



EESTI MAAÜLIKOOL

Põllumajandus- ja keskkonnainstituut

Jan Siimson

**SÜSINIKUBILANSS JÄNESEKAPSA-KÕDUSOO
KASVUKOHATÜÜBI SOOKAASIKUTE VANUSEREAS**

CARBON BUDGETS OF DIFFERENTLY AGED DOWNY
BIRCH (*BETULA PUBENSCEENS*) STANDS GROWING ON
FERTILE *OXALIS* FULL-DRAINED SWAMP SITE TYPE

Bakalaureusetöö

Kalandus ja rakendusökoloogia õppekava

Juhendaja: Mats Varik, PhD

Tartu 2024

LÜHIKOKKUVÕTE

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Autor: Jan Siimson		Õppekava: Kalandus- ja rakendusökoloogia	
Pealkiri: Süsinikubilanss jänesekapsa-kõdusoo kasvukohatüübi sookaasikute vanuseraas			
Lehekülgi: 31	Jooniseid: 7	Tabeleid: 5	Lisaid: 0
Õppetool:	Hüdrobioloogia ja kalandus		
Uurimisvaldkond:	Metsakasvatus, metsandus		
CERC S- kood:	B430		
Juhendaja(d):	Mats Varik		
Kaitsmiskoht ja aasta:	Tartu, 2024		
<p>Käesoleva töö eesmärgiks oli koostada süsinikubilansid ja hinnata süsiniku varusid ning sisend- ja väljundvooge jänesekapsa-kõdusoo kasvukohatüübi sookaasikute vanuseraas. Töö alusandmeteks kasutati metsakorraldusest tulenevaid takseerandmeid. Muud bilansi koostamiseks vajalikud, puuduvad andmed leiti varem avaldatud teadustööde põhjal. Süsinikubilansid koostati NEP meetodil.</p> <p>Puitse biomassi aastane juurdekasv ehk produktsioon oli kõige intensiivsem keskealistes puistutes ning väikseim küpsetes ja kõige nooremas puistus, jäädes vahemikku 0,86 ja 2,8 t C/ha.</p> <p>Mulda suunduvast süsinikuvoost uuritud puistute puhul moodustas valdava osa lehtede, peenjuurte, okste jne varis. Alustaimestiku osakaal mulda suunduvast süsinikuvoost moodustas ligikaudu 7%. Mullast väljuv süsinikuvoog ületas kõikides puistutes sisendvoo, seega mulla süsinikuvaru väheneb.</p> <p>Uuritud puistute NEP väärtused näitasid, et 10- 40 aastased puistud osutusid süsinikku siduvateks, 50 aastane puistu süsinikuneutraalseks ning 60 aastane ja vanemad puistud</p>			

süsinikku emiteerivateks ökosüsteemideks. Eestis on sarnaseid uuringuid läbi viidud vähe, kuid tulemused näitavad üldjoontes sarnaseid trende süsinikusidumises. Siiski näiteks heterotroofse mullahingamise (R_h) väärtused võivad isegi ühe kasvukoha piires varieeruda suurtes piirides, mistõttu jätkuvad uuringud selles valdkonnas on olulised.

Märksõnad: süsiniku sidumine, ökosüsteemi netoproduktioon, süsiniku vood ja varud, kuivendatud soomets.

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Bachelor's Thesis	
Author: Jan Siimson		Specialty: Fisheries and applied ecology	
Title: Carbon budgets of differently aged downy birch (<i>Betula pubescens</i>) stands growing on fertile <i>oxalis</i> full-drained swamp site type			
Pages: 31	Figures: 7	Tables: 5	Appendixes: 0
Department:		Hydrobiology and Fisheries	
Field of research:		Silviculture, forestry	
CERC – S code:		B430	
Supervisors:		Mats Varik	
Place and date:		Tartu, 2024	
<p><i>The aim of this study was to compile carbon balances and assess carbon stocks, as well as input and output fluxes, in the differently aged downy birch (<i>Betula pubescens</i>) stands growing on fertile <i>oxalis</i> full-drained swamp site type. The basic data for the study were derived from the forest management inventory data. Other necessary data for constructing the carbon balance were obtained from previously published scientific works. Carbon balances were calculated using the Net Ecosystem Productivity (NEP) method. The annual increment or production of woody biomass was most intensive in middle-aged stands and lowest in mature and very young stands, ranging from 0.86 to 2.8 t C/ha. Regarding the carbon flux from the stands to the soil, the dominant portion consisted of litter from leaves, fine roots, branches, etc. The proportion of carbon flux from the stands to the soil originating from the understorey vegetation was approximately 7%. The carbon efflux from the soil exceeded the input flow in all stands, resulting in a decrease in soil carbon stock. The NEP values for the studied stands indicated that stands aged 10-40 years acted as carbon sinks, while the 50-year-old stand was carbon-neutral, and stands aged 60 years and older acted as carbon-emitting ecosystems. Although there have been relatively few similar studies conducted in Estonia, the results generally show similar trends in carbon sequestration. However, for instance, values related to soil heterotrophic respiration (R_h) can vary significantly even within the same site, highlighting the importance of continued research in this field.</i></p>			
<p>Keywords: <i>carbon sequestration, net ecosystem production, carbon pools and fluxes, drained peatland forest</i></p>			

SISUKORD

1. Sissejuhatus	6
2. Kirjanduse ülevaade.....	8
2.1. Sookask	8
2.2. Jänese kapsa-kõdusoo kasvukohatüüp.....	9
3. Materjal ja metoodika	11
3.1. Valimi kirjeldus	11
3.2. Ühikute teisendamine ja puuduvate andmete leidmine	12
3.3. Puistu süsinikubilansi komponendid	13
3.3.1. Puude maapealne puitne biomass	13
3.3.2. Puude maa-alune puitne biomass	14
3.3.3. Lehed, muu varis, peenjuured, alustaimestik ja alustaimestiku juured	14
3.3.4. Mulla heterotroofne hingamine	16
3.4. Puistute vanuserea süsinikubilansi leidmine	17
4. Tulemused ja arutelu.....	18
4.1. Puitsesse biomassi seotud süsiniku kogus	18
4.2. Süsiniku vood mulda	20
4.2.1. Peenjuured.....	20
4.2.2. Alustaimestiku maapealne biomass ja juurestik.....	20
4.2.3. Lehed ja muu varis.....	21
4.3. Mullahingamine.....	22
4.4. Puistu vanuserea süsinikubilansid	23
Kokkuvõte	25
Kasutatud kirjandus	27

1. SISSEJUHATUS

Inimtekkeliste kasvuhoonegaaside, sealhulgas CO₂ kontsentratsioonide tõus atmosfääris läbi fossiilsete kütuste kasutamise ja maakasutuse muutuste ning neist omakorda tingitud kliimamuutused on praeguseks kujunenud üheks olulisimaks probleemiks inimkonnale. Samuti on üha suurenev ressursikasutus ja eeltoodud muutused põhjustanud märkimisväärse bioloogilise mitmekesisuse vähenemise. (Foley et al., 2005)

Euroopa Liit, sealhulgas ka Eesti, on erinevate rahvusvaheliste kokkulepetega võtnud endale ambitsioonikaid kohustusi kliimamuutuste leevendamiseks, pidurdamiseks ning liikide kao ja elupaikade degradeerumise peatamiseks. Näiteks on üks Euroopa Liidu ülestest eesmärkidest vähendada 2030. aastaks kasvuhoonegaaside netoheidet 55% võrreldes 1990. aastaga ning saavutada Euroopa Liidu kliimanetraalsus aastaks 2050. Täiendavalt saab välja tuua eesmärgid suurendada taastuvate energiaallikate kasutamist, energiatõhusust ning piirata ressursikasutust jne.(„Kliimaministeerium“, s.a.) Kasvuhoonegaaside heitkoguste vähendamiseks ning teiste eeltoodud eesmärkide saavutamiseks peavad pingutama ja lahendusi leidma kõik põhilised majandussektorid.

