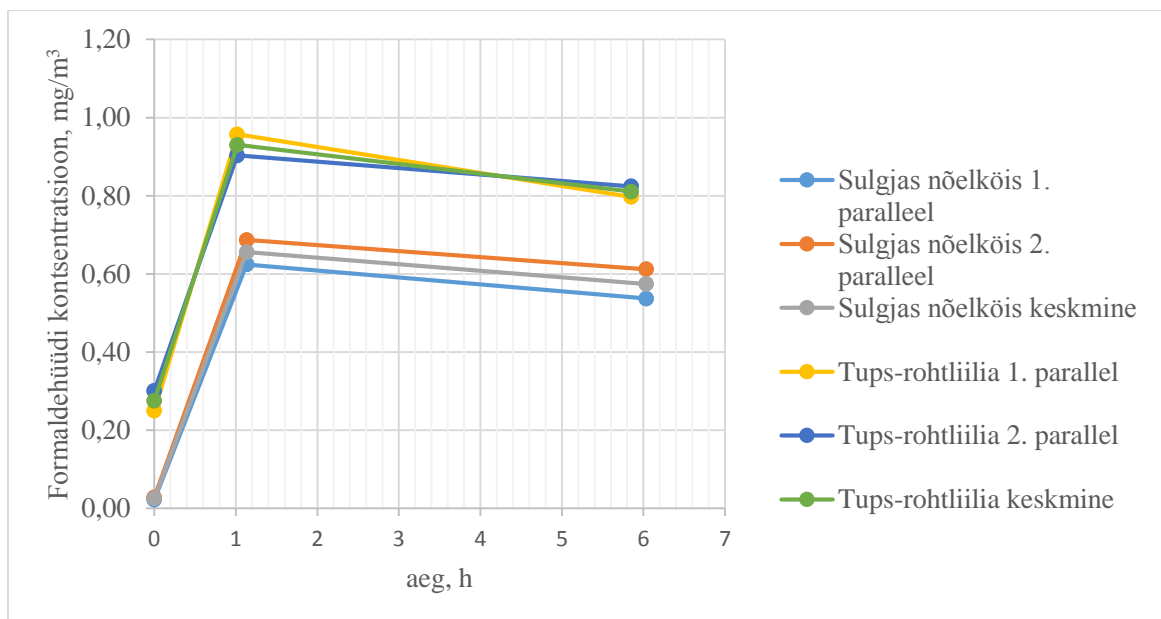
**Joonis 5.8.** Formaldehüüdi kontsentratsioonid kambrites kolmandal katsepäeval, 07.03.2015

Neljandal katsepäeval enne formaldehüüdi sisestamist näitas proov nõelkõie kambri kontsentratsiooniks  $0,01 \text{ mg/m}^3$  ja tups-rohtliilia kambri kontsentratsiooniks  $0,23 \text{ mg/m}^3$ . Pärast formaldehüüdi sisestamist saavutati kontsentratsioonideks vastavalt  $0,55 \text{ mg/m}^3$  ja  $0,58 \text{ mg/m}^3$ . Pärast 2 tundi ja 20 minutit möödeti nõelkõie kambri kontsentratsiooniks  $0,25 \text{ mg/m}^3$ , protsentuaalselt vähenes tulem  $54,1 \%$ . Tups-rohtliilia puhul möödeti tulemuseks  $0,42 \text{ mg/m}^3$ , protsentides vähenemist  $28,9 \%$ . Viimased proovid näitasid tulemusi  $0,13 \text{ mg/m}^3$  ja  $0,22 \text{ mg/m}^3$ , mis näitab protsentuaalset vähenemist vastavalt  $76,9 \%$  ja  $61,8 \%$ . Neljanda katsepäeva tulemused on graafiliselt esitatud joonisel 5.9.



**Joonis 5.9.** Formaldehüüdi kontsentratsioonid kambrites neljandal katsepäeval, 09.03.2015

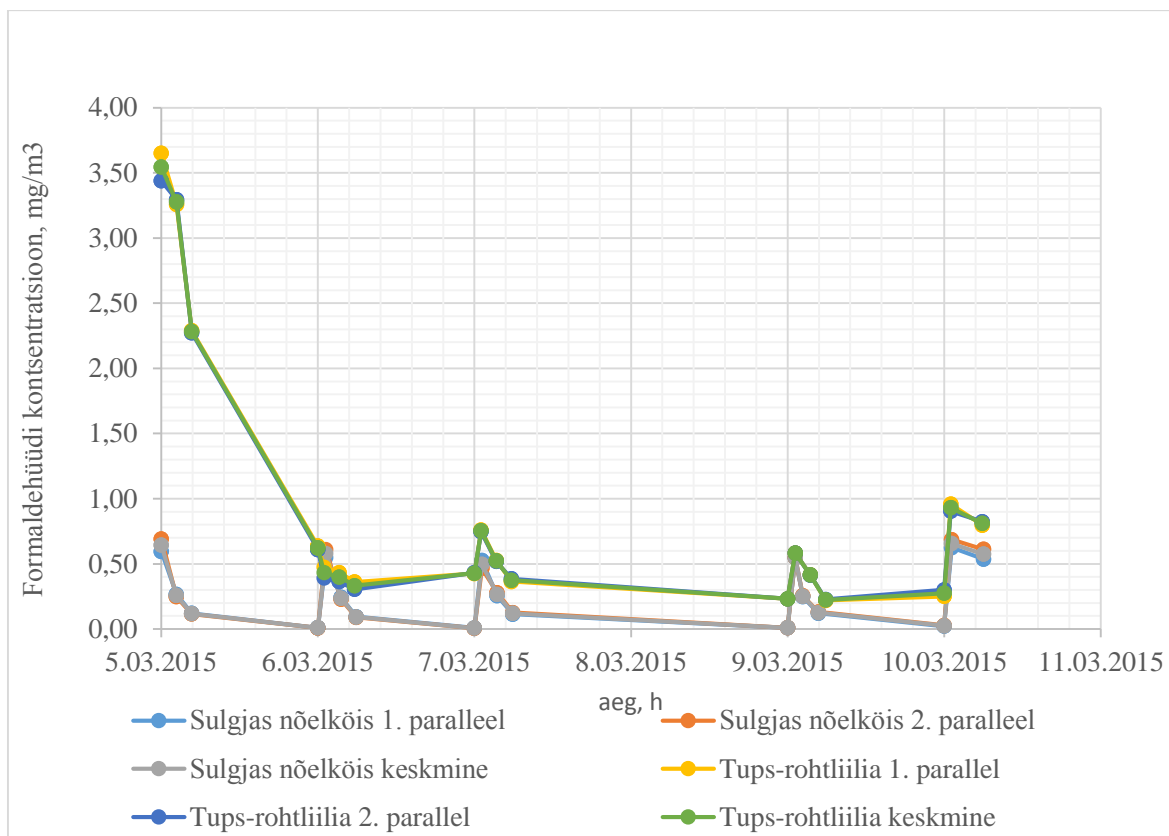
Viimasel, viiendal katsepäeval oli formaldehüüdi tase kambrites  $0,02 \text{ mg/m}^3$  ja  $0,28 \text{ mg/m}^3$  vastavalt nõelkõie ja tups-rohtliilia kambrites. Seejärel eemaldati kambritest taimed ja sisestati kambriks formaldehüüd. Süstimise järgselt mõõdeti kontsentratsioonideks endises nõelkõie kambris  $0,66 \text{ mg/m}^3$  ja endises tups-rohtliilia kambris  $0,93 \text{ mg/m}^3$ . Katsete lõpuks, 4 tunni ja 40 minuti möödudes teisest katsest, vähenes nõelkõie kambris kontsentratsioon tasemeni  $0,57 \text{ mg/m}^3$ , protsentuaalselt 12,4%. Tups-rohtliilia kambris jäi formaldehüüdi kontsentratsioon tasemele  $0,81 \text{ mg/m}^3$ , protsentuaalselt vähenes kontsentratsioon 12,9%. Graafiliselt on tulemused toodud Joonisel 5.10.



**Joonis 5.10.** Formaldehüüdi kontsentratsioonid kambrites viiendal katsepäeval, 10.03.2015

Igal katsepäeval arvutati samal päeval standardlahuste mõõtetulemuste põhjal sirge valemid, mille tõusu kaudu arvutati proovi formaldehüüdi sisaldus. Kõikide päevade standardlahuste mõõtetulemused ja koostatud sirge graafikud on toodud lisas B.

Kogu katseperioodi tulemused on graafiliselt toodud Joonisel 5.11., kust on selgelt näha tups-rohtliilia kambri esimese päeva kõrge näit ning järgnevate päevade formaldehüüdi sisestus ja edasine kontsentratsiooni langus. Kõikide katsete andmed on toodud tabelitena lisas C.



