

TARTU ÜLIKOOL  
BOTAANIKA JA ÖKOLOOGIA INSTITUUT  
ÖKOFÜSIOLOOGIA ÕPPETOOL

KAIRI RAIME

**Varise- ja mullasüsiniku hulga seos võrastiku  
valguse läbilaskvuse ja puistu koosseisuga**

MAGISTRITÖÖ

**Juhendajad: Prof. Olevi Kull  
PhD Robert Szava-Kovats**

TARTU 2007

## SISUKORD

1. SISSEJUHATUS .....	3
1.1. Süsinikuringe ja süsinik metsades .....	3
1.2. Mullasüsiniku varud ja nende mõõtmine.....	4
1.3. Maapealse biomassi seos mullasüsiniku hulgaga.....	8
1.4. Lehepinnaindeksi ja biomassi seos lehestikus neeldunud kiirgusega .....	10
1.5. Puistu koosseisu mõju mulla süsiniku hulgale ja võrastikualustele valgustingimustele ...	13
1.6. Magistritöö eesmärgid .....	17
2. MATERJAL JA METOODIKA.....	18
2.1. Uurimisala iseloomustus .....	18
2.2. Andmete kogumine .....	19
2.3. Mulla-, kõdu- ja variseproovide analüüs .....	20
2.4. Poolsfäärifotode ja rohurinde valgusandmete analüüs .....	21
2.5. Andmete analüüs .....	22
3. TULEMUSED .....	24
3.1. Varise- ja kõdukihi süsiniku ning kogu mullasüsiniku kogused erineva peapuuliigiga puistutes.....	24
3.2. Puu- ja rohurinde valguse läbilaskvus erineva peapuuliigiga puistutes .....	24
3.3. Puu- ja rohurinde valguse läbilaskvuse seos puurinde liigilise koosseisuga.....	26
3.4. Puu- ja rohurinde läbilaskvuse prognoos sõltuvalt puurinde liigilisest koosseisust.....	27
3.5. Süsiniku koguste seos puurinde liigilise koosseisu ning puu- ja rohurinde valguse läbilaskvusega.....	29
3.6. Varise- ja kõdukihi süsiniku hulga prognoos sõltuvalt puurinde liigilisest koosseisust ...	30
4. ARUTELU .....	33
5. KOKKUVÕTE .....	41
6. SUMMARY .....	43
7. TÄNUAVALDUS .....	45
8. KASUTATUD KIRJANDUS .....	46

# 1. SISSEJUHATUS

## 1.1. Süsinikuringe ja süsinik metsades

Süsinikuringe on üks biogeokeemilistest ringetest, mis kirjeldab süsiniku liikumist erinevate vormidena biosfääri, atmosfääri, ookeanide ja mandrilise maakoore vahel. Süsinikuringe ei ole tänapäeval täielikult tasakaalustatud. Fossiilsete kütuste põletamise ja metsade hävitamise tõttu eraldub inimtegevusest atmosfääri ligi 8 miljardit tonni süsinikku aastas. Sellest 3 miljardit tonni süsinikku jääb atmosfääri ja aitab kasvuhooneefekti kaudu kaasa globaalsele soojenemisele. Ülejäänud lahustub ookeanides või seotakse ja kasutatakse fotosünteesi käigus biomassi või mulla orgaanilise aine moodustamiseks (Grace 2001). Süsihappegaasi sisaldus atmosfääris on tööstusliku revolutsiooni algusest saadik pidevalt suurenenud. Aastatel 1980-2006 on suurenemine olnud umbes 12%: 340 ppm 1980. aastal kuni 380 ppm 2006. aastal (Hofmann 2006). Süsihappegaas on üks olulisemaid kasvuhooneefekti tekitavaid gaase ning selle kontsentratsiooni suurenemine mõjutab oluliselt kogu maailma kliimat ja loodust.

1997. aastal võeti Jaapanis vastu Kyoto protokoll, mille kohaselt peavad sellega liitunud riigid aastateks 2008-2012 vähendama oluliselt kuue kasvuhoonegaasi ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , HFCd, PFCd ja  $\text{SF}_6$ ) emissiooni, võrreldes 1990. aastaga. Eesti ratifitseeris ÜRO kliimamuutuste raamkonventsiooni Kyoto protokoll 4. septembril 2002. aastal, mille kohaselt on riik kohustatud vähendama 1990. aastaga võrreldes oma territooriumilt aastatel 2008-2012 õhku paisatavate kasvuhoonegaaside koguseid 8% võrra (EV Keskkonnaministeerium 2005).

Et leida parimat ja efektiivseimat viisi, kuidas süsinikuringe tasakaalu säilitada ja ebasoodsaid muutusi peatada ja mõista, mida need muutused endaga kaasa toovad, on vajalikud paremad teadmised süsinikuringe toimimisest, selle komponentidest, voogudest, varudest ja neid mõjutavatest teguritest. Vajalikud on täpsemad andmed ka süsiniku koguhulga ja nende varude paiknemise kohta maakeral, sh. süsiniku sidumisest mullas ja maa-aluses biomassis.

