

**Kantava kasvualusta edistää katupuiden sopeutumista vaihteleviin
ympäristöolosuhteisiin**

Mari Mäki

Helsingin yliopisto
Metsätieteiden laitos
Pro gradu – tutkielma
28.2.2014

Tiedekunta/Osasto – Fakultet/Sektion – Faculty Maatalous- ja metsätieteellinen tiedekunta		Laitos – Institution – Department Metsätieteiden laitos	
Tekijä – Författare – Author Mari Mäki			
Työn nimi – Arbetets titel – Title Kantava kasvualusta edistää katupuiden sopeutumista vaihteleviin ympäristöolosuhteisiin.			
Oppiaine – Läroämne – Subject Metsäekologia			
Työn laji – Arbetets art – Level Pro gradu	Aika – Datum – Month/year 2/2014	Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages 58 s. + liitteet	
Tiivistelmä/Referat – Abstract <p>Katupuiden kasvualustan tiivistyminen, eli makrohuokosten tilavuuden pieneneminen, rajoittaa juurten kasvua, ja hidastaa kaasujen ja veden diffuusiota. Kasvualustojen lämpötilat saattavat nousta lämpösaareke-ilmion seurauksena, kun kestopäällysteiset pinnat varastoivat lämpöä. Lämpötila sekä hapen ja veden saatavuus vaikuttavat maahengitykseen, jossa mikrobit vapauttavat hiilidioksidia ja mineraaliravinteita hajottamalla orgaanisia yhdisteitä. Rajoitettu kasvualustan tilavuus heikentää veden saatavuutta, jolloin seurauksena voi olla puun kuivuusstressi. Mineraaliravinteiden saatavuus ja kasvualustan vesipitoisuus vaikuttavat puun bruttoprimäärituotukseen ja versonkasvuun.</p> <p>Kantavia kasvualustoja on kehitetty ehkäisemään kasvualustan tiivistymistä. Kasvualustan kivimatriisi toimii kantavana rakenteena ja hienoaines pidättää vettä, mineraaliravinteita ja orgaanista ainesta sekä toimii hienojuurten kasvualustana. Tutkimuksessa verrattiin pilaritervalepän ja puistolehmuksen versonkasvua Helsingin Viikissä vuosina 2003–2011. Pilaritervaleppä kasvoi Norkkokujalla ja puistolehmus Pasteurinkadulla. Molemmille kaduille rakennettiin kolme erilaista kantaa kasvualustaa, jotka erosivat toisistaan hienoaineksen tilavuuden, kuiva-irtotiheyden ja koostumuksen suhteen. Hienoaineksen vesipitoisuus oli korkeampi Pasteurinkadulla kuin Norkkokujalla. Tutkimuksessa tarkasteltiin ravinteiden vapautumista maaperän ravinneanalyysillä ja mitattiin orgaanisen aineksen määrän muutoksia ja hajotusnopeutta sekä hajotusnopeuden riippuvuutta lämpötilasta, hienoaineksen vesipitoisuudesta ja orgaanisen aineksen määrästä laboratorioinkuboinnilla. Lisäksi tutkittiin, kuinka paljon kasvualustoista vapautui vuosittain hiiltä ilmakehään orgaanisten yhdisteiden hajoamisprosessissa.</p> <p>Suurempi orgaanisen aineksen saatavuus lisäsi ravinteiden vapautumista. Orgaanisen aineen määrällä ja hajotusnopeudella oli selkeä positiivinen riippuvuus. Lämpötila selitti 81–100 % ja hienoaineksen vesipitoisuus 15–45 % hajotusnopeuden vaihtelusta inkubaatiokokeessa, eli korkeampi lämpötila ja vesipitoisuus lisäsivät hajotusnopeutta. Kasvualustan hienoaineksesta vapautui hiiltä maahengityksessä 1,8–6,4 kg v⁻¹ Norkkokujalla ja 13,9–87,6 kg v⁻¹ Pasteurinkadulla. Vapautuneen hiilen osuus oli 0,8–2,6 % v⁻¹ maan hiilivarastosta Norkkokujalla ja 2,9–6,7 % v⁻¹ Pasteurinkadulla. Vapautunut hiilivuo oli kasvualustan tilavuuteen (15 m³ ja 45 m³) ja hiilivarastoon nähden suurempi Pasteurinkadulla kuin Norkkokujalla, joten kasvualustan suurempi hienoaineksen vesipitoisuus lisäsi maahengitysaktiivisuutta.</p> <p>Maahengityksessä vapautunut hiilidioksidivuo oli 1,2–225,3 µg g⁻¹ vrk⁻¹, ja vuo oli suurin kasvualustassa kaksi. Kasvualustan hienoaines sisälsi jätevesilietekompostia, männyn kuorta ja saraturvetta, ja siinä oli eniten hajoavaa orgaanista ainesta. Hienoaineksen monipuolinen koostumus ja orgaanisen aineksen hajoamisaktiivisuus ylläpitivät ravinteiden saatavuutta sekä pilaritervalepän ja puistolehmuksen versonkasvua korkeimmalla tasolla kasvualustassa kaksi. Kasvualustojen väliset erot tulivat esiin pidemmällä aikavälillä. Kasvualustan lämpösummalla tai hienoaineksen vesipitoisuudella ei ollut merkitsevää vaikutusta versonkasvuun.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords maahengitys, katupuu, kantava kasvualusta, hajoamisaktiivisuus, versonkasvu			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information Tutkimus on osa Metsätieteiden laitoksen ja Helsingin kaupungin Rakennusviraston koekatu-hanketta, jossa kehitetään katurakentamista vastaamaan paremmin puiden resurssivaatimuksia.			

SISÄLLYSLUETTELO

1. Johdanto	1
1.1 Tausta	1
1.2 Kasvualustan mineralisaatio ja juurten ravinteidenotto	2
1.3 Maahengitys ja hiilen kierto maaperässä	4
1.4 Fotosynteesi ja versonkasvu	6
1.5 Puun vedenkäyttö	8
1.6 Tavoitteet ja hypoteesit	9
2. Aineisto ja menetelmät	11
2.1 Koekadut	11
2.2 Puulajit	12
2.3 Kasvualustat.....	12
2.4 Käytetyt menetelmät	13
2.3.1 Maanäytteiden otto	13
2.3.2 Maa-aineksen mineralisaation mittaaminen	13
2.3.3 Hehkutushäviöiden ja ravinnepitoisuuksien määrittäminen	15
2.3.4 Kasvualustan vesipitoisuuden ja lämpötilan mittaaminen	16
2.3.5 Verson pituuskasvun mittaaminen ja juurten massa	17
2.3.6 Ilman lämpötilan, ilman suhteellisen kosteuden ja sadannan mittaaminen.....	17
2.5 Aineiston käsittely	18
2.5.1. Maahengitys ja sen lämpötilavaste	18
2.5.2. Maahengityksessä vapautuva hiili.....	19
2.5.3 Kasvualustaan sitoutunut hiili.....	20
2.5.4. Hienoaineksen vesipitoisuus.....	20
2.5.5. Termisen kasvukauden pituus.....	21
2.6 Tilastolliset analyysit	21
2.6.1 Lämpötilan ja hienoaineksen vesipitoisuuden vaikutus versonkasvuun	22
2.6.2 Erot ravinnekonentraatioissa vuosien ja kasvualustojen välillä	23
2.6.3 Erot hehkutushäviöissä ja Q_{10} -arvoissa kasvualustojen välillä.....	23
2.6.4 Erot hehkutushäviöissä ja Q_{10} -arvoissa vuosien välillä.....	24
2.6.5 Hajotuksen ja hehkutushäviön välinen riippuvuus.....	24
2.6.6 Hehkutushäviön ja versonkasvun välinen riippuvuus.....	24
3. Tulokset	25
3.1 Kasvualustan ominaisuudet.....	25
3.1.1 Kasvualustan ravinteet	25
3.1.2 Hehkutushäviöt ja juurten jakautuminen.....	26

3.2 Ympäristötekijät	28
3.2.1 Kasvualustan vesipitoisuus ja lämpösumma.....	28
3.2.2 Kasvukauden terminen lämpösumma ja sadanta	31
3.3 Maahengityksen ympäristövasteet	31
3.3.1 Maahengitys ja sen lämpötilavaste	31
3.3.2 Maahengityksen riippuvuus hienoaineksen vesipitoisuudesta.....	34
3.3.3 Kasvualustan hienoaineksesta vapautuva hiili	35
3.3.4 Maahengitys ja hehikutushäviöt	37
3.4 Puiden versonkasvu	37
4. Tulosten tarkastelu.....	39
4.1 Kasvualustojen vesipitoisuuden ja lämpötilan vaikutus maahengitykseen	39
4.2 Kasvualustojen hehikutushäviöiden vaikutus maahengitykseen	42
4.3 Versonkasvu ja kasvualustan mineralisaatio	43
4.4 Puiden kuivuudensietokyky versonkasvussa	45
4.5 Kasvualustan lämpösumma ja versonkasvu	47
4.6 Mikä on paras kasvualusta?.....	48
5. Johtopäätökset.....	49
6. Kiitokset	50
7. Kirjallisuus.....	51
Liitteet	59

1. Johdanto

1.1 Tausta

Katuympäristö poikkeaa puiden luontaisesta elinympäristöstä, koska kasvualusta on tyypillisesti infrastruktuurin rajaama, tilavuudeltaan pieni ja rakenteeltaan tiivistynyt (Graboski ja Gilman 2004, Bühler ym. 2009). Katupuiden keskimääräinen eliniän odote on 19–28 vuotta (Roman ja Scatena 2011), koska vaikeat kasvuolosuhteet lyhentävät katupuiden elinikää. Tiedon ja osaamisen rajallisuus sekä monipuolisen taimiaineksen puute taimitarhoilla kaventaa katuympäristössä hyödynnettävää puulajivalikoimaa. Katupuututkimuksessa tavoitteena on puiden eliniän pidentäminen ja kustannusten laskeminen kasvuolosuhteita parantamalla ja lajivalikoimaa laajentamalla. Kantavia kasvualustoja on kehitetty ratkaisuksi kasvualustan tiivistymiseen, ja niiden malli tuli Suomeen Kööpenhaminasta (Männistö 2006). Kasvualustan kivimatriisi toimii kantavana rakenteena ja hienoaines kivien välissä pidättää vettä, sisältää mineraaliravinteita ja orgaanista ainesta sekä toimii hienojuurten kasvualustana (Grabosky ym. 1999, Bühler ym. 2009). Helsingissä kantavia kasvualustoja on käytetty jo 20 vuotta, mutta toistaiseksi on olemassa vähän tutkimustuloksia siitä, millainen kasvualustan koostumuksen pitäisi olla (Riikonen ym. 2010). Tässä tutkimuksessa verrataan kolmea erilaista kantavaa kasvualustaa.

Tiivistymisen aiheuttama makrohuokosten tilavuuden pieneneminen rajoittaa juurten eteenpäin kasvua, ja heikentää hapen diffuusiota juuristovyöhykkeellä (Trowbridgen ja Bassukin 2004, Day 2010b). Kestopäälysteiset pinnat rajoittavat kaasujen diffuusiota (Jim ym. 1989, Balakina ym. 2005) ja orgaanisen aineksen saatavuutta. Orgaanisten yhdisteiden hajoamisaktiivisuutta kontrolloivat maaperän lämpötila ja vesipitoisuus, hapen diffuusio, orgaanisen aineksen saatavuus ja kemiallinen laatu sekä maaperän mikrobien lajijakauma ja -toiminta (Stotzky ja Norman 1961, Swift ym. 1979, Skopp ym. 1990, Raich ja Potter 1995, Stark ja Firestone 1995, Giardina ja Ryan 2000, Kähkönen ym. 2001, Law ja Ryan 2005, Reichstein ym. 2005, Davidson ja Janssens 2006, Kutsh ym. 2009, Karhu ym. 2010a, Hamdi ym. 2012). Laboratorioinkuboinnilla voidaan tarkastella yksittäisen parametrin, kuten lämpötilan tai vesipitoisuuden, vaikutusta maahengitykseen (Kutsch ym. 2009). Maahengitysaktiivisuuden muutokset vaikuttavat mineraaliravinteiden vapautumisen kautta maanpäällisen biomassan tuotantoon (Chapin ym. 1995, Rustad ym. 2001), ja todennäköisesti myös katupuiden versonkasvuun.

Urban heat island-ilmiö eli lämpösaareke-ilmiö on yleinen tiheästi rakennetussa kaupungissa (Pouyat ym. 2003). Kestopäällysteiset pinnat heijastavat säteilyä ja varastoivat lämpöä. Pinnat ovat myös kuivia, joten haihdunnassa ilmakehään vapautuva lämpöenergia on pienempi. Näiden ilmiöiden seurauksena kaupunkien lämpötilat nousevat. Lämpösaarekeilmiön aiheuttama lämpötilojen nousu voi vaikuttaa myös kasvualustan lämpötilaan. Rajoitettu kasvualustan tilavuus ja tiivistyminen sekä heikko sadannan imeytyminen heikentävät vedenpidätyskykyä ja veden saatavuutta (Cregg ym. 2001, Kaye ym. 2006). Rajoitettu kasvualustan tilavuus saattaa lisätä myös vesipitoisuuden vaihteluita kasvualustassa. Latvustot eivät varjosta toisiaan merkittävästi, joten lehtien absorboiman suoran säteilyn osuus on suuri. Seurauksena puiden haihdunta ja kuivuusstressin riski kasvavat (Whitlow ja Bassuk 1987). Kasvualustan vesipitoisuuden muutokset voivat heijastua fotosynteesituotoksen ja hiilen allokoinnin kautta versonkasvuun.

1.2 Kasvualustan mineralisaatio ja juurten ravinteidenotto

Mikrobit hajottavat orgaanisten yhdisteiden kemiallisia sidoksia tuottamalla entsyymeillä (Hattori 1976, Ross 1989, Kutsch ym. 2009) vapauttaen hiilidioksidia (Simojoki ym. 2008). Hiilidioksidituottoa seuraamalla voidaan tehdä päätelmiä mikrobien hajottamisaktiivisuudesta (Wood ym. 1993). Suurin osa puun hienojuurista kasvaa yleensä maaperän ylemmissä kerroksissa (Wilson ym. 1964; Hendrick ja Pregitzer 1996; Day ym. 2010), joten siellä syntyy eniten orgaanista juuristokariketta mikrobeille. Hienoaineksen huuhtoutuminen ja juuriston erilainen rakenne voivat vaikuttaa hienoaineksen määrään ja juuristokarikkeen jakautumiseen. Karikkeesta vapautuu ravinteita orgaanisen aineksen mineraalisaation seurauksena (Simojoki ym. 2008).

Ravinteet voidaan jakaa neljään ryhmään niiden biokemiallisen roolin perusteella (Mengel ja Kirkby 2001). Hiilen (C), vedyn (H), hapen (O), typen (N) ja rikin (S) muodostamat yhdisteet mahdollistavat kasvin entsyymaattiset prosessit ja fotosynteesin hapetus-pelkistys reaktiot. Fosforin (P), boorin (B) ja piin (Si) muodostamat yhdisteet osallistuvat alkoholiryhmien esteröintiin ja energiansiirtoreaktioihin. Kalium (K), natrium (Na), kalsium (Ca), magnesium (Mg), mangaani (Mn) ja kloori (Cl) ovat tärkeitä entsyymien aktivoinnissa. Ne myös kontrolloivat solukalvon läpäisevyyttä ja sähkökemiallista potentiaalia. Rauta (Fe), kupari (Cu), sinkki (Zn) ja molybdeeni (Mo) mahdollistavat elektronien kuljetusreaktiot muuttamalla valenssiaan. Suomessa suositeltavat ravinnepitoisuudet kantavalle kasvualustalle ovat seuraavat: liukoinen N 15–40 mg l⁻¹, P 15–30 mg l⁻¹, K 200–450 mg l⁻¹, Ca 2500–5500 mg l⁻¹, Mg 250–500 mg l⁻¹ ja S 10–200 mg l⁻¹ (Viheralueiden

hoito VHT 05). Toistaiseksi ei ole määritetty, miten kantavaan kasvualustaan sijoitetut mineraaliravinteet säilyvät kasvualustassa ja riittävät puun kasvuun pidemmällä aikavälillä.

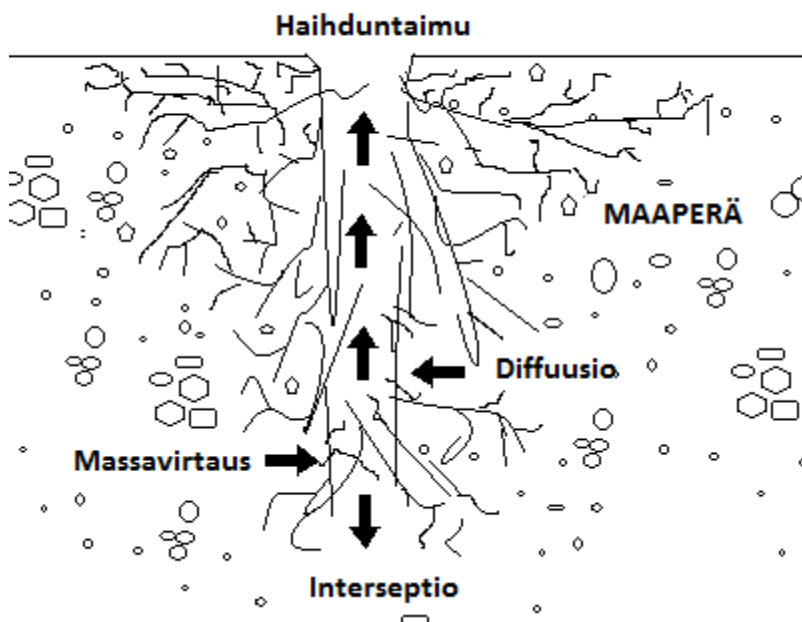
Epäorgaaninen typpi on ligniinin ja proteiinien, kuten entsyymien rakennusaine (Lukac ja Godbold 2011). Epäorgaanisen typen määrä riippuu orgaanisen aineksen hajoamisaktiivisuudesta, mikrobien immobilisaatiosta, ilmakehän typpilaskeumasta, karikkeen määrästä ja laadusta sekä mikrobien ja juuriston välisestä kilpailusta (Jim ym. 1998, Lukac ja Godbold 2011, Korhonen ym. 2013). Katupinnoitteet rajoittavat orgaanisen lehtikarikkeen pääsyä maaperään, ja pienentynyt orgaanisen aineksen saatavuus hidastaa typen mineralisaatiota verrattuna metsämaan luontaisiin olosuhteisiin. Toisaalta kaupungin puistojen ja viheralaiden pintamaassa (0–7,5 cm) on havaittu myös kasvanut nitrifikaatio- ja denitrifikaatioaktiivisuus pintavalunnan, keinokastelun ja lannoitteiden käytön seurauksena (Zhu ym. 2005).

Metsäekosysteemissä typen lähde on myös biologinen typen sidonta (Korhonen ym. 2013), mutta katuympäristössä päällystetyt pinnat rajoittavat kaasujen vaihtoa, ja tämä vaikuttaa symbioottisten sienten biologiseen typensidontaan. Esimerkiksi harmaalepän (*Alnus incana*) juuristobakteerien typensidontaa säätelevän nitrogenaasientsyymin aktiivisuus kasvoi juurinystyröiden korkeammassa happipitoisuudessa, koska mikrobit tarvitsevat happea hengitykseen (Lundquist ym. 2000). Nitrogenaasientsyymin toiminta kuitenkin heikkeni, kun happipitoisuus nousi juurinystyröiden soluissa yli 20 prosenttiin. Juurinystyröiden typensidontakyky erottaa lepät muista Suomessa luontaisesti kasvavista puulajeista, ja tämän vuoksi pilaritervaleppä on valittu toiseksi tarkasteltavaksi puulajiksi tässä tutkimuksessa.

Emäskationeja (K^+ , Ca^{2+} ja Mg^{2+}) vapautuu maanesteeseen kiviaineksen rapautuessa (Palviainen ym. 2012), kun fysikaaliset, kemialliset tai biologiset tekijät rikkovat yhdisteiden välisiä kemiallisia sidoksia (Lukac ja Godbold 2011). Kasvit ja mikrobit hyödyntävät nopeasti maanesteeseen liuenneet emäskationit, mutta myös emäskationien huuhtoutuminen on yleistä. Epäorgaanisen fosforin pitoisuus maanesteessä riippuu kiviaineksen rapautumisen lisäksi orgaanisen aineksen mineralisaatiosta (Banfield ym. 1999).

Ravinteet siirtyvät hienojuurten pinnalle useiden mekanismien avulla (Marschner 2012), ja juurten sisään puoliläpäisevän kalvon läpi solukalvon kuljetusproteiinien avulla (Chrispeels ym. 1999).

Interseptiossa hienijuuri kasvaa maapartikkeleiden muodostamissa huokosissa kohti savipartikkelien pinnalle kiinnittyneitä ioneja (kuva 1.1). Massavirtauksessa puun haihduntaimua ajava voima on vesipotentialigradientti. Diffuusiossa vesimolekyylit liikkuvat pitoisuusgradientin suuntaisesti. Mineraaliravinteet siirtyvät solukalvon läpi pääasiassa epäorgaanisessa muodossa kationeina tai anioneina. Suuremmat molekyylit, kuten negatiivisesti varautuneet anionit, kulkevat solukalvon ionipumppujen läpi, ja tämä vaatii energiaa, koska anionit kulkevat pitoisuusgradienttia vastaan (Sondergaard ym. 2004).



Kuva 1.1. Ravinteet siirtyvät hienijuurten pinnalle kolmella eri tavalla (Marschner 2012). Interseptiossa hienijuuri kasvaa huokosissa kohti savipartikkelien pinnalle kiinnittyneitä mineraaliravinteita. Massavirtauksessa puun haihduntaimu kuljettaa mineraaliravinteita vesipotentialigradientin suuntaisesti. Diffuusiossa vesimolekyylit liikkuvat pitoisuusgradientin suuntaisesti.

1.3 Maahengitys ja hiilen kierto maaperässä

Organismit voidaan jakaa autotrofisiin eliöihin, jotka käyttävät epäorgaanista hiiltä (CO_2) ja heterotrofisiin eliöihin, jotka hajottavat orgaanisia yhdisteitä kuten sokereita (Ross ym. 1989). Autotrofinen maahengitys voidaan jakaa ritsosfääriin eli juuriston ja mykorritsarihmaston hengitykseen, ja se kuvaa juuriston aktiivisuutta (Andersen ym. 2005, Ryan ja Lawn 2005). Autotrofisessa hengityksessä juuriston solut tuottavat energiaa hajottamalla hiiliyhdisteiden sisältämiä kemiallisia sidoksia. Autotrofisen hengityksen osuus on 10–90 prosenttia koko maahengityksestä riippuen vuodenaikasta ja kasvillisuustyypistä (Hanson ym. 2000). Heterotrofisen hengitys on merkittävä osa koko ekosysteemin hengitystä (Davidson ym. 2005), ja tämän vuoksi sillä on tärkeä rooli hiilen kierrossa. Autotrofisen ja heterotrofisen hengityksen erottaminen on

vaikeaa (Hanson ym. 2000), mutta tärkeää maaperäprosesseihin keskittyvän tutkimuksen kannalta.

Heterotrofisessa hengityksessä mikrobit hajottavat orgaanisia yhdisteitä (Kutsch ym. 2009), ja vapauttavat energiaa sekä yksinkertaisia yhdisteitä omien solujensa rakennusaineiksi (Ross 1989). Mikrobin solunulkoiset entsyymit pienentävät kemiallisten reaktioiden aktivaatioenergiaa, eli tehostavat reaktioita (Davidson ja Janssens 2006). Mikrobit käyttävät vapautuvan energian entsyymien valmistukseen. Entsyymituotanto riippuu mikrobin aktiivisuudesta sekä hiilen- ja typen saatavuudesta (Allison ja Vitousek 2005). Orgaanisen aineksen hajoamisaktiivisuuden seurauksena karike ja siitä syntyvät humusaineet hajoavat maaperässä (Kutsch ym. 2009), ja maaperään vapautuu hiiltä ja mineraaliravinteita (Allison ja Vitousek 2005, Simojoki ym. 2008). Lämpötilan nousu lisää myös juuriston kuolleisuutta (Pregitzer ym. 2000), ja seurauksena syntyy enemmän juuristokariketta. Syntyneet yksinkertaiset yhdisteet, kuten sokerit ja aminohapot, kulkevat helposti solukalvojen läpi juuren soluihin (Davidson ym. 2005).

Orgaanisen aineksen hajotusnopeutta voidaan tutkia ns. laboratorioinkubointimenetelmällä, jossa mitataan mikrobitoiminnassa syntyvän hiilidioksidin määrää. Hiilidioksidin tuottonopeuden (hengityksen) perusteella voidaan laskea mikrobitoiminnan aktiivisuus ja suhteuttaa sitä ympäristötekijöihin (maaperän lämpötila ja vesipitoisuus) ja maa-aineksen ominaisuuksiin, kuten orgaanisen aineksen määrään ja ravinnepitoisuuksiin (Dilly ja Nannipieri 2001; Allen ja Schelinger 2004, Miller 2005; Smith 2005; Shaver 2006). Silloin pystytään tarkastelemaan yksittäisen parametrin vaikutusta maaperän hiilidioksidin tuottoon (Kutsch ym. 2009).

Maaperän lämpötila ja vesipitoisuus vaikuttavat maahengitykseen entsyymiaktiivisuuden kautta (Davidson ym. 2005). Lämpötilan noustessa mikrobin hajotusaktiivisuus kasvaa (Trumbore ym. 2000, Giardina ym. 2004). Maahengityksen riippuvuutta lämpötilasta on kuvattu matemaattisesti 1800-luvun lopusta alkaen (Arrhenius 1889), ja useissa empiirisissä malleissa mukaan on otettu lämpötilan lisäksi sadanta tai maaperän vesipitoisuus (Raich ja Potter 1995; Reichstein ym. 2005).

Maaperän hiilidioksidivuon korreloi merkittävästi ilman lämpötilan ja sadannan kanssa globaalilla tasolla (Raich ja Potter 1995). Maahengityksen riippuvuus lämpötilasta on merkittävä tekijä tarkasteltaessa, kuinka ilmaston lämpeneminen ja ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden nousu

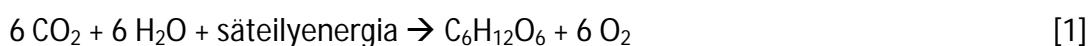
vaikuttavat ekosysteemien sitomaan hiileen maaperässä (Hamdi ym. 2012). Jos hengitys (R) kasvaa enemmän kuin bruttoprimäärituotos (GPP), ekosysteemi muuttuu hiilen lähteeksi ja kiihdyttää hiilidioksidipitoisuuden kasvua ilmakehässä. Borealisissa metsissä maahengityksessä syntyvä hiilidioksidi muodostaa merkittävän osan koko ekosysteemin hengityksestä, ja maahengitys voi olla vuosittaisesta ekosysteemihengityksestä jopa 46–62 prosenttia (Wang ym. 2004). Kaupunkiympäristössä yleinen lämpösaareke-ilmiö voi nostaa myös maaperän lämpötilaa (Whitlown ja Bassukin 1987), ja muutokset lämpötiloissa voivat vaikuttaa merkittävästi mikrobien maahengitysaktiivisuuteen (Pouyat ym. 2003).

Juuriston uusiutuessa maaperään vapautuu jopa 47 prosenttia hienojuuriin ja mykorritsarihmastoon allokoitua hiilestä (Fogel ja Hunt 1983). Hiiltä on sitoutunut kaupunkien maaperään, koska heikentynyt hapen diffuusio hidastaa aerobista hengitystä, joka vapauttaa hiiltä maaperästä ilmakehään. Kaupunkiympäristössä orgaanisen hiilen varasto on merkittävästi suurempi kuin taajamametsissä tai maanviljelykäytössä olevassa maaperässä (Pouyat ym. 2002, Edmondsonin ym. 2012).

Juuriston aktiivisuus ja biomassa säätelevät juuristokarikkeen ja -eritteiden määrää, ja vaikuttavat siten myös hajotettavan aineksen saatavuuteen (Davidson ym. 2005). Mikrobien depolymeraasientsyymien aktiivisuus ja hajotettavan aineksen saatavuus säätelevät orgaanisen aineksen hajoamisaktiivisuutta (Kutsch ym. 2009, Hamdi ym. 2012). Huokostilavuus, vesipitoisuus sekä pitoisuusgradientti ja etäisyys maakerrosten välillä säätelevät kaasujen diffuusiota maaperässä (Aachib ym. 2004, Pumpanen ym. 2008). Tämän vuoksi hapen saatavuus on sidoksissa hienoaineksen vesipitoisuuteen kasvualustassa. Maaperän mikrobit ja juuret tarvitsevat happea, joten happi voi olla rajoittava tekijä maahengityksessä ja juuristokarikkeen muodostumisessa (Davidson ym. 2005). Kaasut liikkuvat maaperässä myös painegradientin avulla (konvektio) (Lukac ja Godbold 2011).

1.4 Fotosynteesi ja versonkasvu

Fotosynteesi on prosessi, jossa kasvit muuttavat solujensa viherhiukkasissa hiilidioksidin valon ja veden avulla glukoosiksi ja hapeksi (Rothemund 1956, Goodwin ja Mercer 1983, Priem 1997):



Hiilidioksidimolekyylit diffundoituvat lehden sisälle huulisolujen väliseen ilmatilaan ilmarakojen ollessa auki (Evans ym. 1996). Ilmatilasta CO₂ siirtyy solujen sisälle nestefaasissa ja solujen sisältä edelleen viherhiukkasiin. Fotosynteesikoneisto hyödyntää energialähteenä tiettyä valon aallonpituusalueita (400–700 nm), jota kutsutaan fotosynteettisesti aktiiviseksi säteilyksi eli PAR-säteilyksi (Stenberg 1996).

Puulajien fotosynteesiaktiivisuus on herkkä eri ympäristötekijöiden vaihtelulle (Bassow ja Bazzaz 1998). Puu ylläpitää hiilidioksidin diffuusiota ja fotosynteesiä säätelemällä ilmarakojen johtokykyä lämpötilan, lehden vesipotentiaalin, ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden ja veden höyrynpaineen vajauksen (VPD) perusteella (Jarvis ym. 1976, Poole ym. 2000). Hiilidioksidin diffuusion pieneneminen on merkittävä syy siihen, miksi fotosynteesitehokkuus laskee kuivuusstressin aikana (Roupsard ym. 1996). Säteilyn määrä vaihtelee ympäristötekijöistä voimakkaimmin latvuksen sisällä vaikuttaen fotosynteesiaktiivisuuteen (Kolari ja Hari 2008).

Solut vapauttavat käyttöönsä energiaa hengityksessä pilkkomalla fotosynteesissä tuotettua glukoosia hapen avulla hiilidioksidiksi ja vedeksi (Rothmund 1956, Goodwin ja Mercer 1983):



Soluhengityksessä keskeisiä vaiheita ovat glykolyysi, sitruunahappokierto ja elektroninsiirtoketju (Ferne ym. 2004). Kun puun fotosynteesi- eli bruttoprimäärituotoksesta (GPP) vähennetään hengitys (R), saadaan tuloksena nettofotosynteesi (NPP) (Waringin ym. 2013). Nettofotosynteesi on se osa, jonka puu allokoii kasvuun ja varastoihin.

Puu investoi yhteytetystä hiilestä 40–73 prosenttia maan alle (Grayston ym. 1997), eli juuriston hengitykseen ja kasvuun (Day ym. 2010b). Geenit ja ympäristötekijät säätelevät sitä, missä suhteessa puu allokoii nettofotosynteesituotoksen verson ja juuriston kasvuun. Esimerkiksi rauduskoivulla (*Betula pendula* Roth) juuri/verso -suhde kasvoi maaperän lämpötilan noustessa (Pumpanen ym. 2012). Juuri/verso-suhde oli 1,46 (7–12 °C), 1,87 (12–15 °C) ja 2,19 (16–22 °C). Lämpötila säätelee verson pituuskasvua ja kasvukauden pituutta (Chmielewski ym. 2002; Slaney ym. 2007). Myös ravinteiden määrä vaikuttaa juuri/verso -suhteeseen. Kun kasvuolosuhteet mahdollistavat korkean fotosynteesituotoksen (GPP), allokoii puu enemmän hiiltä maanpäällisen

osan kasvuun (Litton ym. 2007). Vähäravinteisessa maassa puu allokoii enemmän hiiltä juuristoon varmistaakseen riittävän ravinteiden saannin. Rakennetussa ympäristössä maaperän ominaisuudet, kuten tiivistyminen, maanalainen infrastruktuuri, kohonnut pH ja muuttuneet lämpötila ja vesipitoisuus, voivat muuttaa juurten morfologiaa, fysiologiaa ja kasvudynamiikkaa (Day ym. 2010b). Kun veden tai mineraaliravinteiden saatavuus on rajoitettu, puu investoi enemmän yhteyttämäänsä hiiltä juuriston kasvuun, jolloin verson pituuskasvu hidastuu.

