

Tartu Ülikool
Loodus- ja tehnoloogiateaduskond
Ökoloogia ja Maateaduste Instituut
Geograafia osakond

Magistritöö keskkonnatehnoloogia erialal

Kasvuhoonegaaside vood haljaskatustelt ning paepealselt mullalt

Rauno Mets

Juhendaja: PhD Alar Teemusk

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Osakonna juhataja:

Tartu 2015

Sisukord

Sissejuhatus.....	4
1. Teoreetiline osa.....	5
1.1. Haljaskatuste ajalugu.....	5
1.2. Haljaskatuste tüübid ja iseloomustus	6
1.3. Haljaskatuste kasulikud omadused.....	8
2. Maailmas läbiviidud tööd.....	10
2.1. Kasvuhoonegaaside mõõtmised haljaskatustel	10
2.2. Temperatuuri mõõtmised haljaskatustel.....	11
2.3. Haljaskatustele sarnanevad looduslikud kooslused Eestis ning mujal.....	14
3. Metoodika ja materjal.....	17
3.1. Uuritavate haljaskatuste ning võrdlusala kirjeldus.....	17
3.1.1. Archimedese kergmurukatus	17
3.1.2. Ujula 2a murukatus.....	18
3.1.3. Tallinna Loomaaia mätaskatus	18
3.1.4. Võrdlusala Naagel.....	18
3.2. Välitööde metoodika	20
3.2.1. Kasvuhoonegaaside voo mõõtmine pimekambri meetodiga	20
3.2.2. Keskkonnaparameetrite mõõtmiste metoodikad.....	21
3.2.3. Uurimisalade maapealne ja maa-alune biomass ning kasvupinnas	21
3.2.4. Statistiline analüüs	22
4. Tulemused	23
4.1. Kasvuhoonegaaside vood.....	23
4.1.1. Uurimisalade ökosüsteemi CO ₂ -C vood	23
4.1.2. Uurimisalade CH ₄ -C vood	26
4.1.3. Uurimisalade N ₂ O-N vood.....	29
4.2. Temperatuur	32
4.3. Uurimisalade maapealne ja maa-alune biomass ning kasvupinnas.....	36
5. Arutelu.....	40
5.1. Kasvuhoonegaaside vood.....	40

5.1.1.	Uurimisalade ökosüsteemi CO ₂ -C vood	40
5.1.2.	Uurimisalade CH ₄ -C vood	43
5.1.3.	Uurimisalade N ₂ O-N vood.....	45
5.2.	Temperatuur	47
5.3.	Uurimisalade maapealne ja maa-alune biomass ning kasvupinnas.....	49
	Kokkuvõte.....	52
	Summary.....	55
	Tänuavaldused	58
	Kasutatud kirjandus	59
	Lisad.....	65
	Lisa 1.....	65
	Lisa 2.....	66
	Lisa 3.....	66
	Lisa 4.....	67
	Lisa 5.....	67
	Lisa 6.....	68

Sissejuhatus

Maailmas järjest rohkem populaarsust koguvaks ökotehnoloogia haruks on haljaskatused. Kasvukihi paksuse alusel jaotatakse katusehaljastus kahte gruppi: ekstensiivne ning intensiivne. Haljaskatused omavad mitmeid kasulikke omadusi linnakeskkonna elukvaliteedi tõstmiseks. Haljaskatuste rajamise tulemusena on võimalik linnades vähendada “kuuma saare” efekti, hoonete energiakulu, õhusaastet ning välise müra mõju hoone siseruumidele. Haljaskatused aitavad kinni pidada vihmavett ja reguleerida vihmavee äravoolu ning pakuvad lisaelupaikasad taime-, looma- ja putukaliikidele, lisades samaaegselt linnapildile esteetilist väärtust (Berardi et al., 2014).

Käesolevas uuringus kasutati kolme olemasolevat haljaskatust: kergkruusapõhist ekstensiivset taimkatust, mullapõhist kerge intensiivsusega murukatust ning intensiivse ja ekstensiivse haljaskatuse vahepeale jäävat mätaskatust. Neid võrreldakse haljaskatustele looduslikult kõige sarnasema kooslusega, milleks on õhukesel paepealsel mullal asuv loopealne kooslus. Käesoleva töö eripäraks võrreldes teiste maailmas läbiviidud haljaskatuste uuringutega on see, et senini pole haljaskatustel läbi viidud kasvuhoonegaaside voogude otseseid mõõtmisi, vaid on hinnatud nende suuruseid kaudsete meetoditega. Tööle annab lisaväärtuse ka uuringusse kaasatud paepealne võrdlusala, millelt mõõdeti kasvuhoonegaaside voogusid Eestis esmakordselt.

Antud magistr töö eesmärgiks on mõõta kasvuhoonegaaside voogusid haljaskatustelt ja paepealselt mullalt ning leida kasvuhoonegaaside voogudelt kõige sarnasem haljaskatuse tüüp looduslikule paepealsel mullal asuvale kooslusele.

Käesoleva magistr töö hüpoteesid on järgmised:

1. Kõige sarnasem Naage looduslikule paepealsele alale kasvuhoonegaaside voogudelt on paksema kasvukihiga ja lopsakama taimestikuga Loomaaia mätaskatus.
2. Õhukesed ning suvel läbikuivavad haljaskatused koos loodusliku paepealse võrdlusalaga toimivad aastaringselt metaani sidujatena.
3. Aasta jooksul toimub kõige väiksem haljaskatuste aluskatuse temperatuuri kõikumine paksema kasvukihiga Loomaaia mätaskatusel.
4. Kõige aeglasema süsinikuringega uurimisalaks on õhukese kasvupinnasega ja alvarikooslusega Archimedese kergmurukatust.

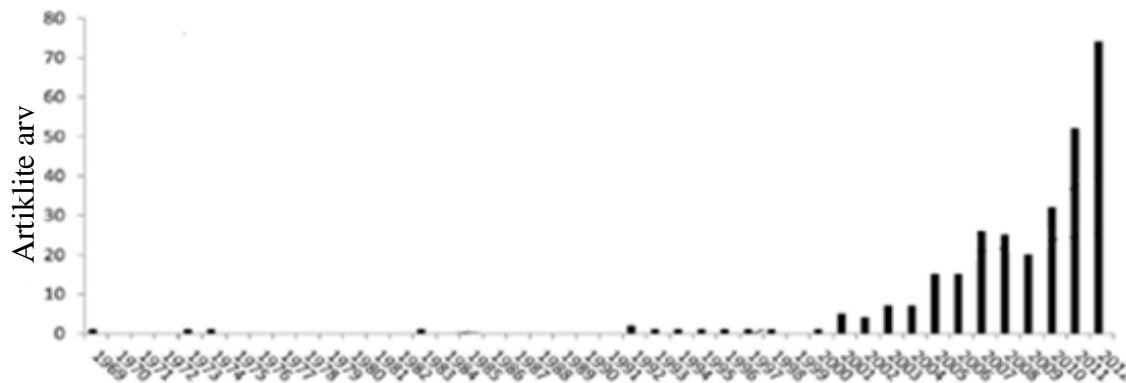
1. Teoreetiline osa

1.1. Haljaskatuste ajalugu

Katusehaljastus on hoone katusele rajatav taimestikul põhinev katusekate. Sõltuvalt haljaskatuse tüübist saab neid nimetada haljaskatusteks, rohukatusteks, rohekatusteks või taimkatusteks. Laialdaselt on levinud eesti keeles sõna “murukatus”, kuigi osade haljaskatuste tüüpide puhul on sarnasus muruga minimaalne või puudub üldse. Kergkruusale rajatud alvarikoosluse taimedega katuseid võidakse lihtsustatult nimetada kerghuumuskatusteks või kergmurukatusteks. Mätastega kaetavaid katuseid kutsutakse mätaskatusteks. Lisaks eelnimetatutele on kasutusel veel mitmeid eestikeelseid ja inglisekeelseid termineid haljaskatuste tähistamiseks.

Haljaskatused on tänapäeval levinud Põhja- ja Kesk-Euroopas ning on muutumas järjest populaarsemaks Põhja-Ameerikas, Jaapanis ja Hiinas. Esimesed haljaskatused, mille olemasolust on kirjalikke tõendeid, olid Babüloonia rippaiad, mida mainiti juba 590 aastat e.m.a., ning mille suuruseks oli 2000 m². Tänapäeval kasutatavad rohekatused on pärit Skandinaaviast. Viikingid kasutasid oma hoonete katustena haljaskatuseid, kus nende peamiseks ülesandeks oli vähendada hoone soojuskadu ning kaitsta hoonet vihma ja tuule eest. Viikingite ajale sarnase ehitusstiiliga mätaskatuseid on võimalik veel tänapäevalgi näha Fääri saartel. Murukatuste populaarsus tõusis 20. sajandi keskel, kui kuulsad arhitektid võtsid nad kasutusele, et muuta hooneid energiasäästlikumaks. Euroopas on haljaskatuste rajamise eestvedajaks olnud Saksamaa. 1990-ndatel moodustasid Saksamaal haljaskatused 13% kogu riigi lamekatustest. Austria, Inglismaa, Uus-Meremaa ja Austraalia on samuti välja andnud eeskirju haljaskatuste ehitamiseks. Ameerika vanim haljaskatus pärineb 1930. aastast ning on rajatud New Yorgi Rockefelleri keskuse katusele (Dinsdale et al., 2006; Cutlip, 2006).

Haljaskatuste populaarsuse tõusu kinnitab ka Blanki jt (2013) poolt läbi viidud uuring, kus selgus, et viimase 20 aasta jooksul on tõusnud haljaskatuste kohta läbiviidavate uuringute arv oluliselt ning 2012. aastal jõudis 74 artiklini aastas (joonis 1). Haljaskatuste populaarsust kinnitab ka fakt, et ajavahemikus 2001 – 2012 on haljaskatuste kohta käivaid artikleid avaldatud 31 eri riigi uurijate poolt (Blank et al., 2013).



Joonis 1. Haljaskatuste kohta ilmunud teaduslike artiklite arv aastate kaupa (Blank et al., 2013).

1.2. Haljaskatuste tüübid ja iseloomustus

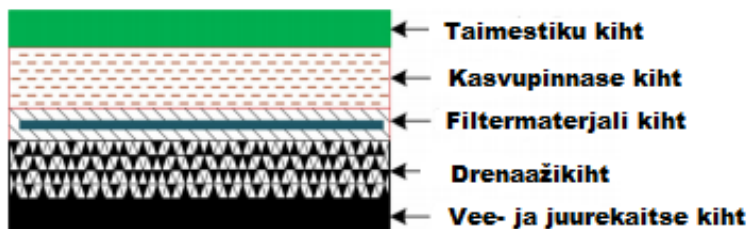
Katusehaljastuse levinuimaks jaotusviisiks on haljaskatuste jaotamine kasvukihi paksuse järgi kahte suuremasse gruppi (Berardi et al., 2014; Chen, 2013; Zhang et al., 2011; Williams et al., 2010; Oberndorfer et al., 2007; Liu et al., 2005):

- Esimese suurema rühma moodustab ekstensiivne katusehaljastus ehk kerged murukatused. Kergmurukatuste korral jääb kihtide paksus enamjaolt alla 20 cm ning lisakoormus jääb vahemikku 60 – 150 kg/m² (sõltub katuse veesisaldusest). Kasvukihina kasutatakse enamasti kergkruusa, mis tagab murukatuse kerguse. Kergkruusapõhisel katusel suudavad kasvada vähesed taimeliigid. Eelistatumad on temperatuuri- ja niiskusrežiimi kõikumist taluvad taimeliigid, eeskätt erinevad kukeharjalised. Kergmurukatused ei vaja hooldamist ning ei talu tallamist, sest selle tagajärjel saab kahjustada seal kasvavate taimede juurestik.
- Teise suurema grupi moodustab intensiivne katusehaljastus ehk hooldatavad katuseaiad. Intensiivsete murukatuste korral on kihtide paksus suurem kui 20 cm ja lisakoormus katusele jääb vahemikku 300 – 1000 kg/m². Suure lisakoormuse tõttu tuleks katuseaedade rajamise soovi korral hinnata olemasoleva hoone katuse kandevõimet (lisatoestuse rajamise vajadust). Tänu kasvusubstraadi paksusele on katuseaedades võimalik kasvatada rohkem eri liiki taimi kui kergetel murukatustel. Näiteks on katuseaedades võimalik kasvatada põõsaid ning isegi väiksemaid puid. Paremate kasvutingimuste tagamiseks vajavad katuseaiad pidevat inimesepoolset hooldamist.

Vahepealseks tüübiks võib pidada Skandinaaviamaades levinud nn mätaskatused. Neid võib klassifitseerida kergelt intensiivseteks haljaskatusteks, sest need on rasked ning vajavad ilusana püsimiseks hooldust. Traditsiooniliselt võib neid rajada kas mätastükkidena või kasutades mulda ja rullmuru.

Traditsioonilised haljaskatused koosnevad enamasti järgmistest kihtidest (joonis 2) (Chen, 2013; Berndtsson, 2010; Liu et al., 2005):

- 1) Taimestik – Taimestik tuleks valida vastavalt taimede võimele olemasolevate tingimustega (kliima, kasvustraat jne) kohaned. Vajadusel võib paigaldada ka niisutussüsteemi.
- 2) Kasvupinnas – Kasvupinnase ülesandeks on toetada taimekasvu. Kasvupinnase koostis ning paksus valitakse vastavalt taimestikule, mida soovitakse katusel kasvatada. Kasvupinnasena võib kasutada mulda, liiva, orgaanilise pinnase ja väetise segu, ning juhul kui tahetakse anda katusele kergust, siis kasutatakse kasvustraaadi osana ka kergkruusa.
- 3) Filtermaterjali kiht – Filterkihi ülesandeks on takistada väikeste osakeste sattumist dreanažikihti. Enamasti kasutatakse selleks geotekstiili.
- 4) Dreanažikiht – Dreanažikihi ülesandeks on eemaldada kasvupinnasest ülearune vesi. Enamasti on see kiht valmistatud kruusast, spetsiaalsest polümeervahu paneelist või kõrge poorsusega polümeersest matist.
- 5) Vee- ning juurekaitse kiht – Vee- ning juurekaitse kihi eesmärgiks on takistada juurte poolt tekkida võivat kahju aluskatusele. Kiht võib olla valmistatud membraanist, kuhu on lisatud keemilist ainet, mis takistab juurte läbitungimist või kasutatakse füüsilisi barjääre, mis koosnevad tavaliselt PVC, polüesterist või polüetüleenist.



Joonis 2. Traditsioonilise haljaskatuse kihid.

1.3. Haljaskatuste kasulikud omadused

Katusehaljastuse kasutamise tulemusena on täheldatud mitmeid kasulikke omadusi nii hoonele kui ümbritsevale keskkonnale. Järgnevalt on välja toodud haljaskatuste olulisemad mõjud:

- Haljaskatused aitavad vähendada ümbritseva keskkonna temperatuuri ehk “kuuma saare” efekti (linnas temperatuur kõrgem kui maal). Ümberkaudse õhutemperatuuri alanemine toimub peamiselt taime lehtede kaudu vee aurustumise tulemusena, mille tagajärjel võib ümberkaudsete alade õhutemperatuur alaneda kuni 3°C (Santamouris, 2014). Uuringutes on leitud, et murukatuste rajamise tulemusena väheneb 2 m kõrgusel olev maksimaalne õhutemperatuur kuni 0,86°C, ning päevane keskmine temperatuur 0,55°C (Savio et al., 2006). Gill jt (2007) poolt läbi viidud uuringu tulemusena leiti, et suurendades Manchesteris olevate rohealade suurust 10% võrra, saab linnas vältida 4°C suurust keskmise temperatuuri kasvu järgneva 80 aasta jooksul (Gill et al., 2007).
- Haljaskatustel on positiivne mõju ka vihmavee kinnipidamisele, aidates reguleerida vihmavee äravoolu ning vähendades maksimaalset hetkelist äravoolu. Vihmasadude korral, kus sademete hulk jääb alla 20 mm, on leitud, et murukatused suudavad endasse siduda kuni 85% neile langevast sademetehulgast. 20 – 40 mm sademete korral oli murukatuse omastusvõime 48% ning üle 40 mm sademete korral oli see langenud 32%. Maksimaalsest veekogusest suutis murukatuse endasse siduda 20 mm sademete korral 89%, 20 – 40 mm sademete korral 62% ning üle 40 mm korral 51%. Murukatuse omastusvõime väheneb ka saju kestvuse pikenedes. Vihmade korral, mis kestsid vähem kui 10 tundi, oli murukatuse omastusvõime 85%, 10 – 20 tunniste sadude korral 66%, ning üle 20 tunniste sadude korral 43%. Vihmavee äravoolu hulka mõjutab oluliselt murukatuse taimestatus, ehk mida taimestatum on murukatuse, seda suurem on tema veekinnipidamise võime (Beecham et al., 2015). Võrreldes tavakatusega on taimestatud katuse vihmavee omastusvõime 82,8% suurem (VanWoert et al., 2005). Maksimaalne äravool on rikkumata taimestikuga haljaskatusel 57% ning ekstensiivsel haljaskatusel 71,7% väiksem tavakatusel olevast äravoolust. Samuti on leitud, et kõige väiksem mõju pinnaäravoolule on lühikese taimkattega murukatustel (Mickovski et al., 2013; Gregoire & Clausen, 2011; Berghage et al., 2009).

- Haljaskatused aitavad vähendada hoone energiakulu. Rohekatuseid saab kasutada hoonete energiatarbe vähendamiseks nii soojas kui külmas kliimas. Soojusisolatsiooni efekt on saavutatud juba 10 cm paksuse kasvupinnasega (Jim & Tsang, 2011). Murukatuse abiga on vähendatud hoone soojusisolatsiooni vajadust suvel 70 – 90% ning talviti väheneb soojuskadu murukatusega hoonel 20 – 30% (Liu & Minor, 2005). Oluline tegur, mis mõjutab katusehaljastuse soojusisolatsiooni efektiivsust, on hoone kvaliteet. Kvaliteetsema hoone korral on murukatusest tulenev kasu märgatavalt väiksem kui mitte kvaliteetse ehitise korral (Jaffal et al., 2012). Päikesepaistelisel päeval väheneb murukatusega hoone jahutamise vajadus 0,9 kWh m⁻² ning pilvisel 0,57 kWh m⁻² (Jim & Tsang, 2011). Samuti on leitud, et jahutusefekti mõjutab oluliselt ka murukatuse kasvupinnase niiskus. Olivieri jt (2013) poolt läbiviidud uuringus leiti, et mida niiskem on murukatus, seda efektiivsem on tema jahutusefekt. Murukatuse suvise jahutamiseefektiivsuse tõstmise üheks võimaluseks on suurendada taime lehe pinna indeksit (LAI), mille tagajärjel saab veel enam ruumide jahutamisevajadust vähendada (Olivieri et al., 2013).
- Pärast haljaskatuste rajamist on hoonete ruumides täheldatud olulist müra vähenemist. Viimastes uuringutes on suurt rõhku pööratud müra vähenemise efektiivsusele erinevatel katusetüüpidel. Uuringus, kus kasutati kahte murukatust (paksusega 75 mm ja 150 mm) ja ühte võrdluskatust, leiti, et õhema murukatuse korral ei olnud müra isolatsioon ühtlane, vaid tulemused olid kõikumad. Paksem murukatus suutis vähendada müra isolatsiooni 8 dB madala sageduse müra korral (50 – 2000 Hz) ning 6 dB kõrge sagedusega müra korral (Connelly & Hodgson, 2011). Mürataseme vähenemise peamiseks põhjuseks arvati olevat taimestiku ning kasvukihi kõrge absorptsiooni koefitsient. Suuremat müra isolatsiooni mõju on täheldatud madalamate hoonete korral, sest sellisel juhul on taimestik otseselt avatud müra välja (Yang et al., 2012; Connelly & Hodgson, 2011). Alates 20 cm kasvukihipaksusest ei ole hoone ruumides leitud olulist mürataseme langemist (Renterghem & Botteldooren, 2008).
- Haljaskatuseid on tihti peetud üheks võimaluseks linnakeskkonna õhusaastet vähendada. VanWoerti jt (2005) poolt läbiviidud uuringus leiti, et Chicago ja Detroiti linna 109 ha suurune murukatuse ala rajamine vähendaks linnade õhusaastet 7,87 t/a (VanWoert et al., 2005). Tan

ja Sia poolt läbiviidud uuringus leiti, et peale murukatuste ehitamist vähenes õhusaastatus 37% võrra (Tan & Sia, 2005).

- Lisaks eelnevale pakuvad haljaskatused linnakeskkonnas lisaelupaikasid erinevatele taime-, looma- ja putukaliikidele, ning lisavad linnapildile esteetilist väärtust (Theodosiou, 2009).

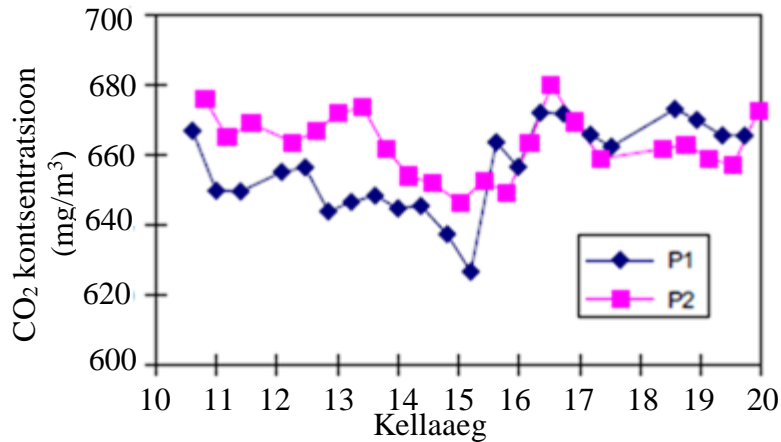
2. Maailmas läbiviidud tööd

2.1. Kasvuhoonegaaside mõõtmised haljaskatustel

Kasvuhoonegaaside mõõtmisi haljaskatustel on maailmas läbiviidud väga vähe. Läbiviidud uuringud käsitlevad kolmest kasvuhoonegaasist ainult CO₂, jättes kõrvale CH₄ ning N₂O. Seega on käesolevas peatükis välja toodud ainult maailmas läbiviidud haljaskatuste CO₂ uuringud.

Li jt (2010) poolt läbi viidud uuringus uuriti CO₂ kontsentratsiooni ning murukatuse omavahelist seost. Katse raames rajati 6-korruselise hoone katusele murukas, kus seejärel mõõdeti (mõõteseadmena kasutati LI-7500) kahest punktist päevast CO₂ kontsentratsiooni. Üks mõõtepunkt asus murupinnast eemal 2 meetri kaugusel ning teine murukatusel. Katses leiti, et päiksesepaistelisel ning tuulevaiksel päeval (kuni kella 16, mil ümbritsevad hooned hakkavad varjutama murukatust) on CO₂ kontsentratsioon tavakatusel keskmiselt 12,9 mg/m³ võrra suurem võrreldes murukattega (joonis 3). Pärast kella 16 oli CO₂ kontsentratsioon murukatuse kohal keskmiselt 4,9 mg/m³ suurem tavakatuse omast. CO₂ kontsentratsiooni kõikumine kahe mõõtekoha vahel on tingitud taimede elutegevusest (päeval kasutavad taimed CO₂ fotosünteesiks ning öösel emiteerivad CO₂ hingamise tagajärjel). Fotosünteesi efektiivsus sõltub suuresti taimede peale langeva valguse intensiivsusest. Päeval, mil valguse intensiivsus on väga suur, omastavad taimed CO₂. Öösel, mil valgusintensiivsus on väike, aeglustub fotosünteesi protsess, ning ülekaalu saavutab hingamine, mille tulemusena hakkab keskkonda emiteerima CO₂. Oluliseks CO₂ kontsentratsiooni mõjutavaks teguriks on tuule kiirus. Tuulevaikse ilma korral saavutab murukatuse ümber olev keskkond O₂ küllastatuse, sest fotosünteesi tulemusena kasutatakse ära ümbritsevast keskkonnast CO₂. Probleem on ka tugeva tuule korral, mil taimedel on raskusi CO₂ efektiivse omastamisega kiiresti liikuvast õhuvoolust. Parimaid tingimusi CO₂ vähendamiseks pakub nõrk tuul, millega puhutakse ära fotosünteesi tagajärjel tekkiv O₂ ning asemele tuuakse uut

CO₂ rikast õhku. Uuringu tulemuste alusel koostatud simulatsioonis leiti, et murukatus võib päikeselisel päeval vähendada ümbritseva keskkonna CO₂ kontsentratsiooni kuni 2% (Li et al., 2010).