Maismaa ökosüsteemidest on metsadel, eriti just boreaalsetel metsadel, oluline roll kliimamuutuste leevendamisel, kuna läbi fotosünteesi osalevad nad aktiivselt süsinikuringes (Dixon et al., 1994; Goodale et al., 2002). Metsaökosüsteemid katavad Euroopa maismaast ligi 40% ning Eestis ca 50%, sidudes igal aastal kokku 10% Euroopa kasvuhoonegaaside emissioonist (Mauser, 2021).

Maa ilma metsad on eriilmelised. Ka Eesti metsad on heterogeensed ning lisaks erinevatele kasvukohatingimustele mõjutavad metsade süsiniku sidumise võimet ka erinevad majandusvõtted (Kukumägi et al., 2017; Paul-Limoges, Black, Christen, Nesic, & Jassal, 2015).

Foreko grupp on Eesti suurim erametsaomanik, omades Eestis ja Lätis kokku üle 70 000 hektari metsamaad („Foreko“, s.a.). Läbi metsamajanduslikke otsuste, saavad grupi ettevõtted mõjutada oma metsade süsinikusidumise võimet. Tarkade otsuste tegemiseks on olulise tähtsusega hea ülevaade metsaressursist ja teaduspõhine lähenemine. Läbi metsakorralduse on ettevõtetel hea ülevaade oma metsaressursist, kuid sellest üksi ei piisa, hindamaks puistute mõju süsinikuringele. Mahukate teadusuuringute läbiviimine või tellimine iga puistu kohta ei ole realistlik. Seetõttu püütakse käesolevas töös hinnata puistute süsinikubilansse, toetudes metsakorraldusest tulenevatele takseerandmetele ja avaldatud teadustööde tulemustele ühe kasvukohatüübi ja peapuuliigi lõikes.

Eesti metsamaast ligikaudu 42% kuulub soometsade klassi („Aastaraamat Mets“, 2021). Kuivendusest mõjutatud kogupindala moodustab Eesti maismaast 1/3. Kuivendatud metsamaid kokku on ca 751 000 ha, mis moodustab samuti üle 30% Eesti metsade kogupindalast. („Maaparandussüsteemide register“, s.a.)

Kõdusoometsad kokku hõlmavad 15,7% metsamaast ehk 364 000 hektarit ja jänesekapsa-kõdusoo kasvukohatüüp ligi 183 000 hektariga moodustab 8% metsamaast. („Aastaraamat Mets“, 2021)

Foreko gruppi kuuluva Roger Puit OÜ metsaga metsamaast ca 20% kuuluvad kõdusoo metsatüüpi ning 15% jänesekapsa-kõdusoo kasvukohatüüpi. Jänesekapsa-kõdusoo kaasikuid on ettevõtte metsaga metsamaast ligikaudu kümnendik. Kuna seda tüüpi puistud moodustavad olulise osa ettevõtte metsamaast, otsustati käesolev töö läbi viia just nende puistute põhjal.

Töö eesmärgiks on koostada süsinikubilansid ja hinnata süsiniku varusid ning sisend- ja väljundvooge jänesekapsa-kõdusoo kasvukohatüübi sookaasikute vanuseraas.

Lähtudes üksikutest varasematest teadustöödest püstitati hüpotees: nooremad ja keskealised puistud seovad süsinikku rohkem, kui küpsed ja vanemad metsad.

Autor avaldab tänu juhendajale, Mats Varikule, olulise toe eest kogu töö koostamise perioodil ja professor Veiko Uri tööühmale võimaluse eest osaleda sarnaste uuringute välitöödel ja seeläbi paremini mõista kasutatud meetodikaid. Lisaks avaldab autor tänu Foreko grupile paindliku tööaja võimaldamise eest kogu õpingute perioodil.

2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

2.1. Sookask

Sookask (*Betula pubescens* Ehrh.) kuulub kaseliste (*Betulaceae*) sugukonna kase (*Betula*) perekonda (Endel Laas, 1987). Lisaks sookasele kuulub perekonda veel ligikaudu 60 liiki heitlehiseid puid ja põõsaid, mille looduslik levila on Põhja-Ameerika ja Euraasia parasvöötmes (Roht, 2007). Looduslikult kasvab Eestis neli kase liiki, lisaks sookasele ka arukask, madal kask ning vaevakask, millest puistuid moodustavad esimesed kaks (*Ibid.*).

Kaskedel on põhja-parasvöötme ja boreaalsetes metsades ökoloogiliselt oluline roll. Suktsessiooni erinevatel etappidel elab nendega koos või toitub neist mitmeid liike nagu näiteks mükoriisaseened, puitu lagundavad seened ning taimetoidulised ja saprotroofsed putukad. Arukask ja sookask on Euroopas ühtlasi ka majanduslikult olulised puuliigid, olles Põhja ja Ida-Euroopas metsanduslikult kõige olulisemad lehtpuuliigid (Hynynen et al., 2010). Madalama kasvu ning jändrikuma ja kõverama tüve tõttu kasutatakse sookaske pigem paberi ja küttepuuna, samas kui arukask on oluline tooraine vineeritööstuses (Ferm, 1990; Hynynen et al., 2010).

Pioneerliigina on kased valgusnõudlikud, kuid nende hea teke või uuenemine läbi seemnete ning juure- ja kännuvõsude võimaldab neil hõivata uusi alasid ning taasasustada häiringualasid. Sookask on arukasest siiski oluliselt varjutalavam (Hytönen, Saramäki, & Niemistö, 2014)

Eestis metsakorralduslikult sookaske ja arukaske ei eristata, vaid neid käsitletakse ühiselt kasena. Ka Soomes ei eristatud metsanduslikult arukaske ja sookaske veel kuni 1980. aastate keskpaigani, kuna sookaske ei peetud väärtuslikuks ning majandussoovituste puhul valgustus- ja harvendusraietel ei arvestatud näiteks tema suurema varjutaluvusega (Ferm, 1990).

Kase enamusega puistuid kasvab Eestis („Aastaraamat Mets“, 2021) andmetel 630 tuhandel hektaril, mis moodustab ca 30% metsamaast. Sookask kasvab looduslikult peamiselt turvasmuldadel või vähese kuivendumõjuga muldadel, arukask aga eelistab viljakamaid ja parasniiskeid või kuivemaid kasvukohatüüpe (Hytönen et al., 2014). Samas on leitud, et niisketel, orgaanilistel muldadel on sookask konkurentsivõimelisem ja kasvab kiiremini kui arukask ning arukask on omakorda kiiremakasvulisem viljakamatel, kuivematel muldadel.