1.5 Puun vedenkäyttö

Haihdunta ylläpitää puun veden kiertoa, ja vesimolekyylit liikkuvat koheesivoimien avulla muodostaen painegradientin, joka vetää yhtenäistä vesipatsasta ksyleemin putkisoluissa (Hölttä ym. 2006). Fotosynteesissä muodostunut glukoosi kulkee vastakkaiseen suuntaan nilan siiviläputkissa mahdollistaen yhteytetyn hiilen allokoinnin juuriin ja runkoon (Hölttä ym. 2006). Kasvin haihduntaa eli transpiraatiota ajava voima on veden pitoisuusgradientti, eli vesimolekyylit liikkuvat diffuusion avulla ilmarakojen huulisoluista ilmakehään. Suurin osa juurten ottamasta vedestä haihtuu ilmakehään ilmarakojen kautta. Säteilyn määrä (Wild ja Wolf 1980), ravinteiden saatavuus (Frey ym. 1996) ja ilmakehän hiilidioksidipitoisuus (Poole ym. 2000) vaikuttavat ilmarakojen ominaisuuksiin, kuten huokosten kokoon, esiintymistiheyteen ja ilmarakoindeksiin, eli ilmarakojen peittävyyslehden pinta-alasta (%). Ilmarakojen ominaisuudet vaikuttavat puolestaan puun haihduntaan.

Haihdunta muodostaa vesipotentialigradientin ja vesi siirtyy maaperästä juuriin haihduntaimuna ja osmoottisen juuristopaineen kautta (Lukac ja Godbold 2011). Huokosten määrä ja kokojakauma vaikuttavat veden diffuusion. Makrohuokokset (> 50 µm) sisältävät keskikokoisia juuria, ja ne täyttyvät sateen seurauksena gravitaatiovedellä, joka huuhtoutuu painovoiman seurauksena pois juuristovyöhykkeeltä. Mesohuokokset (20–50 µm) pidättävät vettä, joka siirtyy diffuusion kautta juurten soluihin. Juuret eivät pysty hyödyntämään mikrohuokosten (< 20 µm) sisältämää vettä, koska se on pidättynyt partikkelien pinnoille adheesivoimilla.

Rajoitettu veden saatavuus ja korkea haihdunta lisäävät kaupunkipuiden kuivuusstressiä (Whitlow ja Bassuk 1987), ja vesistressi on yleinen nuorten kaupunkipuiden kuolleisuutta selittävä tekijä (Novak ym. 2004). Veden saatavuus riippuu sateen intensiteetistä ja jakautumisesta, latvuspännästä ja maaperän vedenpidätyskyvystä (Lindsey ja Bassuk 1992). Kestopäälysteet ja

maaperän tiivistyminen lisäävät pintavaluntaa ja hulevesien hallinnalla ohjataan vesi pois kasvualustasta (Whitlow ja Bassuk 1987).

1.6 Tavoitteet ja hypoteesit

Orgaanisen aineksen hajoamisaktiivisuutta on tutkittu vähän kaupunkipuiden kasvualustoissa, ja tämän vuoksi tutkimuksessa arvioitiin hienoaineksen hajoamisaktiivisuutta. Tavoitteena oli määrittää, kuinka paljon kasvualustan maa-aineksesta vapautui hiiltä heterotrofisessa maahengityksessä yhden vuorokauden aikana. Tavoitteena oli myös laskea kasvualustasta vuoden aikana vapautuvan hiilen osuus suhteessa alkuperäiseen hiilivarastoon.

Maaperän lämpötilan ja vesipitoisuuden on havaittu vaikuttavan orgaanisen aineksen hajoamisaktiivisuuteen (Skopp ym. 1990, Raich ja Potter 1995, Stark ja Firestone 1995, Giardina ja Ryan 2000, Kähkönen ym. 2001, Reichstein ym. 2005, Davidson ja Janssens 2006, Karhu ym. 2010a, Hamdi ym. 2012), mutta toistaiseksi ei tiedetä, miten olosuhteiden muutokset vaikuttavat orgaanisen aineksen hajoamisaktiivisuuteen kantavassa kasvualustassa. Tutkimuksen tavoitteena oli tarkastella maanäytteiden lämpötilan ja vesipitoisuuden vaikutusta hajoamisaktiivisuuteen.

Tutkimusten mukaan orgaanisten yhdisteiden määrä ja laatu säätelevät hajoamisaktiivisuutta (Giardina ja Ryan 2000, Fointaine ym. 2003, Ryan ja Lawn 2005), koska orgaanisen aineksen saatavuus vaikuttaa mikrobien entsyymituotantoon (Kshattriya ym. 1991). Toistaiseksi ei tiedetä, lisääkö orgaanisen aineksen määrä hajoamisaktiivisuutta kantavassa kasvualustassa, vai rajoittaako jokin muu tekijä, kuten heikentynyt hapen diffuusio, voimakkaasti orgaanisen aineksen hajoamisaktiivisuutta. Tavoitteeni oli tarkastella, missä kasvualustassa orgaanisen aineksen määrä oli suurin sekä tarkastella, lisääkö suurempi orgaanisen aineksen määrä hajoamisaktiivisuutta kasvualustassa.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, mikä kolmesta kantavasta kasvualustasta kykenee tarjoamaan parhaat edellytykset katupuun kasvuun pidemmällä aikavälillä. Suurempi ravinteiden saatavuus voi johtaa suurempaan maanpäälliseen nettoprimäärituotokseen sekä pienempään maanalaiseen hiilen allokointiin (Giardina ym. 2003). Tavoitteena oli tarkastella, vaikuttavatko orgaanisen aineksen hajoamisaktiivisuus ja ravinteiden saatavuus vuotuisen versonkasvuun.

Kestopäällysteiset pinnat lisäävät pintavaluntaa ja hidastavat sadannan imeytymistä. Rajoitettu kasvualustan tilavuus ja heikentynyt sadannan imeytyminen pienentävät veden saatavuutta (Cregg ym. 2001, Kaye ym. 2006), jolloin seurauksena voi olla puun kuivuusstressi. Tavoitteena oli tarkastella, rajoittaako kantavan kasvualustan alhaisempi hienoaineksen vesipitoisuus puun versonkasvua.

Maaperän lämpötilan nousu voi lisätä orgaanisen aineksen hajoamisaktiivisuuden kautta mineraaliravinteiden vapautumista, ja tämä voi lisätä puiden bruttoprimäärituotosta (GPP) (Pumpanen ym. 2012). Jos GPP kasvaa enemmän kuin hengitys (R), on seurauksena suurempi nettoprimäärituotos (NPP) (Hari ja Kulmala 2008), eli puun kasvu. Tavoitteena oli tarkastella, vaikuttaako kasvualustan lämpösumma puun versonkasvuun. Tutkimus perustuu viiteen hypoteesiin.

Hypoteesi 1: Kantavan kasvualustan orgaanisen aineksen hajoamisaktiivisuus kiihtyy lämpötilan ja hienoaineksen vesipitoisuuden noustessa.

Hypoteesi 2: Kantavan kasvualustan suurempi orgaanisen aineksen määrä lisää hienoaineksen hajoamisaktiivisuutta.

Hypoteesi 3: Versonkasvu on suurempaa kantavassa kasvualustassa, jossa mineraaliravinteiden määrä ja orgaanisen aineksen hajoamisaktiivisuus ovat suurimpia.

Hypoteesi 4: Kantavan kasvualustan alhaisempi hienoaineksen vesipitoisuus pienentää vuotuista versonkasvua.

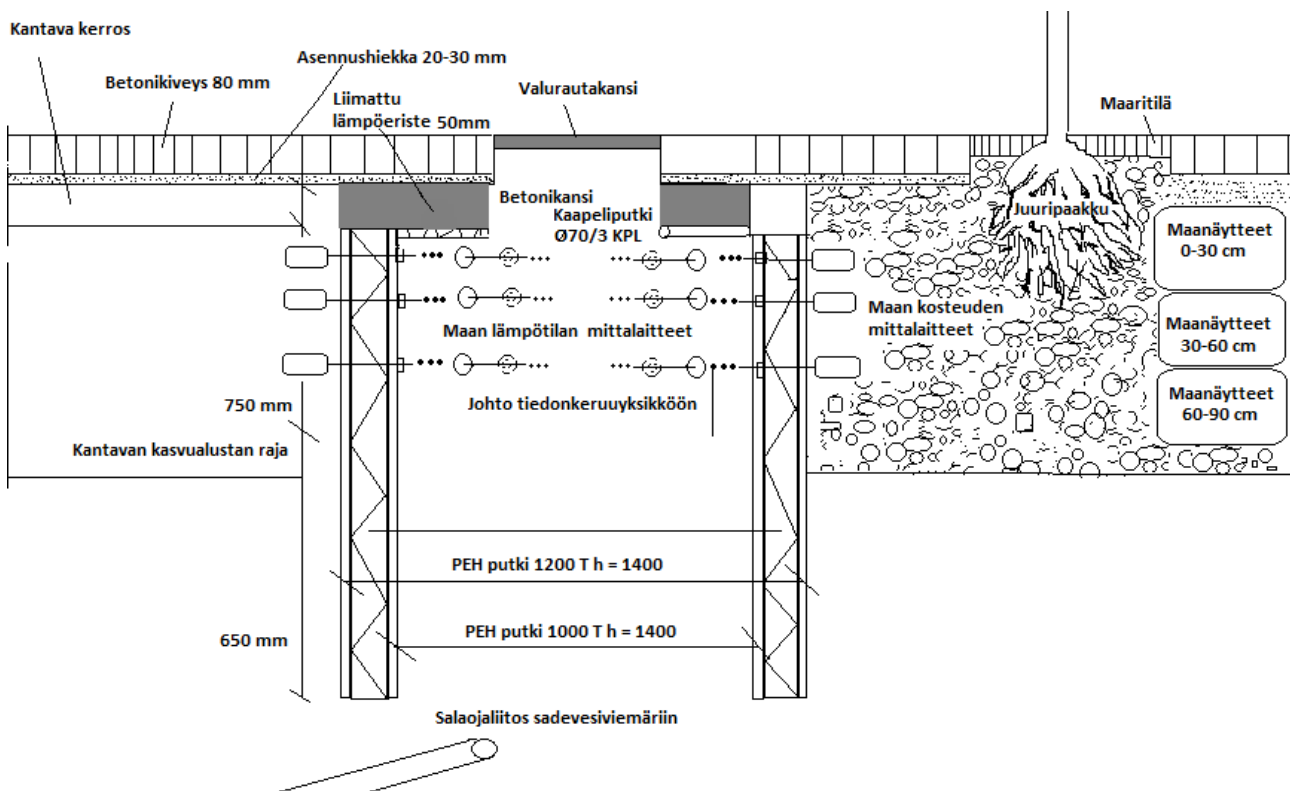
Hypoteesi 5: Kantavan kasvualustan korkeampi lämpösumma lisää vuotuista versonkasvua.

2. Aineisto ja menetelmät

2.1 Koekadut

Tutkimuksen aineisto on osa Metsätieteiden laitoksen ja Helsingin kaupungin Rakennusviraston koekatu-hankkeessa kerättyä aineistoa vuosilta 2002–2011. Hankkeen tavoitteena on kehittää katurakennustekniikkaa vastaamaan paremmin puiden resurssivaatimuksia.

Tutkimuksen kohteena olivat kaksi vuosina 2001–2003 rakennettua katua, jotka sijaitsivat lähietäisyydellä Helsingin yliopiston Viikin kampuksesta (N60°15', E25°03') (Riikonen ym. 2010). Alue on osa Suomen eteläistä rannikkoaluetta, ja se kuuluu hemiboreaaliseen ilmastovyöhykkeeseen. Norkkokuja sijaitsi asuinalueella, ja sitä ympäröivät talot. Pasteurinkadun ympärillä sijaitsi puisto, toimistorakennuksia ja asuinalueita. Molemmille kaduille rakennettiin kolme erilaista kantavaa kasvualustaa sekä kaivo jatkuvan seurannan mittauksia varten (kuva 1.2).



Kuva 1.2 Kasvualustaan on rakennettu kaivo jatkuvan seurannan mittauksia varten kahdesta sisäkkäin asennetusta 1,4 m mittaisesta PEH-putkesta (Krook ym. 2005). Mittalaitteet asennettiin poraamalla kaivoon pysty- tai vaakareikä, ja asentamalla mittalaite kaivosta käsin kasvualustaan. Maaperän lämpötilamittaukset on tehty termistoreilla (Data sheet KTY81-1 series). Mittaussyvytydet ovat 10, 30 ja 60 senttimetriä. Maaperän vesipitoisuutta mitattiin 10 ja 30 senttimetrin syvyydeltä Theta-probellilla (ML2x, Delta T Devices Ltd., Cambridge, Iso-Britannia).

2.2 Puulajit

Molempien katujen puut istutettiin vuoden 2002 loppusyksyllä valmiiksi asennettuun kantavaan kasvualustaan (Krook ym. 2005). Norkkokujalle istutettiin tervalepän (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn) siementaimiin vartettuja pilaritervalepän (*Alnus glutinosa* f. *pyramidalis*) taimia (Riikonen ym. 2010). Megataimien rinnankorkeusläpimitta oli istutusvaiheessa 8,2–10,8 senttimetriä. Puita istutettiin 22 kappaletta.

Pasteurinkadulle istutettiin 15 puistolehmusta (*Tilia cordata* x *vulgaris* Hayne) (Riikonen ym. 2010). Istutetuista puista 5 kappaletta korvattiin syksyllä 2003 samaa alkuperää olevilla uusilla puilla, koska edelliset kuolivat ensimmäisen vuoden aikana. Tarkemmin tuntemattomat puistolehmukskloonit oli vartettu metsälehmuksen (*Tilia cordata* Mill.) siementaimiperusrunkoihin. Megataimien rinnankorkeusläpimitta oli istutusvaiheessa 6,7–11,0 senttimetriä.

2.3 Kasvualustat

Molemmille kaduille perustettiin kolme erilaista kantavaa kasvualustaa. Kasvualustan yksi hienoaines sisälsi hiekkaa, saraturvetta ja savea. Kasvualustan kaksi hienoaines koostui jätevesilietekompostista, männyn kuoresta ja saraturpeesta ja kasvualusta kolme hienosta sepelistä, hiekasta, savesta, lehtikompostista ja männyn kuoresta. Tarkemmat tiedot kasvualustan rakenteesta ja koostumuksesta löytyvät taulukosta 1. Kasvualustojen kanto-ominaisuudet testattiin Tampereen teknillisessä yliopistossa (TTY) ja ne todettiin katurakentamisen kriteerit täyttäväksi (Nieminen 2002).

Norkkokujalla kasvualustat rakennettiin kuoppiin, joiden syvyys oli 1 metri ja leveys 3 metriä ja kasvualustat erotettiin toisistaan tiivistetyllä sepelillä (Riikonen ym. 2010). Pasteurinkadulla rakennettiin jatkuva kasvualustakaista päällystetyn pinnan alle. Kaistan syvyys oli 1 metri ja leveys 3 metriä, ja sitä ympäröivät autotie, jalankulkuväylä ja parkkiruudut. Kasvualustojen kaasukoostumuksen seurantaan varten osaan kasvualustoista sijoitettiin ilmastusputkia eli kaksikerroksisia salaojaputkia. Hienoaines ja kiviaines sekoitettiin käsittelykentällä, kuljetettiin kuorma-autolla koekaduille ja purettiin kippaamalla kolmeksi kasvualustakerrokseksi tiivistäen kerrosten välissä täryjyrällä. Kasvualustan kivet olivat pääasiassa graniittia ja raekoko oli (32-64 mm, 30-120 mm ja 64-150 mm). Kantavan kasvualustan koko oli puuta kohti 15–30 m³

Norkkokujalla ja 45–50 m³ Pasteurinkadulla (Riikonen ym. 2010). Puita kasteltiin viikoittain kaksi vuotta siirtoistutuksen jälkeen.

Taulukko 1.

Taulukossa on esitetty kasvualustojen koostumus ja rakenne (Riikonen ym. 2010 ja Krook ym. 2005).

Kasvualusta	Kantavan rakenteen tilavuus (%)	Hienoaineksen tilavuus (%)	Hienoaineksen kuiva-irtotiheys (kg l ⁻¹)
1 ^a	65	35	1,23
2 ^b	70	30	0,83
3 ^c	70	30	1,30

Hienoaineksen koostumus: (a) karkeaa ja hienoa hiekkaa, saraturvetta ja savea; (b) jätevesilietekompostia (56 %), männyn kuorta (22 %) ja saraturvetta (22 %); (c) hienoa sepeliä (5 %), hiekkaa (65 %), savea (20 %), lehtikompostia (7 %) ja männyn kuorta (3 %).

2.4 Käytetyt menetelmät

2.4.1 Maanäytteiden otto

Kasvualustoista kerättiin maanäytteitä orgaanisen aineksen hajoamisaktiivisuuden määrittämiseksi vuosina 2005, 2008 ja 2011. Jokaiseen kasvualustaan kaivettiin kaksi kuoppaa noin 60 senttimetrin syvyyteen. Vuonna 2008 osa kuopista kaivettiin 90 senttimetrin syvyyteen. Kasvualustojen päältä irrotettiin katupäällyste ja poistettiin teollisuusimurilla kasvualustan pinnassa oleva kestopäällysteen saumausmateriaali. Kasvualustasta kerättiin maanäytteiksi kaikki ylöskaivettu maa-aines kahdesta eri kerroksesta (0–30 ja 30–60 senttimetrin syvyydeltä, vuonna 2008 myös 60–90 senttimetrin syvyydeltä). Yli viiden senttimetrin läpimittaiset kivet punnittiin, mutta niitä ei otettu mukaan maanäytteisiin. Juuret kerättiin talteen molemmista maaperäkerroksista. Laboratoriossa maanäytteistä poistettiin kivet, joiden läpimitta oli yli 1 senttimetri ja juuret, jotka voitiin havaita silmämääräisesti. Kaivamisen yhteydessä esiin tulleet juuret ja maanäytteistä poistetut juuret yhdistettiin juurinäytteeksi maaperäkerroksittain ja punnittiin juurten tuorepaino. Juurinäytteet kerättiin vuonna 2011.

2.4.2 Maa-aineksen mineralisaation mittaus

Jokaisesta maanäytteestä otettiin 20 millilitran osanäytteet lasisiin inkubaatiopulloihin, joiden tilavuus oli 120 millilitraa. Jokaisesta maanäytteestä otettiin kahdeksan osanäytettä. Maaperän orgaanisen aineen hajoamisessa eli mineralisaatiossa mitattiin hiilidioksidin tuottoa suljetussa inkubaatiopullossa 24 tunnin aikana Kähköstä (2001) mukailen. Lämpötilan vaikutusta

maahengitykseen tutkittiin pitämällä kahdeksaa osanäytettä omista inkubaatiopulloissa ja kahta osanäytettä jokaisessa neljässä inkubaatiolämpötilassa (5, 10, 15 ja 25 °C) 24 tuntia ennen hengitysmittausta.

Ennen inkubaatiopullojen sulkemista ne huuhdottiin paineilmalla, jossa hiilidioksidipitoisuus oli noin 380–390 ppm. Jokaista kahdeksaa osanäytettä kohti täytettiin neljä tyhjää inkubaatiopulloa paineilmalla, jotta pystyttiin seuraamaan säilyivätkö paineilman kaasujen konsentraatiot tietyllä vaihteluvälillä tutkimuksen aikana. Pelkästään paineilmaa sisältävät kontrolli-inkubaatiopullot vietiin näytettä sisältävien inkubaatiopullojen kanssa kahteen eri lämpötilaan yhdeksi vuorokaudeksi. Nopalla arvottiin, mihin kahteen lämpötilaan kontrolli-inkubaatiopullot vietiin.

Ilmanäytteet otettiin inkubaatiopulloista neulalla (Becton, Dickinson and Company, Yhdysvallat) ilmatiiviiden korkkien läpi tilavuudeltaan 10 millilitran ruiskuihin (Becton, Dickinson and Company). Pelkästään paineilmaa sisältävistä inkubaatiopulloista otettiin ilmanäyte samalla tavoin. Näytteenottohetkellä inkubaatiopullot olivat noin 0 °C-asteen lämpötilassa. Kaasuanalyysit tehtiin laboratoriossa kaasukromatografilla (Hewlett Packard 5890, Hewlett-Packard, Yhdysvallat), joka mittasi hiilidioksidipitoisuudet ilmanäytteistä. Kaasukromatografissa ajettiin kolme kalibrintinäytettä ennen varsinaisten näytteiden ajamista ja yksi kalibrintinäyte näytteiden ajamisen päätyttyä. Joka neljännen ilmanäytteen jälkeen ajettiin yksi kalibrintinäyte. Kalibrintinäyte otettiin kaasupullosta (Air Liquide Finland Oy, Saksa), jonka happi- ja hiilidioksidipitoisuudet (16,1 ja 5,02 vol %⁻¹) tunnettiin. Yhden näytteen ajaminen kesti kahdeksan minuuttia, ja jokaisen näytteen ajamisen jälkeen kaasukromatografian näytteensyöttösilmukka huuhdeltiin heliumkaasulla.

Kaasuanalyysit tehtiin kahdella toisiinsa liitetyllä kaasukromatografilla. Toinen kaasukromatografi sisälsi molekyyli-seulaan (Molecular Sieve 5A, Restek Corporation, Yhdysvallat) liitetyt kolonnit typelle (N₂), hapelle (O₂), argonille (Ar), metaanille (CH₄) ja etyleenille (C₂H₄) sekä erilaisen kolonnin (Porapak Q) hiilidioksidille (Jaakkola ja Simojoki 1998). Kantokaasuna käytettiin heliumia, jonka virtaus oli 30 ml min⁻¹. Hiilidioksidipitoisuudet mitattiin TC-detektorilla.

Maanäytteistä määritettiin myös vesipitoisuus painoprosentteina. Vesipitoisuus saatiin vertaamalla painoeroa tuorepainon ja kuivapainon välillä (Gardner 1965). Tuorepaino mitattiin

punnitsemalla jokainen inkubaatiopullo tyhjänä sekä heti sen jälkeen, kun siihen oli laitettu 20 ml maanäyte. Kuivapaino määritettiin pitämällä inkubaatiopulloja uunissa 105°C-asteessa 24 tunnin ajan ja punnitsemalla pullot näytteineen heti kuumennuksen jälkeen. Tuore- ja kuivapaino saatiin vähentämällä tyhjän inkubaatiopullon paino. Inkubaatiopullon suuaukkoa ei peitetty, jotta muodostuva vesihöyry pääsisi poistumaan inkubaatiopulloista.

2.4.3 Hehkutushäviöiden ja ravinnepitoisuuksien määrittäminen

Mikrobien käytössä olevasta orgaanisen aineksen määrästä saatiin tietoa tarkastelemalla hehkutushäviötä. Hehkutushäviö kuvaa sitä, kuinka paljon maanäytteestä on orgaanista ainesta suhteessa koko maanäytteen massaan. Hehkutushäviöt määritettiin erikseen jokaisesta kasvualustasta kahdelta eri syvyydeltä (0–30 cm ja 30–60 cm) otetuista maanäytteistä vuosina 2005, 2008 ja 2011. Maanäytteet oli esikäsitelty kuivaamalla 105 °C-asteessa ja seulomalla 2 millimetrin seulalla. Hehkutusta varten esikäsitellyistä maanäytteistä punnittiin kolme kappaletta 5 gramman painoisia osanäytteitä posliiniupokkaisiin, joita pidettiin vuorokausi 105 °C-asteen lämpötilassa, ja tämän jälkeen näytteet punnittiin.

Hehkus tehtiin uunissa, jonka lämpötila nostettiin 550 °C-asteeseen kahdeksi tunniksi. Uunin annettiin jäähtyä useita tunteja, ennen kuin uunin luukku avattiin, ja näytteet otettiin pois. Näytteet jäädytettiin eksikaattorissa ja punnittiin. Hehkutushäviöt saatiin laskemalla, kuinka paljon osanäytteiden massat ovat muuttuneet hehkutuksen jälkeen. Koko näytteen hehkutushäviö saatiin laskemalla kolmen osanäytteen keskiarvo.

Lisäksi tarkasteltiin, miten ravinteiden määrä kasvualustassa muuttui määrittämällä ravinnekonsentraatiot maanäytteistä kolme kertaa seurantajakson aikana. Maaperän ravinnepitoisuudet määritettiin vuonna 2003 maanäytteistä, jotka oli otettu kasvualustaseoksesta ennen kasvualustojen rakentamista, ja vuosina 2005 ja 2008 maanäytteistä, jotka kerättiin kasvualustoista maahengityksen määrittämistä varten. Näytteistä määritettiin kalsiumin, fosforin, kaliumin, magnesiumin, kuparin, mangaanin, rikin, boorin, sinkin ja nitraattitypen pitoisuudet. Ravinneanalyysit tehtiin Eurofins Viljavuuspalvelu Oy:ssä, ja tiedot menetelmistä kuvattiin heidän lähettämillään tuloslomakkeilla.

Kalsiumin, kaliumin, magnesiumin, fosforin ja rikin pitoisuudet määritettiin uuttamalla maa happamaan ammoniumasetaatti-liuokseen (Vuorinen ja Mäkitie 1955). Kupari, sinkki ja mangaani määritettiin uuttamalla maa happamaan ammoniumasetaatti-EDTA-liuokseen (Lakanen ja Erviö 1971). Boorin uutettiin kuumaan veteen (Berger ja Truog 1939). Uuttoliuosten ravinnepitoisuudet mitattiin induktiivisesti kytketyllä plasma-massaspektrometrillä. Fosforipitoisuus mitattiin spektrofotometrisesti ammoniummolybdaatti-kompleksista vuonna 2008. Nitraattitypen pitoisuus määritettiin elektrodilla mittaamalla maa-vesi-suspensiosta (Vuorinen ja Mäkitie 1955). Määritetyt ravinnepitoisuudet olivat milligrammoja maalitraa kohti.

2.4.4 Kasvualustan kosteuden ja lämpötilan mittaus

Jokaiselle kasvualustalle perustettiin kadun rakentamisen yhteydessä automatisoitu mittauspiste, jossa mitataan maaperään, puihin ja mikrometeorologiaan liittyviä muuttujia (Riikonen ym. 2010). Maaperän kosteutta on mitattu vuodesta 2003 alkaen Pasteurinkadulla 10 ja 30 senttimetrin syvyydeltä kasvualustan pinnasta sekä Norkkokujalla vuodesta 2003 alkaen 10 senttimetrin ja vuodesta 2005 alkaen 30 senttimetrin syvyydeltä kasvualustan pinnasta. Maaperän kosteutta mitataan ns. Theta-probella (ML2x, Delta T Devices Ltd., Cambridge, Iso-Britannia).

Maaperän lämpötilamittaukset on tehty termistoreilla (KTY 81 110, Philips Semiconductors, Alankomaat). Niihin on kytketty rinnan 10k ohmin vastus, joka laskee mitattavan resistanssin dataloggerille sopivaksi. Termistorit on paketoitu kupariputken sisään lämpöä johtavan tahnan kanssa. Mittaussyvyudet ovat 10, 30 ja 60 senttimetriä ja mittauksia on tehty vuosina 2003–2011. Dataa kerätään automatisoidusti loggereihin 1-10 minuutin välein, ja data tallentuu varastoon päivittäin (Riikonen ym. 2010). Datasta laskettiin päiväkeskiarvot maaperän lämpötilalle.

Maaperän lämpötilan ja vesipitoisuuden mittausdatassa olevat aukot on täydennetty laskemalla ympäröivien arvojen keskiarvo, jos puuttuvaa dataa on vähemmän kuin tunti. Pidemmät aukot täydennettiin muiden antureiden lukemien perusteella muodostamalla lineaarinen regressiomalli ($y = ax + b$) kahden mittausanturin arvojen välille. Selitettävä muuttuja oli täydennettävä anturi ja selittävä muuttuja toinen anturi samalla ajanhetkellä. Puuttuvat arvot laskettiin muodostetun yhtälön avulla parametrien (a ja b) arvojen perusteella. Jos kaikilla antureilla oli aukko mittauksessa yhtä aikaa, tehtiin gap-filling laskemalla antureille arvot regressioyhtälöllä niiden arvojen perusteella, jotka olivat ennen ja jälkeen aukon. Aukko pyrittiin täydentämään niin, että

muodostetun regressiosuoran selitysaste olisi mahdollisimman suuri ($R^2 > 0,90$), ja tämän vuoksi täydennyksessä käytettävän datan aikaväli vaihteli.

2.4.5 Verson pituuskasvun mittaus ja juurten massa

Tutkimuksessa seurattiin pilaritervalepän ja puistolehmuksen kasvua määrittämällä kasvukauden versokasvu kasvualustakohtaisesti. Molemmilla kaduilla mitattiin vuosittain versonkasvua 2-4:stä puusta jokaiselta kasvualustalta (Riikonen ym. 2010). Puun elävä latvus jaettiin pituussuunnassa kolmeen samanpituiseen osaan ja jokaisesta osasta mitattiin 10 satunnaisesti valittua versoa. Näistä laskettiin puukohtaiset keskiarvot. Versonkasvu mitattiin vuosina 2004–2011, joko huhtikuussa ennen silmujen puhkeamista, tai elokuussa verson kasvun loppumisen jälkeen. Vuoden 2003 versonkasvu saatiin jälkikäteen mittaamalla huhtikuussa 2004 jokaisesta latvuksen osasta yksi pituudeltaan keskimääräinen verso. Pasteurinkadulla kasvualustan kolme versonkasvudata saatiin kaikille neljälle puulle ensimmäisinä vuosina yhden puun perusteella, koska monet ensimmäiset siirtoistutetut puut kuolivat, ja ne korvattiin uusilla vuoden 2003 loppupuolella. Norkkokujalla versonkasvu mitattiin kasvualustakohtaisesti 3-4 puun perusteella vuonna 2003.

Juurten tuorepainon avulla määritettiin, kuinka paljon kaivetussa kuopassa oli juuria (g) suhteessa kuopan hienoaineksen massa (g). Juurten tuorepainon osuus (%) kasvualustassa laskettiin kahden kaivetun kuopan keskiarvona molemmille kasvualustakerroksille.

2.4.6 Ilman lämpötilan, ilman suhteellisen kosteuden ja sadannan mittaus

Ilmasto-olosuhteita on tarkasteltu tässä tutkimuksessa taustamuuttujina. Käyttämäni data on peräisin Helsingin yliopiston SMEAR III-tutkimusasemalta, joka sijaitsee Kumpulassa noin neljän kilometrin päässä Viikistä. Asemalla on mitattu jatkuvana seurantana ilman lämpötilaa, ilman suhteellista kosteutta ja sadantaa. Lämpömittaukset tehtiin platinavastuksen sisältävällä lämpömittarilla, ja ilman suhteellista kosteutta mitattiin ohuella polymeerianturilla (Vaisala HPM243, Vaisala GmbH, Suomi). Sadantaa mitattiin painon muutoksiin perustuvalla sademittarilla (Precipitation Gauge OTT Pluvio² 400, Ott Messtechnik GmbH, Saksa).

