

Tartu Ülikool  
Bioloogia-Geograafiateaduskond  
Botaanika ja ökoloogia Instituut

Jaak Sõber

**Osooni lisamine ja selle mõju ameerika haavale (*Populus tremuloides*)  
katses "Aspen FACE"**

Magistritöö

Juhendaja: teadur Priit Kupper, PhD

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Instituudi juhataja:

## Sisukord

1. Sissejuhatus.....	3
1.1 Välikatsete süsteem,„FACE” .....	3
1.2 Osooni kontsentratsioon välisõhus ja osooni mõju puudele .....	5
2. Materjal ja meetodika .....	7
2.1 Olemasolev FACE meetodika ja kavandatud eksperimendi disain .....	7
2.2 Taimne materjal .....	8
2.3 Mõõtmised ja andmetöötlus .....	8
3. Tulemused.....	12
3.1 Osooni lisamise tehnoloogia .....	12
3.2 Osooni kontsentratsiooni jaotus katseringides .....	14
3.3 Muud probleemid, mis ületati katse täpsuse tagamisel .....	16
3.4 Osooni kontsentratsiooni ühtluse hinnang surnud puude hulga järgi .....	17
3.5 Ameerika haava kloonide kasv ja produktiivsus .....	19
3.6 Lehtede klorofüllisisaldus .....	22
4. Arutelu .....	23
Kokkuvõte .....	27
Summary .....	28
Tänuõnad .....	29
Kasutatud kirjandus .....	30

## **1. Sissejuhatus.**

Üle ühe kolmandiku maailma maismaast on kaetud metsade või puistutega. Süsihappegaasi ja maapinna lähedase osooni sisalduses toimub kiire kasv, millest on kirjutatud mitmeid kokkuvõtteid (Fowler et al. 1999, Stott et al. 2000, Ryerson et al. 2001). On saanud selgeks, et CO<sub>2</sub> ja O<sub>3</sub>-ga manipuleerimise eksperimendid metsas kasvavatel puudel annavad olulist infot biosfääri ja atmosfääri vastastikuste interaktsioonide ja süsiniku varude kohta metsa ökosüsteemides. Ka on metsad võimelised säilitama orgaanilist süsinikku pikaks ajaks, seda seoses puumassis ja pinnases oleva süsiniku varude suhteliselt aeglase ringkäiguga (Dixon et al. 1994, Turner et al. 1995).

Samal ajal on metsas läbiviidavad katsed keerulised teostada, seda eelkõige puude suuruse, kõrguse, pikaajalisuse ja teiste faktorite tõttu. Eksperimendid seemikutega ei näita alati samu vastusreaktsioone, mida täheldatakse täiskasvanud puude puhul, kuna viimased erinevad seemikutest nii füsioloogia, morfoloogia kui keskkonna stresside taluvuse poolest (Lee & Jarvis 1996, Saxe et al. 1998).

Et uurida suureneva süsihappegaasi või ka erinevate saasteainete mõju taimedele, kasutatakse algselt põhiliselt mingit tüüpi suletud ruumi või kambrit. Hiljem tulid kasutusele ülalt avatud nn. "open-top" tüüpi kambrit (Lee & Barton 1993, Saxe et al. 1998, Allen et al. 1992). Kambrite puuduseks on kunstlikud muutused mikroklimaatilistes tingimustes, mis võivad taimede elutalitlust oluliselt mõjutada (McLeod et al. 1999, Olszyk et al. 1986b). Eriti puudutab see kambri sisest temperatuuri, mis võib olla enam kui 3<sup>0</sup> C looduslikust kõrgem (Wang et al. 1995). Temperatuur kambrites võib olla kõrgem isegi sellel juhul, kui kasutatakse ventilaatoreid või soojust väljajuhtimist radiaatorite abil (Heagle et al. 1973, Kimball et al. 1986, Drake et al. 1989). On näidatud ka, et kambrit põhjustavad muutusi puude kujus ja produktsioonis (Tissue et al. 1996, Murray et al. 1996).

### **1.1 Välikatsete süsteem "FACE"**

Alternatiivina suletud või ülalt avatud kambrite katsetele asuti kaheksakümnendatel aastatel välja töötama meetodikat, kus gaase lisatakse mingil maa-alal väliskeskkonnas, tagades seal

lisatava gaasi kontsentratsiooni kontrolli, samal ajal aga mitte muutes ülejäänud keskkonnaparameetreid.

Esimesed seda tüüpi katsed püstitati Hollandis (Mooi & van der Zalm 1985) ja Inglismaal (Greenwood et al. 1982, McLeod 1995), uurimaks rohttaimede reaktsioone kõrgendatud O<sub>3</sub> ja SO<sub>2</sub> keskkonnas. Seejärel hakati kõiki sarnaseid süsteeme kasutama ka CO<sub>2</sub> lisamiseks ja nimetama neid FACE (free-air carbon dioxide enrichment) tüüpi eksperimentideks.

FACE-tüüpi eksperimendi eripärad puude jaoks:

1. katseala peab olema piisavalt suure pinnaga (üle 100 m<sup>2</sup>), et võimaldada intensiivset proovide võtmist taimede eluaja vältel (kaasa arvatud väljajuurimine), nii et see ei häiriks katse terviklikku ülesehitust.
2. Soovitav on alustada katset noorte puudega, arvestades katse kestuseks 10-15 aastat, s.o. kuni puude täiskasvanuks saamiseni.
3. Soovitav on kasutada mitmeid taimeliike või kloone, mis erinevad oma vastusreaktsioonide poolest manipuleeritavas gaasikeskkonnas (Long et al. 2004, Karnosky et al. 2006).

Esimesed CO<sub>2</sub> - ga rikastamise süsteemid hakkasid tööle Arizonas, USA (Kimball et al. 1995) ja Zurichis, Sveits (Hebeisen et al. 1997). Itaallased seevastu on välja töötanud oma erineva süsteemi, mis annab häid tulemusi madalakasvuliste taimede puhul (Miglietta et al. 2001, Okada et al. 2001) ja on oma madalama maksumuse tõttu levimas üle maailma. Puude uurimiseks peetakse seni parimaks USA-s Brookhaveni laboratooriumides (Brookhaven National Laboratories, edaspidi "BNL") välja töötatud süsteemi (Hendrey et al. 1993, Lewin et al. 1994, Hendrey et al. 1999), mis annab parima keskkonnatingimuste kontrolli suurema ruumalaga katselappide puhul. Esimene selline süsteem töötab Norh Carolinas, USA (edaspidi „FACTS1”), alates 1995. a. ja seal uuritakse kõrgendatud [CO<sub>2</sub>] (550 ppm) mõju männile (*Pinus taeda* L).

Kõrgendatud CO<sub>2</sub> lisamise meetoodika FACE katsetes on välja töötatud küllalt suure detailsusega (Hendrey et al. 1999). Esimene FACE süsteem, kus puudele peale CO<sub>2</sub> ka osooni lisama hakati, alustas 1997. a Wisconsinis, USA (edaspidi "Aspen FACE").

Olemasoleva meetoodika kohandamine osooni lisamiseks oli üheks minu tegevusvaldkonnaks kui töötasin "Aspen FACE" katse juures aastatel 1997-2006 ja käesolev magistritöö ongi valminud sealsete materjalide põhjal.

Tingituna osooni väga kõrge reaktiivsusest CO<sub>2</sub>-ga võrreldes ja lisatava gaasi väga väikesest kontsentratsioonist on raske saavutada sama ühtlast gaasi kontsentratsiooni jaotust kui süsihappegaasi puhul. BNL poolt välja töötatud hindamise kriteerium erinevate FACE katsete võrdlemiseks summeerib selle aja, mille jooksul gaasi kontsentratsioon on mitte rohkem kui 10 või 20 % kaugusel soovitud eesmärgist. Kuni 20 % erinevust eesmärgist loetakse veel heaks tulemuseks. Osooni puhul on seda saavutada palju keerulisem kui süsihappegaasi puhul.

## 1.2 Osooni kontsentratsioon välisõhus ja osooni mõju puudele.

Tehtud uuringud näitavad, et koos loodusliku [CO<sub>2</sub>] tõusuga on põhjapoolkeral kasvanud ka loodusliku maalähedase (troposfäärilise) O<sub>3</sub> kontsentratsioon. Tõus on olnud mõnedel andmetel 35% viimase saja aastaga (IPCC Climate Change 2001), teiste allikate põhjal 1 - 2% aastas (Keeling et al. 1995, Mohnen et al 1993, Fowler et al. 1998, Stevenson et al. 1998).

Osooni kontsentratsiooni tõus mõjub negatiivselt nii metsa (McLaughlin et al. 1995, Barnard et al. 1991, Chappelka et al. 1998, Hogsett et al. 1997, Karnosky et al. 1999, King et al. 2001, Karnosky et al. 2003), kui ka põllumajanduskultuuride (Chameides et al. 1994, Dickson et al. 2001, Isebrands et al. 2001, Yamaji et al. 2003) produktioonile. Esimesed seda tüüpi teated pärinevad USA kõige enam reostatud Los Angelese piirkonna põldudel juba aastast 1944 (Middleton et al. 1950). Juba 50-ndatest aastatest on hulgaliselt andmeid tubaka ja viinamarja lehtede osoonikahjustuste kohta (Rich et al. 1969, Darley et al. 1961, Menser et al. 1966). Sellest ajast pärineb ka osoonile ülitundliku tubakasordi Bel\_W3 avastamine, mis on nüüd maailmas tuntumaid osooni bioinkaatoreid (Heggstad et al. 1962).

On kirjeldatud olulisi lehtede kahjustusi väga erinevatel taimedel (Pääkönen et al. 1998, Bergmann et al. 1999, Matyssek & Innes 1999, Wustman et al. 2001, Oksanen et al. 2001, De Temmerman et al. 2002, Yamaji et al. 2003) ning saagikuse ja kasvu vähenemist (Matyssek & Innes 1999, Dickson et al. 2001, Isebrands et al. 2001, De Temmerman et al. 2002, Yamaji et al. 2003). Tundlikumate puuliikide, nagu valge männi (*Pinus strobus*) ja ameerika haava (*Populus tremuloides*), iga-aastase produktiivsuse kaod on 25-35%, kõrge [O<sub>3</sub>]-ga suvedel ka kuni 50% (Hogsett et al. 1997). Väheneb ka lehtede, okaste ja juurte pind ning okste kasv (Adams et al. 1989, Taylor et al. 1994, Karnosky et al. 1996, Hogsett et al. 1997, Noormets et al. 2001 b).

Osoon siseneb lehtedesse avatud õhulõhede kaudu lehe ja keskkonna vahelise normaalse gaasivahetuse käigus. Lehte sisenenud  $O_3$  (või mõni oksüdeerimisreaktsiooni vaheprodukt, nagu OH radikaal või vesinikperoksiid) kahjustab rakke (eelkõige rakumembraanide kaudu). Kui rakud surevad, võib näha kahjustuste sümptome ka lehe pinnal. Esimesteks muutusteks lehtede fotosünteesiaparatis on Rubisco hulga ja aktiivsuse ning klorofüllis sisalduse vähenemine (Moore et al. 1999, Gagnon et al. 1992, Noormets et al. 2001b, Wustman et al. 2001, Yamaji et al. 2003, ). Otseselt on mõõdetav ka õhulõhede juhtivuse vähenemine (Oksanen & Saleem 1999, Noormets et al. 2001b, Wustman et al. 2001, Long & Naidu 2002, Yamaji et al. 2003). Samuti on kirjeldatud antiosüdantide ja teiste nn. kaitseainete hulga muutumist (Lindroth et al. 1993, 1997, Wustman et al. 2001). Tundlikkus osooni mõju suhtes erineb liigiti ja liigisiselt, olles genotüübiti erinev. (Kull et al. 1996, Martin et al. 2001). Osa liike on kõrgendatud  $[O_3]$  suhtes palju tundlikumad, seda nii nähtava kahjustuse ulatuse kui kahjustusi tekitava  $[O_3]$  alampiiri suhtes. Teised keskkonnatingimused, nagu temperatuur, õhu ja mulla niiskusesisaldus, mulla toitainete sisaldus, võivad modifitseerida osooni mõju (Pääkonen et al 1998).

Lisaks produktsiooni vähendamisele mõjutab troposfäärse osooni tase ka süsiniku ringet koosluses, vähendades pinnasesse minevat süsiniku voogu, ja selle voo kvaliteeti (Coleman et al. 1995b).

Osoneerimist võimaldav "Aspen FACE" eksperiment pakub suurt huvi ka seetõttu, et töid, mis käsitleksid  $CO_2$  ja osooni koosmõju puude talitlusele ja kasvule, on tänaseni ilmunud suhteliselt vähe.

Käesolevas magistritöös:

1) Võetakse kokku metoodiline töö, mis tehti osooni lisamiseks FACE tüüpi katsetes. Eesmärgiks on kirjeldada töötavat fumigeerimissüsteemi, hinnata  $O_3$  kontsentratsiooni jaotust katseringides, selgitada välja tingimused, millal fumigeerimist edukalt teostada ei saa, samuti hinnata fumigeerimise edukust katseringide erinevates osades puude suremuse põhjal.

2) Uuritakse osooni ja süsihappegaasi mõju erinevate ameerika haava genotüüpide kasvule. Eesmärgiks on välja selgitada, kas ja kuidas muutub genotüüpide produktiivsuse pingerida  $O_3$  ja  $CO_2$  kõrgendatud kontsentratsioonide mõjul, ning analüüsida nende muutuste põhjusi.