**Joonis 5.11.** Formaldehüüdi kontsentratsioon kogu katseperioodi vältel

Päevade lõikes eemaldasid taimed kambriõhust formaldehüüdi ühe päeva katsete jooksul suhteliselt ühtlasel tasemel (Tabel 5.2.). Esimese katsepäeva tups-rohtliilia tulemus on keskmise arvutamisel välja jäetud, sest kambriõhu formaldehüüdi sisaldus oli püsitatud vahemikust kordades kõrgem. Lahutades keskmisest formaldehüüdi õhust eemaldamise kogusest tühja kambrikatse tulemuse, on saadud arvutuslik tulemus taime kohta. Nii on tups-rohtliilia formaldehüüdi eemaldus õhust keskmiselt 48,1 µg/h ja sulgjal nõelkõiel 73,7 µg/h.

**Tabel 5.2.** Taimede formaldehüüdi eraldus õhust taime kohta tunnis päeva kõrgeima ja päeva lõpu madalaima kontsentratsiooni lõikes

	5.03.2015	06.03.2015	7.03.2015	09.03.2015	Keskmine	Keskmine FA kaoga
Tups-rohtliilia FA eemaldus õhust, µg/h	(270)	60,4	81,4	77,1	73,0	48,1
Sulgja nõelkõie FA eemaldus õhust, µg/h	89,9	105	84,6	89,0	92,1	73,7



Kuna taimede suurused sama liigi piires on suuresti erinevad, on universaalsemateks võrdlusühikuteks seotud formaldehüüdi kogus taime poti või taime massi kohta ajaühikus. Lillepoti mahu hulka kuulub taime juurestik, substraat ja mikroorganismide kogum. Lillepoti mahtu saab võrrelda ainult nendel juhtudel, kus taime juurestik katab kogu poti. Sulgja nõelkõie ja tups-rohtliilia kohta on kirjeldavad andmed toodud vastavalt Tabelis 5.3. ja Tabelis 5.4.

**Tabel 5.3.** Sulgja nõelkõie formaldehüüdi eemaldus õhust lillepoti mahu ja taime massiühiku kohta ajaühikus ühe katsepäeva vältel

Kuupäev	Parameeter	Parameetri väärtus	Formaldehüüdi koguse muutus lillepoti mahu kohta ajaühikus , $\mu\text{g}/(\text{l} \cdot \text{h})$	Formaldehüüdi koguse muutus taime massi kohta ajaühikus, $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$
5.03.2015	Formaldehüüdi koguse muutus, mg	0,42	66,6	281
	Aeg, h	4,67		
6.03.2015	Formaldehüüdi koguse muutus, mg	0,49	77,7	328
	Aeg, h	4,67		
7.03.2015	Formaldehüüdi koguse muutus, mg	0,40	62,6	264
	Aeg, h	4,73		
9.03.2015	Formaldehüüdi koguse muutus, mg	0,42	65,9	278
	Aeg, h	4,72		
10.03.2015	Formaldehüüdi koguse muutus, mg	0,09	–	–
	Aeg, h	4,90		
Keskmine			68,2	288
Keskmine arvestades FA kadu			49,9	269

**Tabel 5.4.** Tups-rohtliilia formaldehüüdi eemaldus õhust lillepoti mahu ja taime massiühiku kohta ajaühikus ühe katsepäeva vältel

Kuupäev	Parameeter	Parameetri väärtus	Formaldehüüdi koguse muutus lillepoti mahu kohta ajaühikus , $\mu\text{g}/(\text{l}^*\text{h})$	Formaldehüüdi koguse muutus taime massi kohta ajaühikus , $\mu\text{g}/(\text{kg}^*\text{h})$
5.03.2015	Formaldehüüdi koguse muutus, mg	1,26	(375)	(723)
	Aeg, h	4,67		
6.03.2015	Formaldehüüdi koguse muutus, mg	0,34	83,9	162
	Aeg, h	5,63		
7.03.2015	Formaldehüüdi koguse muutus, mg	0,38	113	218
	Aeg, h	4,67		
9.03.2015	Formaldehüüdi koguse muutus, mg	0,36	107	207
	Aeg, h	4,67		
10.03.2015	Formaldehüüdi koguse muutus, mg	0,12	–	–
	Aeg, h	4,83		
Keskmine			101	328
Keskmine arvestades FA kadu			76,5	303

Katsete käigus nähtus, et saasteaine kontsentratsiooni langusega langeb ka selle eemaldamise kiirus. Seetõttu on oluline hinnata katsetulemusi ka pikema ajavahemiku põhjal. Katseperioodi käigus oli kolm ligi 24-tunnist perioodi, mille alguse ja lõpu formaldehüüdi kontsentratsioonid olid mõõdetud. Tabelis 5.5 on toodud mõlema katsealuse taime seotud formaldehüüdi kogused keskmisel tunnis ööpäeva vältel.

**Tabel 5.5.** Tups-rohtliilia ja sulgja nõelkõie õhust eemaldatud formaldehüüdi kogus tunnis 24-tunnise vaatlusperioodi jooksul

	5.03.2015-06.03.2015	6.03.2015-07.03.2015	9.03.2015-10.03.2015	Keskmine
Tups-rohtliilia FA eemaldus õhust, $\mu\text{g}/\text{h}$	122	7,95	12,2	47,3
Sulgja nõelkõie FA eemaldus õhust, $\mu\text{g}/\text{h}$	27,3	23,9	21,8	24,3

Tabelis 5.6. ja Tabelis 5.7. on toodud vastavalt sulgja nõelkõie ja tups-rohtliilia andmed taime iseloomustava ühiku kohta 24-tunnise vaatlusperioodi jooksul. Tups-rohtliilia esimese katseperioodi ei ole keskmise väärtuse arvutamisel kaasatud kambriõhu formaldehüüdi sisalduse seatud piiridest kordades kõrgema väärtuse tõttu.

**Tabel 5.6.** Sulgja nõelkõie formaldehüüdi eemaldus õhust lillepoti mahu ja taime massiühiku kohta ajaühikus ligi 24 tunni vältel

Kuupäev	Parameeter	Parameetri väärtus	Formaldehüüdi koguse muutus lillepoti mahu kohta ajaühikus keskmiselt, $\mu\text{g}/(\text{l}^*\text{h})$	Formaldehüüdi koguse muutus taime massi kohta ajaühikus keskmiselt, $\mu\text{g}/(\text{kg}^*\text{h})$
5.03.2015-06.03.2015	Formaldehüüdi koguse muutus, mg	0,63	20,2	85,2
	Aeg, h	23,1		
6.03.2015-07.03.2015	Formaldehüüdi koguse muutus, mg	0,57	17,7	74,5
	Aeg, h	23,9		
9.03.2015-10.03.2015	Formaldehüüdi koguse muutus, mg	0,56	16,2	68,2
	Aeg, h	24,3		
Keskmine			18,0	76,0

**Tabel 5.7.** Tups-rohtliilia formaldehüüdi eemaldus õhust lillepoti mahu ja taime massiühiku kohta ajaühikus ligi 24 tunni vältel

Kuupäev	Parameeter	Parameetri väärtus	Formaldehüüdi koguse muutus lillepoti mahu kohta ajaühikus keskmiselt, $\mu\text{g}/(\text{l}^*\text{h})$	Formaldehüüdi koguse muutus taime massi kohta ajaühikus keskmiselt, $\mu\text{g}/(\text{kg}^*\text{h})$
5.03.2015-06.03.2015	Formaldehüüdi koguse muutus, mg	2,92	(169)	(326)
	Aeg, h	24,0		
6.03.2015-07.03.2015	Formaldehüüdi koguse muutus, mg	0,19	11,0	21,3
	Aeg, h	23,9		
9.03.2015-10.03.2015	Formaldehüüdi koguse muutus, mg	0,30	17,0	32,8
	Aeg, h	24,5		
Keskmine			14,0	27,1

## 5.5 Arutelu ja edasised uurimissuunad

### 5.5.1 Võrdlus varasemate katseandmetega

Käesoleva töö peamine erinevus võrreldes varem valminud töödega on formaldehüüdi kontsentratsiooni tase katsekambris. Teadaolevalt ei ole varasemalt avalikustatud sisekliima piirnormidesse jäävate formaldehüüdi kontsentratsioonidega laborikatsete tulemusi.