2.5 Aineiston käsittely

2.5.1. Maahengitys ja sen lämpötilavaste

Maahengitys määritettiin laboratorioinkubointimenetelmällä, jossa jokaisesta inkubointipullosta otettiin 24 tunnin inkuboinnin jälkeen yksi 10 millilitran ilmanäyte, joka syötettiin kahteen toisiinsa liitettyyn kaasukromatografiin. Kaasukromatografi antoi tulokseksi hiilidioksidipitoisuuden ($C_r \mu\text{l l}^{-1}$), josta vähennettiin inkubaatiopulloon johdetun paineilman keskimääräinen hiilidioksidipitoisuus ($C_0 \mu\text{l l}^{-1}$). Tuloksena saatiin pitoisuuden muutos $\Delta C (\mu\text{l l}^{-1})$, joka syntyi maahengityksessä 24 tunnin aikana (h).

$$\Delta C = (C_r - C_0) / h \quad [3]$$

Hiilidioksidipitoisuuden, hiilidioksidin moolimassan ($M 44,01 \text{ g mol}^{-1}$) ja kaasun moolitilavuuden ($V_m 22,414 \text{ m}^3$) avulla laskettiin hiilidioksidivuo ($R \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-3} \text{ vrk}^{-1}$) kuutiometriä kohti.

$$R = \Delta C \times M / V_m \quad [4]$$

Seuraavaksi laskettiin inkubaatiopullost vapautuneen hiilidioksidin massa ($R_i \text{ mg CO}_2 \text{ vrk}^{-1}$). R oli hiilidioksidivuo ($\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-3} \text{ vrk}^{-1}$) kuutiometriä kohti ja V_i oli inkubaatiopullon tilavuus ($0,00010 \text{ m}^3$).

$$R_i = R \times V_i \quad [5]$$

Lopuksi laskettiin hiilidioksidin massa ($m \text{ mg CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ vrk}^{-1}$), joka vapautuu inkubaatiopullon maanäytteestä ($m_k \text{ g}$) 24 h aikana.

$$m = R_i / m_k \quad [6]$$

Lämpötilan vaikutusta maahengitykseen tutkittiin eksponentiaalisella funktiolla, joka on muotoa:

$$m = r_b Q_{10}^{T/T_{\text{ref}}} \quad [7]$$

Funktiossa m on maahengitys ($\text{mg CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ vrk}^{-1}$) lämpötilassa T ($^{\circ}\text{C}$), T_{ref} on 10°C , ja r_b ($\text{mg CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ vrk}^{-1}$) ja Q_{10} ovat sovitettuja parametreja, joille laskettiin arvot SAS-ohjelman avulla (SAS 9.3 for Windows, Institute Inc., Cary, NC, USA) käyttäen edellä mainittua funktiota ja eri lämpötiloissa tehtyjä inkubaatiomittauksia. Parametri Q_{10} eli reaktionopeuden lämpötilariippuvuus kuvaa sitä, kuinka paljon maahengitys kasvualustassa muuttuu, kun lämpötila kasvaa 10°C -astetta.

2.5.2. Maahengityksessä vapautuva hiili

Maahengityksen m ($\text{mg CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ vrk}^{-1}$) ja inkubaatiolämpötilojen (T $^{\circ}\text{C}$) avulla muodostettiin omat eksponenttifunktiot (8) kaikille kasvualustoille vuosina 2008 ja 2011 (kuvat 1.6 ja 1.7). a ja b olivat eksponenttifunktion parametreja. Muodostettuihin eksponenttifunktioihin (8) syötettiin vuorokauden keskilämpötila (T $^{\circ}\text{C}$), ja laskettiin maahengityksessä syntynyt hiilidioksidivuo vuoden jokaiselle vuorokaudelle (m_i $\text{mg CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ vrk}^{-1}$). Vapautuva hiilivuo laskettiin kolmelle kasvualustan syvyydelle, koska lämpötilaa oli mitattu 10, 30 ja 60 senttimetrin syvyydessä.

$$m_i = a \times e^{b \times T} \quad [8]$$

Vuoden aikana syntynyt hiilidioksidivuo (m_a $\text{mg CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ v}^{-1}$) saatiin laskemalla yhteen vuoden jokaisen vuorokauden hiilidioksidivuo.

$$m_a = \sum_{i=1}^{365} m_i = m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_{365} \quad [9]$$

Kasvualustakerroksesta vapautuneen hiilidioksidin massa (m_b kg v^{-1}) laskettiin kertomalla maagrammaa kohti vapautuneen hiilidioksidin määrä kasvualustakerroksen sisältämän maan määrällä käyttäen hyväksi kasvualustan mitattua tiheyttä (ρ kg dm^{-3}), kasvualustan tilavuutta (V_k dm^3) ja maakerroksen osuutta kasvualustan tilavuudesta (k).

$$m_b = m_a \times \rho \times (V_k \times k) \quad [10]$$

Kasvualustasta vuoden aikana vapautunut hiilidioksidin massa (m_{CO_2} kg v^{-1}) saatiin laskemalla yhteen eri kasvualustakerroksista vapautuneen hiilidioksidin massat.

$$m_{CO_2} = m_{10} + m_{30} + m_{60} \quad [11]$$

Lopuksi laskettiin kasvualustan hienoaineksesta vapautuneen hiilen massa (m_C g), kun tiedettiin hiilen ja hiilidioksidin moolimassa (M_C 12,01 g mol^{-1} , M_{CO_2} 44 g mol^{-1}) sekä hienoaineksen osuus (V_H) kasvualustan tilavuudesta.

$$m_C = m_{CO_2} \times (M_C / M_{CO_2}) \times V_H \quad [12]$$

2.5.3. Kasvualustaan sitoutunut hiili

Hienoaineksen kuivairtotiheyden (ρ kg dm^{-3}), kasvualustan tilavuuden (V_k dm^3) ja hienoaineksen osuuden (V_H) avulla laskettiin kasvualustan hienoaineksen massa (m_H kg).

$$m_H = V_k \times V_H \times \rho \quad [13]$$

Hehkutushäviöiden (h_{2002} %) ja hienoaineksen massan (m_H kg) avulla määritettiin kasvualustaan sitoutuneen hiilen massa (m_{2002} kg), kun tiedettiin, että hiilen osuus hehkutushäviössä on 58 % (Howard 1965).

$$m_{2002} = h_{2002} \times 0,58 \times m_H \quad [14]$$

Lopuksi laskettiin, kuinka monta prosenttia (m_C %) alkuperäisestä hiilivarastosta (m_{2002} kg) hajoaa vuodessa, kun tiedettiin kasvualustasta vuoden aikana vapautunut hiilen massa (m_C kg).

$$m_C = (1 - m_{2002} / m_{2002}) \times 100 \% \quad [15]$$

2.5.4. Hienoaineksen vesipitoisuus

Inkubaationäytteiden vesipitoisuus laskettiin funktiolla (Gardner 1965):

$$M = (W_f - W_d) / W_d \times 100 \% \quad [16]$$

Funktiossa M (%) on maanäytteen vesipitoisuus, W_f on tuorepaino (g) ja W_d on kuivapaino (g). Maahengityksen mittaamisessa käytetyille maanäytteille määritettiin vesipitoisuus painoprosentteina. Vesipitoisuutta käytettiin lämpötilan lisäksi yhtenä selittävänä muuttujana selittämään maahengitystä.

2.5.5. Termisen kasvukauden pituus

Termisen kasvukauden lämpösumma lasketaan vähentämällä jokaisen vuorokauden keskilämpötilasta 5 °C, ja laskemalla lämpötilajäännökset yhteen koko kasvukaudelta (Jylhä ym. 2009). Maaperän lämpösummien laskemisessa käytettiin lämpötiladataa, jossa olevat aukot oli täydennetty. Lämpötiladatasta laskettiin jokaiselle vuorokaudelle keskiarvo eri mittausvyvyksillä. Terminen kasvukausi määritettiin alkamaan siitä ajanhetkestä, kun vuorokauden keskilämpötila oli pysyvästi (10 vuorokauden ajan) yli 5 °C-astetta ja päättymään silloin, kun vuorokauden keskilämpötila laski 5 °C-asteen alapuolelle. Jos vuorokauden keskilämpötila jäi kasvukaudella 5 °C-asteen alapuolelle, sitä vuorokautta ei laskettu mukaan lämpösummaan. Termisen kasvukauden lämpösumma laskettiin erikseen ilman ja kasvualustan lämpötilojen perusteella.

2.6 Tilastolliset analyysit

Parametristen tilastollisten testien käytön ehtona on, että testattavat aineistot ovat normaalijakautuneita ja jakaumien varianssit yhtä suuria. Normaalijakautuneisuus ja varianssien yhtäsuuruus testattiin kasvualustoittain ja vuosittain (liitteet 1-5). Testattavia muuttujia olivat hehikutushäviö, versonkasvu, maahengityksen lämpötilavaste (ns. Q_{10} -arvo), ravinnekonentraatiot sekä kasvualustojen lämpösumma ja hienoaineksen vesipitoisuus. Normaalijakautuneisuus testattiin Kolmogorov-Smirnovin- ja Shapiro-Wilkinin testeillä, ja varianssien yhtä suuruus Levenen testillä. Tilastolliset testit tehtiin PASW-ohjelmalla (PASW Statistics 18.0 for Windows, IBM Corporation, Somers, NY, USA).

Q_{10} -arvo oli normaalijakautunut. Lämpösumma-, hienoaineksen vesipitoisuus- ja versonkasvu olivat normaalijakauman mukaisesti jakautuneita, kun vuosien keskiarvot (2006–2011) yhdistettiin kasvualustakohtaisesti. Versonkasvu noudatti normaalijakaumaa yksittäisinä mittausvuosina

(2003–2011), mutta ei kaikilla kasvualustoilla. Hehikutushäviöt ja ravinnekonentraatiot eivät noudattaneet normaalijakaumaa.

Norkkokujalla versonkasvun ja Q_{10} -arvojen varianssit olivat yhtä suuria. Pasteurinkadulla Q_{10} -arvojen varianssit olivat yhtä suuria vuosien välillä, mutta eivät kasvualustojen yli tarkasteltuna. Hehikutushäviöiden ja ravinnekonentraatioiden varianssit eivät olleet yhtä suuria. Koska aineisto ei täyttänyt parametristen menetelmien vaatimuksia, testattiin käyttäen ei-parametrisiä menetelmiä eli Kruskal-Wallisin ei-parametrinen yksisuuntaista varianssianalyysiä ja Spearmanin korrelaatiokerrointa.

2.6.1 Lämpösumman ja vesipitoisuuden vaikutus versonkasvuun

Kasvukauden aikainen hienoaineksen vesipitoisuus (%) pintamaassa laskettiin jokaiselle kasvualustalle vuorokauden keskimääräisten vesipitoisuuksien keskiarvona. Terminen lämpösumma laskettiin kasvukauden aikaisten vuorokauden keskilämpötilojen summana. Pintamaan (10 cm) lämpösumman ja vesipitoisuuden vaikutusta versonkasvuun testattiin usean selittävän muuttujan lineaarisella sekamallilla:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_{10} + \beta_2 z_{10} + \beta_3 y + \varepsilon \quad [17]$$

Mallissa η on versonkasvu (mm) ja β_0 kuvaa versonkasvua ilman muiden muuttujien vaikutusta. $\beta_1 x_{10}$ on lämpösumma ($^{\circ}\text{C}$ vrk), $\beta_2 z_{10}$ on hienoaineksen vesipitoisuus (%) ja $\beta_3 y$ on kasvualustan vaikutus.

$$\varepsilon = \alpha_{puu} + \delta_{vuosi} + u \quad [18]$$

ε on virhetermi, jossa α_{puu} kuvaa mitatun puun numeroa, δ_{vuosi} on mittausvuosi ja u on satunnainen virhetermi. Virhetermin muuttujat olivat normaalijakautuneita $\alpha_{puu} \sim N(0, \sigma^2_{puu})$ ja $\delta_{vuosi} \sim N(0, \sigma^2_{vuosi})$, missä σ^2_{puu} ja σ^2_{vuosi} olivat tuntemattomia varianssiparametreja.

Testattavat nollahypoteesit olivat, että lämpösumma tai hienoaineksen vesipitoisuus eivät vaikuta versonkasvuun. Kahden lineaarisen sekamallin antamien $-2 \text{ Log Likelihood}$ -lukujen erotusta

verrattiin χ^2 jakauman arvoihin vapausasteella 2. Nollahypoteesi jää voimaan, jos laskettu erotus on pienempi kuin χ^2 jakauman vertailuarvo.

Aineistona käytettiin dataa vuosilta 2006–2011, ja tarkastelu tehtiin erikseen Norkkokujalle ja Pasteurinkadulle, koska kaduilla kasvoi eri puulaji. Menetelmäksi valittiin lineaarinen sekamalli, koska se ottaa tarkastelussa huomioon satunnaismuuttujien aikaansaaman vaikutuksen paremmin kuin lineaarinen regressiomalli, jossa satunnaismuuttujien vaihtelu on yhdistetty yhden virhetermin alle. Lisäksi riittävän suuri otoskoko mahdollisti parametrinen menetelmän käytön.

2.6.2 Erot ravinnekonentraatioissa vuosien ja kasvualustojen välillä

Ravinnekonentraatioiden (mg l^{-1}) eroja vuosien välillä tarkasteltiin Kruskall-Wallis ei-parametrisella yksisuuntaisella varianssianalyysillä. Yhtäsuuruutta testattiin yhdistämällä kasvualustojen aineistot (liite 8). Tilastolliseksi testiksi valittiin Kruskall-Wallis yksisuuntainen varianssianalyysi, koska otoskoko oli pieni, ja tarkasteltavat jakaumat eivät olleet normaalijakautuneita. Nollahypoteesi oli, että tarkasteltavien muuttujien jakaumat ovat yhtä suuret molemmissa otoksissa. Nollahypoteesi jää voimaan, jos tarkasteluparille laskettu p-arvo on yli 0,05 (95 % luottamusväli). Tarkastelupareina käytettiin vuosien 2003 ja 2005, 2005 ja 2008 sekä 2003 ja 2008 ravinnekonentraatioita, ja tarkastelu tehtiin erikseen Norkkokujan ja Pasteurinkadun aineistolle.

Kasvualustojen ravinnekonentraatioiden yhtäsuuruutta tarkasteltiin Kruskall-Wallis ei-parametrisella yksisuuntaisella varianssianalyysillä kahdella tavalla. Ensimmäinen perustui aineistoon, jossa oli yhdistetty eri vuosien data (2003, 2005 ja 2008) kasvualustakohtaisesti (liite 9). Toisessa menetelmässä kasvualustojen yhtäsuuruutta tarkasteltiin vuosikohtaisesti (liite 10).

2.6.3 Erot hehikutushäviöissä ja Q_{10} -arvoissa kasvualustojen välillä

Kasvualustojen hehikutushäviöiden ja Q_{10} -arvojen välisiä eroja tarkasteltiin Kruskall-Wallis ei-parametrisella yksisuuntaisella varianssianalyysillä. Ensimmäinen perustui aineistoon, jossa oli yhdistetty eri vuosien data (2005, 2008 ja 2011) kasvualustakohtaisesti (liite 7). Toisessa menetelmässä kasvualustoja verrattiin vuosikohtaisesti (liite 6 ja kuva 2.5). Q_{10} -arvot ja hehikutushäviöt oli määritetty Norkkokujalla ja Pasteurinkadulla kolmessa eri kasvualustassa vuosina 2005, 2008 ja 2011.

2.6.4 Erot hehkutushäviöissä ja Q_{10} -arvoissa vuosien välillä

Vuosien eroja hehkutushäviöissä ja Q_{10} -arvoissa tarkasteltiin Kruskal-Wallisin ei-parametrisella yksisuuntaisella varianssianalyysillä sekä kasvualustakohtaisesti (liitteet 11 ja 12) että yhdistämällä kasvualustojen aineistot saman vuoden sisällä (liite 11).

2.6.5 Hajotuksen ja hehkutushäviön välinen riippuvuus

Q_{10} -arvojen ja hehkutushäviöiden (%) välille laskettiin Spearmanin korrelaatiokerroin (liite 13). Korrelaatiokerroin laskettiin jokaiselle kasvualustalle niin, että vuosien aineistot yhdistettiin kasvualustakohtaisesti. Korrelaatiokerroin laskettiin myös jokaiselle vuodelle, jolloin kasvualustojen aineistot yhdistettiin vuosikohtaisesti. Spearmanin korrelaatiokerrointa voidaan käyttää silloin, kun muuttuja ei ole normaalijakautunut, tai jakaumien varianssit eivät ole yhtä suuret. Testiksi valittiin Spearmanin korrelaatiokerroin, koska ehdot Pearsonin korrelaatiokertoimen käytölle eivät täysin toteutuneet varianssien yhtä suuruuden osalta Pasteurinkadulla. Spearmanin korrelaatiokerroin laskettiin myös maahengityksen ja hehkutushäviöiden (%) välille sekä maahengityksen ja hienoaineksen vesipitoisuuden (%) välille (liite 13).

2.6.6 Hehkutushäviön ja versonkasvun välinen riippuvuus

Hehkutushäviöiden (%) ja versonkasvun (mm) välille laskettiin Spearmanin korrelaatiokerroin. Hehkutushäviöitä ja versonkasvua verrattiin Norkkokujalla ja Pasteurinkadulla kolmessa eri kasvualustassa vuosina 2005, 2008 ja 2011. Korrelaatiokerroin laskettiin jokaiselle kasvualustalle ja jokaiselle vuodelle, jolloin aineistot yhdistettiin.

3. Tulokset

3.1 Kasvualustan ominaisuudet

3.1.1 Kasvualustan ravinteet

Kaliumin, fosforin ja nitraattitypen pitoisuudet olivat pääosin suurimmat kasvualustassa kaksi ja pienimmät kasvualustassa kolme (taulukko 2). Kasvualustojen väliset erot tulivat esiin myös tilastollisessa tarkastelussa. Fosforilla ja kaliumilla oli tilastollisesti merkitsevä eroa kaikkien kasvualustojen välillä vuosina 2003 ja 2008 (liite 10). Nitraattitypellä oli merkitsevä eroa kaikkien kasvualustojen välillä vuonna 2003. Myös hivenravinteita oli eniten kasvualustassa kaksi ja vähiten kasvualustalla kolme (taulukko 2).

Kasvualustoissa voitiin havaita ravinteiden nopea sitoutuminen puuston kasvuun muutama vuosi istutuksen jälkeen. Nitraattitypen määrä oli laskenut kaikilla kasvualustoilla voimakkaasti vuosien 2003 ja 2005 välillä (taulukko 2.), ja tämä näkyi myös tilastollisesti merkitsevänä erona, kun kasvualustoja tarkasteltiin yhdessä (liite 8). Fosforilla ja kaliumilla oli laskeva trendi vuosien 2003 ja 2005 välillä, ja erityisesti kasvualustassa kaksi. Myös magnesiumin, rikin ja boorin pitoisuus oli laskenut tilastollisesti merkitsevästi vuodesta 2003 vuoteen 2005 ja 2008 (liite 8). Kasvualustojen erilaisuus peitti todennäköisesti osan mittausvuosien välisistä eroista.

Taulukko 2.

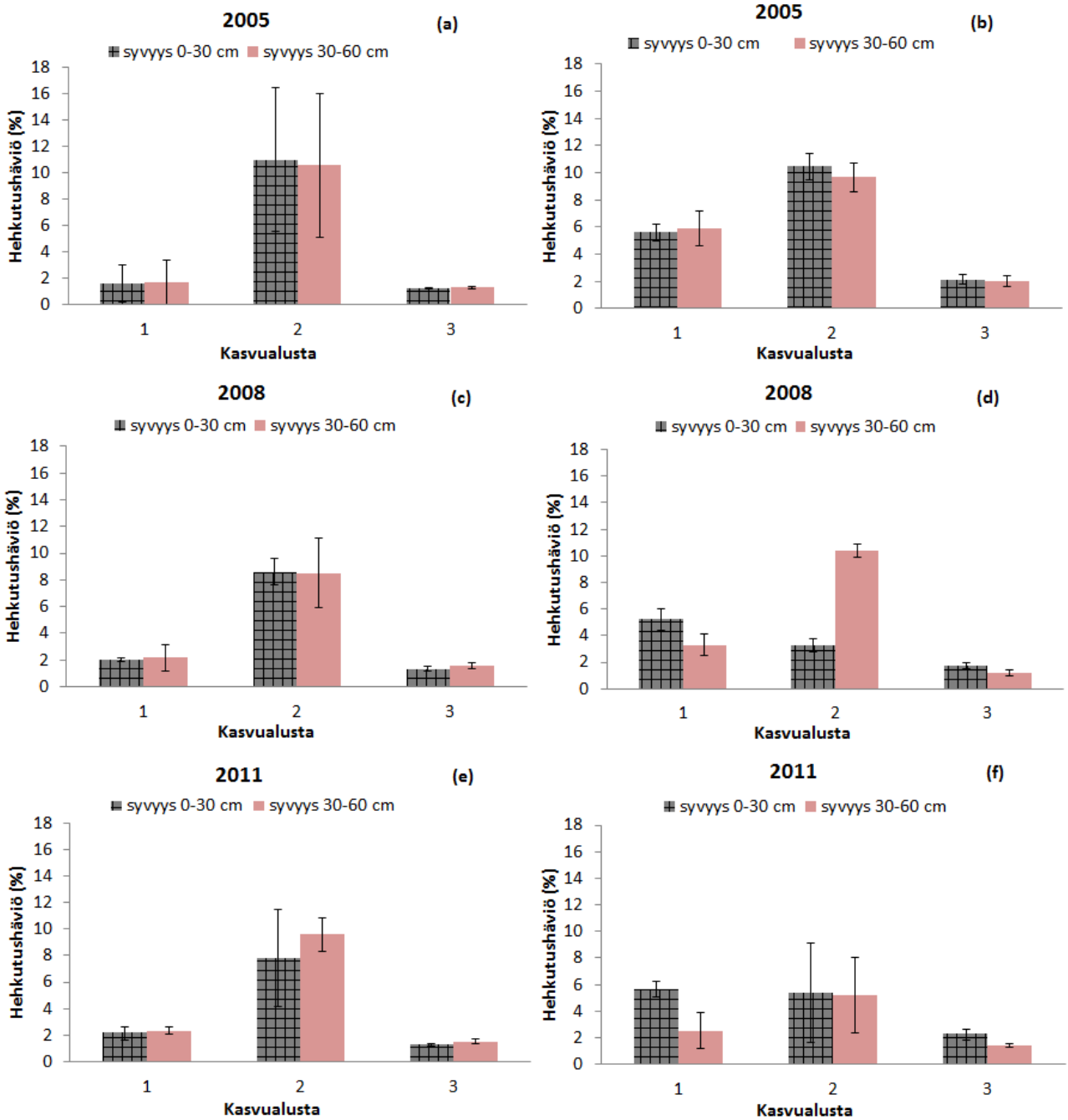
Kalsiumin, fosforin, kaliumin, magnesiumin, kuparin, mangaanin, rikin, boorin, sinkin ja nitraattitypen pitoisuudet (mg l^{-1}) kolmessa kasvualustassa Norkkokujalla ja Pasteurinkadulla vuosina 2003, 2005 ja 2008. Symboleilla A, B ja AB kuvataan tilastollista merkitsevyyttä (merkitsevyytaso $P < 0,05$), eli sitä oliko kasvualustoilla tilastollisia eroja vuosien välillä. Eri symboli kuvaa sitä, että vuosien välillä oli tilastollisesti merkitsevä ero.

Norkkokuja									
	Kasvualusta 1			Kasvualusta 2			Kasvualusta 3		
Ravinteet:	2003	2005	2008	2003	2005	2008	2003	2005	2008
Nitraattityppi (NO ₃ -N), mg l^{-1}	324 A	5 B	80 B	77 A	6 B	38 B	15 A	5 B	66 B
Fosfori (P), mg l^{-1}	11 A	13 A	9 A	95 A	54 AB	52 B	41 A	23 B	23 B
Kalium (K), mg l^{-1}	93 A	85 A	84 A	523 A	218 AB	190 B	188 A	96 AB	95 B
Kalsium (Ca), mg l^{-1}	4140 A	2650 A	3300 A	3220 A	6500 AB	6600 B	3262 A	2750 A	2775 A
Magnesium (Mg), mg l^{-1}	260 A	115 AB	143 B	285 A	209 AB	180 B	136 A	96 AB	95 B
Kupari (Cu), mg l^{-1}	3 A	3 A	3 A	9 A	17 AB	22 B	4 A	4 AB	3 B
Mangaani (Mn), mg l^{-1}	7 A	6 AB	6 B	15 A	32 B	14 A	8 A	8 A	8 A
Rikki (S), mg l^{-1}	111 A	15 AB	12 B	110 A	24 AB	20 B	39 A	11 AB	6 B
Boori (B), mg l^{-1}	1 A	0 B	0 B	1 A	1 A	1 A	1 A	0 B	0 B
Sinkki (Zn), mg l^{-1}	2 A	6 A	2 A	30 A	69 AB	45 B	5 A	4 B	4 B

Pasteurinkatu									
	Kasvualusta 1			Kasvualusta 2			Kasvualusta 3		
Ravinteet:	2003	2005	2008	2003	2005	2008	2003	2005	2008
Nitraattityppi (NO ₃ -N), mg l^{-1}	324 A	5 B	28 B	77 A	10 B	31 B	15 A	5 B	79 B
Fosfori (P), mg l^{-1}	11 A	11 AB	5 B	95 A	52 AB	50 B	41 A	46 A	52 A
Kalium (K), mg l^{-1}	93 A	233 A	109 A	523 A	386 AB	263 B	188 A	223 AB	113 B
Kalsium (Ca), mg l^{-1}	4140 A	2300 AB	2050 B	3220 A	5950 AB	5175 B	3262 A	5200 AB	1983 B
Magnesium (Mg), mg l^{-1}	260 A	203 A	155 B	285 A	154 AB	120 B	136 A	112 AB	47 B
Kupari (Cu), mg l^{-1}	3 A	4 A	3 A	9 A	23 AB	21 B	4 A	7 A	4 A
Mangaani (Mn), mg l^{-1}	7 A	9 AB	8 B	15 A	16 A	19 A	8 A	11 AB	7 B
Rikki (S), mg l^{-1}	111 A	4 AB	5 B	110 A	37 A	64 A	39 A	60 AB	12 B
Boori (B), mg l^{-1}	1 A	0 B	0 B	1 A	1 A	1 A	1 A	1 A	1 A
Sinkki (Zn), mg l^{-1}	2 A	3 A	2 A	30 A	51 AB	47 B	5 A	12 A	5 A

3.1.2 Hehkutushäviöt ja juurten jakautuminen

Hehkutushäviöt (%) olivat suurimmat kasvualustalla kaksi ja pienimmät kasvualustalla kolme (kuva 1.3). Norkkokujalla hehkutushäviöt olivat selkeästi suurimmat kasvualustassa kaksi (7,8 %–11,0 %), mutta Pasteurinkadulla kasvualustassa esiintyi enemmän vuosittaista vaihtelua (3,3 %–10,5 %). Kaikkien kasvualustojen välillä oli tilastollisesti merkitsevä ero vuosittain sekä vuosien yli laskettuja keskiarvoja tarkasteltaessa. Norkkokujalla hehkutushäviöt olivat lähes yhtä suuret molemmissa kasvualustakerroksissa (0–30 ja 30–60 cm), mutta Pasteurinkadulla hehkutushäviöt olivat pääosin suuremmat ylemmässä maaperäkerroksessa.



Kuva 1.3. Hehikutushäviö (%) ja hehikutushäviön keskihajonta (%) molemmissa maakerroksissa (0-30 ja 30-60 senttimetriä) vuosina 2005, 2008 ja 2011 Norkkokujalla (a, c ja e) ja Pasteurinkadulla (b, d ja f).

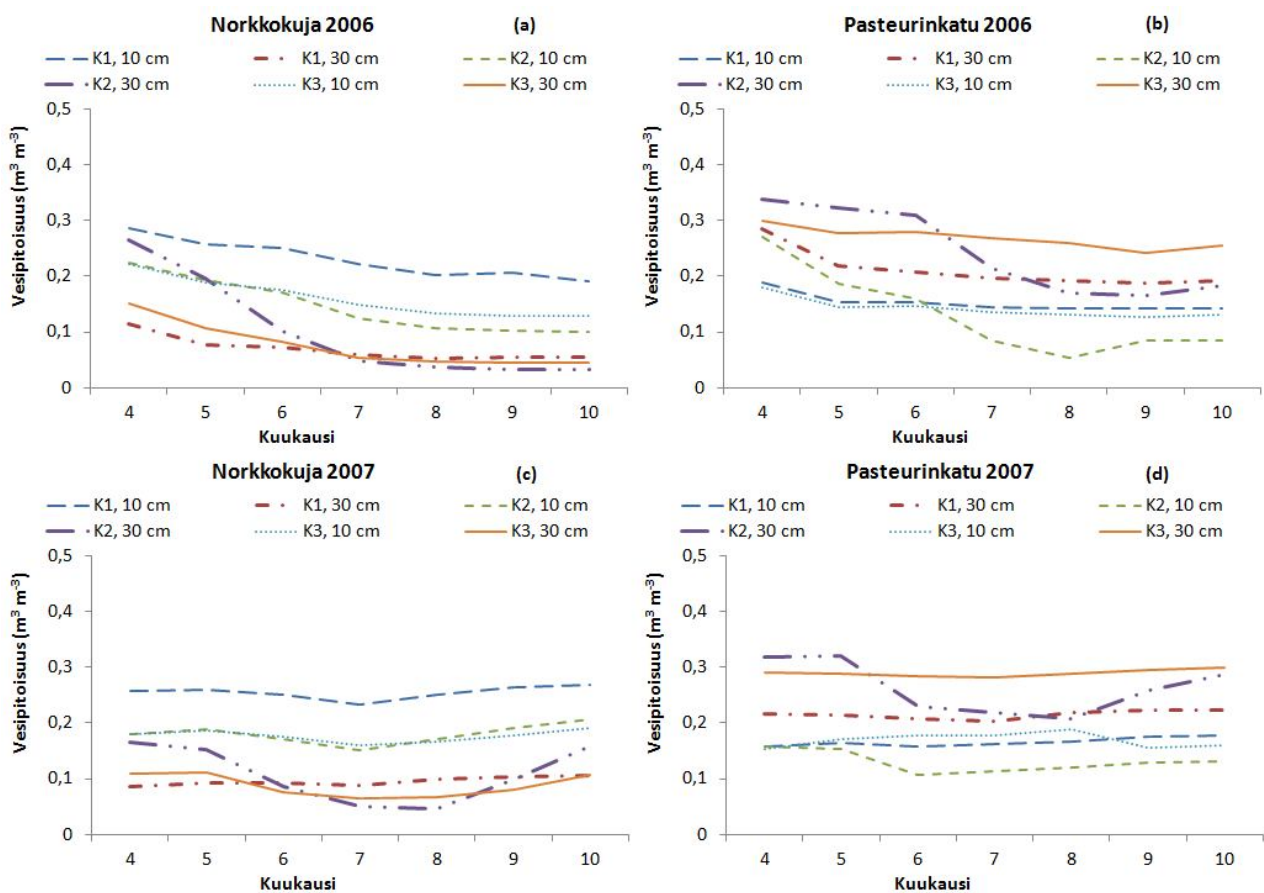
Kasvualustoissa havaittiin tilastollisesti merkitseviä muutoksia orgaanisen aineksen pitoisuudessa. Hehikutushäviö kasvoi kasvualustassa kolme Norkkokujalla ja pienentyi Pasteurinkadulla vuosien 2005 ja 2008 välillä (liite 11). Pasteurinkadulla hehikutushäviö pieneni myös kasvualustassa kaksi vuodesta 2005 vuoteen 2011.