## 2. Materjal ja metoodika.

### 2.1 Olemasolev FACE metoodika ja kavandatud eksperimendi disain.

FACE tehnoloogia ja katselapi kuju areng vertikaalsete torude ringilähedaseks struktuuriks on esimesena kirjeldatud Allen et al. (1992) poolt. "Aspen FACE" puhul on katseala suuruseks on 32 ha, millele on paigutatud 12 korrapärase kaheksanurga kujulist puudega kaetud ala (3 kontrolltöötusega, 3 kõrgendatud [CO<sub>2</sub>]-ga, 3 kõrgendatud [O<sub>3</sub>]-ga ja 3 kõrgendatud [CO<sub>2</sub>+O<sub>3</sub>]-ga). BNL disain kasutab 32 vertikaalset ventilatsioonitoru, mis on ühendatud 34 m läbimõõduga rõnga kujulise jaotustoruga (nn. plenum), mis on valmistatud 38 cm läbimõõduga PVC-torust. Vertikaalsed torud on kõik ühendatud jaotustoruga individuaalsete klappide kaudu. Radiaalne puhur asetseb 5m väljaspool jaotustoru, sissevõtu ava ringist eemale suunatud, et minimiseerida mõju fumigeerimisele. Puhur kindlustab õhuvoolu ca. 100 m<sup>3</sup>/min rõhul 2 kPa. Fumigeeritava ala diameeter on 30 m ning ringid asuvad teineteisest vähemalt 100 m kaugusel. See on vajalik, et vältida gaaside ülekandumist ühelt ringilt teisele tuule mõjul. Iga ring on jagatud ida ja lääne pooleks ning läänepoolne külg on omakorda jagatud põhja ja lõuna veerandiks. Ida poole peal kasvavad ameerika haava (*Populus tremuloides*) kloonid 8L, 42E, 216, 259, ja 271. Loode veerandis kasvavad segamini suhkruvaher (*Acer saccharum*) ja ameerika haab (kloon 216) ning edela veerandis paberikask (*Betula papyrifera*) ja ameerika haab (kloon 216). Katsevariante on neli :

1. kontroll (looduslik [CO<sub>2</sub>] ja looduslik [O<sub>3</sub>]);
2. kõrgendatud [CO<sub>2</sub>] (560 ppm);
3. kõrgendatud [O<sub>3</sub>]
4. kõrgendatud [CO<sub>2</sub>] ja [O<sub>3</sub>] kombinatsioon.

Looduslik päevane [CO<sub>2</sub>] oli 1997. a. keskmiselt 360 ppm (parts per million) ja muutus suhteliselt aeglaselt, öine [CO<sub>2</sub>] oli küllaltki varieeruv, sõltuvalt tuulest ja temperatuurist, keskmiselt 370 – 500 ppm vahel. Kõrgendatud [CO<sub>2</sub>] tähendas 200 ppm üle loodusliku ehk 560 ppm.

Looduslik päevane [O<sub>3</sub>] troposfääris sõltub paljudest teguritest ning muutub üsna suurtes piirides. Üheks oluliseks teguriks "Aspen FACE" asukoha valikul oli piisav kaugus suurtest linnadest ja tööstusobjektidest. On teada, et suurlinnade reostatud õhk võib sobivate püsivate

tuulte korral kanduda rohkem kui 1000 km kaugusele ja põhjustada mõnetunniseid kuni mõnepäevaseid loodusliku [O<sub>3</sub>] tõuse. Olulisteks faktoriteks on ka õhu temperatuuri ja niiskuse kiired muutused. Suve keskmine [O<sub>3</sub>] oli "Aspen FACE" alal, mida loetakse kõige puhtama õhuga piirkonnaks mandri USA-s, 38 ppb (parts per billion). Umbes nädala jagu kogu vegetatsiooniperioodist avaldas mõju osooni reostus sellistest linnadest, nagu Chicago või Minneapolis (200-300 km kauguselt), tõstes päeva keskmise osooni kontsentratsiooni 60-80 ppm-ni. Päikeselistel kuumadel ilmadel oli normaalne [O<sub>3</sub>] 40-50 ppb. On teada, et harilikult on [O<sub>3</sub>] päeval käigul parabooli kuju (maksimumiga keskpäeva ajal). Kontsentratsiooni muutlikkuse tõttu kasutati konkreetset [O<sub>3</sub>] päevase käigu kõverat, mis oli mõõdetud 1987 a. Michiganis (Karnosky et al. 1996) ja modifitseeriti selle kõvera algparameetreid vastavalt "Aspen FACE" tingimustele igal hommikul. Arvuti programm muutis soovitava [O<sub>3</sub>] väärtusi ringi keskel iga tunni algul, nii et [O<sub>3</sub>] oleks 1.5 korda üle eeldatava loodusliku. See oli osooni eksperimendi kriitiline osa, kuna osooni ebahütlasest jaotusest (vt. tulemused) tingituna oli võimalus tugevate taime kahjustuste tekkeks.

## 2.2 Taimne materjal

Ameerika haava (*P. tremuloides* Michx.) kloonide pistoksad koguti Põhja-Ameerikale iseloomulikest lehtpuumetsadest Suure Järvistu piirkonnast (Dickson *et al.*, 2000). Kogutud haava pistoksi kasvatati esialgu kasvuhoones. 1997. a juuni algul istutati kuue kuu vanused (20–40 cm kõrgused) pistoksad 1m vahedega uurimisalal viljakasse mulda (lämmastikuisaldus 0.12 – 0.15%) (Kaakinen *et al.*, 2004). Istutatud puutaimi on fumigeeritud kõrgendatud CO<sub>2</sub> ja O<sub>3</sub> kontsentratsioonidega igal aastal alates 1998. a. Fumigeerimine algab pungade puhkemisega (mais) ja lõpeb lehtede langemisega (septembri lõpp, oktoobri algus). Eksperimendis on kasutatud viit haavaklooni: 8L, 42E, 271, 216 ja 259. Kaks nendest kloonidest 42E ja 259 olid lehekahjustuste järgi otsustades osoonile suhteliselt tundlikud, 271 ja 216 keskmise või vähese tundlikkusega ja 8L tolerantne (Karnosky *et al.*, 1996, Karnosky *et al.*, 2002).

## 2.3 Mõõtmised ja andmetöötlus.

„Aspen FACE” mõõtmiste alustalaks on gaasianalüsaatorid koos oma abisüsteemidega. Kasutusel olid LiCor CO<sub>2</sub> analüsaatorid LI-5262 ja Thermo Environmental O<sub>3</sub> analüsaatorid 49C koos imipumpade ja gaasivoogude jagamise süsteemiga. 49C on printsibiilt kahekanaliline spektrofotomeeter, mis töötab ultravioletti diapsoonis, kus osoonil on tugev



neeldumisriba, mõõtmistäpsus ületas  $\pm 1$  ppb. Torude materjalid (polüetüleen CO<sub>2</sub> ja teflon O<sub>3</sub> jaoks) olid valitud selliselt, et kaod torustikus oleks väiksemad kui 2%. Gaasianalüsaatoreid kaliibriti regulaarselt kord nädalas, Licori seadme puhul kahe erineva CO<sub>2</sub> kontsentratsiooniga testgaasi abil, ja osooni jaoks portatiivse osooni kalibraatori abil. Seda viimast kalibraatorit käisin kord aastas võrdlemas USA keskkonnakaitse agentuuri (EPA) sekundaarse standardiga.

Kontsentratsioonide lugemid võeti 1 sekundilise intervalliga CO<sub>2</sub> jaoks, (seoses proovi segunemisega voolikus ja analüsaatori mõõtekambris esindasid need mitte üle 4 s pikkust keskmistatud ajavahemikku). Osooni analüsaatori registreerimisintervall oli 4 s. Kasutati näitude keskmistamist juba osooni analüsaatori väljundis.

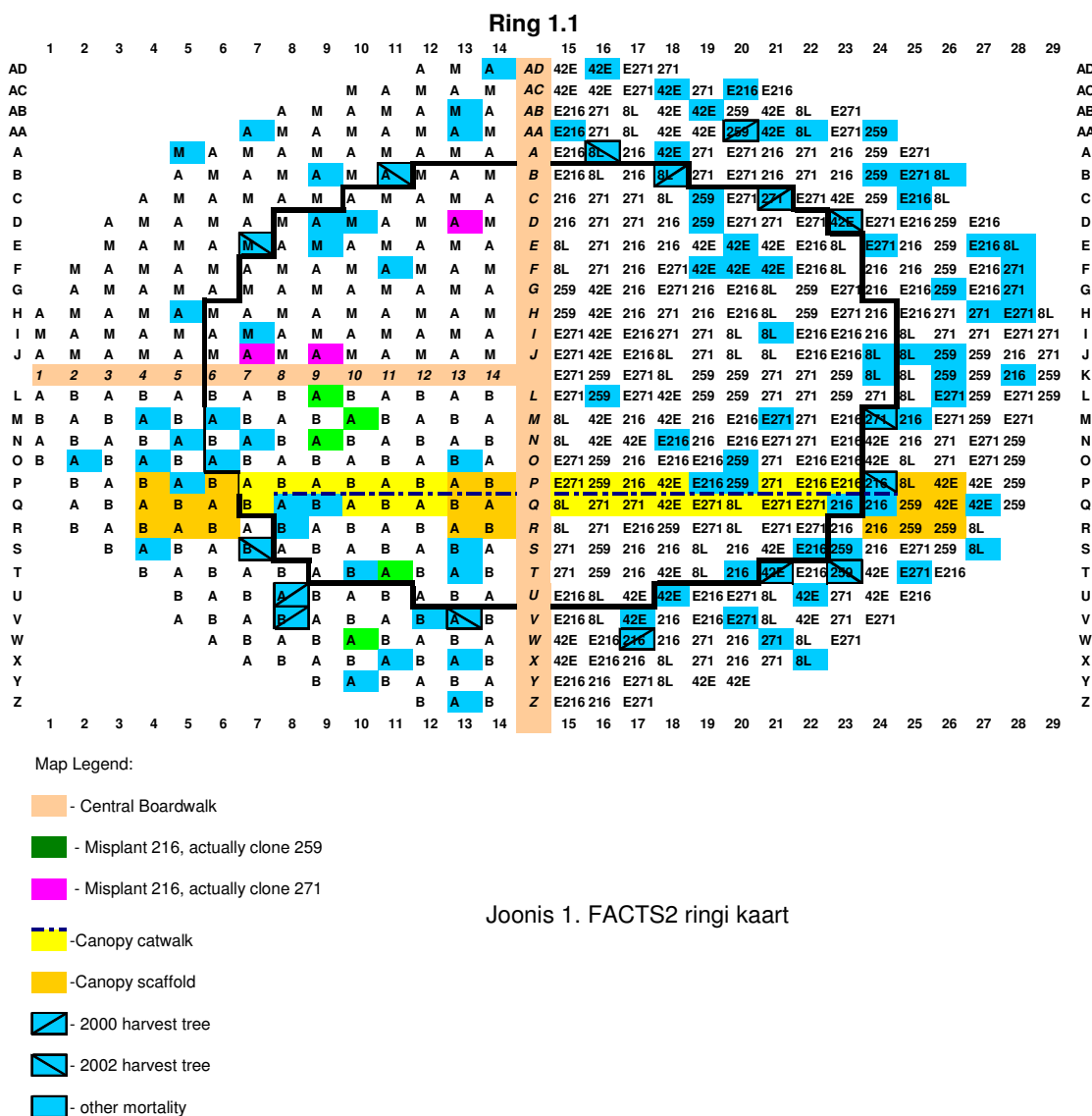
Andmekogumise alamsüsteem paiknes iga ringi lähedal eraldi kliimakontrolliga kuuris. Side juhtarvutiga toimus fiiberoptilise kaabli kaudu, et vältida võimalikke kahjustusi äikese korral. Sissetulevad käsud kas nõudsid mõõtmist andurite vahendusel või siis muutsid väliseadmete (klapid, kraanid, lülitid) seisundeid. Mõõdeti gaaside kontsentratsioone ringi sees, gaaside voolu kiirusi, õhu temperatuuri, niiskust, PAR-i (fotosünteesiliselt aktiivset radiatsiooni) ja päikese kogukiirgust. 200 m eemal asuvate gaasi analüsaatorite abil mõõdeti looduslikku CO<sub>2</sub> ja osooni kontsentratsioone. Lisaks ka toiteallikate, puhuri pöörlemise ja sisendgaasi rõhu andmed. Nende andmete alusel juhiti CO<sub>2</sub> ja osooni voogusid läbi mootoritega tüüritavate kraanide, aga ka gaaside sisse/välja lülitamist, puhureid ning liblikklappe vertikaalrustikus.

Arvuti kontrollis torustikku lisatava CO<sub>2</sub> ja O<sub>3</sub> kogust vastavalt tuule kiirusele ja gaasi kontsentratsioonile ringi keskel. Selleks kasutati empiirilist proportsionaalset-integraalset-differentsiaalset algoritmi (PID) (Lewin 1994). Teine algoritm, mis arvestab nii tuule suunda kui kiirust, kontrollib millistest vertikaalsetest torudest see gaasisegu väljub. Need kaks koos rakendatavat algoritmi lubavad hoida ringi sees vajalikku lisandgaasi kontsentratsiooni, samal ajal minimiseerides gaaside kulu.

Haabade kasvu hindamiseks mõõdeti igal hilissuvel puude tüvede diameetreid kahel erineval kõrgusel (10 ja 50 cm), kasutades nihkkaliibrit. Samuti mõõdeti mõõtelatiga puude kõrgust. Iga ringi jaoks kasutati puude identifitseerimiseks kaarti (joonis 1). Konkreetse puu asukoht on kaardil tähistatud ruuduga, number tähistab vastavat klooni, sinisega on märgitud surnud või välja juuritud puud. Pruun tähistab laudteed käimiseks, must kontuur eraldab intensiivse mõõtmise sisemist tsooni välisest, kus lisatavate gaaside kontsentratsioon ei ole veel tõenäoliselt stabiliseerunud. Puude surevust hinnati visuaalselt, sealjuures surnud puude

eemaldamisel ringist kaaluti nad. Iga ringi kaart kujutab endast MS Excel tabelit, mida on kerge igal aastal korrigeerida.