Tups-rohtliilia esimese katsepäeva jooksul langes formaldehüüdi kontsentratsioon 3,54 mg/m<sup>3</sup> kontsentratsioonini 2,28 mg/m<sup>3</sup> 4 tunni ja 40 minutiga, seejuures oli kambris määratu kestev reostusallikas. Ligi 24-tunnise aja jooksul eemaldas taim kambriõhust vähemalt 2,92 mg formaldehüüdi. Tegelikuses sidus taim endaga rohkem formaldehüüdi kui tehtud proovidega oli võimalik määrata. Planeerimata olukorrana näitas katse siiski, et kõrgete formaldehüüdi kontsentratsioonide juures on taime efektiivsus märgataval kõrgem ning saadud tulemus on võrreldav varasemalt läbi viidud katsetega.

1993. aasta uuringus kasutasid Wolverton, Johnson ja Bounds formaldehüüdi sisestamiseks katsekambrisse kokku 250 ml 37 %-list formaliini ja formaldehüüdi sisaldavaid ehitus- ja muid materjale, mis paigaldati kambrisse koos taimega kestva saasteallikana. Pole täpsemalt teada, milliste taimedega milliste kontsentratsioonide juures katseid tehti.

Wolverton ja Wolverton katsetasid 1989. aastal mitmeid taimeliike formaldehüüdi ja teiste lenduvate orgaaniliste ühendite eraldamisele ruumiõhust. Katsetes kasutati formaldehüüdi algkontsentratsioone 18,6 mg/m<sup>3</sup> kuni 24,8 mg/m<sup>3</sup>. Uuringus tõdeti, et kuigi saadi hea ülevaade, millised taimeliigid võiksid olla efektiivsemad õhu puhastajad, kasutati formaldehüüdi kontsentratsioone, mis siseõhus leiduvast tasemest on kaugelt üle.

Tabelis 5.8. on toodud seotud varasemate katsete andmed. Selgelt on näha formaldehüüdi alkonsentratsiooni mõju taime efektiivsusele ruumi õhust eraldatud formaldehüüdi kogusele ajaühikus. Kuna käesoleva uurimuse lähteandmed erinevad varasematest taolisest katsest mitmekümnekordselt, ei ole võimalik katsetulemusi üheselt võrrelda.

**Tabel 5.8.** Võrdlus varasemate ja käesoleva uurimuse katsetulemustega

	$\mu\text{g/h}$	24h kokku, $\mu\text{g}/24\text{h}$	6 h keskmine, $\mu\text{g/h}$	24h kokku, $\mu\text{g}/24\text{h}$	4,7 h keskmine, $\mu\text{g/h}$	24 h kokku, $\mu\text{g}/24\text{h}$
Formaldehüüdi kontsentratsioon, $\text{mg}/\text{m}^3$	teadmata	18,6-24,8	18-7	18-7	<0,64	<0,64
Uurimus	Wolverton, Johnson, Bounds, 1993	Wolverton, Wolverton, 1989	Wolverton, McDonald, Watkins 1984	Wolverton, McDonald, Watkins 1984	Käesolev	Käesolev
Aloe barbadensis	188	1555	–	–	–	–
Chlorophytum comosum “Vittatum”	560	–	–	–	–	–
Chlorophytum elatum	10378	–	954-2964	16829	–	–
Chlorophytum variegatum	–	–	–	–	72,9	245
Dracaena marginata	772	20469	–	–	–	–
Dracena deremensis “Janet Craigs”	1361	4888	–	–	–	–
Epipremnum pinnatum-sulgjas nõelkõis	–	–	–	–	92,1	577
Hedera helix	1120	9,653	–	–	–	–
Scindapsus aureus - kuld-nõelkõis	8986	–	711	5688	–	–
Syngonium podophyllum	341	–	713	5704	–	–

Varasemalt on avalikustatud uuringute (Wolverton, McDonald, Watkins, 1984 ja Wolverton, Johnson, Bounds, 1993) katsetulemusi, kus õhust eemaldatud formaldehüüdi kogus on esitatud taime lehe pinnaühiku kohta. Käesolevas töös ei ole sama lähenemist kasutatud, sest taime lehestiku pindala määramine on liialt ebatäpne ja on teada, et lisaks taime lehestikule, töötab saasteaine eemaldusel ka juurestik (ptk 4.4).

Wolverton ja Wolverton, 1993 uuringuga (ptk 4.5) näidati taimede omadust kohaneda ajas kõrgemate formaldehüüdi kontsentratsioonidega ja eemaldada õhust rohkem saasteainet ajaühikus. Käesoleva uurimuse käigus ei ole võimalik näha korrelatsiooni järgnevate katsetega taime efektiivsuse tõusule. Erinevuse võis tingida uurimustes kasutatud formaldehüüdi kontsentratsiooni mitmekordne vahe. *Nephrolepis exalta* kambris oli formaldehüüdi kontsentratsiooniks ligikaudu 4,5 mg/m<sup>3</sup> ja *Rhapis excelsa* kambris 5,6 mg/m<sup>3</sup>.

### **5.5.2 Rakendus ehitusmaterjalidest lenduva formaldehüüdi sidumiseks**

Kui on teada hoones kasutatud materjalide formaldehüüdi emissioon, hoonekarbi õhulekkearv ja ventilatsiooni õhuvahetuse määr, on võimalik määrata teoreetiline vajaminevate taimede arv õhust saasteainete eemaldamiseks. Kuna taimede absoluutarvulise formaldehüüdi sidumise kogus väheneb formaldehüüdi kontsentratsiooni langusega õhus, on formaldehüüdi kontsentratsioon õhus ja samal hetkel taime poolt eemaldatud formaldehüüdi kogus õhust vastastikusel seoses. Seetõttu on arvutuseks oluline teada formaldehüüdi saastekoormust ja konkreetse taimeliigi käitumist kestva saaste korral.

Kui ehitusmaterjale on kasutatud sihtotstarbeliselt ja siseruumide ehituses ei kasutata kõrgete lenduvate orgaaniliste ainete sisaldusega materjale, jäävad saasteainete kontsentratsioonid madalaks. Kui kõrgete emissioonidega materjalid on kaetud difuusete materjalidega, eraldub ruumiõhku saasteainet sõltuvalt kattmaterjali difusioonist ja ruumiõhu liikumiskii-  
rusest.

Vaadeldes näitena E1 klassi puitlaastplaati, vastab selle emissiooniklass väärtusele 0,1 ppm 100 g materjali kohta (Tabel 2.1.) õhuvahetusega  $1 \pm 0,1 \text{ h}^{-1}$  (Tabel 2.4). Teisenduse 3.1 põhjal vastab see kestvale emissioonile  $0,124 \text{ mg/m}^3$ . Tuues võrdluseks töökeskkonna piirnормi  $0,60 \text{ mg/m}^3$ , võib ruumis laiusega 4 m, pikkusega 6 m ja kõrgusega 2,5 m, ringleva õhu ja õhuvahetusega  $0,5 \text{ h}^{-1}$  kasutada normis püsimiseks kuni 58 kg katmata  $0,124 \text{ mg}/(\text{h} \cdot \text{m}^3)$  emissiooniga ehitusmaterjali.

### 5.5.3 Edasised uurimissuunad

Girman, Philips ja Levin (2009) leiavad, et varasemate laboratoorsete uurimuste lähema vaatluse all ei leidu veenvaid tõendeid, et toataimede kasutamine siseruumides vähendaks märgatavalt lenduvate orgaaniliste ühendite kontsentratsiooni. Uuringutele peaks tegema mitmeid täiendusi, et demonstreerida taimede kasu siseruumiõhu kvaliteedile. Kambrikatsetes kasutatavad kontsentratsioonid peaksid vastama tegelikele siseruumides esinevatele kontsentratsioonidele. Samuti peaksid uuringud kasutama kõrge täpsuse ja tundlikkusega analüüsimeetodeid lenduvate orgaaniliste ühendite kontsentratsiooni määramiseks ja üks uuring peaks keskenduma ühele lenduvale ühendile. Kambrikatsete tulemused peaksid olema välja toodud kujul, mis näitab ühe taime eemaldatud pollutandi massikogust ühe tunni jooksul. Nii on hõlpsam võrrelda erinevaid reostusaine eemaldamise viise ja hinnata taimede kasutamise efektiivsust. Välja peaks olema toodud ka taime mass.

Käesolevas uuringus on eeltoodud tähelepanekuid silmas peetud ja on jõutud järeldusele, et toataimed eemaldavad ruumiõhust formaldehüüdi tegelikkuses eksisteerivate koguste juures. 4,7-tunnise katseaja jooksul eemaldas üks sulgja nõelkõie taim 75-85 % saasteainest kontsentratsioonilt  $0,64\text{-}0,50 \text{ mg/m}^3$  kontsentratsioonile  $0,09\text{-}0,13 \text{ mg/m}^3$ .