Sookase suurem sobivus happelistele turvasmuldadele ja mürjale kasvukohale tuleneb muuhulgas tema võimest ise oma kasvukoha pH taset muuta ning liigniisketel perioodidel oma juurtesse hapnikku transportida (Ferm, 1990). Nii nagu Eestiski, viitab sookase vana soomekeelne nimi „suokko“ ehk sookask tema sobivusele just märgadele turbaaladele.

2.2. Jänsekapsa-kõdusoo kasvukohatüüp

Lagedatest või hõreda puistuga ning sügava turbalasundiga madal- ja siirdesoodest ning rabadest kujunevad pikaajalise kuivenduse tagajärjel kõdusoometsad, kus turba ladestumine lakkab (Hanell & Päivänen, 2012). Kuivenduse toimel alanev veetase parandab hapnikutingimusi pinnases ja seetõttu hakkab turvas lagunema. Kõdusoometsadele iseloomulikuks on kahanenud turbakihi tõttu langenud maapinna tase, mistõttu puude juurekaelad ja mõnikord ka paljastunud juured jäävad maapinna kohale (Eino Laas et al., 2011).

Kõdusoometsade hulgas eristatakse meil kahte kasvukohatüüpi, mustika-kõdusoo ja jänsekapsa-kõdusoo. Mustika-kõdusoo kasvukohatüüp paikneb vähese kaldega või tasastel aladel. Mikroreljeef on künklik. Mullaks on erineva tüsedusega kuivendatud siirdesoo ja rabaturvas. Puude juurestik asub ülemises, ca 30 sentimeetrises turbakihis. Turvas on väga happeline (pH 2,6 – 3,8). Puistuteks on enamasti männikud ja nende produktiivsus jääb II – III boniteediklassi. Alusmets on hõre või puudub sootuks. Alustaimestik on iseloomulikuks puhmarinde, eriti mustika ohtrus. (Lõhmus, 2006)

Jänsekapsa- kõdusood eristab eelnevast viljakam ning vähem happeline (pH 4,0 – 6,5) muld. Boniteediklass jääb vahemikku I – III ja seetõttu on puistud kõrge tootlikkusega.

Puistutest valdavad kuusikud aga enamuspuuliigiks võib olla ka mänd ja kask, esineb ka sangleppa. Sageli esinevad segametsad. Eeltoodutest kõige madalama tootlikkusega on sookaasikud. Alusmets on kuni keskmise tihedusega. Alusmetsas kasvab pihlaks, toomingas, lodjapuu, kadakas ja vaarikas. Alustaimestikust puhmarinne praktiliselt puudub ning esindatud on jänesekapsa kasvukohatüübile iseloomulikud taimed nagu näiteks jänesekapsas, ussilakk, lillakas, laanelill, saluhein, metskastik, metsmaasikas. Lehtpuumetsadele on iseloomulik mitmete sõnajalgade ohtrus. (Lõhmus, 2006)

3. MATERJAL JA METOODIKA

3.1. Valimi kirjeldus

Käesoleva töö süsinikubilansi arvutused viidi läbi ettevõttele Roger Puit OÜ kuuluvate kinnistute metsatakseerandmete põhjal. Ettevõtte metsahalduse andmebaasist tehti metsaeraldiste elementide päring kõikide kinnistute andmete kohta seisuga 31.08.2023. Päringu tulemus salvestati MS Excel failina. Päringu eesmärk oli saada valimiks võimalikult pikk vanuserida jänesekapsa-kõdusoo kasvukohatüübi sookaasikutest kümneaastase sammuga. Päringu tulemusest koostati valim, filtreerides saadud tabeli tulemusi järgmiste näitajate ja parameetrite alusel:

- 1) KKT = „JO“ – jänesekapsa-kõdusoo kasvukohatüüp
- 2) Rinne = „1“ - I rinne
- 3) Eraldise peapuuliik = „1“ - puuliik on eraldise peapuuliigiks
- 4) Puuliik = „KS“ - kask on otsitav puuliik
- 5) Koosseisu % = „>=80“ - peapuuliigi osakaal I rindes vähemalt 80 %
- 6) Eraldise ha = „>=0,2 ja <2“ - eraldise pindala vahemikus 0,2 ja 2 ha
- 7) Boniteet = „1“ - I boniteet
- 8) Vanus = täiskümned või sellele lähim suurem
- 9) Vanuserühmas mitme eraldise esinemisel valiti hiliseima takseerimise aastaga eraldis.
- 10) Aasta võrdsuse korral langetati juhuslik valik. Lõplikku valimisse (Tabel 1) jäänud eraldiste kohta teostati metshalduse andmebaasist detailsete andmete päring filtriga „Takseerandmed (arvutatud)“, mis andis algses tabelis juba olemasolevatele andmetele lisaks puistu tagavara jooksva juurdekasvu.

Tabel 1. Valimi takseerandmed

Puistu vanus, a	Koosseisu %	Arengu-klass	Puistu kõrgus, m	Puistu dia-meeter, cm	Tagavara, tm/ha	Tüve-mass, t/ha	Tagavara juurdekasv, tm/ha/a	Tüve-massi juurdekasv, t/ha/a	Eraldise pindala, ha
10	100	Noorendik	6,3	3	18	10,4	4	2,3	0,59
20	96	Latimets	13	11	192	110,4	7	4,03	0,4
30	80	Keskealine mets	15	11	104	59,8	8,8	5,06	0,7
40	92	Keskealine mets	22	20	155	89,1	7,6	4,37	0,8
50	91	Valmiv mets	22	17	174	100,1	5,5	3,16	1,04
60	99	Küps mets	24	21	234	134,6	4,9	2,82	0,5
70	95	Küps mets	25	22	204	117,3	3,2	1,84	0,58
81	88	Küps mets	27	29	198	113,9	3	1,73	1,69
91	87	Küps mets	28	31	241	138,6	2,7	1,55	1,11

3.2. Ühikute teisendamine ja puuduvate andmete leidmine

Käesoleva töö alusandmeteks on üksnes metsakorraldusest tulenevad takseerandmed, sealhulgas puistu tagavara (tüvetagavara) ja juurdekasv. Ülejäänud süsinikubilansi komponendid leiti Eestis läbiviidud ning rahvusvahelistes eelretsenseeritavates teadusajakirjades avaldatud teadusuuringute tulemusi kasutades.

Samas kasvukohatüübis kasvavate sookaasikute vanusera süsinikubilansi kohta on Eestis läbi viidud vaid üks uuring (edaspidi tekstis *uuring*) (Uri et al., 2017), seega on käesoleva töö metoodikas kasutatud läbivalt selle töö tulemusi, välja arvatud mõned erandid, mis on sellisel juhul vastavalt viidatud.

Kuna käesoleva töö valimi takseerandmetes (Tabel 1) on puistu (tüve)tagavara ja -juurdekasv antud mahuühikutes (tm), kuid *uuringus* ning süsinikubilansi arvutustes on kasutatud massiühikuid (t), siis mahuühikute teisendamisel massiühikuteks on kasutatud

sookase puidu tihedust 575 kg/m³. Erinevalt ülejäänud metoodikast toetuti selle teisenduse puhul teisele allikale (Buht et al., 2023).

Uuringus leiti, et sookase biomassi erinevate osade (tüvi, koor, oksad, juured, võrsed, lehed jne) süsiniku kontsentratsioon on erinev, jäädes vahemikku 47 kuni 51%. Seetõttu on käesoleva töö süsiniku varude ja voogude arvestuses biomassid teisendatud süsiniku massiks erinevate osade kaalutud keskmise süsinikukontsentratsiooni (47,6%) põhjal.

