

RMK TEADUSPROJEKTI LÕPPARUANNE

1. PROJEKTI NIMETUS: Raiete mõju metsade süsinikuringele

2. PROJEKTI KESTUS	Algus: juuli 2015 Kuu/aasta	Lõpp: juuli 2018 Kuu/aasta
---------------------------	---------------------------------------	--------------------------------------

3. PROJEKTI TAOTLEJA (teadusasutus): Metsandus- ja maaehitusinstituut, Eesti Maaülikool

Telefon: 7313154

Address: Kreutzwaldi 5, Tartu 51006

Registrikood: 74001086

Panga rekvisiidid: EE571010102000084008

4. PROJEKTI JUHT:	Veiko Uri (Ees- ja perekonnanimi)	Professor, PhD (Amet, teaduskraad)
--------------------------	---------------------------------------------	----------------------------------------------

5. PROJEKTI PÕHITÄITJAD

Projekti põhitäitjad:

Ees- ja perekonnanimi	Teaduskraad	Ametikoht
1. Veiko Uri	PhD	EMÜ, professor
2. Jürgen Aosaar	PhD	EMÜ, teadur
3. Mats Varik	PhD	EMÜ, teadur
4. Hardo Becker	PhD	EMÜ, spetsialist
5. Gunnar Morozov	MSc	EMÜ, spetsialist
6. Kristiina Aun	MSc	EMÜ, nooremteadur
7. Mai Kukumägi	PhD	TÜ, teadur
8. Krista Lõhmus	PhD	TÜ, professor
9. Kaido Soosaar	PhD	TÜ, v. teadur
10. Ivika Ostonen	PhD	TÜ, v. teadur
11. Kaie Kriiska	MSc	TÜ, spetsialist
12. Katrin Rosenvald	PhD	TÜ, teadur

*Kaldkirjas TÜ rühm

Projektiga seotud abitoõjõud:

--	--	--

6. PROJEKTI KULUD KOKKU 150 000 eurot

Kulurida	Kokku
Töötasud (põhitäitjad + abitoõjõud)	64174,87
Sotsiaalmaks	21177,7
Töötuskindlustusmaks	513,39
Ostetud teenused	3268,32
Lähetuskulud	0
Materjalid, tarvikud, masinad, seadmed	12535,24
Muud kulud	33330,48
Üldkululõiv	15000
Kokku	150 000

7. PROJEKTI TULEMUSED (maksimaalselt 10 lehekülge)

Projekt kavandati laiaulatusliku uurimusena, selgitamaks nii lage- kui harvendusraie mõju ökosüsteemi CN ringetele. Projekt viidi ellu EMÜ ja TÜ ühistööna, see tagas oma ala parimate spetsialistide kaasamise, tugeva sünergia uurimisrühmas ja tulemuste kvaliteedi. Kõik taotluses püstitatud eesmärgid täideti. Kokku viidi projektis erinevaid töid läbi 14 erineval katsealal (koos kontroll ja harvendatud variantidega). Parema ülevaate saamiseks on uurimisalad esitatud allpool toodud skeemina.

Raied													
Lageraied						Harvendusraied							
Männi alad			Kase alad			Kaasikud				Männikud			
1a.	6a.	10a.	2a.	4a.	7a.	Noorem 20a.		Vanem 30a.		Noorem 25a.		Vanem 45a.	
						HR	KONT.	HR	KONT.	HR	KONT.	HR	KONT.

7.1 Projekti lühikokkuvõte (maksimaalselt 500 tähemärki)

EMÜ ning TÜ töörühmade vahelises ühisprojektis hinnati lage- ja harvendusraiate (HR) mõju puistute süsiniku (C) ringele, samuti mõju mõnede lämmastiku (N) ringe olulisematele voogudele.

Edukalt uuenenud männiraiesmik muutus C-d siduvaks ökosüsteemiks juba 7. raiejärgsel aastal (+0,61 t C ha⁻¹ a⁻¹). Kuna C sidumise määrab puude juurdekasv, siis on kiire ja efektiivne raiesmike uuendamine siinkohal oluline. Viljaka kasvukoha raiesmik oli teisel raiejärgsel aastal nõrk C allikas (-0,51 t C ha⁻¹ a⁻¹) ja muutus C-d siduvaks samuti 7. raiejärgsel aastal.

Erinevatel meetoditel (bilansi meetod ja EC) saadud tulemused olid omavahel väga heas kooskõlas, mis tõstab uuringu usaldusväärsust. CN leostumine lageraiejärgselt oli kõikidel aladel väike ega ületanud kasvavates puistutes saadud tulemusi.

HR arukaasikutes ja männikutes ei mõjutanud mullahingamise (Rs, Rh) intensiivsust ega ka maapealse varise aastast voogu. Kuigi lehe-/okkavarise mass pärast HR enamikel aladel vähenes, polnud erinevus kontrollalast kas stat. oluline või tasandus erinevus paari aasta jooksul. CN leostumine olid kõikides uuritud puistutes (ka. kontrollalad) väike, HR ei suurendanud CN leostumist. HR mõju lämmastiku netomineralisatsiooni voole osutus kasvukoha- ja puuliigispetsiifiliseks; HR järgselt suurenes taimedele omastatava N voog noores arukaasikus, kuid ei muutunud noores mustikamännikus.

7.2 Abstract (maksimaalselt 300 tähemärki)

The effect of clear-cut and thinning on stand carbon (C) and nitrogen (N) fluxes was studied in pine and birch stands. The studied ecosystems turned into C sink already 7 years after clear-cut. The outcomes were verified by similar results estimated by indirect and eddy covariance methods. In studied stands thinning did not increase soil respiration intensity either CN leaching; annual litter flux of the stands was not reduced significantly after thinning. Total C budgets of stands were not affected significantly by temporary reduced production of trees.

7.3 Lageraie mõju C bilansile

Erinevate metsamajanduslike tegevuste juures tuleb üha enam arvestada kaasnevate keskkonnamõjudega, sh. võimaliku C emissiooni suurenemisega. Projekti üheks peamiseks eesmärgiks oli selgitada, millal erineva viljakusega kasvukohtadel (mustika ja jänese kapsa kkt.) saab süsinikku (C) emiteerivast lageraiealast taas C-d siduv ökosüsteem.

Kinnistunud on seisukoht, et raiejärgselt on raiesmik (noorendik) C-d emiteeriv ökosüsteem ligikaudu kümme aastat (Amiro et al., 2010; Goulden et al., 2011) või isegi kauem (Noormets et al., 2012). C-bilansi muutumisel negatiivsest (emiteerivast) positiivseks (siduvaks) on määravaks puude kasvukiirus, st. üldstatult alles 10 a. vanustes noorendikes peaks puude aastane juurdekasv jõudma tasemeni, kus C sidumine ületab aastase heterotroofse mullahingamise (Rh) voo. Ka märgitakse paljudes töodes lageraiate ühe olulise probleemina aastase Rh suurenemist raiesmikel, mis võib olla tingitud nii mullatemperatuuri tõusust kui ka laguneva orgaanilise materjali lisandumisest mulda (Pumpanen et al., 2004; Moroni et al., 2009).

7.3.1 Männi lageraiealad

Lageraiejärgse C sidumise dünaamika hindamiseks männi aladel valiti kolm erivanuselist katseala: värske raiesmik (raitud 2015. a. talvel), 6. a noorendik ja 10 a. noorendik. Kõik alad asusid gleistunud leedemuldadel (mustika kasvukohatüüp).