Võrdluseks käesoleva töö katsetulemustele võiks edaspidiseid katsetulemusi välja tuua lillepoti (substraat ja juur) mahu ja taime massi kaudu, et hõlpsamini võrrelda samast liigist taimi ja nende omadusi. Erinevate taimeliikide iseloomustamiseks ja võrdlemiseks võiks kindlaks määratud saasteaine kontsentratsioonist õhus esitada saasteaine eemaldamise poolaega ja

aega, mis kulub 95% saasteaine eemaldamiseks. Selleks tuleks kambriõhu tihedama ajagraafiku alusel proove kuni saasteaine on kambriõhust peaaegu eemaldatud.

Näitena võttes lähtekontsentratsiooniks  $0,6 \text{ mg/m}^3$ , esitatakse aeg, mis kulus kambriõhu saasteaine kontsentratsiooni languseks tasemeni  $0,3 \text{ mg/m}^3$  ning seejärel aeg, mis kulub katse algusest kambriõhus  $30 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  saasteaine kontsentratsioonini jõudmiseks. Sel viisil on näha, millistes kontsentratsioonivahemikes kulub taimel saasteaine eemaldamiseks rohkem ja vähem aega. Üldjuhul on oluline, et vaatluse all olev taim eemaldaks ruumiõhust saasteaineid sarnastes olukordades, mis reaalselt hoonetes eksisteerivad. Ei ole tõestatud, et kõrgetel saasteaine kontsentratsioonidel efektiivsed taimed oleksid sama tõhusad madalatel, eluruumides esinevatel kontsentratsioonidel (lisa A).



## KOKKUVÕTE

Energiatõhusas ehituses on oht saasteainete kogunemiseks ruumi õhus, sest hoone on kõrge õhupidavusega ja konservatiivsete ventilatsiooni õhuvooluhulkadega. Sünteetiliste ehitusmaterjalide kasutamisega tõuseb risk lenduvate ühendite kontsentratsiooni tõusuks piirnormidest kõrgemale. Nii ehitusmaterjalidest lenduvate kui inimtekkeliste ühendite kontsentratsiooni tõus tingib halva sisekliima, mis on tõestatud negatiivse mõjuga inimeste tervisele.

Uurimuse käigus selgus, et formaldehüüdi kontsentratsioonil  $0,6 \text{ mg/m}^3$ , mis on Eestis töökeskonna piirnormiks, eemaldavad taimed õhust formaldehüüdi tunduvalt aeglasemalt kui varasemate uurimuste käigus kõrgete kontsentratsioonidega,  $>18 \text{ mg/m}^3$  läbi viidud katsed näitavad. Arvestades formaldehüüdi kadu katsekambrist, arvatavasti lagunemist valguse toimel ja saasteaine kontsentratsioonivahemikku  $0,64\text{-}0,09 \text{ mg/m}^3$ , on taimede formaldehüüdi eemaldus katsekambri õhust tups-rohtliilial  $48,1 \text{ } \mu\text{g}/(\text{h}\cdot\text{m}^3)$  ja sulgjal nõelkõiel  $73,2 \text{ } \mu\text{g}/(\text{h}\cdot\text{m}^3)$ . Esitatud andmetes pole arvestatud tups-rohtliilia kambris olnud täiendavat saasteallikat, tegelikkuses on taime resotuaaine eemaldus õhust kõrgem.

Läbiviidud katsete teiseks eesmärgiks oli välja selgitada, kas pikemaajalisem saasteaine mõju suurendab taime poolt ruumi õhust eemaldatava saasteaine kogust ajaühikus. Katsete käigus ei olnud võimalik vastavat seost välja lugeda. Põhjuseks võib olla varasema uuringu ligi 30 korda madalam formaldehüüdi kontsentratsioon ja/või katkematult ühtlase suurusega saasteaine lisandumine keskkonda.

Leiti selge seos ruumi õhu saasteaine kontsentratsiooni ja taime poolt õhust eemaldatava saasteaine koguse vahel. Kõrgete saasteainete kontsentratsioonidega õhust eemaldavad taimed ajaühikus rohkem vaatlusalust ühendit. Seetõttu on oluline edasises uurimises määrata katse ajal kontsentratsioonide muutuse vahemik ja taime eemaldatud saasteaine kogus selles kontsentratsioonide vahemikus. Seejuures võiks edasine uurimussuund liikuda tegelikkuses eksisteerivate kontsentratsioonide matkimisele, et saadud tulemused oleksid praktikas otseselt rakendatavad. Eri liiki taimi võiks võrrelda saasteaine kontsentratsiooni poolaja suhtes erinevate ruumi õhku lenduvate ühendite kontsentratsiooni punktide vahel. Sama liiki

taimi saaaks sel juhul võrrelda toodud näitaja suhtes taime kogumassiühiku ja taime poti kogu mahtuvuse suhtes. Viimast eeldusel, et taim on juurdunud kogu poti ulatuses ja substraadis elutsev mikroorganismide kogum on aktiivne.

## **TÄNUAVALDUSED**

Töö autor tänab juhendajaid Illimar Kalki ja Kairit Laksbergi nõu, toe ja abi eest.

Samuti avaldab autor tänu katsete läbiviimise toetamise eest Tallinna Tehnikaülikoolile ja Terviseameti Tartu laborile.

## KIRJANDUS

1. Asthmatic symptoms and volatile organic compounds, formaldehyde, and carbon dioxide in dwellings. (1995). / D. Norbäck, E. Björnsson, C. Janson, et al.– Occupational and Environmental Medicine, 52, 388-395. [Online] Occupational and Environmental Medicine (17.03.03)
2. Atkinson, R., Hester R. E., Harrison R. M. (1995) Gas phase tropospheric chemistry of organic compounds, volatile organic compounds in the atmosphere. [Online] Royal Society of Chemistry (27.08.2014)
3. Efficiency of Volatile Formaldehyde Removal by Indoor Plants: Contribution of Aerial Plant Parts versus the Root Zone (2008). / Kwang Jin Kim, Mi Jung Kil, Jeong Seob Song, Eun Ha Yoo – Journal of the American Society for Horticultural Science, 133(4), 521-526, [Online] Journal of the American Society for Horticultural Science (8.03.15)
4. European Commission. (1989) EUR 121 96 - European concerted action – Indoor Air Quality and Its Impact on Man. COST Project 613: Report no 2: Formaldehyde Emission from Wood Based Materials: Guideline for the determination of steady state concentrations in test chambers. [Online] European Commission Joint Research Centre (09.06.2014)
5. European Commission. (1990) EUR 13216 - European concerted action – Indoor Air Quality and Its Impact on Man. COST Project 61 3: Report no 7: Indoor Air Pollution by Formaldehyde in European Countries. [Online] European Commission Joint Research Centre (09.06.2014)
6. European Commission. (1997) EUR 13216 - European concerted action – Indoor Air Quality and Its Impact on Man. ECA IAQ: Report no 18: Evaluation of VOC

- Emissions from Building Products: Solid Flooring Materials. [Online] European Commission Joint Research Centre (10.06.2014)
7. Girman, J., Phillips, T., Levin, H. (2009) Critical Review: How Well Do House Plants Perform as Indoor Air Cleaners? – Proceedings of Healthy Buildings, p 667, [Online] Building Ecology (17.04.15)
  8. Hoone energiatõhususe miinimumnõuded. Lisa: Ventilatsiooni välisõhu vooluhulga ja energiaarvutuses kasutatavate ruumitemperatuuride seadeväärtused (vastu võetud 03.06.2015). – Elektrooniline Riigi Teataja [WWW] [https://www.riigiteataja.ee/akt/tilisa/1050/6201/5015/MKM\\_m55\\_lisa.pdf#](https://www.riigiteataja.ee/akt/tilisa/1050/6201/5015/MKM_m55_lisa.pdf#) (29.09.2015)
  9. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, völvme 88 Formaldehyde, 2-Butoxyethanol and 1-tert-Butoxypropan-2-ol (2006) International Agency for Research on Cancer [Online] World Health Organization Regional Office for Europe (18.04.2015)
  10. Lebowitz, M. D., Quackenboss J. J. (1993). Formaldehyde: Exposure Effects on Human Health – Handbook of Hazardous Materials, 285-291. Morton Corn [Online] Academic Press Inc. (02.02.15)
  11. Meninghaus, R., Gunnarsen, L., Knudsen, H. N. (2000). Diffusion and Sorption of Volatile Organic Compounds in Building Materials-Impact on Indoor Air Quality—Environmental Science Technology, 34, 3101-3108, [Online] ResearchGate (26.08.14)
  12. Puidu töötlemisel välisõhku eralduvate saasteainete heitkoguste määramismeetodid. (Vastu võetud 02.08.2004 nr 98, kehtiv). – Elektrooniline Riigi Teataja [WWW] <https://www.riigiteataja.ee/akt/789443> (19.04.2015)