3.3. Puistu süsinikubilansi komponendid

3.3.1. Puude maapealne puitne biomass

Puude maapealse biomassi moodustavad tüvi, oksad, jooksva aastal kasvanud võrsed ja lehed. Kuna *uuringus* leiti, et erinevad osad moodustavad maapealsest puitsest biomassist kindla osakaalu, mille varieeruvus vanuseraas on väike ning selge trend puudub (va. lehtede osas, mis ei kuulu puitse biomassi hulka), siis kanti *uuringus* käsitletud puistute biomasside osakaalude keskmised (Tabel 2) üle käesoleva töö valmile, mille tulemusena leiti valimi tüvemassile lisaks maapealse puitse biomassi fraktsionaalne jaotus tonnides hektari kohta.

Puude maapealse puitse biomassi erinevate fraktsioonide aastase juurdekasvu ehk produktsiooni leidmisel eeldati, et takseerandmetes olev tüvemassi juurdekasv jaguneb proportsionaalselt puude maapealse puitse biomassiga.

Tabel 2. Maapealse puitse biomassi fraktsionaalne jaotus protsentides (Uri et al., 2017)

Puistu vanus	Tüvemass	Okste mass	Võrsete mass
12	84,3	13,7	2
24	86,5	12,1	1,4
30	87,4	11,5	1
38	84,3	14,7	1
78	87,3	12,1	0,7
Keskmine	85,9	12,8	1,2

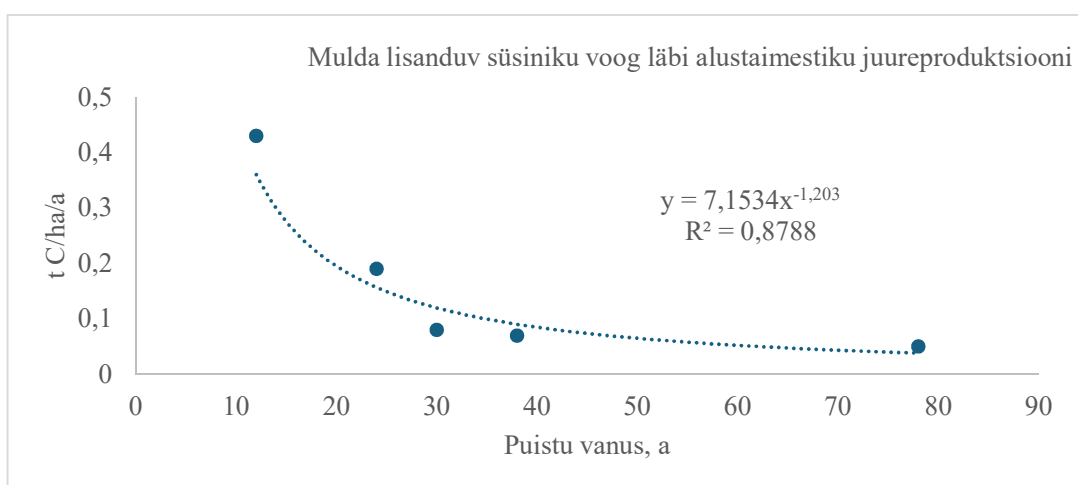
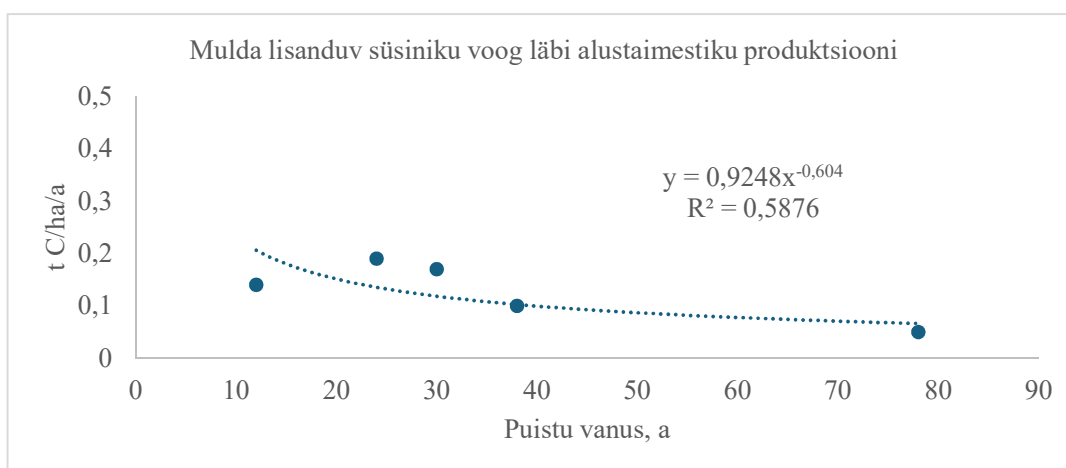
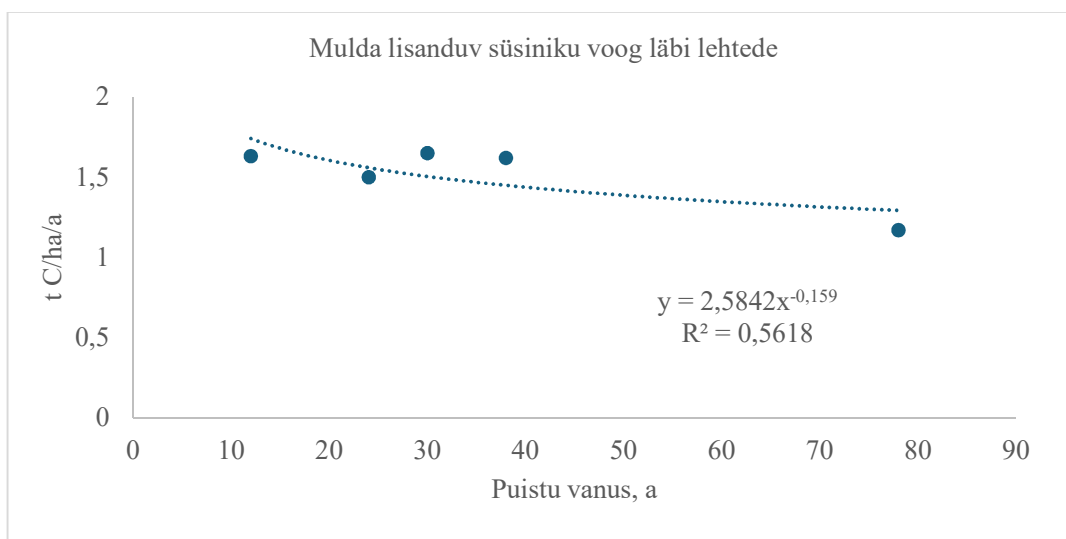
3.3.2. Puude maa-alune puitne biomass

Puude maa-aluse puitse osa biomassist moodustavad känd ja jämedad juured. Jämedateks loeti juured, mille läbimõõt oli üle 2 millimeetri. Käesolevas töös võeti aluseks sookase maa-aluse biomassi osakaal 43% maapealsest biomassist (Buht et al., 2023).