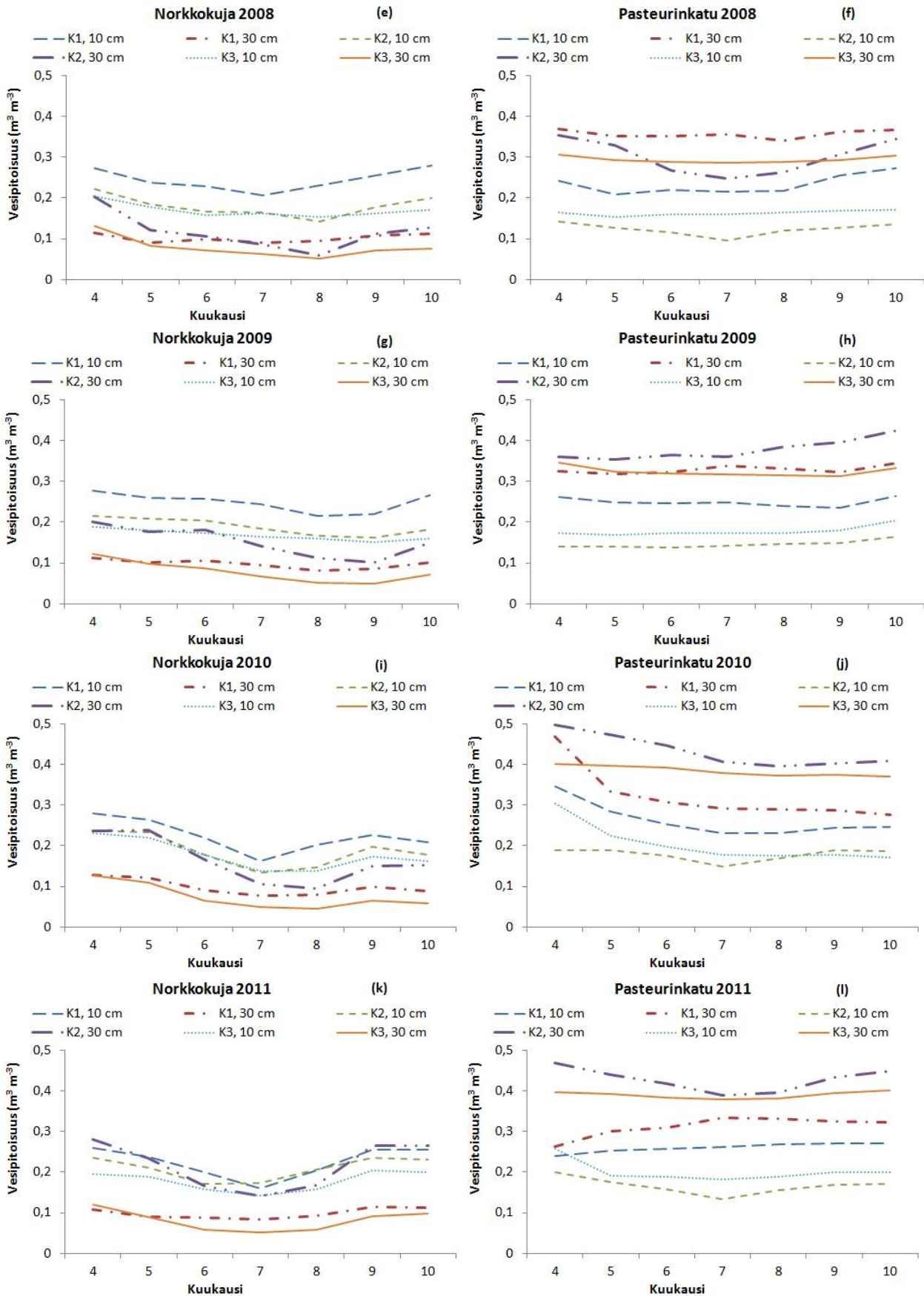
Kasvualustassa kaksi oli eniten juuria suhteessa hienoaineksen massaan. Norkkokujalla juurten osuus oli lähes yhtä suuri molemmissa maakerroksissa, mutta Pasteurinkadulla juuria oli enemmän ylempässä kerroksessa. Kasvualustoista määritettiin juurten tuorepaino vuonna 2011.

3.2 Ympäristötekijät

3.2.1 Kasvualustan vesipitoisuus ja lämpösomma

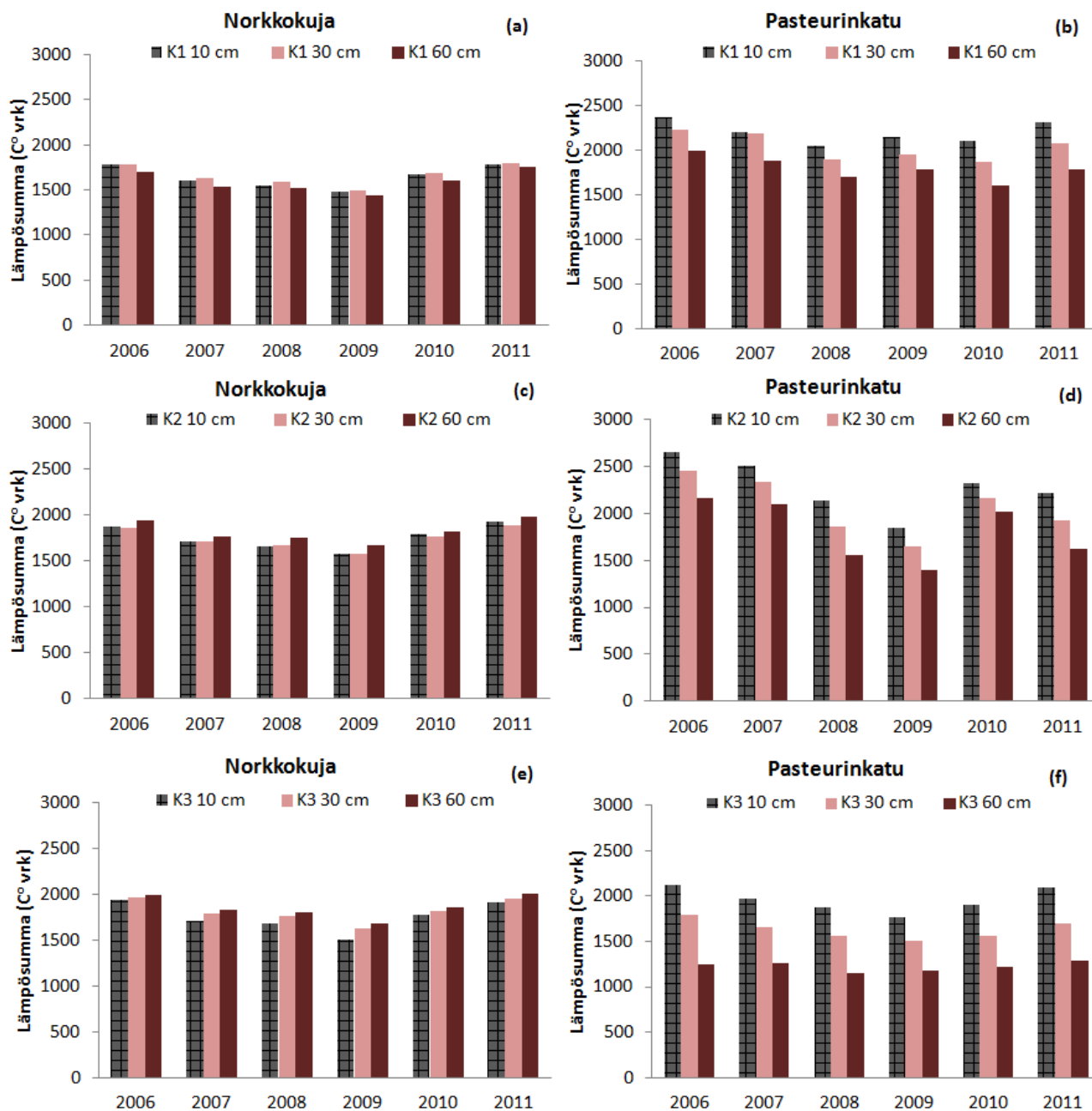
Kasvukauden keskimääräinen hienoaineksen vesipitoisuus ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) oli kasvualustan pintakerroksessa (10 cm) lähes yhtä suuri Norkkokujalla (0,14 - 0,25) ja Pasteurinkadulla (0,12 - 0,26) vuosina 2006–2011 (kuva 1.4). Vesipitoisuus oli kuitenkin huomattavasti suurempi alemmassa mittaussyvytydessä (30 cm) Pasteurinkadulla (0,20 - 0,42) kuin Norkkokujalla (0,06 - 0,20). Vesipitoisuus oli suurin Norkkokujalla kasvualustassa yksi ja kaksi ja Pasteurinkadulla kasvualustoissa kaksi ja kolme.





Kuva 1.4. Hienoaineksen vesipitoisuus ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) kuukausikeskiarvoina Norkkokujan (a, c, e, g, i, k) ja Pasteurinkadun (b, d, f, h, j, l) kasvualueilla (K1, K2 ja K3) vuosina 2006-2011.

Norkkokujalla kasvualustan lämpösomma oli vuodesta riippuen 1400–2000 vuorokausiastetta (°C vrk) ja Pasteurinkadulla 1100–2500 °C vrk (kuva 1.5). Pasteurinkadulla vuosien ja kasvualustakerrosten välinen vaihtelu oli suurempaa kuin Norkkokujalla, ja erityisesti kasvialustassa kaksi. Norkkokujalla lämpösummat olivat suurimmat kasvialustoissa kaksi ja kolme ja Pasteurinkadulla kasvialustoissa yksi ja kaksi. Lämpösummat olivat suurimmat vuosina 2006 ja 2011 ja matalimmat vuosina 2008 ja 2009.



Kuva 1.5. Kasvialustojen (K1, K2 ja K3) lämpösomma (°C vrk) kolmella mittausyvytydellä (10, 30 ja 60 senttimetriä) Norkkokujalla (a, c ja e) ja Pasteurinkadulla (b, d ja f) vuosina 2006-2011.

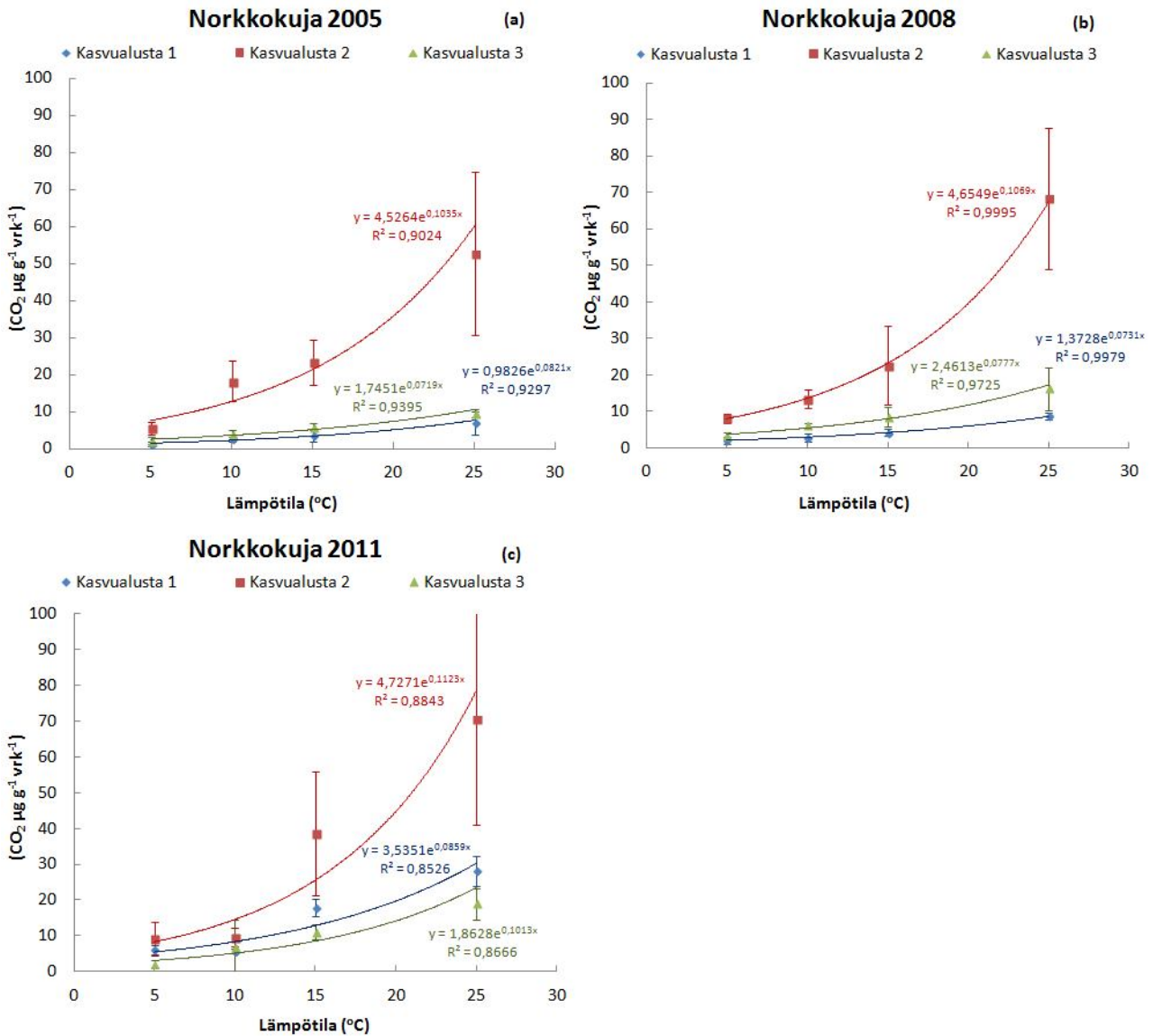
3.2.2 Kasvukauden terminen lämpösumma ja sadesumma

Kasvukausi alkoi seurantajakson aikana 21.4.–11.5. ja päättyi 1.10.–31.10. Aikaisin kasvukauden alkamishetki oli vuonna 2011 ja myöhäisin vuonna 2008. Kasvukauden lämpösumma oli 1410–1740 °C vrk. Kasvukauden myöhästyminen näkyi myös termisen kasvukauden lämpösummassa, joka oli huomattavasti suurempi vuonna 2011 (1740 °C vrk) kuin 2008 (1480 °C vrk). Vuoden aikana kertynyt sadesumma (570–850 mm) oli suurin vuosina 2004, 2008 ja 2011.

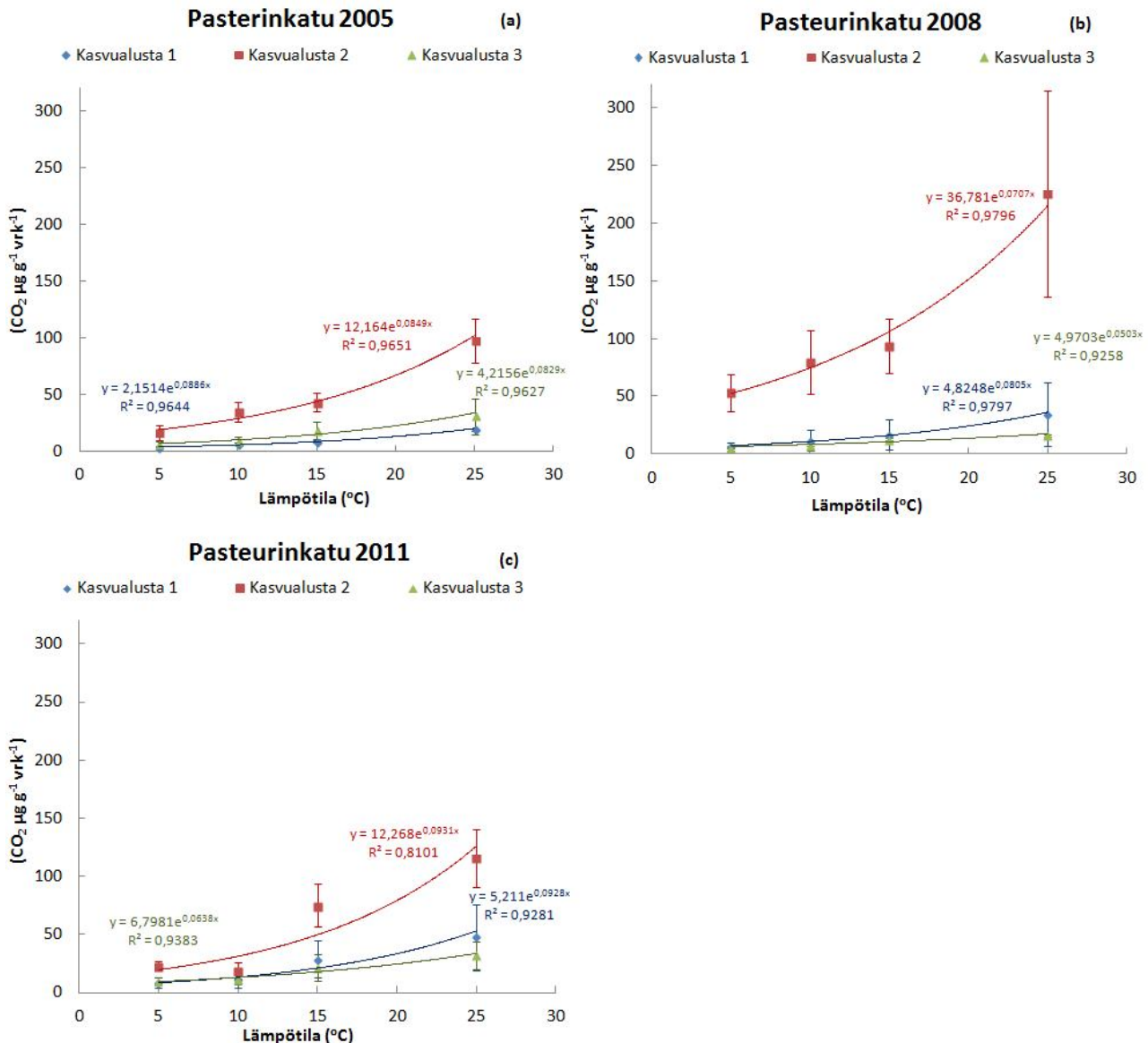
3.3 Maahengityksen ympäristövasteet

3.3.1 Maahengitys ja sen lämpötilavaste

Lämpötilan ja maahengityksen välillä oli positiivinen korrelaatio ($k_s = 0,404-0,837$, p -arvo $< 0,05$), kun tarkasteltiin koko aineistoa. Keskiarvoihin sovitetussa mallissa lämpötila selitti 81–100 prosenttia maahengityksen vaihtelusta inkubaatiokeessa (kuvat 1.6 ja 1.7). Maahengityksessä syntyneen hiilidioksidin määrä ($\mu\text{g g}^{-1} \text{vrk}^{-1}$) on esitetty lämpötilan funktiona kolmessa kasvualustassa. Maahengityksen kasvu oli voimakkainta korkeammissa lämpötiloissa, ja erityisesti kasvualustassa kaksi. Maahengitysaktiivisuus kasvoi lämpötilan noustessa voimakkaammin vuonna 2008 kuin vuosina 2005 ja 2011.



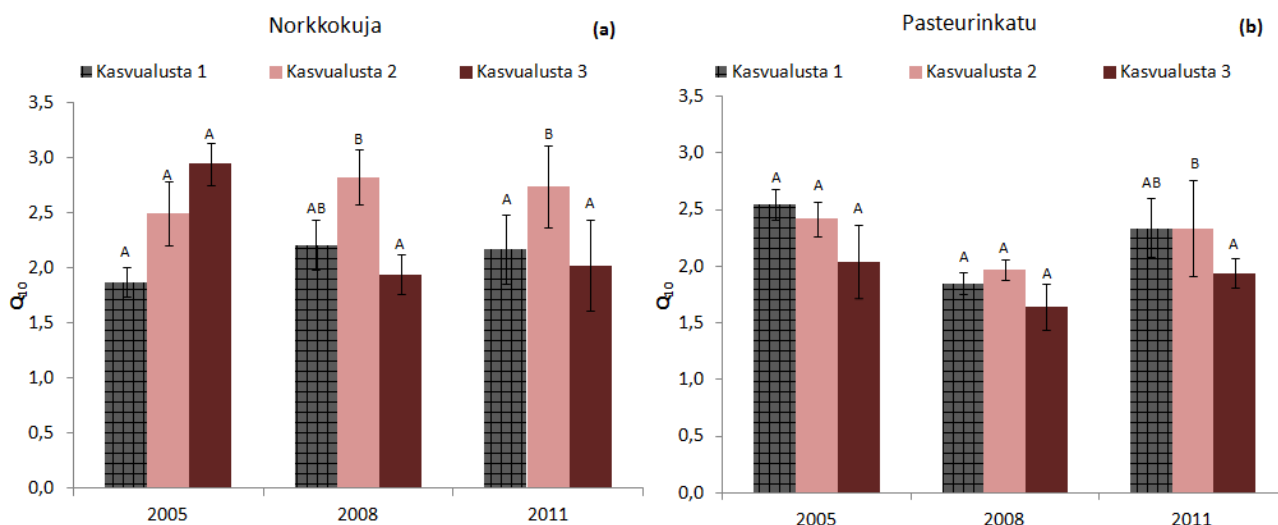
Kuva 1.6. Maahengityksessä syntyneen hiilidioksidin ($\mu\text{g g}^{-1} \text{vrk}^{-1}$) suhde lämpötilaan kasvualustoissa 1. (sininen), 2. (punainen) ja 3. (vihreä) Norkkokujalla vuosina 2005 (a), 2008 (b) ja 2011 (c). Kuvassa on esitetty maahengityksen keskihajonta tietyssä lämpötilassa kasvualustakohtaisesti. Kasvialustojen heikutushäviöt (%) olivat 1,7 %, 10,8 % ja 1,3 % vuonna 2005, 2,2 %, 7,6 % ja 1,5 % vuonna 2008 ja 2,2 %, 8,7 % ja 1,4 % vuonna 2011. Maahengitys on ylempää (0-30 cm) kasvialustakerroksesta vuonna 2005 ja ylempää ja alemmasta (30-60 cm) kasvialustakerroksesta vuonna 2008 ja 2011.



Kuva 1.7. Kuva 1.6. Maahengityksessä syntyneen hiilidioksidin ($\mu\text{g g}^{-1} \text{vrk}^{-1}$) suhde lämpötilaan kasvualustoissa 1. (sininen), 2 (punainen) ja 3. (vihreä) Pasteurinkadulla vuosina 2005 (a), 2008 (b) ja 2011 (c). Kuvassa on esitetty maahengityksen keskihajonta tietyssä lämpötilassa kasvualustakohtaisesti. Kasvualustojen hehikutushäviöt (%) olivat 5,7 %, 10,1 % ja 2,1 % vuonna 2005, 4,2 %, 9,4 % ja 1,4 % vuonna 2008 ja 4,7 %, 7,6 % ja 1,8 % vuonna 2011. Maahengitys on ylemmästä (0-30 cm) kasvualustakerroksesta vuonna 2005 ja ylemmästä ja alemmasta (30-60 cm) kasvualustakerroksesta vuonna 2008 ja 2011.

Maahengitys oli suurinta kasvualustassa kaksi ($5,5 - 225,3 \mu\text{g g}^{-1} \text{vrk}^{-1}$). Maahengityksessä muodostuneen hiilidioksidin määrä vaihteli Norkkokujalla $1,2$ ja $68,4 \mu\text{g g}^{-1} \text{vrk}^{-1}$ välillä ja Pasteurinkadulla $2,9$ ja $225,3 \mu\text{g g}^{-1} \text{vrk}^{-1}$ välillä vuosina 2005, 2008 ja 2011. Maahengitys oli suurempaa Pasteurinkadulla kuin Norkkokujalla, mutta Pasteurinkadulla esiintyi myös suurempaa vaihtelua maahengityksessä.

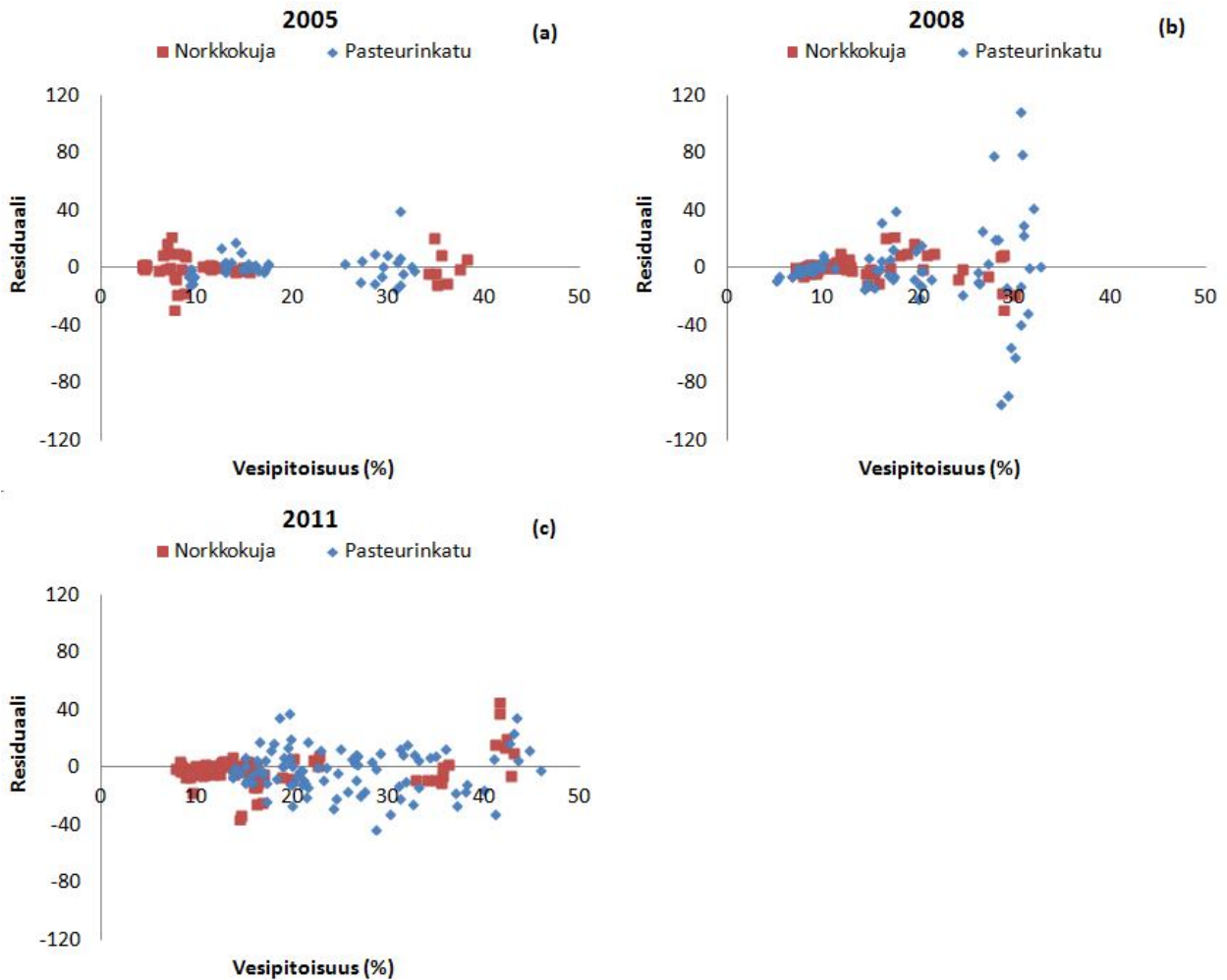
Maahengityksen lämpötilavasteet (ns. Q_{10} -arvo) olivat suuremmat Norkkokujalla (1,9 - 2,9) kuin Pasteurinkadulla (1,6 - 2,5). Norkkokujalla Q_{10} -arvo oli suurin kasvualustalla kaksi (kuva 1.8). Ero oli tilastollisesti merkitsevä koko aineistossa (liite 14) ja vuonna 2011 (kuva 1.8). Pasteurinkadulla Q_{10} -arvo oli tilastollisesti merkitsevästi pienin kasvualustalla kolme koko aineistossa (liite 14) ja vuonna 2011 kasvualustaan kaksi verrattuna (kuva 1.8). Aineiston pieni koko rajoitti tilastollista merkitsevyyttä vuonna 2005. Kasvualustojen orgaanisen aineksen lämpötilavaste ei muuttunut tilastollisesti merkitsevästi vuodesta 2005 vuoteen 2011 (liite 13).



Kuva 1.8. Kuvassa on esitty Q_{10} -arvot ja niiden keskihajonnat kasvualustoilla 1-3 Norkkokujalla (a) ja Pasteurinkadulla (b). Symbolit A, B ja AB kuvaavat sitä, oliko kasvualustojen välillä tilastollisesti merkitseviä eroja vuosina 2005, 2008 ja 2011. Eri symboli kuvaa sitä, että kasvualustojen välillä oli merkitsevä ero.

3.3.2 Maahengityksen riippuvuus hienoaineksen vesipitoisuudesta

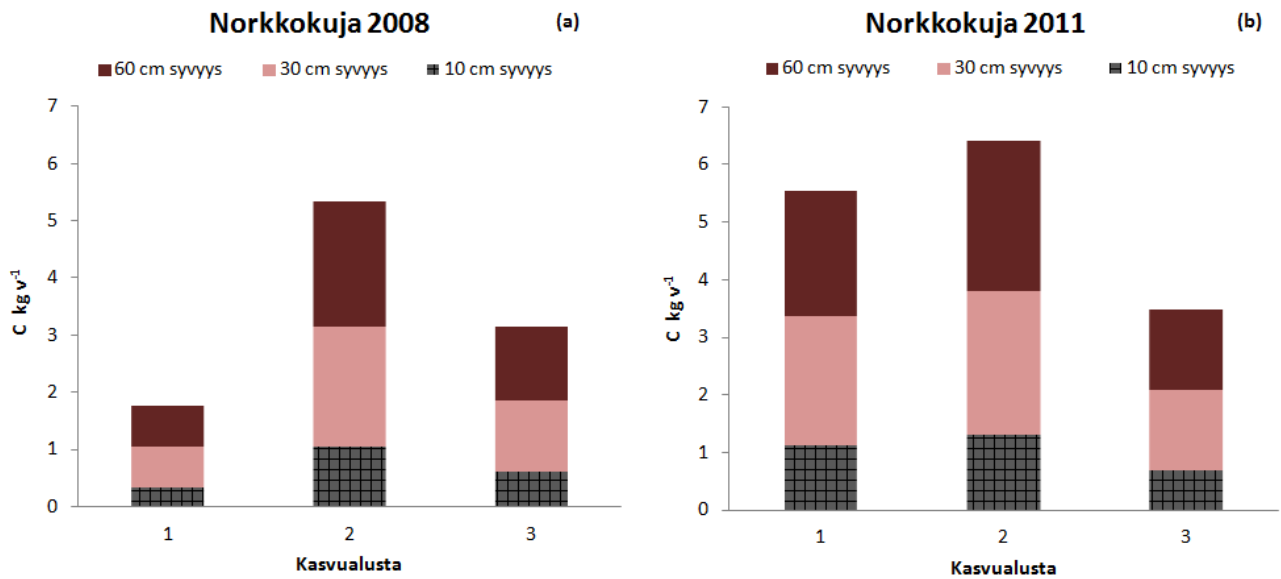
Hienoaineksen vesipitoisuuden ja maahengityksen välillä oli positiivinen korrelaatio ($k_s = 0,348-0,652$, p -arvo $< 0,05$), eli korkeampi vesipitoisuus lisäsi maahengitysaktiivisuutta. Hienoaineksen vesipitoisuus selitti 15–45 prosenttia maasta vapautuvan CO_2 -vuon vaihtelusta inkubaatiokokeessa. Maahengitysaktiivisuus kasvoi voimakkaammin vesipitoisuuden funktiona Pasteurinkadulla kuin Norkkokujalla, ja jyrkintä nousu oli Pasteurinkadulla vuonna 2008 ja Norkkokujalla vuonna 2011. Hienoaineksen vesipitoisuuden nousu kasvatti maahengityksen ($\mu g\ g^{-1}\ vrk^{-1}$) residuaaleja, eli maahengityksen ja lämpötilan välistä selittämätöntä vaihtelua (kuva 1.9). Residuaalit olivat suurimpia Pasteurinkadulla vuosina 2008 ja 2011. Norkkokujalla residuaalit olivat suuria myös matalassa vesipitoisuudessa vuonna 2005.



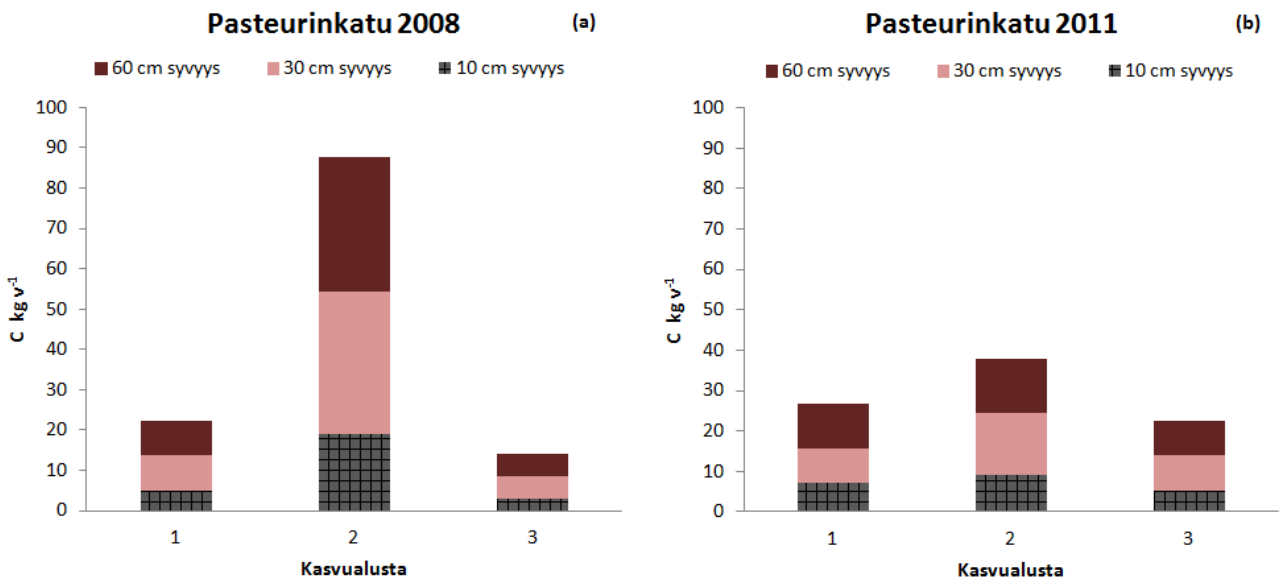
Kuva 1.9. Maahengityksen ($\mu\text{g g}^{-1} \text{vrk}^{-1}$) selittämätön residuaalivaihtelu on esitetty maanäytteiden vesipitoisuuden (%) funktiona Norkkokujalla ja Pasteurinkadulla vuosina 2005 (a), 2008 (b) ja 2011 (c). Residuaalit kuvaavat maahengityksen vaihtelua, jota ei voida selittää inkubaatiolämpötilan avulla. Aineisto on ylemmästä (0-30 cm) kasvualustakerroksesta vuonna 2005 ja ylemmästä ja alemmasta (30-60 cm) kasvualustakerroksesta vuonna 2008 ja 2011. Residuaalit jakautuvat melko tasaisesti nollatason molemmiin puolin.