Haabade kasvu andmed kanti MS Access andmebaasi kindlas kokkulepitud formaadis, et võimaldada nende kasutamist kõigi eksperimendis osalejate poolt. Mõõdetud parameetrite keskmisi võrreldi Statistica 7.0 abil T-testiga. Olulisuse nivoo oli kõikidel juhtudel 0,05.



Joonis 1. FACTS2 ringi kaart

Et saada esmast ülevaadet osooni ruumilisest jaotusest ringi sees, kasutasin esimesel kahel aastal (1998-99) lihtsat omakonstrueeritud nn. multiport süsteemi. Roostevabast terasest 24 asendiga kraani külge oli ühendatud sammootor, mis lülitas kraani asendeid iga 30 s tagant. Kakskümmend neli 6 mm läbimõõduga teflonvoolikut olid paigutatud enamvähem ühtlaselt

üle ringi (1 m kõrgusel). Voolikute ühed otsad olid gaaside vastuvõtu lehtrite otsas, teised otsad paiknesid kraani küljes. Kraani ühise toru kaudu imes osooni analüsaator järjestikku õhku nendest 24-st kanalist ( tsükkel seega 12 minutit). Iga 30 s perioodi lõpus registreeriti osooni kontsentratsioon arvutis koos pordi koordinaatide ja kellaajaga (10 s vältel). Mõõtmise tarkvara oli minu enda kirjutatud, kasutades Borland Pascal tarkvara. Andmete keskmistamiseks, statistiliseks töötamiseks ja kontuurjooniste tegemiseks, kasutasin programmi Statistica 6.0 (Statsoft Inc, USA).

Tuule kiirust ja suunda mõõdeti firma Climatronics kopsik-anemomeetri ja tuulelipuga. Minimaalne mõõdetav tuule kiirus oli 0,3 m/s anemomeetri jaoks ja 0,4 m/s tuulelipu jaoks. Katseid tehti ka firma Gill Instruments sonic tüüpi anemomeetriga, mis mõõdab tuule kiirust ja suunda, määrates ultraheli impulsside liikumise aega saatjalt vastuvõtjale kahes risti asetsevas suunas, ja ei sisalda liikuvaid osi.

Klorofüllü sisalduse mõõtmine toimus portatiivse mõõtmisega Minolta SPAD-502 Chlorophyll Meter abil (Spectrum Technologies Inc). Mõõtmismeetod ise põhineb Ishida töö (Ishida et al. 1996), kes näitas, et SPAD väärtused korreleeruvad nii klorofüllü kui lämmastiku sisaldusega lehe pinnaühiku kohta.

### 3. TULEMUSED

#### 3.1 Osooni lisamise tehnoloogia.

Antud projekt oli 1997. a. esimene FACE maailmas, kus eksperimendi käigus oli vaja lisada sama torustiku kaudu 3-le ringile nii CO<sub>2</sub> kui O<sub>3</sub> korraga. Esmaseks ülesandeks oli selgeks saada, kuidas nende gaaside väga erinev reaktsioonivõime kõikvõimalike materjalidega, ja lisatavate gaaside kontsentratsioonide suur erinevus (200 ppm CO<sub>2</sub> puhul versus 0,05 ppm O<sub>3</sub> jaoks), võiksid mõjutada katse tulemusi. Vajaliku täpsuse tagamiseks katsetati fumigeerimisel paljusid tehnilisi variante. Alljärgnevalt kirjeldame tekkinud probleeme ja valitud lahendusi. Sellise detailsusastmega info ei sisaldu tavaliselt artiklite metoodikates, kuid ilma selleta pole võimalik uut katset käivitada.

Lisandgaasi kontsentratsiooni jaotumine katseringi sees sõltub suuresti sellest, kuidas toimub CO<sub>2</sub> ja osooni lisamine vertikaalsetest torudest:

##### A. Klapisüsteem.

Klapid, mis asetsevad vertikaalsete torude alumises otsas, avanevad ja sulguvad nii, et kindlustada gaasi vool ainult tuulepealselt küljelt. See vähendab oluliselt lisandgaasi tarbimist ja ka ohtu, et ühe katseringi mikrokliima hakkab mõjutama teisi, mis asetsevad alla tuult. Kui avada korraga kõik 16 klappi tuulepealsel küljel poolringis, siis on oht liiga suurte kontsentratsioonide tekkeks ringi servades, kus puutujad on peaaegu paralleelsed tuule suunaga (Lewin 1994). Selle vältimiseks lasime lisandid ringi 135 kraadi ulatuses (12 klappi), lisaks hoitakse kaare servast lugedes teine klapp suletud, mis jätab avatuks ainult 10 klappi 32-st. Selline konfiguratsioon määrati empiiriliste vaatluste põhjal erinevate tuule kiiruste ja turbulentsi korral.

##### A. Gaaside emiteerimine.

CO<sub>2</sub> puhul on võimalik gaasi emiteerimine ringi servades asuvate torude avadest ringi keskme suunas (näit. 2.5 cm laiused pilud 1/3 osale toru ümbermöödust). Torudest väljuv [CO<sub>2</sub>] on ca. 3 mahu % ja lahjenemine toimub umbes 1 m kauguseni väljalaske avadest. Puud, mis asuvad vertikaalsete torude ligiduses, moodustavad nn. puhvertsooni ja neid ei kasutata teadustöö eesmärgil. Osooni lisamisel olukord aga muutub. Torustikust väljuv [O<sub>3</sub>] on ca. 2000 ppb ja see on väga toksiline nii taimedele kui inimesele juba mõnekümne minutilise doosina. Seega oli tingimata vajalik lühendada väljuva [O<sub>3</sub>] lahjendamise aega ja ruumala. Selleks modifitseerisime nn. Walklate süsteemi (Walklate et al. 1996).

Vertikaalsed torud pöörati nii, et gaasi vool suunati ringi keskkohast eemale, kasutades selleks vertikaaltorudele paigutatud L-kujulisi plastmassist tõkkeid (joonis 2),



Joonis 2. Vertikaalne toru koos gaasi emiteerimise avade ja tõketega.

mis soodustas gaaside segunemist ja suunasid voo ka allapoole. Katsed proovide võtmisel gaasianalüsaatoriga ja ka suitsüküünaldegaga näitasid, et nii on tagatud gaaside rahuldav segunemine juba 0.5 m kaugusel torude väljalaskeavadest. Korraga jäeti avatuks 4-5 pilu. Vastavalt puude kasvamisele muudeti igal aastal avatud pilude vertikaalset konfiguratsiooni (mittevajalikud avad kaeti kleeplindiga).

### C. Tuule kiirus.

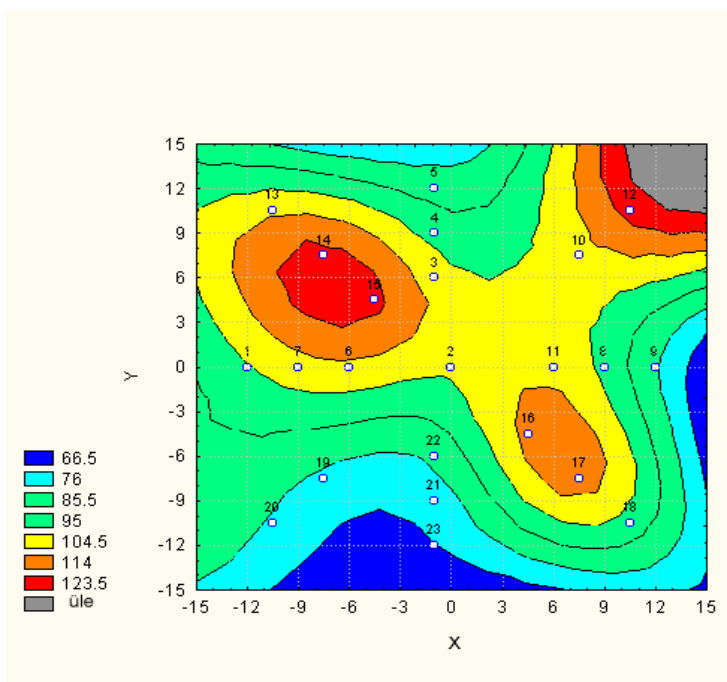
FACE süsteemid kogu maailmas töötavad rahuldavalt tuule kiiruste vahemikus 0,5 – 4 m/s. Tavaliselt on sellised tingimused 70-80 % suvisest päevasest ajast vegetatsiooniperioodi vältel. „Aspen FACE” paljude aastate keskmised tuulekiirused oli vahemikus 1,7-2 m/s.

Et gaasid tuulega ringile kanduksid, on pidevalt vaja teada tuule suunda. Tegelikult tuule suuna määramine muutub mitteusaldatavaks, kui tuule kiirus langeb alla 0.4 m/s (tavaliste anemomeetrite puhul). Ka võtab sellises olukorras vähemalt 40 sek aega, et muutused osooni väljavoolu hulgas jõuaks ringi keskel asuva andurini. Tundlikuma tuuleanduri (sonic tüüpi anduri) kasutamine ei parandanud fumigeerimise kontrolli. Seetõttu väga väikestel tuule kiirustel, alla 0,15 m/s (juhul kui tuule kiiruse andur seisis juba 20 sek), tuule suuna kontroll peatati ja avati iga teine klapp terve ringi perimeetri ulatuses. Selline tuulevaikus on kõige

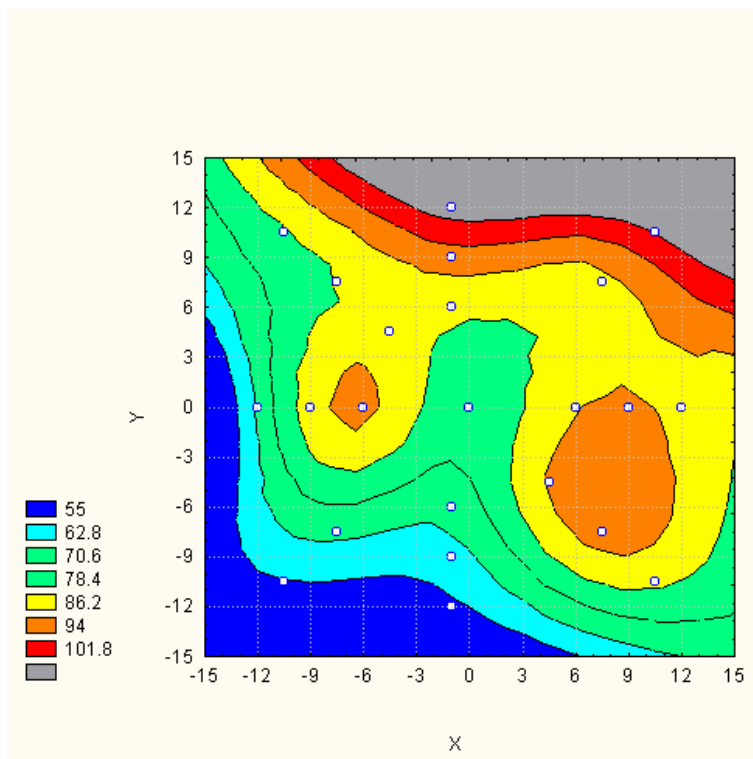
problemaatilisem olukord vabas õhus fumigeerimisel. Esiteks, sellises olukorras gaasi transport vertikaalsetest torudest välja on erinevates suundades erinev. Teiseks, gaasisegu transport on väga aeglane (teeb ka tagasiside gaasi kontsentratsiooni andurist arvutisse aeglaseks). Kolmandaks, õhu portsjonid, mis on erinevalt CO<sub>2</sub> või osooniga rikastatud (segamine puudub), liiguvad ebahühtlaselt läbi puudekoosluse. See võib osooni korral põhjustada visuaalselt jälgitavaid lokaalseid kahjustusi lehtedele.

### 3.2 Osooni kontsentratsiooni jaotus katseringides.

Metoodikas kirjeldatud multiport süsteemi abil hinnatud osooni kontsentratsiooni jaotumine ringides erineva tuule kiiruse korral on toodud joonistel 3 ja 4. Nõrgale ja mõõdukale tuulele vastavad tüüpilised osooni kontsentratsiooni jaotused näitavad, kui oluline on tuule mõju. X ja Y telje koordinaadid on meetrites, koordinaatidel 0,0 on ringi keskpunkt. Rahuldav [O<sub>3</sub>] jaotus on tähistatud roheline, helesinine (10-20 % alla normi) ja kollasega (10-20 % üle normi), tumesinine, pruun ja punane on väljaspool 20 % normi. Numbritega märgistatud väikesed ringikesed tähistavad gaasi proovide võtmise asukohti.



Joonis 3. Osooni profiil FACE ringis 1m kõrgusel, 12. sept. 98 17:00-18:00, tuule kiirus 0,9±0,3 m/s, suund 41±71 deg, looduslik [O<sub>3</sub>] 43 ppb, eesmärk [O<sub>3</sub>] 96 ppb, [O<sub>3</sub>]min=44ppb, [O<sub>3</sub>]max=241 ppb.



Joonis 4. Osooni profiil FACE ringis 1m kõrgusel, 15. sept. 98 12:00-13:00, tuule kiirus  $2,3 \pm 0,8$  m/s, suund  $21 \pm 114$  deg, looduslik  $[O_3]$  31 ppb, eesmärk  $[O_3]$  78 ppb,  $[O_3]_{\min}=44$ ppb,  $[O_3]_{\max}=164$  ppb.

Iga tunni algul antakse ette soovitud osooni kontsentratsioon ja arvutatakse selle tunni jaoks ajavahemik, millal süsteem suutis hoida tegelikku osooni kontsentratsiooni mitte kaugemal kui  $\pm 10\%$  või  $\pm 20\%$  soovitud kontsentratsioonist.