Kui mõned erandid (nt. troopilised rohumaad) välja jätta, siis arvatakse, et maismaa suurimad süsinikuvarud paiknevad metsades (biomassina ja mullasüsinikuna) ning taimkatte tüübina annavad metsad suurima osa maailma primaarproduktioonist (Malhi *et al.* 1999). Metsades sisalduv süsinikuvaru moodustab 1150 Gt (Dixon *et al.* 1994). Sellest 49% paikneb boreaalsetes metsades, 14% parasvöötme metsades ja 37% troopilistes metsades. Keskmiselt 69% metsaökosüsteemide süsinikust paikneb orgaanilise aina mullas ja 31% elusbiomassina (Dixon *et al.* 1994). Orgaaniline süsinik on metsades jaotunud elusbiomassi, surnud puidu (oksad ja tüved maapinnal, seisvad surnud puud, kannud, suured surnud juured),

metsakõdu ja –varise (orgaaniline aine mineraalmulla peal, va. elusad juured ja surnud puit), ning mineraalse mulla vahel (Bormann ja Likens 1994).

Metsade süsinikubilansi määrab süsinikku siduvate protsesside (fotosüntees, puude kasv, süsiniku akumulatsioon muldades) ja süsinikku eraldavate protsesside (nt. elusbiomassi hingamine, varise mikroobne lagunemine, mulla süsiniku oksüdatsioon, häiringud) vahekord. Need protsessid toimuvad erinevas ajaskaalas (päevases, aastases, mitmeaastases, aastakümnetes jne.) ja neid mõjutavad paljud kliima- ja keskkonnategurid nagu temperatuur, niiskus, häiringute sagedus (Malhi *et al.* 1999).

## 1.2. Mullasüsiniku varud ja nende mõõtmine

Suuremat osa maismaa pinnast katab mullakiht. Jämedalt võetuna moodustab 45% mulla ruumalast mineraalne tahke aine, 5% orgaaniline tahke aine, 25% vesi ja 25% õhk. Orgaanilise aine sisaldus mullas on väga varieeruv. Turbamuldade tahkest fraktsioonist moodustab orgaaniline aine kuni 95%. Samas on muldi, milles orgaanilise aine sisaldus ei ületa 1% piiri (Eerme 1996).

Mullakihi vertikaalne profiil jaguneb mitmeks mullahorisondiks. Neist kõige ülemine, O-horison ehk kõduhorison, sisaldab kõige enam orgaanilist ainet, puulehti ja muid taimejäänuseid. Selle horisoni alumisel piiril on taimejäänused tavaliselt juba lagunened huumuseks ja algmaterjal pole enam identifitseeritav. Järgmine, A-horison ehk huumusehorison, koosneb küll olulisel määral mineraalsest aine, kuid sisaldab ohtralt huumust ja on temas leiduva elustiku tõttu bioloogiliselt väga aktiivne. Mullas liikuv vesi kannab sügavamale nõrgudes kaasa mulla kõige peenemate fraktsioonide osakesi ja lahustunud orgaanilisi aineid. A-horisoni alused mullahorisonid sisaldavad orgaanilist ainet vähem kui ülemised horisonid. Vähem kui 5% mulla ruumalast moodustav orgaaniline aine on mulla viljakuse määraja. Huumus on toiduks mulla mikroorganismidele ning tema sisaldusest sõltuvad nii mulla füüsikalised kui keemilised omadused. Muldade tekkimine on pikaajaline protsess. Paarikümne sentimeetri paksuse mullakihi moodustumiseks kulub olenevalt kliimast ja muudest keskkonnatingimustest 1500-7500 aastat (Eerme 1996).

Suur osa metsade süsinikubilansi kohta tehtud uuringutest on keskendunud rohkem maapealsele süsinikule, kuigi maapealne süsiniku akumulatsioon taimedes on vaid osa kogu süsinikust metsas. Tunduvalt vähem on teada, mis toimub maa all nii juure biomassi kui ka mulla orgaanilise aine osas, kui suured on mullas paiknevad süsinikuvarud, kuidas need paiknevad. Atmosfääri süsihappegaasi kontsentratsiooni suurenemine ja sellest tingitud

õhutemperatuuride muutus muudab ilmselt süsiniku jaotust atmosfääri, taimkatte ja muldade vahel. Praegu pole veel päris selge, kuidas atmosfääri süsihappegaasi kontsentratsiooni suurenemine mulla süsinikuvarusid mõjutab (Conen *et al.* 2005). Veel üheksakümnendate aastate lõpus oli suhteliselt vähe teada süsiniku dünaamikast ja sidumisest mullas. Pärast seda on mullasüsiniku uurimisele ja selleks vajalike uurimismeetodite arendamisele hakatud rohkem tähelepanu pöörama ning selles osas on tehtud olulisi edasiminekuid.

Enamik mulla orgaanilise süsiniku varu suuruseks pakutud hinnanguid jäävad vahemikku 1400-1600 Pg süsinikku (Schlesinger *et al.* 2000). Maailma muldades paikneb umbes kolm korda rohkem süsinikku kui taimkattes (Schlesinger 1997; Watson *et al.* 2000) ning ligikaudu 55 Pg kogu sellest mullasüsinikust paikneb mulla pinnal asetsevas varises ja kõdus. Kuna see suurus on sarnane maailma maismaa primaarse netoproduktiooni (NPP) väärtusele, siis keskmine aeg, mis kulub varise lagunemiseks, on ligikaudu üks aasta (Schlesinger *et al.* 2000).