Joonis 3. Haljaskatuse (P1) ja võrdluskatuse (P2) kohal oleva CO₂ kontsentratsioon päikesepaistelisel madala tuule kiirusega päeva (Li et al., 2010).

Malaisias läbiviidud katses uuriti *Ipomoea pes-caprae* (perekond lehtertapp) CO₂ omastamist. Ühekorruselise elamu katusele viidi *Ipomoea pes-caprae* taimed, mis olid istutatud 102 potti. CO₂ omastamise mõõtmised viidi läbi kahel korral aastas, aprillis ning juulis. Katse tulemusena leiti, et ühe päeva keskmine CO₂ omastamise kiirus oli juulikuus 7,503 μmol CO₂ m⁻²s⁻¹ ning aprillikuus 4,6845 μmol CO₂ m⁻²s⁻¹. Kahe kuu tulemuste vaheline erinevus oli tingitud ilmastiku erinevustest. Juuli on Malaisias vihmane ning soojem kui aprill. Aasta keskmiseks CO₂ omastamise kiiruseks arvutati/saadi 6,09 μmol CO₂ m⁻²s⁻¹. Ühe taime CO₂ omastamiskoguseks leiti aastas 0,048 t CO₂/a (Ismail et al., 2012).

2.2. Temperatuuri mõõtmised haljaskatustel

Haljaskatustel on oluline mõju nii katusepinna- kui ka hoonesisesele temperatuurile. Murukatuste albeedo jääb vahemikku 0,2 – 0,3, mis on suurem kui näiteks bituumenkatustel (0,1 – 0,2).

Murukatused seovad fotosünteesi tulemusena 60% neile langevast päikesekiirgusest ning peegeldavad umbes 20 – 30% pealangevast päikesekiirgusest. Ülejäänud 20% antakse soojusena edasi kasvusubstraadile (Berardi et al., 2014).

Gagliano jt (2014) poolt läbi viidud simulatsioonis uuriti murukatuse ja tavakatuse temperatuuri ööpäevast käiku. Uuringus leiti, et tavakatuse pealne osa saavutab oma maksimaalse temperatuuri kell 13.00, mil temperatuur jõudis 45°C. Tavakatuse sisepind jõudis oma maksimaalse temperatuurini õhtul kell 19.00, kui temperatuuriks mõõdeti 33°C. Murukatusega hoone puhul olid katuse temperatuurid oluliselt madalamad. Murukatuse väliskiit saavutas oma maksimaalse temperatuuri kell 14.00, mil temperatuuriks mõõdeti 33,5°C, mis on tavakatustest 12°C madalam. Murukatuse sisepinna temperatuur kõikus vahemikus 26 – 26,3°C ning saavutas oma haripunkti kella 22.00-ks, samas kui tavakatusel kõikus sisepinna temperatuur 7°C vahemikus (Gagliano et al., 2014).

Prantsusmaal läbiviidud murukatuse temperatuuri mõõtmiste uuringus võrreldi kolme erineva taimestikuga murukatust ja võrdluskatust. Uuringu käigus tõusis maksimaalne õhutemperatuur 28,7°C. Võrdluskatusel mõõdeti maksimaalseks temperatuuriks 73,5°C. Uuringus selgus, et olenemata murukatuste taimestikust, jäi kasvupinna maksimaalne temperatuur märgatavalt madalamaks, keskmiselt 34,8°C juurde (Morau et al., 2014).

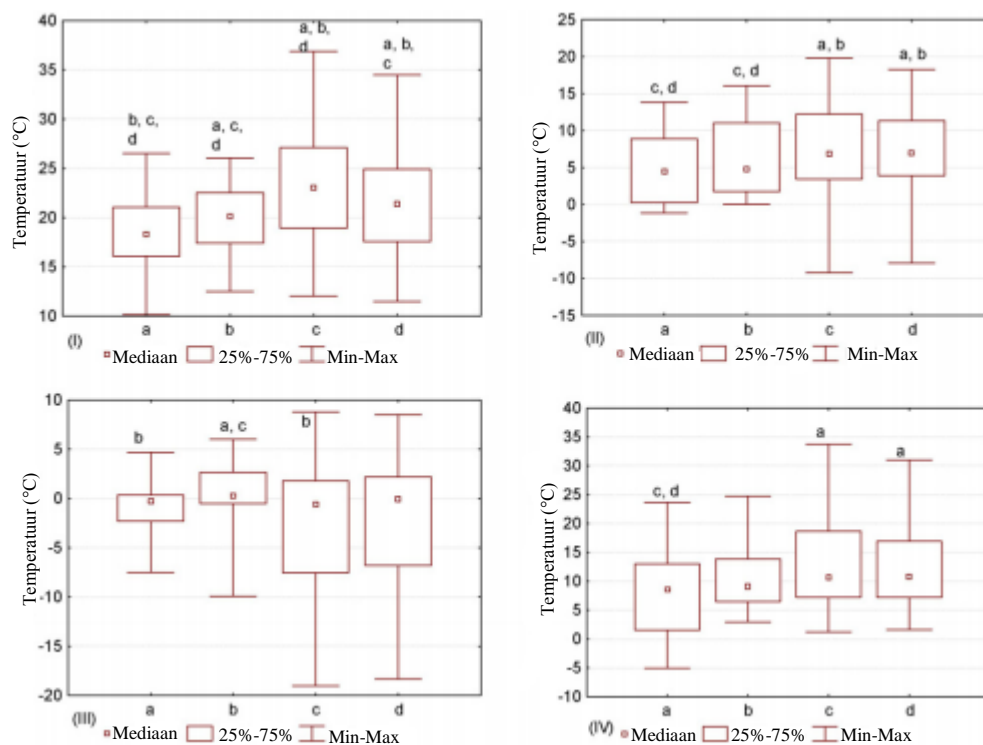
Teemuski ja Manderi poolt läbi viidud uuringus võrreldi 4 erineva katusetüübi (kergmurukatuse, mätaskatuse, SBS-kattega katuse ja teraskatuse) aastaringset temperatuurikäiku (joonis 4). Suvetingimustes on aluskatuse temperatuurid keskmiselt kõige madalamad kergmurukatusel. Suveperioodil oli mätaskatusel keskmine temperatuur küll mõne kraadi võrra kõrgem, kuid temperatuuri amplituud oli väiksem. Kõige kõrgem keskmine temperatuur oli SBS-kattega võrdluskatusel, millel täheldati ka kõige suuremat temperatuuri kõikumist (Teemusk & Mander, 2010).

Sügisperioodil olid haljaskatused keskmiselt madalamate temperatuuridega kui võrdluskatused. Keskmiselt kõige madalamad ja kõige kõrgemad temperatuurid mõõdeti vastavalt kergmurukatustel ning SBS katusel. Haljaskatuste korral oli näha ka väga minimaalset ööpäevast temperatuuri kõikumist. Vaatlusperioodil ei langenud temperatuur haljaskatustel kordagi alla 0°C. Võrdluskatuste korral oli märgata kõrgemaid päevaseid ning madalamaid öiseid temperatuure (temp alla 0°C) (Teemusk & Mander, 2010).

Talvetingimustes olid murukatused keskmiselt märgatavalt soojemad kui võrdluskatused. Keskmine temperatuur kergmurukatusel oli -1,1°C ning mätaskatusel -0,1°C. Võrdluskatustest oli

SBS katusel keskmine temperatuur $-2,6^{\circ}\text{C}$ ning teraskatusel $-3,1^{\circ}\text{C}$. Võrdluskatustel oli talveperioodil märgata ka väga suurt temperatuuri kõikumist. Märkimisväärne on fakt, et haljaskatustel ei langenud temperatuur alla -10°C , samas kui võrdluskatustel võis temperatuur langeda alla -20°C (Teemusk & Mander, 2010).

Kevadel jäid haljaskatustel keskmised temperatuurid võrreldes võrdluskatustega madalamaks. Haljaskatustest oli keskmiselt madalama temperatuuriga kergmurukatus, samuti oli näha, et kergmurukatustel on temperatuuri kõikumine märgatavalt suurem kui mätaskatusel (Teemusk & Mander, 2010).

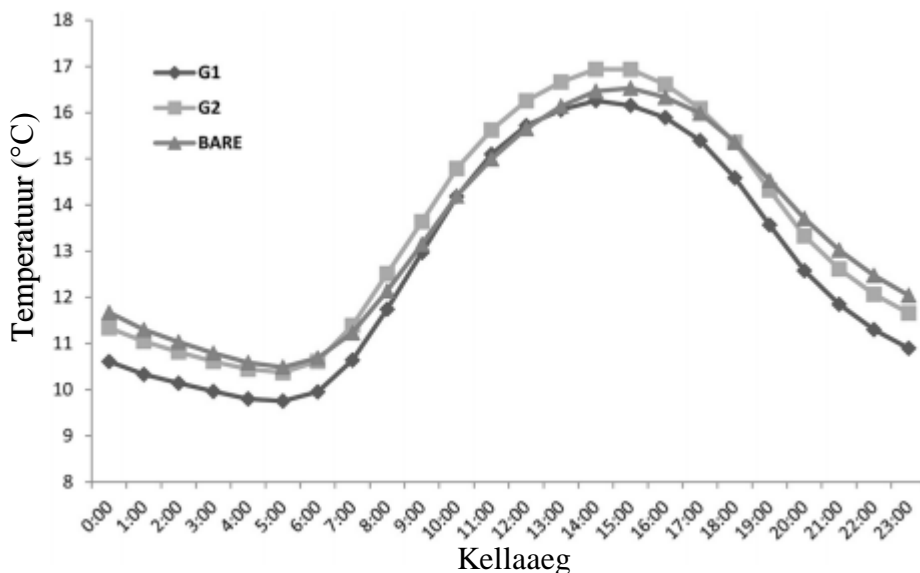


Joonis 4. Mediaan, 25- ja 75-protsentiilid ning minimaalsed ja maksimaalsed keskmised temperatuurid neljal võrdluskatusel (a – kergmurukatus (100 mm), b – mätaskatus (150 mm), c – SBS-kattega võrdluskatus, d – terasest katusekate) neljal erineval aastaajal (suvi (I), sügis (II), talv (III) ja kevad (IV)) (Teemusk & Mander, 2010).

Michigani ülikooli linnakus läbiviidud katses uuriti murukatuse ja kruusakatuse temperatuuri käiku ajavahemikus 1. september 2005 – 31. august 2006. Suvised isolatsioonikihi pealt mõõdetud temperatuurid erinesid üksteisest oluliselt. Maksimaalseks mõõdetud temperatuuride erinevuseks oli 20 kraadi. Mõlema katusetüübi mõõdetud temperatuurid olid nii kevadel kui ka sügisel sarnased. Uuringu tulemusena järeldati, et murukatused pakuvad kruusaga kaetud katustest

paremat kaitset ekstreemsemate temperatuuride eest. Peamiseks erinevuse põhjuseks peeti pinnases oleva vee kogust, päikesekiirgust, välist temperatuuri ja lund (Getter & Rowe, 2006). Soojusvoo suurusjärku aitavad vähendada ka taimede lehestiku varjutusefekt, kasvupinnase poolt tekitatud isolatsioonikiht ning aurumisest tulenev jahtumine (Jim & Tsang, 2011, Getter & Rowe, 2006).

Inglismaal, Manchesteris, koostati kolmeosaline katsekatus, mille rajamise eesmärgiks oli uurida kahe murukatuse ning võrdluskatuse kohal oleva õhutemperatuuri käitumist (joonis 5). Uuringus leiti, et võrreldes tavakattega katusega vähendab intensiivne murukatus kuu keskmist temperatuuri 300 mm kõrgusel kuni 1,06°C. Suuremat jahutusefekt oli märgata öösi, mil temperatuuride keskmiseks erinevuseks oli 1,58°C. Maksimaalne temperatuuride erinevus leidis aset kella 21.00 – 22.00 paiku ning mille peamiseks põhjuseks arvati olevat pikalainelise kiirguse vabanemine (soojus, mis oli tavakatusesse akumulunud päeval) võrdluskatusest (Speak et al., 2013).



Joonis 5. Kolme võrdluskatuse (G1- terve murukatus, G2- kahjustatud murukatus, BARE- võrdluskatus) 300 mm kõrgusel oleva õhutemperatuuri keskmistatud ööpäevane käik ajavahemikus 28.03.2012 – 31.08.2012 (Speak et al., 2013).

2.3. Haljaskatustele sarnanevad looduslikud kooslused Eestis ning mujal

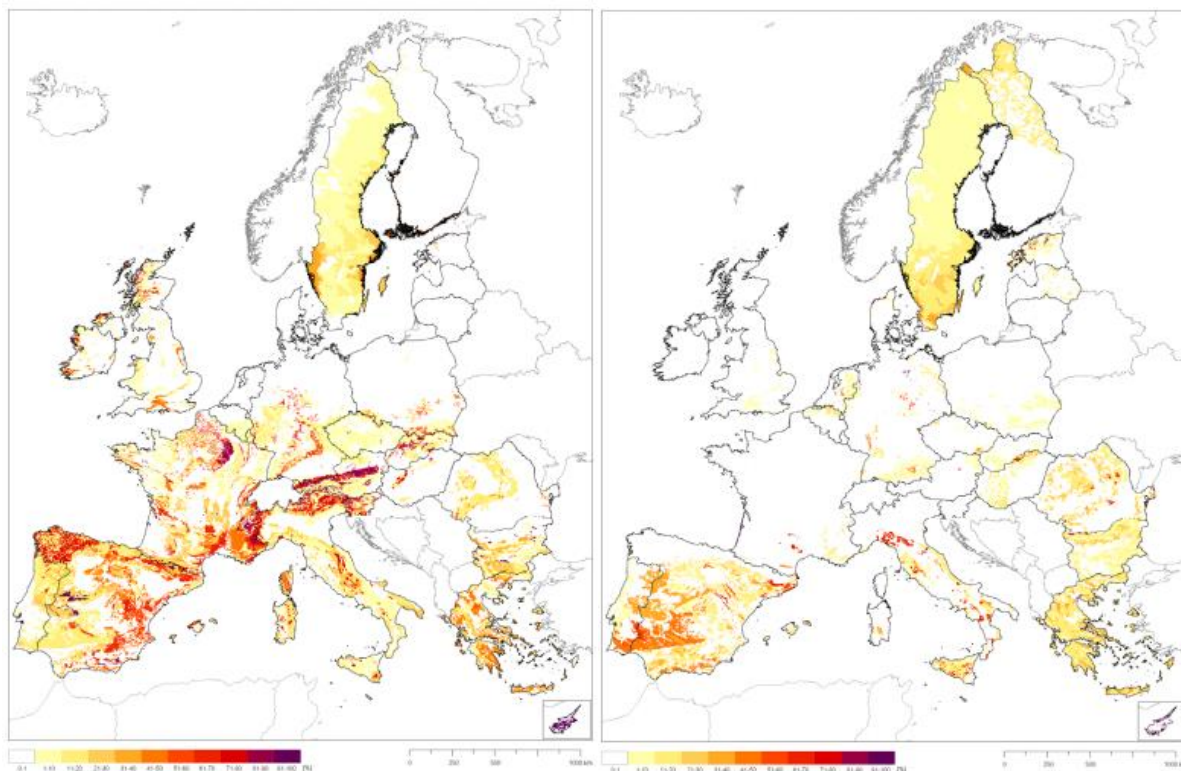
Haljaskatustele kõige sarnasemate tingimustega looduslikeks muldadeks Eestis on paepealsed mullad (3,9% Eesti territooriumist). Paepealsed mullad on levinud Harju ja Viru lavamaal, lavaja pinnaga aluspõhjalisel Pandivere kõrgustikul, Lääne- ja Loode-Eesti laugnõlvalistel kühmudel

ning paestel saartel (Saaremaa, Vormsi, Muhu, Vilsandi ja Pakri). Paetasandike pinnakatte paksust arvestades on paepelased mullad jagatud kolme gruppi (Arold, 2005):

- 1) Väga õhukese karbonaatse kattega paetasandikud (pinnakate alla 30 cm) – esinevad tugevasti kulutatud klindilähedastel aladel. Pinnakatteks on enamasti rähkne paemurend või lokaalne liivsavimoreen. Sisemaal esineb ainult kohati väikeste laikudena. Tüüpilisteks muldadeks on paepealsed e. loomullad (Kh', Kh'', Kh'g, Kh''g). Need on peenekivised lubja- ja huumusrikkad mullad, mille profiil koosneb ainult A- ja D-horisondist (harva ka C- või AC-horisont). Mullad on raske lõimisega, koosnedes keskmistest või rasketest liivsavidest. Muldadele on omane väga suur neutraalse huumuse sisaldus ja huumusevaru (150 – 270 t/ha), mis on tingitud suurest taimejuure tihedusest õhukeses mullakamaras ja paese maapõue tugevast mõjust. Väga õhukese pinnakattega huumuserikastel muldadel on kujunenud liigirikas, kuid madal rohustik ning neid nimetatakse loopealseteks. Neid iseloomustavad ekstreemsed äärmustemperatuurid ja temperatuuri suured ööpäevased kõikumised, sadevee valgumine paelõhedesse (õhuke mullakiht) ning mullakihi läbikuivamine.
- 2) Õhukese karbonaatse kattega paetasandikud (pinnakate 30 – 100 cm) – tüüpilisteks muldadeks on kohati tugevalt kivised koreserohked ja põuakartlikud või parasniisked rähkmullad (K', K'', K'''; K'g, K''g, K'''g), mis on kujunenud rähkmoreenil. Iseloomulikuks profiiliks on A-Bm-C. Mulla põhimassi moodustab valkjask või kollakashallist moreenist pärinevad teravaservalised rähased ning kruusafraktsioon. Kõige koreserohkemad mullad (20 – 50%). Levinumaks lõimiseks on rähken kerge liivsavi. Huumusesisaldus on looduslikes arengus rähkmuldades 9 – 10%.
- 3) Õhukese mittekarbonaatse kattega pinnakate (30 – 100 cm) – pärast jääaega mere alt vabanenud paese aluspõhjaga Põhja- ja Lääne-Eesti aladel esineb mõnes kohas liivakattega paetasandikke.

Euroopa muldadest sarnaneb haljaskatustele kaks mullagruppi, milleks on *Leptosolid* ja *Regosolid*. *Leptosolid* on üks neljast peamisest Euroopa mullagrupist (joonis 6), kattes üle 10% kogu Euroopa pindalast (levinumad Vahemeremaades). *Leptosolid* koosnevad omakorda kuuest erinevast

allrühmast, milleks on *Calcaric* (LPca)-, *Rendzic* (LPRz)-, *Dystric* (LPdy)-, *Eutric* (LPeu)-, *Haplic* (LPha)- ja *Lithic Leptosol* (LPli). *Leptosolid* on oma iseloomult õhukesed mullad, mis asuvad kõval aluskivimil ning sisaldavad suures koguses korest või karbonaadirikast materjali. Õhukese mullakihi tõttu on *Leptosolidel* vähe mullahorisonte ning on hea veejuhtivusega. *Leptosome*, mis asuvad paekivil, kutsutakse rendsiinadeks, millel hulka kuuluvad ka Eesti paepealsed mullad (Tóth et al., 2008).



Joonis 6. *Leptosolide* (vasakul) ja *Regosolide* (paremal) levik Euroopas (Tóth et al., 2008).

Teiseks haljaskatustele sarnaseks mullagrupiks on *Regosolid* (joonis 6), mis on levinud 220 000 km² suurusel alal Euroopas. *Regosolide* grupp koosneb neljast alagrupist, millest murukatusete kõige sarnasem on *Calcaric Regosolid* (RGca), lisaks eelnevale kuulub sellesse gruppi veel *Dystric Regosol* (RGdy), *Eutric Regosol* (RGeu) ja *Haplic Regosol* (RGha). *Regosolid* on väga halvasti väljaarenenud mineraalmullad, millel puudub enamik mullahorisonte. Laialdaselt on need levinud erosioonitundlikel aladel. Peamisteks mulla arengut takistavateks teguriteks on madal mulla temperatuur ning pikaajaline kuivaperiood (Tóth et al., 2008).

3. Metoodika ja materjal

3.1. Uuritavate haljaskatuste ning võrdlusala kirjeldus

Kasvuhoonegaaside voogude mõõtmised viidi läbi Tallinnas ja Tartus. Mõlemas kohas asus kaks mõõdeala, milleks Tartus olid aadressil Ujula 2a paikneva Konsumi katusel olev murukatus ja SA Archimedese kergmurukatus ning Tallinnas Tallinna Loomaiaia mätaskatus ja Naagel looduslikul paepealsel mullal asuv võrdlusala.

3.1.1. Archimedese kergmurukatus

Archimedese lame kergmurukatus (vt. lisa 1) asub Tartu kesklinnas ($58^{\circ} 22' 40''$ N, $26^{\circ} 44' 07''$ E) Turusilla vahetus läheduses Emajõe ääres. Murukatus rajati 2003. aasta maikuuks. Murukatuse mõõdeteks (ilma ääristeta) on 16,7 m x 3,8 m ning pindalaks 60,3 m². Katuse kõrgus maapinnast on umbes 4,5 m. Kergmurukatuse aluskatuseks on bituumenkate, mis on rajatud väikese kaldega. Haljastuse rajamisel kaeti aluskatuse pind kergkruusaga, mille tulemusena kaotati aluskatuse esialgne kalle. Archimedese kergmurukatusel puudub juuretõke ning katuse kalde kaotamiseks kasutatud kergkruusa peal asub mügaraline plastmaterjalist dreanaažikiht, paksusega 0,8 cm. Dreanaažikiht on kaetud omakorda kahe erineva kivivilla sordiga, millest alumine 3 cm on kõva ning ülemine 5 cm pehme kivivill. Substraadikihi paksuseks on 10 cm ning see koosneb kuiva aine massiprotsendi järgi 66% ulatuses kergkruusast (fraktsioon 4 – 20 mm 66%, fraktsioon 2 – 4 mm 22%, fraktsioon 0 – 2 mm 12%). Ülejäänud osa katuse substraadist moodustab huumus (30%) ning savi (4%). Selleks, et katusel oleks võimalik vajadusel käia, on ehitatud substraadikihi sisse puitvõrestik (hetkel praktiliselt lagunenu). Katuse valmides külvati murukatusele seemnesegu, mis sisaldas järgmisi taimi: harilik kukehari, nõmm-liivatee, kartusnia nelk, karvane kadakkaer, kuumaasikas, kalju-kilbirohi, arendsi kivirik, nurmnelk, mets-lõosilm, aed-lõosilm, keskmine värihein, nõeljas kesakann. Haljaskatus oli mõõtmiste aastal taimestikuga kaetud 70% ulatuses. Taimestik oli lopsakam ning liigirikkam haljaskatuse äärtes ning katuse keskel taimestik puudus või esines üksikud hõreda taimestikuga alad (peamiselt puhmastena).