Neist 6 a. noorendiku alale püstitati ka *eddy-covariance* (EC) mõõtejaam atmosfääri ja ökosüsteemi vahelise C vahetuse otsemõõtmiseks. Samuti hinnati sellel alal biomassis seotud aastast C voogu ning mulla CO₂ emissiooni kahe järjestikuse aasta jooksul. Vastavalt varasemalt kirjeldatud metodikale (Uri et al., 2014; 2017ab) tehti kõikidel aladel detailsed mullauuringud (Tabel 1). Katseala rajamisel oli 6 a. noorendiku keskmine kõrgus 1m ja puude arv 15 000 tk/ha. Vanema (10 a.) männiku vastavad näitajad olid 3,1m ja 3400 tk/ha. Puude biomassi ja produktsiooni hinnati mudelpuude meetodil (Uri et al., 2012; 2014), alustaimestiku maapealset biomassi ja produktsiooni prooviruutude meetodil (Uri et al., 2011; 2017ab). Rohhtaimede maapealse osa produktsioon on võrdne nende biomassiga, puhmaste produktsiooni määramiseks eraldati igast proovist erinevad liigid (pohl, mustikas, kanarbik) ning neilt alamproovi taimedelt lõigati ära viimase aasta juurdekasvud (mustikal ka kõik lehed), saadud fraktsioonid kuivatati ning kaaluti, määrati nende C sisaldus.

Sammalde biomassi hindamiseks võeti proovid terasraamiga (25x25cm). Laboris proovid sorteeriti, eemaldati kõdu ja varise osised. Eraldati alamproov, kus aastase netoproduktsiooni hindamiseks eraldati sammaldel viimase aasta kasv. Produktsiooni ja selle C sisalduse põhjal arvutati aastane alustaimestikus seotud C voog (Tabel 2).

Kõikides uuritud puistutes hinnati puude ja alustaimestiku peenjuurte biomassi mullamonoliitide meetodil (Uri et al., 2017ab; Varik et al., 2013). Sarnaselt varasematele tööle (Uri et al., 2011, 2017ab), eeldati et juurevarise kaudu mulda jõudev aastane C voog on pidev, st. eelmisel aastal lagunemata jäänud juurte

Tabel 1. Muldade üldiseloomustus ja C varud (ülemine 0-50 cm kiht, koos kõduhorisondiga) lageraie järgselt uuenenud männinoorendikes.

Vanus, a	Mulla liik	Ülemises 0-20 cm mullakihis					pH _{KCl}	C* varu, t C ha ⁻¹
		N%	P mg/kg	K mg/kg	Ca mg/kg	Mg mg/kg		
1	LIIg	0,15	8,59	41,25	67,65	19,68	3,07	199,9
6	LIIIg	0,07	15,42	16,34	79,88	10,32	3,47	109,0
10	LIIg	0,12	73,50	25,83	111,37	18,27	3,64	136,3

*mulla C varu mulla ülemise 0-50 cm kihis

mass laguneb järgmisel või ülejärgmisel aastal ning samal ajal lisandub mulda ka pidevalt samas suurusjärgus surnud peenjuuri (Mayer et al., 2013) st. kogu peenjuurte aastane produktsioon on käsitletav juurevarisena ehk C sisendvoona mulda.

Tabel 2. Alustaimestiku maapealse osa biomass ja produktsioon ning süsiniku (C) sidumine.

Vanus	Biomass t ha ⁻¹			Produktsioon, t ha ⁻¹ a ⁻¹		Seotud C t ha ⁻¹ a ⁻¹			
	Puhm.	Rohht.	Sambl.	Puhm.	Sambl.	Puhm.	Sambl.	Rohht.	Kokku
1	0,53	0,18	3,55	0,25	1,21	0,12	0,52	0,08	0,71
6	4,44	0,21	2,19	2,09	0,74	0,97	0,32	0,09	1,38
10	3,36	0,34	3,71	1,58	1,26	0,73	0,54	0,15	1,42

Noorendikes, (5-10 a.) moodustab puude iga-aastane juurdekasv väga suure osa nende biomassist ning sellest tulenevalt suureneb sel perioodil ka aastane C sidumine ligikaudu kahekordselt (Tabel 3).

Tabel 3. Männinoorendike takseeritajad, puude biomass, nende erinevate fraktsioonide aastane produktsioon ja selles seotud süsinik (C).

Vanus, a	D _{1,3} , cm	H, m	Puid tk/ha	Maap. biomass	Produktsioon t ha ⁻¹ a ⁻¹						
					Tüvi	Oksad	Võrsed	Okkad	Jämejuur	Kokku	Seotud C kokku
6*	-	1,0	15000	3,4	0,64	0,18	0,21	0,78	0,21	2,02	0,98
7*	-	1,6	15000	7,7	1,44	1,07	0,54	1,45	0,42	4,92	2,40
10	3,5	3,1	3400	12,2	1,48	0,24	3,93	2,69	0,67	9,01	4,42

*Samad puistud, mõõtmisi viidi läbi kahel järjestikusel aastal.

Erinevate raiejärgsete ökosüsteemide C bilansid koostati hinnatud sisend- ja väljundvoogude põhjal (Uri et al., 2017ab; Varik et al., 2015). Peamiseks C väljundvooks oli heterotroofne mullahingamine (Rh); leostumise osa oli marginaalne (Tabel 4).

Esimesel raiejärgsel aastal oli raiesmikul C sidumine väike, kuna kasvasid vaid peamiselt puhmad ja samblad. Kuid ka aastane R_h voog oli tagasihoidlik ($3,2 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) (Tabel 4) ning kogu mullahingamise (R_s) voog $4,9 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Järgmisel aastal (2017) R_h voog sellel alal vähenes oluliselt ($2,3 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), mida võib seletada mulla liigniiskusega (suur sademete hulk, vähenenud transpiratsioon). Uuritud vanuseraas muutus männikute lageraiejärgne C bilanss C-d emiteerivast ($-2,14 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) kuni oluliselt siduvaks ($+2,64 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) 10 a. vanuses noorendikus (Tabel 4). Kuna alustaimestiku produktioon ja selles seotav C oli aladel suhteliselt stabiilne (Tabel 2), siis oli C on bilansi muutumisel määravaks puude biomass ja selle juurdekasvus seotav C.

Tabel 4. Süsinikubilansid ($\text{t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) vahetult lageraie järgselt ning erivanuselistes männinoorendikes

Vanus, a	C sidumine								C väljund		Balanss
	Puud			Alustaimestik		Mä peenjuured	Kokku	CH ₄	R _h	Leost.	
	Maa-pealne	Maa-all	Kokku	Maa-peal	Maa-all						
1	0	0	0	0,72	0,34	0	1,06	n.e.	-3,2	n.e.	-2,14
6*	0,88	0,10	0,98	1,38	0,20	0,24	2,80	0,004	-4,2	-0,015	-1,40
7*	1,97	0,42	2,39	1,38	0,20	0,24	4,21	n.e.	-3,6	-0,005	+0,61
10	4,12	0,31	4,43	1,42	0,67	1,03	7,55	n.e.	-4,9	n.e.	+2,64

*Samad puistud, mõõtmisi viidi läbi kahel järjestikusel aastal.

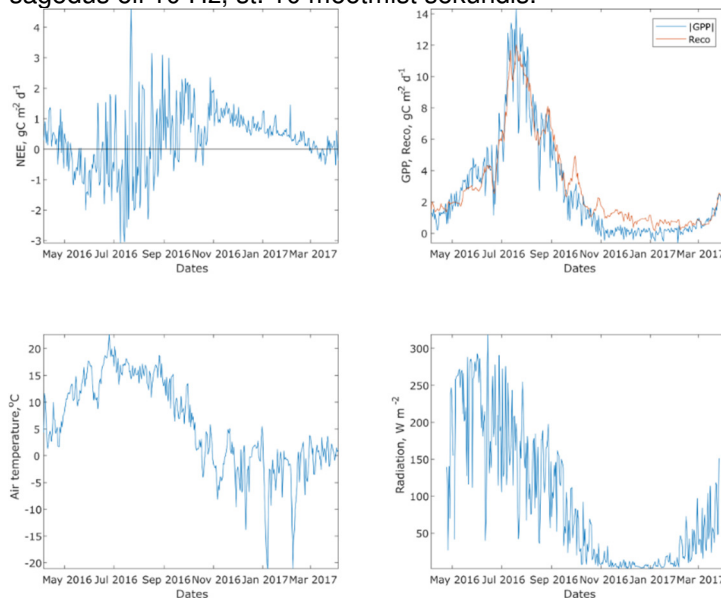
n.e. – pole hinnatud

6 a. männinoorendikus viidi läbi ka metaani (CH₄) emissioonide hindamine staatilise pimekambri meetodil (Hutchinson ja Livingston, 1993). Kogutud gaasiproovid analüüsiti gaas-kromatograafia TÕ geograafia osakonna kliimamuutuste laboris. Aastane CH₄ voog oli võrreldes kogu C bilansiga tühises suurusjärgus ($+0,004 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) ja see ala osutus metaani siduvaks süsteemiks (Tabel 4). Erinevatel kuudel mõõdetud CH₄ voo intensiivsus jäi vahemikku $-8,14$ kuni $+76,83 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

Ka aastased lämmastiku (N) leostumise vood lageraiejärgsetel aladel olid väga väikesed ($<1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) ega kujuta endast keskkonnariski.