Multiport süsteemi abil saadud tulemused:

- A. Mõõduka tuule kiiruse korral (1-3 m/s, 1998. a. hooaja keskmine päeval ajal oli  $1,7 \pm 0,2$  m/s) püsib  $[O_3]$  (vahemikus ette antud kontsentratsioon  $\pm 10\%$ ) vähemalt 63 % kogu ajast ja (vahemikus ette antud kontsentratsioon  $\pm 20\%$ ) vähemalt 98 % kogu ajast. Nõrga tuule korral (alla 1m/s, mida esineb hooaja jooksul ca. 15% kogu ajast), on vastavad näitajad 36% kogu ajast ja 66% kogu ajast. Bioloogiliste mõõtmiste seisukohast loetakse  $[O_3]$ , mis on lähemal kui  $\pm 20\%$  etteantud kontsentratsioonile, heaks lähendiks.
- B. Nõrga tuule korral on suurem oht puude kahjustumiseks, kuna  $[O_3]$  maksimum on palju kõrgem.
- C. tugevama tuule korral annab rohkem tunda tuule suuna efekt, kus tuule pealsel küljel märgataval alal on  $[O_3]$  rohkem kui 30% üle eesmärgi ja tuule alusel küljel vastavalt

üle 30% alla eesmärgi. See oligi üheks põhjuseks, et bioloogiliste eksperimentide jaoks kasutati puid, mis asusid vähemalt 2,5 m seespool perimeetrit.

### **3.3 Muud probleemid, mis ületati katse täpsuse tagamisel.**

Lisandgaasi kontsentratsiooni reguleerimine süsteemis, andmete registreerimine ja salvestamine toimus kolme integreeritud alamsüsteemi poolt: tuule kiiruse & suuna ning gaasi kontsentratsioonide andurid, andmekogumissüsteem ning lisandgaasi kontrollprogramm. Kõigis nendes lülides on omad spetsiifilised vea tekke võimalused ja allikad.

Üheks esimeseks probleemiks oli reguleerivasse arvutisse mineva signaali hilinemine. Vooliku pikkus proovi võtmise pordist analüsaatorini ulatus 35 m-ni ja vooliku ruumala ligi 2 l-ni, mida vähendada ei õnnestu, kuna siis kasvab liiga suureks imemise takistus. Kuna optimaalne gaasivoolu kiirus läbi analüsaatorite küvettide oli mõlemal juhul ca. 1 ml/sek, oleks see tähendanud lubamatut näidu hilinemist. Väljapääsu leidsin, kasutades eraldiseisvat imemispumpa nii CO<sub>2</sub> kui O<sub>3</sub> ahelas. Lisapump tõmbas õhku kiirusega 10-20 l/min, analüsaatorid võtsid vajamineva õhu pumba sisendist üle stabiliseeriva takistuse (kapillaari). Nii saime gaasianalüsaatorite näitude hilinemise langetada 6-10 sekundini. Katse täpsus sõltus oluliselt ka gaaside kontsentratsioonide mõõtmise täpsusest. Ebastabiilse ilmastiku korral esineb märgatavaid [CO<sub>2</sub>] ja [O<sub>3</sub>] piike, kus näiteks 10 sekundilised kontsentratsiooni väärtused võivad ületada 1 min keskmist kuni 10 korda. Registreeritud gaasi kontsentratsioonid piikide ajal jäävad alati väiksemaks, kui nende tegelik maksimaalne väärtus (sõltuvalt piikide kestusest ja amplituudist) ehk signaali kuju moondub. Gaasi imemise süsteemi, analüsaatori parameetrite ja kontrollprogrammi korrigeerimisega saavutasin, et üle 6 sek kestvad piigid tulid registreeritult välja vähemalt 86% ulatuses oma tegelikust maksimaalsest väärtusest.

Probleeme oli ka [CO<sub>2</sub>] või [O<sub>3</sub>] kontrolli tagamisega gaaside emiteerimisel. Selgus, et gaase ei saa mitmel põhjusel alati lisada lihtsalt proportsionaalselt tuule kiirusega. Nendest põhjustest tähtsamad on õhu turbulents ja ajalised viivitused süsteemis. Täiustasin katse kontrollalgoritmi ning aitasin koostada kontroll programmi osa, mis võimaldas vaadata süsteemi käitumist olevikus ja minevikus ning kontrollalgoritmi vastavalt vajadusele klaviatuurilt korrigeerida. See võimaldas süsteemi operatiivset peenreguleerimist katse käigus. Uus kontrollalgoritm sisaldas ka võimalusi andmete koopiade tegemiseks ja alarmide (liiga kõrge/madal gaasi kontsentratsioon, temperatuur jne.), töölerakendamiseks. Seda viimast



on vaja, et ebastabiilsete ilmastiku olude korral või aparatuuri rikete tekkimisel operaatoril oleks võimalik programmi töösse käsitsi sekkuda.

### 3.4 Osooni kontsentratsiooni ühtluse hinnang surnud puude hulga järgi.

Joonisel 1 on musta kontuuriga eraldatud ringi sisemine ja välimine tsoon (väline tsoon paiknes [O<sub>3</sub>] emitteerivatele torudele lähemal kui 2,5 m). Üheks võimaluseks hinnata edukust osoneerimise edukust on võrrelda puude suremust sisemises ja välises tsoonis. Seda tehti 2005. a. suvel, võrreldes haava kõikide kloonide suremust erinevates tsoonides (tabel 1, joonis 5 ja 6).

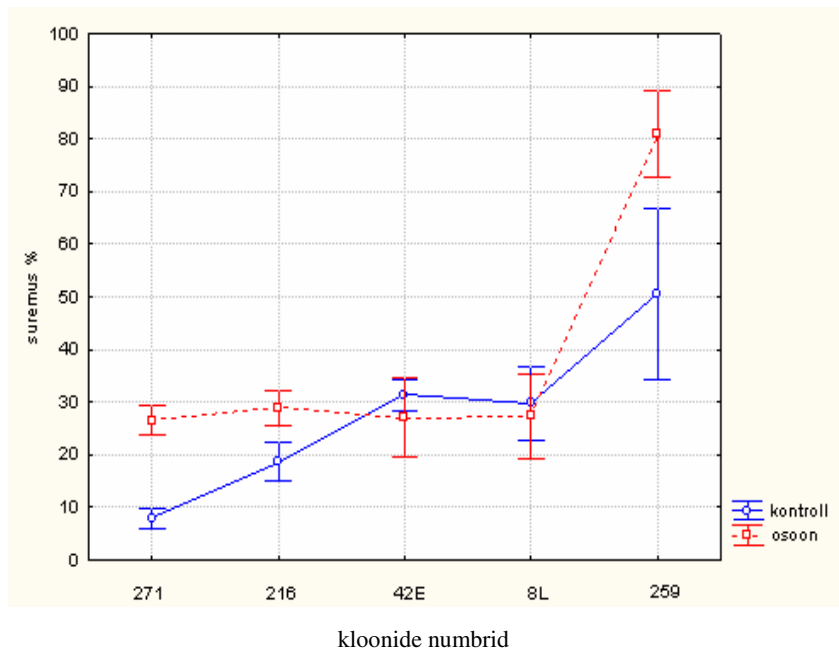
Tabel 1. Ameerika haava suremus FACE eksperimendis 2005. a.

	Haava suremus	keskmine±standard viga		Erinevuse olemasolu
kontrolltöötlus	väline tsoon	27,6	7,2	p=0.049 JAH
	sisemine tsoon	15,7	5,5	
osoonitöötlus	väline tsoon	38,1	10,7	p=0.017 JAH
	sisemine tsoon	18,0	7,6	
väline tsoon	kontrolltöötlus	27,6	7,1	p=0,197 EI
	osoonitöötlus	38,1	10,7	
sisemine tsoon	kontrolltöötlus	15,7	5,5	p=0.697 EI
	osoonitöötlus	18,0	7,6	

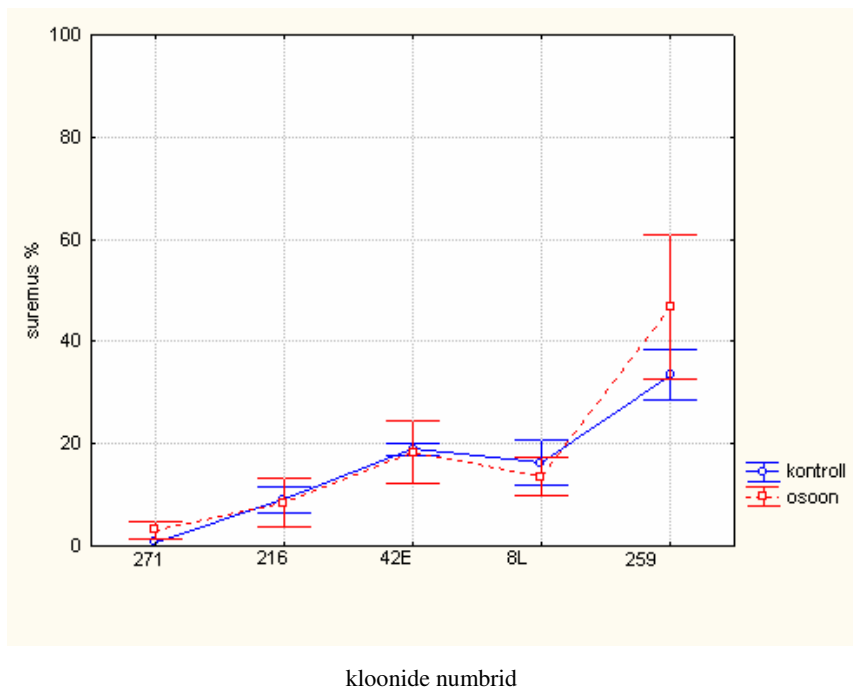
Tabelist 1 nähtub, et välisringides oli suremus statistiliselt oluliselt suurem kui siseringides. Kontrolltöötles oli välisringi suremus 1,8 korda ja osoonitöötleses 2,1 korda suurem kui siseringi oma. Nii välises kui sisemises tsoonis oli suremus osooni all kontrolltöötlesega võrreldes küll veidi suurem, aga osooni mõju suremusele ei olnud statistiliselt oluline kummaski tsoonis. Tendentsina on siiski märgatav, et osoon suurendab veelgi sise- ja välisringi vahelist suurt erinevust puude suremuses.

Vaadeldes suremust kloonide kaupa (joonis 5), on osoonile tundlik kloon 259 ilmselt tundlik ka kõikidele muudele kahjustavatele teguritele. Selle klooni puude suremus (50% välises tsoonis kontrollringis) ületab kõikide kloonide keskmise suremuse ligi 2 korda. Osoonile vähetundlik kloon 271 on vähem tundlik ka muudele teguritele, suremus keskosas nullilähedane ja ringi välises tsoonis ainult 7,9±2 %. Siiski on just nende kahe klooni

puhul täheldatav, et osoon suurendab suremust välises tsoonis (joonis 5), kuid mitte keskkosas (joonis 6).



Joonis 5. Ameerika haava suremus FACE eksperimendis katseringi välises tsoonis 2005. a. suvel kloonide kaupa, 3 ringi keskmine  $\pm$  standard viga.



Joonis 6. Ameerika haava suremus FACE eksperimendis katseringi keskmises tsoonis 2005. a. suvel kloonide kaupa, 3 ringi keskmine  $\pm$  standard viga.

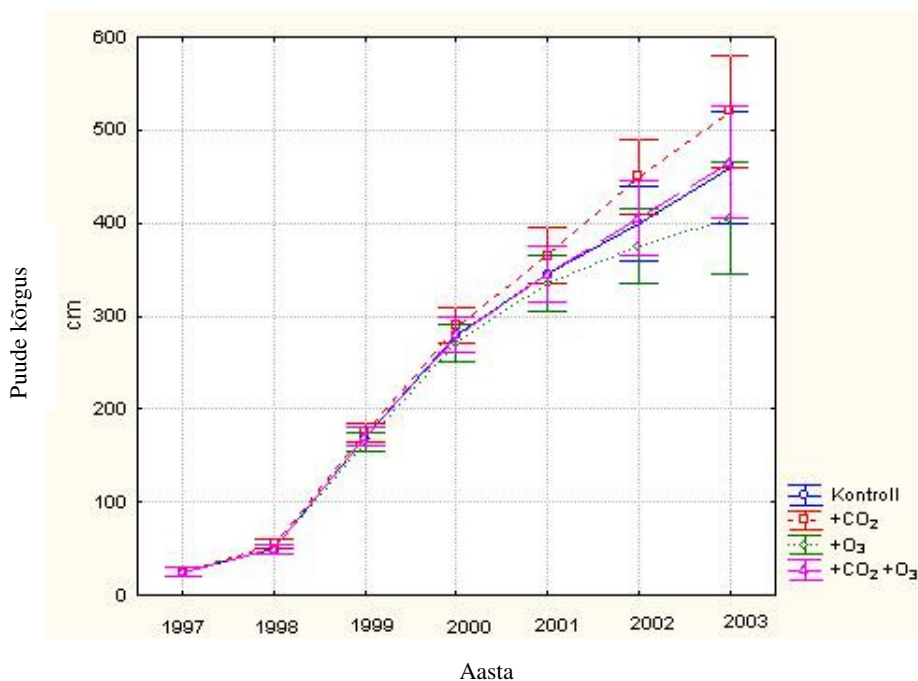
### 3.5 Ameerika haava kloonide kasv ja produktiivsus .

"Aspen FACE" eksperimendi käigus mõõtsime igal aastal haabade kasvu parameetreid. 2003 aastal võeti esimese 6 aasta tulemused kokku ja need on ka avaldatud (Karnosky et al., 2003, 2005). Joonistel 7 ja 8 on erinevate töötluste jaoks toodud kõigi siseringi haabade (sõltumata kloonist) tüvede keskmistatud diameetrid (d) ja kõrgused (h). Joonistelt 7 ja 8 on tendentsina näha, et CO<sub>2</sub> - ga töötlemine kiirendab, osooniga töötlemine aga vähendab puude kasvu. 6 aasta vanustel puudel on CO<sub>2</sub> ringides d kontrolliga võrreldes 10% ja h 13% suurem, O<sub>3</sub> ringides esineb mõlema parameetri vähenemine (vastavalt 12% ja 14%). Need muutused ei osutunud aga (nagu ka CO<sub>2</sub>+O<sub>3</sub> ringi erinevus kontrollist) statistiliselt oluliseks.