Maa-aluse biomassi aastase juurdekasvu puhul eeldati, et see on proportsionaalne puude maapealse biomassi juurdekasvuga.

3.3.3. Lehed, muu varis, peenjuured, alustaimestik ja alustaimestiku juured

Lehed, peenjuured ja alustaimestik ei kuulu puitse biomassi hulka. Kuna lehtpuumetsas kogu aastane lehtede produktsioon langeb sügisel maapinnale ning eeldame, et laguneb ka alustaimestik ja selle juurestik, siis käsitleti *uuringus* neid kui otsest süsiniku voogu mulda. Lehtede, alustaimestiku ja selle juurestiku poolt mulda lisanduv süsiniku kogus oli negatiivses korrelatsioonis metsa vanusega ning käesoleva uuringu valimis olevale metsade vanusereale arvutati vastav väärtus tõusukordaja põhjal (Joonis 1).



Joonis 1. Seos mulda lisanduva süsiniku koguse ja uuritud puistute vanuse vahel (Uri et al., 2017).

Peenjuurteks loeti puude juured, mille läbimõõt oli alla 2 millimeetri. Peenjuurte lagunemise läbi mulda lisanduva süsiniku kogus leiti *uuringus*, võttes arvesse nende massi uuritud puistute vanusereas ning peenjuurte produktsiooni ja lagunemise kiirust. Kuna peenjuurte varisest mulda lisanduva süsiniku koguse ja puistu vanuse vahel seost ei leitud, siis käesoleva töö süsiniku voogude arvestuses kasutati keskmist aastas mulda lisanduva süsiniku kogust (1,11 t C/ha/a).

Muu varise (urvad, seemned, koor ja oksad) kogus leiti, lahutades *uuringus* toodud maapealsest koguvarisest lehtede varise. Saadud tulemuste puhul seos puistu vanusega puudus ning seetõttu kasutati kogu käesoleva töö valimi puhul keskmist väärtust (0,19 t C/ha/a).

3.3.4. Mulla heterotroofne hingamine

Mullahingamine (R_s), on protsesside kogum, mis hõlmab juurte kasvuhingamist, taimejäänuste lagunemist ja mulla mikroorganismide hingamist ning mille tulemusel eraldub süsihappegaas (CO_2) (Luo & Zhou, 2006). Mulla heterotroofne hingamine (R_h) ehk lagunemishingamine on mulla organismide värske ja vanema orgaanilise aine lagundamisega seotud hingamine (Ruehr et al., 2009). Käesolevas töös käsitleti mulla heterotroofset hingamist kui süsiniku väljundvoogu metsaökosüsteemist, mis varieerus *uuringus* 4,7 – 6,2 t C/ha/a. Kuna R_h ja uuritavate puistute vanuserea vahel seos puudus, siis käesoleva töö süsinikuvoogude arvutamisel rakendati kogu valimi vanusereale keskmist R_h väärtust 5,32 t C/ha/a.

3.4. Puistute vanuserea süsinikubilansi leidmine

Metsaökosüsteemi süsinikubilansi sisendvoo hulka loeti kogu puistu taimestiku maapealse ja maa-aluse osa aastane produktsioon (NPP), millest osa salvestus puitu ja osa suundus mulla süsinikufondi. Käesoleva töö valimi süsinikubilansside leidmiseks arutati eeltoodud metoodikaga puistute peamised süsiniku sisend- ja väljundvood. Vanuserea iga puistu süsinikubilanss, ehk aastane netoproduktsioon (NEP) arutati taimestiku aastase primaarproduktsiooni (NPP) ja heterotroofse mullahingamise (Rh) vahena (Lovett, Cole, & Pace, 2006; Xu, Yang, Li, Shen, & Fang, 2014).

Käesolevas töös positiivse väärtusega NEP näitas süsiniku sidumist ökosüsteemis ning negatiivse väärtusega NEP seda, et vaadeldav puistu emiteerib süsinikku.

4. TULEMUSED JA ARUTELU

4.1. Puitsesse biomassi seotud süsiniku kogus

Puude maapealne biomass oli tugevas seoses ($R^2 = 0,68$) puistu vanusega, suurenedes metsa vanuse tõustes (Tabel 3). Sellest tulenevalt jälgis sama trendi ka puude maapealses osas seotud süsinikukogus. Sarnase tugevusega seos ($R^2 = 0,62$) sookase maapealse biomassi ja puistu vanuse vahel leiti ka (Uri et al., 2017). Maapealse biomassi väärtused võrreldavates vanuseklassides olid aga käesolevas töös mõnevõrra väiksemad. Erinevus võib tuleneda puistute looduslikust erinevusest aga ka sellest, et eelmainitud uuringus vaadeldi majandamata puistuid ja käesoleva töö puhul oli tegemist majandusmetsadega, kus teatud sammuga võidakse teostada hooldusraieid. Lühiaegset valgustus- ja harvendusraie järgset biomassi langust ja selle mõju puistu süsinikusidumisele on näiteks täheldanud uurimuses (Aun, 2021).

Tabel 3. Puitses biomassis seotud süsiniku kogus t C/ha

Puistu vanus, a	Puude maapealne biomass	Jämedate juurte biomass	Kogu puitne biomass
10	5,73	2,46	8,19
20	61,11	26,28	87,38
30	33,1	14,23	47,33
40	49,33	21,21	70,54
50	55,38	23,81	79,19
60	74,47	32,02	106,49
70	64,92	27,92	92,84
81	63,01	27,1	90,11
91	76,7	32,98	109,68

Tabel 4. Puitse biomassi aastane produktsioon t C/ha/a

Puistu vanus, a	Puude maapealne biomass	Jämedate juurte biomass	Kogu puitne biomass
10	1,27	0,55	1,82
20	2,23	0,96	3,19
30	2,8	1,2	4
40	2,42	1,04	3,46
50	1,75	0,75	2,5
60	1,56	0,67	2,23
70	1,02	0,44	1,46
81	0,95	0,41	1,37
91	0,86	0,37	1,23

Maapealse puitse biomassi aastane juurdekasv ehk produktsioon oli kõige intensiivsem keskealistes puistutes ning väikseim küpsetes ja kõige nooremas puistus, jäädes vahemikku 0,86 ja 2,8 t C/ha/a (Tabel 4). Aastase produktsiooni suurus jäi käesolevas töös samasse suurusjärku (Uri et al., 2017) leituga, va. kõige noorema puistu osas vastavalt 0,86 ja 3,84 t C/ha/a. Noorte puistute madalamat produktsiooni on (Aun, 2021) näiteks põhjendanud puude väikeste mõõtmetega noores eas.

Jämedate juurte biomass ja nendes seotud süsinik ning aastane produktsioon arvutati puude maapealse biomassi põhjal ja seetõttu järgisid need sama mustrit.