Liikudes ekvaatorist kaugemale väiksematelt laiuskraadidelt suuremate suunas, suureneb süsinikuvaru mullas üldiselt piki temperatuurigradiendi, peegeldades surnud taimse materjali aeglasemat lagundamist jahedamas keskkonnas (Malhi *et al.* 1999; Schimel *et al.* 2000). Suurem osa mullasüsiniku varudest paiknebki põhjapoolsetes parasvöötme ja boreaalse vöötme metsades (Schlesinger 1997; Watson *et al.* 2000). Boreaalsete metsade mullad sisaldavad keskmiselt rohkem süsinikku kui mistahes teised metsabioomid maailmas, sest süsiniku varud paiknevad seal orgaanilise aine varudena sügaval, tihti külmunult (Dixon *et al.* 1994), püsites mitmetest aastatest kuni sajanditeni (Black *et al.* 2005). Troopilises vöötmes on primaarproduktioon tunduvalt suurem kui boreaalses vöötmes, kuid süsinikuringe on kiirem ja suurem osa mulda jõudvast süsinikust eraldub kiiresti tagasi atmosfääri (Black *et al.* 2005; Malhi *et al.* 1999). Boreaalsed metsad mängivad seega olulist rolli globaalses süsinikuringes ja seetõttu on süsinikuvarude uurimise seisukohalt oluline hinnata boreaalsete metsade mullas olevat süsiniku hulka ja leida selleks minimaalse aja- ja vahendite kuluga kasutatavaid meetodeid.

Ka suhteliselt väikesed muutused mulla süsinikuvarudes (nt. kliima ja maakasutuse muutuste või inimtegevuse tulemusena), võivad mõjutada väga oluliselt lokaalset ja regionaalset süsinikubilanssi (Conen *et al.* 2005). Mulla ja atmosfääri süsinikuvarud on omavahel seotud: kui süsiniku eraldumine mullast suureneb, siis kasvab süsihappegaasi hulk atmosfääris ning süsiniku suurem sidumine mullas vähendab süsihappegaasi hulka atmosfääris. Mure kliima soojenemise pärast on suurendanud huvi süsiniku sidumise vastu muldades, püüdes sel teel vähendada atmosfääri süsihappegaasi kontsentratsiooni (Ellert *et al.* 2000).

Muundumisele allumise või energeetilise väärtuse alusel eristatakse mullas: aktiivset, mõõdukat ja passiivset süsinikuvaru. Seda jaotust on laialt kasutatud lagunemise dünaamika kirjeldamisel (Khanna *et al.* 2001; Bandaranayake *et al.* 2003). Neil kolmel vormil on erinevad käibe kiirused:

1. Aktiivse süsiniku ringluse kestvusteks on kuud kuni aastad; seda varu saab vabalt bioloogilistes protsessides kasutada. See hõlmab endas mikroobset biomassi ja labiilseid orgaanilisi ühendeid, eeldatavalt reageerib see varu kiiresti füüsikalistele, keemilistele ja mikroklimaatilistele muutustele mullakeskkonnas. See varu moodustab vähem kui 5% mulla orgaanilisest süsinikust.
2. Mõõduka süsiniku ringluse kestvuseks on kümned aastad, selle varu moodustab tavaliselt umbes 20-40% mulla orgaanilisest süsinikust.
3. Passiivse süsiniku puhul on kestvuseks sajad kuni tuhanded aastad, selle varu moodustab tavaliselt ligikaudu 60-70% mulla orgaanilisest süsinikust

Aktiivse süsinikuvaru mõju toitainete voogudele on oluliselt suurem kui passiivsetel varudel. Kuid kui eesmärgiks on suurendada süsinikuvarusid mullas, siis oleks kasulikum süsiniku muundamine mõõdukasse või passiivsesse vormi, kust on kaod väiksemad ja süsinik võib jääda mulda sadadeks või isegi tuhandeteks aastateks (Khanna *et al.* 2001).

Muld on nii ajas kui ruumis väga varieeruvate omadustega, seda nii vertikaalses kui horisontaalses suunas. Ka süsiniku sisaldus varieerub erineva sügavusega mullakihtides. Ühed mullahorisonid akumulierivad süsinikku, teistest liigub seda välja. Mulla orgaanilise aine kontsentratsioon väheneb peaaegu alati eksponentsiaalselt mulla sügavusega (mida sügavamal mullas, seda väiksem on tavaliselt süsiniku kontsentratsioon), mis peegeldab selle päritolu maapealsest taimsest varisest ja juurevarisest. Seega asub suurem osa mulla süsinikuvarust mullapinna lähedal, kus see on avatud mikroobsele lagundamisele, erosioonile ja inimtegevusest tulenevatele häiringutele (Schlesinger *et al.* 2000; Kimble *et al.* 2001). Metsaraied või tulekahjud vähendavad süsinikku hulka mullas, nii otseselt kui pikemaajalise sisendvoogude vähenemisega, vähemalt seni kuni juurte biomass ja maapealne biomass taastuvad ja moodustuv varise hulk saavutab häiringueelse ajaga võrreldava taseme (Rice 2002). Martin *et al.* (2005) uurisid süsiniku sisaldust erinevas vanuses puistute (11 kuni 65 aastat) ülarinde biomassis ja mullas ning näitasid, et puistu vananedes süsiniku sisaldus ülarinde biomassis suureneb, kuid süsiniku hulk mineraalses mullas eri vanusega puistutes oluliselt ei erinenud.