Turbulentsete kovariatsioonide (eddy covariance, EC) meetodil hinnatud süsiniku vood männinoorendikus.

Noores männikus (6. a.) viidi paralleelselt C ringe varude ja voogude kaudse hindamisega läbi ka C voogude aastane otsemõõtmine ökosüsteemi ja atmosfääri vahel EC meetodil 2016. a. aprillist 2017. a. aprillini (TÜ tööruhma poolt). Kasutati 4,4 m kõrgust masti, Li-7200 gaasianalüsaatorit ja Gill Windmaster Pro anemomeetrit (LI-COR Biosciences, Lincoln, NE, USA ja Gill Instruments, Lymington, UK). Mõõtmiste sagedus oli 10 Hz, st. 10 mõõtmist sekundis.



Joonis 1. Turbulentsete kovariatsioonide (EC) meetodil mõõdetud parameetrite aastased dünaamikad 6-aastasest männinoorendikus. NEE – neto C vahetus atmosfääri ja ökosüsteemi vahel (*net ecosystem exchange*); GPP – kogu C sidumine (*gross primary production*); Reco – ökosüsteemi koguhingamine (*respiration of ecosystem*).

EC meetodil hinnatud aastane C bilanss (NEE e. *net ecosystem exchange*) uuritud ökosüsteemi ja atmosfääri vahel oli $-1,19 \pm 0,36$ t C, st. et 6-aasta vanune männinoorendik oli süsinikku emiteeriv ökosüsteem, kaotades ca $1,2$ t C $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$. Kogu aastane C sisendvoog (GPP- *gross primary production*) oli $9,87$ ja väljundvoog (Reco-*ecosystem respiration*) $11,05$ t C $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ (joon 1). Saadud tulemus ($-1,19$ t C $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) on väga heas kooskõlas kaudsel meetodil saaduga, kus ökosüsteemi aastaseks C bilansiks hinnati $-1,37$ t C ha^{-1} (Tabel 4). Analoogseid uurimusi, kus paralleelselt kasutati kaudset bilansimeetodit ja EC mõõtmisi, on maailmas läbi viidud ka varem (Meyer et al., 2013; Kolari et al., 2004), kuid nendes uurimustes olid erinevused kahe meetodi vahelistes tulemutes oluliselt suuremad. Erinevate meetodite samaaegne kasutamine võimaldab saada suurema usaldusväärsusega tulemusi ökosüsteemi C sidumise kohta. Samuti kinnitavad saadud tulemused bilansimeetodi sobivust selliste süsiniku-uuringute teostamiseks.

7.3.2 Kase lageraiealad

Paralleelselt männikutega viidi samad uuringud läbi ka kolmel erivanuselisel kasealal: kasega uuendatud lageraieala (kaks aastat lageraiest), nelja-aastane valdavalt arukasega uuenenud raiesmik ja seitsmeaastane hooldamata arukase noorendik, kus kaaspuuliigina kasvas raagremmelgaid. Kõik alad kuulusid viljakasse jänese kapsa kasvukohatüüpi (kkt) näivleetunud mulla (Tabel 5).

Tabel 5. Puude, alusmetsa ja alustaimestiku biomassid arukasega uuenenud (uuendatud) lageraiejärgsetel aladel.

Vanus	D1,3, cm	H, m	Puude arv tk ha^{-1}		Maapealne biomass t ha^{-1}			
			Kask	Paju	Kased	Paju	Alusmets	Rohttaim
2 a.	-	0,3	2400	-	-*	-	0,37	4,03
4 a.	-	1,2	28 900	-	1,6	-	0,54	3,46
7 a.	1,3	4,5	12 700	4700	10,5	1,3	0,13	1,87

*Kuna uuendatud alal on kaseseemikute biomass väga väike, pole seda arvestatud.

Tabel 6. Peamised süsinikuvood (t C $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) kasega uuenenud (uuendatud) lageraiejärgsetel aladel.

Vanus	Produktsioonis seotud				Peenjuured		Kokku	Rh	Bilanss
	Kased	Pajud	Alusmets	Rohttaim	Kask	Rohttaim			
2 a.	-	-	0,09	1,73	-	1,20	3,03	-3,2	-0,17
4 a.	0,60	-	0,27	1,49	0,48	0,53	3,37	-4,1	-0,73
7 a.	1,56	0,74	0,07	0,80	1,10	1,87	6,14	-5,6	+0,54

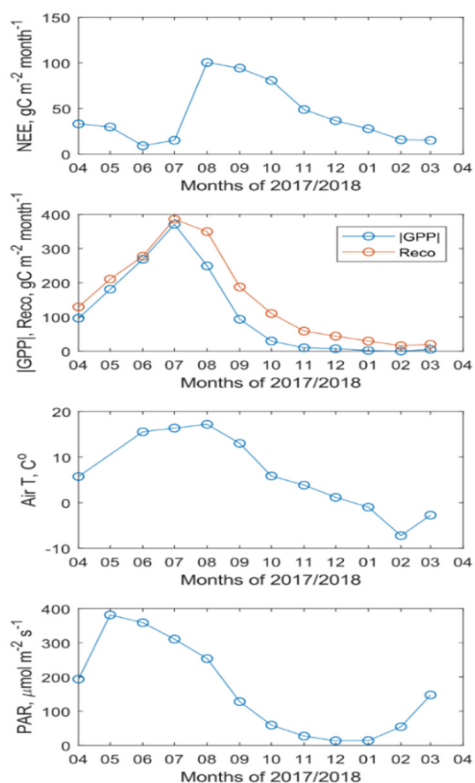
Kasealade C bilansi dünaamika erines männikute vanuseraas hinnatust. Noorim ala (2 a.) osutus nõrgaks C emiteerijaks ($-0,17$ t C $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$). Alal oli tugev rohttaimestiku kasv (suures osas kõrrelised), aastane Rh voog oli samas tagasihoidlik ($3,2$ t C $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$). Kuid erinevalt männi aladest vanematel aladel mulla aastane Rh voog suurenes (Tabel 6), mistõttu vaatamata suuremale puude poolt seotud C-le jäi ka 4-aastase kasenoorendiku C bilanss jätkuvalt negatiivseks. Samas 7 a. kaasik oli vaatamata suurele Rh voole ($5,6$ t C $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) juba C siduja (Tabel 6). Vanematel aladel suurenes kaskede osa C sidumisel ja vähenes alustaimestiku osa, kuna valgustingimused puude all muutuvad pärast võrade liitumist, toob see kaasa alustaimestiku biomassi vähenemise.

Rh suurenemine vanuse kasvades võib olla kasvukohaspetsiifiline, sõltudes raiejäätmete kogusest, aga ka mullatemperatuurist ja niiskusest. Vanemaid alasid mõjutab ka suurenev orgaanilise C voog mulda; puistu kasvades suureneb lehe- ja juurevarise kogus, samuti ei lagune tõenäoliselt kogu alustaimestiku orgaanilise aine produktsioon ühe aasta jooksul, mis võib samuti suurendada Rh voogu hilisematel aastatel.