3.1.2. Ujula 2a murukatus

Ujula 2a (edaspidi Ujula) kerge intensiivsusega lame murukatus (vt. lisa 2) asub Tartus Emajõe kaldal Ülejõe linnaosas, Sauna tänava, Ujula tänava ja Vene tänava vahel kesklinna vahetus läheduses (58° 23' 11" N, 26° 43' 26" E). Haljaskatus on rajatud 2007. aastal. Haljaskatuse pindalaks on ca 600 m² ning kõrgus maapinnast umbes 8 m. Haljaskatuse aluskatuseks, millele haljaskatus rajati, on betoon. Ehitusprojekti järgi asetseb aluskatuse peal hüdroisolatsioon, mis on juurestikukindel ning täiendavalt kaitstud kummimatiga. Hüdroisolatsiooni peal asetseb omakorda tuulutussoontega vahtpolüstürool, mis on kaetud geotekstiiliga, kergkruusast drenikihiga ning kasvupinnasega. Kasvupinnase paksuseks on 10 cm, mida omakorda saab jagada kaheks erinevaks kihiks. Alumise 5 cm kasvupinnasest moodustab savikasliiv ning ülemise 5 cm muld. Peamisteks taimeliikideks on aasnurmikas ja lamba-aruhein. Taimestik katab haljaskatuse pinnast 90%. Ülejäänud 10% moodustab kividest ehitatud kõnniteed ja graniitkillustikuga alad, mis on rajatud kohtadesse, kuhu päike ei paista ning taimede kasvamine on seeläbi raskendatud.

3.1.3. Tallinna Loomaaia mätaskatus

Uuritud mätaskatus (vt. lisa 3) asub Tallinnas (Tallinna Loomaaias) (59° 25' 00" N, 24° 39' 30" E) ning on rajatud 2003. aastal. Mätaskatuse alust hoonet kasutatakse suuremas jaos kitseliste tallina, teises pooles asub ka töötajate ruum. Mätaskatuse ühe katusepoole mõõtmeteks on 15 m x 4 m ning katuse kogupindala on 120 m². Erinevalt eelmisest kahest uuritavast haljaskatusest on mätaskatus viilkatus, kaldenurgaga 20°. Katuse kõrguseks maapinnast on umbes 4 m (räästast). Mätaskatuse aluskatuse katteks on bituumenkate, mille peal asub mügaraline plastmaterjalist dreanažikiht. Dreanažikihi peal on 15 cm paksune kasvupinnase- ja taimestiku kiht. Kasvukihi moodustas rähkne muld. Mätaskatus on siinkohal tinglik nimetus, sest taimestik on rajatud siirdmuru kasutades. Levinumateks taimeliikideks on erinevad kõrrelised (lamba-aruhein, punane aruhein jt) ning taimestiku katvus oli 90%.

3.1.4. Võrdlusala Naagel

Naage võrdlusala (vt lisa 4) asub Tallinna Loomaaia mätaskatusest 20 km kaugusel Naage külas (59° 24' 16" N, 24° 22' 23" E). Naage võrdlusala mullaliigiks on õhuke paepealne muld (Kh'')

ning mulla lõimiseks on keskmiselt koreseline, keskmine liivsavi, mis asub paekivil (r_2ls_2/p) (joonis 7). Mullaprofiil koosneb kahest horisondist: A ja D. Mullakihi keskmiseks paksuseks mõõdeti 12 cm. Mõõdeala läheduses asub vana militaarrajatis, mis on uuristatud paeastangusse. Alal kasvasid üksikud kadakad ning taimedest olid levinumad looniidu taimed (harilik ja valge kukehari (*Sedum acre* ja *S. album*), harilik koldrohi (*Anthyllis vulneraria*), kuldkann (*Helianthemum nummularium*) ja hobumadar (*Galium verum*)).



Joonis 7. Naage uurimisala mullastiku kaart. Mõõdekoht on tähistatud punase kolmnurgaga (Maa-ameti geoportaal).

3.2. Välitööde metoodika

3.2.1. Kasvuhoonegaaside voo mõõtmine pimekambri meetodiga

Kasvuhoonegaaside (CO₂, CH₄ ja N₂O) emissiooni mõõtmisi teostati pimekambri meetodil. Mõõtmised toimusid iga kahe nädala tagant ajavahemikus 2014. aasta aprill – 2015. aasta märts. Mõõtmised toimusid kahel järjestikusel päeval, millest ühel päeval toimusid mõõtmised Tallinna aladel ning teisel Tartu aladel. Põhimõtteks oli tagada kõigil neljal mõõtealal võimalikult sarnased ilmastikutingimused.

Kasvuhoonegaaside emissiooni mõõtmiseks kasutati valgeid 65,5-liitrise mahuga PVC-kambreid (kõrgus 50 cm, diameeter 50 cm), mis asetati õhukindlalt plastikringi peal olevasse sopistusse. Sopistus oli eelnevalt täidetud veega, mille abiga tagati kambri ning plastikringi ühenduskoha õhupidavus. Archimedese ja Loomaaia katustel olid plastikringid kogu uurimisperioodi jooksul statsionaarsed, samas Ujula ning Naage aladel asetati plastikringid enne iga mõõtmist uuesti pinnasesse (lumekatte ning külmunud pinnase korral asetati plastikringid lumme). Madalate õhutemperatuuride korral, kui vee kasutamine kambri õhutiheduse tagamiseks oli raskendatud, kasutati õhutiheduse saavutamiseks kummitihendeid. Kummitihendeid kasutati aastaringselt Loomaaia mätaskatusel, sest katuse kallaku tõttu polnud seal võimalik vett kambri õhutiheduse saavutamiseks kasutada.

Proovide kogumine teostati igal uurimisalal kolmes korduses (kolm kambrit iga mõõteala kohta) ning gaasiproovid koguti 100 ml suurustesse eelvakumeeritud (6,0⁻² mbar) klaaspudelitesse. Kambrite omavaheliseks kauguseks valiti u 4 m. Proovide võtmine toimus ühe tunni jooksul iga 20 minuti tagant. Ühest kambrit saadi seega kokku neli proovi: 0, 20, 40 ja 60 minuti proov. Nullproov võeti kohe peale kambri paigaldamist plastikrõngale.

CO₂, CH₄ ja N₂O sisaldus proovides määrati elektron-detektori (ECD) ja leek-ionisatsiooni detektoriga (FID) varustatud gaas-kromatograafi (Shimadzu GC-2014) abil Tartu Ülikooli Geograafia osakonna laboris. Gaasivoo intensiivsus arvutati gaasikontsentratsiooni lineaarse muutuse alusel võttes arvesse pimekambri ruumala ja kambriga kaetud pindala (Mander et al., 2003).

3.2.2. Keskkonnaparameetrite mõõtmiste metoodikad

Kasvuhoonegaaside emissiooni mõõtmistele lisaks mõõdeti igalt uurimisalalt kasvusubstraadi- ning õhutemperatuuri. Statsionaarsed andurid olid paigaldatud Archimedese, Loomaaia ja Ujula haljaskatusele. Naage alal mõõdeti temperatuure samaaegselt kasvuhoonegaaside emissiooni mõõtmisega. Temperatuure mõõdeti neljast erinevast punktist: 1 m kõrgusel mõõdeala kohal olevat õhutemperatuuri, katuse pinnatemperatuuri, 5 cm sügavusel olevat temperatuuri ning murukatuse kasvupinnase all (sisuliselt aluskatusel, Naagel seega aluskivimil) olevat temperatuuri. Kasvupinnase- ja õhutemperatuurid registreeriti haljaskatustel iga 15 minuti tagant. Temperatuuri mõõtmiseks kasutati Cometi logerit R0141 Evikoni MCI Pt1000TG8/E sensoriga. Mõõtmisi alustati Tartu aladel 1. jaanuaril 2014 ning Tallinna Loomaaias 14. aprillil 2014. Naagel tehti esimene temperatuuri mõõtmine 28. aprillil. Kõigil uurimisaladel lõppesid temperatuuri mõõtmised 1. aprill 2015.

Mullaniiskuse mõõtmised viidi läbi ProCheck niiskusemõõturiga. Niiskuse mõõtmised algasid kõigil aladel juulist ning kestsid kuni alade külmumiseni (v.a. 15.09.2014 kui mõõtmisi ei toimunud Tallinna aladel) ning jätkusid uurimisalade kasvupinnase sulamisel (vt. lisa 5). Viimane kasvupinnase niiskusesisalduse mõõtmine toimus 17. märts 2015. Mõõtmised toimusid gaasimõõtmiste ajal 5 cm sügavuselt, iga kambri kahelt vastasküljelt.

Sademetede andmed uurimisperioodi kohta saadi Archimedese ja Ujula haljaskatustele Tartu Tõravere meteoroloogiajaamast ning Tallinna Loomaaia ja Naage uurimisaladele Tallinn-Harku Aeroloogiajaamast (vt. lisa 6).

3.2.3. Uurimisalade maapealne ja maa-alune biomass ning kasvupinnas

Uurimisaladelt koguti 2014. aasta oktoobris kasvupinnase proovid (kolm kordust igalt alalt), mis viidi seejärel OÜ Keskkonnauuringute Keskuse Tartu filiaali laborisse, et selgitada välja mõõdealade pinnase keemiline koostis. Kogutud proovidest lasti määrata kasvupinnase kuivainekaal, üldlämmastik ($N_{\text{üld}}$), orgaanilise aine sisaldus, fosfori (P), kaadmiumi (Cd), kaaliumi (K), kaltsiumi (Ca), magneesiumi (Mg), plii (Pb), tsingi (Zn), väävli (S) ja üldsüsiniku ($C_{\text{üld}}$) sisaldus.

Lisaks koguti oktoobris ka igalt katsealalt taimestiku maapealse ning maa-aluse biomassi proovid. Maapealne biomass koguti 30 x 30 cm suurustest ruutudest (kolm kordust igalt alalt). Peale ruudustiku mahamärkimist lõigati kääridega kogu ruudu sees olev taimestik maapinna lähedalt maha ning koguti kokku. Maa-aluse biomassi proovid koguti 4 cm diameetrise puuriga. Igalt katsealalt võeti kokku üheksa kordust, mida seejärel pesti veega selleks, et eemaldada taimede juured kasvusubstraadist. Juurte väljapesemiseks kasutati 0,2 mm sõela. Maa-alusest osast eemaldati lisaks kasvusubstraadile ka vetikad. Peale proovide töötlemist määrati nii maapealse kui ka maa-aluse taimse massi toakuiv kaal. Kaalutud proovid asetati seejärel kuivama termokappi (Gallenkamp Sanyo OMT) 70°C juurde. Peale kogutud biomassi proovide kuivatamist määrati nende absoluutkuiv kaal. Maapealse taimemassi kaalumiseks kasutati Kern GS 6200-1 kaalu (mõõtetäpsus 0,1 g) ning maa-alused juureproovid kaaluti KERN PLS 510-3 kaaluga (mõõtetäpsus 0,001 g). Iga mõõdeala kohta koostati kolmest maapealsest biomassi proovist ala kõige paremini iseloomustav keskmistatud proov, mis purustati kannmiksriga. Maa-aluse taimse massi üheksa proovi segati kokku ning saadeti koos maapealsete proovidega Keskkonnauuringute Keskuse laborisse edasiseks analüüsiks. Proovidest lasti määrata üldlämmastiku ($N_{\text{üld}}$), fosfori (P), väevli (S), kaaliumi (K), kaltsiumi (Ca) ja üldsüsiniku ($C_{\text{üld}}$) sisaldused.

3.2.4. Statistiline analüüs

Andmed analüüsiti kahes programmis, milleks olid MS Excel ning Statistica 7.1. Esmane kasvuhoonegaaside andmetöötlus toimus MS Excelis, kus vaadeldi ühest kambrist mõõdetud kasvuhoonegaasi determinatsioonikordajat (R^2). Olulisuse nivooks valiti esmasel gaaside töötlusel $\alpha = 0,05$ CO₂ korral ning $\alpha = 0,1$ N₂O ja CH₄ korral. Juhul kui kasvuhoonegaasi tulemus oli väiksem temale määratud olulisuse nivoost, vaadati ka SLOPE tegurit.

Muutujate normaaljaotuse kontrollimiseks kasutati kolme testi: Kolmogorov-Smirnovi, Lillieforsi ja Shapiro-Wilki testi, mille tulemusena selgus, et kasvuhoonegaaside emissioonid ei vastanud normaaljaotusele, mistõttu kasutati edasises andmetöötles mitteparameetrilisi meetodeid. Proovivõtukohtade vaheliste gaasiemissioonide erinevuste statistilise olulisuse hindamiseks kasutati Kruskal-Wallis ANOVA testi. Kasvuhoonegaaside emissiooni ja erinevate keskkonnategurite vaheliste seoste analüüsil rakendati Spearmani astakorrelatsiooni, olulisuse nivooga $\alpha = 0,05$.

4. Tulemused

4.1. Kasvuhoonegaaside vood

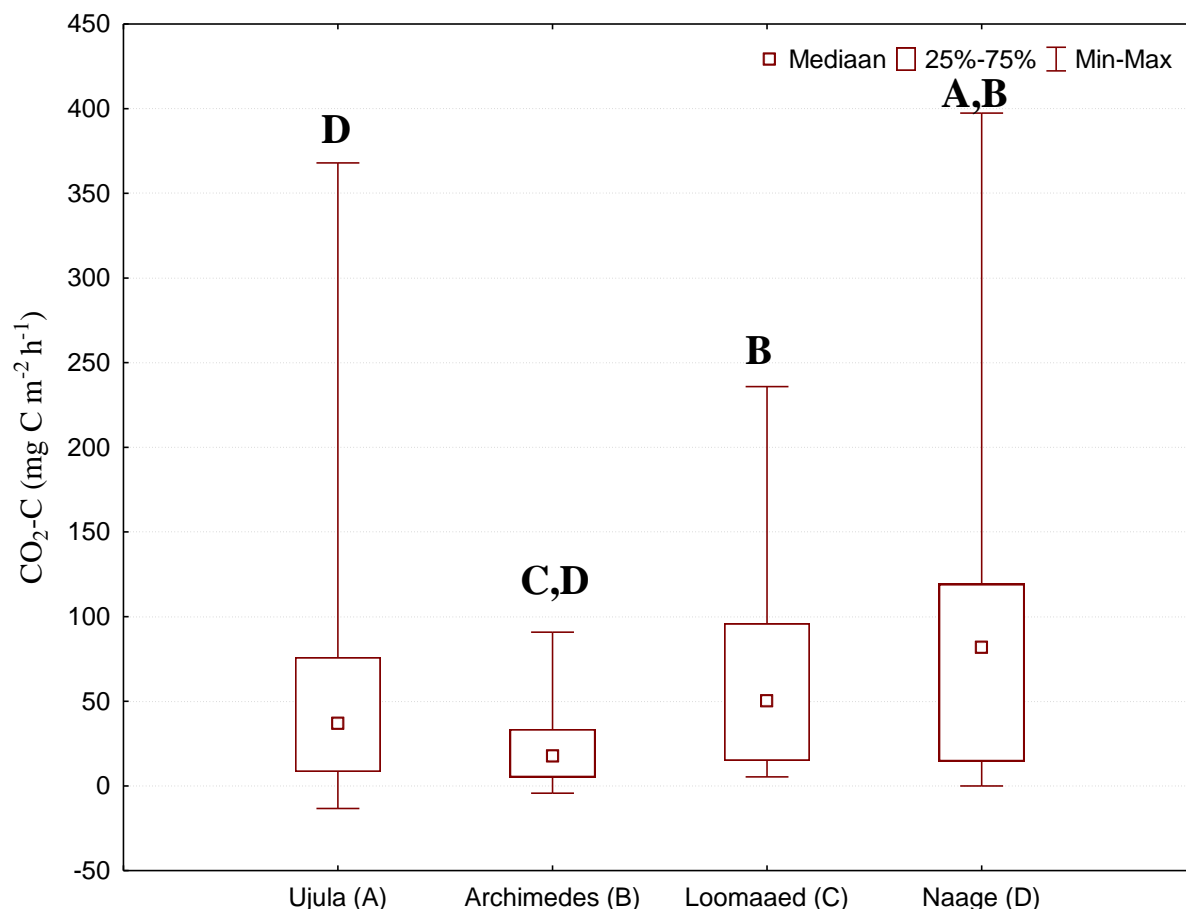
4.1.1. Uurimisalade ökosüsteemi CO₂-C vood

Uurimisperioodil varieerus keskmine süsihappegaasi emissioon uurimisaladel neljakordselt, olles Archimedese kergmurukatusel 24,5 mg C m⁻² h⁻¹ ning Naage looduslikul alal 94,7 mg C m⁻² h⁻¹.

Naage ala uurimisperioodi CO₂ voo mediaanväärtus oli 81,7 mg C m⁻² h⁻¹, mis ületas kahekordselt haljaskatuste voogusid. Mõõteperioodil oli kõrgeima mediaanväärtusega haljaskatuseks Loomaaia mätaskatus (50,2 mg C m⁻² h⁻¹). Neljast uurimisalast kõige väiksema CO₂ voo mediaanväärtusega oli Archimedese kergmurukatuse (17,7 mg C m⁻² h⁻¹) (joonis 8).

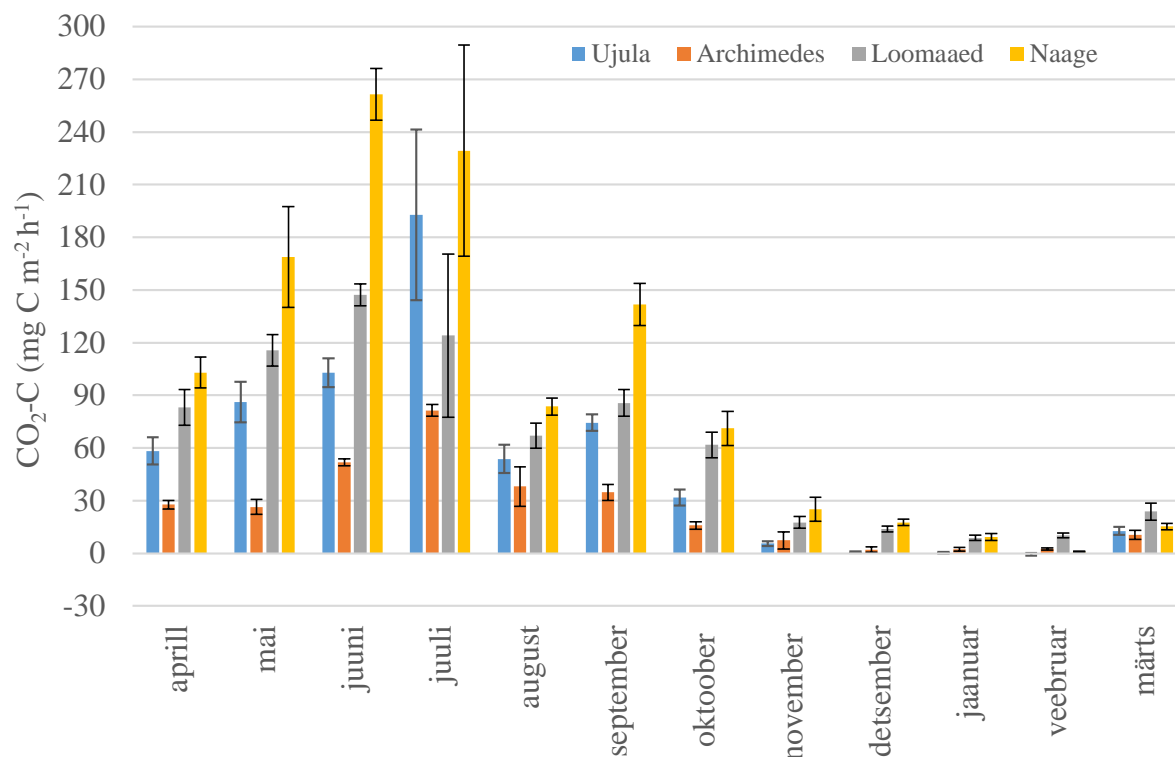
Uurimisalade maksimaalsete CO₂ voogude võrdlemisel (joonis 8) leiti, et suurimad ühekordsed CO₂ vood pärinevad Ujula haljaskatusest (368,0 mg C m⁻² h⁻¹) ja Naagelt (397,4 mg C m⁻² h⁻¹) ning väikseim Archimedese kergmurukatusest (90,8 mg C m⁻² h⁻¹). Väikseim CO₂ voo kõikumine uurimisperioodil oli Archimedese kergmurukatusel (95,1 mg C m⁻² h⁻¹) ning suurim Naage alal (397,3 mg C m⁻² h⁻¹). Samuti on jooniselt 8 näha, et Archimedese ning Ujula haljaskatustel registreeriti negatiivseid CO₂ voogusid ehk katused sidusid CO₂.

Kruskal-Wallis ANOVA testi põhjal erines Naage ala keskmine süsihappegaasi emissioon statistiliselt oluliselt Ujula ning Archimedese murukatuste emissioonidest, kuid mitte Loomaaia mätaskatuse emissioonidest. Haljaskatuste omavahelisel võrdlemisel selgus, et omavahel erinevad statistiliselt usaldusväärselt Archimedese kergmurukatuse ja Loomaaia mätaskatuse süsihappegaasi emissioonid (joonis 8).



Joonis 8. Süsihappegaasi voo mediaanväärtused, 25- ja 75-protsentiilid ning minimaalsed ja maksimaalsed väärtused uurimisaladel ajavahemikul aprill 2014 kuni märts 2015. Joonisel olevad tähed viitavad alade statistiliselt usaldusväärsele erinevusele CO₂ voogudes ($p < 0,05$) (selgitus: tähistus „C,D“ tähendab, et vastav väärtus erineb usaldusväärsest aladel C ja D mõõdetud väärtustest).

Joonisel 9 on välja toodud nelja mõõdeala kuu keskmised CO₂ emissioonid ajavahemikus 2014. aasta aprillist kuni 2015. aasta märtsini. Jooniselt on näha, et CO₂ emissioon oli kogu vegetatsiooniperioodi kõige suurem Naage alal ning madalaim Archimedese kergmurukatusel. Haljaskatustest oli uurimisperiodil kõige suurema CO₂ emissiooniga Loomaaia mätaskatus (v. a. juuli, kui Ujula murukatusel oli suurem keskmine CO₂ emissioon). Uurimisperiodi maksimaalsed kuu keskmised CO₂ emissioonid mõõdeti Tallinna aladel (Loomaaed ja Naage) juunis ning Tartu aladel (Archimedes ja Ujula) juulis. Antud jooniselt on näha ka, et Ujula murukatus toimis veebruaris süsihappegaasi sidujana ($-0,5 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).



Joonis 9. Uurimisalade kuu keskmised süsihappegaasi vood ($\text{mg C m}^{-2} \text{h}^{-1}$) koos keskmiste standardvigadega 2014. a aprillist kuni 2015. a märtsini.

Uurimisalade kuu keskmistest CO_2 voogudest (jooniselt 9) on näha aastaajalist sempoonsust. Aprillist juunini toimub kõikidel aladel ühtlane CO_2 emissiooni tõus, mille väärtused on kõrgeimad südasuvel. Augustis toimus kõigil neljal uurimisalal oluline CO_2 voo vähenemine. Alates septembrist algab CO_2 voo järk-järguline vähenemine ning mõõteperioodi madalaimad väärtused registreeriti uurimisaladel jaanuaris ning veebruaris.

Spearmani astakkorrelatsiooni kasutades analüüsiti CO_2 emissiooni ning aluskatuselt/aluskivimilt, 5 cm sügavuselt kasvukihist, murukatuse pinnalt ning katuselt mõõdetud õhutemperatuuri (1 m kõrgusel) omavahelist seost. Statistilise analüüsi tulemusena selgus, et kõigi nelja uurimisala puhul korreleerus tugevalt kasvukihi (aluskatus ja 5 cm) temperatuur ning CO_2 emissioon omavahel positiivselt (tabel 1). Tugevaim korrelatsioon leiti Archimedese kergmurukatuse CO_2 emissiooni ning aluskatuse temperatuuri vahel ($\rho = 0,91$) ning nõrgim Loomaaia mätaskatusel oleva CO_2 emissiooni ning aluskatuse ja 5 cm sügavusel oleva temperatuuri vahel ($\rho = 0,81$). Pinna temperatuur korreleerus CO_2 emissiooniga kõige paremini Ujula murukatusel ($\rho = 0,92$). Õhutemperatuuriga oli kõige tugevam korrelatsioon CO_2 emissiooniga Archimedese kergmurukatusel ($\rho = 0,87$).