3.3.3 Kasvualustan hienoaineksesta vapautuva hiili

Kasvualustan (15 m^3) hienoaineksesta vapautui hiiltä maahengityksessä $1,8\text{-}6,4 \text{ kg v}^{-1}$ Norkkokujalla vuosina 2008 ja 2011 (kuva 2.1). Pasteurinkadulla kasvualustasta (45 m^3) vapautui hiiltä $13,9\text{-}87,6 \text{ kg v}^{-1}$ (kuva 2.2). Vapautuva hiilivuo oli suurin kasvualustassa kaksi.



Kuva 2.1. Kasvialustan hienoaineksesta maahengityksessä vapautuva hiili (C kg) yhden vuoden aikana. Hiilituotos määritettiin kolmen eri syvyyden lämpötilan perusteella Norkkokujalla vuonna 2008 (a) ja 2011 (b). Kasvialustan syvyys oli 1 metri. Pintamaan (0-20 cm) maahengitys laskettiin 10 cm mittaussyvyyden avulla, keskikerros (20-60 cm) 30 cm ja pohjakerros (60-100 cm) 60 senttimetrin mittaussyvyyden perusteella. Kasvialustan tilavuus oli 15 m³.



Kuva 2.2. Kasvialustan hienoaineksesta maahengityksessä vapautuva hiili (C kg) yhden vuoden aikana. Hiilituotos määritettiin kolmen eri syvyyden lämpötilan perusteella Pasteurinkadulla vuonna 2008 (a) ja 2011 (b). Kasvialustan syvyys oli 1 metri. Pintamaan (0-20 cm) maahengitys laskettiin 10 cm syvyyden avulla, keskikerros (20-60 cm) 30 cm ja pohjakerros (60-100 cm) 60 senttimetrin syvyyden perusteella. Kasvialustan tilavuus oli 45 m³.

Kasvialustan hienoaineksen hiilivarasto oli 136 - 433 kg Norkkokujalla ja 407 - 1300 kg Pasteurinkadulla vuonna 2002. Maan hiilivarastosta vapautuu hiiltä maahengityksessä 0,8 - 2,6 % vuodessa Norkkokujalla ja 2,9 - 6,7 % v⁻¹ Pasteurinkadulla.

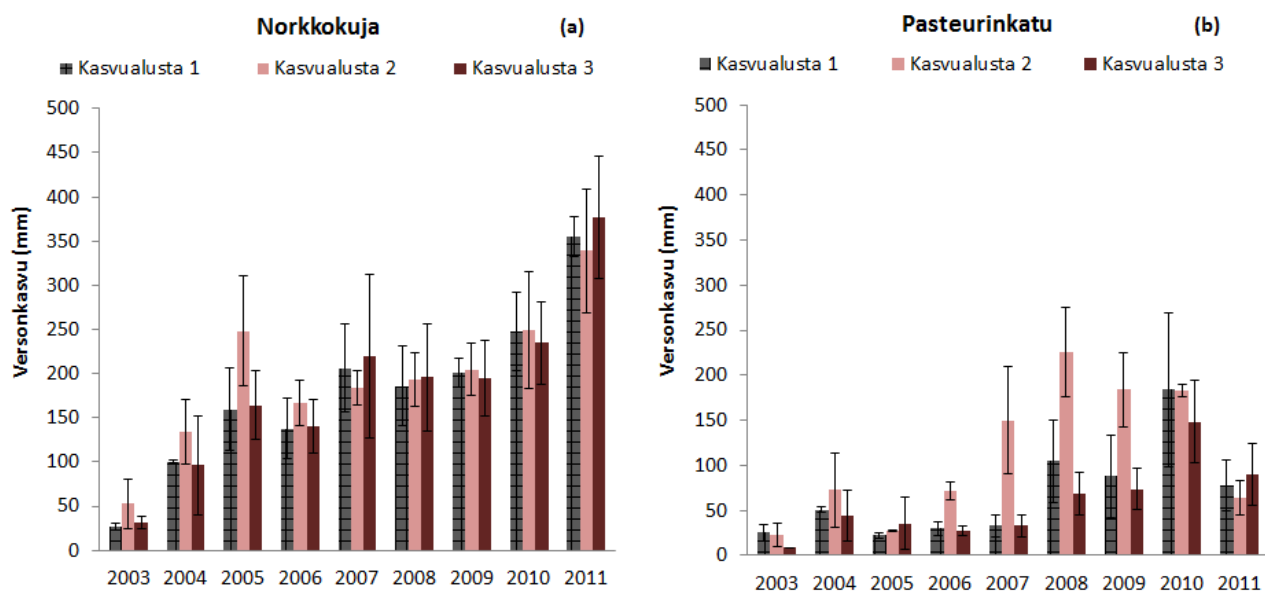
3.3.4 Maahengitys ja hehkutushäviöt

Kun orgaanisten yhdisteiden määrä (hehkutushäviö, %) kasvualustassa oli suurempi, kasvoi myös maahengityksessä muodostuva hiilidioksidivuo (kuvat 1.9 ja 2.1). Hehkutushäviöiden (%) ja maahengityksen välillä oli positiivinen korrelaatio Norkkokujalla koko aineistossa ($k_s = 0,772$, p-arvo = 0,000) sekä vuosina 2008 ($k_s = 0,664$, p-arvo = 0,026) ja 2011 ($k_s = 0,926$, p-arvo = 0,000) (liite 13). Norkkokujalla ja Pasteurinkadulla oli tilastollisesti merkitsevää korrelaatiota kasvualustassa kolme ($k_s = 0,665$, p-arvo = 0,026; $k_s = 0,664$, p-arvo = 0,025).

Q_{10} -arvojen ja hehkutushäviöiden välinen korrelaatio lisääntyi tutkimusjakson aikana vuodesta 2005 vuoteen 2011 (liite 13). Hehkutushäviöiden (%) ja Q_{10} -arvojen välillä oli kohtalainen tilastollinen korrelaatio Norkkokujalla ($k_s = 0,498$, p-arvo = 0,002) ja Pasteurinkadulla ($k_s = 0,424$, p-arvo = 0,011), kun vuosien ja kasvualustojen aineistot yhdistettiin. Norkkokujalla oli voimakas korrelaatio vuosina 2008 (0,792, p-arvo = 0,004) ja 2011 (0,718, p-arvo = 0,001) ja Pasteurinkadulla vuonna 2011 ($k_s = 0,865$, p-arvo = 0,000), kun kasvualustoja tarkasteltiin yhdessä.

3.4 Puiden versonkasvu

Kumulatiivinen versonkasvu (mm) oli suurin kasvualustassa kaksi, ja lähes yhtä suuri kasvualustoissa yksi ja kolme. Vuotuinen versonkasvu oli suurinta pilaritervalepällä kasvualustassa kaksi vuosina 2003–2006, 2009 ja 2010 ja puistolehmuksella vuosina 2004 ja 2006–2009 (kuva 2.3). Pintamaan lämpösummalla tai hienoaineksen vesipitoisuudella ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta kasvualustan vuotuisen versonkasvuun usean selittävän muuttujan lineaarisilla sekamalleilla tarkasteltaessa.



Kuva 2.3. Pilaritervalepän (a) ja puistolehmuksen (b) vuotuinen versonkasvu (mm) ja versonkasvun keskihajonta. Versonkasvua tarkasteltiin kasvualustoilla 1-3 vuosina 2003-2011.

Suurempi orgaanisen aineksen määrä lisäsi versonkasvua. Pilaritervalepällä (vuonna 2005) ja puistolehmuksella (vuonna 2008) oli merkitsevä korrelaatio ($k_s = 0,614-0,708$, p-arvo = 0,000) hehcutushäviöiden (%) ja versonkasvun (mm) välillä (taulukko 3). Jokin muu tekijä kuin orgaanisen aineksen määrä selitti versonkasvua vuonna 2011. Suurempi orgaanisen aineksen määrä ei lisännyt versonkasvua yksittäisen kasvualustan sisällä pilaritervalepällä tai puistolehmuksella.

Taulukko 3.

Hehcutushäviöiden (%) ja versonkasvun (mm) välinen Spearmanin korrelaatio pilaritervalepällä (Norkkokuja) ja puistolehmuksella (Pasteurinkatu). Korrelaatiokerroin laskettiin katujen sisällä kolmelle eri kasvualustalle (1-3) ja kolmelle eri vuodelle (2005, 2008 ja 2011). * Korrelaatio oli tilastollisesti merkitsevä 0,05 riskitasolla. ** Korrelaatio oli tilastollisesti merkitsevä 0,01 riskitasolla.

Pilaritervaleppä

korrelaatio	p-arvo	N	korrelaatio	p-arvo	N	korrelaatio	p-arvo	N
Kasvualustat 1, 2 ja 3 ja vuodet 2005, 2008 ja 2011								
-0,093	0,368	95						

Vuosi 2005			Vuosi 2008			Vuosi 2011		
0,614*	0,014	16	-1,888	0,368	25	-0,931**	0,000	54

Puistolehmus

korrelaatio	p-arvo	N	korrelaatio	p-arvo	N	korrelaatio	p-arvo	N
Kasvualustat 1, 2 ja 3 ja vuodet 2005, 2008 ja 2011								
-0,208*	0,032	106						

Vuosi 2005			Vuosi 2008			Vuosi 2011		
-0,663**	0,007	15	0,708**	0,000	27	-0,926**	0,000	64

4. Tulosten tarkastelu

4.1 Kasvualustojen vesipitoisuuden ja lämpötilan vaikutus maahengitykseen

Ensimmäinen hypoteesi oli, että kantavan kasvualustan orgaanisen aineksen hajoamisaktiivisuus kiihtyy lämpötilan ja hienoaineksen vesipitoisuuden noustessa. Orgaanisen aineksen hajoamisaktiivisuutta mitattiin maahengityksen avulla. Tämän tutkimuksen mukaan lämpötilan ja maahengityksen välillä oli positiivinen korrelaatio, ja lämpötila selitti 81–100 prosenttia maahengityksen vaihtelusta inkubaatiokeessa. Kasvava maahengitysaktiivisuus perustuu siihen, että lämpötilan nousu lisää entsyymien aktiivisuutta (Davidson ja Janssens 2006), jolloin mikrobit tarvitsevat vähemmän energiaa kemiallisten sidosten rikkomiseen. Lämpötilan nousu mahdollistaa sen, että mikrobit kykenevät hajottamaan maassa olevia orgaanisia yhdisteitä nopeammin. Lämpötila voi vaikuttaa myös entsyymien muodostumiseen ja rakenteeseen sekä maaperän mikrobipopulaatioon (Davidson ja Janssens 2006). Aineiston perusteella ei voida sanoa, mitä maahengitysaktiivisuudelle tapahtuisi, jos lämpötila nostettaisiin yli 25 °C-asteen.

Maahengityksen lämpötilavaste eli ns. Q_{10} -arvo kuvaa sitä, kuinka paljon maahengitys kasvualustassa muuttui, kun lämpötila kasvoi 10 °C-astetta. Q_{10} -arvo oli tässä tutkimuksessa 1,6 – 2,9. Q_{10} -arvoilla oli laskeva trendi Pasteurinkadulla ja nouseva trendi Norkkokujalla kasvualustoissa yksi ja kaksi vuodesta 2005 vuoteen 2008. Helposti hajoavat orgaaniset hiiliyhdisteet hajoavat myös matalammissa lämpötiloissa (Karhu ym. 2010a), ja muodostuva juuristokarike todennäköisesti pienensi Q_{10} -arvoja Pasteurinkadulla vuonna 2008. Pasteurinkadulla Q_{10} -arvot olivat kuitenkin suuremmat vuonna 2011 kuin 2008 ja Norkkokujalla lähes yhtä suuret. Kähkösen (2001) tutkimuksessa käytettiin samaa menetelmää ja Q_{10} -arvot (2,3–2,8) olivat yhtä suuria kuin tässä tutkimuksessa, mutta matalammissa lämpötiloissa (2,5 - 12 °C). Kähkösen maanäytteet oli kerätty boreaalisen mäntymetsän maaperäkerroksista. Havupuiden karikkeen sisältämät yhdisteet hajoavat hitaammin kuin lehtipuiden karike. Toisaalta kasvualustat kaksi ja kolme sisälsivät männyn kuorta, ja tämä mahdollisesti pienensi eroja orgaanisen aineksen hajoamisnopeudessa näiden kahden tutkimuksen välillä.

Maahengityksen lämpötilavaste riippuu tarkasteltavan lämpötilan lisäksi tutkimusmenetelmästä ja inkubaatioajasta (Hamdi ym. 2012). Inkubaatioajan vaikutukset voidaan havaita erityisesti inkubaation alussa, kun vaihtelua lämpötilariippuvuudessa aiheuttavat nopeasti hajoavat

hiiliyhdisteet (Hamdi ym. 2012). Kasvualustojen orgaanisen aineksen lämpötilavaste ei muuttunut tilastollisesti merkitsevästi vuodesta 2005 vuoteen 2011. Tämä voidaan selittää sillä, että juuristokarikkeen ansiosta helposti hajoavien hiiliyhdisteiden määrä pysyi vakiona vuodesta riippumatta, ja 24 tunnin aikana maanäytteestä hajoavat ensimmäisenä helposti hajoavat hiiliyhdisteet.

Orgaanisen aineksen lämpötilariippuvuuden tutkimista vaikeuttaa se, että orgaaninen aines sisältää yhdisteitä, jotka ovat eri hajoamisvaiheessa (Li ym. 2008), ja joilla on erilainen lämpötilavaste (Liski ym. 1999, Knorr ym. 2005, Davidson ja Janssens 2006). Giardina ja Ryan (2000) eivät löytäneet korrelaatiota inkubointilämpötilojen ja orgaanisen aineksen hajoamisaktiivisuuden väliltä, mutta tämä johtuu luultavasti siitä, että he eivät ottaneet huomioon yhdisteiden erilaista lämpötilavastetta (Davidson ja Janssens 2006). Myös orgaanisen hiilen ikä vaikuttaa siihen, kuinka herkästi maahengityksaktiivisuus muuttuu lämpötilan kasvaessa (Karhu ym. 2010a). Tässä tutkimuksessa hiilen iällä ei todennäköisesti ole suurta merkitystä, koska orgaaninen aines oli melko tuoretta.

Giardinan ja Ryanin (2000) mukaan maaperän lämpötilan lisäksi hajoamisnopeutta kontrolloi maaperän vesipitoisuus. Ensimmäinen hypoteesin toinen osa oli, että hienoaineksen vesipitoisuuden nousu kiihdyttää orgaanisen aineksen hajoamisaktiivisuutta kantavassa kasvualustassa. Hienoaineksen vesipitoisuuden ja maahengityksen välillä oli positiivinen korrelaatio, ja hienoaineksen vesipitoisuus selitti 15–45 prosenttia maasta vapautuvan CO₂-vuon vaihtelusta inkubaatiokokeissa. Suurempi vesipitoisuus lisäsi hengityksaktiivisuutta, kuten hypoteesissa on esitetty. Hienoaineksen vesipitoisuuden kasvu lisäsi maahengityksen ($\mu\text{g g}^{-1} \text{vrk}^{-1}$) residuaalivaihtelua, jota ei voitu selittää lämpötilan avulla. Vesipitoisuuden merkitys maahengitystä selittävänä tekijä kasvoi hienoaineksen vesipitoisuuden kasvaessa, ja tämä aiheutti hajontaa maahengityksen lämpötilariippuvuuteen.

Mikrobien erittämät solun ulkoiset entsyymit, jotka hajottavat hiiliyhdisteitä, liikkuvat veden diffuusion mukana (Davidson ja Janssens 2006). Kuivassa maaperässä vesifilmit muuttuvat ohuimmiksi rajoittaen entsyymien kulkeutumista, ja tämä heikentää solun ulkoisten entsyymien toimintaa (Stark ja Firestone 1995). Tämän vuoksi maanperän vesipitoisuuden nousun on havaittu lisäävän maahengityksaktiivisuutta.

Orgaanisten yhdisteiden hajoamisaktiivisuus on suurimmillaan tietyssä maaperän vesitilavuudessa ja poikkeavuudet tästä vaihteluvälistä heikentävät hajoamisaktiivisuutta (Skopp ym. 1990). Vesipitoisuus säätelee hapen diffuusiota maaperässä (Aachib ym. 2004, Pumpanen ym. 2008, Gabriel ja Kellman 2013), ja korkea vesipitoisuus voi heikentää maahengitysaktiivisuutta, vaikka sellaista vaikutusta ei tässä tutkimuksessa havaittu. Hienoaineksen vesipitoisuuden nousu pysähtyi 30–65 tilavuusprosenttiin Norkkokujalla ja 30–45 tilavuusprosenttiin Pasteurinkadulla, joten tutkimuksen perusteella ei voida sanoa, miten korkea hienoaineksen vesipitoisuus vaikuttaisi hengitysaktiivisuuteen.

Näytteiden otto ja laboratorioinkubointi ovat häiriötekijöitä, jotka vaikuttavat maa-aineksen biologisiin prosesseihin ja maahuokosten tilavuuteen, joka puolestaan vaikuttaa kaasujen diffuusioon (Subke ym. 2009). Juurten poistaminen vähentää juuristokarikkeen ja -eritteiden muodostamaa hiililähdettä. Maanäytteiden oton jälkeen hiilivuo pienenee nopeasti (tunneista muutamaan päivään) (Reichstein ym. 2005), kun maanäytteeseen ei tule lisää orgaanisia yhdisteitä. Toisaalta maanäytteeseen jääneet juuret ja mykorritsarihmastot kuolevat, joten maanäytteessä on enemmän kuollutta biomassaa (Subke ym. 2009). Nämä tekijät vaikuttavat maahengityksessä vapautuvaan hiilivuohon.

Inkubaatiopulloja pidettiin jäällä styrox-laatikossa tavoitteena saavuttaa 0 °C-asteen inkubaatiolämpötila. Kaikki inkubaatiopullot eivät välttämättä ehtineet jäähtyä 0 °C-asteeseen. Toinen tekijä on lämpötila, jossa inkubaatiopulloja pidettiin 24 tuntia ennen inkubointia. Lämpötilat saattoivat vaihdella jonkin verran tutkimuksen aikana sekä mittausvuosien välillä. Tämä aiheuttaa vaihtelua eksponenttifunktioon, jonka avulla laskettiin vuosittain vapautuva hiilivuo. Systemaattinen virhe on korkeintaan 5-22 prosenttia, koska korjauskertoimen vaikutus on suoraan suhteessa lämpötilaan (Lloyd ja Taylor 1994).

Maanäytteiden avulla voidaan eristää yksittäinen prosessi, kuten maahengitys ja selvittää, miten eri tekijät, kuten lämpötila ja vesipitoisuus, vaikuttavat tarkasteltavaan prosessiin (Kutsch ym. 2009). Maaperän koostumus on heterogeeninen, joten maanäytteet eivät välttämättä muodosta realistista otosta. Jos maaperän koostumus oletetaan homogeeniseksi, syntyy yli- tai aliarvio maaperän hiilivuosta lämpötilan muuttuessa (Karhu 2010b). Maanäytteiden heterogeenisyys voi peittää tilastollisessa tarkastelussa käsittelyn aikaansaaman vaikutuksen. Tämä täytyy pitää

mielessä myös tämän tutkimuksen johtopäätöksiä tehtäessä. Otoksoon pitäisi olla riittävän suuri kattamaan vaihtelu maaperän koostumuksessa ja rakenteessa. Toisaalta rakentamisen yhteydessä koekatujen maaperästä pyrittiin tekemään mahdollisimman homogeeninen, joten koekatujen maaperä on oletusarvoisesti homogeenisempi kuin metsämaa.

4.2 Kasvualustojen hehkutushäviöiden vaikutus maahengitykseen

Giardinan ja Ryanin (2000) mukaan hajoamisnopeutta kontrolloi orgaanisen aineksen saatavuus, joka kuvaa sitä, missä muodossa hiili on kasvualustassa. Toinen hypoteesi oli, että kantavan kasvualustan suurempi orgaanisen aineksen määrä lisää kasvualustan hajoamisaktiivisuutta. Maahengitys oli suurinta kasvualustassa kaksi, jossa oli hehkutushäviöiden perusteella eniten orgaanisia yhdisteitä. Juurten osuus (%) kasvualustan hienoaineksesta oli suurin kasvualustassa kaksi, ja muodostuva juuristokarike on orgaanisten yhdisteiden lähde.

Q_{10} -arvojen ja hehkutushäviöiden (%) välinen korrelaatio lisääntyi tutkimusjakson aikana vuodesta 2005 vuoteen 2011. Q_{10} -arvojen ja hehkutushäviöiden välillä oli voimakas korrelaatio ($k_s = 0,718 - 0,865$) vuonna 2011. Kun orgaanisen aineksen määrä oli suurempi, kasvoi hengitysaktiivisuus lämpötilan noustessa voimakkaammin. Puiden kasvaessa kasvualustaan muodostui mahdollisesti enemmän tuoretta juuristokariketta, jonka lämpötilavaste oli maahengityksessä korkea. Hehkutushäviöiden (%) ja Q_{10} -arvojen välillä oli kuitenkin heikko korrelaatio ($k_s = 0,424 - 0,498$), kun tarkasteltiin koko aineistoa. Tämä johtuu todennäköisesti kasvualustojen orgaanisen aineksen laadullisista eroista, jotka vaikuttavat hajoamisherkkyyteen. Kasvualustassa yksi oli pääasiassa turvetta, kasvualustassa kaksi oli kompostoitua liettä ja kasvualustassa kolme lehtikompostia. Saadut tulokset tukevat osittain hypoteesia kaksi.

Suuremman orgaanisten yhdisteiden määrän on havaittu lisäävän hajoamisaktiivisuutta, kun energiaa vapautuu hajotustoiminnassa mikrobien entsyymituotantoon (Fointaine 2003). Monet maaperän mikrobit ovat erikoistuneet hajottamaan tuoretta orgaanista ainesta (Fointaine 2003). Maaperässä on jatkuva kilpailu helposti hajoavaa orgaanista ainesta hyödyntävien mikrobien ja polymeerisiä orgaanisia yhdisteitä käyttävien mikrobien välillä. Joidenkin tutkimusten mukaan helposti hajotettavien hiiliyhdisteiden, kuten juuristoeritteiden, saatavuus ei lisännyt hajoamisaktiivisuutta (Dalenberg ja Jager 1989, De Nobili ym. 2001). Lisääntynyt saatavilla olevan energian määrä ei välttämättä vaikuta maaperän orgaanisen aineksen hajoamisaktiivisuuteen

(Fontaine 2003), jos helposti hajoavaa orgaanista ainesta hajottavat mikrobit voittavat kilpailussa polymeerisiä orgaanisia yhdisteitä hyödyntävät mikrobit. Hiiliyhdisteet voivat kiinnittyä savipartikkelien pinnoille kemiallisin sidoksin, ja tämä voi vaikuttaa mikrobien kykyyn hyödyntää orgaanisia yhdisteitä (Oades 1988, Davidson ja Janssens 2006).

Norkkokujalla kasvualustan maahengityksessä vapautui hiiltä 1,8-6,4 kg v⁻¹ (kasvualustan tilavuus 15 m³) ja Pasteurinkadulla 13,9-87,6 kg v⁻¹ (45 m³). Kasvualustan hiilivarastosta vapautuu maahengityksessä hiiltä 0,8 - 2,6 % vuodessa Norkkokujalla ja 2,9 - 6,7 % Pasteurinkadulla, eli suhteellisesti enemmän Pasteurinkadulla. Koekatujen hiilivuota ei voida kuitenkaan verrata suoraan toisiinsa, koska koekaduilla kasvoi eri puulaji. Maahengityksessä vapautuva hiilivuo oli suurin kasvualustassa kaksi. Hehikutushäviöt olivat suurimmat kasvualustassa kaksi vuonna 2008, joten kasvualustojen väliset erot hiilivuossa selittyvät todennäköisesti orgaanisen aineksen määrällä. Hiilivuo oli suurempi vuonna 2011 kuin 2008. Hehikutushäviöt olivat lähes yhtä suuria molempina vuosina, mutta kasvualustojen lämpösummat olivat suurempia vuonna 2011 kuin vuonna 2008. Kasvualustojen suurempi lämpösumma todennäköisesti lisäsi hiilivuota vuonna 2011. Pasteurinkadulla CO₂ tuotto oli kasvualustan tilavuuteen nähden huomattavasti suurempi kuin Norkkokujalla, joten Pasteurinkadun korkea hienoaineksen vesipitoisuus lisäsi mahdollisesti kasvualustan hiilivuota.

4.3 Versonkasvu ja kasvualustan mineralisaatio

Kolmas hypoteesi oli, että versonkasvu on suurempaa kantavassa kasvualustassa, jossa mineraaliravinteiden määrä ja orgaanisen aineksen hajoamisaktiivisuus ovat suurempia. Ravinnekonsentraatiot, maahengitysaktiivisuus ja versonkasvu olivat suurimmat kasvualustassa kaksi. Norkkokujalla (vuonna 2005) ja Pasteurinkadulla (vuonna 2008) oli merkitsevä korrelaatio hehikutushäviöiden ja versonkasvun välillä ($k_s = 0,614-0,708$), eli suurempi orgaanisen aineksen määrä lisäsi versonkasvua. Tulosten perusteella hypoteesi kolme sai vahvistusta, eli versonkasvu oli suurinta kasvualustassa kaksi, koska siellä oli eniten ravinteita puun käyttöön, ja kasvualustan orgaanisen aineksen hajoamisaktiivisuus oli tehokkainta.

Koska kasvualustojen hienoaineksen koostumus on erilainen, ei voida sanoa varmasti, johtuvatko erot vuotuisessa versonkasvussa hajoamisaktiivisuudesta vai suuremmasta ravinteiden saatavuudesta. Kasvualustojen yksi ja kaksi hienoaineksessa oli myös saraturvetta. Saraturve on

heikommin hajoavaa (Biasi ym. 2011), joten siihen on kertynyt vanhempaa hiiltä, ja sitoutuneet ravinteet vapautuvat puun käyttöön hitaasti. Saraturpeen hitaampi hajoamisaktiivisuus todennäköisesti vaikutti siihen, että mineraaliravinteita vapautui kasvualustaan koko seurantajakson ajan, ja pitoisuudet säilyivät suurimpina kasvualustassa kaksi. Toisaalta kasvualustassa kaksi oli yli 50 prosenttia hienoaineksen tilavuudesta jätevesilietteitä, joka hajoaa huomattavasti nopeammin kuin saraturve. Hienoaineksen monipuolisen koostumuksen vuoksi ravinnepitoisuudet olivat korkeimmat kasvualustassa kaksi koko seurantajakson ajan.

Hehikutushäviöiden ja versonkasvun välillä oli käänteinen merkitsevä korrelaatio vuonna 2011, eli pienempi orgaanisen aineksen määrä lisäsi versonkasvua. Pasteurinkadulla hehikutushäviö oli merkitsevästi pienempi kasvualustassa kaksi vuonna 2011 kuin vuosina 2005 ja 2008. Norkkokujalla maahengityksessä vapautunut hiilivuo oli suurempi vuonna 2011 kuin 2008. Sadesumma ja kasvualustan lämpösumma olivat keskimääräistä suurempia vuonna 2011. Suurempi lämpösumma todennäköisesti lisäsi orgaanisen aineksen hajoamisaktiivisuutta ja suurempi sadesumma versonkasvua. Tämän vuoksi versonkasvu oli suurempi silloin, kun orgaanisen aineksen määrä oli pienempi. Tulos on kuitenkin ristiriidassa kolmannen hypoteesin kanssa. On myös mahdollista, että orgaanisen aineksen voimakas hajoamisaktiivisuus rajoitti ravinteiden pidätyskykyä kasvualustassa kaksi, koska mineraaliravinteita pidättävä hienoaineksen pinta-ala oli pienentynyt voimakkaasti.

Riikosen ym. (2010) mukaan pilaritervalepän versonkasvu oli kohtalaista kaikissa kasvualustoissa. Myös tässä tutkimuksessa hajonta kasvualustojen kumulatiivisessa versonkasvussa oli melko pientä, vaikka ravinteiden saatavuus ja hajoamisaktiivisuus vaihtelivat kasvualustojen välillä. Tätä voidaan selittää sillä, että kasvualustoissa oli aluksi paljon ravinteita, mutta ne sitoutuvat kasvualustasta nopeasti puun kasvuun (Riikonen ym. 2010), ja tasoittavat eroja kasvualustojen välillä. Pilaritervalepän biologinen typensidonta todennäköisesti pienensi eroja kasvualustojen välillä, koska ero kasvualustojen nitraattityppipitoisuudessa oli merkitsevä vuonna 2003, mutta ei myöhemmin.

Hyvä ravinteiden saatavuus näkyi melko korkeana lehtien typpipitoisuutena, eli metsälehmus allokoii ravinteita voimakkaasti lehvästön kasvuun (Kazda ym. 2000). Lehtialakohtainen fotosynteesituotos korreloi voimakkaasti lehtien typpipitoisuuden kanssa (Kazda ym. 2000), eli

suurempi ravinteiden saatavuus lisäsi fotosynteesituotosta. Tasainen jätevesilietekompostin hajoaminen ja hyvä ravinteiden saatavuus edistivät puistolehmuksen kasvua kasvualustassa kaksi (Riikonen ym. 2010), koska melko korkea hienoaineksen vesipitoisuus mahdollisti puun riittävän veden saannin. Kasvualustojen versonkasvu oli lähes yhtä suurta vuonna 2003, eli erot ravinnepitoisuuksissa eivät vielä heijastuneet versonkasvuun (9-25 cm). Syynä oli istutusshokki (Riikonen ym. 2010), joka estää puuta hyödyntämästä tehokkaasti kasvualustan resursseja. Vuonna 2008 vuotuinen versonkasvu oli 69–226 millimetriä, eli vaihtelu versonkasvussa oli suurempaa kuin aikaisemmin. Kasvualustojen väliset erot tulevat esiin versonkasvussa vasta pidemmällä aikavälillä.

4.4 Puiden kuivuudensietokyky versonkasvussa

Katuympäristössä vesi on usein ensisijainen puiden kasvua rajoittava tekijä (Bühler ym. 2006). Neljäs hypoteesi oli, että kantavan kasvualustan alhaisempi hienoaineksen vesipitoisuus pienentäisi vuotuisia versonkasvua. Hienoaineksen vesipitoisuudella (10 cm) ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta versonkasvuun, eli lineaarisella sekamallilla ei saatu vahvistusta hypoteesille neljä. Aikaisemmassa tutkimuksessa (Riikonen ym. 2010) havaittiin, että matala kasvualustan hienoaineksen vesipitoisuus rajoitti pilaritervalepän kasvua, mutta puistolehmuksella vesipitoisuuden nousu ei lisännyt versonkasvua. Tämä johtuu luultavasti siitä, että Pasteurinkadulla hienoaineksen vesipitoisuus oli melko korkealla tasolla koko kasvukauden.

Hienoaineksen vesipitoisuutta mitattiin ns. Theta-probella, joka mittaa maaperän vesitilavuutta, ja mittaus perustuu dielektrisyysvakion arvojen muutoksiin. Mittausmenetelmää ovat testanneet Gaskin ja Miller (1995), ja heidän mukaansa mittauksessa on tärkeää, että maaveden dielektrisyysvakio on huomattavasti suurempi kuin ympäröivän maa-aineksen. Theta-proben mittaamat dielektrisyysvakion arvot ovat olleet liian korkeita verrattuna TDR:n (Time Domain Reflectometry) antamiin tuloksiin, ja tämä on ollut seurausta maaperän tiivistymisestä lähellä elektrodeja (Robinson ym. 1999). Jos maaperä on kantavasta kasvualustasta huolimatta tiivistynyt, saattaa tämä vaikuttaa maaperän kosteuden mittaukseen.