Turbulentsete kovariatsioonide (EC) meetodil hinnatud süsiniku vood kase lageraiealal.

Kõige nooremal (2 a.) kase alal viidi läbi EC mõõtmised ühe aasta jooksul (aprill 2017–aprill 2018.) sarnaselt männi raiesmikul kasutatud meetodikale (sama aparatuur ning mõõtmismetoodika). Kasutati sama EC jaama, mis teisaldati pärast aastast mõõtmisperioodi männi alalt kase alale. EC meetodil mõõdetud aastane C bilanss (NEE) oli $-0,51$ t C $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ mis ühtib üsna hästi kaudsel meetodil saaduga ($-0,17$ t C $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$). Kogu aastane C sisendvoog (GPP) oli $1,31$ t C $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ ja väljundvoog (Reco) $1,82$ t C $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$.

EC mast mõõtis gaasivahetust atmosfääri ja ökosüsteemi vahel $4,4$ m kõrgusel maapinnast ning EC meetodil hinnatud aastases produktsioonis seotud C oli väiksem ($1,31$ t C $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) kui bilansimeetodil saadud hinnang ($3,03$ t C $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$), samuti oli ökosüsteemist atmosfääri emiteerunud C voog (Reco) väiksem kambermeetodil mõõdetud Rh voost. See näitab, et suur osa C-st käibib süsteemi siseselt, maapinnalähedases õhukihis ja mullahingamisest emiteerunud C seotakse vahetult alustaimestiku poolt.



Joonis 2. Turbulentsete kovariatsioonide (EC) meetodil mõõdetud parameetrite aastased dünaamikad lageraiejärgsel arukasega uuendatud alal. NEE – neto C vahetus atmosfääri ja ökosüsteemi vahel (*net ecosystem exchange*); GPP – kogu C sidumine (*gross primary production*); Reco – ökosüsteemi koguhingamine (*respiration of ecosystem*).

Ka viljaka kasvukoha lageraieraiesmikul oli toitainete (NP) ning C leostumise vood väikesed. C leostumine (5-15 kg C ha⁻¹ a⁻¹) jäi samasse suurusjärku nagu on hinnatud ka mitmetes varasemates Eesti uurimustes (Uri et al., 2015; 2017a), N leostumine jäi vahemikku 3,3 – 5,3 kg N ha⁻¹ a⁻¹.

7.4 Harvendusraie mõju puistu süsiniku- ja lämmastikuringe voogudele.

7.4.1 Katsealad

Harvendusraiate (HR) mõju männikute ja kaasikute süsiniku (C) ja lämmastiku (N) voogudele hinnati kahes erineva vanusega (25 a. ja 45 a.) mustika kasvukohatüübi männikus, samuti kahes (20 a. ja 30 a.) jänese kapsa arukaasikus (Tabelid 7 ja 8). Kõikidele katsealadele rajati kaks proovitükki, millest üks harvendati 2015. a. hilissügisel ja teine jäeti kontrollalaks. Mõlemale proovitükile paigaldati tööks vajalik taristu ja viidi läbi eksperimendid.

Tabel 7. Mäni hooldusraie katsealade iseloomustus

	Noorem männik		Vanem männik	
	Kontrollala	Harvendatud ala	Kontrollala	Harvendatud ala
Puistu vanus, a	25		45	
Proovitüki pind, ha	0,09	0,09	0,075	0,075
Keskmine kõrgus, m	14,2	13,7	18,1	18,9
Rinnasdiameeter, cm	11,3	14,2	17,2	19,5
Puistu tihedus, tk ha ⁻¹	2722	1178	1373	813
Rinnaspindala, m ² ha ⁻¹	27,2	18,8	31,8	24,2
Puude maapealne biomass t ha ⁻¹	93,8	70,7	155,6	120,6
Muld	Lklg		Llllg	

Vanemas (45 a.) männikus oli väljaraie löikepindalast 24% ja nooremas (25 a.) männikus 31%.

Tabel. 8. Kase hooldusraie katsealade iseloomustus

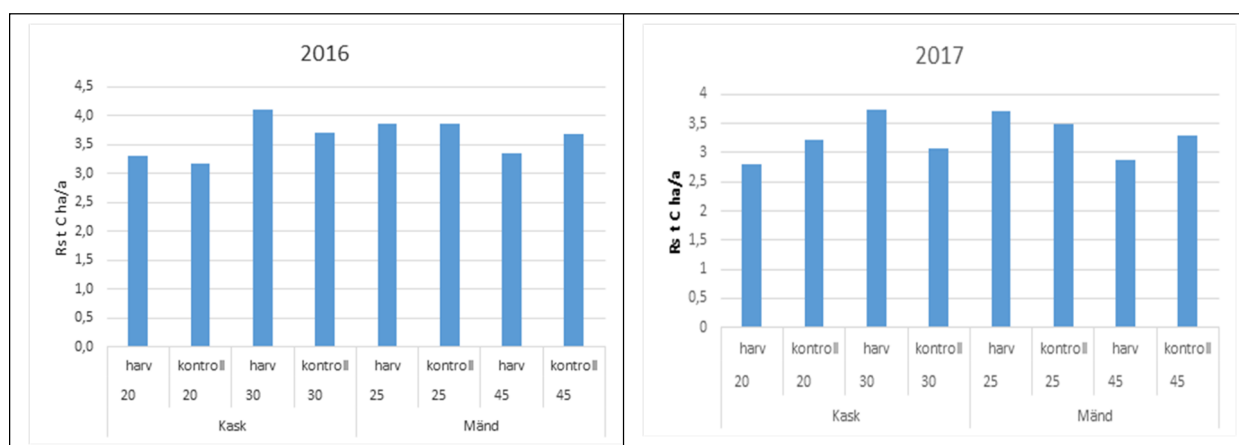
	Noorem kaasik		Vanem kaasik	
	Kontrollala	Harvendatud ala	Kontrollala	Harvendatud ala
Puistu vanus, a	20		30	
Proovitüki pind, ha	0,045	0,045	0,075	0,075
Keskmine kõrgus, m	17,2	18,7	19,8	22,6
Rinnasdiameeter, cm	11,1	12,1	15,2	18,3
Puistu tihedus, tk ha ⁻¹	2500	1841	1233	337
Rinnaspindala, m ² ha ⁻¹	24,5	21,3	22,4	17,5
Puude maapealne puitunud BM t ha ⁻¹	131,1	116,6	137,7	114,6
Muld	LP		Lkl	

Vanemas arukaasikus oli väljaraie lõikepindalast 22% ja nooremas 13%. Kuna 20 a. arukaasik oli väga tihe ja varem hooldamata, siis tehti raiet tagasihoidliku raiekraadiga, et vältida võimalikke tormi- ja lumekahjustusi.

7.4.2 Harvendusraie mõju mullahingamisele

Harvendusraie (HR) mõju mullahingamisele (sh. heterotroofsele) on antud uurimuses üks olulisemaid aspekte, sest ühelt poolt mulda jõudev orgaanilise C voog (maapealne varis, juurevaris) ja teisalt selle lagunemisel atmosfääri emiteeruva C vahetõrje määravad mulla C bilansi. Varasemad tulemused HR mõjust mullahingamisele on erinevad (suurendav, vähendav mõju) (Selmants et al., 2008; Tang et al., 2005). Rh võib harvendamise järgselt intensivistuda juurevarise ja lisandunud raiejäätmete lagunemise tulemusel (Misson et al., 2005; Son et al., 2004; Sullivan et al., 2008), samuti tõusnud mullatemperatuuri tõttu (Jandl et al., 2007; Ohashi et al. 1999).