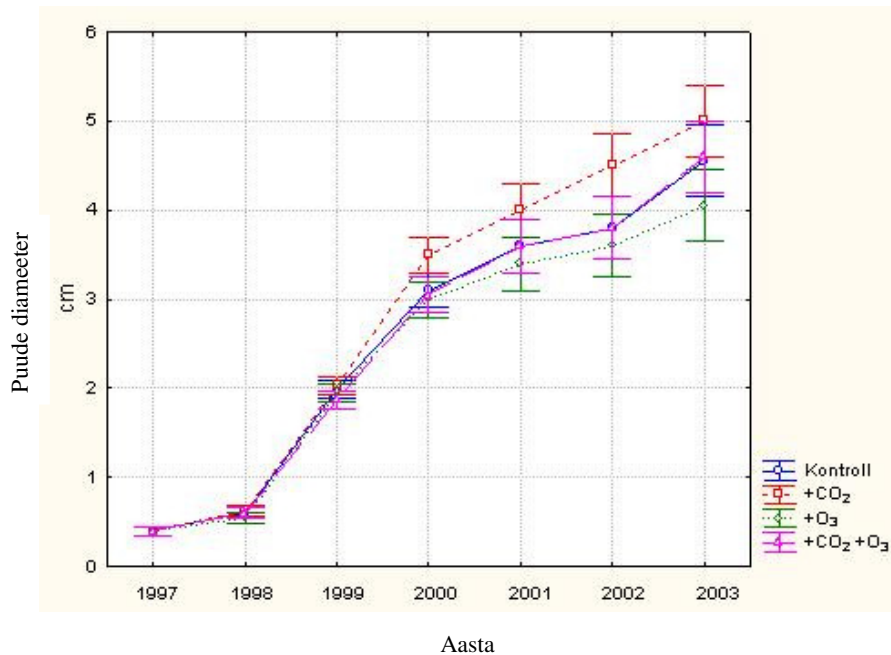
O<sub>3</sub> ringide d ja h erinevus CO<sub>2</sub> ringi vastavatest parameetritest oli 23% ja 28 %. (kahe viimase aasta keskväärtused ning standardvead tabelis 2) ja need erinevused olid ka kõik statistiliselt olulised.

Tabel 2. Statistiliselt olulised erinevused ameerika haava kõrgustes ja diameetrites.

Aasta	Keskmine kõrgus (cm±standard viga)		Keskmine diameeter (cm±standard viga)	
	[CO <sub>2</sub> ] ring	[O <sub>3</sub> ] ring	[CO <sub>2</sub> ] ring	[O <sub>3</sub> ] ring
2002	450±40	375±40	4,5±0,35	3,6±0,35
2003	520±60	405±60	5,0±0,40	4,04±0,40

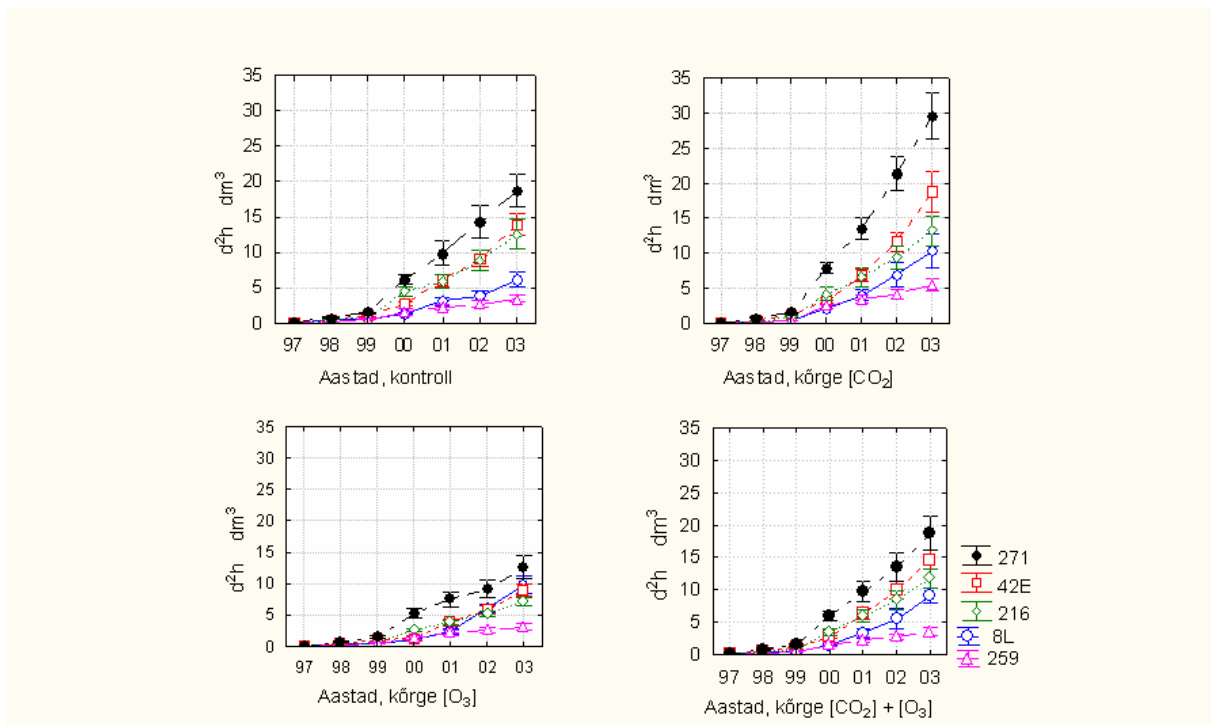


Joonis 7. Ameerika haava puude kõrgused FACE eksperimendis, cm, keskmine ± standard viga.



Joonis 8. Ameerika haava puude puude diameetrid FACE eksperimendis, cm, keskmine  $\pm$  standard viga.

Kasvu iseloomustamiseks kloonide kaupa kasutati puu tüve ruumala hinnangut valemi  $d^2h$  põhjal, mis toob erinevused paremini välja kui diameeter või kõrgus üksikult (Crow 1988). Tüve ruumala iseloomustava suuruse  $d^2h$  väärtuste kasv erinevatel kloonidel on toodud joonisel 9.



Joonis 9. Ameerika haava tüve ruumala hinnang  $d^2h$  aastate lõikes FACE katses, keskmine  $\pm$  standard viga.

Kloonide vahelised erinevused on suured ja see on ilmselt üheks põhjuseks, miks töötluste mõjud (kõigi haabade jaoks koos) statistiliselt oluliseks ei osutunud. Võrreldes töötluste mõju parameetritele d<sup>2</sup>h kloonide kaupa, tuli ilmsiks rohkem statistiliselt olulisi mõjusid kui kõigi kloonide puhul koos.

Kloonide võrdlusest on näha:

**A. kontrollringides:**

kloon 271 on kõige kiirema kasvuga, temaga võrreldes 42E ja 216 kasvukiirused jäävad maha vastavalt 35% ja 49 % . Klooni 8L kasvukiirus jääb kloonist 271 maha juba 3 korda, osoonitundliku klooni 259 kasvukiirus on 5,4 korda väiksem kui 271-l.

**Kõigi nelja klooni erinevus kloonist 271 oli aastal 2003 statistiliselt oluline. Kloon 259 erines samal ajal oluliselt kõigist kloonidest peale klooni 8L, viimane aga kõigist peale klooni 259. Kloonid 216 ja 42E oluliselt ei erinenud.**

**B. kõrge [CO<sub>2</sub>] ringides:**

klooni 271 mahukasv kontrolliga võrreldes kiireneb 57 %, klooni 8L 66 %, 259 - 160 %, klooni 42E 35 %, klooni 216 kiireneb mahukasv kontrolliga võrreldes ainult 5 %.

**Nelja klooni erinevus kloonist 271 aastatel 2002, 2003 on ka siin statistiliselt oluline.**

**Ka kloon 259 erines oluliselt ülejäänud neljast kloonist. Kloonide 216 ja 42E kasvukiiruste vahe suurenes, kuid mitte veel statistiliselt oluliselt. Seejuures kloonide kasvukiiruse järjestus kontrolliga võrreldes ei muutunud.**

**C: kõrge [O<sub>3</sub>] ringides:**

mahukasv kontrolliga võrreldes on enamasti väiksem. Klooni 271 väheneb kasvukiirus 66 % kontrolliga võrreldes, 42E - 164 %, 216 - 156 %, klooni 259 89 % (kõige väiksem kasvu pidurdumine). Klooni 8L on mahukasv hoopis suurem (155 % kontrolliga võrreldes). 8L kasvu kiirenemise põhjus ei ole teada.

**Kloon 271 kasvukiirus ei erine enam oluliselt kloonist 8L, küll aga ülejaanud kolmest kloonist. Klooni 259 kasvukiirus erineb oluliselt ülejaanud neljast kloonist. Klooni 8L kasvukiirus joonisel 9 on nüüd suurem, kui kloonidel 42E või 216, aga statistiliselt mitteoluliselt.**

**D. kõrge [CO<sub>2</sub>+O<sub>3</sub>] ringides:**

kloon 271 kasvukiirus on kontrolliga võrreldes täpselt sama, klooni 8L 4 % kõrgem, 42E-l 5 % kõrgem, 216-l 6 % madalam, 259-l täpselt sama.

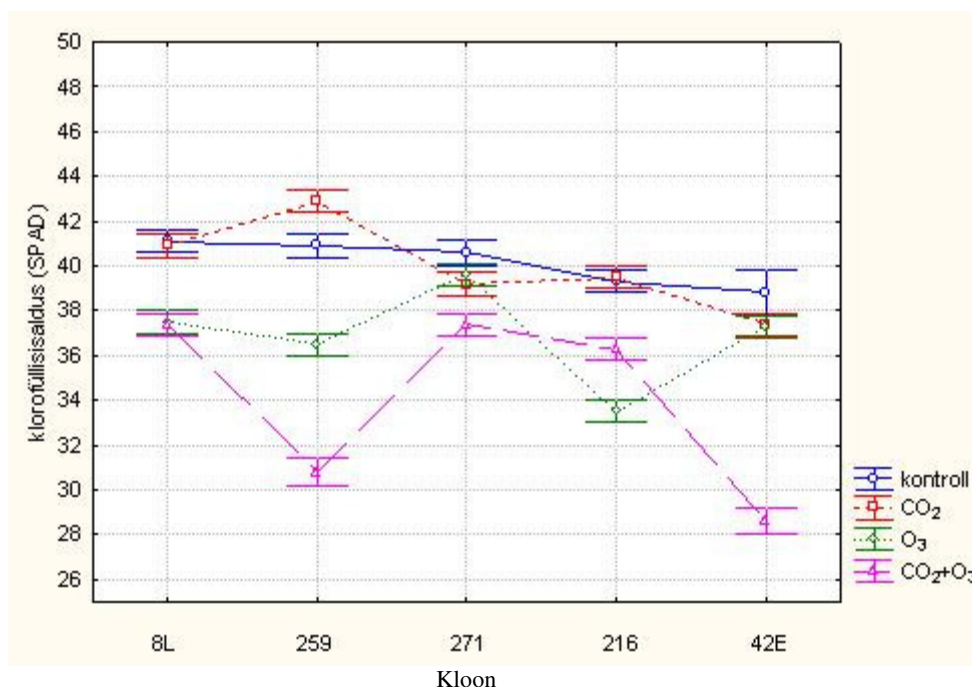
**Selles töötluses usaldusväärset erinevust võrreldes kontrolliga ei tuvastatud.**

E. Igas variandis on kloon 271 kiirema kasvuga ja kloon 259 kõige aeglasem kasvulisem.

F. Kõige kiirema kasvuga kloon on ka väiksema suremusega, kõige aeglasema kasvuga kloon on ka kõige suurema surevusega.

### 3.6 Lehtede klorofüllisisaldus.

2003. a. hindasime FACE eksperimendis ka erinevate haavakloonide lehtede klorofüllisisaldust. Tulemused on toodud joonisel 10.



Joonis 10. Ameerika haava lehtede klorofüllisisaldusega võrdeline suurus (SPAD) 2003. a. suvel kloonide kaupa.

Püüdes seostada kloonide kasvukiirusi ja nende kloonide lehtede klorofüllisisaldust, võib ütelda, et kloonidevahelised erinevused lehtede klorofüllisisalduses pole üheski töötluses puude kasvuga otseselt seotud.

Jooniselt 10 ilmneb, et varieeruvus lehtede klorofüllisisalduses on eriti suur lehtede kahjustuse järgi osoonitundlikeks (vahel ka keskmiselt tundlikeks) hinnatud kloonidel. Nendele kloonidele on ka iseloomulik, et märkimisväärselt väheneb lehtede klorofüllisisaldus CO<sub>2</sub> ja O<sub>3</sub> kombineeritud mõju korral. Nii väheneb oluliselt ja statistiliselt usaldusväärselt SPAD näit osooni mõjul kloonidel 259 ja 216, [CO<sub>2</sub>] + [O<sub>3</sub>] mõjul kloonidel 259, 216 ja 42E.

#### 4. Arutelu

„Aspen FACE” katse püstitamise ajal tehtud kontrollmõõtmised näitasid, et seda tüüpi katsetes tuleb osooni kontsentratsiooni rahuldava jaotumise tagamiseks muuta mitmeid CO<sub>2</sub> manipuleerimise puhul kasutusel olnud süsteemi osi ja parameetreid. Sellele vaatamata ei olnud osooni puhul võimalik saavutada sama head kontsentratsiooni kontrolli kui CO<sub>2</sub> puhul. Põhjuseks oli osooni väga madal kontsentratsioon (osooni kontsentratsiooni mõõduks on miljardik ühes ruumiosas ehk ppb) ja suur keemiline aktiivsus. Osoon on vees küllalt hästi lahustuv (Lahustub hapnikuga võrreldes ca. 70 korda paremini) ja vesi ning igasugused muud lisandid nii torustikes kui õhus lagundavad osooni kiiresti. Seega on olulised puhtus ja materjalide õige valik. Taimede kahjustumise vältimiseks oli gaasi võimalikult kiire segunemine ringi sisenemisel palju olulisem kui süsihappegaasiga fumigeerimise korral. Seda tuleb arvestada ka teiste toksiliste lisandgaaside puhul.