Pasteurinkadulla juuria oli eniten kasvualustan pintakerroksessa vuosina 2005 ja 2008 (Riikonen ym. 2010) sekä 2011. Puu on pyrkinyt varmistamaan juurten hapen saannin sijoittamalla enemmän juuria kasvualustan pintakerrokseen, jossa huokokset eivät ole saturoituneet vedellä.

Heikentynyt hapen diffuusio voi selittää, miksi Pasteurinkadulla ei havaittu versonkasvun lisääntymistä suuremmassa hienoaineksen vesipitoisuudessa tässä tutkimuksessa tai Riikosen ym. (2010) tutkimuksessa. Toisaalta puut kasvattavat vanhetessaan suuremman lehtipinta-alan ja laajentavat juuristoaan kasvualustassa, jolloin puut pystyvät paremmin itse reagoimaan maaperän vesipitoisuuden muutoksiin haihdutuskoneistonsa avulla (Riikonen ym. 2010).

Kavitaatiota esiintyy tervalepällä jo keskinkertaisessa ksyleemin alipaineessa (Hacke ja Sauter 1996), ja kavitaatiolta suojautuminen rajoittaa lehtien ilmarakokonduktanssia. Kavitaatiossa paine laskee veden höyrystymispaineen alapuolelle aiheuttaen kaasukuplien muodostumista ja veden kuljetuksen katkeamista ksyleemin soluissa. Kavitaatiolta suojautuminen pienentää hiilidioksidin diffuusion kautta fotosynteesituotosta ja versonkasvua alhaisemmassa hienoaineksen vesipitoisuudessa, vaikka sitä ei tässä tutkimuksessa havaittu. Tervalepän ilmarakokonduktanssi on suuri, eli tervaleppä haihduttaa voimakkaasti (Hacke ja Sauter 1996). Jotta voimakas haihdunta, mutta alhainen ksyleemin alipaine olisi mahdollista, tarvitaan hyvä veden saatavuus (Weber ym. 1986). Tämän vuoksi tervaleppä voisi soveltua katupuuksi katuympäristöön, jossa kuivuuden sijaan ongelmana on korkea vesipitoisuus ja huokosten saturoituminen. Tervalepällä on tehokas sisäinen kuljetussysteemi, ja myös vesi kulkee hyvin rungossa (Claessens ym. 2010). Norkkokujalla asuintalojen varjostus pienensi todennäköisesti haihduntaa. Tehokas vedenkuljetus ja pienentynyt haihdunta auttavat puuta selviytymään silloin, kun veden saatavuus on rajoitettu, ja tämä selittää, miksi tutkimuksessa ei havaittu vuotuisen versonkasvun laskua pintamaan alhaisemmassa hienoaineksen vesipitoisuudessa. Tutkimuksen perusteella ei voida sanoa, vaikuttivatko hienoaineksen vesipitoisuuden vaihtelut alemmissä kasvualustakerroksissa versonkasvuun.

Metsälehmüksellä ilmarat reagoivat herkästi rajoitettuun vesitilavuuteen pienentäen haihduntaa (Niinemets ym. 1997, 1999), ja tämä auttaa puuta selviytymään silloin, kun maaperän vesipitoisuus on matala. Toisaalta metsälehmüksellä on havaittu korkea ilmarakojen johtokyky, kun veden saatavuus oli turvattu (Kazda ym. 2000). Ilmarakojen johtokyky reagoi herkästi myös lehden lämpötilan ja säteilymäärän muutoksiin (Sellin ja Kupper 2006), ja puun vedenkäyttöstrategia voi heijastua myös puun fotosynteesikoneiston ominaisuuksiin (Aasamaa ym. 2004). Latvuksen yläosassa melko korkea ilmarakojen johtokyky mahdollistaa hiilidioksidin diffuusion ja tehokkaan säteilyenergian hyödyntämisen fotosynteesituotokseen. Tässä tutkimuksessa puistolehmus ei välttämättä kyennyt hyödyntämään korkeaa hienoaineksen vesipitoisuutta, koska

juuristo oli keskittynyt kasvualustan ylemmään kerrokseen. Heikentynyt hapen diffuusio ja istutusshokki selittävät puistolehmuksen suhteellisen pientä versonkasvua Pasteurinkadulla.

4.5 Kasvualustan lämpösumma ja versonkasvu

Maaperän kohonnut lämpötila voi lisätä maahengitystä ja mineraaliravinteiden vapautumista, ja tämä voi heijastua puiden bruttoprimäärituotokseen (Pumpanen ym. 2012). Kohonnut lämpötila aktivoi juuriston kasvua (Vapaavuori ym. 1992, Pregitzer ym. 2000), ja allokointi juuristoon voi pienentää versonkasvua. Viides hypoteesi oli, että kantavan kasvualustan korkeampi lämpösumma lisää vuotuista versonkasvua. Kasvualustan lämpösummalla (10 cm) ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta versonkasvuun, joten lineaarisella sekamallilla ei saatu vahvistusta hypoteesille viisi.

Versonkasvu riippuu puun geneettisestä alkuperästä, koosta ja kehitysvaiheesta (Day ym. 2002). Puun kehitysvaihe vaikuttaa siihen, missä suhteessa puu allokoii yhteyttämistuotteita juuristoon ja latvukseen. Siirtoistutusta seurannut pieni vuosittainen versonkasvu johtuu todennäköisesti istutusshokin lisäksi voimakkaasta allokoinnista juuristoon. Puun kasvaessa geneettinen alkuperä ohjaa lehtien fysiologiassa ja morfologiassa tapahtuvia muutoksia (Day ym. 2002). Muutokset vaikuttavat puun yhteyttämiskapasiteettiin, ja sitä kautta versonkasvuun. Tämä vaikeuttaa eri kehitysvaiheissa olevien puiden versonkasvun vertailua (Riikonen ym. 2010). Tässä tutkimuksessa etuna on se, että puut ovat samaa kehitysvaihetta ja geneettiseltä alkuperältään lähellä toisiaan.

Versonkasvua mitattaessa aineistoa pyrittiin keräämään tasaisesti eri ilmansuunnista ja latvuksen eri osista. Tilan puute kuitenkin vaikeutti mittausten tekoa ja mittauspaikkojen valinnassa jouduttiin ottamaan huomioon rakennukset ja ympäröivä liikenne. Tämä voi olla ongelma tulosten luotettavuuden kannalta, koska vuosittainen versonkasvu vaihtelee voimakkaasti latvuksen eri osissa (Riikonen ym. 2010), johtuen erilaisesta säteilyenergian ja haihduntapaineen jakautumisesta (Aasamaa ym. 2004). Toisaalta verson topologinen asema ei ole välttämättä yksittäisen verson kasvun kannalta kovin merkittävä tekijä, koska katuymäristössä latvukselle on varattu oma kasvutila, ja muiden puiden varjostava vaikutus on vähäistä.

4.6 Mikä on paras kasvualusta?

Versonkasvu on paras indikaattori sille, miten hyvin puu menestyy kasvualustassa. Versonkasvu ja ravinteiden saatavuus olivat suurimpia kasvualustassa kaksi, joka sisälsi ravinteikasta jätevesilietekompostia, männyn kuorta ja saraturvetta. Norkkokujalla erot kumulatiivisessa versonkasvussa olivat pieniä kasvualustojen välillä. Kasvualustojen mineraaliravinteet sitoutuivat nopeasti puun kasvuun (Riikonen ym. 2010), ja tämä tasoitti eroja kasvualustojen välillä yhdessä juuristobakteerien biologisen typensidonnan kanssa. Pilaritervalepän ilmarakojen johtokyky on melko korkea. Rajoitettu veden saatavuus oli todennäköisesti yksi syy siihen, miksi suurempi ravinteiden saatavuus ei lisännyt pilaritervalepän versonkasvuna voimakkaammin kasvualustassa kaksi. Puistolehmuksella kumulatiivinen versonkasvu oli selkeästi suurin kasvualustassa kaksi. Erot johtuvat todennäköisesti ravinteiden saatavuudesta, koska puu kykeni korkeassa hienoaineksen vesipitoisuudessa ylläpitämään haihduntaimun avulla ravinteiden ottoa ja hiilidioksidin diffuusiota, joka olisi mahdollistanut suuremman versonkasvun. Myös juuriston epätasainen jakautuminen vaikutti mahdollisesti ravinteiden saatavuuteen. Kasvualustan suurempi ravinteiden määrä heijastuu puun kasvuun vain, jos puu kykenee ylläpitämään ilmarakojensa johtokykyä.

Puun kasvua voidaan parantaa lisäämällä orgaanista ainesta kasvualustaan (Scharenbroch 2009). Kasvualustojen orgaanisen aineksen rakenne ja koostumus vaihtelivat, koska tavoitteena oli tarkastella, millainen kasvualusta täyttää parhaiten puiden resurssivaatimukset pidemmällä aikavälillä. Kasvualustan kaksi hienoainesta sisälsi eniten hajoavaa orgaanista ainesta. Korkeampi orgaanisen aineksen saatavuus lisäsi orgaanisen aineksen hajoamisaktiivisuutta kasvualustassa, jolloin juuristovyöhykkeelle vapautuu enemmän mineraaliravinteita. Tämä näkyy suurempana versonkasvuna sekä juuriston biomassana. Suurimmat maahengityksen lämpötilavasteet olivat Norkkokujalla kasvualustassa kaksi ja Pasteurinkadulla kasvualustassa yksi, joten näiden kasvualustojen hajoamisaktiivisuus reagoi voimakkaimmin, jos lämpösaareke-ilmio nostaa ilman ja maaperän lämpötiloja. Hajontaa lämpötilavasteisiin aiheutti todennäköisesti se, että kasvualustojen hienoainesta oli seos erilaisia orgaanisia yhdisteitä, joilla on todennäköisesti erilainen lämpötilavaste.

5. Johtopäätökset

Lämpötilan ja hienoaineksen vesipitoisuuden nousu kiihdyttivät orgaanisen aineksen hajoamisaktiivisuutta inkubointikokeessa, eli tutkimuksessa saatiin vahvistusta ensimmäisen hypoteesin tueksi. Vuoden aikana vapautunut hiilivuo oli kasvualustan tilavuuteen ja alkuperäiseen hiilivarastoon nähden suurempi Pasteurinkadulla kuin Norkkokujalla, joten hienoaineksen suurempi vesipitoisuus lisäsi maahengitysaktiivisuutta kasvualustassa. Vapautuvaan hiilivuohon vaikutti varmasti myös se, että kaduilla kasvoi eri puulaji. Vuoden aikana vapautuva hiilivuo oli suurin kasvualustassa kaksi, ja tätä voitiin selittää suuremmalla orgaanisen aineksen saatavuudella. Vuonna 2011 maahengitysaktiivisuus kasvoi lämpötilan noustessa jyrkemmin, kun orgaanisen aineksen määrä oli suurempi. Tutkimuksessa saatiin osittain vahvistusta hypoteesille kaksi, jonka mukaan suurempi orgaanisen aineksen määrä lisäisi hajoamisaktiivisuutta kantavassa kasvualustassa.

Hienoaineksen koostumus ja orgaanisen aineksen hajoamisaktiivisuus ylläpitivät puun ravinteiden saatavuuden korkeimmalla tasolla kasvualustassa kaksi. Suurempi orgaanisen aineksen määrä lisäsi versonkasvua Norkkokujalla (vuonna 2005) ja Pasteurinkadulla (vuonna 2008). Hypoteesi kolme sai osittain vahvistusta, eli versonkasvu oli suurinta kasvualustassa kaksi, koska siellä oli eniten ravinteita puun käyttöön, ja orgaanisen aineksen hajoamisaktiivisuus oli tehokkainta. Kasvualustan lämpösummalla ja hienoaineksen vesipitoisuudella ei havaittu merkitsevää vaikutusta vuotuisen versonkasvuun lineaarisella sekamallilla, toisin kun hypoteeseissa neljä ja viisi on esitetty.

Rakentamisen yhteydessä pitäisi ottaa huomioon kasvualustan koostumuksen lisäksi kasvualustan tilavuus, hulevesien hallinta ja juuristoritilöiden koko. Tällöin ei suljeta pois kasvualustan ja maanpäällisen osan vuorovaikutusta veden ja lehtikarikkeen kierrossa sekä kaasujen vaihdossa. Lisäksi on syytä kiinnittää huomiota puulajivalintaan, koska eri lajien ilmarakojen johtokyky, veden kuljetus, ksyleemin putkisolujen herkkyys kavitaatiolle, hiiliyhdisteiden allokointi sekä juuriston arkkitehtuuri vaihtelevat. Puulajien versonkasvun vertailu ei ole näiden syiden vuoksi mielekäästä.

Orgaanisen aineksen hajoamisaktiivisuus, ravinteiden saatavuus, kasvualustan vesitalous ja puiden kasvu ovat tiukasti sidoksissa toisiinsa. Vesipitoisuus vaikuttaa orgaanisen aineksen jakautumiseen, kaasujen diffuusioon ja ilmarakojen johtokykyyn. Orgaanisen aineksen määrä ja -jakautuminen

sekä hapen diffuusio ovat yhdessä lämpötilan ja vesipitoisuuden kanssa tärkeitä tekijöitä, jotka vaikuttavat orgaanisen aineksen hajoamisaktiivisuuteen. Ilmarakojen johtokyky säätelee puun fotosynteesituotosta ja juurten ravinteiden ottoa. Ravinteiden saatavuus ja hienoaineksen vesipitoisuus ohjaavat puita allokoimaan yhteyttämistuotteita juuriston ja latvuksen välillä. Voimakas allokonti juuristoon näkyy hitaana versonkasvuna ja heti kasvualustan perustamisen jälkeen istutusshokkina. Kasvualustaan investoimalla pystytään parantamaan puiden kasvua ja selviytymistä vain, jos kasvualustan vesitalous on kunnossa.

6. Kiitokset

Haluan kiittää ohjaajaani MMT, dosentti Jukka Pumpasta korvaamattomista neuvoista ja tinkimättömyydestä. Haluan kiittää myös MMM Anu Riikosta suunnannäyttämisestä ja kannustuksesta, ja kaikkia koekatuhankkeessa työskennelleitä aineiston keräämiseen osallistumisesta. Lisäksi haluan kiittää SMEAR III-tutkimusaseman tutkijoita ilmasto-olosuhteisiin liittyvästä aineistosta, laboratoriomestari Marjut Wallneria maanäytteiden käsittelyyn liittyvästä opastuksesta ja tilastotieteen yliopistolehtori Jarkko Isotaloa tilastollisen testauksen selkeyttämisestä ja havainnollistamisesta. Olen kiitollinen myös ystäväistäni ja perheestäni, koska he tuovat paljon lämpöä ja iloa elämäni.

7. Kirjallisuus

- Aachib, M., Mbonimpa, M., ja Aubertin, M. 2004. Measurement and prediction of the oxygen diffusion coefficient in unsaturated media, with applications to soil covers. *Water, air, and soil pollution*, 156(1), 163-193.
- Aasamaa, K., Söber, A., Hartung, W., ja Niinemets, Ü. 2004. Drought acclimation of two deciduous tree species of different layers in a temperate forest canopy. *Trees*, 18(1), 93-101.
- Allison, S. D. ja Vitousek, P. M. 2005. Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs. *Soil Biology & Biochemistry* 37 (2005) 937–944.
- Allen, A. S ja Schlesinger, W. H. 2004. Nutrient limitations to soil microbial biomass and activity in loblolly pine forests. *Soil Biology and Biochemistry* 36:581–589.
- Andersen, C. P., Nikolov, I., Nikolova, P., Matyssek, R., ja Häberle, K. H. 2005. Estimating “autotrophic” belowground respiration in spruce and beech forests: decreases following girdling. *European Journal of Forest Research*, 124(3), 155-163.
- Arrhenius, S. 1889. Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 4, 226–248.
- Balakina, J. N., Makarova, O. V., Bondarenko, V. V., Koudstaal, L. J., Ros, E. J., Koolen, A. J., ja van Loon, W. K. 2005. Simulation of oxygen regime of tree substrates. *Urban Forestry & Urban Greening*, 4(1), 23-35.
- Banfield, J. F., Barker, W. W., Welch, S. A., ja Taunton, A. 1999. Biological impact on mineral dissolution: application of the lichen model to understanding mineral weathering in the rhizosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(7), 3404-3411.
- Bassow, S. L. ja Bazzaz, F. A. 1998. How environmental conditions affect canopy leaf-level photosynthesis in four deciduous tree species. *Ecology*, 79(8), 2660-2675.
- Berger, K. C. ja Truog, E. 1939. Boron determination in soils and plants. *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition*, 11(10), 540-545.
- Biasi, C., Tavi, N. M., Jokinen, S., Shurpali, N., Hämäläinen, K., Jungner, H., Oinonen, M. ja Martikainen, P. J. 2011. Differentiating sources of CO₂ from organic soil under bioenergy crop cultivation: A field-based approach using ¹⁴C. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(12), 2406-2409.
- Bühler, O., Nielsen, C. N., ja Kristoffersen, P. 2006. Growth and phenology of established *Tilia cordata* street trees in response to different irrigation regimes. *Arboriculture and Urban Forestry*, 32(1), 3-9.
- Bühler, O., Balder, H. ja Kristoffersen, P. 2009. Establishment of urban trees. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources* 2009 (4), no. 059, 1-11.
- Chapin III, F. S., Shaver, G. R., Giblin, A. E., Nadelhoffer, K. J., ja Laundre, J. A. 1995. Responses of arctic tundra to experimental and observed changes in climate. *Ecology*, 76(3), 694-711.
- Chmielewski, F. M., ja Rotzer, T. 2002. Annual and spatial variability of the beginning of growing season in Europe in relation to air temperature changes. *Climate research*, 19(3), 257-264.
- Claessens H, Oosterbaan A., Savill P. ja Rondeux J. 2010. A review of the characteristics of black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) and their implications for silvicultural practices. *Forestry*, Vol 83, No 2, 2010.
- Conen F., Karhu K., Leifeld J., Seth B., Vanhala P., Liski J. ja Alewell C. 2008. Temperature sensitivity of young and old soil carbon – Same soil, slight differences in ¹³C natural

- abundance method, inconsistent results. *Soil Biology and Biochemistry*, Volume 40, Issue 10, October 2008, Pages 2703–2705.
- Cregg, B. M. ja Dix, M. E. 2001. Tree moisture stress and insect damage in urban areas in relation heat island effects. *Journal of Arboriculture* 27 (1), 8-17.
- Chrispeels, M. J., Crawford, N. M., ja Schroeder, J. I. 1999. Proteins for transport of water and mineral nutrients across the membranes of plant cells. *The Plant Cell Online*, 11(4), 661-675.
- Dalenberg, J.W. ja Jager, G., 1989. Priming effect of some organic additions to ¹⁴C-labelled soil. *Soil Biology and Biochemistry* 21, 443–448.
- Data sheet KTY81-1 series Silicon temperature sensors. 2000. Philips Electronics N. V. Alankomaat.
- Davidson, E. A., Janssens, I. A. ja Luo, Y. 2005. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q₁₀. *Global Change Biology* (2006) 12, 154-164.
- Davidson, E. A. ja Janssens, I. A. 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* 440, 165-173.
- Day, M. E., Greenwood M. S. ja Diaz-Sala C. 2002. Age- and size-related trends in woody plant shoot development: regulatory pathways and evidence for genetic control. *Tree Physiology* 22, 507–513.
- Day, S. D., Wiseman E. P., Dickinson, S. B. ja Harris, J. R. 2010a. Contemporary Concepts of Root System Architecture of Urban Trees. *Arboriculture & Urban Forestry* 36(4): 149–159.
- Day, S. D., Wiseman E. P., Dickinson S. B. ja Harris J. R. 2010b. Tree Root Ecology in the Urban Environment and Implications for a Sustainable Rhizosphere. *Arboriculture & Urban Forestry* 36 (5), 193-205.
- Dilly, O. ja Nannipieri, P. 2001. Response of ATP content, respiration rate and enzyme activities in an arable and a forest soil to nutrient additions. *Biology and Fertility of Soils*, Vol.34, pp. 34-64.
- Edmondson, J. L., Davies, Z. G., McHugh, N., Gaston, K. J. ja Leake, J. R. 2012. Organic carbon hidden in urban ecosystems *SCIENTIFIC REPORTS*, 2012, 2:963.
- Evans, J. R., ja Von Caemmerer, S. 1996. Carbon dioxide diffusion inside leaves. *Plant Physiology*, 110(2), 339.
- Fernie, A. R., Carrari, F., ja Sweetlove, L. J. 2004. Respiratory metabolism: glycolysis, the TCA cycle and mitochondrial electron transport. *Current opinion in plant biology*, 7(3), 254-261.
- Fogel, R. ja Hunt, G. 1983. Contribution of mycorrhizae and soil fungi to nutrient cycling in a Douglas-fir ecosystem. *Canadian Journal of Forest Research* 13(2):219–232.
- Frey, B., Scheidegger, C., Gunthardt-Goerg, M. S., ja Matyssek, R. 1996. The effects of ozone and nutrient supply on stomatal response in birch (*Betula pendula*) leaves as determined by digital image-analysis and X-ray microanalysis. *New Phytologist*, 132(1), 135-143.
- Gabriel, C. E., ja Kellman, L. 2013. Investigating the role of moisture as an environmental constraint in the decomposition of shallow and deep mineral soil organic matter of a temperate coniferous soil. *Soil Biology and Biochemistry*.
- Gardner, W. H. 1965. Methods of soil analysis. Water content, p. 82-125. In: C.A. Black (ed.), *Amer. Soc. Agron., Agron. Ser. No. 9*, Madison.
- Gaskin, G. J. ja Miller, J. D. 1995. Measurement of Soil Water Content Using a Simplified Impedance Measuring Technique. 1995. *J. Agric. Eng. Res.* (1996) 63, 153 – 160.
- Giardina, C. P. ja Ryan, M. G. 2000. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature. *Nature* 404, 858-861.

- Giardina, C. P., Ryan, M. G., Binkley, D., ja Fownes, J. H. 2003. Primary production and carbon allocation in relation to nutrient supply in a tropical experimental forest. *Global Change Biology*, 9(10), 1438-1450.
- Giardina, C. P., Binkley, D., Ryan, M. G., Fownes, J. H., ja Senock, R. S. 2004. Belowground carbon cycling in a humid tropical forest decreases with fertilization. *Oecologia*, 139(4), 545-550.
- Goodwin, T. W. ja Mercer, E. I. 1983. Introduction to Plant Biochemistry. Second edition. Pergamon Press, London. p. 93-131.
- Grabosky, J., Bassuk, N., Irwin, L., ja van Es, H. 1999. Pilot Field Study of Structural Soil Materials in Pavement Profiles. *The Landscape Below Ground II*.
- Grabosky, J., Bassuk, N., Irwin, L., ja Van Es, H. 2001. Shoot and Root Growth of Three Tree Species in Sidewalks. *Journal of Environmental Horticulture* 19(4):203–206.
- Grayston, S. J., Vaughan, D. ja Jones, D. 1997. Rhizosphere carbon flow in trees, in comparison with annual plants: the importance of root exudation and its impact on microbial activity and nutrient availability. *Applied Soil Ecology* 5(1):29–56.
- Hacke, U. ja Sauter, J. J. 1996. Drought-Induced Xylem Dysfunction in Petioles, Branches, and Roots of *Populus balsamifera* L. and *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. *Plant Physiol.* (1996) 111: 413-417.
- Hamdi, S., Moyano, F., Sall, S., Bernoux, M. ja Chevallier, T. 2012. Synthesis analysis of the temperature sensitivity of soil respiration from laboratory studies in relation to incubation methods and soil conditions. *Soil Biology & Biochemistry* 58 (2013) 115-126.
- Hanson, P. J., Edwards, N. T., Garten, C. T. ja Andrews, J. A. 2000. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 48, 115–146, 2000.
- Hari, P. ja Kulmala, L. 2008. Advances in global change research 34. *In Boreal Forest and Climate Change*. Eds. P. Hari ja L. Kulmala. Springer, New York. ISBN 978-1-4020-8717-2.
- Harris, J. R. 2007. Transplanting large trees. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*. 2, No. 024.
- Hattori, T. 1976. Microbial life in the soil: An Introduction. Institute for Agricultural Research. Tohoku University. Sendai, Japan. p. 427.
- von der Heide-Spravka, K. G. ja Watson, G. W. 1992. Directional differences in little-leaf linden (*Tilia cordata* Mill.) crown development. *Arboricultural Journal: The International Journal of Urban Forestry* Volume 16, Issue 3, 1992.
- Hendrick, R. L., ja Pregitzer, K. S. 1996. Temporal and depth-related patterns of fine root dynamics in northern hardwood forests. *Journal of Ecology*, 167-176.
- Holmäsén, I. 1991. Pohjolan puut ja pensaat. WSOY. 176 s.
- Howard, P. J. A. 1965. The carbon-organic matter factor in various soil types. *Oikos*, 15(2), 229-236.
- Hölttä, T., Vesala, T., ja Nikinmaa, E. 2007. A model of bubble growth leading to xylem conduit embolism. *Journal of theoretical biology*, 249(1), 111-123.
- Hölttä, T., Vesala, T., Sevanto, S., Perämäki, M., ja Nikinmaa, E. 2006. Modeling xylem and phloem water flows in trees according to cohesion theory and Münch hypothesis. *Trees*, 20(1), 67-78.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Working Group I to the Fourth Assessment Report. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 996 p.

- Jaakkola, A. ja Simojoki, A. 1998. Effect of soil wetness on air composition and nitrous oxide emission in a loam soil. *Agricultural and Food Science in Finland* 7: 491-505.
- Jarvis, P. G. 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 273(927), 593-610.
- Jim, C. Y. 1998. Physical and chemical properties of a Hong Kong roadside soil in relation to urban tree growth. *Urban Ecosystems* 2, 171–181.
- Jylhä, K., Ruosteenoja, K., Räisänen, J., Venäläinen, A., Ruokolainen, L., Saku, S. ja Seitola, T. 2009. Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten, ACCLIM-hankkeen raportti 2009.
- Karhu, K., Fritze, H., Tuomi, M., Vanhala, P., Spetz, P., Kitunen, V. ja Liski, J. 2009. Temperature sensitivity of organic matter decomposition in two boreal forest soil profiles. *Soil Biology and Biochemistry* Volume 42, Issue 1, January 2010, Pages 72–82.
- Karhu, K., Fritze, H., Hämäläinen, K., Vanhala, P., Högne, J., Oinonen, M., Sonninen, E., Tuomi, M., Spetz, P., Kitunen, V. ja Liski, J. 2010a. Temperature sensitivity of soil carbon fractions in boreal forest soil. *Ecology* 91: 370-376.
- Karhu, K. 2010b. Temperature sensitivity of soil organic matter decomposition in boreal soils. *Dissertationes Forestales* 107. 59 p.
- Kazda, M., Salzer, J., ja Reiter, I. 2000. Photosynthetic capacity in relation to nitrogen in the canopy of a *Quercus robur*, *Fraxinus angustifolia* and *Tilia cordata* flood plain forest. *Tree physiology*, 20(15), 1029-1037.
- Knorr, W., Prentice, I. C., House, J. I., ja Holland, E. A. 2005. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. *Nature*, 433(7023), 298-301.
- Kolari, P., Kulmala, L., Pumpanen, J., Launiainen, S., Ilvesniemi, H., Hari, P., ja Nikinmaa, E. 2009. exchange and component CO. *Boreal Environment Research*, 14, 761-783.
- Korhonen, J. F. J., Pihlatie, M., Pumpanen, J., Aaltonen, H., Hari, P., Levula, J., Kieloaho A. J., Nikinmaa E., Vesala T. ja Ilvesniemi, H. 2013. Nitrogen balance of a boreal Scots pine forest. *Biogeosciences*, 10(2), 1083-1095.
- Kramer, P. J. ja Kozlowski, T. T. 1960. *Physiology of Trees*. McGraw-Hill Book Company, New York. p. 642.
- Krook, J., Peurasuo, P. ja Heino, M. 2005. Kantava kasvualusta – katurakenne ja katupuun kasvupaikka, koetoimintaa ja käytäntöä. Suomen kuntatekniikan yhdistys ry:n julkaisu 22.
- Kutsch, W. L., Bahn, M., ja Heinemeyer, A. 2009. Soil carbon relations: an overview. *Soil carbon dynamics—an integrated methodology*. Cambridge University Press, Cambridge, 1-15.
- Kähkönen, M. P., Hopia, A. I., Vuorela, H. J., Rauha, J. P., Pihlaja, K., Kujala, T. S. ja Heinonen, M. 1999. Antioxidant Activity of Plant Extracts Containing Phenolic Compounds. *J. Agric. Food Chem.* 1999, 47, 3954-3962.
- Kähkönen, M. A., Wittmann, C., Kurola, J., Ilvesniemi, H. ja Salkinoja-Salonen, M. S. 2001. Microbial activity of boreal forest soil in a cold climate. *BOREAL ENVIRONMENT RESEARCH* 6: 19-28.
- Lakanen, E. ja Erviö, R. 1971. A comparison of eight extractants for the determination of plant available micronutrients in soils. *Agral. Fenn.* 123, 223–232.
- Leiros, M. C., Trasar-Cepeda, C., Seoane, S. ja Gil-Sotres, F. 1998. Dependence of mineralization of soil organic matter on temperature and moisture. *Soil Biology and Biochemistry* 31 (1999) 327-335.

- Li, J., Ziegler, S., Lane, C. S. ja Billings, S. A. 2012. Warming-enhanced preferential microbial mineralization of humified boreal forest soil organic matter: Interpretation of soil profiles along a climate transect using laboratory incubations. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 117, 2012.
- Lindahl, B. O., Taylor, A. F. S. ja Finlay, R. D. 2002. Defining nutritional constraints on carbon cycling in boreal forests – towards a less ‘phytcentric’ perspective. *Plant and Soil* 242: 123–135.
- Liski, J., Ilvesniemi, H., Mäkelä, A., ja Westman, C. J. 1999. CO₂ Emissions from Soil in Response to Climatic Warming Are Overestimated: The Decomposition of Old Soil Organic Matter Is Tolerant of Temperature. *Ambio*, 171-174.
- Lloyd, J., ja Taylor, J. A. 1994. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology* (1994) 8, 315-323.
- Lukac, M. ja Godbold, D. L. 2011. *Soil Ecology in Northern Forests*. Cambridge University Press. p. 274.
- Lundquist, P. 2000. Nitrogenase Activity in *Alnus incana* Root Nodules. Responses to O₂ and Short-Term N₂ Deprivation¹. *Plant Physiology*, February 2000, Vol. 122, pp. 553–561.
- Marschner, P. 2012. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (Third Edition)*. p. 315-330. Elsevier (EBS), Agricultural and Biological Sciences.
- Miller, A. E., Schimel, J. P., Meixner, T., Sickman, J. O., ja Melack, J. M. 2005. Episodic rewetting enhances carbon and nitrogen release from chaparral soils. *Soil Biology and Biochemistry* 37:2195–2204.
- Männistö, A. 2006. Kasvualustojen käyttökokemuksia ja kantavien kansion kehitystä. *Viherympäristö* 2/2006.
- Nikinmaa, E., Goulet, J., Messier, C., Sievänen, R., Perttunen, J. ja Lehtonen, M. 2003. Shoot growth and crown development; the effect of crown position in 3D simulations. *Tree Physiology*. 215, p. 23-28.
- Niinemets, Ü., Kull, O., ja Tenhunen, J. D. 1998. An analysis of light effects on foliar morphology, physiology, and light interception in temperate deciduous woody species of contrasting shade tolerance. *Tree physiology*, 18(10), 681-696.
- Niinemets, Ü., Söber, A., Kull, O., Hartung, W. ja Tenhunen, J. D. 1999. Apparent controls on leaf conductance by soil water availability and via light-acclimation of foliage structural and physiological properties in a mixed deciduous, temperate forest. *International Journal of Plant Sciences* 160, 707–721.
- Nowak, D. J., Kuroda, M., ja Crane, D. E. 2004. Tree mortality rates and tree population projections in Baltimore, Maryland, USA. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2(3), 139-147.
- De Nobili, M., Contin, M., Mondini, C., ja Brookes, P. C. 2001. Soil microbial biomass is triggered into activity by trace amounts of substrate. *Soil Biology and Biochemistry*, 33(9), 1163-1170.
- Oades, J. M. 1988. The retention of organic matter in soils. *Biogeochemistry*, 5(1), 35-70.
- Palviainen, M., Starr, M., ja Westman, C. J. 2012. The effect of site fertility and climate on current weathering in Finnish forest soils: Results of a 10–16year study using buried crushed test-rock material. *Geoderma*, 183, 58-66.
- Poole, I., Lawson, T., Weyers, J. D. B., ja Raven, J. A. 2000. Effect of elevated CO₂ on the stomatal distribution and leaf physiology of *Alnus glutinosa*. *New Phytologist*, 145(3), 511-521.
- Pouyat, R., Groffman, P., Yesilonis, I., ja Hernandez, L. 2002. Soil carbon pools and fluxes in urban ecosystems. *Environmental pollution*, 116, S107-S118.