13. Puidupõhistest paneelidest eralduva formaldehüüdi määramine kambrikatsega. (2004). Wood-based panels – Determination of formaldehyde release- Part 1: Formaldehyde emission by the chamber method: EVS-EN 717-1:2004. Tallinn: Standardiamet.
14. Roffael, E. Volatile organic compounds and formaldehyde in nature, wood and wood based panels. – Holz als Roh- und Werkstoff, 64. Berliin: Springer, 2006, 144-149
15. Roost, V. (1995). Toalill. Tallinn: Maalehe raamat
16. Siseõhu kvaliteedinõuded. (2007). Sisekeskkonna algandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust mugavusest, valgustusest ja akustikast: EVS-EN 15251:2007. Tallinn: Standardiamet
17. Siseõhu kvaliteedinõuded, rahvuslik lisa. (2012). Sisekeskkonna algandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust mugavusest, valgustusest ja akustikast. Eesti rahvuslik lisa standardile EVS-EN 15251:2007: EVS 916:2012. Tallinn: Standardiamet
18. Stenman, K., Wennström, A., (2008). Toataimed: Päritolu, hooldamine ja paljundamine. Tallinn: Varrak
19. Töökeskkonna keemiliste ohutegurite piirnormid (vastu võetud 18.09.2001, viimati jõustunud 29.09.2001). – Elektrooniline Riigi Teataja [WWW] <https://www.riigiteataja.ee/akt/130112011011> (22.05.15)

20. WHO Air Quality Guidelines for Europe, Second Edition (2000). WHO Regional Publications, European Series, 91, 87-90, [Online] World Health Organization Regional Office for Europe (24.03.2015)
  
21. Wolverton, B. C., McDonald, R. C., Watkins, Jr. E. A. (1984) Foliage Plants for Removing Indoor Air Pollutants from Energy-Efficient Homes. – The New York Botanical Garden 38 (2) 224-228 [Online] The New York Botanical Garden (25.03.2015)
  
22. Wolverton, B. C., Johnson, A., Bounds, K., (1989) Interior Landscape Plants for Indoor Air Pollution Abatement, 1-13 [Online] NASA John C. Stennis Space Center Science and Technology Laboratory (09.04.2016)
  
23. Wolverton, B. C., Wolverton, J. D. (1993) Plants And Soil Microorganisms: Removal of Formaldehyde, Xylene, and Ammonia from the Indoor Environment – Journal of the Mississippi Academy of Sciences, 11-15 [Online] Wolverton Environmental Services (15.03.15)
  
24. Wolverton Environmental Services, Inc., Indoor Air Pollution (2012) [WWW] <http://www.wolvertonenvironmental.com/air.htm> (15.03.15)

**LISAD**



**Lisa A. Tabel A.1.** Formaldehüüdi kontsentratsioonid elu- ja avalike hoonete siseruumiõhus (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans)

**Table 14. Occurrence of formaldehyde in indoor air in residential and public settings**

Country	Location/region	Sampling period	No. of samples	Mean concentration or range of means ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) <sup>a</sup>	Range ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) <sup>a</sup>	Comments	Reference
<b>Residential</b>							
Australia	Victoria	1994–95	NR	12.6 ppb <sup>b</sup> 13.8 ppb <sup>b</sup> 11.3 ppb <sup>b</sup> 11.4 ppb <sup>b</sup>	< 0.3–105 < 0.3–108 < 0.3–108	Eighty households Bedroom Living-room Kitchen	Garrett <i>et al.</i> (1997, 1999)
Austria	Burgenland, Carinthia and Styria	1988–89	234 apartments	< 30–100 ppb 100–500 ppb > 500 ppb		Measured in 33% of the apartments Measured in 48% of the apartments Measured in 19% of the apartments	Koeck <i>et al.</i> (1997)
Canada	Quebec City, QC	NR	28 3 34 6	7.3 9.2 8.2 9.9	max., 20.2 max., 19.7 max., 23.4 max., 19.5	Basement, with combustion appliance Basement, without combustion appliance Ground floor, with combustion appliance Ground floor, without combustion appliance	Lévesque <i>et al.</i> (2001)
	Various	1989–95	151	35.9 (29.8 <sup>b</sup> )	NR	Pooled data from five studies at various locations	Liteplo & Meek (2003)
Egypt	Cairo	1999	294	89 ppb 100 ppb 100 ppb 87.6 ppb 105.6 ppb	35–192 ppb 30–213 ppb 28–225 ppb NR NR	Seven apartments Kitchen Bedroom Living room Measured in spring Measured in summer	Khoder <i>et al.</i> (2000)
France	Paris	2001	61 61 61	21.7 <sup>c</sup> 24.2 <sup>c</sup> 24.5 <sup>c</sup>	NR NR NR	Sixty-one dwellings in Paris and suburbs Kitchen Living room Bedroom	Clarisse <i>et al.</i> (2003)
Hungary		1998	123	17.5	0.6–56.7	Homes in six medium-sized cities	Erdei <i>et al.</i> (2003)
Japan	Country-wide	1998–2001	1642	120 (95.7 <sup>b</sup> )	max., 979	From 1422 homes distributed throughout the country	Park & Ikeda (2003)
	NR	2000	171	110 ppb 120 ppb	20–872 ppb 11–840 ppb	Rooms from 81 houses Active DNPH method Detector tube method	Azuma <i>et al.</i> (2003)
	Niigata Prefecture	1999	104	NR	0–740	Data from figure; 29% greater than 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Sakaguchi & Akabayashi (2003)
	Nagoya	1998	37	17.6 <sup>c</sup>	max., 73	Dwelling factors and airborne concentrations were also compared	Sakai <i>et al.</i> (2004)
Mexico	Mexico City and Xalapa	1996–98	50 <sup>d</sup>	37–47	12–81	Measured in two houses	Báez <i>et al.</i> (2003)
Sweden	Uppsala	1998	27	8.3 <sup>c</sup>	max., 19	Dwelling factors and airborne concentrations were also compared	Sakai <i>et al.</i> (2004)
United Kingdom	London	1991–92	17 40	15.0 ppb 3.4 ppb	ND–93.1 ppb ND–10.3 ppb	West London, residential area North London, residential area	Williams <i>et al.</i> (1996)
USA	San Francisco Bay Area, CA	1984	48 45	41 ppb 36 ppb	NR NR	Kitchen Main bedroom	Sexton <i>et al.</i> (1986)
	Various	1981–84	273	44.0 <sup>b</sup>	NR	Mixed locations	Shah & Singh (1988) <sup>e</sup>
	Colorado	1992–93	9	26 <sup>d</sup> 49 <sup>d</sup>	8–66 33–81	Prior to occupancy After 5 months of occupancy	Lindstrom <i>et al.</i> (1995)
	Boston, MA	1993	14 26	11.1 ppb 16.1 ppb	6.0–16.1 ppb 5.9–53.8 ppb	Winter measurements, four residences Summer measurements, nine residences	Reiss <i>et al.</i> (1995)
	Louisiana	NR	419	460	ND–6600	Measured in 53 houses (75% urban, 25% rural); also measured seasonal differences	Lemus <i>et al.</i> (1998)
<b>Public settings</b>							
China	Hotel ballroom	2002	28	29.7	26.3–63.0	Measured in four hotel ballrooms in the evening on 7 consecutive days	Feng <i>et al.</i> (2004)
Italy	Library	1995–96	16	32.7	1.7–67.8	Sixteen libraries at the University of Modena; 10 samples with detectable levels	Fantuzzi <i>et al.</i> (1996)
Mexico	Museum	1996–98	60 <sup>d</sup>	11–34	4–59	Three museums	Báez <i>et al.</i> (2003)
Sweden	Hospital	1997	4	5	2–7	Geriatric hospitals built in 1925, 1985, 1993 and 1994	Wieslander <i>et al.</i> (1999b)
	Primary school	1993, 1995	48	9.5	3–16	Twelve randomly selected primary schools	Norbäck <i>et al.</i> (2000)