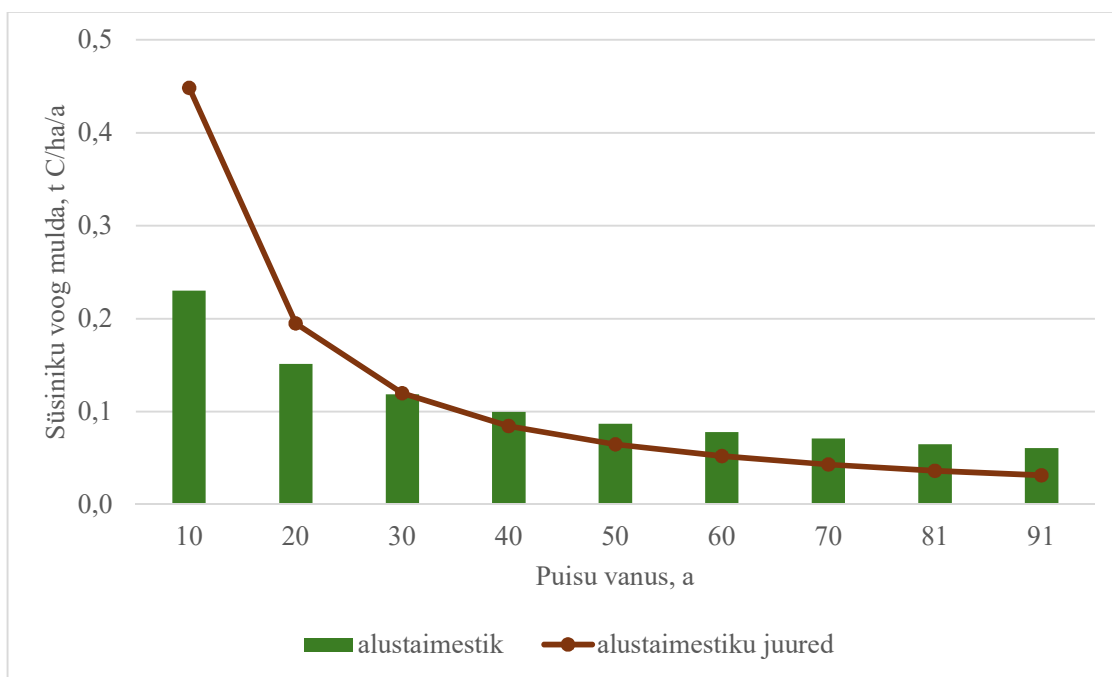
4.2. Süsinikuvood mulda

4.2.1. Peenjuured

Kuna peenjuurte biomassi ja puistu vanuse vahel seost ei leitud ja käesoleva töö valimile rakendati (Uri et al., 2017) keskmist väärtust, siis kajastatakse seda üksnes bilansiarvestuses vastaval real. Oluline on siiski välja tuua, et mitmed teised autorid (nt. Aosaar et al., 2013; Rytter, 2013; Varik et al., 2015) on leidnud märkimisväärselt erinevaid väärtusi peenjuurte produktsiooni ja käibekiiruste osas erinevate muldade ja puuliikide puhul. Mulda suunduvast süsinikuvoost omab peenjuurte varis käesoleva töö metsaökosüsteemi süsinikubilansis lehevarise järel tähtsusetult teist kohta ja seetõttu on edaspidised uuringud selles osas kahtlemata olulised.

4.2.2. Alustaimestiku maapealne biomass ja juurestik

Alustaimestiku maapealsest ja maa-alusest osast mulda tekkiv süsinikuvoog oli suurem nooremates metsades ja langes puistu vanuse tõustes, jäädes vahemikku 0,09 - 0,68 t C/ha/a (Joonis 5). Kogu mulda liikuvast süsinikuvoost moodustas alustaimestiku osakaal vanuserea keskmisena 7,1 %.

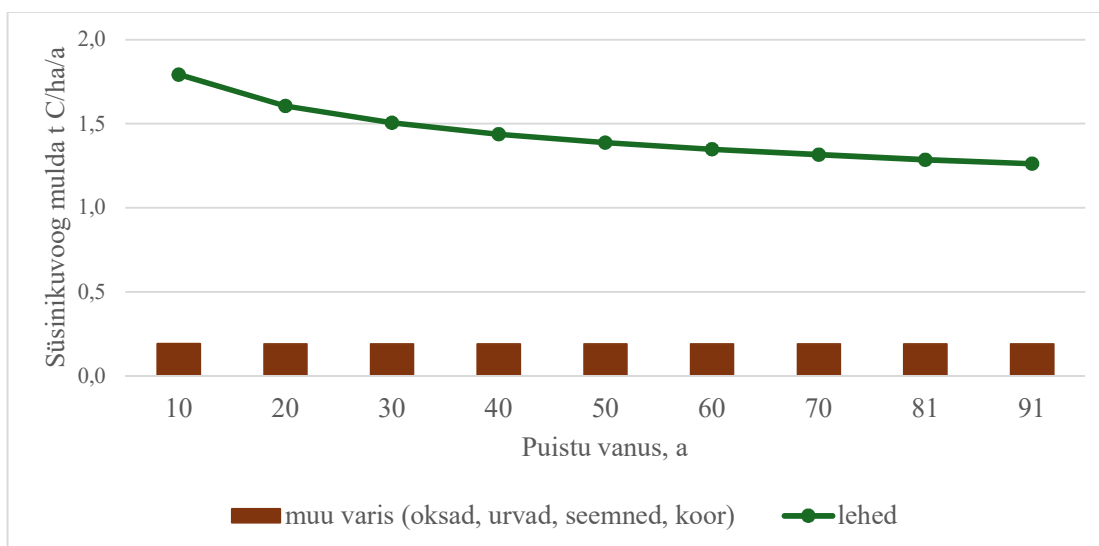


Joonis 5. Alustaimestiku maapealsest ja maa-alusest osast mulda suunduv süsinikuvoog.

Mõnevõrra suuremat (0,42 – 1,57 t C/ha/a) alustaimestikust lähtuvat süsinikuvoogu mulda on märkinud (Aun, 2021) arukaasikutes. Tähtis on siinjuures märkida, erinevate kasvukohatüüpide alustaimestik erineb oluliselt (Lõhmus, 2006).

4.2.3. Lehed ja muu varis

Lehed ja muu varis moodustasid peamise osa mulda suunduvast süsinikuvoost, mille koguhulk jäi uuritud puistutes vahemikku 1,45 ja 1,98 t C/ha/a ning oli negatiivses korrelatsioonis puistu vanusega. (Joonis 6).



Joonis 6. Lehe- ja muust varisest mulda suunduv süsinikuvoog mulda uuritud puistute vanuseraas.