Tabel 1. Spearmani astakorrelatsioon (ρ) CO₂ emissiooni ning aluskatuse pinna-, 5 cm sügavuse-, murukatuse pinna-, õhutemperatuuri ja niiskuse vahel ($p < 0,05$). Naagel mõõdeti aluskatuse temperatuur aluskivimilt. Tärniga on tähistatud tugev korrelatsioon.

	Ujula	Archimedes	Loomaaed	Naage
aluskatus	0,88*	0,91*	0,81*	0,83*
5 cm	0,89*	0,90*	0,81*	0,89*
pind	0,92*	0,87*	0,82*	puudus
õhk	0,80*	0,87*	0,79*	0,84*
niiskus	-0,50	-0,80*	-0,48	-0,88*

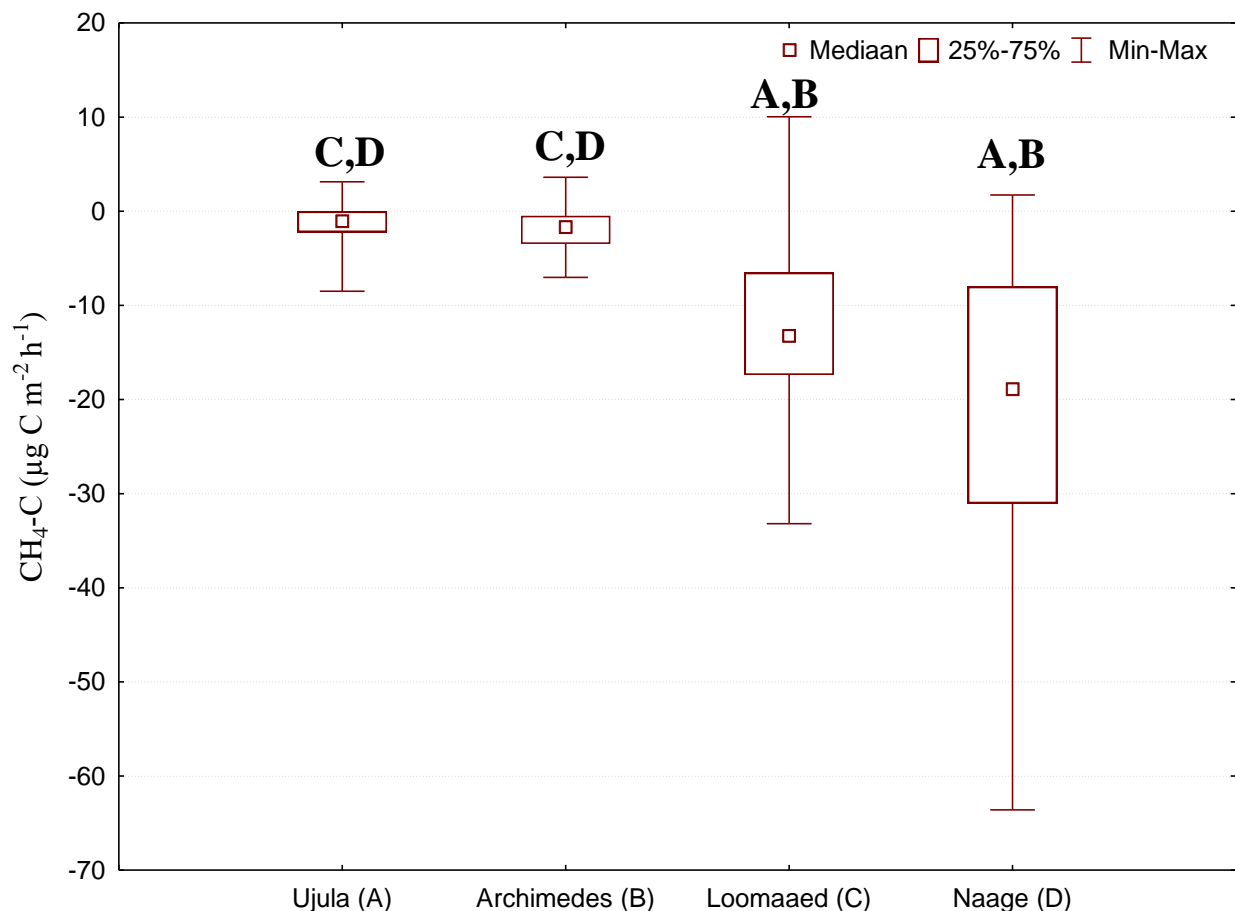
Spearmani astakorrelatsiooniga niiskuse ning CO₂ emissioonide (tabel 1) analüüsimisel selgus, et Archimedese ning Naage uurimisaladel oli kasvupinnase niiskus CO₂ emissiooniga negatiivses korrelatsioonis. Tugevaim korrelatsioon leiti Naage uurimisalalt mõõdetud kasvupinnase niiskuse ja CO₂ emissioonide vahel ($\rho = -0,88$). Ujula ning Loomaaia haljaskatustel tugevat korrelatsiooni CO₂ emissioonide ja kasvupinnase niiskuse vahel ei esinenud.

4.1.2. Uurimisalade CH₄-C vood

Uurimisaladel jäi keskmine metaani voog katseperioodil vahemikku $-1,3 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (Ujula) – $-22,2 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (Naage). Uurimisperioodil oli suurima keskmise metaani sidumisvõimega haljaskatuseks Loomaaia mätaskatus ($-12,2 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).

Kõrgeim aastane CH₄ mediaanväärtus (joonis 10) oli Naage alal ($-18,9 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ning võrreldes omavahel ainult haljaskatuseid oli neist suurima aastase mediaanväärtusega Loomaaia mätaskatus ($-13,3 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Väikseima CH₄ sidumise mediaanväärtusega oli kõikide uurimisalade hulgast Ujula murukatus ($-1,3 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).

Joonisel 10 on näha, et uurimisperioodil toimus suurim CH₄ sidumine Naage alal ($-63,6 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Haljaskatustest oli suurima CH₄ sidumisenäitajaga Loomaaia mätaskatus ($-33,2 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Väikseim maksimaalse CH₄ sidumisvõimega murukatus oli Archimedese kergmurukatus ($-7,0 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Lisaks CH₄ sidumisele esines mõõtealadel CH₄ emiteerimisele viitavaid mõõtetulemusi. Jooniselt on näha, et kõige suurem ühekordne CH₄ emiteerimine toimus Loomaaia mätaskatusel ($10,0 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Väikseim CH₄ voo kõikumine uurimisperioodil oli Archimedese kergmurukatusel ($10,6 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ning suurim Naage alal ($65,3 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).

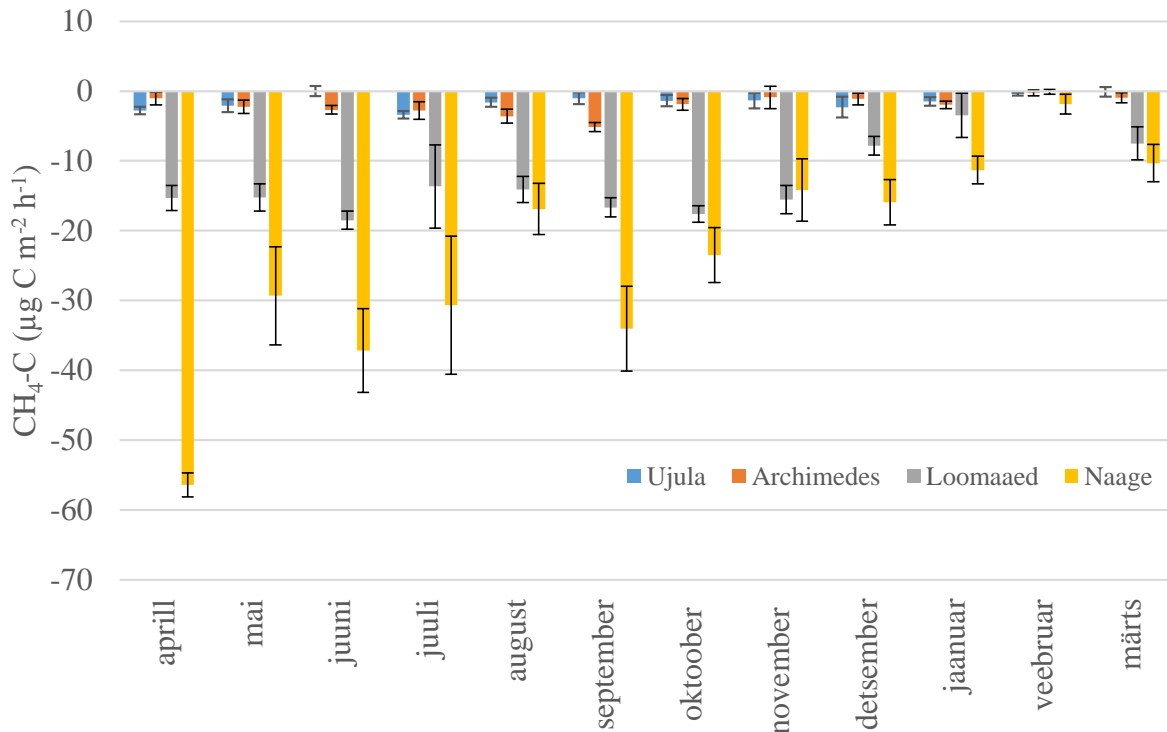


Joonis 10. Metaani voo mediaanväärtused, 25- ja 75-protsentiilid ning minimaalsed ja maksimaalsed väärtused uurimisaladel ajavahemikul aprill 2014 kuni märts 2015. Tähistuste selgitust vaata jooniselt 8.

Metaani voogude analüüsimisel Kruskal-Wallis ANOVA testiga leiti, et Naage ala erines metaani voo alusel statistiliselt usaldusväärselt Ujula ning Archimedese haljaskatustest, kuid mitte Loomaaia mätaskatusest. Haljaskatuste omavahelisel analüüsimisel selgus, et Ujula ja Archimedese katused erinesid metaani voo alusel usaldusväärselt Loomaaia mätaskatusest (joonis 10).

Joonisel 11 on näha uurimisalade kuu keskmised metaanivood uurimisperiodil. Suurim metaani tarbimine toimus mõõteperiodil Naagel ning haljaskatustest oli suurima metaani tarbimisega Loomaaia mätaskatus. Naagel toimus suurim metaani sidumine aprillis, samas kui haljaskatuste korral esines suurim keskmine metaani sidumine suvel (juunis Loomaaias, juulis Ujulas) ning sügisel (septembris Archimedesel). Aprillist novembrini oli metaani sidumine Loomaaias suhteliselt stabiilne, samas Naagel muutusid tingimused rohkem ja seetõttu varieerus ka metaani

sidumine. Sarnaselt süsihappegaasi voole uurimisaladelt oli ka metaani korral näha peale septembrit ühtlast metaani voo vähenemist. Minimaalsed metaani sidumise väärtused registreeriti talvel (veebruar).



Joonis 11. Uurimisalade kuu keskmised metaani vood ($\mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$) koos keskmiste standardvigadega 2014. a aprillist kuni 2015. a märtsini.

Uurimisalade metaani voog korreleerus tugevalt kõigi mõõdetud temperatuuridega (tabel 2). Suurim Spearmani astakorrelatsioonikordaja pinnase temperatuuride (aluskatuse ja 5 cm) ja metaani voo vahel oli Naagel ($\rho = -0,72$) ning haljaskatustest oli suurima Spearmani astakordajaga Archimedese kergmurukatus ($\rho = -0,67$). Väikseima Spearmani astakorrelatsioonikordajaga oli Ujula murukatus ($\rho = -0,47$). Pinnaselt mõõdetud temperatuur korreleerus kõige tugevamini Loomaaia metaani vooga ($\rho = -0,50$) ning õhutemperatuur Naage alalt mõõdetud metaani vooga ($\rho = -0,64$).

Niiskuse ja metaani voog korreleerus omavahel statistiliselt oluliselt (tabel 2) ainult Archimedese kergmurukatusel ($\rho = 0,67$). Teistel aladel esines metaani voo ja niiskuse tulemuste vahel nõrk positiivne korrelatsioon.

Tabel 2. Spearmani astakorrelatsioon (ρ) CH₄ emissiooni ning aluskatuse pinna-, 5 cm sügavuse-, murukatuse pinna-, õhutemperatuuri ja niiskuse vahel ($p < 0,05$). Naagel mõõdeti aluskatuse temperatuur aluskivimilt. Tärniga on tähistatud tugev korrelatsioon.

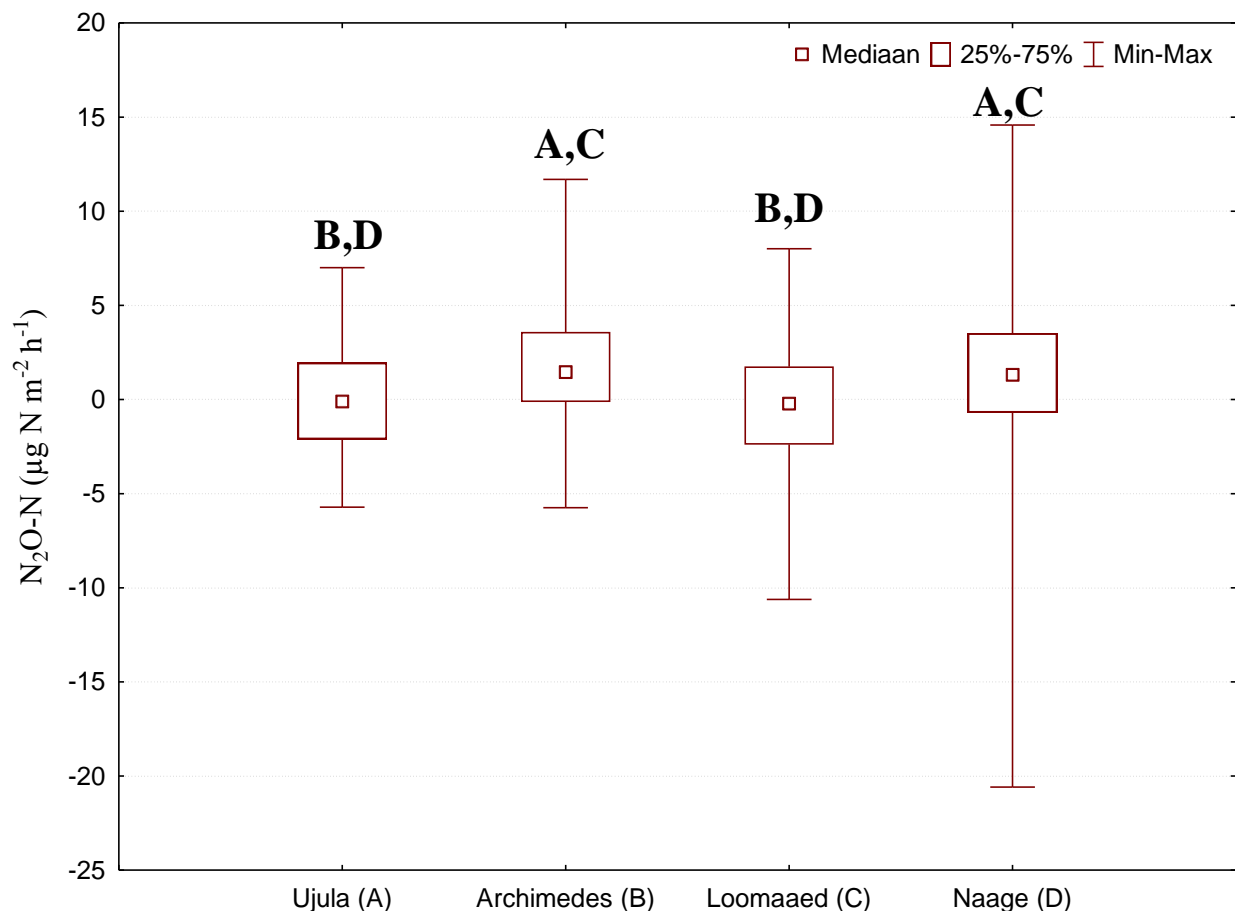
	Ujula	Archimedes	Loomaaed	Naage
aluskatus	-0,47*	-0,67*	-0,54*	-0,69*
5 cm	-0,48*	-0,64*	-0,54*	-0,72*
pind	-0,44*	-0,48*	-0,50*	puudus
õhk	-0,39*	-0,51*	-0,49*	-0,64*
niiskus	0,22	0,67*	0,42	0,49

4.1.3. Uurimisalade N₂O-N vood

Keskmiised N₂O vood erinesid uurimisaladel vahemikus -0,3 µg N m⁻² h⁻¹ (Loomaaed) – 1,7 µg N m⁻² h⁻¹ (Archimedes).

Uurimisperioodil oli suurim N₂O mediaanväärtus (joonis 12) Archimedese kergmurukatusel (1,5 µg N m⁻² h⁻¹). Aastase mediaanväärtuse järgi emiteeris N₂O-d peale Archimedese kergmurukatuse veel Naage (1,3 µg N m⁻² h⁻¹). Ujula (-0,1 µg N m⁻² h⁻¹) ning Loomaaia (-0,2 µg N m⁻² h⁻¹) haljaskatustel toimus aastase mediaanväärtuse alusel aga N₂O sidumine.

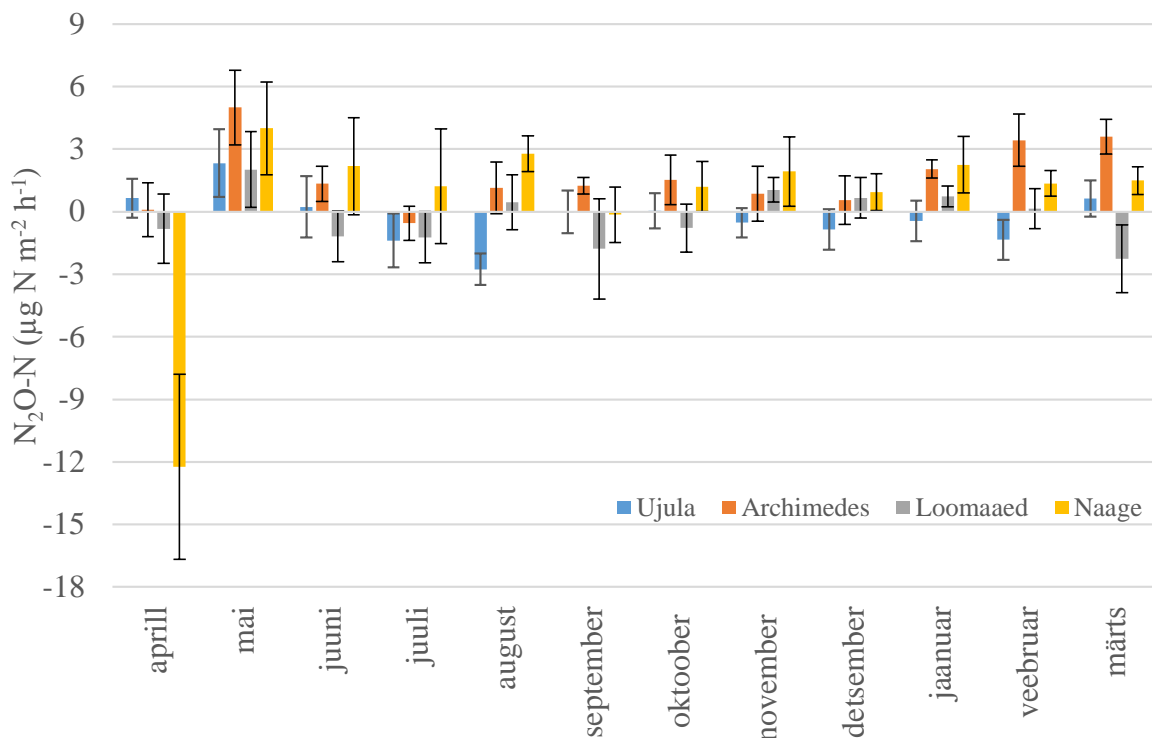
Suurim aastane N₂O voo kõikumine oli Naagel (35,2 µg N m⁻² h⁻¹) ning väikseim Ujula murukatusel (12,7 µg N m⁻² h⁻¹) (joonis 12). Haljaskatustest oli suurima N₂O voo kõikumisega Loomaaia mätaskatus (18,6 µg N m⁻² h⁻¹). Suurim N₂O sidumine (-20,6 µg N m⁻² h⁻¹) ning emiteerimine (14,6 µg N m⁻² h⁻¹) toimus vaatlusperioodil Naagel.



Joonis 12. Naerugaasi voo mediaanväärtused, 25- ja 75-protsentiilid ning minimaalsed ja maksimaalsed väärtused uurimisaladel ajavahemikul aprill 2014 kuni märts 2015. Tähistuste selgitust vaata jooniselt 8.

Kruskal-Wallis ANOVA testi põhjal võib statistiliselt usaldusväärselt öelda, et nii Ujula kui ka Loomaaia haljaskatused erinevad naerugaasi voo alusel statistiliselt usaldusväärselt Archimedese kergmurukatusest ning Naage uurimisalast (joonis 12).

Joonisel 13 on välja toodud naerugaasi kuu keskmised väärtused uurimisperiodil kõigil neljal alal. Suurim N₂O sidumine toimus aprillis Naagel. Samas on jooniselt näha, et ülejäänud mõõteperioodil emiteeris Naage uurimisala hoopis naerugaasi. Katustest oli suurima naerugaasi sidumise võimega Ujula murukatus (augustis), samas suurima emiteerimise võimega haljaskatus oli Archimedese kergmurukatus (mai). Uurimisaladel oli naerugaasi kuu keskmine emissioon suurim mais. Jooniselt on näha, et uurimisaladel jäid kuu keskmised N₂O vood tavaliselt vahemikku -3 – 3 µg N m⁻² h⁻¹.



Joonis 13. Kuu keskmised naerugaasi vood ($\mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$) koos keskmiste standardvigadega 2014. a aprillist kuni 2015. a märtsini.

Spearmani astakorrelatsiooniga naerugaasi voogude ja keskkonnaparameetrite omavahelisel analüüsimisel (tabel 3) selgus, et naerugaasi voo ja temperatuuride vahel ei esinenud ühegi uurimisala korral tugevat korrelatsiooni. Sarnaselt mullatemperatuurile ei leitud uurimisaladel tugevat korrelatsiooni ka niiskuse ja naerugaasi voo vahel.

Tabel 3. Spearmani astakorrelatsioon (ρ) N₂O emissiooni ning aluskatuse pinna-, 5 cm sügavuse-, murukatuse pinna-, õhutemperatuuri ja niiskuse vahel ($p < 0,05$). Naagel mõõdeti aluskatuse temperatuur aluskivimilt.