Osoneerida pole mõistlik kui õhu suhteline niiskus on üle 90 %, kui lehed on märjad või kui tuule kiirused on alla 0,5 m/s, sest siis on osooni neeldumine torude lähedal väga intensiivne ja juba mõne tunni jooksul võivad selles piirkonnas tekkida tugevad lehtede kahjustused.

Väljatöötatud süsteemi saab edukalt kasutada ilmselt ka veeauru lisamise puhul, kui õnnestub vesi pihustada tilgakesteks, mille läbimõõt on mõnikümmend mikronit. Sellist veeauruga rikastamist nimetatakse kasvuhoonete ja istandike puhul vee atomiseerimiseks (mis pole küll täpne termin, vt. ka [www.hagonozzles.com](http://www.hagonozzles.com), [www.coldfog.com](http://www.coldfog.com)). Veeauruga rikastamise katse (nn "FAHM" ehk "Free air humidity manipulation") on praegu püstitamisel Järvelja lähedale Rõka külla.

„Aspen FACE” käigus leitud kõrgendatud [CO<sub>2</sub>] ja [O<sub>3</sub>] mõju ameerika haava kasvule ja produktiivsusele sarnaneb üldjoontes teistel liikidel saadud mõjuga, vt. näiteks ülevaateid (Long et al. 2004, Ainsworth & Long 2004, Karnosky et al. 2006, Krupa & Manning 1988). Üldjoontes tähendab see, et kõrgendatud [CO<sub>2</sub>] suurendab, kõrgendatud [O<sub>3</sub>] aga vähendab produktsiooni (joonis 7 ja 8), nii meie katses (Wustman et al. 2001, Karnosky et al. 2003), lühiajalistes laborikatsetes (Moldau et al. 1993), ülalt avatud taimekambrites (Allen 1990), kui ka üksikutes teistes FACE tüüpi eksperimentides.

Samas sõltuvad muutuste absoluutväärtused tugevasti nii liigist kui katsekorraldusest. Huvi pakuvad suured erinevused haava erinevate genotüüpide reaktsioonides (joonis 9), sest sellel on suur praktiline tähtsus tingimustes, kus CO<sub>2</sub> ja O<sub>3</sub> kontsentratsioonid kasvavad. Tõus nende gaaside kontsentratsioonides pole hüpotees, vaid reaalsus. Katsetes saavutatud keskmine mõõdetud [CO<sub>2</sub>] katseringides oli 520-540 ppm ehk ca. 160-180 ppm üle

loodusliku taseme. Kuna mõõtsin igal aastal küllalt suure täpsusega kõrvale ka looduslikku [CO<sub>2</sub>], siis on teada, et 9 aastaga suurenes see antud piirkonnas ca. 10 ppm, 360-lt 370 ppm-ni. Pikaajalised mõõtmised üle maailma näitavad, et see kasv kiireneb pidevalt (Long et al. 2004). Sama kehtib [O<sub>3</sub>] tõusu kohta (Percy et al. 2006). Seega ennustab meie eksperiment, mis juhtub 50-100 aasta pärast istandikes, kuhu on paberipuudena erinevaid haavakloone istutatud ja võimaldab metsakasvatatutel ning paberikompaniidel teha praktilisi otsuseid. Tuleb otsustada, mida kloonida ja istutada, sest haava kloonimine on suhteliselt odav ja hästi väljatöötatud protseduur.

Meie tulemustest on näha, et kloon 271 osutus kõige perspektiivsemaks nii kontroll-, kõrge [CO<sub>2</sub>] kui kõrge [CO<sub>2</sub>+O<sub>3</sub>] ringides (joonis 9). Kõrge [CO<sub>2</sub>] töötlustes suureneb kloon 271 mahukasv teiste kloonidega samaväärselt. Kui arvestame, et looduses toimib CO<sub>2</sub> ja osooni koosmõju, siis 271 eelised jäävad kehtima. Analoogilisi tulemusi kirjeldasime ka 2001. a. (Wustman et al. 2001, Isebrands et al. 2001).

Kokkuvõtlikult võib haava kohta ütelda, et kui tegemist oleks ainult [CO<sub>2</sub>] suurenemisega looduses, suureneks haava mahukasv aastaks 2100 ca. 28 %, mis on kooskõlas andmetega teistel puuliikidel (Curtis et al. 2000, Long et al. 2004, DeLucia et al. 1999). Kui osooni kontsentratsiooni tase samal ajal maapinna lähedal suureneb, juba praeguseks suurlinnade ümbruses esineva nivoo (Percy et al. 2006), siis võib eeldada ca. 26 % mahukasvu vähenemist, vt. ka (Dickson et al. 1998, Bortier et al. 2000). Kui mõlemad mõjud toimivad realselt koos, siis [CO<sub>2</sub>] mõju ei korva [O<sub>3</sub>] oma ja võib eeldada mahukasvu ca. 6 % vähenemist aastaks 2100 (Isebrands et al. 2001).

Kui vaadata muutusi kloonide kaupa, siis kloon 271 ilmselt säilitab oma eelised ka kõrgete osooni kontsentratsioonide puhul. Kloon 42E oleks valikutes järgmine. Neid küsimusi vaatlesime ka ilmunud artiklis (Percy et al. 2006). Huvitav on märkida, et 42E oli lehtede osoonikahjustuse järgi tituleeritud osoonitundlikuks klooniks, kuid produktsiooni poolest oleks ta ka kõrgetel osooni kontsentratsioonidel üks paremaid (joonis 9).

Järelikult ei ole lehe kahjustuste ulatus alati kooskõlas produktiivsuse muutustega. Lehe kahjustustele eelneb tavaliselt klorofüllikadu lehtedest. See, et osa lehtede klorofüllist kõrgendatud osooni all hävib, on teada juba avatud taimekambri katsetest (Gagnon et al. 1992, Farage 1996). Meie mõõtmistes kloon 42E lehtede klorofüllis sisaldus langeb süsihappegaasi pluss osooni all teiste kloonidega võrreldes väga madalale, aga see ei kajastu kuidagi kasvukiiruse vähenemises. Sama kehtib kloon 259 kohta, kus juba algselt väike kasvukiirus väheneb osooni mõjul veel ainult ca. 10%. Kuigi lehtede klorofüllisisaldus korreleerub maksimaalse fotosünteesi intensiivsusega (Sober et al. 2002) ja võiks oodata, et



madalama fotosünteesiga kaasneb ka madalam produktiivsus, pole produktiivsus meie katses ilmselt otseselt lehtede fotosünteesi intensiivsusega määratud. Nagu kirjutasime 2003. a. (Sharma et al 2003), võib lehtede klorofüllisisaldus olla seda väiksem mida suurem on lehtede arv ja lehepinnaindeks LAI, sest lämmastiku limitatsiooni korral jaotub viimane koos sünteesitud klorofülliga suuremale lehepinnale. Ka on erinevates töödes (Kull 1996, Noormets 2001) näidatud, et lehtede klorofüllisisaldus ei muutu alati vastavuses nende kloonide maksimaalse fotosünteesi intensiivsuse vähenemisega osooni all.

### **Mille poolest siis kiire kasvuga kloon kloon 271 teistest kloonidest erineb?**

1. Väike suremus kõikide fumigeerimise kombinatsioonide korral, isegi ringi servades, kus  $[O_3]$  võib lühiajaliselt kasvada kuni väärtuseni 300 ppb. Ilmselt on see kloon vastupidav üsna mitmete stressifaktoritele, kaasa arvatud tuul ja konkurents ressursside pärast.
2. Episoodilised õhulõhede juhtivuse mõõtmised (Riikkonen et al. 2007) on näidanud, et klooni 271 iseloomustavad ka suhteliselt kinnised õhulõhed. See võib paljudel juhtudel parema veevarustuse kaudu tagada kiirema kasvu, võrreldes teiste kloonidega.
3. Täheleanduv on ka klooni 271 pikemat vegetatsiooniperioodi teistega võrreldes, eriti kõrgendatud  $[CO_2]$  ringides (Isebrands et al. 2001, Karnosky 2003). On väidetud, et see põhjustab hoopis negatiivseid efekte pungade talvise kahjustumise näol (Lutze et al. 1998), kuid meie katses seda ei täheldatud. Pigem toob see kaasa suurema süsinikuhulga sidumise vegetatsiooniperioodi jooksul ja suurema produktsiooni. Kloon 271 on ka visuaalselt dominantsem kui teised kloonid.

### **Mis iseloomustab osoonile tolerantset klooni 8L?**

Klooni 8L, mida on hakatud kutsuma ka osonofiilseks, iseloomustab noorte puude suhteliselt aeglane kasv (esimese aasta lõpuks olid klooni 8L puud ligi 2 korda lühemad, kui klooni 271). Kui teistel kloonidel kõrgendatud osoon mõjutas praktiliselt ainult puude diameetrit, vähendades kasvu kiirust, mitte puu kõrgust, siis 8L puhul kasvas statistiliselt usaldusväärset ka kõrgus, ja seda mitmete aastate vältel. Unikaalseks teeb selle klooni ka asjaolu, et kombineeritud  $[CO_2]+[O_3]$  mõjul 8L mahukasv kontrolliga võrreldes järjest väheneb ja on viimastel aastatel negatiivne.  $[CO_2]$  ja  $[O_3]$  eraldi annavad aga siiani positiivse mõju.

Osooni taluvuse mehhanism sellel klooni 8L puhul pole otseselt teada ja see vääriks eraldi uurimist.

Kokkuvõttes näitasid kasvu mõõtmised aastate edenedes üha suuremaid erinevusi kloonide vahel, mis veelgi rõhutab pikaajaliste katsete tähtsust, võrreldes lühiajaliste kambrikatsetega.

Pikas perspektiivis võib kogu pilti hakata mõjutama ka lämmastiku kättesaadavus mullas. On näidatud (Dickson et al. 2000, Söber et al. 2003), et kuigi N tase katses püsib veel kõrgena, on näha selget vähenemise tendentsi. Tulevikus võib küsida, mis saab kloonide paremusjärjestusest siis, kui lämmastik muutub limiteerivaks faktoriks. Praeguseeni on parim kõige paremate kasvu iseloomustavate parameetritega kloon, aga kiire kasv nõuab ka palju lämmastikku. Teist laadi faktorid, millele üha rohkem tähelepanu pööratakse, on taimehaigused, mis erinevate patogeenide mõjul tekivad. Seenhaigused, nagu papli lehe-rooste (*Melampsora medusae*) ja lehetäide esinemissagedus erineb statistiliselt oluliselt kloonide ja ringide kaupa ( Karnosky et al. 2002, 2005, Mankovska et al. 2003, Percy et al. 2002, 2003), olles suurem nii kõrge [CO<sub>2</sub>] kui [O<sub>3</sub>] all. Aastaks 2100 võivad kõik need stressifaktorid oluliselt mõjutada erinevate ameerika haava kloonide kasvu, produktiivsust ja ellujäämist.

Nüüdseks on ametlikult välja öeldud (US EPA 1996), et praegu kasutusel olevad taimede osoonile eksponeerimise mõõdupuud ei iseloomusta kuigi hästi ei osooni sisenemist taime ega ka osooni mõju taime sees. Samuti ei anna nad head pilti füüsilistest, bioloogilistest ja meteoroloogilistest protsessidest, mis osoonikahjustusi mõjutavad, ega võimalda ennustada taimestiku vastureaktsioone ( Manning, 2005). Seega on vajalikud uudsed lähenemisviisid.

## Kokkuvõte

Käesolevas töös on kirjeldatud katseid ameerika haava osoneerimisel vabas õhus „Aspen FACE” eksperimendis aastatel 1997-2005, ja seda kahes aspektis. Esiteks, kuidas luua bioloogilisteks mõõtmisteks sobivat keskkonda katselapil ja teiseks, milline on kõrgendatud  $[O_3]$  ja  $[CO_2]+[O_3]$  efekt haava kasvule ja suremusele. "Aspen FACE" asub Wisconsinis, USA, juhtivaks organisatsiooniks on Michigani Tehnoloogiaülikool.

Mõõdeti 5 erineva haavaklooni suremust, kõrgusi, diameetreid, ja lehtede klorofüllisisaldust. Metoodilises pooles on näidatud, et oskusliku fumigeerimissüsteemi parameetrite valikuga on võimalik osooni kontsentratsiooni ebaühtlus 30 m läbimõõduga ringi sees viia väiksemaks kui 20 % eesmärgist. Fumigeerimise edukust saab osooni puhul hinnata puude suremuse erinevuse järgi sisemises nn. mõõtetsoonis ja ringi välises osas. Põhitulemus: osooniringide servades on surevus, võrreldes ringi keskosaga, ligilähedaselt sama palju suurem kui kontrollringides. Ehk teisisõnu, osooni kui tugevalt toksilise gaasi lisamine ei põhjusta täiendavat puude suremist osooni emiteerivate torude läheduses.

Tüve ruumala kasvu võrdlemine näitas neljal kloonil mahukasvu vähenemist osooni all 56 - 66 % (võrreldes kontrolliga). Kloon 8L osutus osoonilembeliseks, tema mahukasv kõrgendatud  $[O_3]$  toimel kiirenes.

SPAD-meetriga hinnatud lehtede klorofüllisisaldused erinevatel kloonidel näitasid, et üheski töötluses polnud kloonidevahelised erinevused lehtede klorofüllisisalduses otseselt seotud puude kasvu erinevustega.