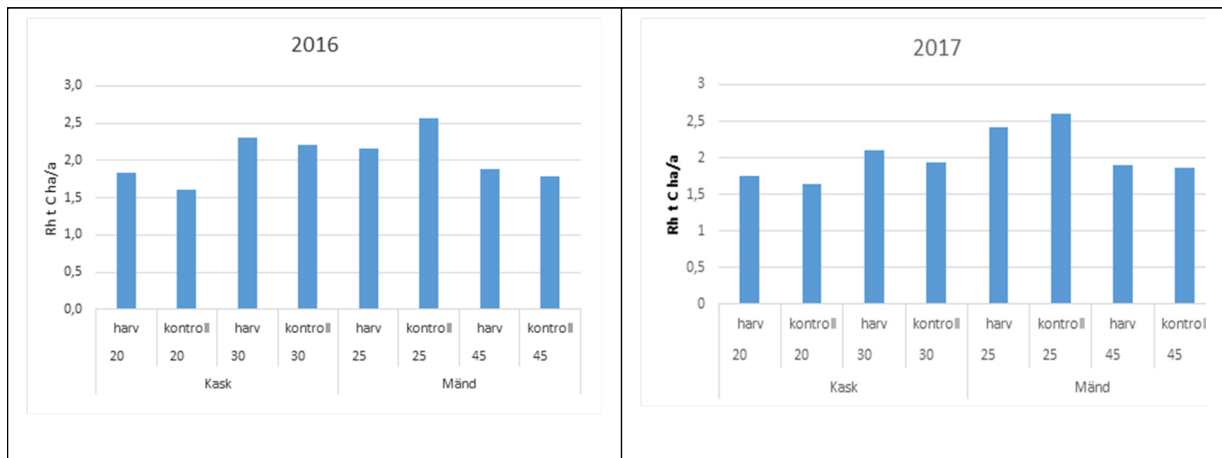
Mullahingamist (Rs ja Rh) mõõdeti igakuiselt portatiivse gaaianalüsaatoriga CIRAS-2 (Kukumägi et al., 2017, Uri et al., 2017ab). Heterotroofse mullahingamise voo eristamiseks kasutati 20 cm läbimõõduga PVC torusid, mis paigaldati 40-50 cm sügavusele mulda. Kahel esimesel HR järgsel aastal (2016-2017) usaldusväärset harvendamise mõju mullahingamisele ei leitud (joon 3). Vanemas (30 a.) arukaasikus oli mõlema raiejärgse aasta jooksul Rs voog HR alal võrreldes kontrollalaga kõrgem, kuid erinevus polnud statistiliselt usaldusväärne ($P > 0,05$). Vanemas männikus (45. a.) oli tendents Rs voo vähenemisele harvendatud alal, kuid ka see erinevus polnud usaldusväärne. Analüüsid kahe aasta mõõtmisandmeid koos ühe andmestikuna (HR versus kontroll) ei olnud harvendamine faktorina oluline, st. harvendamine ei mõjutanud aastast kumulatiivset mullahingamist.



Joonis 3. Mullahingamise (Rs) aastased kumulatiivsed vood uuritud kaasikutes ning männikutes kahel harvendusraie järgsel aastal (2016-2017).

Sama tulemus saadi ka heterotroofse mullahingamise (Rh) puhul: harvendamine ei mõjutanud Rh aastast kumulatiivset voogu üheski uuritud puistus (Joon. 4). Kuigi erinevused polnud usaldusväärsed, jäi mõju

suund puistutes erinevaks, st. kui kaasikutes oli HR aladel Rh voog alati pisut kõrgem, siis 25. a. männikus harvendamine pigem vähendas seda (Joon. 4).



Joonis 4 . Heterotroofse (Rh) mullahingamise aastased voog harvendatud ja kontrollaladel uuritud kaasikutes ning männikutes kahel raiejärgsel aastal (2016-2017).

Kokkuvõtteks: harvendamine ei mõjutanud aastast kumulatiivset Rs ja Rh intensiivsust uuritud kaasikutes ja männikutes.

7.4.3 Harvendusraie mõju varise voogudele

Kõikides uuritud puistutes paigaldati varisekogujad nii harvendatud (HR) kui ka kontrollaladele. Varist koguti kuuajalise sammuga, kõik variseproovid fraktsioneeriti ja kaaluti vastavalt varem rakendatud meetodikale (Uri et al., 2017ab).

Kuna HR järgselt väheneb puistu biomass ja seega ka okka või lehemass, toob see endaga kaasa aastase varisevoog vähenemise esimestel raiejärgsetel aastatel. Männikutes oli raiekraad tugevam (24-31% raieeelsest löikepindalast), kaasikutes väiksem (13-22% löikepindalast), ning varisevoog vähenes raiejärgselt harvendatud männikutes ka enam. Kuigi enamikul juhtudel puistutes raiejärgselt maapealse varise voog vähenes (Tabel 9), polnud kaasikutes lehevarise kogused HR ning kontrollala vahel statistiliselt oluliselt erinevad ($P > 0,05$). Nooremas (25. a.) männikus oli esimesel harvendusjärgsel aastal aastane okkavarise voog suurem kontrollalal 28% harvendatud alal hinnatust (t-test, $P < 0,05$), kuid juba teisel raiejärgsel aastal (2017) polnud erinevus (2,26 versus 2,63 t/ha/a) enam statistiliselt usaldusväärne ($P > 0,05$). Sama tulemus saadi ka vanemas (45 a.) männikus: esimesel raiejärgsel aastal oli okkavarise voog HR ja KNTR ala vahel erinev, kui järgmisel aastal enam mitte ($P > 0,05$).

Tabel 9. Aastased lehe, okka ja kogu maapealse varise vood ($t \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) uuritud kase ja männi puistutes. HR – harvendatud ala; KNTR - kontrollala

	Okka/lehe varis				Kogu varis			
	2016		2017		2016		2017	
	HR	KNTR	HR	KNTR	HR	KNTR	HR	KNTR
Männik 25 a.	1,98	2,73	2,26	2,63	3,08	4,71	2,91	3,70
Männik 45 a.	1,81	2,50	1,61	2,05	2,92	4,38	2,20	3,01
Kaasik 20 a.	2,36	2,34	2,66	3,10	2,92	3,27	3,14	3,63
Kaasik 30 a.	1,66	2,28	2,06	2,68	2,52	2,28	2,59	3,17

7.4.4 Harvendusraie mõju süsiniku ja lämmastiku leostumisele

Ühe hüpoteesina võib harvendamine suurendada lämmastiku (N) ja süsiniku (C) leostumist (raiejäätmetest vabanev CN, hõredamas puistus suurem läbiuhtumine), kuid käesolevas uurimuses see oletus kinnitust ei leidnud. Aastased NC leostumise vood jäid mõlema uuritud puuliigi puhul kõikidel juhtudel tagasihoidlikuks (Tabelid 10 ja 11), mõnel juhul harvendatud alal leostumine isegi vähenes (Tabel 10). Noores kaasikus leostus N peamiselt nitraadina ja orgaanilises vormis, C leostumine kaasikus jäi samasse suurusjärku hall-lepikutes hinnatuga (Uri et al., 2017a).

Ka noores männikus oli NP leostumine äärmiselt väike (Tabel 11). Lüsimeetreid kontrolliti igakuiselt, kuid sageli neis nõrgvett polnud või oli seda väga väikestes kogustes, mis on üheks vähese leostumise põhjuseks (sarnaselt Kiidjärve kaasikule). Leostunud N vormidest domineeris ammoonium N ja org. N,

mis on heas kooskõlas NNM katse tulemustega: peamiselt toimub mullas ammonifikatsioon (p. 7.4.5). Noores männikus leostus harvendatud alal küll rohkem, kuid mõlemas katsevariandis hinnatud NC leostumise vood olid tühised.

Tabel 10 Erinevate lämmastikuvormide, fosfori (P) ja süsiniku (C) leostumine (kg ha⁻¹ a⁻¹) 20-aastases arukaasikus. NH₄ –ammooniumlämmastik, NO₃ – nitraatlämmastik, OrgN – orgaaniline lämmastik.