- Pouyat, R. V., Russell-Annellid, J., Yesilonis, I. D ja Groffman, P. M. 2003. Soil carbon in urban forest ecosystems. Teoksessa Kimble, J.M., Heath, L. S., Birdsey, R. A. ja Lal, R. (toim.). The potential of U.S. forest soils to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. S. 385-394. CRC Press, Boca Raton, USA.
- Pregitzer, K. S., King, J. S., Burton, A. J., ja Brown, S. E. 2000. Responses of tree fine roots to temperature. *New Phytologist*, 147(1), 105-115.
- Priem, H. N. 1997. CO₂ and climate: A geologist's view. *Space Science Reviews*, 81(1-2), 173-198.
- Pumpanen, J., Ilvesniemi, H., Kulmala, L., Siivola, E., Laakso, H., Helenelund, C., Laakso, M., Uusimaa, M., Iisakkala, P., Räisänen, J. ja Hari, P. 2008. Respiration in boreal forest soil as determined from carbon dioxide concentration profile. *Soil Science Society of America Journal*. 72(5): 1187-1196.
- Pumpanen, J., Heinonsalo, J., Rasilo, T., Villemot, J. ja Ilvesniemi, H. 2012. The effects of soil and air temperature on CO₂ exchange and net biomass accumulation in Norway spruce, Scots pine and silver birch seedlings. *Tree Physiology* 32: 724–36.
- Raich, J. W. ja Potter, C. S. 1995. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 9(1), 23-36.
- Ranta, E., Rita, H. ja Kouki, J. Biometria: Tilastotiedettä ekologeille. Yliopistopaino Helsinki 2005.
- Reichstein, M., Subke, J. A., Angeli, A. C. ja Tenhunen, J. D. 2005. Does the temperature sensitivity of decomposition of soil organic matter depend upon water content, soil horizon, or incubation time? *Global Change Biology*, 11, p. 1754–1767.
- Repola, J. 2009. Biomass equations for Scots pine and Norway spruce in Finland. *Silva Fenn.* 43:625–647.
- Riikonen, A., Linden, L., Pulkkinen, M. ja Nikinmaa, E. 2010. Post-transplant crown allometry and shoot growth of two species of street trees. *Urban Forestry and Urban Greening* 10, 87-94.
- Robinson, D. A., Gardner, C. M. K., ja Cooper, J. D. 1999. Measurement of relative permittivity in sandy soils using TDR, capacitance and theta probes: comparison, including the effects of bulk soil electrical conductivity. *Journal of Hydrology*, 223(3), 198-211.
- Roman, L. A. ja Scatena, F. N. 2011. Street tree survival rates: Meta-analysis of previous studies and application to a field survey in Philadelphia, PA, USA. *Urban Forestry & Urban Greening* (2011): 269-274.
- Ross, S. 1989. Soil processes: a systematic approach. Rutledge, Chapman & Hall, New York. 444 pp.
- Roupsard, O., Gross, P. ja Dreyer, E. 1996. Limitation of photosynthetic activity by CO₂ availability in the chloroplasts of oak leaves from different species and during drought. In *Annales des sciences Forestières*. Vol. 53, No. 2-3, pp. 243-254. EDP Sciences.
- Rustad, L. E., Campbell, J., Marion, G., Norby, R., Mitchell, M., Hartley, A., Cornelissen J., ja Gurevitch, J. 2001. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecologia*, 126(4), 543-562.
- Ryan, M. G., ja Law, B. E. 2005. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry*, 73(1), 3-27.
- Rothmund, P. 1956. Hemin and Chlorophyll: the Two Most Important Pigments for Life on Earth.
- Salwa, H., Moyano, F. Sall, S., Bernoux, M. ja Chevallier, T. 2012. Synthesis analysis of the temperature sensitivity of soil respiration from laboratory studies in relation to

- incubation methods and soil conditions. *Soil Biology and Biochemistry* 58 (2013) 115-126.
- Schlesinger, W. H. 1977. Carbon balance in terrestrial detritus. *Annual Review of Ecology and Systematics* 8: 51–81.
- Scharenbroch, B. C. 2009. A Meta-analysis of Studies Published in *Arboriculture & Urban Forestry* Relating to Organic Materials and Impacts on Soil, Tree, and Environmental Properties. *Arboriculture & Urban Forestry* 2009. 35(5): 221–231.
- Sellin, A., ja Kupper, P. 2007. Temperature, light and leaf hydraulic conductance of little-leaf lindens (*Tilia cordata*) in a mixed forest canopy. *Tree Physiology*, 27(5), 679-688.
- Shaver, G. R., Giblin, A. E., Nadelhoffer, K. J., Thieler, K. K., Downs, M. R. Laundre, J. A. ja Rastetter, E. B. 2006. Carbon turnover in Alaskan tundra soils: effects of organic matter quality, temperature, moisture and fertilizer. *Journal of Ecology*, 94, p. 740–753.
- Simojoki, A., Garcia, H., Pihlatie, M., Pumpanen, J., Kurola, J., Salkinoja-Salonen, M., ja Hari, P. 2008. Environmental factors in soil. *Boreal forest and climate change*, 34, 306-313.
- Skopp, J., Jawson, M. D. ja Doran, J. W. 1990. Steady-State Aerobic Microbial Activity as a Function of Soil Water Content. *Soil Science Society of America Journal*, 54, 1619-1625.
- Slaney, M., Wallin, G., Medhurst, J., ja Linder, S. 2007. Impact of elevated carbon dioxide concentration and temperature on bud burst and shoot growth of boreal Norway spruce. *Tree Physiology*, 27(2), 301-312.
- Smith, V. R. 2005. Moisture, carbon and inorganic nutrient controls of soil respiration at a sub-Antarctic island. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(1), 81-91.
- Smith, S. E. ja Read D. J. 2008. Mycorrhizal Symbiosis. Third Edition. Academic Press p. 800.
- Sondergaard, T. E., Schulz, A., ja Palmgren, M. G. 2004. Energization of transport processes in plants. Roles of the plasma membrane H⁺-ATPase. *Plant Physiology*, 136(1), 2475-2482.
- Stark, J. M. ja Firestone, M. K. 1995. Mechanisms for soil moisture effects on activity of nitrifying bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 61(1), 218-221.
- Stenberg, P. 1996. Metsikön rakenne, säteilyolot ja tuotos. Helsingin yliopiston metsäekologian laitoksen julkaisuja 15. Luvut 1., s.6-8 ja 3.1 s.18-23.
- Stotzky, G., ja Norman, A. G. 1961. Factors limiting microbial activities in soil. *Archiv für Mikrobiologie*, 40(4), 341-369.
- Subke, J. A., Heinemeyer, A. ja Reichstein, M. 2009. Experimental design: scaling up in time and space, and its statistical considerations. *Soil carbon dynamics—an integrated methodology*. Cambridge University Press, Cambridge, 34-48.
- Swift, M. J., Heal O. W. ja Anderson J. M. 1979. Decomposition in terrestrial ecosystems. Blackwell Scientific, London. 372 p.
- Talbot, J. M., ja Treseder, K. K. 2010. Controls over mycorrhizal uptake of organic nitrogen. *Pedobiologia*, 53(3), 169-179.
- Trowbridge, P. J. ja Bassuk, N. 2004. Trees in the urban landscape, site assessment design and installation. John Wiley & Sons, New Jersey.
- Trumbore, S. 2000. Age of soil organic matter and soil respiration: radiocarbon constraints on belowground C dynamics. *Ecological Applications*, 10(2), 399-411.
- Tscharntke, T., Thiessen, S., Dolch, R. ja Boland, W. 2001. Herbivory, induced resistance, and interplant signal transfer in *Alnus glutinosa*. *Biochemical Systematics and Ecology* Volume 29, Issue 10, November 2001, Pages 1025–1047.
- User Manual ML2x-UM-1.21. 1999. Delta T Devices Ltd., Cambridge, Great-Britain.

- Vanhala, P., Karhu, K., Tuomi, M., Sonninen, E., Jugner, H., Fritze, H. ja Liski, J. 2007. Old soil carbon is more temperature sensitive than the young in an agricultural field. *Soil Biology and Biochemistry*, *Volume 39*, Issue 11, November 2007, Pages 2967–2970.
- Vanhala, P., Karhu, K., Tuomi, M., Björklöf, K., Fritze, H. ja Liski, J. 2008. Temperature sensitivity of soil organic matter decomposition in southern and northern areas of the boreal forest zone. *Soil Biology and Biochemistry*, *Volume 40*, Issue 7, July 2008, Pages 1758–1764.
- Vanhala, P., Karhu, K., Tuomi, M., Björklöf, K., Fritze, H., Hyvärinen, H. ja Liski, J. 2009. Transplantation of organic surface horizons of boreal soils into warmer regions alters microbiology but not the temperature sensitivity of decomposition. *Global Change Biology* *Volume 17*, p. 538–550, 2011.
- Vapaavuori, E. M., Rikala, R., ja Ryyppö, A. 1992. Effects of root temperature on growth and photosynthesis in conifer seedlings during shoot elongation. *Tree Physiology*, *10(3)*, 217-230.
- Weber, A. 1986. Distribution of spore-positive and spore-negative nodules in stands of *Alnus glutinosa* and *Alnus incana* in Finland. *Plant and Soil*, *96(2)*, 205-213.
- Vihervaluiden hoito VHT'05: Laatuvaatimukset, määrittämisperusteet, työohjeet. Marko Eskolainen. Viherympäristöliitto ry. Julkaisu 32.
- Whitlow, T. H ja Bassuk, N. L. 1987. Trees in difficult sites. *Journal of Arboriculture* *13(1)*, 10-17.
- Wilson, B. F. 1964. *Structure and Growth of Woody Roots of Acer Rubrum L.* Harvard University, Harvard Forest.
- Vuorinen, V. ja Mäkitie, O. 1955. The method of soil testing in use in Finland *Agrogeological Publications* 63: 1–44.
- Waring, R. H., Landsberg, J. J. ja Williams, M. 2013. Net primary production of forests: a constant fraction of gross primary production? *Tree Physiology* *18*, 129-134.
- Wild, A., ja Wolf, G. 1980. The Effect of Different Light Intensities on the Frequency and Size of Stomata, the Size of Cells, the Number, Size and Chlorophyll Content of Chloroplasts in the Mesophyll and the Guard Cells during the Ontogeny of Primary Leaves of *Sinapis alba*. *Zeitschrift für Pflanzenphysiologie*, *97(4)*, 325-342.
- Wood, B. D., Keller, C. K., ja Johnstone, D. L. 1993. In situ measurement of microbial activity and controls on microbial CO₂ production in the unsaturated zone. *Water resources research*, *29(3)*, 647-659.
- Zhu, W. X., Dillard, N. D., ja Grimm, N. B. 2005. Urban nitrogen biogeochemistry: status and processes in green retention basins. *Biogeochemistry*, *71(2)*, 177-196.

Liitteet

Liite 1.

Normaalijakautuneisuus testattiin Norkkokujalla kasvualustoittain ja vuosittain, ja testattavia muuttujia olivat hehikutushäviöt (%), versonkasvu (mm), lämpötilavasteet (ns. Q10-arvot) ja ravinnepitoisuudet (mg l⁻¹). Jokaisen muuttujan aineisto eri vuosilta yhdistettiin kasvualustan sisällä yhdeksi jakaumaksi. Normaalijakautuneisuus testattiin Kolmogorov-Smirnovin ja Shapiro-Wilkinin testeillä. Taulukossa on esitetty testisuureen arvo, havaintojen lukumäärä (df) ja p-arvo 95 % luottamusvälillä. Versonkasvu ei ole kasvualustoittain normaalijakautunutta, koska kasvualustojen kaksi ja kolme versonkasvu ei ole normaalijakautunut. Versonkasvu on kuitenkin normaalijakautunutta vuosina 2005–2011, kun kasvualustat yhdistetään. Hehikutushäviöt ovat kasvualustakohtaisesti normaalijakautuneita. Vuosien sisällä hehikutushäviöt eivät kuitenkaan ole normaalijakautuneita. Q10-arvot ovat normaalijakautuneita kasvualustan- ja vertailtavan vuoden sisällä lukuun ottamatta kasvualustaa yksi. Ravinnepitoisuudet eivät ole normaalisti jakautuneita vuoden tai kasvualustan sisällä.

	Kasvualusta	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk			Vuosi	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		Testisuure	df	p-arvo	Testisuure	df	p-arvo		Testisuure	df	p-arvo	Testisuure	df	p-arvo
Versonkasvu	1	0,095	32	0,200	0,967	32	0,424	2003	0,305	6	0,086	0,857	6	0,180
Versonkasvu	2	0,151	32	0,063	0,950	32	0,145	2004	0,362	6	0,013	0,647	6	0,002
Versonkasvu	3	0,183	32	0,008	0,939	32	0,072	2005	0,257	6	0,200	0,903	6	0,390
Versonkasvu								2006	0,206	6	0,200	0,922	6	0,519
Versonkasvu								2007	0,240	6	0,200	0,897	6	0,359
Versonkasvu								2008	0,173	6	0,200	0,942	6	0,678
Versonkasvu								2009	0,193	6	0,200	0,945	6	0,696
Versonkasvu								2010	0,245	6	0,200	0,952	6	0,753
Versonkasvu								2011	0,240	6	0,200	0,912	6	0,447
Hehikutushäviö	1	0,135	34	0,123	0,921	34	0,017	2005	0,320	16	0,000	0,661	16	0,000
Hehikutushäviö	2	0,081	30	0,200	0,976	30	0,699	2008	0,293	25	0,000	0,801	25	0,000
Hehikutushäviö	3	0,184	31	0,009	0,856	31	0,001	2011	0,311	54	0,000	0,726	54	0,000
QT	1	0,241	12	0,053	0,805	12	0,011	2005	0,169	6	0,200	0,963	6	0,671
QT	2	0,121	12	0,200	0,971	12	0,925	2008	0,203	11	0,200	0,875	11	0,089
QT	3	0,131	11	0,200	0,947	11	0,600	2011	0,102	18	0,200	0,963	18	0,666
Fosfori	1	0,196	11	0,200	0,951	11	0,661	2003	0,239	15	0,021	0,855	15	0,020
Fosfori	2	0,267	10	0,042	0,878	10	0,122	2005	0,356	6	0,037	0,796	6	0,075
Fosfori	3	0,276	11	0,019	0,769	11	0,004	2008	0,226	12	0,091	0,865	12	0,057
Kalium	1	0,145	11	0,200	0,959	11	0,765	2003	0,307	15	0,000	0,782	15	0,002
Kalium	2	0,236	10	0,122	0,822	10	0,027	2005	0,422	5	0,004	0,700	5	0,010
Kalium	3	0,259	11	0,037	0,795	11	0,008	2008	0,259	12	0,026	0,824	12	0,018
Kalsium	1	0,238	11	0,082	0,851	11	0,043	2003	0,220	15	0,049	0,900	15	0,094
Kalsium	2	0,198	10	0,200	0,878	10	0,124	2005	0,454	5	0,001	0,586	5	0,000
Kalsium	3	0,172	11	0,200	0,934	11	0,449	2008	0,163	12	0,200	0,876	12	0,078
Magnesium	1	0,241	11	0,073	0,885	11	0,122	2003	0,306	15	0,001	0,769	15	0,002
Magnesium	2	0,241	10	0,072	0,861	11	0,142	2005	0,271	5	0,200	0,918	5	0,516
Magnesium	3	0,252	11	0,200	0,920	11	0,315	2008	0,217	12	0,123	0,919	12	0,275
Rikki	1	0,259	11	0,038	0,797	11	0,009	2003	0,188	15	0,137	0,873	15	0,081
Rikki	2	0,262	10	0,050	0,838	10	0,042	2005	0,211	5	0,004	0,659	5	0,789
Rikki	3	0,273	11	0,022	0,812	11	0,013	2008	0,048	12	0,128	0,785	12	0,046
Boori	1	0,342	11	0,001	0,697	11	0,000	2003	0,193	15	0,137	0,873	15	0,037
Boori	2	0,298	10	0,012	0,782	10	0,009	2005	0,423	5	0,004	0,659	5	0,003
Boori	3	0,303	11	0,006	0,731	11	0,001	2008	0,216	12	0,128	0,785	12	0,001
Kupari	1	0,252	11	0,050	0,843	11	0,035	2003	0,350	15	0,000	0,766	15	0,002
Kupari	2	0,193	10	0,200	0,907	10	0,258	2005	0,436	5	0,002	0,639	5	0,002

Kupari	3	0,207	11	0,200	0,914	11	0,268	2008	0,402	12	0,000	0,676	12	0,000
Mangaani	1	0,178	11	0,200	0,953	11	0,685	2003	0,343	15	0,000	0,746	15	0,001
Mangaani	2	0,347	10	0,001	0,842	10	0,047	2005	0,408	5	0,007	0,713	5	0,013
Mangaani	3	0,265	11	0,030	0,908	11	0,228	2008	0,201	12	0,197	0,821	12	0,016
Sinkki	1	0,252	10	0,049	0,721	11	0,001	2003	0,368	15	0,000	0,748	15	0,001
Sinkki	2	0,183	11	0,200	0,888	10	0,163	2005	0,428	5	0,003	0,610	5	0,001
Sinkki	3	0,154	11	0,200	0,899	11	0,180	2008	0,400	12	0,000	0,681	12	0,001
Nitraattityppi	1	0,274	11	0,020	0,812	11	0,013	2003	0,252	15	0,011	0,765	15	0,001
Nitraattityppi	2	0,218	10	0,195	0,892	10	0,178	2005	0,473	5	0,001	0,552	5	0,000
Nitraattityppi	3	0,285	11	0,013	0,834	11	0,026	2008	0,160	12	0,200	0,901	12	0,161

Liite 2.

Normaalijakautuneisuus testattiin Pasteurinkadulla kasvualustoittain ja vuosittain, ja testattavia muuttujia olivat hehikutushäviö (%), versonkasvu (mm), maahengityksen lämpötilavasteet (ns. Q_{10} -arvo) ja ravinnepitoisuudet (mg l^{-1}). Jokaisen muuttujan aineisto eri vuosilta yhdistettiin kasvualustan sisällä yhdeksi jakaumaksi. Normaalijakautuneisuus testattiin Kolmogorov-Smirnovin ja Shapiro-Wilkinin testeillä. Taulukossa on esitetty testisuuren arvo, havaintojen lukumäärä (df) ja p-arvo 95 % luottamusväillä. Versonkasvu ei ole kasvualustoittain normaalijakautunutta. Versonkasvu on normaalijakautunutta vuosina 2003, 2004 ja 2008–2011, kun kasvualustat yhdistetään. Hehikutushäviöt ovat kasvualustakohtaisesti normaalijakautuneita lukuunottamatta kasvualustaa yksi. Vuosien sisällä hehikutushäviöt ovat normaalijakautuneita vain vuonna 2005. Q_{10} -arvot ovat kasvualustoittain normaalijakautuneita, mutta vuosien sisällä tarkasteltuna Q_{10} -arvot eivät ole normaalijakautuneita vuonna 2011. Ravinnepitoisuuksista muodostetut jakaumat eivät ole normaalisti jakautuneita vuoden tai kasvualustan sisällä.

	Kasvualusta	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk			Vuosi	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		Testisuure	df	p-arvo	Testisuure	df	p-arvo		Testisuure	df	p-arvo	Testisuure	df	p-arvo
Versonkasvu	1	0,243	18	0,006	0,778	18	0,001	2003	0,219	6	0,200	0,932	6	0,599
Versonkasvu	2	0,162	18	0,200	0,914	18	0,102	2004	0,213	6	0,200	0,928	6	0,567
Versonkasvu	3	0,216	18	0,026	0,899	18	0,056	2005	0,414	6	0,002	0,651	6	0,001
Versonkasvu								2006	0,278	6	0,163	0,862	6	0,197
Versonkasvu								2007	0,304	6	0,088	0,825	6	0,097
Versonkasvu								2008	0,181	6	0,200	0,957	6	0,794
Versonkasvu								2009	0,239	6	0,200	0,908	6	0,422
Versonkasvu								2010	0,228	6	0,200	0,938	6	0,643
Versonkasvu								2011	0,221	6	0,200	0,906	6	0,409
Hehikutushäviö	1	0,158	35	0,026	0,922	35	0,017	2005	0,245	15	0,016	0,857	15	0,022
Hehikutushäviö	2	0,139	33	0,107	0,939	33	0,065	2008	0,211	27	0,003	0,852	27	0,001
Hehikutushäviö	3	0,147	38	0,038	0,902	39	0,003	2011	0,157	64	0,000	0,904	64	0,000
QT	1	0,182	12	0,200	0,932	12	0,399	2005	0,201	5	0,200	0,979	5	0,928
QT	2	0,194	12	0,200	0,926	12	0,339	2008	0,148	12	0,200	0,936	12	0,452
QT	3	0,159	11	0,200	0,918	11	0,304	2011	0,221	18	0,021	0,878	18	0,025
Fosfori	1	0,179	11	0,200	0,881	11	0,107	2003	0,239	15	0,021	0,855	15	0,200
Fosfori	2	0,271	11	0,023	0,856	11	0,050	2005	0,202	6	0,200	0,890	6	0,320
Fosfori	3	0,362	11	0,000	0,621	11	0,000	2008	0,241	12	0,052	0,760	12	0,003
Kalium	1	0,328	11	0,002	0,664	11	0,000	2003	0,307	15	0,000	0,782	15	0,002
Kalium	2	0,154	11	0,200	0,886	11	0,123	2005	0,382	6	0,007	0,758	6	0,024
Kalium	3	0,236	11	0,087	0,912	11	0,261	2008	0,198	12	0,200	0,889	12	0,114
Kalsium	1	0,198	11	0,200	0,897	11	0,168	2003	0,220	15	0,049	0,900	15	0,094
Kalsium	2	0,272	11	0,023	0,866	11	0,068	2005	0,216	6	0,200	0,875	6	0,247
Kalsium	3	0,245	11	0,065	0,846	11	0,037	2008	0,167	12	0,200	0,948	12	0,615
Magnesium	1	0,238	11	0,082	0,853	11	0,047	2003	0,306	15	0,001	0,769	15	0,002
Magnesium	2	0,249	11	0,056	0,786	11	0,006	2005	0,148	6	0,200	0,985	6	0,974

Magnesium	3	0,270	11	0,025	0,853	11	0,046	2008	0,190	12	0,200	0,910	12	0,213
Rikki	1	0,352	11	0,000	0,715	11	0,001	2003	0,188	15	0,162	0,896	15	0,081
Rikki	2	0,134	11	0,200	0,957	11	0,737	2005	0,254	6	0,200	0,865	6	0,206
Rikki	3	0,235	11	0,091	0,879	11	0,102	2008	0,307	12	0,003	0,736	12	0,002
Boori	1	0,274	11	0,021	0,745	11	0,002	2003	0,193	15	0,137	0,873	15	0,037
Boori	2	0,214	11	0,172	0,895	11	0,160	2005	0,175	6	0,200	0,958	6	0,804
Boori	3	0,461	11	0,000	0,507	11	0,000	2008	0,273	12	0,014	0,598	12	0,000
Kupari	1	0,203	11	0,200	0,872	11	0,083	2003	0,350	15	0,000	0,766	15	0,001
Kupari	2	0,217	11	0,156	0,882	11	0,111	2005	0,305	6	0,086	0,799	6	0,058
Kupari	3	0,365	11	0,000	0,765	11	0,003	2008	0,331	12	0,001	0,751	12	0,003
Mangaani	1	0,280	11	0,016	0,831	11	0,024	2003	0,343	15	0,000	0,746	15	0,001
Mangaani	2	0,190	11	0,090	0,837	11	0,029	2005	0,223	6	0,200	0,920	6	0,502
Mangaani	3	0,341	11	0,015	0,805	11	0,011	2008	0,314	12	0,002	0,752	12	0,003
Sinkki	1	0,283	11	0,014	0,694	11	0,000	2003	0,368	15	0,000	0,748	15	0,001
Sinkki	2	0,190	11	0,200	0,860	11	0,058	2005	0,294	6	0,114	0,790	6	0,048
Sinkki	3	0,341	11	0,001	0,765	11	0,003	2008	0,341	12	0,000	0,696	12	0,001
Nitraattityppi	1	0,316	11	0,003	0,720	11	0,001	2003	0,252	15	0,011	0,765	15	0,001
Nitraattityppi	2	0,192	11	0,200	0,873	11	0,086	2005	0,492	6	0,000	0,496	6	0,000
Nitraattityppi	3	0,290	11	0,010	0,787	11	0,006	2008	0,217	12	0,125	0,764	12	0,004

Liite 3.

Normaalijakautuneisuus testattiin Norkkokujalla, ja testattavia muuttujia olivat versonkasvu (mm), hienoaineksen vesipitoisuus ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) ja lämpösusma ($^{\circ}\text{C vrk}$). Muuttujille laskettiin keskiarvo jokaiselle vuodelle (2006–2011) ja keskiarvot yhdistettiin kasvualustan ja mittausvyöyden sisällä yhdeksi jakumaksi muuttuja kohtaisesti. Normaalijakautuneisuus testattiin Kolmogorov-Smirnovin ja Shapiro-Wilkinin testeillä. Taulukossa on esitetty testisuureen arvo, havaintojen lukumäärä (df) ja p-arvo 95 % luottamusvälillä. Versonkasvu ei ole kasvualustoittain normaalijakautunutta lukuun ottamatta kasvualustaa yksi. Hienoaineksen vesipitoisuus oli normaalijakautunutta lukuun ottamatta kasvualustojen yksi ja kolme mittausvyöydyttä 30. Kasvualustan lämpösusma oli normaalijakautunut kaikissa mittausvyöydyksissä.

	Kasvualusta ja syvyys	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		Testisuure	df	p-arvo	Testisuure	df	p-arvo
Versonkasvu	1	0,250	6	0,200	0,904	6	0,399
Versonkasvu	2	0,279	6	0,175	0,846	6	0,145
Versonkasvu	3	0,296	6	0,108	0,851	6	0,161
Vesipitoisuus	1, 10 cm	0,195	6	0,200	0,954	6	0,774
Vesipitoisuus	1, 30 cm	0,367	6	0,012	0,695	6	0,006
Vesipitoisuus	2, 10 cm	0,291	6	0,112	0,920	6	0,508
Vesipitoisuus	2, 30 cm	0,204	6	0,200	0,893	6	0,335
Vesipitoisuus	3, 10 cm	0,229	6	0,200	0,907	6	0,419
Vesipitoisuus	3, 30 cm	0,307	6	0,081	0,891	6	0,326
Lämpösusma	1, 10 cm	0,198	6	0,200	0,925	6	0,544
Lämpösusma	1, 30 cm	0,177	6	0,200	0,952	6	0,760
Lämpösusma	1, 60 cm	0,170	6	0,200	0,965	6	0,860
Lämpösusma	2, 10 cm	0,143	6	0,200	0,976	6	0,933
Lämpösusma	2, 30 cm	0,173	6	0,200	0,960	6	0,818
Lämpösusma	2, 60 cm	0,180	6	0,200	0,945	6	0,699
Lämpösusma	3, 10 cm	0,172	6	0,200	0,945	6	0,698
Lämpösusma	3, 30 cm	0,192	6	0,200	0,929	6	0,573
Lämpösusma	3, 60 cm	0,185	6	0,200	0,935	6	0,621

Liite 4.

Normaalijakautuneisuus testattiin Pasteurinkadulla, ja testattavia muuttujia olivat versonkasvu (mm), hienoaineksen vesipitoisuus ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) ja lämpösusma ($^{\circ}\text{C vrk}$). Muuttujille laskettiin keskiarvo jokaiselle vuodelle (2006–2011), ja keskiarvot yhdistettiin kasvualustan ja mittaussyvyyden sisällä yhdeksi jakaumaksi muuttujakohtaisesti. Normaalijakautuneisuus testattiin Kolmogorov-Smirnovin ja Shapiro-Wilkinin testeillä. Taulukossa on esitetty testisuureen arvo, havaintojen lukumäärä (df) ja p-arvo 95 % luottamusvälillä. Versonkasvu oli kasvualustoittain normaalijakautunutta. Hienoaineksen vesipitoisuus oli normaalijakautunutta lukuun ottamatta kasvualustojen yksi ja kaksi mittaussyvyyttä 10 cm. Kasvualustan lämpösusma oli normaalijakautunut kaikissa mittaussyvyyksissä.

	Kasvualusta ja syvyys	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		Testisuure	df	p-arvo	Testisuure	df	p-arvo
Versonkasvu	1	0,207	6	0,200	0,902	6	0,383
Versonkasvu	2	0,213	6	0,200	0,895	6	0,345
Versonkasvu	3	0,193	6	0,200	0,917	6	0,483
Vesipitoisuus	1, 10 cm	0,292	6	0,121	0,842	6	0,136
Vesipitoisuus	1, 30 cm	0,240	6	0,200	0,875	6	0,246
Vesipitoisuus	2, 10 cm	0,251	6	0,200	0,885	6	0,295
Vesipitoisuus	2, 30 cm	0,188	6	0,200	0,857	6	0,178
Vesipitoisuus	3, 10 cm	0,214	6	0,200	0,933	6	0,602
Vesipitoisuus	3, 30 cm	0,223	6	0,200	0,871	6	0,231
Lämpösusma	1, 10 cm	0,163	6	0,200	0,948	6	0,721
Lämpösusma	1, 30 cm	0,200	6	0,200	0,906	6	0,410
Lämpösusma	1, 60 cm	0,196	6	0,200	0,980	6	0,949
Lämpösusma	2, 10 cm	0,140	6	0,200	0,985	6	0,972
Lämpösusma	2, 30 cm	0,167	6	0,200	0,966	6	0,864
Lämpösusma	2, 60 cm	0,241	6	0,200	0,883	6	0,284
Lämpösusma	3, 10 cm	0,179	6	0,200	0,952	6	0,759
Lämpösusma	3, 30 cm	0,243	6	0,200	0,936	6	0,625
Lämpösusma	3, 60 cm	0,154	6	0,200	0,966	6	0,866

Liite 5.

Varianssien yhtä suuruutta testattiin Norkkokujalla ja Pasteurinkadulla versonkasvussa (mm), ravinnekonentraatioissa (mg l^{-1}), hehikutushäviöissä (%) ja lämpötilavasteissa (Q_{10} -arvo). Levenen testillä testattiin muuttujakohtaisesti ovatko muuttujien varianssit kolmella kasvualustalla yhtä suuret. Levenen testillä testattiin myös, ovatko muuttujien varianssit eri vuosina (2003–2011) yhtä suuret. Taulukossa on esitetty testisuureen arvot, vapausasteet (df1 ja df2) ja p-arvot 95 % luottamusvälillä.

	Norkkokuja				Pasteurinkatu			
	Testisuure	df1	df2	p-arvo	Testisuure	df1	df2	p-arvo
Versonkasvu	0,504	2	94	0,606	4,877	2	64	0,011
Kasvualustat	1,690	8	88	0,112	3,579	8	58	0,002
Vuodet								
Hehikutushäviö								
Kasvualustat	46,226	2	92	0,000	14,109	2	103	0,000
Vuodet	0,730	2	92	0,485	4,130	2	103	0,019
QT								
Kasvualustat	1,357	2	32	0,272	1,128	2	32	0,001
Vuodet	0,942	2	32	0,400	0,142	2	32	0,868
Fosfori								
Kasvualustat	54,346	2	29	0,000	4,565	2	30	0,019
Vuodet	5,018	2	29	0,013	1,037	2	30	0,367
Kalium								
Kasvualustat	114,468	2	29	0,000	10,619	2	30	0,000

Vuodet	17,687	2	29	0,000	11,892	2	30	0,000
Kalsium								
Kasvualustat	13,841	2	29	0,000	0,752	2	30	0,480
Vuodet	5,799	2	29	0,008	7,084	2	30	0,003
Magnesium								
Kasvualustat	10,157	2	29	0,000	12,511	2	30	0,000
Vuodet	1,223	2	29	0,309	3,337	2	30	0,049
Rikki								
Kasvualustat	15,633	2	29	0,000	9,295	2	30	0,001
Vuodet	10,057	2	29	0,000	0,263	2	30	0,770
Boori								
Kasvualustat	10,332	2	29	0,000	1,871	2	30	0,172
Vuodet	1,033	2	29	0,369	4,239	2	30	0,024
Kupari								
Kasvualustat	34,890	2	29	0,000	37,383	2	30	0,000
Vuodet	9,617	2	29	0,001	12,841	2	30	0,000
Mangaani								
Kasvualustat	2,189	2	29	0,130	3,536	2	30	0,042
Vuodet	0,282	2	29	0,756	4,375	2	30	0,022
Sinkki								
Kasvualustat	17,859	2	29	0,000	33,687	2	30	0,000
Vuodet	2,980	2	29	0,067	4,870	2	30	0,015
Nitraattityppi								
Kasvualustat	55,088	2	29	0,000	107,768	2	30	0,000
Vuodet	28,179	2	29	0,000	29,367	2	30	0,000
Lämpösumma								
Syvyudet	0,172	8	45	0,994	5,697	8	45	0,000
Vesipitoisuus								
Syvyudet	5,365	5	30	0,001	6,308	5	30	0,000

Liite 6.