Hinnates „Aspen FACE” katse põhjal haava produtsiooni aastaks 2100, võib öelda, et isegi siis kui looduslik  $[CO_2]$  tõuseb väärtuseni 560 ppm ehk 200 ppm üle praeguse nullib loodusliku  $[O_3]$  samaaegne kasv haava kasvu kiirenemise süsihappegaasi mõjul ja lõpptulemuseks on pigem mõneprotsendine haava produktsiooni vähenemine.

**Fumigation with ozone and its effect on American aspen (*Populus tremuloides*)  
in „Aspen FACE” experiment.**

Summary

Experiments with elevated ozone concentration in „Aspen FACE” experiment during 2001-2005 are described. The study had two objectives: 1) how to establish proper environment inside the experimental plot and 2) what kind of effect elevated  $[O_3]$  and  $[CO_2]+[O_3]$  had on growth and mortality of aspen trees. Measurements were performed in Wisconsin, USA, under leadership of Michigan Technological University.

Mortality, height, diameter and chlorophyll content of leaves (SPAD) of 5 different aspen clones were measured. It was shown, that establishment of proper parameters for the fumigation system allowed to have ozone concentration dissimilarity within 20 % from the target within 30 m diameter plot. Performance of fumigation was estimated, measuring mortality within the ring separately in outer and inner zones. The main result: in rings with elevated concentration of ozone, the difference in mortality between outer and inner parts was not statistically reliably higher than in control rings. Consequently, ozone as highly toxic gas doesn't cause additional mortality in zone, close to emitting tubes.

Volume growth measurements showed decrease in volume growth 56-66 % under high ozone (if compared with control) for 4 aspen clones. One clone, 8L, happened to be ozonophylic, its volume growth increased under elevated concentration of ozone. Chlorophyll content of leaves varied independently of growth rate in different clones and treatment differences in chlorophyll content were not directly related to volume growth.

Predicting aspen productivity for the year 2100 from „Aspen FACE” experiment, we can say, that if natural  $[CO_2]$  raises up to 560 ppm (or 200 ppm above current value), its positive effect will be neglected by the raise in natural  $[O_3]$  and the final result could be decrease in productivity for several per cent.

Tänuõnad.

Tahaks tänada kõiki inimesi, kes töötasid koos minuga "Aspen FACE" projektis, eriti projektijuht David Karnosky - t. Tänan ka oma juhendajat, Priit Kupper'it abi eest töö vormistamisel, samuti Anu Sõber'it igakülgse suunamise ja näpunäidete eest töö kokkupanekul.

## **Kasutatud kirjandus.**

Adams, R.M., Glyer, J.D., Johnson, S.L., McCarl, B.A., 1989. A reassessment of the economic effects of ozone on U.S. agriculture. *Journal of Air Pollution Control Association*, 39: 960-968.

Ainsworth E.A., Long S.P., 2005. What have we learned from 15 years of free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) ? *New Phytologist*, 165: 351-372.

Allen L.H., 1990. Plant responses to rising carbon dioxide and potential interactions with air pollutants. *Journal of Environmental Quality*, 19, 15-34.

Allen, L.H., 1992. Field techniques for exposure of plants and ecosystems to elevated CO<sub>2</sub> and other trace gases. *Crit. Rev. Plant Sci.*, 11:85-119.

Bergmann, E., Bender, J., Weigel, H.J., 1999. Ozone threshold doses and exposure-response relationships for the development of ozone injury symptoms in wild plant species. *New Phytology*, 144: 423-435.

Bortier, K., Ceulemans, R., Temmerman, L., 2000. Effects of tropospheric ozone on woody plants. In: Agrawal, S.B., Agrawal, M. (Eds.), *Environmental Pollution and Plant Responses*. CRC Press, pp. 153–174.

Gagnon, Z.E., Karnosky, D.F., Dickson, R.E., Isebrands, J.G., 1992. Effects of ozone on chlorophyll content in *Populus tremuloides*. *American Journal of Botany*, 79, 107 pp.

Chameides, W.L., Kasibhatla, P.S., Yienger, J., Levy I.H., 1994. Growth of continental-scale metro-agro-plexes, regional ozone pollution, and world food production. *Science*, 264, 74–77.

Chappelka, A.H., Samuelson, L., 1998. Ambient ozone effects on forest trees of the eastern United States: a review. *New Phytologist*, 139, 91-108.

Coleman, M.D., Dickson, R.E., Isebrands, J.G., Karnosky, D.F., 1995a. Photosynthetic productivity of aspen clones varying in sensitivity to tropospheric ozone. *Tree Physiology*, 15, p. 585-592.

Coleman, M.D., Dickson, R.E., Isebrands, J.G., Karnosky, D.F., 1995b. Carbon allocation and partitioning in aspen clones varying in sensitivity to tropospheric ozone. *Tree Physiology*, 15, p. 593-604.

Crow, T.R., 1988. A guide to using regression equations for estimating tree biomass. *North. J. Appl. For.* 5, 15-22.

Curtis, P.S., Vogel, C.S., Wang, X., Pregitzer, K.S., Zak, D.R., Lussenhop, J., Kubiske, M., Teeri, J.A., 2000. Gas exchange, leaf nitrogen, and growth efficiency of *Populus tremuloides* in a CO<sub>2</sub>-enriched atmosphere. *Ecological Applications*, 10 (1), 3–17.

Darley, E.F. & Middleton, J. T., 1961. Carbon filter protects plants from damage by air pollution. *Florists review*, 127, 15-16.

DeLucia, E.H., Hamilton, J.G., Naidu, S.L., Thomas, R.B., Andrews, J.A., Finzi, A., Lavine, M., Matamala, R., Mohan, J.E., Hendrey, G.R., Schlesinger, W.H., 1999. Net primary production of a forest ecosystem with experimental CO<sub>2</sub> enrichment. *Science*, 294, 1177–1179.

Dickson, R.E., Coleman, M.D., Riemenschneider, D.E., Isebrands, J.G., Hogan, G.D., Karnosky, D.F., 1998. Growth of five hybrid poplar genotypes exposed to interacting elevated CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub>. *Can. J. For. Res.*, 28, 1706–1716.

Dickson, R.E., Coleman, M.D., Pechter, P., Karnosky, D., 2001. Growth and crown architecture of two aspen genotypes exposed to interacting ozone and carbon dioxide. *Environmental Pollution*, 115: 319-334.

Dixon, R.K., Brown, S., Houghton, R.A., Solomon, A.M., Trexler, M.C., Wisniewski J., 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 263, 185-190.

Drake, B.G., Leadley, P.W., Arp, W.J., Nassiry, D., Curtis, P.S., 1989. An open top chamber for field studies of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration on saltmarsh vegetation. *Functional Ecol.*, 3:363-371.

Farage, P.K., 1996. The effect of ozone fumigation over one season on photosynthetic processes of *Quercus robur* seedlings. *New Phytologist*, 134, p. 279-285.

Fowler, D., Flechard, C., Skiba, U., Coyle, M., Cape, J.N., 1998. The atmospheric budget of oxidized nitrogen and its role in ozone formation and deposition. *New Phytologist*, 139. p. 11-23.

Fowler, D., Cape, J.N., Coyle, M., Flechard, C., Kuylenstierna, J., Hicks, K., Derwent, D., Johnson, C., Stevenson, D., 1999. The global exposure of forests to air pollutants. *Water, Air and Soil Pollution*, 116, 5-32.

Gagnon, Z.E., Karnosky, D.F., Dickson, R.E., Isebrands, J.G., 1992. Effects of ozone on chlorophyll content in *Populus tremuloides*. *American Journal of Botany*, 79 (Supplement), 107 pp.

Greenwood, P., Greenhalgh, A., Baker, C.K., Unsworth, M.H., 1982. A computer-controlled system for exposing field crops to gaseous air pollutants. *Atmospheric Environment*, 39, 2166-2261.

Heagle, A.S., Body, D.E., Heck, W.W., 1973. An open-top chamber to assess the impact of air pollution on plants. *J. Environ. Qual.*, 2:365-368

Hebeisen, T., Lüscher, A., Zanetti, S., Fisher, B.U., Hartwig, U.A., Frechner, M., Hendrey, G.R., Blum, H., Nösberg, J., 1997. Growth response of *Tripholium repens* L. & *Lolium perenne* L. as monocultures and bi-species mixture to free-air CO<sub>2</sub> enrichment and management. *Global Change Biology*, 3, 149-160.

Heggestad, H.E., Menser, H.A., 1962. Leaf-spot sensitive tobacco strain Bel-W3, a biological indicator of the air pollutant ozone. *Phytopathology*, 52, 735 (abstract).



Hendrey, G.R., Ellsworth, D.S., Lewin, K.F., Nagy, J., 1999. A free-air enrichment system for exposing tall forest vegetation to elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. *Global Change Biology*, 5, 293–309.

Hendrey, G.R., Lewin, K.F., Nagy, J., 1993. Control of carbon dioxide in unconfined field plots. In: Schulze, E-D.; Mooney, H.A., eds. Design and execution of experiments on CO<sub>2</sub> enrichment. *Ecosystems Res., Rep. 6.*, Brussels, Belgium: Commission of the European Communities, CEC-DGXII/D-1: 309-329.

Hendrey, G.R., Ellsworth, D.S., Lewin, K.F., Nagy, J., 1999. A free-air enrichment system for exposing tall forest vegetation to elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. *Global Change Biology*, 5, 293–309.

Hogsett, W.E., Weber, J.E., Tingey, D., Herstrom, A., Lee, E.H., Laurence, J.A., 1997. An approach for characterizing tropospheric ozone risk to forests. *Environmental Management*, 21, p. 105-120.

Isebrands, I.G., McDonald, E.P., Kruger, E., Hendrey, G., Pregitzer, K., Percy, K., Sober, J., Karnosky, D.F., 2001. Growth responses of *Populus tremuloides* clones to interacting carbon dioxide and tropospheric ozone. *Environmental Pollution*, 115, p. 359-371.

Kaakinen, S., Kostianen, K., Ek, F., Saranpää, P., Kubiske, M.E., Sober, J., Karnosky, D.F., Vapaavuori, E., 2004. Stem wood properties of *Populus tremuloides*, *Betula papyrifera* and *Acer saccharum* saplings after 3 years of treatments to elevated carbon dioxide and ozone. *Global Change Biology*, 10: 1513 – 1525.

Karnosky, D.F., Gagnon, Z.E., Dickson, R.E., Coleman, M.D., Lee, E.H., Isebrands, J.G., 1996. Changes in growth, leaf abscission, and biomass, associated with seasonal tropospheric ozone exposures of *Populus tremuloides* clones and seedlings. *Canadian Journal of Forest Research*, 16, p. 23-27.

Karnosky, D.F., Mankovska, B., Percy, K., Dickson, R.E., Podila, G.K., Sober, J., Noormets, A., Hendrey, G., Coleman, M.D., Kubiske, M.E., Pregitzer, K.S., Isebrands, J.G., 1999. Effects of tropospheric O<sub>3</sub> on trembling aspen and interaction with CO<sub>2</sub>: results from an O<sub>3</sub>-gradient and a FACE experiment. *Water, Air, and Soil Pollution*, 116, p. 311-322.

Karnosky, D.F., Percy, K.E., Xiang, B., Callan, B., Noormets, A., Mankovska, B., Hopkin, A., Sober, J., Jones, W., Dickson, R.E., Isebrands, J.G., 2002. Interacting elevated CO<sub>2</sub> and tropospheric O<sub>3</sub> predisposes aspen (*Populus tremuloides* Michx.) to infection by rust (*Melampsora medusae* f.sp. *tremuloidae*). *Global Change Biology*, 8:329-338. [PDF](#)

Karnosky, D.F., Pregitzer, K.S., Hendrey, G.R., Percy, K.E., Zak, D.R., Lindroth, R.L., Mattson, W.J., Kubiske, M., Podila, G.K., Noormets, A., McDonald, E., Kruger, E.L., King, J., Mankovska, B., Sober, A., Awmack, C., Callan, B., Hopkin, A., Xiang, B., Hom, J., Sober, J., Host, G., Riemenschneider, D.E., Zasada, J., Dickson, R.E., Isebrands, J.G., 2003b. Impacts of Interacting CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> on trembling aspen: results from the aspen FACE experiment. *Functional Ecology*, 17, 289-304.

Karnosky, D.F., Pregitzer, K.S., Zak, D.R., Kubiske, M.E., Hendrey, G.R., Weinstein, D., Nosal, M., Percy, K.E., 2005. Scaling ozone responses of forest trees to the ecosystem level in a changing climate. *Plant, Cell and Environment*, 28:965-981. [PDF](#)

Karnosky, D.F., Werner, H., Holopainen, T., Percy, K., Oksanen, T., Oksanen, E., Heerdt, C., Fabian, P., Nagy, J., Heilman, W., Cox, R., Nelson, N., Matyssek, R., 2007. Free-air exposure systems to scale up ozone research to mature trees. *Plant Biol.*, 9:1-10.

Keeling, C.M., Whort, T.P., Wahlen, M., Vander Plicht, J., 1995. International extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. *Nature*, 375, p. 666-670.

Kimball, B.A., Pinter, B.J., Garcia, R.L., LaMorte, R. L., Wall, G.W., Hunsaker D.J., 1995. Productivity and water use of wheat under free-air carbon dioxide enrichment. *Global Change Biology*, 1, 429-442.

King, J.S., Pregitzer, K.S., Zak, D.R., Karnosky, D.F., Isebrands, J.G., Dickson, R.E., Hendrey, G.R., Sober, J., 2001. Fine root biomass and fluxes of soil carbon in young stands of paper birch and trembling aspen is affected by elevated CO<sub>2</sub>, and tropospheric O<sub>3</sub>. *Oecologia*, 128, p. 237-250.

Krupa, S.V., 1988. Atmospheric Ozone: Formation and Effects on Vegetation. *Environmental Pollution*, 50, 101-137.