Üha suurenev huvi mullasüsiniku kui ühe võimaliku kliimamuutuste mõjutaja vastu on andnud alust mitmeteks teadustöödeks mulla orgaanilise süsiniku sisalduse hindamise ja selle varieeruvuse kohta (Conant ja Paustian 2002; Conant *et al.* 2003; Fernandez *et al.* 1993;

Homann *et al.* 2001; Huntington *et al.* 1988; Liski 1995) ning mulla süsinikuvarude detailsetele kirjeldustele (Garten *et al.* 1999). Sõltuvalt uurimismeetodist ja mulla tüübist, valitakse ka sobivaim proovivõtmise tehnika, kusjuures mullaproovide võtmisel tuleb arvestada terve hulga faktoritega (proovivõtmise koht, aeg, sügavus, hulk, proovide arv jm.), et kogutud andmed oleksid võimalikult realistlikud ja hiljem kasutatavad (Kimble *et al.* 2001; Ellert *et al.* 2001). Enamik eespool mainitud uurimustest vaatlevad metsaalust orgaanilist materjali (koosneb varisekihist ja kõdukihist) ja mitmeid nende all asetsevaid kihte ülemises 30 cm paksuses mineraalses mullakihis üksteisest eraldi. Vaatluse alla võetav mullakihi sügavus varieerub erinevates uurimistöodes 30 sentimeetrist kuni 70 sentimeetrini (Liski 1995; Huntington *et al.* 1988; Fernandez *et al.* 1993). Samuti on sõltuvalt uurimusest mullaproovi võtmiseks kasutatav mullapuuri ristlõikepindala, väljakaevete augu suurus ja võetud proovide arv väga erinevad, sõltudes konkreetsest uurimiseesmärgist. Mulla süsiniku sisalduse arvutamiseks maapinna pindalaühiku kohta ( $\text{kg C m}^{-2}$ ) on kasutatud protsentuaalset süsiniku sisalduse väärtust ja mulla massi maapinnaühiku kohta ( $\text{kg m}^{-2}$ ). Võrreldes täpsusega, millega saab määrata süsinikusisaldust atmosfääris (vähem kui 1 ppm  $\text{CO}_2$ ), ei ole mulla süsinikuvarude ja nende muutuste hindamise täpsus eriti suur, kuid mullasüsiniku varude uurimiseks on see tõenäoliselt piisav (Conen 2005).

Mullaomaduste (sealhulgas süsiniku sisaldus) hindamiseks suurematel aladel kasutatakse praegu tihti mullakaarte, kuid paljude piirkondade kohta on mulla uuringute andmed vananenud või puuduvad üldse. Alternatiivina mullakaartidele kasutatakse geoloogiliste ja keskkonnatingimuste vahelisi seoseid mulla omaduste prognoosimiseks mingil alal. Mulla omadused sõltuvad kliimast, aluskivimist, taimkattest, häiringute esinemise ajaloost ja kestusest. On võimalik leida nende tegurite omavahelisi seoseid ning nende faktorite seoseid mullaomadustega. Kahjuks aga faktorid, mida on lihtne kaardistada või mõõta (nt. sademed, temperatuur, taimkate, kõrgus merepinnast) võivad süsiniku hulka mullas vähem mõjutada kui faktorid, mida on raskem iga prooviala puhul määrata (nt. aluskivim, häiringute esinemise ajalugu), kui seda pole varem dokumenteeritud (Bolstad ja Vose 2001).

Metsamuldade orgaanilise süsiniku sisaldus ja dünaamika erinevad oluliselt põllumajandusmuldade omadest: metsades on mulda sisenev varis enamasti madalama kvaliteediga ja mullad ei ole eksponeeritud nii ekstreemsetele keskkonnatingimustele. Seetõttu ei ole analüüsimeetodid, mis on välja töötatud põllumajandusmuldade jaoks, tihti kasutatavad metsamuldade uurimiseks (Khanna *et al.* 2001). Metsamuldade aktiivse mullasüsiniku varu määramise meetoditena on Khanna *et al.* (2001) pakkunud välja mikroobse biomassi ja mikroobse hingamise mõõtmist, kuna mikroorganismid moodustavad olulise osa aktiivsest süsinikuvarust, kuid aktiivne süsinikuvaru võib sisaldada ka

mittemikroobset osa. Meetodid, mis ühendavad mulla füüsikalist fraktsioneerimist või keemilist ekstraheerimist hindamaks aktiivset mullasüsiniku varu, võivad eelnevale lisaks anda täiendavat informatsiooni. Üha rohkem on hakatud tähelepanu pöörama ka mulla süsiniku hulga sisalduse prognoosimisele kaugseire meetodite ja prognoosimudelite abil.