Hehkutushäviö (%) ja hehkutushäviöiden keskihajonta Pasterinkadulla ja Norkkokujalla vuosina 2005, 2008 ja 2011. Symboleilla A, B ja C kuvataan tilastollista merkitsevyyttä, eli sitä onko kasvualustojen välillä tilastollisia eroja eri vuosina.

	Norkkokuja			Pasterinkatu		
	Kasvualusta 1 2005	Kasvualusta 2 2005	Kasvualusta 3 2005	Kasvualusta 1 2005	Kasvualusta 2 2005	Kasvualusta 3 2005
Hehkutushäviö, %	1,7 A	10,8 B	1,3 C	5,7 A	10,1 B	2,1 C
Keskihajonta	1,3	4,5	0,1	0,8	1,0	0,3
<hr/>						
	2008	2008	2008	2008	2008	2008
Hehkutushäviö, %	2,2 A	7,6 B	1,5 C	4,2 A	9,4 B	1,4 C
Keskihajonta	0,7	2,3	0,3	1,1	4,9	0,3
<hr/>						
	2011	2011	2011	2011	2011	2011
Hehkutushäviö, %	2,3 A	8,7 B	1,4 C	4,7 A	7,6 B	1,8 C
Keskihajonta	0,4	2,7	0,2	1,4	1,1	0,5

Liite 7.

Kruskalin-Wallsin ei-parametrisella yksisuuntaisella varianssianalyysillä testattiin, oliko hehkutushäviöissä (%) tilastollisesti merkitseviä eroja kasvualustojen välillä Norkkokujalla ja Pasterinkadulla. Taulukossa on esitetty varianssianalyysillä lasketut tilastolliset tunnusluvut eli otoskoko (N), testisuuren arvo (Chi-Square), vapausaste (df) ja p-arvo. Tarkastelupareina käytettiin kasvualustojen 1-3 hehkutushäviöitä (%) ja vuosien 2005, 2008 ja 2011 aineisto yhdistettiin kasvualustoittain.

Norkkokuja	N	Chi-Square	df	p-arvo	Pasteurinkatu	N	Chi-Square	df	p-arvo
1/2	34/30	46,892	1	0,000	1/2	35/35	34,620	1	0,000
2/3	30/31	45,000	1	0,000	2/3	33/38	44,710	1	0,000
1/3	34/31	28,856	1	0,000	1/3	35/38	53,919	1	0,000

Liite 8.

Kruskalin-Wallsin ei-parametrisella yksisuuntaisella varianssianalyysillä testattiin, oliko ravinnepitoisuuksissa (mg l^{-1}) tilastollisesti merkitseviä eroja vuosien välillä, kun kasvualustoja tarkastellaan yhdessä. Taulukossa on esitetty varianssianalyysillä lasketut tilastolliset tunnusluvut eli otoskoko (N), testisuureen arvo (Chi-Square), vapausaste (df) ja p-arvo. Tarkastelupareina käytettiin vuosien 2003 ja 2005, 2005 ja 2008 sekä 2003 ja 2008 ravinnepitoisuuksia Norkkokujalla ja Pasteurinkadulla.

Norkkokuja						Pasteurinkatu					
Ravinne	Vuodet	N	Chi-Square	df	p-arvo	Ravinne	Vuodet	N	Chi-Square	df	p-arvo
Kalsium	2003/2005	15/6	1,365	1	0,243	Kalsium	2003/2005	15/6	0,606	1	0,436
Kalsium	2005/2008	6/12	0,002	1	0,963	Kalsium	2005/2008	6/12	1,723	1	0,189
Kalsium	2003/2008	15/12	0,060	1	0,807	Kalsium	2003/2008	15/12	3,088	1	0,079
Fosfori	2003/2005	15/6	0,219	1	0,640	Fosfori	2003/2005	15/6	0,152	1	0,697
Fosfori	2005/2008	6/12	0,179	1	0,673	Fosfori	2005/2008	6/12	0,563	1	0,453
Fosfori	2003/2008	15/12	1,320	1	0,251	Fosfori	2003/2008	15/12	0,955	1	0,329
Kalium	2003/2005	15/6	1,024	1	0,312	Kalium	2003/2005	15/6	1,364	1	0,243
Kalium	2005/2008	6/12	0,079	1	0,779	Kalium	2005/2008	6/12	3,512	1	0,061
Kalium	2003/2008	15/12	5,724	1	0,017	Kalium	2003/2008	15/12	0,772	1	0,380
Magnesium	2003/2005	15/6	5,462	1	0,019	Magnesium	2003/2005	15/6	4,424	1	0,035
Magnesium	2005/2008	6/12	0,009	1	0,925	Magnesium	2005/2008	6/12	2,857	1	0,091
Magnesium	2003/2008	15/12	9,164	1	0,002	Magnesium	2003/2008	15/12	11,360	1	0,001
Rikki	2003/2005	15/6	12,281	1	0,000	Rikki	2003/2005	15/6	7,015	1	0,008
Rikki	2005/2008	6/12	0,513	1	0,474	Rikki	2005/2008	6/12	0,457	1	0,499
Rikki	2003/2008	15/12	19,410	1	0,000	Rikki	2003/2008	15/12	10,760	1	0,001
Boori	2003/2005	15/6	5,219	1	0,022	Boori	2003/2005	15/6	8,530	1	0,003
Boori	2005/2008	6/12	0,009	1	0,925	Boori	2005/2008	6/12	0,144	1	0,704
Boori	2003/2008	15/12	13,931	1	0,000	Boori	2003/2008	15/12	3,876	1	0,049
Kupari	2003/2005	15/6	0,344	1	0,558	Kupari	2003/2005	15/6	2,683	1	0,101
Kupari	2005/2008	6/12	0,793	1	0,373	Kupari	2005/2008	6/12	0,970	1	0,325
Kupari	2003/2008	15/12	0,015	1	0,903	Kupari	2003/2008	15/12	0,345	1	0,557
Mangaani	2003/2005	15/6	0,014	1	0,907	Mangaani	2003/2005	15/6	2,559	1	0,110
Mangaani	2005/2008	6/12	0,317	1	0,573	Mangaani	2005/2008	6/12	1,373	1	0,241
Mangaani	2003/2008	15/12	0,866	1	0,352	Mangaani	2003/2008	15/12	0,029	1	0,864
Sinkki	2003/2005	15/6	0,048	1	0,827	Sinkki	2003/2005	15/6	1,552	1	0,213
Sinkki	2005/2008	6/12	0,711	1	0,399	Sinkki	2005/2008	6/12	1,482	1	0,223
Sinkki	2003/2008	15/12	0,038	1	0,845	Sinkki	2003/2008	15/12	0,021	1	0,884
Nitraattityppi	2003/2005	15/6	12,475	1	0,000	Nitraattityppi	2003/2005	15/6	10,889	1	0,001
Nitraattityppi	2005/2008	6/12	11,620	1	0,001	Nitraattityppi	2005/2008	6/12	11,608	1	0,001
Nitraattityppi	2003/2008	15/12	0,134	1	0,714	Nitraattityppi	2003/2008	15/12	1,052	1	0,305

Liite 9.

Kruskalin-Wallsin ei-parametrisella yksisuuntaisella varianssianalyysillä testattiin, oliko ravinnepitoisuuksissa (mg l^{-1}) tilastollisesti merkitseviä eroja kasvualustojen välillä Norkkokujalla ja Pasteurinkadulla. Taulukossa on esitetty varianssianalyysillä lasketut tilastolliset tunnusluvut eli otoskoko (N), testisuureen arvo (Chi-Square), vapausaste (df) ja p-arvo. Tarkastelupareina käytettiin kasvualustojen 1-3 ravinnepitoisuuksia (mg l^{-1}) ja vuosien 2005, 2008 ja 2011 aineisto yhdistettiin kasvualustoittain.

Norkkokuja						Pasteurinkatu					
Kasvualusta	Ravinne	N	Chi-Square	df	p-arvo	Kasvualusta	Ravinne	N	Chi-Square	df	p-arvo
1/2	Kalsium	11/11	3,033	1	0,082	1/2	Kalsium	11/11	3,030	1	0,082
2/3	Kalsium	11/11	5,745	1	0,017	2/3	Kalsium	11/11	2,805	1	0,094
1/3	Kalsium	11/11	2,286	1	0,131	1/3	Kalsium	11/11	0,004	1	0,948
1/2	Fosfori	11/11	15,890	1	0,000	1/2	Fosfori	11/11	15,845	1	0,000
2/3	Fosfori	11/11	15,845	1	0,000	2/3	Fosfori	11/11	8,553	1	0,003
1/3	Fosfori	11/11	15,917	1	0,000	1/3	Fosfori	11/11	15,836	1	0,000
1/2	Kalium	11/11	15,792	1	0,000	1/2	Kalium	11/11	15,783	1	0,000
2/3	Kalium	11/11	9,344	1	0,002	2/3	Kalium	11/11	15,783	1	0,000
1/3	Kalium	11/11	6,728	1	0,009	1/3	Kalium	11/11	3,145	1	0,076
1/2	Magnesium	11/11	2,698	1	0,100	1/2	Magnesium	11/11	0,069	1	0,792
2/3	Magnesium	11/11	13,058	1	0,000	2/3	Magnesium	11/11	5,748	1	0,017
1/3	Magnesium	11/11	5,761	1	0,016	1/3	Magnesium	11/11	15,827	1	0,000
1/2	Rikki	11/11	0,017	1	0,895	1/2	Rikki	11/11	0,990	1	0,320
2/3	Rikki	11/11	4,025	1	0,045	2/3	Rikki	11/11	6,903	1	0,009
1/3	Rikki	11/11	0,990	1	0,320	1/3	Rikki	11/11	0,055	1	0,815
1/2	Boori	11/11	7,369	1	0,007	1/2	Boori	11/11	9,594	1	0,002
2/3	Boori	11/11	9,107	1	0,003	2/3	Boori	11/11	6,664	1	0,010
1/3	Boori	11/11	0,134	1	0,714	1/3	Boori	11/11	0,188	1	0,665
1/2	Kupari	11/11	15,809	1	0,000	1/2	Kupari	11/11	15,854	1	0,000
2/3	Kupari	11/11	15,863	1	0,000	2/3	Kupari	11/11	13,866	1	0,000
1/3	Kupari	11/11	6,637	1	0,010	1/3	Kupari	11/11	3,542	1	0,060
1/2	Mangaani	11/11	15,990	1	0,000	1/2	Mangaani	11/11	15,899	1	0,000
2/3	Mangaani	11/11	15,999	1	0,000	2/3	Mangaani	11/11	15,899	1	0,000
1/3	Mangaani	11/11	12,398	1	0,000	1/3	Mangaani	11/11	0,212	1	0,645
1/2	Sinkki	11/11	15,000	1	0,000	1/2	Sinkki	11/11	15,783	1	0,000
2/3	Sinkki	11/11	15,000	1	0,000	2/3	Sinkki	11/11	15,783	1	0,000
1/3	Sinkki	11/11	10,565	1	0,001	1/3	Sinkki	11/11	12,807	1	0,000
1/2	Nitraattityppi	11/11	3,043	1	0,081	1/2	Nitraattityppi	11/11	0,313	1	0,576
2/3	Nitraattityppi	11/11	1,251	1	0,263	2/3	Nitraattityppi	11/11	1,647	1	0,199
1/3	Nitraattityppi	11/11	4,880	1	0,027	1/3	Nitraattityppi	11/11	2,402	1	0,121

Liite 10.

Kruskalin-Wallisn ei-parametrisella yksisuuntaisella varianssianalyysillä testattiin, oliko ravinnepitoisuuksissa tilastollisesti merkitseviä eroja kasvualustojen välillä Norkkokuja ja Pasteurinkadulla. Taulukossa on esitetty varianssianalyysillä lasketut tilastolliset tunnusluvut eli otoskoko (N), testisuureen arvo (Chi-Square), vapausaste (df) ja p-arvo. Tarkastelupareina käytettiin kasvualustojen 1-3 ravinnepitoisuuksia (mg l^{-1}) ja vuosia 2005, 2008 ja 2011 tarkasteltiin erikseen.

Norkkokuja							Pasteurinkatu						
Kasvualustat	Vuosi	Ravinne	N	Chi-Square	df	p-arvo	Kasvualustat	Vuosi	Ravinne	N	Chi-Square	df	p-arvo
1/2	2003	Kalsium	5/5	5,771	1	0,016	1/2	2003	Kalsium	5/5	5,771	1	0,016
2/3	2003	Kalsium	5/5	1,844	1	0,175	2/3	2003	Kalsium	5/5	1,844	1	0,175
1/3	2003	Kalsium	5/5	6,818	1	0,009	1/3	2003	Kalsium	5/5	6,818	1	0,009
1/2	2005	Kalsium	2/2	2,400	1	0,121	1/2	2005	Kalsium	2/2	2,400	1	0,121
2/3	2005	Kalsium	2/2	2,400	1	0,121	2/3	2005	Kalsium	2/2	0,000	1	1,000
1/3	2005	Kalsium	2/2	1,500	1	0,221	1/3	2005	Kalsium	2/2	2,400	1	0,121

1/2	2008	Kalsium	4/4	5,333	1	0,021	1/2	2008	Kalsium	4/4	5,398	1	0,020
2/3	2008	Kalsium	4/4	5,333	1	0,021	2/3	2008	Kalsium	4/4	5,398	1	0,020
1/3	2008	Kalsium	4/4	0,333	1	0,564	1/3	2008	Kalsium	4/4	0,190	1	0,663
1/2	2003	Fosfori	5/5	7,031	1	0,008	1/2	2003	Fosfori	5/5	7,031	1	0,008
2/3	2003	Fosfori	5/5	6,902	1	0,009	2/3	2003	Fosfori	5/5	6,818	1	0,009
1/3	2003	Fosfori	5/5	7,031	1	0,008	1/3	2003	Fosfori	5/5	7,031	1	0,008
1/2	2005	Fosfori	2/2	2,400	1	0,121	1/2	2005	Fosfori	2/2	2,400	1	0,121
2/3	2005	Fosfori	2/2	2,667	1	0,102	2/3	2005	Fosfori	2/2	0,600	1	0,439
1/3	2005	Fosfori	2/2	2,667	1	0,102	1/3	2005	Fosfori	2/2	2,400	1	0,121
1/2	2008	Fosfori	4/4	5,333	1	0,021	1/2	2008	Fosfori	4/4	5,463	1	0,019
2/3	2008	Fosfori	4/4	5,333	1	0,021	2/3	2008	Fosfori	4/4	1,349	1	0,245
1/3	2008	Fosfori	4/4	5,333	1	0,021	1/3	2008	Fosfori	4/4	5,398	1	0,020
1/2	2003	Kalium	5/5	6,818	1	0,009	1/2	2003	Kalium	5/5	6,818	1	0,009
2/3	2003	Kalium	5/5	6,818	1	0,009	2/3	2003	Kalium	5/5	6,818	1	0,009
1/3	2003	Kalium	5/5	6,818	1	0,009	1/3	2003	Kalium	5/5	6,818	1	0,009
1/2	2005	Kalium	2/2	2,400	1	0,121	1/2	2005	Kalium	2/2	2,400	1	0,121
2/3	2005	Kalium	2/2	2,400	1	0,121	2/3	2005	Kalium	2/2	2,400	1	0,121
1/3	2005	Kalium	2/2	0,000	1	1,000	1/3	2005	Kalium	2/2	2,400	1	0,121
1/2	2008	Kalium	4/4	5,398	1	0,020	1/2	2008	Kalium	4/4	5,333	1	0,021
2/3	2008	Kalium	4/4	5,398	1	0,020	2/3	2008	Kalium	4/4	5,333	1	0,021
1/3	2008	Kalium	4/4	2,083	1	0,149	1/3	2008	Kalium	4/4	0,190	1	0,663
1/2	2003	Magnesium	5/5	5,345	1	0,021	1/2	2003	Magnesium	5/5	5,345	1	0,021
2/3	2003	Magnesium	5/5	6,818	1	0,009	2/3	2003	Magnesium	5/5	6,818	1	0,009
1/3	2003	Magnesium	5/5	6,860	1	0,009	1/3	2003	Magnesium	5/5	6,860	1	0,009
1/2	2005	Magnesium	2/2	2,400	1	0,121	1/2	2005	Magnesium	2/2	2,400	1	0,121
2/3	2005	Magnesium	2/2	2,400	1	0,121	2/3	2005	Magnesium	2/2	2,400	1	0,121
1/3	2005	Magnesium	2/2	0,000	1	1,000	1/3	2005	Magnesium	2/2	2,400	1	0,121
1/2	2008	Magnesium	4/4	1,333	1	0,248	1/2	2008	Magnesium	4/4	5,671	1	0,017
2/3	2008	Magnesium	4/4	4,744	1	0,029	2/3	2008	Magnesium	4/4	5,398	1	0,020
1/3	2008	Magnesium	4/4	2,551	1	0,110	1/3	2008	Magnesium	4/4	5,600	1	0,018
1/2	2003	Rikki	5/5	2,151	1	0,142	1/2	2003	Rikki	5/5	2,151	1	0,141
2/3	2003	Rikki	5/5	6,818	1	0,009	2/3	2003	Rikki	5/5	6,818	1	0,009
1/3	2003	Rikki	5/5	6,818	1	0,009	1/3	2003	Rikki	5/5	6,818	1	0,009
1/2	2005	Rikki	2/2	0,600	1	0,439	1/2	2005	Rikki	2/2	2,667	1	0,102
2/3	2005	Rikki	2/2	2,400	1	0,121	2/3	2005	Rikki	2/2	0,600	1	0,439
1/3	2005	Rikki	2/2	0,000	1	1,000	1/3	2005	Rikki	2/2	2,667	1	0,102
1/2	2008	Rikki	4/4	1,349	1	0,245	1/2	2008	Rikki	4/4	6,054	1	0,014
2/3	2008	Rikki	4/4	5,600	1	0,018	2/3	2008	Rikki	4/4	3,563	1	0,059
1/3	2008	Rikki	4/4	0,438	1	0,508	1/3	2008	Rikki	4/4	0,438	1	0,508
1/2	2003	Boori	5/5	7,353	1	0,007	1/2	2003	Boori	5/5	7,353	1	0,007
2/3	2003	Boori	5/5	7,867	1	0,005	2/3	2003	Boori	5/5	7,867	1	0,005
1/3	2003	Boori	5/5	8,333	1	0,004	1/3	2003	Boori	5/5	8,333	1	0,004
1/2	2005	Boori	2/2	2,667	1	0,102	1/2	2005	Boori	2/2	2,400	1	0,121
2/3	2005	Boori	2/2	2,667	1	0,102	2/3	2005	Boori	2/2	2,400	1	0,121
1/3	2005	Boori	2/2	3,000	1	0,083	1/3	2005	Boori	2/2	2,400	1	0,121
1/2	2008	Boori	4/4	5,531	1	0,019	1/2	2008	Boori	4/4	5,600	1	0,018

2/3	2008	Boori	4/4	5,671	1	0,017	2/3	2008	Boori	4/4	1,349	1	0,245
1/3	2008	Boori	4/4	5,744	1	0,017	1/3	2008	Boori	4/4	4,051	1	0,044
1/2	2003	Kupari	5/5	6,860	1	0,009	1/2	2003	Kupari	5/5	6,860	1	0,009
2/3	2003	Kupari	5/5	7,031	1	0,008	2/3	2003	Kupari	5/5	7,031	1	0,008
1/3	2003	Kupari	5/5	4,992	1	0,025	1/3	2003	Kupari	5/5	4,992	1	0,025
1/2	2005	Kupari	2/2	2,400	1	0,121	1/2	2005	Kupari	2/2	2,400	1	0,121
2/3	2005	Kupari	2/2	2,400	1	0,121	2/3	2005	Kupari	2/2	2,400	1	0,121
1/3	2005	Kupari	2/2	0,600	1	0,439	1/3	2005	Kupari	2/2	2,400	1	0,121
1/2	2008	Kupari	4/4	5,398	1	0,020	1/2	2008	Kupari	4/4	5,463	1	0,019
2/3	2008	Kupari	4/4	5,333	1	0,021	2/3	2008	Kupari	4/4	5,398	1	0,020
1/3	2008	Kupari	4/4	1,349	1	0,245	1/3	2008	Kupari	4/4	0,000	1	1,000
1/2	2003	Mangaani	5/5	6,860	1	0,009	1/2	2003	Mangaani	5/5	6,860	1	0,009
2/3	2003	Mangaani	5/5	6,902	1	0,009	2/3	2003	Mangaani	5/5	6,902	1	0,009
1/3	2003	Mangaani	5/5	6,361	1	0,012	1/3	2003	Mangaani	5/5	6,361	1	0,012
1/2	2005	Mangaani	2/2	2,400	1	0,121	1/2	2005	Mangaani	2/2	2,400	1	0,121
2/3	2005	Mangaani	2/2	2,400	1	0,121	2/3	2005	Mangaani	2/2	2,400	1	0,121
1/3	2005	Mangaani	2/2	2,400	1	0,121	1/3	2005	Mangaani	2/2	0,600	1	0,439
1/2	2008	Mangaani	4/4	5,671	1	0,017	1/2	2008	Mangaani	4/4	5,398	1	0,020
2/3	2008	Mangaani	4/4	5,600	1	0,018	2/3	2008	Mangaani	4/4	5,398	1	0,020
1/3	2008	Mangaani	4/4	5,398	1	0,020	1/3	2008	Mangaani	4/4	5,333	1	0,021
1/2	2003	Sinkki	5/5	6,818	1	0,009	1/2	2003	Sinkki	5/5	6,818	1	0,009
2/3	2003	Sinkki	5/5	6,818	1	0,009	2/3	2003	Sinkki	5/5	6,818	1	0,009
1/3	2003	Sinkki	5/5	6,818	1	0,009	1/3	2003	Sinkki	5/5	6,818	1	0,009
1/2	2005	Sinkki	2/2	1,500	1	0,221	1/2	2005	Sinkki	2/2	2,400	1	0,121
2/3	2005	Sinkki	2/2	1,500	1	0,221	2/3	2005	Sinkki	2/2	2,400	1	0,121
1/3	2005	Sinkki	2/2	0,000	1	1,000	1/3	2005	Sinkki	2/2	2,400	1	0,121
1/2	2008	Sinkki	4/4	5,333	1	0,021	1/2	2008	Sinkki	4/4	5,333	1	0,021
2/3	2008	Sinkki	4/4	5,333	1	0,021	2/3	2008	Sinkki	4/4	5,333	1	0,021
1/3	2008	Sinkki	4/4	5,333	1	0,021	1/3	2008	Sinkki	4/4	5,333	1	0,021
1/2	2003	Nitraattityppi	5/5	6,988	1	0,008	1/2	2003	Nitraattityppi	5/5	6,988	1	0,008
2/3	2003	Nitraattityppi	5/5	6,860	1	0,009	2/3	2003	Nitraattityppi	5/5	6,860	1	0,009
1/3	2003	Nitraattityppi	5/5	7,031	1	0,008	1/3	2003	Nitraattityppi	5/5	7,031	1	0,008
1/2	2005	Nitraattityppi	2/2	1,000	1	0,317	1/2	2005	Nitraattityppi	2/2	2,400	1	0,121
2/3	2005	Nitraattityppi	2/2	1,000	1	0,317	2/3	2005	Nitraattityppi	2/2	1,000	1	0,317
1/3	2005	Nitraattityppi	2/2	0,000	1	1,000	1/3	2005	Nitraattityppi	2/2	0,000	1	1,000
1/2	2008	Nitraattityppi	4/4	3,036	1	0,081	1/2	2008	Nitraattityppi	4/4	0,750	1	0,386
2/3	2008	Nitraattityppi	4/4	3,036	1	0,081	2/3	2008	Nitraattityppi	4/4	5,333	1	0,021
1/3	2008	Nitraattityppi	4/4	0,083	1	0,773	1/3	2008	Nitraattityppi	4/4	5,333	1	0,021

Liite 11.

Kruskalin-Wallis ei-parametrisella yksisuuntaisella varianssianalyysillä testattiin, oliko hehkutushäviöissä (%) tilastollisesti merkitseviä eroja vuosien välillä. Taulukossa on esitetty mittaussyvyydet (0–30 ja 30–60), joista data on kerätty, sekä varianssianalyysillä lasketut tilastolliset tunnusluvut eli otoskoko (N), testisuureen arvo (Chi-Square), vapausaste (df) ja p-arvo. Tarkastelupareina käytettiin vuosien 2005 ja 2008, 2008 ja 2011 sekä 2005 ja 2011 hehkutushäviöitä (%) Norkkokujalla ja Pasteurinkadulla.

Norkkokuja						Pasteurinkatu					
Kasvualusta	Vuodet	N	Chi-Square	df	p-arvo	Kasvualusta	Vuodet	N	Chi-Square	df	p-arvo
1	2005/2008	4/9	0,381	1	0,537	1	2005/2008	4/11	4,926	1	0,026
1	2008/2011	9/21	0,001	1	0,982	1	2008/2011	11/20	1,065	1	0,302

1	2005/2011	4/21	0,088	1	0,767	1	2005/2011	4/20	1,350	1	0,245
2	2005/2008	4/9	0,381	1	0,537	2	2005/2008	4/9	0,095	1	0,758
2	2008/2011	9/17	1,889	1	0,169	2	2008/2011	9/20	5,556	1	0,018
2	2005/2011	4/17	0,078	1	0,780	2	2005/2011	4/20	8,214	1	0,004
3	2005/2008	8/7	5,906	1	0,015	3	2005/2008	7/7	5,000	1	0,025
3	2008/2011	7/16	2,790	1	0,095	3	2008/2011	7/24	2,431	1	0,119
3	2005/2011	8/16	3,375	1	0,066	3	2005/2011	7/24	2,009	1	0,156
Kaikki kasvualustat	2005/2008	16/25	3,601	1	0,058	Kaikki kasvualustat	2005/2008	15/27	0,108	1	0,743
Kaikki kasvualustat	2008/2011	25/54	0,059	1	0,808	Kaikki kasvualustat	2008/2011	27/64	0,004	1	0,952
Kaikki kasvualustat	2005/2011	16/54	3,725	1	0,054	Kaikki kasvualustat	2005/2011	15/64	0,316	1	0,574

Liite 12.

Kruskalin-Wallisn ei-parametrisella yksisuuntaisella varianssianalyysillä testattiin, oliko maahengityksen lämpötilavasteissa (Q_{10} -arvo) tilastollisesti merkitseviä eroja kasvualustoilla vuosien välillä. Taulukossa on esitetty varianssianalyysillä lasketut tilastolliset tunnusluvut eli otoskoko (N), testisuureen arvo (Chi-Square), vapausaste (df) ja p-arvo. Tarkastelupareina käytettiin vuosien 2005 ja 2008, 2008 ja 2011 sekä 2005 ja 2011 Q_{10} -arvoja Norkkokujalla ja Pasteurinkadulla.

Norkkokuja						Pasteurinkatu					
Kasvualusta	Vuodet	N	Chi-Square	df	p-arvo	Kasvualusta	Vuodet	N	Chi-Square	df	p-arvo
1	2005/2008	2/4	0,909	1	0,340	1	2005/2008	2/4	3,429	1	0,064
1	2008/2011	4/6	0,727	1	0,394	1	2008/2011	4/6	2,227	1	0,136
1	2005/2011	2/6	2,778	1	0,096	1	2005/2011	2/6	1,000	1	0,317
2	2005/2008	2/4	0,857	1	0,355	2	2005/2008	2/4	1,929	1	0,165
2	2008/2011	4/6	0,182	1	0,670	2	2008/2011	4/6	2,227	1	0,136
2	2005/2011	2/6	1,778	1	0,182	2	2005/2011	2/6	1,778	1	0,182
3	2005/2008	2/3	3,000	1	0,083	3	2005/2008	2/4	0,500	1	0,480
3	2008/2011	3/6	0,267	1	0,606	3	2008/2011	3/6	1,636	1	0,201
3	2005/2011	2/6	4,000	1	0,046	3	2005/2011	2/6	1,000	1	0,317

Liite 13.

Hehkutushäviöiden (%), Q_{10} -arvojen, hienoaineen vesipitoisuuden (%) ja CO_2 hiilivuon ($\mu g\ g^{-1}\ vrk^{-1}$) välinen korrelaatio. Korrelaation määrittämisessä käytettiin Spearmanin korrelaatiokerrointa. Korrelaatiokerroin laskettiin erikseen Norkkokujalle ja Pasteurinkadulle ja katujen sisällä kolmelle eri kasvualustalle ja kolmelle eri vuodelle (2005, 2008 ja 2011).

	Hehkutushäviö	Norkkokuja			Pasteurinkatu		
		Q_{10}	Vesipitoisuus	CO_2	Q_{10}	Vesipitoisuus	CO_2
Koko aineisto	korrelaatio	0,498**	0,742**	0,772**	0,424*	0,439**	0,298
	p-arvo	0,002	0,000	0,000	0,011	0,008	0,082
	N	35	35	35	35	35	35
Kasvualusta 1	korrelaatio	0,479	0,303	0,516	0,783**	0,-569	-0,16
	p-arvo	0,115	0,339	0,088	0,003	0,053	0,619
	N	12	12	12	12	12	12
Kasvualusta 2	korrelaatio	0,185	0,182	0,271	0,075	0,153	-0,242
	p-arvo	0,565	0,572	0,395	0,817	0,635	0,449
	N	12	12	12	12	12	12
Kasvualusta 3	korrelaatio	-0,233	0,689*	0,665*	0,131	0,411	0,664*
	p-arvo	0,491	0,019	0,025	0,701	0,209	0,026
	N	11	11	11	11	11	11
Vuosi 2005	korrelaatio	-0,239	0,717	0,748	0,316	0,949*	0,632

	p-arvo	0,648	0,109	0,338	0,604	0,014	0,252
	N	6	6	6	5	5	5
Vuosi 2008	korrelaatio	0,792**	0,650*	0,664*	-0,127	0,505	0,438
	p-arvo	0,004	0,030	0,026	0,694	0,094	0,154
	N	12	12	12	12	12	12
Vuosi 2011	korrelaatio	0,718**	0,825**	0,925**	0,865**	0,420	0,283
	p-arvo	0,001	0,000	0,000	0,000	0,083	0,256
	N	18	18	18	18	18	18

* Korrelaatio oli tilastollisesti merkitsevä 0,05 riskitasolla.

** Korrelaatio oli tilastollisesti merkitsevä 0,01 riskitasolla.

Liite 14.

Kruskalin-Wallisn ei-parametrisella yksisuuntaisella varianssianalyysillä testattiin, oliko Q_{10} -arvoissa tilastollisesti merkitseviä eroja kasvualustojen välillä Norkkokujalla ja Pasteurinkadulla. Taulukossa on esitetty varianssianalyysillä lasketut tilastolliset tunnusluvut eli otoskoko (N), testisuureen arvo (Chi-Square), vapausaste (df) ja p-arvo, joka kuvaa tilastollista merkitsevyyttä. Tarkastelupareina käytettiin kasvualustojen Q_{10} -arvoja ja vuosien 2005, 2008 ja 2011 aineisto yhdistettiin kasvualustoittain.

Norkkokuja	N	Chi-Square	df	p-arvo	Pasteurinkatu	N	Chi-Square	df	p-arvo
1/2	12/12	10,462	1	0,001	1/2	12/12	0,030	1	0,862
2/3	12/11	7,678	1	0,006	2/3	12/11	6,367	1	0,012
1/3	12/11	0,004	1	0,951	1/3	12/11	4,125	1	0,042