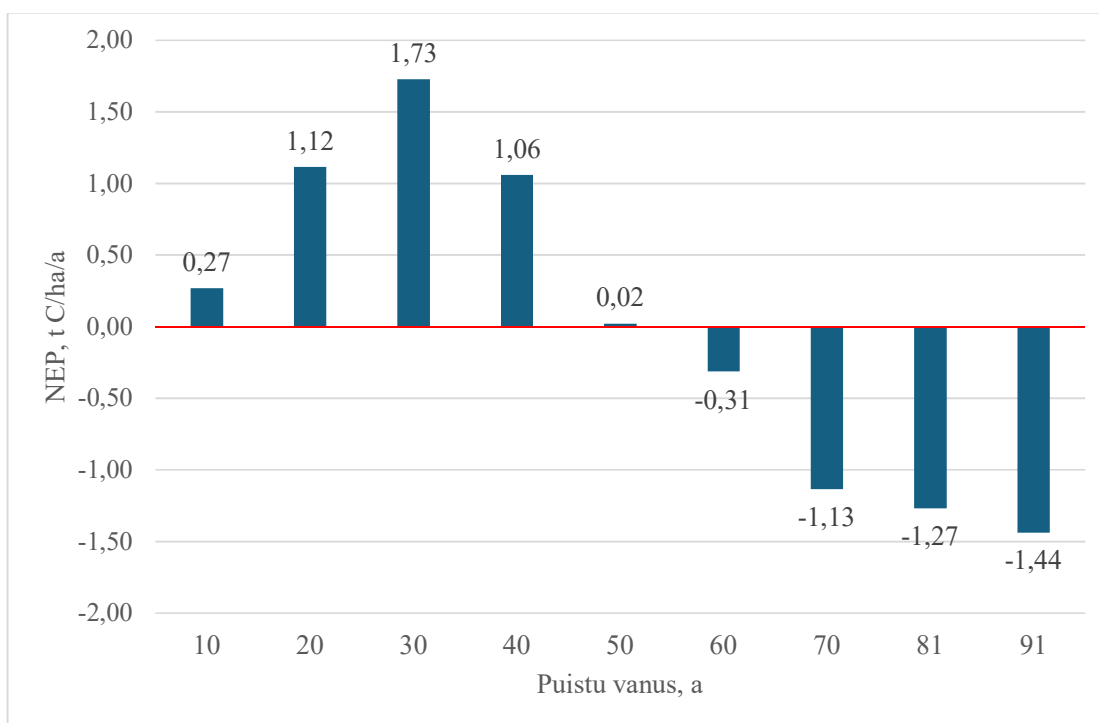
Samas suurusjärgus varisest (lehed+muu) tulenevat süsinikuvoogu on märkinud (Aun, 2021) 21- ja 30- aastastes arukaasikutes. Lehed, muu varis ja peenjuured kokku moodustasid vanuseraia keskmisena ca. 90% mulda suunduvast süsinikuvoost.

4.3. Mullahingamine

Mulla heterotroofne hingamine (R_h) loeti käesolevas töös puistute vanuseraas süsinikubilansside ainsaks väljuvaks süsinikuvoooks ning selle hulk ületas kogu käesoleva töö puistute vanuseraia puhul mulda suunduvat süsinikuvoogu (Tabel 5). Sellest võib järeldada, et antud puistutes turba lagunemine kuivenduse tõttu jätkub ja mulla süsinikuaru väheneb. Seda suutis kompenseerida vaid intensiivne puitse biomassi juurdekasv.

4.4. Puistu vanusera süsinikubilansid

Jänesekapsa-kõdusoo kaasikute vanusera süsinikubilansi väärtused (NEP) järgisid sama trendi puude aastase produktsiooniga, olles madalamad kõige nooremas ja küpsetes puistutes ning suurim väärtus (1,73 t C/ha/a) oli kolmekümneaastases puistus (Tabel 5). Käesolevas töös leitud jänesekapsa-kõdusoo sookaasikute süsinikubilansi väärtused näitasid, et 10 – 40 aastased puistud osutusid süsinikku siduvateks, 50 aastane praktiliselt süsinikuneutraalseteks ning 60 aastane ja vanemad puistud süsinikku emiteerivateks ökosüsteemideks (Joonis 7).



Joonis 7. NEP ehk süsinikubilansid jänesekapsa-kõdusoo sookaasikute vanuseraas.

Tabel 5. Süsinikubilansi komponendid t C/ha/a

puistu vanus, a	10	20	30	40	50	60	70	81	91
<i>Maapealne</i>									
<i>produktsoon</i>									
(1) puitne biomass	1,27	2,23	2,80	2,42	1,75	1,56	1,02	0,95	0,86
(2) lehed	1,79	1,60	1,50	1,44	1,39	1,35	1,32	1,28	1,26
(3) muu varis	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
(4) alustaimestik	0,23	0,15	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06
<i>Maa-alune</i>									
<i>produktsoon</i>									
(5) jämedad juured	0,55	0,96	1,20	1,04	0,75	0,67	0,44	0,41	0,37
(6) peenjuured	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
(7) alustaimestiku juured	0,45	0,19	0,12	0,08	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03
<i>Muld</i>									
Heterotroofne									
(8) hingamine (Rh)	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32
C voog mulda									
(9) (2)+(3)+(4)+(6)+(7)	3,77	3,25	3,04	2,92	2,84	2,78	2,73	2,69	2,65
(10) mulla C bilanss (9-8)	-1,55	-2,07	-2,28	-2,40	-2,48	-2,54	-2,59	-2,63	-2,67
<i>Ökosüsteemi</i>									
<i>produktsoon</i>									
(11) NPP (1)+(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)	5,59	6,44	7,05	6,38	5,34	5,01	4,19	4,05	3,88
(12) NEP (11)-(8)	0,27	1,12	1,73	1,06	0,02	-0,31	-1,13	-1,27	-1,44

Puistu NEP väärtust mõjutas kõige olulisemalt süsiniku väljundvoog ehk heterotroofne hingamine. Uuringus (Uri et al., 2017) jäi heterotroofse hingamise väärtus vahemikku 4,7 – 6,8 t C/ha/a. Sama näitaja, sarnases kasvukohatüübis, 12-aastases sookaasikus varieerus vahemikus 7,2 – 10,1 t C/ha/a (Aosaar et al., 2023), mis näitab heterotroofse hingamise suurt varieeruvust sarnase kasvukohatüübi piires.

KOKKUVÕTE

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli koostada süsinikubilansid ja hinnata süsiniku varusid ning sisend- ja väljundvooge jänsekapsa-kõdusoo kasvukohatüübi sookaasikute vanuseraas. Saadud tulemused on järgnevad:

1. Puude maapealne biomass oli tugevas seoses puistu vanusega, suurenedes metsa vanuse tõustes.
2. Puitse biomassi aastane juurdekasv ehk produktsioon oli kõige intensiivsem keskealistes puistutes ning väikseim küpsetes ja kõige nooremas puistus, jäädes vahemikku 0,86 ja 2,8 t C/ha.
3. Lehed, muu varis ja peenjuured kokku moodustasid vanusera keskmisena ca. 90% mulda suunduvast süsinikuvoost, samas kui kogu alustaimestiku osakaal moodustas ligikaudu 7 %.
4. Mulla heterotroofse hingamise hulk ületas kogu uuritud puistute vanusera puhul mulda suunduvat süsinikuvoogu, mistõttu antud puistutes mulla süsinikuvaru väheneb.
5. Jänsekapsa-kõdusoo kaasikute vanusera süsinikubilansi hinnangud (NEP) järgisid puude aastase produktsiooni trendi, olles madalamad kõige nooremas ja küpsetes puistutes. Suurim väärtus (1,73 t C/ha/a) oli kolmekümneaastasest puistus.
6. Uuritud sookaasikute NEP väärtused näitasid, et 10 – 40 aastased puistud osutusid süsinikku siduvateks, 50 aastane praktiliselt süsinikuneutraalseteks ning 60 aastane ja vanemad puistud süsinikku emiteerivateks ökosüsteemideks. Kuivendatud turvasmullal kasvava puistu toimimise süsiniku sidujana või -emiteerijana määrab ära puude juurdekasv.

Viimane punkt kinnitab ka seatud hüpoteesi, et noored ja keskealised jänsekapsa-kõdusoo kasvukoha sookaasikud seovad süsinikku rohkem, kui küpsed ja vanemad metsad.