	Ujula	Archimedes	Loomaaed	Naage
aluskatus	-0,08	-0,29	-0,24	0,15
5 cm	-0,07	-0,29	-0,23	0,02
pind	-0,10	-0,22	-0,33	puudus
õhk	-0,01	-0,27	-0,37	0,11
niiskus	0,53	0,53	-0,25	0,09

4.2. Temperatuur

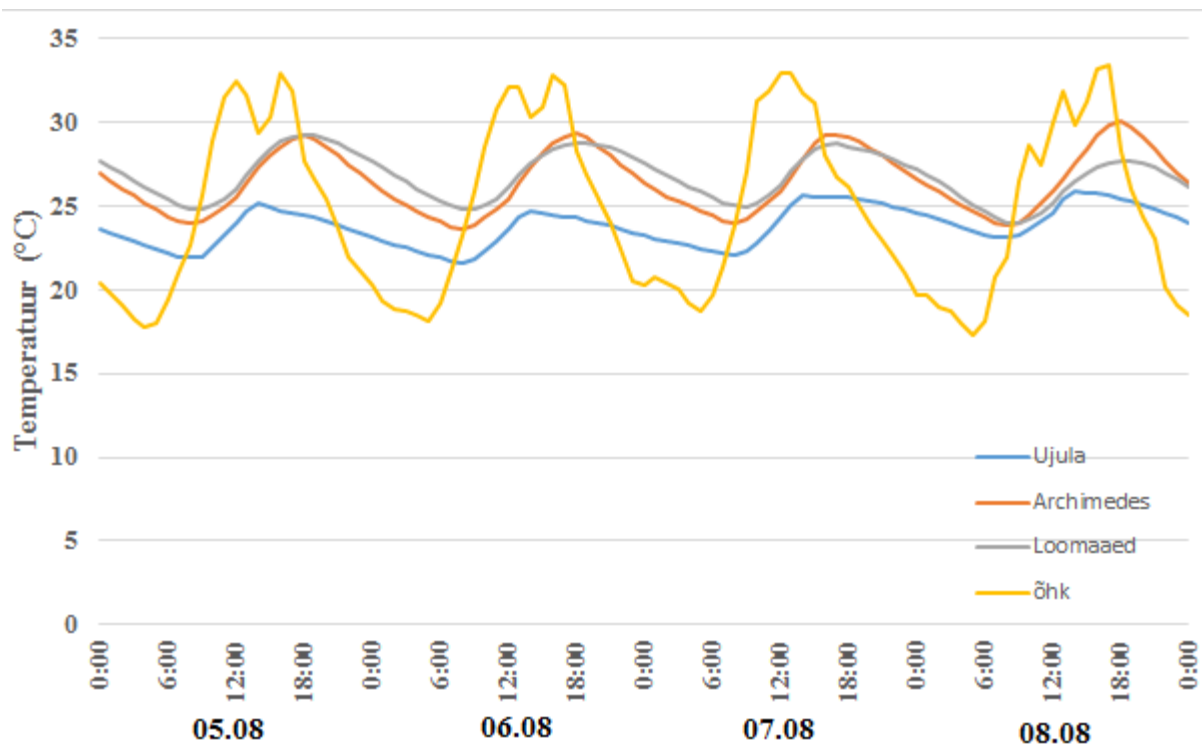
Järgnevalt on välja toodud kolme haljaskatuse (Archimedese, Ujula ja Loomaaia) kasvupinnaste all (ehk sisuliselt aluskatusel) mõõdetud ööpäeva keskmised temperatuurid uurimisperiodil ning tehtud kolm väljavõtet olulisematest perioodidest (suvi, sügis ja pehme talv) näitamaks eri tüüpi haljaskatuste kasvupinnaste käitumist välise temperatuuri muutumise korral.

Joonisel 14 on kujutatud haljaskatuste aluskatuste keskmiseid ööpäevaseid temperatuure ajavahemikus 01.01.2014 – 01.04.2015. Lisaks on graafikul kujutatud ööpäeva keskmist õhutemperatuuri (kasutatud Archimedese kergmurukatusest mõõdetud õhutemperatuuri). Jooniselt on näha, et kõige kõrgem maksimaalne ööpäevane aluskatuse temperatuur registreeriti Loomaaia mätaskatusel (28,7°C). Kolmest katusest tõusis aluskatuse maksimaalne ööpäevane temperatuur kõige vähem Ujula murukatusele (25,0°C). Kõige kõrgem keskmine ööpäevane temperatuur ajavahemikus aprill 2014 – märts 2015 oli Archimedese kergmurukatusele (10,1°C) ning väikseim Ujula murukatusele (8,6°C). Minimaalne ööpäevane temperatuur oli -4,9°C (Ujula). Suurima aluskatuse temperatuuri kõikumisega haljaskatuseks oli Loomaaia mätaskatus (31,4°C) ning väiksema temperatuuri kõikumisega haljaskatuseks oli Archimedese kergmurukatus (27,4°C). Eelnevalt vaadeldud ajavahemikus ei langenud temperatuur kordagi alla nulli Archimedese kergmurukatuse aluskatuse pinnal. Samas on näha, et madalamate õhutemperatuuride korral (jaanuar – veebruar 2014) langeb ka Archimedese kergmurukatuse kasvupinnase temperatuur alla nulli.



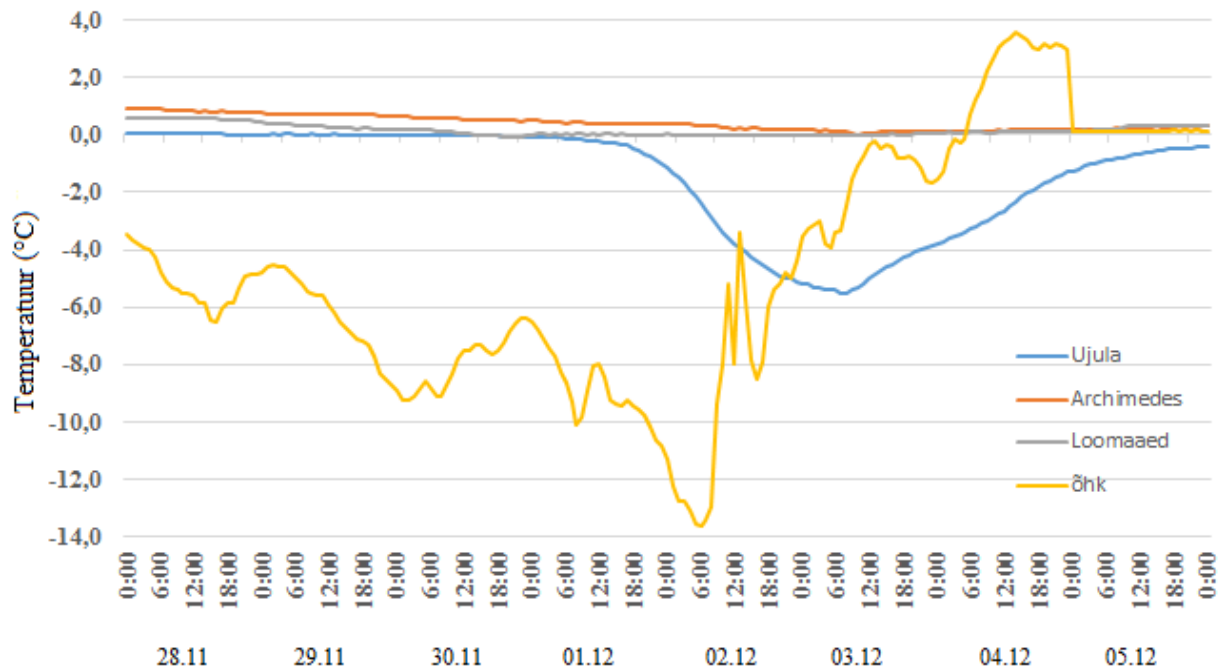
Joonis 14. Kolme haljaskatuse (Ujula, Archimedes, Loomaaed) aluskatuste ööpäeva keskmised temperatuurid ja õhutemperatuur (Archimedese kergmurukatuse kohal mõõdetuna) uurimisperiodil (01.01.2014 – 01.04.2015). Loomaaia katuse mõõtmised algasid 14.04.2014.

Joonisel 15 on kujutatud õhutemperatuuri muutuse mõju kolme haljaskatuse aluskatuse temperatuuridele suvel. Jooniselt on näha, kuidas haljaskatuste aluskatuste temperatuurid järgivad ajalise nihkega õhutemperatuuri muutumist. Õhutemperatuur saavutab oma päevase maksimumi kella 13.00-ks ning haljaskatuste aluskatustest saavutab kõige kiiremini oma päevase maksimaalse temperatuuri Ujula murukatuse (14.00). Archimedese ja Loomaaia haljaskatuste aluskatused saavutavad oma maksimaalse temperatuuri suvel kella 18.00-ks. Kõige kõrgemale tõusis aluskatuse temperatuur suvepäeval Archimedese kergmurukatusel (maksimaalne mõõdetud väärtus 30°C). Kõige madalam maksimaalne aluskatuse temperatuur mõõdeti Ujula murukatusel (26°C). Väikseim aluskatuse temperatuuri kõikumine toimus vaadeldaval perioodil Ujula murukatusel (4,6°C), samas kui kõige suurema aluskatuse temperatuuri muutusega oli Archimedese kergmurukatuse (7,4°C).



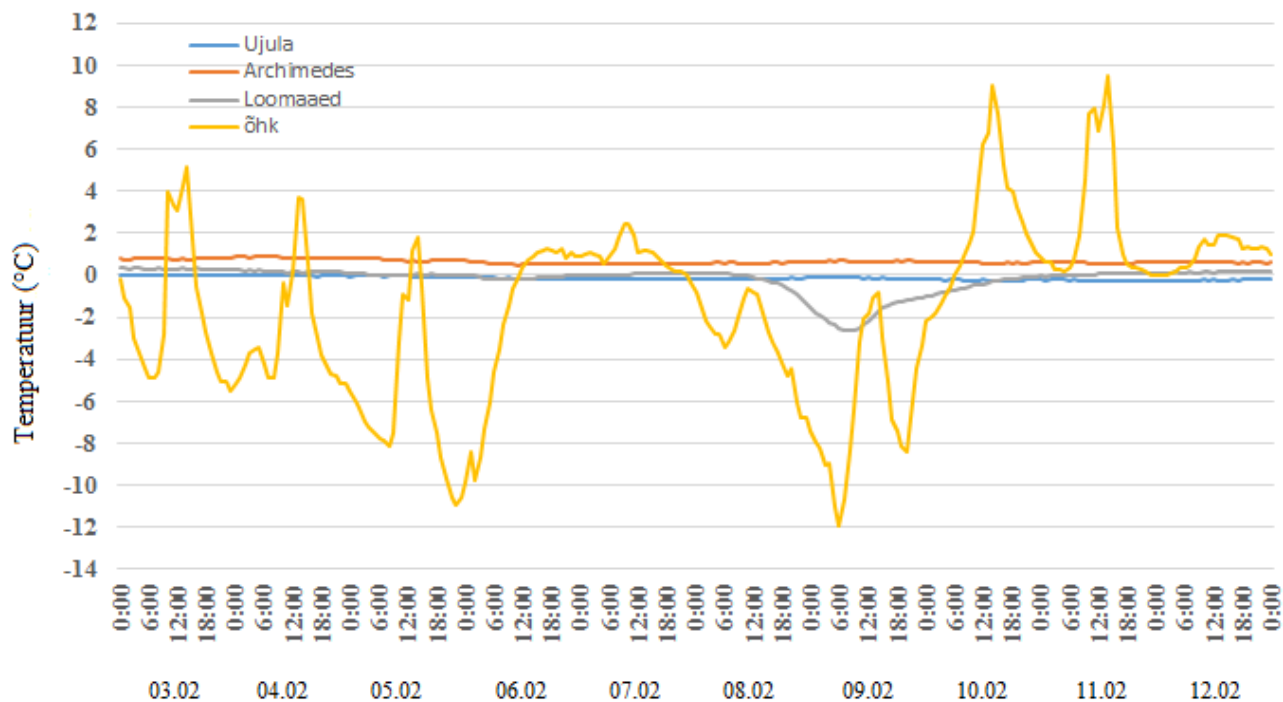
Joonisel 15. Kolme uuritava haljaskatuse aluskatuste temperatuuride ja õhutemperatuuri (Archimedese kergmurukatuse kohal mõõdetuna) omavaheline sõltuvus suvel (05.08.2014 – 08.08.2014).

Joonisel 16 on kujutatud õhutemperatuuri mõju haljaskatuste aluskatuste temperatuuridele sügisel, kui haljaskatustel esines esimene pikaajalisem külmaperiood. Jooniselt on näha, et õhutemperatuuri langemisel alla 0°C jäävad haljaskatuste aluskatuste temperatuurid jätkuvalt üle 0°C. Erandiks oli Ujula murukatus, kus aluskatuse temperatuur langes vaatlusperioodil alla -5°C. Samas õhutemperatuuri tõusmisel jätkus aluskatuste temperatuuri langemine veel järgnevad 12 tundi, peale mida hakkasid ka need tõusma. Samuti on jooniselt näha, et Archimedese ja Loomaaia haljaskatuste temperatuuride kõikumine vaadeldud ajavahemikus oli väga väike, jäädes alla 1,5°C.



Joonis 16. Kolme uuritava haljaskatuse aluskatuste temperatuuride ja õhutemperatuuri (Archimedese kergmurukatuse kohal mõõdetuna) omavaheline sõltuvus sügisel (28.11.2014 – 05.12.2014).

Joonisel 17 on näha õhutemperatuuri mõju külmunud haljaskatustele pehmel talveperioodil. Õhutemperatuur tõuseb vaadeldavas ajavahemikus korduvalt üle 0°C ning kõigub suures vahemikus (-12 – 9,8°C), külmunud haljaskatused reageerivad välisele temperatuuri muutusele minimaalselt (v.a. Loomaaia mätaskatus, kus aluskatuse temperatuur langes -2,6°C-ni). Archimedese ning Ujula haljaskatustel jäid aluskatuste temperatuuri muutused 1°C vahemikku.



Joonis 17. Kolme uuritava haljaskatuse aluskatuste temperatuuride ja õhutemperatuuri (Archimedese kergmurukatuse kohal mõõdetuna) omavaheline sõltuvus talvel (03.02.2015 – 12.02.2015).

4.3. Uurimisalade maapealne ja maa-alune biomass ning kasvupinnas

Järgnevalt on välja toodud uurimisalade erinevused maapealse ja maa-aluse biomassi analüüsi tulemuste alusel. Tabelis 4 on esitatud oktoobris kogutud haljaskatuste ning Naage maapealse ja maa-aluse biomassi laborianalüüsi tulemused. Tulemustest on näha, et üldlämmastiku sisaldus maapealses kuivatatud biomassis oli suurim Ujula murukatusel ning väiksem Archimedese kergmurukatusel. Kõrgeimad üldlämmastiku sisaldused maa-aluses biomassis olid Naagel ning Ujula murukatusel. Fosfori sisaldusest lähtuvalt eristus teistest aladest oluliselt Archimedese kergmurukatuse, mille fosfori sisaldused nii maapealses kui ka maa-aluses biomassis olid üle kahe korra madalamad kui teistel uurimisaladel. Sarnaselt üldlämmastikule registreeriti Ujula murukatusel biomassi kõrgeim fosfori sisaldus. Kõrgeim maapealse biomassi kaaliumi sisaldus oli Ujula murukatusel 17000 mg/kg KA, samas kui Naagel oli kaaliumi sisaldus kogutud biomassis üle 2,5 korra väiksem (7100 mg/kg KA). Uurimisalade maapealse biomassi kaltsiumi sisalduses oli samuti näha suuri kõikumisi. Suurima kaltsiumi sisaldusega maapealne biomass oli oodatult Archimedese kergmurukatusel (16000 mg/kg KA) ning väiksem kaltsiumi sisaldus mõõdeti

Loomaaias (4900 mg/kg KA). Väevli sisalduse võrdlemisel eristus kõigist uurimisaladest Loomaia maa-alune biomass, mille väevli sisalduseks saadi 2300 mg/kg KA kohta, mis oli üle 500 mg/kg võrra kõrgem teistest uurimisaladest. Kõigil uurimisaladel oli süsiniku sisaldus suurim maapeelses biomassis, olles suurima osakaaluga Archimedese kergmurukatusel (49%) ning Naagel (48%).

Tabel 4. Uurimisalade maapealse ja maa-aluse biomassi keemiline koostis 2014. aasta sügisel. MP tähistab maapealset biomassi ning MA maa-alust biomassi.

	N üld (mg/kg)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	Ca (mg/kg)	S (mg/kg)	C üld (%)
Ujula MA	14000	2200	4800	15000	1800	44
Ujula MP	22000	2700	17000	7600	1800	46
Archimedes MA	11000	900	7100	20000	1700	45
Archimedes MP	12000	900	9200	16000	1700	49
Loomaaed MA	17000	2200	3900	18000	2300	44
Loomaaed MP	18000	2500	7300	4900	1600	49
Naage MA	14000	2100	4400	13000	1400	47
Naage MP	17000	2200	7100	10000	1300	48

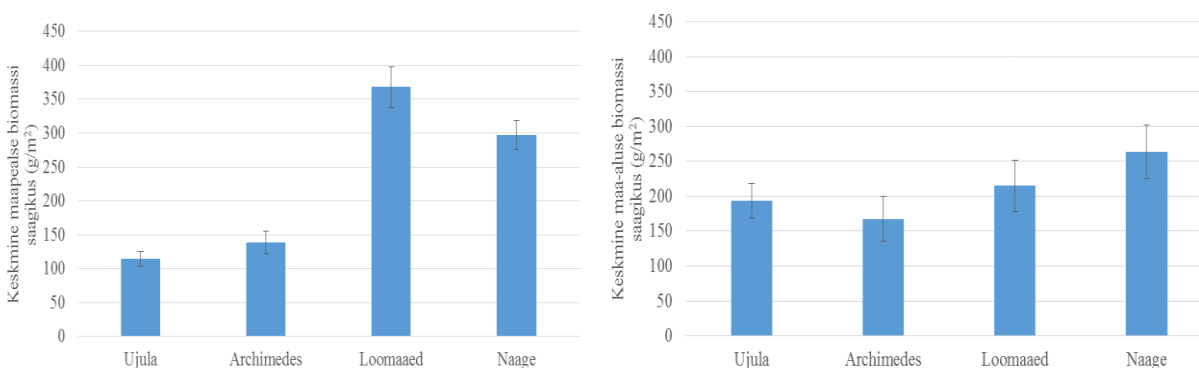
Tabelis 5 on välja toodud nelja uurimisala kasvupinnase keemiline koostis oktoobris kogutud andmete põhjal. Keemilise analüüsi tulemustest on näha, et kõige kõrgema lämmastiku sisaldusega kasvupinnaseks on Naage (9367 mg/kg) ning väikseima lämmastiku sisaldusega alaks oli Archimedese kergmurukatuse (943 mg/kg). Uurimisalade kasvupinnaste fosfori sisaldusest oli näha, et kõige suurema fosfori sisaldusega alaks oli Naage ning haljaskatustest Loomaia mätaskatus. Väikseim fosfori sisaldus kasvukihis oli Archimedese ning Ujula haljaskatustel. Süsiniku sisaldus kasvupinnases jäi uuringualadel vahemikku 1,3 – 9,2%. Teisi olulisi toitained (K, Ca) oli kõige rohkem Naagel ning kõige vähem õhema kasvupinnasega Ujula haljaskatusel. Magneesiumi sisaldus oli kõige suurem Archimedese kergmurukatuse kasvupinnases (3733 mg/kg) ning kõige vähem leidus magneesiumi Loomaia mätaskatuse kasvupinnases (2000 mg/kg). Kõige kõrgema orgaanilise aine sisaldusega oli Naage kasvupinnas (20,1%). Haljaskatustest oli kõrgeima orgaanilise aine sisaldusega Loomaaed (9,5%), väikseima orgaanilise aine sisaldusega alaks oli Archimedes (2,7%). Raskemetalle leidus rohkem Tallinna aladel

(Loomaaed ja Naage). Kõrgeima plii sisaldusega kasvupinnaseks oli Naage ning väikseima plii sisaldusega kasvupinnaseks oli Archimedes. Tsingi kontsentratsioonid kasvupinnases olid suurimad Loomaaias (105,3 mg/kg). Ülejäänud kolmel alal olid tsingi sisaldused kasvupinnastes üle kahe korra madalamad.

Tabel 5. Uurimisalade kasvupinnaste keemiline koostis 2014. aasta sügisel.

	Nüüd mg/kg	P mg/kg	Cüüd %	K mg/kg	Ca mg/kg	Mg mg/kg	S mg/kg	org.aine %	Cd mg/kg	Pb mg/kg	Zn mg/kg
Ujula	1187	547	1,7	1433	5233	2167	150	5,0	<1	8,2	30,7
Archimedes	943	230	1,3	1800	9733	3733	267	2,7	<1	3,4	19,3
Loomaaed	3100	1800	4,9	1500	11000	2000	370	9,5	<1	26,3	105,3
Naage	9367	4933	9,2	2067	16667	2333	1100	20,1	<1	39,7	46,7

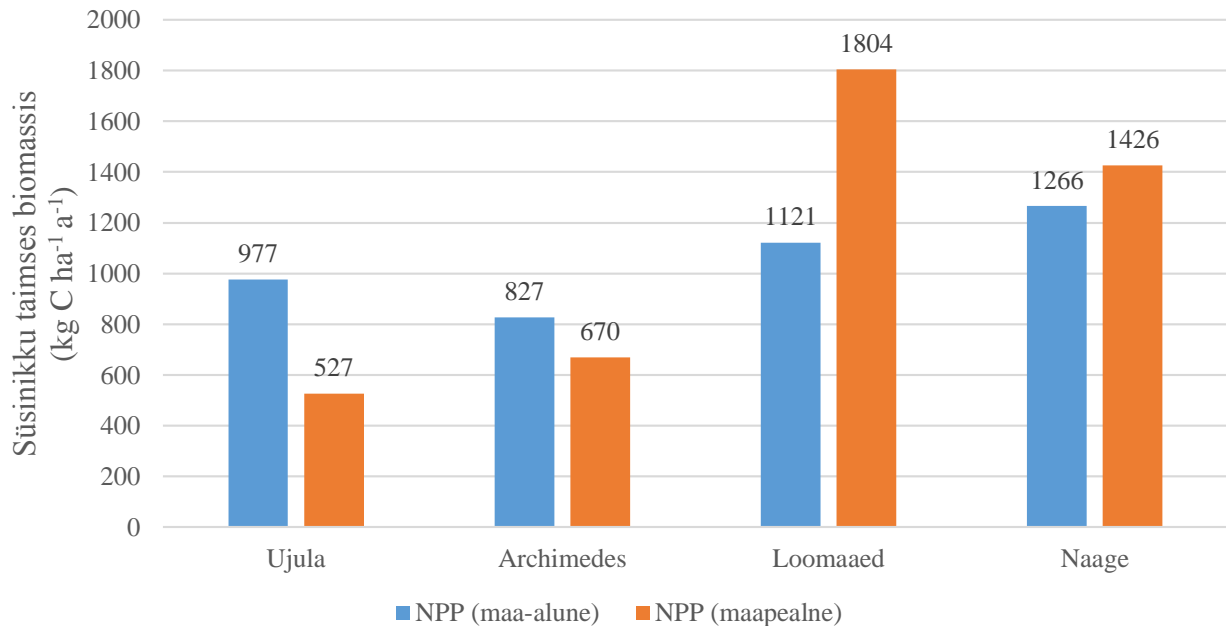
Joonisel 18 on välja toodud nelja uurimisala maapealse ja maa-aluse biomassi produktsioon. Jooniselt on näha, et Loomaaia ja Naage uurimisaladel on maapealse biomassi produktsioon üle kahe korra kõrgem kui Archimedese ja Ujula haljaskatustel. Suurima kuivaine maapealse biomassi saagikusega uurimisalaks oli Loomaaia mätaskatus 368 g KA/m² kohta. Maa-aluse keskmise biomassi võrdlemisel on näha, et kõige suurem juurte sisaldus pindala ühiku kohta on Naagel (263 g/m²). Haljaskatustest oli suurima maa-aluse biomassi saagikusega Loomaaia mätaskatus (215 g/m²).



Joonis 18. Nelja uurimisala maapealse ning maa-aluse biomassi kuivaine saagikus 2014. aasta oktoobris.