	Kontroll						Harvendus					
	NH ₄	NO ₃	Org N	Kokku N	C	P	NH ₄	NO ₃	OrgN	Kokku N	C	P
aprill' 16	0,13	0,63	0,86	1,6	15,3	0,31	0,05	0,52	0,59	1,2	12,4	0,18
juuli' 16	0,00	0,74	0,72	1,5	11,5	0,26	0,00	0,16	0,19	0,4	2,8	0,06
aug.' 16	0,08	0,32	0,34	0,7	5,7	0,11	0,01	0,14	0,07	0,2	1,4	0,02
nov.' 16	0,00	0,14	0,09	0,2	1,8	0,03	0,00	0,04	0,03	0,1	0,6	0,26
aprill' 17	0,00	0,29	1,13	1,4	9,7	0,21	0,01	0,15	0,30	0,5	4,2	0,06
Kokku	0,2	2,1	3,1	5,5	43,9	0,92	0,1	1,0	1,2	2,3	21,4	0,58
Osakaal	4%	39%	57%				3%	45%	52%			

Tabel 11. Erinevate lämmastikuvormide, fosfori (P) ja süsiniku (C) leostumine (kg ha⁻¹ a⁻¹) 25-aastases männikus. NH₄ –ammooniumlämmastik, NO₃ – nitraatlämmastik, OrgN – orgaaniline lämmastik

	Kontroll						Harvendus					
	NH ₄	NO ₃	OrgN	Kokku N	C	P	NH ₄	NO ₃	OrgN	Kokku N	C	P
aprill'16	0	0	0	0	0	<0,01	0	0	0	0	0	<0,01
juuli' 16	0	0	0	0	0	<0,01	0	0	0	0	0	<0,01
aug.' 16	0,01	0,00	0,01	0,02	0,11	<0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,23	<0,01
nov.' 16	0,00	0,00	0,01	0,01	0,05	<0,01	0,01	0,00	0,01	0,02	0,22	<0,01
aprill'17	0,01	0,00	0,01	0,02	0,15	<0,01	0,04	0,00	0,06	0,1	0,85	<0,01
Kokku				0,05	0,31	0,02				0,14	1,30	0,01
Osakaal	49%	1%	50%				37%	6%	58%			

Tabel 12. Lämmastiku, fosfori ja süsiniku leostumine (kg ha⁻¹ a⁻¹) vanemates puistutes. N-lämmastik, C – süsinik, P – fosfor.

	Kontroll			Harvendus		
	N	C	P	N	C	P
Männik 45 a. 2016	0,99	34,8	0,03	1,05	38,5	0,04
Männik 45 a. 2017	0,60	13,5	0,03	1,38	9,35	0,02
Kaasik 30 a. 2016	0,33	11,3	0,01	0,20	11,2	<0,01
Kaasik 30 a. 2017	0,20	12,1	<0,01	0,20	9,1	<0,01

Ka vanemates puistutes olid leostunud NP ja C kogused väikesed ja harvendamine leostumist ei suurendanud (Tabel 12).

7.4.5 Harvendamise mõju lämmastiku netomineralisatsiooni intensiivsusele

Harvendamise mõju lämmastiku netomineralisatsiooni (NNM) aastasele voole hinnati mõlema puulligi puhul nooremates puistutes: 20 a. kaasikus ja 25. a. männikus. Kasutati inkubeeritud polüetüleenkottide meetodit, selle meetodi detailsem kirjeldus on esitatud mitmetes varasemates töödes (Uri et al., 2008, Becker et al., 2016).

Tabel 13. Aastane nitrifikatsiooni, ammonifikatsiooni ning kogu mineralisatsiooni voog (kg N ha⁻¹ a⁻¹) mulla ülemises 0-10 cm mullakihis noortes arukase ja männi puistutes.

	Nitrifikatsioon	Ammonifikatsioon	Kogu NNM
Kaasik			
Kontroll	14,20	15,62	29,82
Harvendus	40,05	13,86	53,91
Männik			
Kontroll	0,01	19,43	19,44
Harvendus	0,02	20,29	20,31

Harvendusraie suurendas oluliselt (P<0,05) netonitrifikatsiooni voogu viljaka kasvukoha arukaasikus, mistõttu oli ka kogu aastane NNM voog HR alal 45% suurem võrreldes kontrollalaga. Kui raiejärgselt puude kasv ja C sidumine suureneb vähenenud konkurentsi arvel, siis antud juhul on taimede omastatava N koguse suurenemine mullas oluline lisategur, mis võib mõjutada taimede produktiooni ja C sidumist. Ammonifikatsiooni voog jäi kaasiku mõlemas katsevariandis praktiliselt samasse suurusjärku (Tabel 13). Samas ei suurendanud intensiivsem nitrifikatsioon N leostumist (Tabel 10). Männikus

harvendamine aastast NNM voogu aga ei mõjutanud, kuigi raiekraad oli männikus oluliselt suurem (31%), kaasikus (11%). Saadud tulemuste põhjal on harvendamise mõju NNM-ile nii puuliigi-, kui kasvukohaspetsiifiline.

7.4.6 Harvendamise mõju peenjuurte biomassile ja produktsioonile

Kõikidel harvendusraie katsealadel võeti vegetatsiooniperioodi lõpus mullapuuriga 20 mullamonoliiti, mis jagati neljaks sügavuskihiks (0-40 cm). Sügavuskihtide kaupa pesti proovidest välja peenjuured, need sorteeriti laboris (puude ja alustaimestiku juured), kuivatati ja kaaluti, tulemuste põhjal arvatati peenjuurte biomass puistutes.

Männikud

Nooremas männikus oli männi peenjuurte biomass kontrollalal oluliselt suurem harvendatud (HR) ala biomassist (Tabel 14). Samas oli keskmine peenjuurte biomass puu kohta suurem HR alal (vastavalt 2,3 ja 1,7 kg). Kuigi peenjuurte nekromass olid HR ja kontrollalal samas suurusjärgus (vastavalt 0,92 ja 0,84 t ha⁻¹) (Tabel 14), oli nende osakaal HR alal peenjuurte biomassist suurem (HR ca 31% ja kontrollalal 20%).

Samas männikus hinnati puude peenjuurte produktsiooni erinevate meetoditega. Kasutati sissekasvulindrite meetodit. Kui üldiselt kasutatakse selle meetodi puhul nn. „juuresukka“ (Ostonen et al., 2005; Varik et al., 2015), siis antud töös kasutati meetodit, kus juurevaba substraat inkubeeriti ilma monoliiti koos hoidva võrgu e. „sukata“. Proovikohad tähistati ja hiljem võeti proovid peenema mullapuuriga, monoliidina. Proove võeti 4 korda aasta jooksul ning sel meetodil hinnati männi peenjuurte aastaseks netoproduktsiooniks harvendatud alal 1,02 t ha⁻¹ a⁻¹ ja kontrollalal 1,60 t ha⁻¹ a⁻¹.

Tabel 14. Männi peenjuurte bio- ja nekromassi (t ha⁻¹) jagunemine sügavuskihtides 25-aastase mustikamänniku harvendatud (Harv.) ja kontrollalal (Kntr.) (\pm standardviga)

Sügavuskiht	Biomass		Nekromass	
	Harv.	Kntr.	Harv.	Kntr.
0-10	1,33 \pm 0,13	2,52 \pm 0,23	0,23 \pm 0,02	0,29 \pm 0,06
10-20	0,88 \pm 0,08	1,29 \pm 0,11	0,34 \pm 0,04	0,27 \pm 0,03
20-30	0,41 \pm 0,04	0,69 \pm 0,06	0,21 \pm 0,02	0,31 \pm 0,04
30-40	0,10 \pm 0,02	0,19 \pm 0,06	0,05 \pm 0,01	0,06 \pm 0,01
Kokku	2,72\pm0,05	4,68\pm0,09	0,84\pm0,02	0,92\pm0,02

Lisaks kasutati järjestikuste monoliitide (*sequential coring*) meetodit. Mõlemast katsevariandist võeti mullapuuriga aasta jooksul neljal korral monoliite perioodil okt. 2016 – okt. 2017 ja saadud tulemuste põhjal hinnati aastast peenjuurte biomassi dünaamikat otsustusmaatriksi põhjal (Fairley ja Alexander 1985) (Tabel 15).