Eesti metsad on heterogeensed ning lisaks kasvukohatingimustele mõjutavad metsade süsiniku varusid ja voogusid ka rakendatavad majandusvõtted. Seetõttu on sarnaste uuringute jätkamine äärmiselt oluline, kuna käesolev töö on hinnang ainult ühe puuliigi ja kindla kasvukohatüübi kohta.

KASUTATUD KIRJANDUS

Aastaraamat Mets. (2021). Salvestatud 23. mai 2024, <https://keskkonnaportaal.ee/et/metsa-aastaraamatud>

Aosaar, J., Varik, M., Lõhmus, K., Ostonen, I., Becker, H., & Uri, V. (2013). Long-term study of above- and below-ground biomass production in relation to nitrogen and carbon accumulation dynamics in a grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench) plantation on former agricultural land. *European Journal of Forest Research*, 132(5), 737–749. <https://doi.org/10.1007/s10342-013-0706-1>

Aun, K. (2021). *Short-term effect of felling on carbon fluxes and storages in different Estonian forest ecosystems*. Eesti Maailikool. Salvestatud <http://hdl.handle.net/10492/6941>

Buht, M., Padari, A., Aosaar, J., Varik, M., Aun, K., Uri, M., ... Uri, V. (2023). Biomass allocation and equations for silver birch (*Betula pendula*) and downy birch (*Betula pubescens*) in Estonia. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 38, 1–11. <https://doi.org/10.1080/02827581.2023.2273250>

Dixon, R. K. K., Solomon, A., Brown, S., Houghton, R., Trexler, M., & Wisniewski, J. (1994). Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. *Science (New York, N.Y.)*, 263, 185–190. <https://doi.org/10.1126/science.263.5144.185>

- Ferm, A. (1990). *Coppicing, aboveground woody biomass production and nutritional aspects of birch with specific reference to Betula pubescens*. Metsäntutkimuslaitos. Salvestatud <https://jukuri.luke.fi/handle/10024/520908>
- Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., ... Snyder, P. K. (2005). Global Consequences of Land Use. *Science*, 309(5734), 570–574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>
- Foreko. (s.a.). Salvestatud 24. mai 2024, Foreko website: <https://foreko.ee/>
- Goodale, C., Apps, M., Birdsey, R., Field, C., Heath, L., Houghton, R., ... Shvidenko, A. (2002). Forest Carbon Sinks in the Northern Hemisphere. *Ecological Applications*, 12, 891–899. <https://doi.org/10.2307/3060997>
- Hanell, B., & Päivänen, J. (2012). *Peatland ecology and forestry: A sound approach*. Salvestatud <https://portals.iucn.org/library/node/29077>
- Hynynen, J., Niemistö, P., Viherä-Aarnio, A., Brunner, A., Hein, S., & Velling, P. (2010). Silviculture of birch (*Betula pendula* Roth and *Betula pubescens* Ehrh.) in northern Europe. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 83(1), 103–119. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpp035>
- Hytönen, J., Saramäki, J., & Niemistö, P. (2014). Growth, stem quality and nutritional status of *Betula pendula* and *Betula pubescens* in pure stands and mixtures. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 29(1), 1–11. <https://doi.org/10.1080/02827581.2013.838300>
- Kliimaministerium. (s.a.). Salvestatud 24. mai 2024, Euroopa Liidu kliimaeesmärgid website: <https://kliimaministerium.ee/euroopa-liidu-kliimaeesmargid>
- Kukumägi, M., Ostonen, I., Uri, V., Helmisaari, H.-S., Kanal, A., Kull, O., & Lõhmus, K. (2017). Variation of soil respiration and its components in hemiboreal Norway spruce

- stands of different ages. *Plant and Soil*, 414(1), 265–280.
<https://doi.org/10.1007/s11104-016-3133-5>
- Laas, Eino, Laas, E., Paalits, K., Valgepea, M., Uri, V., Valgepea, M., ... Pikk, J. (Toim). (2011). *Metsamajanduse alused: Õpik kõrgkoolidele*. Tartu: Tartu Ülikooli Kirjastus.
- Laas, Endel. (1987). *Dendroloogia* (2., ümbertööt. tr). Tallinn: Valgus.
- Lovett, G. M., Cole, J. J., & Pace, M. L. (2006). Is Net Ecosystem Production Equal to Ecosystem Carbon Accumulation? *Ecosystems*, 9(1), 152–155.
<https://doi.org/10.1007/s10021-005-0036-3>
- Luo, Y., & Zhou, X. (2006). Soil Respiration and the Environment. Y. Luo & X. Zhou (Toim), *Soil Respiration and the Environment* (lk ix–xi). Burlington: Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-012088782-8/50000-0>
- Lõhmus, E. (2006). *Eesti metsakasvukohatiüübid* (3. tr). Tartu: Eesti Loodusfoto.
- Maaparandussüsteemide register. (s.a.). Salvestatud 25. mai 2024, Riigi infosüsteemi haldussüsteem RIHA website:
<https://www.riha.ee/Infos%C3%BCsteemid/Vaata/msr>
- Mauser, H. (2021, märts 24). Key questions on forests in the EU | European Forest Institute. Salvestatud 24. mai 2024, <https://efi.int/publications-bank/key-questions-forests-eu>
- Paul-Limoges, E., Black, A., Christen, A., Nestic, Z., & Jassal, R. (2015). Effect of clearcut harvesting on the carbon balance of a Douglas-fir forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 203, 30–42.
- Roht, U. (2007). *Lehtpuud. I osa: Acanthaceae-Ericaceae*. Tartu: Atlex.
- Ruehr, N. K., Offermann, C. A., Gessler, A., Winkler, J. B., Ferrio, J. P., Buchmann, N., & Barnard, R. L. (2009). Drought effects on allocation of recent carbon: From beech

- leaves to soil CO₂ efflux. *New Phytologist*, 184(4), 950–961.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03044.x>
- Rytter, R.-M. (2013). The effect of limited availability of N or water on C allocation to fine roots and annual fine root turnover in *Alnus incana* and *Salix viminalis*. *Tree Physiology*, 33(9), 924–939. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpt060>
- Uri, V., Kukumägi, M., Aosaar, J., Varik, M., Becker, H., Morozov, G., & Karoles, K. (2017). Ecosystems carbon budgets of differently aged downy birch stands growing on well-drained peatlands. *Forest Ecology and Management*, 399, 82–93.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.05.023>
- Varik, M., Kukumägi, M., Aosaar, J., Becker, H., Ostonen, I., Lõhmus, K., & Uri, V. (2015). Carbon budgets in fertile silver birch (*Betula pendula* Roth) chronosequence stands. *Ecological Engineering*, 77. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.01.041>
- Xu, B., Yang, Y., Li, P., Shen, H., & Fang, J. (2014). Global patterns of ecosystem carbon flux in forests: A biometric data-based synthesis. *Global Biogeochemical Cycles*, 28.
<https://doi.org/10.1002/2013GB004593>

Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Jan Siimson,
(10.10.1975)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö „Süsinikubilanss jänesekapsa-kõdusoo kasvukohatüübi sookaasikute vanuseraas“, mille juhendaja on Mats Varik,
 - 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
 - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
 - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemisekskuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

Jan Siimson /allkirjastatud digitaalselt/
allkiri

Tartu, 27.05.2024

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Mats Varik /allkirjastatud digitaalselt/
(juhendaja nimi ja allkiri)

27.05.2024
(kuupäev)