Maapealsesse ning maa-alusesse biomassi seotud süsiniku kirjeldamiseks koostati joonis 19. Jooniselt on näha, et kõige suurem süsiniku sisaldus maapealses biomassis on Loomaaia

mätaskatusel ning kõige väiksem Ujula murukatusel. Maa-aluses biomassis on kõige suurem süsiniku sisaldus Naage uurimisalal ning haljaskatustest oli suurima süsiniku sisaldusega Loomaaia mätaskatus. Väikseim süsiniku sisaldus maa-aluses biomassis oli Archimedese kergmurukatusel.



Joonis 19. Uurimisalade maapealsesse ning maa-alusesse taimsesse biomassi seotud süsiniku kogus (kg C ha⁻¹a⁻¹). NPP tähendab ökosüsteemi kogu primaarproduksioon (*net primary production*).

5. Arutelu

5.1. Kasvuhoonegaaside vood

5.1.1. Uurimisalade ökosüsteemi CO₂-C vood

Ökosüsteemi CO₂ voogu mõjutavad mitmed keskkonnategurid, millest üks olulisemaid on mullatemperatuur. Mitmetes uuringutes on leitud, et CO₂ voo intensiivistumine järgib mullatemperatuuri tõusu. Mullatemperatuuri tõusmise tagajärjel suureneb mulla mikroorganismide elutegevuse intensiivsus (Hassan et al., 2014; Almagro et al., 2009; Gough & Seiler, 2004). Samas liiga kõrged või madalad mullatemperatuurid omavad CO₂ voole negatiivset mõju, sest see kahjustab mulla mikroorganisme (Kanerva, 2007). CO₂ voo suurenemist temperatuuri tõusmisel kinnitasid ka neljalt uurimisalalt saadud tulemused, kus mõõdetud mullatemperatuuride ning CO₂ voo vahel esines tugev positiivne korrelatsioon. Uurimisalade pinnasetemperatuuri ning CO₂ voo omavahelisest korreleerumisest saab järeldada, et kõige kiiremini reageerib välisele temperatuuri muutusele Archimedese kergmurukatuse mikroorganismide kooslus ning kõige aeglasemalt Loomaaia mätaskatuse mikroorganismide kooslus.

Sademed omavad mõju CO₂ voole, sest nende tulemusena suureneb kasvupinnase niiskusesisaldus. Uurimisperioodi sademed on esitatud lisas 5. Kuu keskmistest CO₂ voogude tulemustest on näha, et intensiivsem hingamine (CO₂ voog) toimus kuudel (nt juuli), kus olid väiksemad sademete hulgad. Samas suuremate sademetega kuudel oli näha hingamise intensiivsuse alanemist (Harper et al., 2005; Contant et al., 1998). Sademete mõju hingamise intensiivsuse alanemisele illustreerib kõige paremini uurimisalade augustikuine CO₂ voog, mis oli oluliselt madalam kui juuli CO₂ voog. Samuti põhjendavad sademed ära juulikuise CO₂ voogude vähenemise Tallinna aladel. Tallinna aladel toimus enne juulikuist esimest mõõtmist suur sadu (5 päeva sademete kogus 21,2 mm), samas kui Tartu aladel oli sademete hulk enne esimest juulikuist kasvuhoonegaaside mõõtmist märgatavalt madalam (5 päeva sademete kogus 2,3 mm).

Eelnevast tulenevalt mõjutab haljaskatuste ökosüsteemi CO₂ voogu oluliselt pinnase niiskusesisaldus. Maailmas läbiviidud uuringutes on leitud, et pinnase väga kõrge, või vastupidi, väga madal niiskusesisaldus mõjutab ökosüsteemi CO₂ voogu (Kanerva, 2007; Harper et al.,

2005). Niiskuse mõju CO₂ voole avaldub peamiselt pinnase pooriruumi kaudu. Kuna õhk jagab mullas olevat pooriruumi veega, väheneb pinnases oleva hapniku hulk pinnase vee sisalduse kasvades. Väiksema hapniku kontsentratsiooni tulemusena langeb kasvupinnases olevate mikroorganismide elutegevuse aktiivsus ning väheneb CO₂ emissioon. Lisaks reguleerib kasvupinnase niiskusesisaldus gaaside liikumist ning difusiooni. Uuringutes on leitud, et pinnase veesisaldus mõjutab lisaks eelnevale veel orgaanilise aine lagunemiskiirust ning väga kuivades ja märgades tingimustes võib lagunemiskiirus drastiliselt väheneda (Hassan et al., 2014; Chang et al., 2008; Buschmann et al., 1997). Läbiviidud uuringus leiti, et Naagel ning Archimedese kergmurukatusel esines tugev negatiivne korrelatsioon CO₂ voo ning niiskuse vahel. Ujula ning Loomaaia haljaskatustel oli CO₂ voo ning kasvupinnase niiskuse vahel nõrk negatiivne korrelatsioon. Kahe ala nõrga korrelatsiooni põhjuseks võib olla mulla tihenemine (tallamine, omaraskuse all tihenemine) ning Loomaaia katuse kallakus. Mulla tihenemise tulemusena väheneb mullas olevate pooride maht, mille tulemuseks on hapniku kontsentratsiooni vähenemine pinnases. Saadud tulemustest saab järeldada, et uurimisalade CO₂ voo suurus sõltub mulla niiskusesisaldusest (Berretta et al., 2014; Stovin et al., 2012).

Läbiviidud uuringu tulemustest on näha, et uurimisalade CO₂ voog järgib hästi aastaegade muutumist. Kevadest kuni kesksuveni oli uurimisaladel näha ühtlast CO₂ emissiooni kasvu, mis saavutas oma maksimaalsed väärtused juulis. Peamiseks CO₂ intensiivsuse kasvu põhjuseks oli uurimisalade kasvupinnaste ülesesulamine ning temperatuuri tõus. CO₂ voo suurenemine toimub nii heterotroofse kui ka autotroofse hingamise intensiivsuse kasvamisest ja mulla niiskusesisalduse vähenemisest. Alates septembrist toimus uurimisaladel CO₂ voo järkjärguline vähenemine, mis saavutas oma miinimumi veebruaris. Sügisene CO₂ voo vähenemine oli tingitud temperatuuri langemisest ning pinnase niiskusesisalduse tõusust (Almagro et al., 2009; Harper et al., 2005). CO₂ voo vähenemist uurimisaladel mõjutab ka õitsemise algus ning taimede vananemine, mille tulemusena kasutatakse juurtele ning juurehingamisele vajalikke toitaineid taime teistes osades (Harper et al., 2005). Veebruaris Ujula murukatusel mõõdetud negatiivse CO₂ voo põhjuseks võis olla gaas-kromatograafi mõõteviga, sest katusele mõõdetud CO₂ vood olid väga väikesed.

CO₂ voogusid mõjutab oluliselt ka uurimisaladel olev valgusrežiim. Erineva valgusrežiimi mõju oli näha Ujula murukatusel, kus enamuse katusepinnast on varjutatud ümberasuvate korterite poolt. Ujula murukatuse 8. juuli mõõtekorra (kõige suurema emissiooniga mõõtekord Ujula

haljaskatusel) kolme kambri CO₂ andmete analüüsist sai järeldada, et kahes kambri, mis asusid katuse keskel ning mida ei varjutanud ümberasuivad korterid, olid CO₂ emissioonid umbes kaks korda kõrgemad kui kambri, mida varjutasid ümberkaudsed korterid. Varjus oleva kambri väiksema CO₂ emissiooni põhjuseks oli kasvupinnase madalam temperatuur ning kõrgem niiskusesisaldus. Sarnast sõltuvust Ujula murukatuse kolme kambri vahel oli märgata ka teistel mõõtekordadel. Saadud tulemustest saab järeldada, et CO₂ voog on märgatavalt kõrgem haljaskatustel, mis ei ole varjutatud ümberkaudsetest hoonetest ning CO₂ vood võivad erineda ühel katusel suures ulatuses (Durhman & Rowe, 2007).

Suurimad keskmised CO₂ vood mõõdeti Naage ja Loomaaia uurimisaladel. Suuremate emissioonide peamiseks põhjuseks on aladel olev tüsedam kasvupinnas, parem kasvupinnase niiskuserežiim, lopsakam taimestik, suurem toitainete ning süsiniku sisaldus kasvupinnases (vt tabel 5). Väikseim keskmine CO₂ voog oli Archimedese kergmurukatusel, sest kasvupinnasena on kasutatud kergkruusa, millel saavad kasvada ainult väikse bioproduktiooniga vähenõudlikud taimeliigid (kukehari). Väikese biomassi tõttu pole kasvupinnase mikroorganismidel piisavalt orgaanilist ainet, et toota suuremas koguses CO₂. Samuti on Archimedese kergmurukatuse kasvupinnases palju vähem taimedele vajalikke toitaineid, mis soodustaksid taimekasvu ning suurendaks seeläbi CO₂ voogu.

Kolmest uuritud haljaskatusest olid CO₂ voogudelt kõige sarnasem looduslikule võrdlusalale Loomaaia mätaskatus. Seda kinnitas ka Kruskal-Wallise ANOVA test, mille põhjal erines Naage ala keskmine süsihappegaasi emissioon statistiliselt oluliselt Ujula ning Archimedese murukatuste emissioonidest, kuid mitte Loomaaia mätaskatuse emissioonidest. Loomaaia ja Naage uurimisalade sarnasuse peamiseks põhjusteks oli sarnane taimestik, paksem kasvukiht, sarnasem temperatuurirežiim ning suurem toitainete sisaldus kasvupinnases.

Austrias õhukesel metsamullal läbiviidud süsihappegaasi voo mõõtmisel saadi aasta keskmiseks süsihappegaasi emissiooni suuruseks 19,7 mg CO₂ m⁻² h⁻¹. Antud magistritöö raames jäid uurimisalade aastased keskmised CO₂ vood vahemikku 24,5 mg C m⁻² h⁻¹ – 94,7 mg C m⁻² h⁻¹. Antud tulemustest on näha, et õhukese kasvupinnasega (alla 15 cm) haljaskatustel ning Naage võrdlusalal on märgatavalt kõrgemad keskmised CO₂ emissioonid kui õhukesel metsamullal (Kitzler et al., 2006).

Võrreldes uurimisaladelt saadud keskmiseid CO₂ voogusid maailmas läbiviidud töödega, saab järeldada, et uurimisalad käituvad CO₂ voogudelt kõige sarnasemalt rohumaadele. Raich ja Schlesinger (1992) arvutasid rohumaade keskmiseks CO₂ vooks 0,4 – 0,5 kg CO₂-C m⁻² a⁻¹, samas kui antud töö uurimisalade keskmised CO₂ vood jäid vahemikku 0,2 – 0,8 kg CO₂-C m⁻² a⁻¹. Keskmiste CO₂ voogude osas kõige sarnasemaks rohumaad tüübiks Ujula (keskmise CO₂ voog 0,3 kg CO₂-C m⁻² a⁻¹) ning Loomaia haljaskatustele (keskmise CO₂ voog 0,4 kg CO₂-C m⁻² a⁻¹) olid parasniisked rohumaad (keskmise CO₂ voog 0,4 kg CO₂-C m⁻² a⁻¹). Archimedese kergmurukatus (keskmise CO₂ voog 0,2 kg CO₂-C m⁻² a⁻¹) oli CO₂ voogudelt kõige sarnasem kõrbele (keskmise CO₂ voog 0,2 kg CO₂-C m⁻² a⁻¹). Naage paepealne (0,8 kg CO₂-C m⁻² a⁻¹) sarnanes keskmise CO₂ voolt Vahemere nõmme ja metsamaaga (0,8 kg CO₂-C m⁻² a⁻¹) (Raich & Schlesinger, 1992).

5.1.2. Uurimisalade CH₄-C vood

Metaani tekib ning tarbitakse erinevate mikroobsete protsesside tulemusena. Looduslikuks metaani tekkimise viisiks on anaeroobses keskkonnas läbiviidav metanogenees, mida viivad läbi erinevad arhed. Metaani sidumine toimub aga metanotroofide poolt, kes kasutavad metaani süsiniku- ja energiaallikana. Metaani sidumine toimub enamasti pinnase ülemistes kihtides (0 – 20 cm), kus on olemas piisavalt hapnikku. Metaani emissiooni/sidumist mõjutavad paljud erinevad tegurid nagu pinnases olev orgaanilise aine varu, temperatuur, pinnase tekstuuri, mineraloogia ja hüdroloogilised tingimused (Carter et al., 2011; Le Mer & Roger, 2001; Batjes & Bridges, 1992).

Väikseim keskmine metaani sidumine toimus õhema kasvukihiga Ujula ning Archimedese haljaskatustel. Loomaia mätaskatusel, mille kasvupinnas oli 5 cm võrra paksem, oli metaani sidumine juba 10 korda suurem ning Naage looduslikul võrdlusel 17 korda suurem, sest tusedamal kasvukihil on võimelised kasvama suurema bioproduktiooniga taimed. Ujula ning Archimedese haljaskatuste madalam CH₄ sidumisvõime põhjuseks on madalam mikroobide elutegevuse intensiivsus. Mikroobide madalat elutegevuse intensiivsust kinnitavad Archimedese ning Ujula haljaskatuste madalamad kasvupinnaste orgaanilise süsiniku sisaldused võrreldes Loomaia ning Naage aladega (tabel 5) (Merino et al., 2004; Shrestha et al., 2004).

Samuti on tusedama kasvukihi korral tagatud parem niiskusrežiim. Pinnase niiskusesisaldus on üks olulisemaid keskkonnaparametreid, mis mõjutab metaani sidumist/emiteerumist, sest kõrge niiskusesisalduse korral on atmosfäärse metaani ja hapniku difusioon pinnasesse raskendatud.

(Carter et al., 2011; Jäckel et al., 2001; Kammann et al., 2001). Läbiviidud uuringus esines tugev positiivne korrelatsioon metaani voo ja pinnase niiskusesisalduse vahel ainult Archimedese kergmurukatusel. Teistel kolmel uuringualal leiti nõrk positiivne korrelatsioon metaani voo ja pinnase niiskusesisalduse vahel. Positiivse korrelatsiooni põhjuseks on mikroobide elutegevuse kahjustumine pinnase läbikuivamisel (madal kasvupinnase niiskusesisaldus), sest vaadeldud uurimisalad on väga õhukese kasvupinnasega (alla 20 cm) ning mille tulemusena tekib pinnase läbikuivamine kiiresti (kõige kiiremini Archimedese kergmurukatusel). Peale pinnase niiskusesisalduse tõusmist kulub mikroobidel aega oma koosluse taastamiseks, mille tulemuseks on positiivne korrelatsioon pinnase niiskusesisalduse ja metaani sidumise vahel (Wu et al., 2010; Borken & Matzner, 2009).

Oluliseks metaani emissiooni/sidumise mõjutajaks on temperatuur (metaani emiteerimine/sidumine on mikrobioloogilised protsessid). Temperatuuri olulist mõju metaani voole kinnitasid ka uurimisaladelt saadud tulemused, kus statistilise töötluse tulemusena leiti tugev negatiivne korrelatsioon temperatuuri ning metaani voo vahel kõigil neljal uuringu alal. Tugev negatiivne korrelatsioon on tingitud sellest, et kõrgematel temperatuuridel ($< 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) on metaani difusioon aeglasem. Negatiivset temperatuuri mõju metaani voole suurendab ka uurimisalade põuatundlikkus ning kasvupinnase niiskusesisalduse suurenemine vihmasadude tulemusena, mille tagajärjel väheneb metanotroofide elutegevuse intensiivsus. Kõige tugevamalt on CH_4 voog mõjutatud kasvupinnase temperatuurist Archimedese ning Naage uurimisaladel. Archimedese ning Naage ala tugevam korrelatsioon CH_4 vooga on tingitud kasvupinnase suuremast poorsusest, mis soodustab õhu difusiooni kasvupinnasesse (Luo et al., 2013; Wu et al., 2010).

Kuu keskmistest CH_4 voogudest (joonis 11) on näha, et suuremate sademetega (vt. lisa 5) kuudel (august) väheneb uurimisaladel metaani sidumine. Sademete ning CH_4 sidumise negatiivse seose põhjuseks on pinnase niiskusesisalduse kasv, mille tulemusena väheneb pinnases oleva hapniku kontsentratsioon ning aeglustub metanotroofide elutegevuse intensiivsus (raskendatud metaani difusioon) (Jäckel et al., 2001; Kammann et al., 2001).

Kõigil neljal alal esines uurimisperiodil ka metaani emiteerimisele viitavaid mõõtmistulemusi. Metaani emissiooni üheks põhjuseks on suur vee sisalduse mulla poorides. Maailmas läbiviidud töödes on leitud, et kui vesi täidab rohkem kui 50% mulla poori ruumalast võivad kuivad mullad hakata emiteerima CH_4 . Samuti on leitud, et CH_4 emissiooni võib esile kutsuda ka kõrge NH_4^+

konsentratsioon, sest kõrgendatud anorgaanilisel lämmastikul on leitud tugev inhibeeriv toime CH₄ oksüdatsioonile (Wu et al., 2010; Liu et al., 2009).

Naage võrdlusalale käitus kuu keskmiste metaani voogude põhjal kõige sarnasemalt Loomaaia mätaskatus. Metaani voogude sarnasust kinnitas ka läbiviidud Kruskal-Wallise ANOVA test, kus leiti, et Naage ala erines metaani voo alusel statistiliselt usaldusväärselt Ujula ning Archimedese haljaskatustest, kuid mitte Loomaaia mätaskatusest. Loomaaia ning Naage ala CH₄ voogude sarnasuse põhjuseks on alade sarnane kasvupinnase koostis, kasvupinnase paksus, taimestik, suurem orgaanilise aine sisaldus ning ühtlasem niiskusežiim.

Luo jt (2013) poolt läbiviidud uuringu tulemuste põhjal saab järeldada, et uurimisalad on aasta keskmiste metaani voogudelt sarnased rohumaadele, kus aasta keskmiseks metaani vooks mõõdeti -1,74 kg CH₄-C ha⁻¹ a⁻¹ (Luo et al., 2013). Magistritöö aasta keskmised CH₄ vood jäid haljaskatustel vahemikku -0,11 kg CH₄-C ha⁻¹ a⁻¹ (Ujula) – -1,17 kg CH₄-C ha⁻¹ a⁻¹ (Loomaaed) ning Naagel -1,94 kg CH₄-C ha⁻¹ a⁻¹.

5.1.3. Uurimisalade N₂O-N vood

Pinnases tekib N₂O peamiselt nitrifitseerimist/denitrifitseerimist läbiviivate mikroorganismide elutegevuse tagajärjel. Nitrifitseerivate/denitrifitseerivate mikroorganismide elutegevuse intensiivsust mõjutavad paljud erinevad tegurid nagu temperatuur, sademed, lämmastiku sisaldus pinnases, hapniku kättesaadavus, mineraliseerumise kiirus, pinnase tekstuur ning struktuur (Luo et al., 2013; Du et al., 2006; Batjes & Bridges, 1992). Suuremate gaasivoogude olemasoluks peavad aladel olema täidetud kõik eelnevad tegurid (Nicolini et al., 2013).

Keskmised naerugaasi vood erinesid uurimisaladel väga väikeses vahemikus -0,3 µg N m⁻² h⁻¹ (Loomaaed) – 1,7 µg N m⁻² h⁻¹ (Archimedes). Saadud tulemustest saab järeldada, et uurimisaladel toimub väga minimaalne naerugaasi sidumine/emiteerumine. Väikse naerugaasi voo üheks põhjuseks on kõigi uurimisalade kasvupinnaste väike paksus (alla 20 cm), sest protsessid (nitrifikatsioon/denitrifikatsioon), mille tulemusena tekib N₂O, toimuvad intensiivsemalt suurema tüsedusega kasvupinnases, kuna õhema kasvupinnase korral on kasvupinnas hapnikuga küllastunud (Carter et al., 2011).

Väikeste naerugaasi emissioonide põhjuseks on ka uurimisalade kasvupinnaste iseloom. Kõigi nelja uurimisala kasvupinnaseid saab liigitada kuivade kasvupinnaste klassi (kergesti läbikuivavad mullad), mis tähendab kõrgemaid hapniku kontsentratsioone pinnases (suurem osa pinnase poori ruumist on täidetud õhuga) ning denitrifikatsiooni protsessi puudumist. Suuremate naerugaasi emissioonide tekkimiseks on aladel aga vajalik anoksiline keskkond, sest naerugaasi tekib rohkem denitrifikatsiooni protsessi tulemusena (Luo et al 2013; Nicolini et al., 2013).

Negatiivsed naerugaasi vood viitavad uurimisaladel toimunud naerugaasi sidumisele. Saadud tulemustest saab järeldada, et uurimisaladel on denitrifikatsiooni protsess lõpuni viidud ning toimub N_2 emiteerimine. Naerugaasi sidumise põhjused aeroobsetes kuivades muldades pole siiani veel hästi mõistetavad. Naerugaasi sidumise oletatavaks põhjuseks on arvatud olevat kuivade muldade korral tõhustunud naerugaasi difusioon atmosfäärist uurimisala kasvupinnasesse ning NO_3^- puudumist. Naerugaasi võidakse seejärel hakata kasutama elektron aktseptorina denitrifikatsiooni protsessis, mis viib omakorda naerugaasi sidumiseni ning N_2 moodustumisele. Üheks naerugaasi sidumise põhjuseks on vähene lämmastiku sisaldus kasvupinnastes, mis aitab põhjendada Ujula ning Loomaaia haljaskatuste naerugaasi sidumist vaatlusperioodil (Stewart et al., 2012; Chapuis-Lardy et al., 2007).

Uurimisalade N_2O voog on mõjutatud kuiva-märja perioodi vahetumisest. Läbikuivanud pinnase niisutamisel kiireneb orgaanilise aine mineraliseerumine, mis omakorda intensiivistab nitrifikatsiooni protsessi. Veesisalduse suurenemisel aeglustub nitrifikatsiooni protsess ning kasvupinnasesse tekivad anaeroobsed kohad, kus saab hakata toimuma denitrifikatsiooni protsess. Pinnase niiskusesisalduse tulemusena hakkab N_2O emissioon suurenema, sest pinnasesse tekib järjest juurde anaeroobseid koldeid. Peale pinnase kuivamist hakkab N_2O emissioon vähenema, sest pinnase poorides väheneb vee sisaldus, mille tulemusena kaovad kasvupinnases olevad anaeroobsed kolded. Läbiviidud uuringus ei leitud uurimisaladelt mõõdetud niiskuse ja temperatuuri andmete ning N_2O voogude vahel tugevat korrelatsiooni. Samuti ei leitud seoseid sademete ning N_2O voogude vahel. Tugeva korrelatsiooni puudumise põhjuseks oli minimaalne N_2O voogude erinevus mõõteperioodil. Uurimisalade väikesed N_2O voogude erinevused olid tingitud kasvupinnase paksusest (õhuke kasvupinnas küllastub kiiresti hapnikuga) ning orgaanilise aine vähesusest (Carter et al., 2011; Batjes & Bridges, 1992).

Naerugaasi vood jäid uurimisperioodil vahemikku $-20,6 \mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1} - 14,6 \mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$, mis on kooskõlas Du jt (2006) poolt läbiviidud uuringu tulemustega, kus naerugaasi voogude tulemused (ümber arvatud) pool-kuival rohumaal jäid vahemikku $-20,8 \mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1} - 8,8 \mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ (Du et al., 2006).

Kuna mõõtetulemused jäid uurimisperioodil alla gaas-kromatograafi veapiiri, tuleks alade edasisel uurimisel kasutusele võtta täpsemad mõõtmismeetodid selgitamiseks välja uurimisalade naerugaasi voogude täpsemad suurused. Lisaks tuleks naerugaasi voogusid mõõta tihedama intervalliga kui kaks nädalat, sest naerugaasi voogudele on iseloomulikud hetkelised kõrged kontsentratsioonid (nt. peale vihma) (Nicolini et al., 2013). Samas saab kogutud naerugaasi andmete põhjal järeldada, et uurimisalad ei toimi oluliste naerugaasi emiteerijatena.