Kull, O., Sober, A., Coleman, M.D., Dickson, R.E., Isebrands, J.G., Gagnon, Z., Karnosky, D.F., 1996. Photosynthetic response of aspen clones to simultaneous exposures of ozone and CO<sub>2</sub>. *Canadian Journal of Forest Research*, 16, p. 639-648.

Lee, H.S.J., Barton, A., 1993. Comparative studies on elevated CO<sub>2</sub>, using open-top chambers, tree chambers and branch bags. In: *Design and execution of Experiments on CO<sub>2</sub> enrichment*, pp. 239-259, *Ecosystems research report 6*.

Lee, H.S.J., Jarvis, P.G., 1996. Effects of tree maturity on some responses to elevated CO<sub>2</sub> in *Sitka spruce*. In: *carbon Dioxide and Terrestrial ecosystems*, pp 53-70. Academic Press, San Diego, CA.

Lewin, K.F., Hendrey, G.R., Nagy, J., LaMorte, R.L., 1994. Design and application of a free-air carbon dioxide enrichment facility. *Agricultural and Forest Meteorology*, 70: 15-29.

Lindroth, R.L., Kinney, K.K., Platz, C.L., 1993. Responses of deciduous trees to elevated atmospheric CO<sub>2</sub>: productivity, phytochemistry and insect performance. *Ecology*, 74, p. 763-777.

Lindroth, R.L., Roth, S., Kruger, E.L., Volin, I.C., Koss, P.A., 1997. CO<sub>2</sub>-mediated changes in aspen chemistry: Effects on gypsy moth performance and susceptibility to virus. *Global Change Biology*, 3, p. 279-289

Long, S.P., Ainsworth, E.A., Rogers, A., Ort, D.R., 2004. Rising atmospheric carbon dioxide: plants FACE the future. *Ann. Rev. Plant Biol.* , 55:591-628.

Long, S.P. and Naidu, S.L., 2002. Effects of oxidants at the biochemical, cell and physiological levels, with particular reference to ozone. In: *Air Pollution and Plant Life*. Eds. J.N.B. Bell and M. Treshow. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, pp 69 – 88.

Lutze, J.L., Roden, J.S., Holly, C.J., Wolfe, J., Egerton, J.J.G., Ball, M.C., 1998. Elevated atmospheric CO<sub>2</sub> promotes frost damage in evergreen tree seedlings. *Plant, Cell and Environment*, 21, 631–635.

Mankovska, B., Percy, K. and Karnosky, D.F., 2003. Impact of greenhouse gases on epicuticular waxes of *Populus tremuloides* Mich.: Results from an open-air exposure and a natural O<sub>3</sub> gradient. *Ekológia (Bratislava)* 22 (Supplement 1):182-194. [PDF](#)

Wendy M. Loya, Kurt S. Pregitzer, Noah J. Karberg, John S. King, Christian P. Giardina, 2003. Reduction of soil carbon formation by tropospheric ozone under increased carbon dioxide levels. *Nature*, 425, 705-707.

Martin, M.J., Host, G.E., Lenz, K.E., Isebrands, J.G., 2001. Simulating the growth response of aspen to elevated ozone: a mechanistic approach to scaling a leaf-level model of ozone effects on photosynthesis to a complex canopy architecture. *Environmental Pollution*, 115: 425-436.

Matyssek, R., Innes, J.R., 1999. Ozone – a risk factor for trees and forests in Europe? *Water, Air and Soil Pollution*, 116: 199-226.

McLaughlin, S.B., Downing, D.J., 1995. Interactive effects of ambient ozone measured on mature forest trees. *Nature*, 374, 252-257.

McLeod, A.R., 1995. An open-air system for exposure of young forest trees to sulfur dioxide and ozone. *Plant, Cell and Environment*, 19, 1639-1649.

McLeod, A.R., Long, S.P., 1999. Free-air carbon dioxide enrichment (FACE) in Global Change Research: A Review. *Adv. Ecol. Res.*, 28:1-55.

Middleton, J. T., Kendrick, J.B., Jr., Schwalm, H. W., 1950. Injury to herbaceous plants by smog or air pollution. *Plant Disease Repr.*, 34, 245-252.

Miglietta, F., Lanini, M., Bindi, M., Magliulo, V., 1997. Free-air CO<sub>2</sub> enrichment of potato (*Solanum tuberosum* L.): Design and performanse of the CO<sub>2</sub>-fumigation system. *Global Change Biology*, 3, 417-425.

Miglietta, F., Peressotti, A., Vaccari, F.P., Zaldei, A., de Angelis, P., Scarascia-Mugnozza, G., 2001. Free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) of a poplar plantation:the POPFACE fumigation system. *New Phytol.*, 150:465-76.

Menser, H.A.Jr., Heggstad, H.E., Grosso, J.J., 1966. Carbon filter prevents ozone fleck and premature senescence of tobacco leaves. *Phytopathology*, 56, 466-467.

Moldau, H., Söber, J., Söber, A., 1993. Impact of acute ozone exposure on CO<sub>2</sub> uptake by two cultivars of *Phaseolus vulgaris* L. *Photosynthetica*, 28: 133-141

Moore. B.D., Cheng, S.H., Sims, D., Seemann. J.R., 1999. The biochemical and molecular basis for photosynthetic acclimation of elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. *Plant, Cell and Environment*, 22, p. 567-582.

Murray, M.B., Leith, I.D., Jarvis, P.G., 1996. The effect of long term CO<sub>2</sub> enrichment on the growth, biomass partitioning and mineral nutrition of *Sitka Spruce*. *Trees Structure and Function*, 10:393-402.

Noormets, A., McDonald, E.P., Kruger, E.L., Sober, A., Isebrands, J.G., Dickson, R.E., Karnosky, D.F., 2001a. The effect of elevated carbon dioxide and “zone on leaf- and branch-level photosynthesis and potential plant-level carbon gain in aspen. *Trees Structure and Function*, 15. p, 262-210.

Noormets, A., Sober A., Pell, E.J., Dickson, R.E., Podila, G.K., Sober J., Isebrands. J.G., Karnosky, D.F., 2001b. Stomatal and non-stomatal limitation to photosynthesis in two trembling aspen (*Populus tremuloides* Michx.) clones exposed to elevated CO<sub>2</sub> and/or O<sub>3</sub>. *Plant, Cell and Environment*, 24, p. 321-336.

Okada, M., Lieffering, M., Nakamura, H., 2001. Free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE), using pure CO<sub>2</sub> injection: system description. *New Phytologist*, 150, 251–260.

Oksanen, E., Saleem, A., 1999. Ozone exposure results in various carry-over effects and prolonged reduction in biomass in birch (*Betula pendula* Roth ). *Plant, Cell and Environment*, 22. 1401-1411.

Oksanen, E., Amores, G., Kokko, H., Santamaria, J.M. and Kärenlampi, L., 2001. *Tree Physiology*, 21: 1171-1181.

Olszyk, D.M., Kats, G., Dawson, P.J., Bytnerowicz, A., Wolf, J., Thompson, C.R., 1986a. Characteristics of air exclusion systems vs. chambers for field air pollution studies. *Journal of Environmental Quality*, 15: 326-334.

Olszyk, D.M., Bytnerowicz, A., Kats, G., Dawson, P.J., Wolf, J., Thompson, C.R., 1986b. Crop effects from air pollutants in air enclosure systems vs. field chambers. *Journal of Environmental Quality*, 15: 417- 422.

Percy. K.E., Awmack, C.S., Lindroth. R.L., Kopper, B.J., Isbrands, J.G., Pregitzer K.S., Hendrey, G.R., Dickson, R.E., Zak. D.R., Oksanen, E., Sober, J., Harrington R., Karnosky, D.F., 2002. Will pests modify predicted response of forests to CO<sub>2</sub> enriched atmospheres? *Nature*, 420, p.403-407.

Percy, K.E., Mankovska, B., Hopkin, A., Callan, B., Karnosky, D.F., 2003. Ozone affects leaf surface pest interactions. In: D.F. Karnosky, K.E. Percy, A.H. Chappelka, C. Simpson, and J.M. Pikkarainen (Eds.), *Air Pollution, Global Change and Forests in the New Millennium*. Elsevier Press, Amsterdam, pp. 247-258.

Percy, K.E., Nosal, M., Heilman, W., Dann, T., Sober, J., Legge, A.H., Karnosky, D.F., 2006. New exposure-based metric approach for evaluating O<sub>3</sub> risk to North American aspen forests. *Environmental Pollution*, doi:10.1016, 1-13.

Pääkonen, E., Günthardt-Goerg, M.S. and Holopainen, T., 1998. Responses of Leaf Processes in a Sensitive Birch (*Betula pendula* Roth) clone to ozone combined with drought. *Annals of Botany*, 82: 49-59.

Pääkonen, E., Vahala, J., Pohjolainen, M., Holopainen, T. and Kärenlampi, L., 1998. Physiological, stomatal and ultrastructural ozone responses in birch (*Betula pendula* Roth.) are modified by water stress. *Plant, Cell and Environment*, 21:671-684.

Rich, S., Taylor, G.S. & Tomlinson, H., 1969. Crop damaging periods of ambient ozone in Connecticut. *Plant Disease Repr.*, 53, 969-973.

Ryerson, T.B., Frainer, M., Holloway, J.S., Parrish, D.D., Huey, L.G., Sueper, D.T., Frost, G.J., Donnelly, S.G., Schauffler, S., Atlas, E.L., Kuster, W.C., Goldan, P.D., Hubler, G., Meagher, J.F. & Fehsenfeld, F.C., 2001. Observations of ozone formation in power plant plumes and implications for ozone control strategies. *Science*, 272, 719–723.

Saxe, H., Ellsworth, D.S., Heath, J., 1998. Tree and forest functioning in an enriched CO<sub>2</sub> atmosphere. *New Phytologist*, 139, 395-436.

Sharma, P., Sober, A., Sober, J., Podila, G.K., Kubiske, M.E., Mattson, W.J., Isebrands, J.G. and Karnosky, D.F., 2003. Moderation of [CO<sub>2</sub>]-induced gas exchange responses by elevated tropospheric O<sub>3</sub> in trembling aspen and sugar maple. *Ekologia* 22 (Supplement 1):304-317.

[PDF](#)

Stevenson, D.S., Johnson, C.E., Collins, W.J., Derwent, R.G., Shine, K.P., Edwards, J.M., 1998. Evolution of tropospheric ozone radiative forcing. *Geophysical Research Letters*, 25, p, 3819-3822.

Stott, P.A., Tett, S.F.B., Jones, G.S., Allen, M.R., Mitchell, J.F.B. & Jenkins, G.J., 2000. External control of 20th century temperature by natural and anthropogenic forcings. *Science*, 290, 2133–2137.

Sõber, A., Kull, O., Karnosky, D.F., 2003. CO<sub>2</sub> neeldumine haavapuistus. CO<sub>2</sub> ja O<sub>3</sub> kõrgenenud kontsentratsioonide mõju. *Kogumik Kaasaegse Ökoloogia Probleemid. Eesti ökoloogia Globaliseerivas maailmas. Eesti IX Ökoloogiakonverentsi lühiartiklid*. Lk.307-312. Tartu 2003.

Taylor, G.E., Jr., Johnson, D.W., Andersen, C.P., 1994. Air pollution and forest Ecosystems: a regional to global perspective. *Ecological Applications*, 4:662-689.

Turner, D.P., Koerper, G.J., Harmon, M.E., Lee, J.J., 1995. A carbon budget for forests of the conterminous United States. *Ecological applications*, 5(2), 421-436.

De Temmerman, L., Vandermeiren, K. D., Haese, D., 2002. Ozone effects on trees, where uptake and detoxification meet. *Dendrobiology*. 47: 9-19.

Tissue, D.T., Thomas, R.B., Strain, B.R., 1996. Growth and photosynthesis of loblolly pine after exposure to elevated CO<sub>2</sub> for 19 months in the field. *Tree Phys.*, 16:49-59.

Walklate, P.S., Xu, Z.G., McLeod, A.B., 1996. A new gas injection method to enhance spatial utilization within a free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) system. *Global Change Biology*, 2:75-78.

Wang, K.Y., Kellomäki, S., Laitinen, K., 1995. Effects of needle age, long-term temperature and CO<sub>2</sub> treatment on the photosynthesis of scots pine. *Tree Physiology*, 15, 211-218.



Wustman, B.A., Oksanen, E., Karnosky, D.F., Sober, J., Isebrands, J.G., Hendrey, G.R., Pregitzer, K.S., Podila, G.K., 2001. Effects of elevated CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> on aspen clones varying in O<sub>3</sub> sensitivity: Can CO<sub>2</sub> ameliorate the harmful effects of O<sub>3</sub>? *Environmental Pollution*, 115, p 473-481.

Yamaji, K., Julkunen – Tiitto, R., Rousi, M., Freiwald, V., Oksanen, E., 2003. Ozone exposure over two growing seasons alters root-to-shoot ratio and chemical composition of birch (*Betula pendula* Roth). *Global Change Biology*, 9: 1363-1377.

### **Käsikirjad**

Barnard, J.E., Lucier, A., Johnson, A.H., Brooks, R.T., Karnosky, D.F., Dunn, R.H. 1991. NAPAP State of Science/Technology Report 16.

Kimball, B.A., 1986. A modular energy balance program including subroutines for greenhouses and other latent heat devices. ARS-33, USDA, ARS, Washington, DC, 360 pp.

Mooi, I.J., van der Zalm, A.J.A., 1985. Research on the effects of higher than ambient concentrations of SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> on vegetation under semi-natural conditions. First interim report to the commission of the european communities, EEC Contract ENV-677-NL.

### **Internetileheküljed**

Hago manufacturing Co. koduleheküljed:

[www.hagonozzles.com/documents/service-download-literature/Water%20Atomizing.pdf](http://www.hagonozzles.com/documents/service-download-literature/Water%20Atomizing.pdf)

IPCC. 2001. A report of working group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

<http://www.ipcc.ch/>