Mullateaduses eristatakse varisekihti kui mullapealset orgaanikakihti ning erinevaid mullahorisonte, kusjuures ka kõdukiht loetakse mullahorisontide hulka, kuid paljude metsa süsinikuvarusid käsitlevate ökoloogiliste uurimuste puhul vaadeldakse varise- ja kõdukihti koos. Federer (1982) kirjeldab oma töös, kui raske on varise- ja kõdukihte üksteisest eristada ja kui subjektiivne see eristus on ning kuivõrd erinevate kihtide paksuse hinnangud varieeruvad eri ajal samas kohas mõõtes, isegi kui nende summaarne paksus on ajas muutumatu. Tihti on ka kõdukihti huumushorisondist raske eristada. Federer (1982) kirjeldab oma töös mitmeid erinevaid kriteeriume, kuidas ja mille alusel eristatakse erinevaid kihte mineraalse mulla peal olevas orgaanilises materjalis (ingl. k. *forest floor*, koosneb erinevas lagunemisastmes varisest ja kõdust) ning orgaanilisi kihte mineraalses mullas. Mitmete häiringute (näiteks raietegevus, erosioon ja kuhjumine, vihmausside, putukate ja väikeste imetajate tegevus, tormiheide) tulemusena võivad varise- ja kõdukihid ning mineraalse mulla horisondid olla omavahel segatud, mis teeb nende eristamise veelgi keerukamaks (Federer 1982).

### **1.3. Maapealse biomassi seos mullasüsiniku hulgaga**

Süsiniku sidumine muldades toimub taimede produktsiooni kaudu. Taimed kasutavad süsihappegaasi fotosünteesil tootmaks orgaanilist materjali taimekudede ülesehitamiseks. Mulla orgaaniline süsinik (SOC) pärineb peamiselt maaalustest ja -pealsetest taimejäänustest, mis varisena mulda satuvad. Osa sellest orgaanilisest süsinikust seotakse mulla elustiku poolt erinevatesse orgaanilistesse ühenditesse, mis jäävad mulda (nt. huumusena) ja võivad seal püsida sadu või isegi tuhandeid aastaid, väike osa leostub lahustuvate orgaaniliste ühenditena, ülejäänud eraldub süsihappegaasina tagasi atmosfääri (Cheng *et al.* 2001; Khanna *et al.* 2001).

Orgaanilise materjali lagundamine mullas on keerukas mitmeetapiline protsess, milles osalevad nii putukad, bakterid kui ka seened (Grace 2001) ning mille tulemusena muudavad mikroorganismid taimsest materjalist pärineva süsiniku mulla orgaaniliseks süsinikuks. Orgaanilised ühendid lagundatakse väiksemateks osadeks, kuni need on muutunud mikroorganismidele kättesaamatuks, moodustades tugevaid sidemeid mulla mineraalsete



osakestega. Mulla orgaanilise süsiniku muundamine vähem labiilsetesse vormidesse on osa süsiniku sidumise protsessist (Khanna *et al.* 2001).

Erinevate uurijate jaoks võib terminil „mulla orgaaniline süsinik” (SOC) olla erinevaid tähendusi. Mõnede jaoks võib see tähendada erineva lagunemisastmega taimejäänuseid või mulla orgaanilist süsinikku, mis on seotud erineva suurusega mullaosakesega; teiste jaoks võib see tähendada keemilisi ühendeid, mis sisaldavad spetsiifilisi struktuure või funktsionaalseid rühmi. See termin on olnud aktiivselt kasutusel kirjanduses, mis käsitleb süsiniku muundumise dünaamikat keskkonnas ning selle modelleerimist (Cheng ja Kimble 2001).

Paljud faktorid võivad orgaanilise materjali lagunemist aeglustada ja selle tulemusena mõjutada mulla võimet süsinikku varuda. Sellisteks teguriteks on näiteks kliimategurid (temperatuur ja sademed), mulla savi sisaldus ja mineraalne koostis, maastik, reljeef, taimkate, mulla bioloogiline aktiivsus. Mulla orgaanilise süsiniku muundumine sõltub kindlasti ka varise kvaliteedist, kui hästi see allub lagundamisele (Cheng *et al.* 2001; Khanna *et al.* 2001; Czimczik *et al.* 2005; Saleska *et al.* 2002) ning samuti häiringute (nt. raie, põlengud) esinemisest ja kestusest (Czimczik *et al.* 2005). Lagunemine on aeglasem madalamatel temperatuuridel, samuti kõrge või madala mulla niiskusesisalduse korral. Liikudes reljeefil merepinnast kõrgemale, suurenevad mulla orgaanilise süsiniku varud temperatuuri alanemise ja sademete suurenemise ja savi kontsentratsiooni vähenemisega (Czimczik *et al.* 2005).

Heitlehistes metsades ei mõjutanud raiejääkide raiesmikule maha jätmise kuidagi mulla ülakihi orgaanilise süsiniku varu, kuid okaspuumetsades suurenes see kuni u. 18%, ilmselt aga vaid ajani, mil need raiejäägid said ära lagundatud. Samas kui raiejäägid eemaldada, siis see ei vähenda mitte ainult potentsiaalset sisendvoogu mulla orgaanilise süsiniku varusse järgmise metsa raietsükli ajal, vaid võib tõsiselt häirida ka toitaineteringlust ning puude kasvu (Czimczik *et al.* 2005).

Mulla orgaaniline aine (SOM) on kompleksne segu värsketest ja erineva lagunemisastmega loomsetest ja taimsetest jäänustest, elusast ning lagunevast mikroobsest materjalist, mulla heterotroofide biomassist ning suhteliselt püsivatest huumuseosakestest. Süsinik on peamine keemiline element mulla orgaanilise aine koostises, moodustades 48-60% kogu kaalust. Orgaaniline materjal on üks keerulisemaid, dünaamilisemaid ja reaktiivsemaid mulla komponente. Erinevatel orgaanilistel osakestel on erinevad omadused, mis mõjutavad mulla protsesse ja viljakust. Seega oleks huvitav uurida seost mulla koostisosade ja taimse produktsiooni vahel, kuid kahjuks on neid osi tihti raske eristada (Rosell *et al.* 2001).