ND, not detected; NR, not reported

<sup>a</sup> Unless stated otherwise

<sup>b</sup> Median

<sup>c</sup> Geometric mean

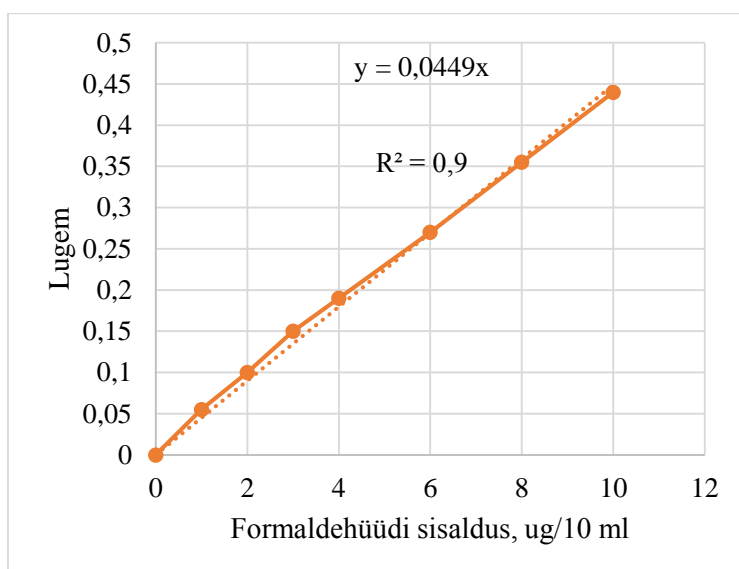
<sup>d</sup> Number of indoor and outdoor measurements combined (see Table 13)

<sup>e</sup> Data collected from literature searches, direct contacts with individuals and organisations, reports, computer tapes and direct electronic transfers

## LISA B Standardlahuste lugemid spektrofotomeetrilt ja koostatud joone võrrandid

**Tabel B.1.** Standardlahuste kontsentratsioonid ja lugemid spektrofotomeetrilt esimesel katsepäeval, 05.03.2015

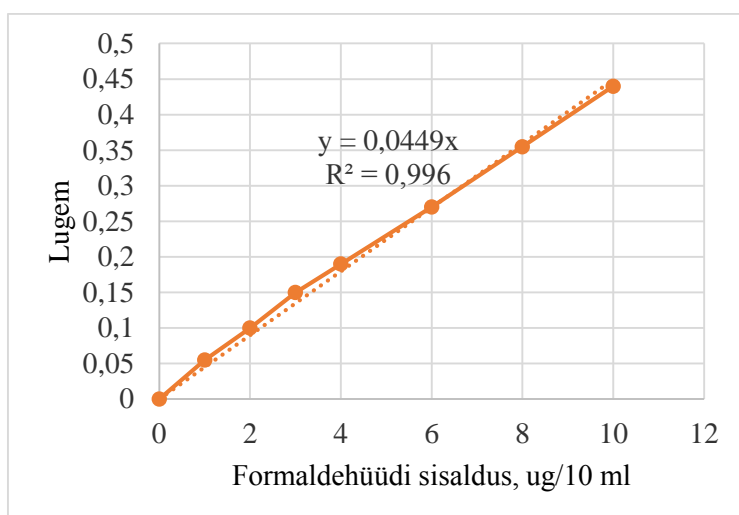
Standardlahuse formaldehüüdi sisaldus, ug/10 ml	Lugem spektrofotomeetrilt
0	0
1	0,055
2	0,1
3	0,15
4	0,19
6	0,27
8	0,355
10	0,44



**Joonis B.1.** Joone tõusu leidmiseks koostatud joone võrrand kontsentratsioonide ja lugemite põhjal esimesel katsepäeval 05.03.2015

**Tabel B.2.** Standardlahuste kontsentratsioonid ja lugemid spektrofotomeetrilt teisel katsepäeval, 06.03.2015

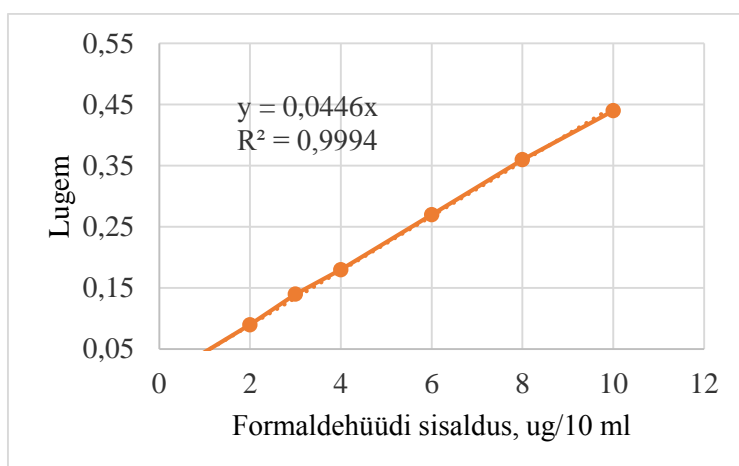
Standardlahuse formaldehüüdi sisaldus, ug/10 ml	Lugem spektrofotomeetrilt
0	0
1	0,055
2	0,1
3	0,15
4	0,19
6	0,27
8	0,355
10	0,44



**Joonis B.2.** Joone tõusu leidmiseks koostatud joone võrrand kontsentratsioonide ja lugemite põhjal teisel katsepäeval 06.03.2015

**Tabel B.3.** Standardlahuste kontsentratsioonid ja lugemid spektrofotomeetrilt kolmandal katsepäeval, 07.03.2015

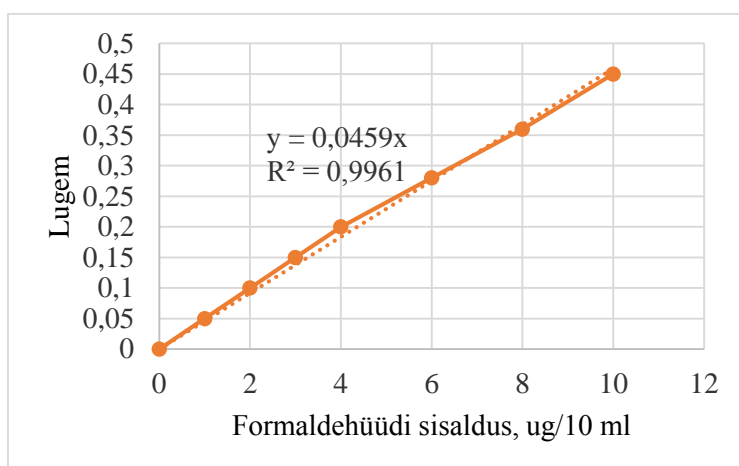
Standardlahuse formaldehüüdi sisaldus, ug/10 ml	Lugem spektrofotomeetrilt
0	0
1	0,045
2	0,09
3	0,14
4	0,18
6	0,27
8	0,36
10	0,44



**Joonis B.3.** Joone tõusu leidmiseks koostatud joone võrrand kontsentratsioonide ja lugemite põhjal kolmandal katsepäeval 07.03.2015

**Tabel B.4.** Standardlahuste kontsentratsioonid ja lugemid spektrofotomeetrilt neljandal katsepäeval, 09.03.2015

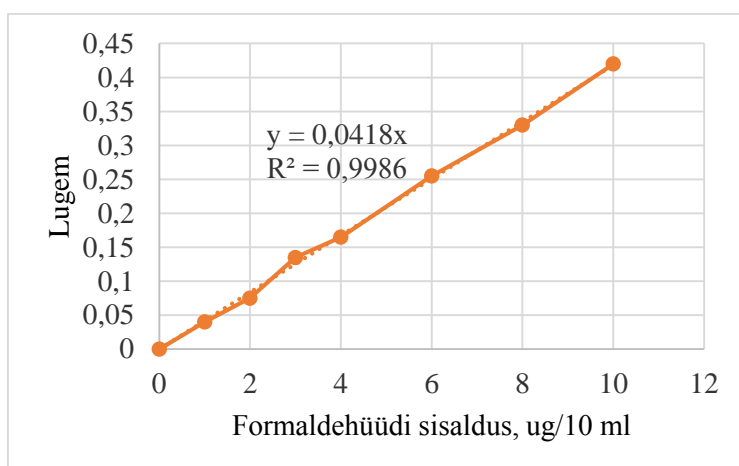
Standardlahuse formaldehüüdi sisaldus, ug/10 ml	Lugem spektrofotomeetrilt
0	0
1	0,05
2	0,1
3	0,15
4	0,2
6	0,28
8	0,36
10	0,45



**Joonis B.4.** Joone tõusu leidmiseks koostatud joone võrrand kontsentratsioonide ja lugemite põhjal neljandal katsepäeval 09.03.2015

**Tabel B.5.** Standardlahuste kontsentratsioonid ja lugemid spektrofotomeetrilt viiendal katsepäeval, 10.03.2015

Standardlahuse formaldehüüdi sisaldus, ug/10 ml	Lugem spektrofotomeetrilt
0	0
1	0,04
2	0,075
3	0,135
4	0,165
6	0,255
8	0,33
10	0,42



**Joonis B.5.** Joone tõusu leidmiseks koostatud joone võrrand kontsentratsioonide ja lugemite põhjal viiendal katsepäeval 10.03.2015