5.2. Temperatuur

Loomaaia mätaskatuse kõrgemate keskmiste ööpäevaste temperatuuride põhjusteks olid haljaskatuse kasvusubstraadi ja keskkonnatingimuste erinevused. Loomaaia mätaskatusel tõusis aluskatuse ööpäeva keskmine temperatuur kõrgemale võrreldes Ujula murukatusega seepärast, et Ujula murukatust ümbritsevad kolmanda korruse korterid, mis varjutavad seal asuva murukatuse. Varjutusefekti tulemusena on Ujula murukatusel olevad õhutemperatuurid märgatavalt madalamad kui Loomaaia mätaskatusel. Archimedese kergmurukatuse madalama ööpäevase temperatuuri põhjuseks oli kergmurukatuse suurem kasvukihi poorsus. Suure kasvupinnase poorsuse tulemusena langeb kasvukihi temperatuur öösel palju kiiremini, kui mullal põhinevatel haljaskatustel (Olszewski & Young, 2011; Sailor & Hagos, 2011).

Loomaaia mätaskatuse kõrgemate aluskatuse temperatuuride põhjuseks on ka kasvukihi suurem soojusmahtuvus. Paksema kasvukihi tõttu ei jahtu suurema soojusmahtuvusega mätaskatus nii kiiresti kui õhema kasvukihiga haljaskatused, mille tulemusena on mätaskatuse temperatuur hommikul kõrgem kui teistel haljaskatustel. Pikema kuumalaine korral toimub seeläbi pidev soojuse akumulatsioon mätaskatuse kasvupinnases, mille tulemusena saavutab mätaskatus kõrgemad ööpäevased temperatuurid kui õhema kasvupinnasega Archimedese ja Ujula haljaskatused (Gagliano et al., 2014; Teemusk & Mander, 2010).

Haljaskatuste temperatuuri isolatsioonivõimet mõjutab oluliselt kasvupinnaste niiskusesisaldus. Suurema niiskusesisaldusega kasvupinnased soojenevad ning jahtuvad palju aeglasemalt kui madalama niiskusesisaldusega kasvupinnased (Jim & Peng, 2012; Sailor & Hagos, 2011). Kasvupinnase niiskusesisalduse mõju haljaskatuste kasvupinnaste temperatuuridele oli näha ka haljaskatustelt mõõdetud kasvupinnase niiskuse tulemustest (vt. lisa 6). Samas külmuvad suurema niiskusesisaldusega kasvupinnased kiiremini läbi, mille tagajärjel võivad temperatuurid aluskatusel langeda miinuskraadidesse. Suurema veesisaldusega kasvupinnaste kiiremat külmumist oli näha esimesel suuremal külmaperioodil Ujula murukatusel.

Pehmel talvel ja hilissügisel, mil haljaskatuste pinnased olid külmunud/külmumas, oli näha, et välisõhu temperatuuril on väga minimaalne mõju aluskatuste temperatuuridele (Teemusk & Mander, 2010). Saadud tulemustest saab järeldada, et haljaskatused vähendavad aluskatuse temperatuuri ööpäevast kõikumist märgatavalt pikendades seeläbi aluskatuse eluiga.

Loomaaia mätaskatuse aluskatuse temperatuuri alla 0°C langemise põhjuseks pehmel talvel oli lumekatte puudumine Loomaaia mätaskatusel, samas kui Ujula ning Archimedese kergmurukatusel oli 2 cm paksune lumekate, mis toimis lisaisolatsioonina välistemperatuuri eest (Teemusk & Mander, 2010).

Haljaskatustelt mõõdetud aluskatuste temperatuuri tulemustele tuginedes saab järeldada, et kõige paremat isolatsiooni välise temperatuuri eest pakkus vaatlusperioodil Archimedese kergmurukatuse ning kõige halvemat Loomaaia mätaskatuse. Eelnevat järeldust kinnitab haljaskatustelt mõõdetud minimaalsete ja maksimaalsete temperatuuride vahe, kus suurim ööpäevane aluskatuse temperatuuri kõikumine toimus Loomaaia mätaskatusel ning väikseim Archimedese kergmurukatusel. Samuti mõõdeti kõrgeim ööpäevane aluskatuse temperatuur Loomaaia mätaskatusel ning väikseim Ujulas (oli varjutatud ümberkaudsetest korteritest). Saadud tulemus läheb kokku Teemuski & Manderi (2010) poolt läbiviidud uurimusega, kus mätaskatuse aluskatusel mõõdetud temperatuuride amplituud oli suurem vaatlusperioodil juuni 2004 – detsember 2007, kui kergmurukatuse aluskatuste temperatuuride amplituud (Teemusk & Mander, 2010).

5.3. Uurimisalade maapealne ja maa-alune biomass ning kasvupinnas

Maapealset biomassi produktsiooni mõjutavad haljaskatustel mitmed tegurid nagu valguse kättesaadavus, kasvupinnas, taimestiku liigiline koosseis, vegetatsiooniperioodi pikkus ja niiskurežiim (Thuring et al., 2010; Durhman & Rowe, 2007).

Biomassi analüüsi tulemustest leiti, et väiksema biomassi saagikusega aladeks olid oodatult õhema kasvukihiga Archimedese ning Ujula haljaskatused. Suurema taimse biomassiga aladeks olid түsedama kasvupinnasega Loomaaia mätaskatus ning Naage. Kuivaperioodil pakub paksem kasvupinnas paremat kasvukeskkonda taimestikule, sest түsedamal pinnasel on suuremad vee- ning toitainete varud. Samuti kaitseb paksem kasvupinnas talvel taimede juuri külma eest ning vähendab seega taimede väljalangemist. Põhjamaades on soovituslikuks kasvupinnase paksuseks hinnatud 10 cm, mis toetab uuringu tulemusi, kus kõrgem biomassi saagikus oli üle 10 cm paksuse kasvupinnasega aladel (Thuring et al., 2010; Durhman & Rowe, 2007; Rowe et al., 2006; Harper et al., 2005).

Lisaks kasvukihi paksusele mõjutas biomassi saagikust uurimisalade kasvupinnas koostis ning valgusolud. Archimedese kergmurukatuse väikese maapealse biomassi saagikuse üheks põhjuseks on kasvupinnase omadused (kergekruus). Kergkruusal põhineval kasvusubstraadil suudavad kasvada ainult vähenõudlikud taimeliigid, mille biomassi produktsioon on madal. Ujula murukatuse biomassi väikese saagikuse üheks peamiseks mõjutajaks on katusel olevad valgusolud. Ujula murukatusele langeb vähe päikesekiirgust, sest seda ümbritsevad murukatuse tasapinna ja kolmanda korruse korterid, mis varjutavad hommikuse ning õhtuse päikese (Thuring et al., 2010; Durhman & Rowe, 2007).

Uurimisalade maa-aluse biomassi saagikuse erinevuse põhjuseks on erinev taimestik. Kõrreliste taimede juurestik on suurem ning paremini välja arenenum kui loopealse koosluse taimestikul. Seda kinnitas ka murukatuste maa-aluse biomassi saagikus, kus suurima maa-aluse biomassiga uurimisalaks oli Naage. Murukatuste hulgast oli suurima saagikusega Loomaaia mätaskatus, kus kasvasid kõrrelised (lamba-aruhein). Väikseima maa-aluse saagikusega alaks oli alvari kooslusega Archimedese kergmurukatatus (Thuring et al., 2010; Durhman & Rowe, 2007).

Võrreldes Naage uurimisala kasvupinnase keemilise koostise tulemusi (tabel 5) haljaskatustelt saadud tulemustega on näha, et haljaskatused on toitainetest märgatavalt vaesunud. Võrreldes Naagega on lämmastiku kontsentratsioon haljaskatuste kasvupinnases vähenenud kõige vähem Loomaaia mätaskatusel (3 korda) ja kõige rohkem Archimedese kergmurukatusel (10 korda). Haljaskatuste süsiniku sisaldus oli vähenenud kõige rohkem Archimedese kergmurukatusel (7 korda) ning kõige vähem Loomaaia mätaskatusel (2 korda). Kõige suurem vähenemine oli toimunud fosfori osas. Naagega võrreldes oli kõige suurem fosfori vähenemine kasvupinnases toimunud Archimedese kergmurukatusel (22 korda) ja kõige väiksem fosfori vähenemine Loomaaia mätaskatusel (3 korda). Väga suur fosfori äraanne võrreldes Naagega oli toimunud ka Ujula murukatusel (9 korda). Haljaskatuste kasvupinnase kaltsiumi sisaldusest oli näha, et kõige väiksem vähenemine võrreldes Naagega oli samuti toimunud Loomaaia mätaskatusel (1,5 korda) ning kõige suurem Archimedese kergmurukatusel (3 korda).

Haljaskatuste kasvupinnase toitainete sisaldus on piiratud nende rajamisel kasutatud mulla toitainete sisaldusega. Mõningal määral võib toitaineid kasvupinnastesse lisanduda kaudsete meetoditega (sademed, lindude väljaheidet), kuid nende mõju on ajutine või lokaalne. Vähese toitainete lisandumise tulemusena on haljaskatuste kasvupinnased praeguseks taimedele vajalikest toitainetest vaesunud (tabel 5), mistõttu on vähenenud ka haljaskatuste taimestiku maa-aluse ja maapealse biomassi saagikus võrreldes Naage võrdlusalaga. Peamiselt toimub toitainete kadu haljaskatustelt pinnase läbiuhtumisel vihmaveega, mida omakorda soodustab kasvupinnase suur poorsus. Taimestiku biomassi süsiniku sisalduse suurendamiseks tuleks uuritud haljaskatuseid hooldada (külvata hävinud taimestiku asemele uusi taimi) ning võimalusel ka väetada (Rowe et al., 2006).

Kõigi nelja uurimisala kasvupinnastest leiti ka erinevaid raskemetalle (Zn ja Pb). Peamiseks Pb allikaks linnakeskkonnas on ajalooliselt olnud pliilisandiga kütused (Del Rio-Salas et al., 2012). Haljaskatustest oli kõige suurema Pb sisaldusega kasvupinnaseks Loomaaia mätaskatus, mis on põhjendatav Tallinna intensiivsema liiklusega. Madalama liiklusintensiivsusega Tartu uurimisaladel leidis Pb madalamates kontsentratsioonides. Kõrgeima Zn sisaldusega uurimisalaks oli Loomaaia mätaskatus, kus Zn sisaldus ületas enam kui kahekordselt teiste uurimisalade kasvupinnaste Zn sisaldusi. Oluliselt kõrgema Zn sisalduse põhjuseks on lennukoridor, mis läheb üle Loomaaia mätaskatuse (Boyle, 1996).

Katusehaljastuse süsiniku sidumise võimet mõjutavad mitmed tegurid nagu haljaskatuse ja taimestiku vanus. Taimestiku süsiniku sidumise võime haljaskatustel on suurim esimesel paaril aastal pärast murukatuse rajamist kuna esimestel aastatel on taimede kasv kõige kiirem, sest kasvupinnases on piisavas koguses toitaineid (Getter et al., 2009). Uuritud kolmest haljaskatusest olid kaks (Loomaaed ja Archimedes) rajatud 2003. aastal ning üks (Ujula) 2007. aastal. Kogutud biomassi proovide süsinikusisaldusest oli näha, et Archimedese kergmurukatusel oli üks madalamaid süsinikusisaldusi nii maapealses kui maa-aluses biomassis. Archimedese kergmurukatuse vaatlusel oli näha ka taimede kidur kasv, mis andis märku katusel valitsevast toitainete puudusest. Toitainete vähesust kasvupinnases kinnitas ka kasvupinnasest võetud proovide madal orgaanilise aine, lämmastiku ning fosfori sisaldused (tabel 5). Kasvupinnase toitaine vähesust oli näha ka Ujula murukatusest kogutud kasvupinnase proovide tulemustest (Rowe et al., 2006).

Uurimisaladelt saadud biomassi süsiniku sisalduse tulemused olid sarnased Getteri jt (2009) poolt läbi viidud uuringuga, kus leiti, et ekstensiivsete haljaskatuste maapealse biomassi tootmine oli uurimisaladel keskmiselt $1680 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ning maa-aluse biomassi süsiniku sisalduseks saadi keskmiselt $1070 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Getter et al., 2009). Käesolevas uuringus jäid uurimisalade maapealse biomassi süsiniku sisaldused vahemikku $527 - 1804 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ning maa-aluse biomassi süsiniku sisaldused $827 - 1266 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

Eeldusel, et maapealne biomass on kevadel null ning maa-aluses biomassis ei toimu vegetatsiooni perioodil olulisi erinevusi saab anda hinnangu uurimisalade C-linge kiirusele. Süsinikuringe hindamine toimus biomassi maapealse süsiniku sisalduse jagamisel kolme kuu keskmise (septembri, oktoobri ning novembri) ökosüsteemi hingamisega. Saadud tulemustest saab järeldada, et kõige kiirem süsinikuringe on oktoobris kogutud biomassi andmete põhjal Ujula ning Naage uuringualadel. Kõige aeglasem süsinikuringe oli Archimedese haljaskatusel. Aeglase süsinikuringe põhjuseks on Archimedese kergmurukatusel kasvavad kanarbikud ning kukeharjad, mis on raskemini lagundatavad kui kõrrelised (Hassan et al., 2014).

Kokkuvõte

Käesoleva magistritöö raames mõõdeti (2014. aasta aprillist kuni 2015. aasta märtsini) kasvuhoonegaaside voogusid pimekambri meetodil kolmelt haljaskatuselt (Archimedese kergmurukatus, Ujula murukatus ning Loomaaia mätaskatus) ning võrdlusalalt (Naage). Magistritöö eesmärgiks oli leida gaasirežiimilt kõige sarnasem haljaskatus looduslikule paepealsele mullal asuvale kooslusele. Paepealne muld valiti võrdlusalaks seepärast, et ta on õhukese mullakihiga ning aluskivimiks on paas, mis on väga sarnane haljaskatustel valitsevatele oludele.

Kasvuhoonegaaside andmetele lisaks mõõdeti uurimisalade kasvupinnaste temperatuure, õhutemperatuure ning niiskusesisaldust. Samuti viidi 2014. aasta sügisel läbi kasvupinnase ning maapealse ja maa-aluse biomassi proovide kogumine ning analüüsimine (OÜ Keskkonnauuringute Keskuse Tartu filiaali laboris).

CO₂ emissioonid sõltusid aastaajast ning uurimisalade vahelised CO₂ emissioonid erinesid suurel määral (keskmine CO₂ voog erines uurimisalade vahel 4-kordselt). Suurimad CO₂ vood mõõdeti kõigil neljal uurimisalal juulis ning väiksemad veebruaris (v.a. Ujula, kus veebruaris toimus CO₂ sidumine). Pimekambri meetodil mõõdetud CO₂ emissioonide alusel erines Naage ala keskmine CO₂ emissioon statistiliselt oluliselt Ujula ning Archimedese murukatuste emissioonidest. Haljaskatuste omavahelisel võrdlemisel erinesid statistiliselt usaldusväärselt Archimedese kergmurukatus ja Loomaaia mätaskatus.

Uurimisperioodil toimus kõigil neljal uurimisalal keskmiselt CH₄ sidumine. Suurim keskmine metaani sidumine toimus Naage võrdlusalal ning haljaskatustest oli suurima keskmise CH₄ sidumisvõimega Loomaaia mätaskatus. Naagel toimus suurim keskmine CH₄ sidumine aprillis, samas kui haljaskatuste puhul oli suurim keskmine CH₄ sidumine suvel (juunis Loomaaias, juulis Ujulas) ning sügisel (septembris Archimedesel). CH₄ voogudelt erinesid Naage alast statistiliselt usaldusväärselt Ujula ning Archimedese haljaskatused. Haljaskatuste omavahelisel analüüsimisel selgus, et Ujula ja Archimedese haljaskatused erinesid CH₄ voo alusel statistiliselt usaldusväärselt Loomaaia mätaskatusest.

Keskmine N₂O vood erinesid uurimisaladel vahemikus -0,3 µg N m⁻² a⁻¹ (Loomaaed) – 1,7 µg N m⁻² a⁻¹ (Archimedes). N₂O emiteerijatena toimisid Archimedese ning Naage uurimisalad ning

sidujatena Ujula ning Loomaaia haljaskatused. N₂O voogudelt erinesid statistiliselt usaldusväärsetl Ujula kui ka Loomaaia haljaskatused Archimedese kergmurukatusest ning Naage uurimisalast.

Keskkonnateguritest mõjutas enim kasvuhoonegaaside voogusid temperatuur. Kõige rohkem mõjutasid keskkonnaparameetrid CO₂ voogusid. Tugevaimad korrelatsioonid leiti CO₂ voo ja uurimisaladelt mõõdetud aluskatuse- ning haljaskatuse pinnatemperatuuridega. CO₂ voo ja kasvupinnase niiskusesisalduse vahel leiti tugev korrelatsioon Archimedese ning Naage uurimisaladel. CH₄ vood olid kõige tugevamas seoses uurimisaladelt mõõdetud aluskatuse temperatuuridega. CH₄ voo ja kasvupinnase niiskusesisalduse vahel esines tugev korrelatsioon ainult Archimedese kergmurukatusel. N₂O voogude ja keskkonnaparameetrite vahel tugevaid korrelatsioone ei leitud.

Maksimaalne ööpäevane aluskatuse temperatuur registreeriti Loomaaia mätaskatusel. Haljaskatustest tõusis aluskatuse maksimaalne ööpäevane temperatuur kõige vähem Ujula murukatusel. Kõige kõrgem keskmine ööpäevane temperatuur vaatlusperioodil oli Archimedese kergmurukatusel ning väiksem Ujula murukatusel. Minimaalne ööpäevane temperatuur uurimisperioodil mõõdeti Ujula murukatusel. Suurima aluskatuse temperatuuri kõikumisega haljaskatuseks oli Loomaaia mätaskatus ning väiksema temperatuuri kõikumisega haljaskatuseks oli Archimedese kergmurukatus.

Suurima kuivaine maapealse biomassi saagikusega uurimisalaks oli Loomaaia mätaskatus. Maa-aluse keskmise biomassi võrdlemisel leiti, et kõige suurem juurte sisaldus pindala ühiku kohta oli Naagel ning haljaskatustest Loomaaia mätaskatusel. Suurim süsiniku sisaldus maapealses biomassis oli Loomaaia mätaskatusel ning väiksem Ujula murukatusel. Maa-aluses biomassis oli kõige suurem süsiniku sisaldus Naage uurimisalal ning haljaskatustest Loomaaia mätaskatusel.

Saadud tulemuste põhjal saab teha järgnevad järeldused:

- Naage looduslikule paepealsele alale on CO₂ ja CH₄ voogudelt kõige sarnasem Loomaaia mätaskatus. N₂O voogudelt on Naagele kõige sarnasemaks haljaskatuseks Archimedese kergkruusal põhinev kergmurukatus.
- Kõik neli uurimisala (Archimedese, Ujula, Loomaaed ja Naage) sidusid aasta keskmiselt CH₄.

- Kõige paremat kaitset välistemperatuuri muutuse eest pakkus Archimedese kergmurukatus ning kõige halvemat Loomaaia mätaskatus.
- Kõigi uuritud haljaskatuste kasvupinnased olid toitainetest vaesunud, mille tulemusena tuleks mõelda nende väetamisele.
- Kõige kiirem C-ringe on oktoobris kogutud biomassi andmete põhjal Ujula ning Naage uuringualadel. Kõige aeglasem C-ringe oli Archimedese haljaskatusel.

Tulevikus tuleks teostada veel täiendavaid uuringuid (mõõtmised dünaamilise läbipaistva kambriga, äravoolu vee kogumine), selleks et välja selgitada erinevat tüüpi haljaskatuste täpne süsiniku bilanss ja globaalse soojenemise potentsiaal.

Summary

Fluxes of greenhouse gases from green roofs and limestone soil

The aim of this study was to find out which of the green roofs in Tartu and Tallinn resemble the most rendzina soil. Limestone soil was chosen as reference area because of its thin layer of soil and its limestone bedrock. The greenhouse gas fluxes were measured (April 2014 to March 2015) using the closed chamber-method on three different green roofs (Archimedes light weight aggregate green roof, Ujula green roof and sod roof of Tallinn Zoo) and Naage reference area. Archimedes and Ujula green roofs belong to an extensive green roof group and the sod roof of Tallinn Zoo classifies as semi-intensive green roof.

In addition, the soil temperature, air temperature and soil moisture were measured. Also, soil and above- and belowground biomass samples were collected from each site in autumn 2014. Collected samples were analysed in OÜ Estonian Environmental Research Centre Tartu branch lab.

Emissions of carbon dioxide depended on the time of year and varied to a large extent (research sites differed in mean CO₂ outflow 4 times). Highest fluxes of CO₂ were measured from each site in July and the lowest in February (except for Ujula green roof where in February was noticed CO₂ uptake). Results showed that CO₂ emissions differed significantly between Naage reference area and Ujula and Archimedes green roofs. Also, the Archimedes green roof's CO₂ emission differed in a statistically significant way from the sod roof of Tallinn Zoo.

The mean fluxes of CH₄ showed CH₄ uptake activity in all research areas. The biggest uptake was found in Naage reference area and the green roof with the biggest mean CH₄ uptake was the sod roof of Tallinn Zoo. In Naage the biggest CH₄ uptake was measured in April. The biggest CH₄ uptake among green roofs was measured in summer (in June at Tallinn Zoo sod roof, in July at Ujula green roof) and in autumn (in September at Archimedes green roof). There was found statistically significant difference in measured fluxes of CH₄ at Ujula and Archimedes green roofs and Naage reference area. There was also found that fluxes of CH₄ at Archimedes and Ujula green roofs differed in a statistically significant way from the sod roof of Tallinn Zoo.

Mean fluxes of N₂O varied between research areas from -0,3 μg N m⁻² y⁻¹ (Tallinn Zoo) to 1,7 μg N m⁻² y⁻¹ (Archimedes). While Archimedes and Naage acted as N₂O emitters, acted Naage reference area and the sod roof of Tallinn Zoo as uptakers of N₂O. Ujula and Tallinn Zoo research areas fluxes of N₂O differed in a statistically significant way from Naage and Archimedes research areas.

Out of environmental factors was temperature the one that affected greenhouse fluxes of gas the most. The environmental factors influenced the most CO₂ out of greenhouse gases. The strongest correlations were found between fluxes of CO₂ and temperatures of green roof surface and base roof. Also, a strong correlation was found between fluxes of CO₂ and moisture at research sites Archimedes and Ujula. The strongest correlation was between CH₄ and the temperatures of the base roofs in research areas. Results showed a strong correlation between flux of CH₄ and soil moisture only at Archimedes green roof. Between fluxes of N₂O and environmental factors was not found any strong correlation.

The highest circadian temperature was recorded at sod roof of Tallinn Zoo. The maximum circadian temperature rose the least at Ujula green roof. The mean circadian temperature was highest at Archimedes green roof and the lowest at Ujula green roof. Minimal circadian temperature was measured at Ujula green roof. The green roof with maximal fluctuations in base roof temperature was the sod roof of Tallinn Zoo and minimal fluctuations in base roof temperature were recorded at Archimedes green roof.

The results show that biomass yield was biggest at Tallinn Zoo. Comparison of belowground biomass mean showed that the highest roots content per unit area was found at Naage reference area and out of the green roofs had the highest roots content the sod roof of Tallinn Zoo. The carbon content in aboveground biomass was highest at Tallinn Zoo and lowest at Ujula green roof. The highest carbon content in belowground biomass was recorded at Naage reference area and the sod roof of Tallinn Zoo.

Based on the results of this paper it can be concluded:

- The sod roof of Tallinn Zoo had the most similar fluxes of CO₂ and CH₄ compared to Naage natural limestone soil area. When it comes to fluxes of N₂O was the most similar Archimedes green roof.