Kuna süsinik siseneb muldadesse peamiselt maapealse või -aluse surnud taimse orgaanilise materjalina (varisena), siis on süsiniku sisend muldadesse heas korrelatsioonis taimkatte primaarse netoproduktiooniga (NPP). Szakács *et al.* (2004) uurisid oma töös produktiooni näitajate (sh. lehepinnaindeksi ja biomassi kasvukiiruse) seost mulla süsiniku hulgaga karjamaadel ning leidsid, et lehepinnaindeksi (LAI) ja mulla süsiniku varu vahel on väga tugev seos ( $r = 0,97$ ). Samas aga ei tarvitse NPP suurenemine proportsionaalselt kohe viia süsiniku akumulatsiooni suurenemisele muldades, sest sisendit võivad vähendada suuremad hingamiskulud (Finzi ja Schlesinger 2002; Schlesinger ja Lichter 2001). Paljudes muldades akumulereb vaid väike osa varisest moodustunud mulla orgaanilisest süsinikust, suurem osa eraldub heterotroofse hingamise käigus süsihappegaasina atmosfääri (Czimeczik *et al.* 2005). Euroopa metsades moodustas 1990. aastal süsiniku sisend mulda ligikaudu 76% NPP-st (0,596 Pg süsinikku aastas) (Nabuurs *et al.* 2003). Sellest sisendist 87% eraldus heterotroofse hingamise käigus ja vaid 13,5% süsinikust akumulereus mullas. Seega mullas akumulerev orgaaniline süsinik hõlmas umbes 10% NPP-st (Czimeczik *et al.* 2005). Janssens *et al.* (2001) hinnangu järgi eraldus euroopa metsades 80% kogu primaarproduktioonist (GPP) atmosfääri hingamise käigus ja 70% ökosüsteemi hingamisest toimus maa all. Maismaa ökosüsteemides mulla pinnalt eralduv süsihappegaasi voog on mulla orgaanilise materjali lagunemisel ja juurehingamisel eralduva süsihappegaasi voogude summa (Högberg *et al.* 2005). Raichi ja Schlesingeri (1992) andmetel moodustab mulla pinnalt eralduv süsihappegaasi voog 20-40% kogu maismaa süsihappegaasi emissioonist.

#### **1.4. Lehepinnaindeksi ja biomassi seos lehestikus neeldunud kiirgusega**

Produktioon on lähedalt ja lineaarselt seotud neelatud kiirguse hulgaga. Kuna noortes taimedes neelab lehestik suurema osa kiirgusest, siis lehepinna hulk on oluline produktiooni määraja (Heilman *et al.* 1996). On näidatud, et lehepinna ja produktiivsuse vahel on tugev seos, seda väga erinevates ökosüsteemides, sealhulgas metsades (Webb *et al.* 1983). Gleeson ja Tilman (1990) näitavad oma töös, et valguse läbituleku ja LAI hulga või biomassi vahel on pöördvõrdeline seos.

Lehepinnaindeks (LAI - lehtede pindala maapinna pindalaühiku kohta) on oluline võrastiku tunnus, mis on vaatluse all paljudes füsioloogilistes ja ökosüsteemi uuringutes. Lehe pindala sõltub keskkonnatingimustest kahel moel. Esiteks antud koha kvaliteet, mis on määratud mullatingimustega (st. toitainete kättesaadavus, veemahutavus, juurte poolt hõivatud ruum jne.) ja kliimaga (st. sademed, fotosünteesiliselt aktiivne kiirgus, temperatuur jne.), seab

piiri maksimaalsele puistu LAI väärtusele. Teiseks aastane kliima varieeruvus võib põhjustada LAI fluktuatsioonide selle potentsiaalse ülemise piiri ümber. Nende fluktuatsioonide ulatus sõltub kliimamuutuse amplituudist ja liikide tundlikkusest (Vose *et al.* 1994).

Seoseid valgustingimuste ja võra ehituse vahel on kirjanduses suhteliselt hästi käsitletud. Enamikul juhtudel on uuritud võrastiku omadusi (st. LAI, lehestiku vertikaalne jaotus, lehtede kaldenurkade jaotus, lehe peegeldusvõime ja valguse läbitulek lehestikust, lehestiku grupeerumine), mis mõjutavad päikese kiirguse või fotosünteesilisel aktiivse kiirguse (PAR) hulka ja jaotust võrastiku sees (Wang ja Jarvis 1990). LAI vertikaalne jaotus ja PAR-i jaotus on funktsionaalselt omavahel seotud, st. lehestiku jaotus sõltub tugevalt PAR-i jaotusest ja vastupidi (Vose *et al.* 1994). Erinevused liikide vahel puistu LAI arengus on tingitud erinevate liikide füsioloogilistest omadustest ja keskkonnatingimustest, mis reguleerivad lehe pindala. Puistu lehestiku pindala reguleerib ka mulla niiskus, paljude okaspuude puhul on näidatud tugevat seost LAI ja kasvukoha veerežiimi vahel (Grier ja Running 1977).