Tabel 15. Järjestikuste monoliitide meetodil hinnatud puude ja alustaimestiku peenjuurte produktsioon (t ha⁻¹ a⁻¹) 25-aastases mustika kkt. männikus

	Kontrollala	Harvendatud ala
Männi peenjuured	0,79	0,83
Puhma juured	0,42	0,32
Rohhtaime juured	0,91	0,97
Kokku	2,12	2,12

Vanemas männikus (45 a.) hinnati peenjuurte biomassi monoliitide meetodil (Tabel 16) ning aastane produktsioon arvatati keskmise käibekiiruse 0,65 põhjal (Makkonen & Helmisaari, 1999; Brunner et al., 2013).

Tabel 16. Monoliitide meetodil hinnatud peenjuurte biomass ning nekromass (t ha⁻¹) 45-aastase mustikamänniku harvendatud ja kontrollalal.

	Kontrollala	Harvendatud ala
Männi peenjuured	3,00	2,01
Nekromass	0,62	0,50
Puhma juured	0,55	0,24
Rohhtaime juured	0,40	0,07
Kokku	4,58	2,82

Kaasikud

Mõlemal kase uurimisalal hinnati peenjuurte biomassi ja produktsiooni järjestikuste monoliitide meetodil (Tabel 17). Nooremas kaasikus peenjuurte biomass ja aastane netoproduktsioon HR ja kontrollala vahel

ei erinenud, st. raie mõju puudus. Vanemas kaasikus (30 a.) ületas peenjuurte netoproduksioon kontrollalal kahekordselt HR ala oma.

Tabel 17. Puude peenjuurte biomass ja tootmine erineva vanusega kaasikute harvendatud ja kontrollalal

Ala	Biomass, t ha ⁻¹	Tootmine, t ha ⁻¹ a ⁻¹
20 a. Harvendatud	1,9	1,5
20 a. Kontroll	2,1	1,2
30 a. Harvendatud	2,5	0,9
30 a. Kontroll	2,1	1,8

7.4.7 Harvendamise mõju kaasikute ja männikute süsinikubilansile Kaasikud

Hinnatud voogude põhjal koostati C bilansid uuritud puistutele. Noores arukaasikus (20. a.) oli kaks aastat peale harvendamist C sidumine HR alal vaid veidi madalam (+4,7 t C ha⁻¹ a⁻¹) võrreldes kontrollalaga (+4,9 t C ha⁻¹ a⁻¹). Kuna raiekraad oli mõõdukas (13% rinnaslõikepindalast), siis võib sellest olla tingitud ka tagasihoidlik mõju puistu C sidumisele. Väiksem puude biomass toob kaasa nii puistu tootmise kui ka C sidumise vähenemise (Tabel 18). Samas suurenes paranenud valgustingimuste tõttu rohttaimede tootmine. Harvendamine ei mõjutanud mullahingamise intensiivsust, see oli mõlemas katsevariantis praktiliselt sama.

Tabel 18 Süsiniku vood ja bilanss (t C ha⁻¹ a⁻¹) noores ja keskealises arukaasikus

Vood		20 a. kaasik		30 a. kaasik	
		Kontroll	Harven.	Kontroll	Harven.
Puude puitunud osad	Maa peal	3,27	3,08	3,74	2,37
	Maa-all	0,71	0,66	0,81	0,51
Lehevaris		1,53	1,32	1,33	1,02
Rohttaimed		0,32	0,53	0,70	0,94
Kase peenjuur		0,59	0,74	0,89	0,44
Rohetaimede juured		0,11	0,12	0,72	0,67
Kokku seotud		6,53	6,44	8,18	5,95
Hetrotroofne hingamine (Rh)		-1,64	-1,74	-1,93	-2,10
Leostumine		-0,005	-0,002	<0,001	<0,001
Bilanss		+4,89	+4,70	+6,25	+3,85

Noortes kaasikutes on harvendusraied vajalik metsakasvatuse võtte puistu kvaliteedi parandamiseks ja selle rakendamiseks ei kaasne C emissiooni suurenemist ega puistu C sidumise võime olulist langust. Vanemas kaasikus C bilanss küll vähenes, aga ka siin C emissioon mullast ei suurenenud. Bilanss vähenes tänu väiksemale puude biomassile HR alal, mis hiljem taastub. Vanemas kaasikus oli väljaraie ulatuslikum (22% lõikepindalast) ja harvendamise mõju puistu tootmisele ning C sidumisele suurem. HR osas oli C sidumine ca 27% väiksem kontrollalal C sidumisest, kuid sellele vaatamata jäi C bilanss positiivseks (+4 t C ha⁻¹ a⁻¹) (Tabel 18).

Männikud

Mõlemas männikus olid C bilansid erinevates katsevariantides samas suurusjärgus (Tabel 19), st. harvendamise mõju C sidumisele polnud oluline. Kuigi puude tüveproduktioon oli väljaraie tulemusel HR alal väiksem, suurenes 25 a. puistus jooksva aasta okaste tootmine, samuti rohttaimede kasv, mis kompenseeris puitunud osade juurdekasvu vähenemist. Aastane kumulatiivne Rh voog oli nooremas männikus HR alal küll pisut väiksem, kuid erinevus katsevariantide vahel polnud usaldusväärne (P<0,05). Noorema puistu C bilanss oli peamiselt tänu suuremale okaste ja rohttaimede tootmisele HR alal isegi natuke suurem kontrollalal C sidumisest. Vanemas (45 a.) männikus oli Rh voog HR ja kontrollalal praktiliselt sama (Tabel 19).

Tabel 19 Süsiniku vood ja bilanss (t C ha⁻¹ a⁻¹) noores ja keskealises männikus

Vood		25 a. männik		45 a. männik	
		Kontroll	Harven	Kontroll	Harven
Puude puitunud osad	Maa peal	3,52	3,09	3,15	2,53
	Maa-all	0,45	0,46	0,62	0,49
Okkad		1,08	1,60	1,18	0,96
Puhmad		0,08	0,01	0,08	0,12
Rohttaimed		0,07	0,24	0,04	0,85
Samblad		0,10	0,06	0,23	0,26
Männi peenjuur (d<2mm)		0,40	0,42	0,98	0,66
Alustaim. peenjuur		0,61	0,59	0,31	0,09
Kokku seotud		6,32	6,47	6,59	5,96

Hetroroofne hingamine (Rh)	-2,59	-2,42	-1,86	-1,89
Leostumine	<0,001	<0,01	0,01	0,01
Bilanss	+3,73	+4,05	+4,74	+4,08

Kokkuvõte ja järeldused

Mustikamännikute ja jänesekapsa kaasikute majandamine lageraietega ei too endaga kaasa olulist raiejärgset C emissiooni suurenemist, samuti muutuvad need alad C- siduvateks süsteemideks märksa varem kui seni arvatud.

Männikute puhul on efektiivse C sidumise seisukohalt eriti oluline kiire ja edukas raiejärgne metsauuendamine. Harvendusraied viljakates jänesekapsa kkt kaasikutes ja mustika kkt. männikutes ei too endaga kaasa negatiivseid tagajärgi süsinikusidumise osas, samuti lämmastiku leostumise näol.

* Lageraie järgselt muutus männinoorendik süsinikku (C) siduvaks ökosüsteemiks juba 7. raiejärgsel aastal.

* Viljakas (jk. kkt.) raiesmik oli teisel raiejärgsel aastal nõrk C allikas (-0,51 t C ha⁻¹ a⁻¹). Uuenemata alal sidus intensiivse kasvuga rohttaimestik süsinikku 3 t C ha⁻¹ a⁻¹. Selline ökosüsteem muutus C-d siduvaks samuti seitsmendal raiejärgsel aastal.