- Year average of all four research areas (Archimedes, Ujula, Tallinna Zoo and Naage) showed uptake of methane.
- The best and worst protection against the fluctuations of temperature had respectively Archimedes green roof and sod roof of Tallinn Zoo.
- All of the green roofs were nutrient-impoverished and therefore fertilization should be considered.
- Based on the biomass data collected in October has the Naage reference area and Ujula green roof the fastest carbon cycle. The slowest carbon cycle was recorded at Archimedes green roof.

To find out the exact carbon balance of different types of green roofs and the potential of global warming further and extensive research would be needed (measurements with dynamic transparent chamber and rainfall runoff chemical analyse).

Tänuavaldused

Töö autor avaldab suurt tänu oma juhendajale Alar Teemuskile oskusliku juhendamise ja õpetamise eest. Lisaks soovin tänada kõiki teisi Tartu Ülikooli Geograafia osakonna töötajaid, kes on abiks olnud töö valmimise juures. Nendeks olid Raili Hansen, Järvi Järveoja, Arno Kanal, Ain Kull, Martin Maddison, Ülo Mander, Ivika Ostonen-Märtin, Kaido Soosaar, Mae Uri.

Suured tänusõnad ka Archimedese Sihtasutusele, Tallinna Loomaaiale ning Ujula 2a ühistule, tänu kellele sai see magistritöö üldse võimalikuks.

Kasutatud kirjandus

Almagro, M., Lopez, J., Querejeta, I. J., Martinez-Mena, M., 2009. Temperature dependence of soil CO₂ efflux is strongly modulated by seasonal patterns of moisture availability in a Mediterranean ecosystem. *Soil Biology & Biochemistry*, 41: 594-605.

Arold I., 2005. Eesti maastikud. Tartu: Tartu Ülikooli Kirjastuse trükikoda.

Batjes, N. H., Bridges, E. M., 1992. A review of soil factors and processes that control fluxes of heat, moisture and greenhouse gases. Technical paper 23, International Soil Reference and Information Centre, Wageningen.

Beecham, S., Razzaghamanesh, M., 2015. Water quality and quantity investigation of green roofs in a dry climate. *Water research*, 70: 370-384.

Berardi, U., GhaffarianHoseini, A., GhaffarianHoseini, A., 2014. State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, 115: 411-428.

Berghage, D. R., Beattie, D., Jarrett, R. A., Thuring, C., Razaei, F., O'Conner, P. T., 2009. Green roofs for stormwater runoff control. EPA 600-R-09-026. National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency.

Berndtsson, C. J., 2010. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*, 36: 351-360.

Berretta, C., Poë, S., Stovin, V., 2014. Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: The influence of vegetation and substrate characteristics. *Journal of Hydrology*, 511: 374-386.

Blank, L., Vasl, A., Levy, S., Grant, G., Kadas, G., Dafni, A., Blaustein, L., 2013. Directions in green roof research: A bibliometric study. *Building and Environment*, 66: 23-28.

Borken, W., Matzner, E., 2009. Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils. *Global Change Biology*, 15: 808-824.

Boyle, A. K., 1996. Evaluating particulate emissions from jet engines: Analysis of chemical and physical characteristics and potential impacts on coastal environments and human health. *Transportation Research Record No. 1517*.

Buchmann, N., Guehl, J. M., Barigah, T. S., Ehleringer, J. R., 1997. Interseasonal comparison of CO₂ concentrations, isotopic composition, and carbon dynamics in an Amazonian rainforest (French Guiana). *Oecologia*, 110: 120-131.

Carter, S. M., Ambus, P., Albert, R. K., Larsen, S. K., Andersson, M., Priemé, A., Linden, van der L., Beier, C., 2011. Effects of elevated atmospheric CO₂, prolonged summer drought and temperature increase on N₂O and CH₄ fluxes in a temperate heathland. *Soil Biology & Biochemistry*, 43: 1660-1670.

- Chang, S. C., Tseng, K. H., Hsia, Y. J., Wang, C. P., Wu, J. T.,** 2008. Soil respiration in a subtropical montane cloud forest in Taiwan. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148: 788-798.
- Chapuis-Lardy, L., Wrage, N., Metay, A., Chotte, J.-L., Bernoux, M.,** 2007. Soils, a sink for N₂O? A review. *Global Change Biology*, 13: 1-17.
- Chen, F. C.,** 2013. Performance evaluation and development strategies for green roofs in Taiwan: A review. *Ecological Engineering* 52: 51-58.
- Conant, R. T., Klopatek, J. M., Malin, R. C., Klopatek, C. C.,** 1998. Carbon pools and fluxes along an environmental gradient in northern Arizona. *Biogeochemistry*, 43: 43-61.
- Connelly, M., Hodgson, M.,** 2011. Laboratory experimental investigation of the acoustical characteristics of vegetated roofs. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 129: 2393.
- Cutlip, J.,** 2006. Green roofs: a sustainable technology. UC Davis Extension: Sustainability and the Built Environment.
- Del Rio-Salas, R., Ruiz, J., De la O-Villanueva, M., Valencia-Moreno, M., Moreno-Rodríguez, V., Gómez-Alvarez, A., Grijalva, T., Mendivil, H., Paz-Moreno, F., Meza-Figueroa, D.,** 2012. Tracing geogenic and anthropogenic sources in urban dusts: Insights from lead isotopes. *Atmospheric Environment*, 60: 202-210.
- Dinsdale, S., Pearen, B., Wilson, C.,** 2006. Feasibility study for green roof application on queen's university campus. Queen's physical plant services.
- Du, R., Lu, D., Wang, G.,** 2006. Diurnal, seasonal, and inter-annual variations of N₂O fluxes from native semi-arid grassland soils of inner Mongolia. *Soil Biology & Biochemistry*, 38: 3474-3482.
- Durhman, K. A., Rowe, D. B.,** 2007. Effect of Substrate Depth on Initial Growth, Coverage, and Survival of 25 Succulent Green Roof Plant Taxa. *Hortscience*, 42(3): 588-595.
- Gagliano, A., Detommaso, M., Nocera, F., Patania, F., Aneli, S.,** 2014. The retrofit of existing buildings through the exploitation of the green roofs – a simulation study. *Energy Procedia*, 62: 52-61.
- Getter, L. K., Rowe, B. D., Robertson, P. G., Cregg, M. B., Andresen, A. J.,** 2009. Carbon sequestration potential of extensive green roofs. *Environmental Science and Technology* 43(19): 7564-7570.
- Getter, L. K., Rowe, B. D.,** 2006. The role of extensive green roofs in sustainable development. *Hortscience*, 41(5): 1276-1285.
- Gill, E. S., Handley, F. J., Ennos, R. A., Pauleit, S.,** 2007. Adapting cities for climate change: the role of green infrastructure. *Built Environment*, 3(1): 115-133.

- Gough, C. M., Seiler, J. R.,** 2004. The influence of environmental, soil carbon, root, and stand characteristics on soil CO₂ efflux in loblolly pine plantations located on the South Carolina Coastal Plain. *Forest Ecology and Management*, 191: 353-363.
- Gregoire, G. B., Clausen, C. J.,** 2011. Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality. *Ecological Engineering*, 37: 963-969.
- Harper, C. W., Blair, M. J., Fay, A. P., Knapp, K. A., Carlisle, D. J.,** 2005. Increased rainfall variability and reduced rainfall amount decreases soil CO₂ flux in a grassland ecosystem. *Global Change Biology*, 11: 322-344.
- Hassan, W., David, J., Abbas, F.,** 2014. Effect of type and quality of two contrasting plant residues on CO₂ emission potential of Ultisol soil: Implications for indirect influence of temperature and moisture. *Catena*, 114: 90-96.
- Ismail, A., Samad, M. H. A., Rahman, A. M. A., Yeok, F. S.,** 2012. Cooling potentials and CO₂ uptake of *Ipomoea pes-caprae* installed on the flat roof of a single storey residential building in Malaysia. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 35: 361-368.
- Jaffal, I., Ouldboukhitine, S., Belarbi, R.,** 2012. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy*, 43: 157-164.
- Jim, Y. C., Peng, H. L. L.,** 2012. Substrate moisture effect on water balance and thermal regime of a tropical extensive green roof. *Ecological Engineering*, 47: 9-23.
- Jim, C. Y., Tsang, W. S.,** 2011. Biophysical properties and thermal performance of an intensive green roof. *Building and Environment*, 46: 1263-1274.
- Jäckel, U., Schnell, S., Conrad, R.,** 2001. Effect of moisture, texture and aggregate size of paddy soil on production and consumption of CH₄. *Soil Biology & Biochemistry*, 33: 965-971.
- Kammann, C., Grünhage, L., Jäger, J. H., Wachinger, G.,** 2001. Methane fluxes from differentially managed grassland study plots: the important role of CH₄ oxidation in grassland with a high potential for CH₄ production. *Environmental Pollution*, 115(2): 261-273.
- Kanerva, T.,** 2007. Fluxes of N₂O, CH₄ and CO₂ in a meadow ecosystem exposed to elevated ozone and carbon dioxide for three years. *Environmental Pollution*, 145: 818-828.
- Le Mer, J., Roger, P.,** 2001. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *European Journal of Soil Biology*, 37: 25-50.
- Li, J., Wai, W.H.O., Li, S. Y., Zhan, J., Ho, A. Y., Li, J., Lam, E.,** 2010. Effect of green roof on ambient CO₂ concentration. *Building and Environment*, 45: 2644-2651.
- Liu, C., Holst, J., Yao, Z., Brüggemann, N., Butterbach-Bahl, K., Han, S., Han, X., Tas, B., Susenbeth, A., Zheng, X.,** 2009. Growing season methane budget of an Inner Mongolian steppe. *Atmospheric Environment*, 43: 3086-3095.

- Liu, Y. K., Baskaran, A.,** 2005. Using garden roof systems to achieve sustainable building envelopes. *Construction Technology Update*, National Research Council Canada, 65.
- Liu, K.K.Y., Minor, J.,** 2005. NRCC-48204: Performance evaluation of an extensive green roof. *Greening Rooftops for Sustainable Communities*. Washington D.C., p. 1-11.
- Luo, J. G., Kiese, R., Wolf, B., Butterbach-Bahl, K.,** 2013. Effects of soil temperature and moisture on methane uptake and nitrous oxide emissions across three different ecosystem types. *Biogeosciences*, 10: 3205-3219.
- Mander, Ü., Kuusemets, V., Lõhmus, K., Muring, T., Teiter, S., Augustin, J.,** 2003. Nitrous oxide, dinitrogen and methane emission in a subsurface flow constructed wetland. *Water Science and Technology*, 48: 135-142.
- Merino, A., Pérez-Batallón, P., Macías, F.,** 2004. Responses of soil organic matter and greenhouse gas fluxes to soil management and land use changes in a humid temperate region of southern Europe. *Soil Biology and Biochemistry*, 36: 917-925.
- Mickovski, B. S., Buss, K., McKenzie, M. B., Sokmener, B.,** 2013. Laboratory study on the potential use of recycled inert construction waste material in the substrate mix for extensive green roofs. *Ecological Engineering*, 61: 706-714.
- Morau, D., Rakotondramiarana, T. H., Ranaivoarisoa, F. T., Andriamamonjy, L. A.,** 2014. Thermal behavior of green roof in Reunion Island: Contribution towards a net zero building. *Energy Procedia*, 57: 1908-1921.
- Nicolini, G., Castaldi, S., Fratini, G., Valentini, R.,** 2013. A literature overview of micrometeorological CH₄ and N₂O flux measurements in terrestrial ecosystems. *Atmospheric Environment*, 81: 311-319.
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N.,** 2007. Green roofs as urban ecosystems: Ecological structures, functions, and services. *Bioscience*, 57(10): 823-833.
- Olivieri, F, Di Perna, C., D’Orazio, M., Olivieri, L., Neila, J.,** 2013. Experimental measurements and numerical model for the summer performance assessment of extensive green roofs in a mediterranean coastal climate. *Energy Build*, 63: 1-14.
- Olszewski, W. M., Young, A. C.,** 2011. Physical and Chemical Properties of Green Roof Media and Their Effect on Plant Establishment. *Journal of Environmental Horticulture*, 29(2): 81-86.
- Raich, J. W., Schlesinger, W. H.,** 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus* 44B, 81-99.
- Renterghem, V. T., Botteldooren, D.,** 2008. Numerical evaluation of sound propagating over green roofs. *Journal of Sound and Vibration*, 317: 781-799.

- Rowe, D. B., Monterusso, M. A., Rugh, C. L.,** 2006. Assessment of heatexpanded slate and fertility requirements in green roof substrates. *HortTechnology*, 16(3): 471-477.
- Sailor, J. D., Hagos, M.,** 2011. An updated and expanded set of thermal property data for green roof growing media. *Energy and Buildings*, 43: 2298-2303.
- Santamouris, M.,** 2014. Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103: 682-703.
- Savio, P., Rosenzweig, C., Solecki, D. W., Slosberg, B. R.,** 2006. Mitigating New York City's heat island with urban forestry, living roofs, and light surfaces. New York City Regional Heat Island Initiative. The New York State Energy Research and Development Authority, Albany, NY.
- Shrestha, B. M., Sitaula, B. K., Singh, B. R., Bajracharya, R. M.,** 2004. Fluxes of CO₂ and CH₄ in soil profiles of a mountainous watershed of Nepal as influenced by land use, temperature, moisture and substrate addition. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 68: 155-164.
- Speak, F. A., Rothwell, J. J., Lindley, S. J., Smith, L. C.,** 2013. Reduction of the urban cooling effects of an intensive green roof due to vegetation damage. *Urban Clim*, 3: 40-55.
- Stewart, J. K., Brummell, E. M., Farrell, E. R., Siciliano, D. S.,** 2012. N₂O flux from plant-soil systems in polar deserts switch between sources and sinks under different light conditions. *Soil Biology & Biochemistry*, 48: 69-77.
- Stovin, V., Vesuviano, G., Kasmin, H.,** 2012. The hydrological performance of a greenroof test bed under UK climatic conditions. *Journal of Hydrology*, 414–415: 148-161.
- Zhang, X., Shen, L., Tam, Y. W. V., Lee, Y. W. W.,** 2011. Barriers to implement extensive green roof systems: a Hong Kong study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16: 314-319.
- Tan, Y. P., Sia, A.,** 2005. A pilot green roof research project in Singapore. In: Proceedings of third annual greening rooftops for sustainable communities conference, Awards and Trade Show, Washington, DC; May 4-6.
- Teemusk, A., Mander, Ü.,** 2010. Temperature regime of planted roofs compared with conventional roofing systems. *Ecological Engineering*, 36: 91-95.
- Theodosiou, T.,** 2009. Green roofs in buildings: thermal and environmental behaviour. *Advances in Building Energy Research*, 3(1): 271-288.
- Thuring, E. C., Berghage, D. R., Beattie, J. D.,** 2010. Green roof plant responses to different Substrate types and depths under various drought conditions. *HortTechnology*, 20(2): 395-401.
- Tóth, G., Montanarella, G., Stolbovoy, V, Máté, F., Bódis, K., Jones, A., Panagos, P., Van Liedekerke, M.,** 2008. Soils of the European Union. Institute for Environment and Sustainability Land Management and Natural Hazards Unit Action Soil.

VanWoert, D. N., Rowe, B. D., Andresen, A. J., Rugh, L. C., Fernandez, T. R., Xiao, L., 2005. Green roof stormwater retention: Effects of roof surface, slope, and media depth. *Journal of Environmental Quality*, 34: 1036-1044.

Yang, S. H., Kang, J., Choi, S M., 2012. Acoustic effects of green roof systems on a lowprofiled structure at street level. *Building and Environment*, 50: 44-55.

Williams, G. S. N., Rayner, P. J., Raynor, J. K., 2010. Green roofs for a wide brown land: opportunities and barriers for rooftop greening in Australia. *Urban Forestry & Urban Greening*, 9: 245-251.

Wu, X., Yao, Z., Brüggemann, N., Shen, Y. Z., Wolf, B., Dannenmann, M., Zheng, X., Butterbach-Bahl, K., 2010. Effects of soil moisture and temperature on CO₂ and CH₄ soil atmosphere exchange of various land use/cover types in a semi-arid grassland in Inner Mongolia, China. *Soil Biology & Biochemistry*, 42: 773-787.

Internetiallikad:

Maa-ameti geoportaal (<http://geoportaal.maaamet.ee>). (Vaadatud 19.04.2015).

Lisad

Lisa 1.



Pilt 1. Archimedese kergmurukatus ja selle kergkruusakiht.

Lisa 2



Pilt 2. Ujula murukatus ja selle profiilvaade.

Lisa 3



Pilt 3. Loomaia mätaskatus ja selle profiilvaade.

Lisa 4



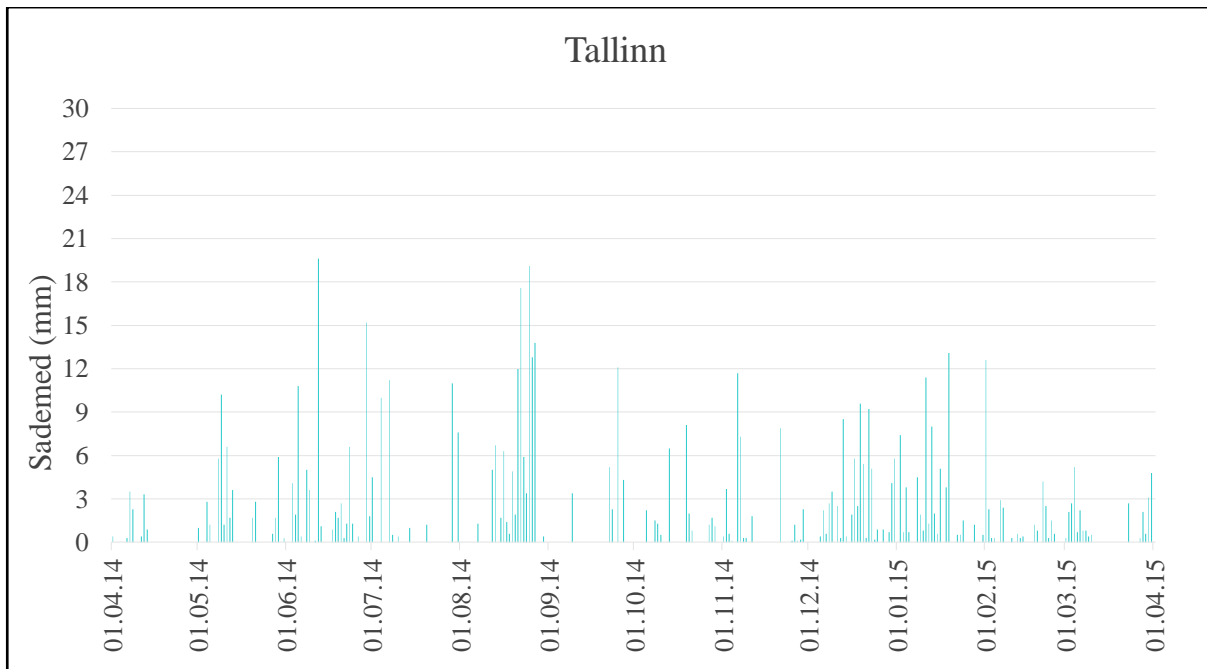
Pilt 4. Naage võrdlusala ja selle profiilvaade.

Lisa 5

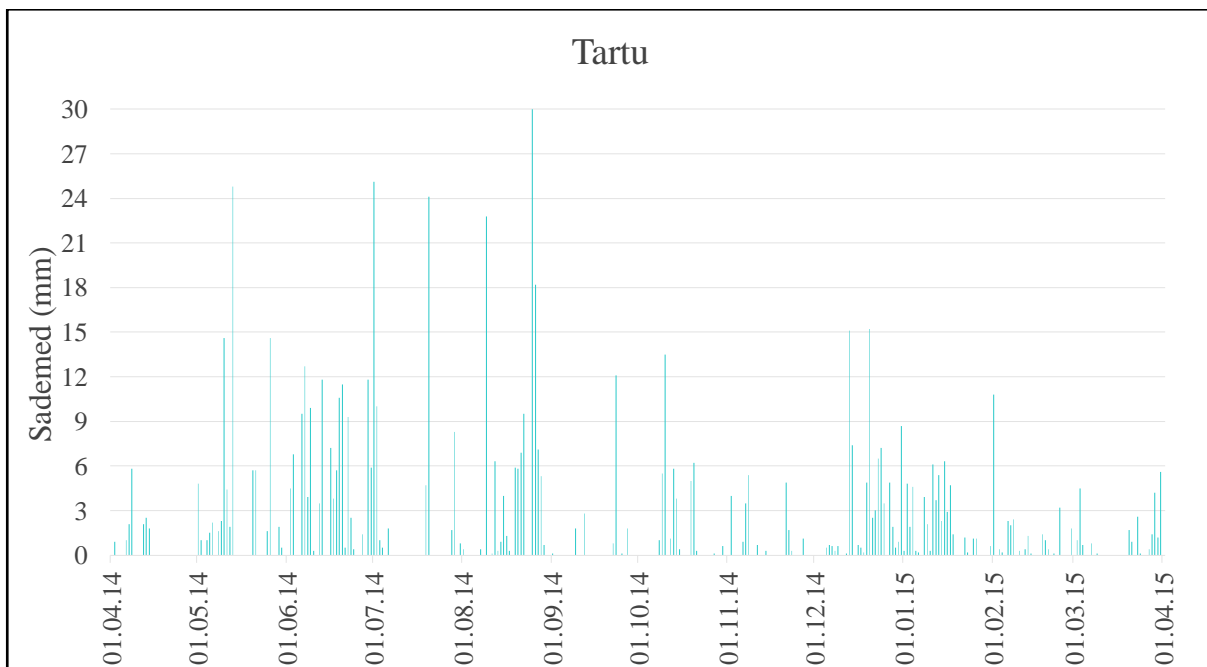
Tabel 1. Uurimisalade keskmised kasvupinnaste niiskusesisaldused.

kuupäev	23.07.15	07.08.15	19.08.15	02.09.15	01.10.15	14.10.15	28.10.15	11.11.15	25.11.15	09.12.15	19.12.15	06.01.15	20.01.15	02.02.15	16.02.15	02.03.15	17.03.15
Ujula	0,13	0,11	0,19	0,47	0,46	0,50	0,50	0,49	jääs	jääs	0,37	jääs	jääs	jääs	jääs	0,50	andur katki
Archimedes	0,09	0,07	0,13	0,16	0,14	0,20	0,18	0,19	jääs	jääs	0,25	jääs	jääs	jääs	jääs	0,28	0,18
kuupäev	23.07.15	04.08.15	18.08.15	31.08.15	02.10.15	13.10.15	27.10.15	10.11.15	24.11.15	08.12.15	20.12.15	05.01.15	19.01.15	01.02.15	15.02.15	01.03.15	16.03.15
Loomaaed	0,07	0,12	puudus	0,28	0,21	0,26	0,31	0,34	0,24	0,40	0,44	0,39	jääs	jääs	jääs	0,51	0,32
Naage	0,10	0,10	puudus	0,37	0,30	0,40	0,39	0,45	0,46	0,47	0,52	0,52	0,53	0,54	jääs	0,45	andur katki

Lisa 6



Joonis 1. Sademed Tallinna uurimisaladel ajavahemikus 01.03.2014 – 01.04.2015.



Joonis 2. Sademed Tartu uurimisaladel ajavahemikus 01.03.2014 – 01.04.2015.

Lihlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina Rauno Mets

(sünnikuupäev: 06.05.1990)

Annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihlitsentsi) enda loodud teose

„Kasvuhoonegaaside vood haljaskatustelt ning paepealselt mullalt“,

mille juhendaja on PhD Alar Teemusk,

reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

kinnitan, et lihlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 18.05.2015