Otsesed lehepinna indeksi mõõtmised on suhteliselt töömahukad. Seega on tähelepanu rohkem pööratud kaudsetele meetoditele, mis annavad suhteliselt kergesti ja statistiliselt enamvähem usaldusväärseid tulemusi. Lehepinna indeksi määramiseks on hea kasutada informatsiooni lehestikus seotava päikese kiirguse kohta, kuna see meetod on kiire ja mittedestruktiivne ning seda on hea kasutada lehestiku lühiajalise dünaamika kvantifitseerimiseks (Vose *et al.* 1994). Otsese päikese kiirguse taimestikust läbituleku põhjal saame anda suhteliselt usaldusväärse hinnangu taimestiku lehepinna indeksile, seda taimestiku puhul, millel on ühtlane lehepinna jaotus ja lehtede juhuslik ruumiline paigutus. Kui taimede vahel on tühimikke, siis hinnatakse lehepinna indeksit üle, kuid siiski annab LAI hindamine kasulikku informatsiooni taimestiku üldise arengu kohta (Lang *et al.* 1985). Kaudsed meetodid lehepinna indeksi määramiseks on muutunud populaarseks tänu nende käepärasusele, võrreldes otseste meetoditega.

Seost lehepinna indeksi ja valgusrežiimi vahel on tihti kujutatud Beer-Lambert'i valemiga (Anderson 1966; Lang 1987; Hirose 2005; Stadt ja Lieffers 2005):

$$I_i/I_o = e^{-k \cdot L}, \quad (1.1)$$

kus  $I_i$  tähistab kiirgust lehestiku all ja  $I_o$  kiirgust lehestiku kohal,  $k$  on ekstinktsioonikoeffitsient (arvestab lehtede ruumilist korraldust) ja  $L$  on lehepinna indeks (LAI). Suhe  $I_i/I_o$  näitab suhtelist lehestiku alla jõudvat kiirgust.

Valguse neeldumine või lehestikust läbi jõudmine sõltub antud valemi kohaselt lehepinnaindeksist ja ekstinktsioonikoefitsiendist (sõltub lehtede optilistest omadustest ja pinna omadustest, asendist päikese suhtes). Suhtelise lehestiku alla jõudva kiirguse ( $I_i/I_0$ ) logaritm on proportsionaalne lehepinnaindeksiga. Tihti esitatakse ekstinktsioonikoefitsienti kui konstanti ja eelpool toodud võrdus (1.1) avaldatakse kujul

$$I_i = I_0 * e^{-k*L}. \quad (1.2)$$

Seda kasutatakse kuivaine produktsiooni prognoosimiseks valguse sidumise ja võrastikust läbijõudvuse põhjal (Anderson 1966). Praktikas on kasutatud ka teist valemit, mis kirjeldab detailsemalt päikese nurga mõju (Smith *et al.* 1991) või võrastiku osade agregatsiooni mõju (Oker-Blom ja Kellomäki 1983) antud seosele.

Võra arhitektuur, kogu lehepind, lehepinna jaotus võra sees, lehe ja oksa morfoloogia ja asend mõjutavad oluliselt taime produktiivsust, sest need mõjutavad mitte vaid päikesekiirguse sidumist vaid ka muundumist biomassiks. Lehepinna olemasolev hulk ja asend on tõenäoliselt kaks kõige olulisemat faktorit, mis määravad puistu produktiivsuse (Heilman *et al.* 1996).

Metsa alustaimestikuga taimede fotosünteesilised produktiivsused on tihti piiratud ebapiisavate valgusressurssidega. Metsa alustaimestikus sõltub valguse kättesaadavus lehtede jaoks suuresti metsa suuruselt, võrastiku tihedusest ja võrastiku avauste jaotusest. Lehtede puhul, mis on arenenud piiratud valguse kättesaadavuse juures, suurendab valguse sidumise suurenemine tänu lehepindade suunamisele võrastiku avauste poole oluliselt fotosünteesilist produktiivsust (Muraoka *et al.* 1998).

On väidetud, et neto primaarproduktsioon või biomassi produktsioon põllukultuuride puhul on otseselt seotud lehestiku poolt seotud kiirgusenergiaga (Monteith 1994). Empiirilist mudelit kujutatakse sageli kujul

$$NPP = IPAR * \epsilon, \quad (1.3)$$

kus **NPP** on neto primaarproduktsioon, **IPAR** on neelatud fotosünteesiliselt aktiivne kiirgus ja  $\epsilon$  on energia muundumise efektiivsus, mis jääb vahemikku 1 kuni 5 g kuivainest, mis toodetakse neelatud energia ühe megadžauli kohta.

Linder (1985) näitas esimesena, et lineaarne seos päikesekiirguse kinnipüüdmise ja biomassi produktsiooni vahel eksisteerib ka puistute puhul. Siiski varieeruvus võra ja võrastiku arhitektuuris erinevate taime genotüüpide seas võib tugevalt mõjutada

päikeseenergia muundumise efektiivsust biomassi produktsiooniks (Chen *et al.* 1994). Paljud uurijad on leidnud aga, et arvestada tuleks ka keskkonnaga ja fenoloogiaga seotud muutujaid.