LISA C. Proovide andmetabelid katseperioodi jooksul

Tabel C.1.1. Sulgja nõelkõie proovide andmed esimesel katsepäeval 05.03.2015

Aeg, paralleel	Lugem	Sisaldus proovis, mg/m <sup>3</sup>	Lahjendus	Sisaldus, mg/m <sup>3</sup>	Aeg, min	Õhu vooluhulk, l/min	Kontsentratsioon, mg/m <sup>3</sup>	Kontsentratsioon, mg/m <sup>3</sup>	Kontsentratsiooni muutus algproovist, %	Kontsentratsiooni muutus eelmisest proovist, %
9:12 1a	0,13	2,9	10,0	28,95	12	4,50	0,60			
9:12 1b	0,145	3,2	1,0	3,23	12	4,50				
9:12 2a	0,13	2,9	10,0	28,95	12	4,00				
9:12 2b	0,19	4,2	1,0	4,23	12	4,00	0,69	0,64	0,00	0,00
11:31 1a	0,06	1,3	10,0	13,36	12	4,50	0,27			
11:31 1b	0,045	1,0	1,0	1,00	12	4,50				
11:31 2a	0,05	1,1	10,0	11,14	12	4,00				
11:31 2b	0,035	0,8	1,0	0,78	12	4,00	0,25	0,26	60,05	60,05
13:52 1a	0,355	7,9	1,0	7,91	15	4,50	0,12			
13:52 1b	0,01	0,2	1,0	0,22	15	4,50				
13:52 2a	0,3	6,7	1,0	6,68	15	4,00				
13:52 2b	0,01	0,2	1,0	0,22	15	4,00	0,12	0,12	81,71	54,21

**Tabel C.2.1.** Tups-rohtliilia proovide andmed esimsel katsepäeval 05.03.2015

Aeg, paralleel	Lugem	Sisaldus proovis, mg/m <sup>3</sup>	Lahjendus	Sisaldus, mg/m <sup>3</sup>	Aeg, min	Õhu vooluhulk, l/min	Kontsentratsioon, mg/m <sup>3</sup>	Kontsentratsioon, mg/m <sup>3</sup>	Kontsentratsiooni muutus algproovist, %	Kontsentratsiooni muutus eelmisest proovist, %
9:48 1a	0,165	3,7	50,0	183,74	12	4,50	3,65			
9:48 1b	0,06	1,3	10,0	13,36	12	4,50				
9:48 2a	0,14	3,1	50,0	155,90	12	4,00				
9:48 2b	0,41	9,1	1,0	9,13	12	4,00	3,44	3,54	0,00	0,00
12:08 1a	0,15	3,3	50,0	167,04	12	4,50	3,26			
12:08 1b	0,04	0,9	10,0	8,91	12	4,50				
12:08 2a	0,13	2,9	50,0	144,77	12	4,00				
12:08 2b	0,06	1,3	10,0	13,36	12	4,00	3,29	3,28	7,56	7,56
14:28 1a	0,105	2,3	50,0	116,93	12	4,50	2,29			
14:28 1b	0,03	0,7	10,0	6,68	12	4,50				
14:28 2a	0,085	1,9	50,0	94,65	12	4,00				
14:28 2b	0,065	1,4	10,0	14,48	12	4,00	2,27	2,28	35,63	30,37



**Tabel C.1.2.** Sulgja nõelkõie proovide andmed teisel katsepäeval 06.03.2015

Aeg, paralleel	Lugem	Sisaldus proovis, mg/m <sup>3</sup>	Lahjendus	Sisaldus, mg/m <sup>3</sup>	Aeg, min	Õhu vooluhulk, l/min	Kontsentratsioon, mg/m <sup>3</sup>	Kontsentratsioon, mg/m <sup>3</sup>	Kontsentratsiooni muutus algproovist, %	Kontsentratsiooni muutus eelmisest proovist, %
8:04 1a	0,045	0,9	1	0,95	26	4,38	0,01	0,01	-	-
8:04 1b	0,0075	0,2	1	0,16	26	4,38				
8:04 2a	0,045	0,9	1	0,95	26	4,65				
8:04 2b	0,005	0,1	1	0,11	26	4,65	0,01	0,01	-	-
9:17 1a	0,125	2,6	10,0	26,26	12	4,37	0,55	0,58	0,00	0,00
9:17 1b	0,12	2,5	1,0	2,52	12	4,37				
9:17 2a	0,14	2,9	10,0	29,41	12	4,62				
9:17 2b	0,21	4,4	1,0	4,41	12	4,62	0,61	0,58	0,00	0,00
11:37 1a	0,055	1,2	10,0	11,55	12	4,32	0,24	0,24	59,37	59,37
11:37 1b	0,05	1,1	1,0	1,05	12	4,32				
11:37 2a	0,055	1,2	10,0	11,55	12	4,65				
11:37 2b	0,055	1,2	1,0	1,16	12	4,65	0,23	0,24	59,37	59,37
13:57 1a	0,28	5,9	1,0	5,88	15	4,31	0,09	0,09	84,19	61,10
13:57 1b	0,01	0,2	1,0	0,21	15	4,31				
13:57 2a	0,29	6,1	1,0	6,09	15	4,88				
13:57 2b	0,02	0,4	1,0	0,42	15	4,88	0,09	0,09	84,19	61,10

**Tabel C.2.2.** Tups-rohtliilia proovide andmed teisel katsepäeval 06.03.2015

Aeg, paralleel	Lugem	Sisaldus proovis, mg/m <sup>3</sup>	Lahendus	Sisaldus, mg/m <sup>3</sup>	Aeg, min	Õhu vooluhulk, l/min	Kontsentratsioon, mg/m <sup>3</sup>	Kontsentratsioon, mg/m <sup>3</sup>	Kontsentratsiooni muutus algproovist, %	Kontsentratsiooni muutus eelmisest proovist, %
8:46 1a	0,145	3,0	10	30,46	12	4,38	0,64	0,62	-	-
8:46 1b	0,14	2,9	1	2,94	12	4,38				
8:46 2a	0,15	3,2	10	31,51	12	4,65				
8:46 2b	0,12	2,5	1	2,52	12	4,65				
9:44 1a	0,11	2,3	10,0	23,11	12	4,37	0,47	0,43	30,54	0,00
9:44 1b	0,085	1,8	1,0	1,79	12	4,37				
9:44 2a	0,095	2,0	10,0	19,96	12	4,62				
9:44 2b	0,08	1,7	1,0	1,68	12	4,62	0,39	0,43	30,54	0,00
12:04 1a	0,1	2,1	10,0	21,01	12	4,32	0,43	0,40	7,87	7,87
12:04 1b	0,07	1,5	1,0	1,47	12	4,32				
12:04 2a	0,09	1,9	10,0	18,91	12	4,65				
12:04 2b	0,065	1,4	1,0	1,37	12	4,65				
14:24 1a	0,095	2,0	10,0	19,96	12	4,88	0,36	0,33	23,10	16,53
14:24 1b	0,055	1,2	1,0	1,16	12	4,88				
14:24 2a	0,07	1,5	10,0	14,71	12	4,31				
14:24 2b	0,05	1,1	1,0	1,05	12	4,31	0,30	0,33	23,10	16,53

**Tabel C.1.3.** Sulgja nõelkõie proovide andmed kolmandal katsepäeval 07.03.2015

Aeg, paralleel	Lugem	Sisaldus proovis, mg/m <sup>3</sup>	Lahjendus	Sisaldus, mg/m <sup>3</sup>	Aeg, min	Õhu vooluhulk, l/min	Kontsentratsioon, mg/m <sup>3</sup>	Kontsentratsioon, mg/m <sup>3</sup>	Kontsentratsiooni muutus algproovist, %	Kontsentratsiooni muutus eelmisest proovist, %
8:03 1a	0,04	0,9	1	0,90	26,5	4,21	0,01	0,01	-	-
8:03 1b	0	0,0	1	0,00	26,5	4,21				
8:03 2a	0,035	0,8	1	0,78	26,5	4,74				
8:03 2b	0	0,0	1	0,00	26,5	4,74				
9:12 1a	0,11	2,5	10,0	24,66	12,0	4,28	0,53	0,50	0,00	0,00
9:12 1b	0,105	2,4	1,0	2,35	12,0	4,28				
9:12 2a	0,11	2,5	10,0	24,66	12,0	4,67				
9:12 2b	0,065	1,5	1,0	1,46	12,0	4,67	0,47	0,50	0,00	0,00
11:32 1a	0,055	1,2	10,0	12,33	12,0	4,47	0,25	0,27	46,23	46,23
11:32 1b	0,06	1,3	1,0	1,35	12,0	4,47				
11:32 2a	0,06	1,3	10,0	13,45	12,0	4,36				
11:32 2b	0,05	1,1	1,0	1,12	12,0	4,36				
13:56 1a	0,32	7,2	1,0	7,17	15,0	4,33	0,11	0,12	75,75	54,91
13:56 1b	0,01	0,2	1,0	0,22	15,0	4,33				
13:56 2a	0,38	8,5	1,0	8,52	15,0	4,78				
13:56 2b	0,025	0,6	1,0	0,56	15,0	4,78	0,13	0,12	75,75	54,91