* Heterotroofse mullahingamise voog männi lageraiealal ja noorendikes jäi samasse suurusjärku (3,2 – 4,9 t C ha⁻¹ a⁻¹) nagu see on vanemates ja keskealistes männikutes, st. lageraiejärgselt mulla C emissioon ei suurenenud.

* Erinevate C voogude hindamine ja nende põhjal C bilansi koostamine on sobiv meetod metsade C ringe uurinuteks; samadel uurimisaladel bilansi meetodil ja *eddy covariance* meetodil saadud tulemused olid omavahel väga heas kooskõlas.

* C ja N leostumine lageraiejärgselt oli väike ning jäi samasse suurusjärku erinevates puistutes mõõdetud väärtustega.

* Viljaka kasvukoha raiesmikul, kus puudub metsauuendus ning kus peamisteks C sidujateks on rohttaimed, käibib suur osa süsinikust süsteemi siseselt, st. mullahingamisest emiteerunud C seotakse maapinnalähedasesest õhukihist jooksvalt alustaimestiku poolt ja C vahetus atmosfääri ning ökosüsteemi vahel jääb suurusjärku 0,5 t C ha⁻¹ a⁻¹.

* Harvendusraie ei mõjutanud mullahingamise (Rs, Rh) intensiivsust kahel raiejärgsel aastal üheski uuritud arukase- ega männipuistus.

* Samuti ei mõjutanud harvendusraie maapealse varise aastast voogu uuritud puistutes (männikud, kaasikud) oluliselt. Kuigi lehe või okkavarise mass pärast harvendusraiet enamikel juhtudel vähenes, polnud erinevused võrreldes kontrollalaga statistiliselt olulised või tasandus erinevus juba kahe aasta jooksul.

* Harvendamine ei põhjustanud olulist raiejärgset CN leostumist, leostunud CN vood olid väikesed nii harvendatud kui kontrollaladel.

* Harvendamise mõju lämmastiku netomineralisatsioonile mullas on kasvukoha- ja puuliigispetsiifiline; harvendusraie suurendas märkimisväärselt taimedele kättesaadava lämmastiku voogu noores arukaasikus, kuid ei mõjutanud seda noores mustikamännikus.

* Vaid keskealises arukaasikus oli peenjuurte produktsioon kontrollalal oluliselt suurem kui harvendatud alal. Teistel juhtudel harvendatud ja kontrollala peenjuurte produktsioon jäi samasse suurusjärku.

Tuua välja projekti tulemuste olulisus ja anda soovitusid nende rakendamiseks.

Lõppenud projekti peamine väärtus seisneb selles, et praktiliselt esmakordselt Eestis hinnati metsamajandamise (lage- ja harvendusraied) mõju ökosüsteemi süsinikuringele. Tänapäeva metsamajandus peaks olema teaduspõhine, st. erinevate majandustegevuste mõju metsade C sidumisele peaks olema selgitatud ja neid teadmisi tuleks majandamisotsuste tegemisel ka arvestada.

Töös selgus, et lageraied ei põhjustanud uuritud aladel olulist süsinikuemissiooni suurenemist, samuti taastub ökosüsteemi C bilanss arvatust kiiremini. Tulemused toetavad raiejärgse kiire ja efektiivse uuendamise vajalikkust C sidumise seisukohalt. Harvendusraied on peamine metsakasvatustlik abinõu kvaliteetsete ja tootlike tulevikupuistute kujundamisel, nende läbi viimine metsades ei põhjusta keskkonnariske C sidumise või lämmastikukadude seisukohalt.

Anda põhjendatud hinnang täiendavate rakendusuuringute läbiviimise vajaduse kohta.

Lõppenud projekt selgitas C ringe seaduspärasusi ja majandamise mõju C sidumisele vaid kahes kasvukohatüübis, kuid Eesti metsad on väga heterogeensed ja saadud tulemused pole üldistatavad kõikidele metsadele. Seepärast on vajadus analoogsete uuringute järgi erinevates metsatüüpides.

Jätakuvalt puuduvad meil teadmised erinevate (alternatiivsete) raieliikide (näit. turberaied) mõjust metsade C sidumisele, maapinna ettevalmistamise mõjust ja samuti raietöödel tekkivate mullahäiringute mõjust.

8. PROJEKTIGA HAAKUVAD DOKTORI- JA MAGISTRITÖÖD:

Projekt toetas väga olulisel määral noorte, nii doktori- kui magistriastme üliõpilaste õpinguid, samuti olid kaasatud mitmed bakalaureuse astme üliõpilased, kes kirjutasid oma lõputööd selle projekti raames.

Dokoritööd:

Doktorant ja projekti põhitäitja Hardo Becker kaitses 2016. aasta augustis doktoritöö „Metsamajandamise mõju süsiniku- ja lämmastikuvoogudele ning varudele erinevates metsaökosüsteemides“. Töö valmis käimasoleva projekti toetusel.

Doktorant ja projekti põhitäitja Gunnar Morozov osales projekti täitmisel kogu perioodi jooksul ja selle projekti tulemused moodustavad olulise osa tema doktoritööst (mis samuti käsitleb metsade CN ringeid ja majandamise mõju neile). Kaitsmine on planeeritud 2019. aastaks.

Viimasel projektiaastal kaasati ka esimese aasta doktorant Kristiina Aun, kelle doktoritöö on samuti seotud projekti temaatikaga.

Magistritööd:

2017. a. Kristiina Aun, Harvendamise mõju noorte arukaasikute arengule, Eesti Maaülikool, juh. Veiko Uri.
2018. a. Doris Silm, Hariliku männi (*Pinus sylvestris* L.) maapealne ja maa-alune biomass ning sellesse seotud süsinikuvaru mustika kasvukohatüübis. Eesti Maaülikool juh. Veiko Uri ja Mats Varik.

2018. a. Neeme Lõhmus, Harvendusraie mõju puude jämeduskasvule ning süsinikuvarudele ja -voogudele palumännikus. Eesti Maaülikool juh. Veiko Uri, Maris Hordo, Jürgen Aosaar

2018. a. Kadi-Ly Pindma, Peenjuurte biomass ja tootmine viljakates arukaasikutes, Eesti Maaülikool juh. Veiko Uri; Mats Varik.

9. PROJEKTI RAAMES AVALDATUD PUBLIKATSIOONID:

Avaldatud on esimene, just selle projekti uurimistulemusi kajastav artikkel, mis selgitab süsinikubilansi tasakaalustumist lageraiejärgselt:

Uri V., Kukumägi, M., Aosaar J., Varik M., Becker H., Aun K., Krasnova A., Morozov G., Ostonen I., Mander Ü., Lõhmus K., Rosenvald K., Kriiska K., Soosaar K. 2018. The carbon balance of a six-year-old Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) ecosystem estimated by different methods. *Forest Ecology and Management*, 433, 248-262.

Koostamisel on artikkel harvendamise mõjust lämmastiku netomineralisatsioonile ja leostumisele kaasikutes ja männikutes (The effect of thinning to annual net nitrogen mineralization and nitrogen leaching in silver birch and scots pine stands). Artikli esimeseks autoriks on doktorant Gunnar Morozov ja see on üks kolmest tema doktoritöösse planeeritud artiklitest. Käsikirja loodame ajakirja saata selle aasta lõpus.

Töörühma teine doktorant (Kristiina Aun) koostab käsikirja harvendusraie mõjust arukaasikute varisevoogudele ja peenjuurte tootmisele.

Kindlasti koostatakse veel vähemalt kaks mahukat käsikirja: männikute süsinikubilansist laiemalt ja arukaasikute lageraiejärgsest süsinikubilansi taastumisest.

10. Projekti juht (nimi): Veiko Uri	Allkiri:	Kuupäev: 05.07.2018
--------------------------------------------	-----------------	----------------------------

11. Taotleja esindaja kinnitus aruande õigsuse kohta (nimi, amet): Toomas Timmusk, direktor	Allkiri:	Kuupäev: 05.07.2018
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------	----------------------------

NB! Aruanne esitada elektrooniliselt e-posti aadressil: teadus@rmk.ee