**Tabel C.2.3.** Tups-rohtliilia proovide andmed kolmandal katsepäeval 07.03.2015

Aeg, paralleel	Lugem	Sisaldus proovis, mg/m <sup>3</sup>	Lahendus	Sisaldus, mg/m <sup>3</sup>	Aeg, min	Õhu vooluhulk, l/min	Kontsentratsioon, mg/m <sup>3</sup>	Kontsentratsioon, mg/m <sup>3</sup>	Kontsentratsiooni muutus algproovist, %	Kontsentratsiooni muutus eelmisest proovist, %
8:41 1a	0,09	2,0	10	20,18	12	4,21	0,43	0,43	-	-
8:41 1b	0,06	1,3	1	1,35	12	4,21				
8:41 2a	0,105	2,4	10	23,54	12	4,74				
8:41 2b	0,045	1,0	1	1,01	12	4,74				
9:42 1a	0,18	4,0	10,0	40,36	12	4,67	0,76	0,75	0,00	0,00
9:42 1b	0,1	2,2	1,0	2,24	12	4,67				
9:42 2a	0,16	3,6	10,0	35,87	12	4,28				
9:42 2b	0,11	2,5	1,0	2,47	12	4,28	0,75	0,75	0,00	0,00
12:02 1a	0,12	2,7	10,0	26,91	12	4,47	0,53	0,52	30,63	30,63
12:02 1b	0,06	1,3	1,0	1,35	12	4,47				
12:02 2a	0,115	2,6	10,0	25,78	12	4,36				
12:02 2b	0,06	1,3	1,0	1,35	12	4,36				
14:22 1a	0,08	1,8	10,0	17,94	12	4,33	0,36	0,37	50,24	28,28
14:22 1b	0,045	1,0	1,0	1,01	12	4,33				
14:22 2a	0,095	2,1	10,0	21,30	12	4,78				
14:22 2b	0,035	0,8	1,0	0,78	12	4,78				

**Tabel C.1.4.** Sulgja nõelkõie proovide andmed neljandal katsepäeval 09.03.2015

Aeg, paralleel	Lugem	Sisaldus proovis, mg/m <sup>3</sup>	Lahjendus	Sisaldus, mg/m <sup>3</sup>	Aeg, min	Õhu vooluhulk, l/min	Kontsentratsioon, mg/m <sup>3</sup>	Kontsentratsioon, mg/m <sup>3</sup>	Kontsentratsiooni muutus algproovist, %	Kontsentratsiooni muutus eelmisest proovist, %
8:02 1a	0,05	1,1	1	1,09	25	4,71				
8:02 1b	0	0,0	1	0,00	25	4,71	0,01	0,01	-	-
9:12 1a	0,13	2,8	10,0	28,32	12	4,71				
9:12 1b	0,12	2,6	1,0	2,61	12	4,71	0,55	0,55	0,00	0,00
11:32 1a	0,06	1,3	10,0	13,07	12	4,80				
11:32 1b	0,055	1,2	1,0	1,20	12	4,80	0,25			
11:32 2a	0,06	1,3	10,0	13,07	12	4,80				
11:32 2b	0,075	1,6	1,0	1,63	12	4,80	0,26	0,25	54,05	54,05
13:55 1a	0,38	8,3	1,0	8,28	16	4,72				
13:55 1b	0,04	0,9	1,0	0,87	16	4,72	0,12			
13:55 2a	0,4	8,7	1,0	8,71	16	4,76				
13:55 2b	0,06	1,3	1,0	1,31	16	4,76	0,13	0,13	76,91	49,76

**Tabel C.2.4.** Tups-rohtliilia proovide andmed neljandal katsepäeval 09.03.2015

Aeg, paralleel	Lugem	Sisaldus proovis, mg/m <sup>3</sup>	Lahjendus	Sisaldus, mg/m <sup>3</sup>	Aeg, min	Õhu vooluhulk, l/min	Kontsentratsioon, mg/m <sup>3</sup>	Kontsentratsioon, mg/m <sup>3</sup>	Kontsentratsiooni muutus algproovist, %	Kontsentratsiooni muutus eelmisest proovist, %
8:31 2a	0,075	1,6	10	16,34	16	4,79				
8:31 2b	0,065	1,4	1	1,42	16	4,79	0,23	0,23	-	-
9:42 2a	0,14	3,1	10,0	30,50	12	4,79				
9:42 2b	0,14	3,1	1,0	3,05	12	4,79	0,58	0,58	0,00	0,00
12:00 1a	0,1	2,2	10,0	21,79	12	4,80				
12:00 1b	0,1	2,2	1,0	2,18	12	4,80	0,42			
12:00 2a	0,1	2,2	10,0	21,79	12	4,80				
12:00 2b	0,095	2,1	1,0	2,07	12	4,80	0,41	0,42	28,88	28,88
14:22 1a	0,045	1,0	10,0	9,80	12	4,72				
14:22 1b	0,12	2,6	1,0	2,61	12	4,72	0,22			
14:22 2a	0,055	1,2	10,0	11,98	12	4,76				
14:22 2b	0,045	1,0	1,0	0,98	12	4,76	0,23	0,22	61,78	46,26

**Tabel C.1.5.** Sulgja nõelkõie proovide andmed viiendal katsepäeval 10.03.2015

Aeg, paralleel	Lugem	Sisaldus proovis, mg/m <sup>3</sup>	Lahjendus	Sisaldus, mg/m <sup>3</sup>	Aeg, min	Õhu vooluhulk, l/min	Kontsentratsioon, mg/m <sup>3</sup>	Kontsentratsioon, mg/m <sup>3</sup>	Kontsentratsiooni muutus algproovist, %	Kontsentratsiooni muutus eelmisest proovist, %
9:30 1a	0,08	1,9	1	1,91	25	4,79	0,02	0,02	-	-
9:30 1b	0,03	0,7	1	0,72	25	4,79				
9:30 2a	0,13	3,1	1	3,11	25	4,79				
9:30 2b	0,01	0,2	1	0,24	25	4,79				
10:38 1a	0,125	3,0	10,0	29,90	12	4,79	0,62	0,66	0,00	0,00
10:38 1b	0,25	6,0	1,0	5,98	12	4,79				
10:38 2a	0,145	3,5	10,0	34,69	12	4,79				
10:38 2b	0,2	4,8	1,0	4,78	12	4,79	0,69	0,66	0,00	0,00
15:32 1a	0,1	2,4	10,0	23,92	12	4,79	0,54	0,57	12,38	12,38
15:32 1b	0,29	6,9	1,0	6,94	12	4,79				
15:32 2a	0,11	2,6	10,0	26,32	12	4,79				
15:32 2b	0,37	8,9	1,0	8,85	12	4,79	0,61	0,57	12,38	12,38

**Tabel C.2.5.** Tups-rohtliilia proovide andmed viiendal katsepäeval 10.03.2015

Aeg, paralleel	Lugem	Sisaldus proovis, mg/m <sup>3</sup>	Lahjendus	Sisaldus, mg/m <sup>3</sup>	Aeg, min	Õhu vooluhulk, l/min	Kontsentratsioon, mg/m <sup>3</sup>	Kontsentratsioon, mg/m <sup>3</sup>	Kontsentratsiooni muutus algproovist, %	Kontsentratsiooni muutus eelmisest proovist, %
10:09 1a	0,07	1,7	10	16,75	18	4,79	0,25			
10:09 1b	0,2	4,8	1	4,78	18	4,79				
10:09 2a	0,095	2,3	10	22,73	18	4,74	0,30	0,28	-	-
10:09 2b	0,125	3,0	1	2,99	18	4,79				
11:10 1a	0,18	4,3	10,0	43,06	12	4,79	0,96			
11:10 1b	0,05	1,2	10,0	11,96	12	4,79				
11:10 2a	0,19	4,5	10,0	45,45	12	4,79	0,90	0,93	0,00	0,00
11:10 2b	0,27	6,5	1,0	6,46	12	4,79				
16:00 1a	0,17	4,1	10,0	40,67	12	4,79	0,80			
16:00 1b	0,215	5,1	1,0	5,14	12	4,79				
16:00 2a	0,18	4,3	10,0	43,06	12	4,79	0,82	0,81	12,86	12,86
16:00 2b	0,18	4,3	1,0	4,31	12	4,79				