Muundumiseefektiivsus  $\epsilon$  (nimetatakse ka valguse kasutuse efektiivsuseks) on defineeritud kui toodetud biomassi hulk lehestiku poolt seotud päikesekiirguse ühiku kohta või neelatud fotosünteesiliselt aktiivse kiirguse ühiku kohta. Piisava niiskuse ja toitainete varustusega tingimustes jääb muundumiseefektiivsus kogu kasvuperioodiks üsna konstantseks (Heilman *et al.* 1996). Mitmed võrastiku struktuurilised tunnused, sealhulgas suurem LAI, pikem üksikute lehepindade ja kogu lehepinna eluiga, agregeeritud lehestik ja efektiivsem leheasend, võivad avaldada positiivset mõju fotosünteesile (Heilman *et al.* 1996). Vose ja Allen (1988) ning Teskey *et al.* (1987) esitlesid lineaarset seost tõrvikumänni (*Pinus taeda*) produktiivsuse ja lehepinnaindeksi (LAI) või lehestiku biomassi vahel, näidates, et üksik faktor nagu seda on valguskiirguse sidumine, võib olla piisav üheliigilise puistu kasvu näitaja.

### **1.5. Puistu koosseisu mõju mulla süsiniku hulgale ja võrastikualustele valgustingimustele**

Et ülarinde liigid mõjutavad mulda, on olnud teada ja vaatluse all juba pikka aega (Joffe 1949). Ülarinde liigiline koosseis mõjutab ilmselt mulla viljakust. Puuliikide mõju mulla viljakusele pole aga lihtsalt puude mõju mineraalmullale, vaid puude ja teiste ökosüsteemi komponentide vaheliste interaktsioonide tulemus (Binkley ja Giardina 1998).

Erinevatel puuliikidel on mulla arengule ja toitainete ringlusele erinev mõju. Metsa ülarinde koosseis mõjutab mulla keemilisi, füüsikalisi ja bioloogilisi omadusi. Erinevat mõju mullale seletatakse sellega, et erinevate liikide poolt produtseeritud varis on erinev nii kvantiteedilt kui kvaliteedilt. Parema kvaliteediga varis tekitab hea elukeskkonna mulla faunale, näiteks vihmaussidele, mis kiirendavad lagunemist ja mineralisatsiooni (Thelin *et al.* 2002). Kased (*Betula sp.*) suurendavad mulla viljakust, muudavad esialgse huumuse viljakamaks, millel on kõrgem pH, mullas ja varises on rohkem mullaorganisme, suurem mikroobne aktiivsus. Kuusk seevastu aga aeglustab aineringet. Järelikult kuuse-kase segametsas võib kask parandada mulla tingimusi, mille tulemuseks on suurem mulla viljakus ka teiste taimeliikide jaoks (Bengtsson *et al.* 1999; Thelin *et al.* 2002). Lehtpuuliikides on toitainete sisaldus kõrgem kui okaspuuliikides (Augusto *et al.* 2000; Cole *et al.* 1980; Perala ja Alban 1982). Lehtpuuliikide lehestikus on võrreldes okaspuuliikidega kõrgemas kontsentratsioonis lämmastikku, kaaliumit, kaltsiumit ja magneesiumi (Augusto *et al.* 2002).

Järelikult võib lehtpuude varis olla toitainete poolest rikkam kui okaspuuvaris. Sellist efekti kirjeldas Ebermayer juba 19. sajandil (1876) ning seda on kinnitanud ka hilisemad uuringud.

Okaspuud (nt. *Picea abies*) muudavad mulda happelisemaks, vähendavad mulla pH-d. Augusto *et al.* (2003) näitas, et mullapinna pH selliste puuliikide nagu hariliku kuuse (*Picea abies*) ja hariliku männi (*Pinus sylvestris*) all on oluliselt madalam kui hariliku pöõgi (*Fagus sylvatica*), kivitamme (*Quercus petraea*) või hariliku tamme (*Quercus robur*) puhul. Harilikul vahtral (*Acer platanoides*), harilikul valgepöõgil (*Carpinus betulus*) ja harilikul pärnal (*Tilia Cordata*) on madalam hapestav mõju kui harilikul pöõgil (*Fagus sylvatica*) või harilikul tammel (*Quercus robur*). Mõnede tuntumate puuliikide järjekord hapestamisvõime vähenemise suunas võiks olla järgmine: (*Picea abies*; *Pinus sylvestris*) => (*Abies alba*; *Pseudotsuga menziesii*) => (*Betula pendula*; *Fagus sylvatica*; *Quercus robur*) => (*Acer platanoides*; *Fraxinus excelsior*; *Tilia cordata*). Kuuse (*Picea abies*) ja männi (*Pinus sylvestris*) varis on happeline, nad hapestavad nii mulda kui ka pinnavett. Happeline muld on rohttaimedele kehvaks kasvutingimuseks, kuna paljude toitainete kättesaadavus happelises keskkonnas väheneb (Augusto *et al.* 2002). Erinevate puuliikide mõju mulla pH-le on eriti märkimisväärne mulla ülemise 10 sentimeetri paksuse kihi ulatuses (varisele ja mulla pindmisele kihile) (Augusto *et al.* 2002; Augusto *et al.* 2003).

Heitlehiste puude all, neutraalse pH-ga või kergelt happelistel muldadel, savikal või liivsavikal lõimisel on varise tootmine kiire ja varise lagunemisest tekkinud süsinik segatakse bioloogilise ainete liikumise käigus kiiresti mineraalsesse mulda. Okaspuude all on varise- ja kõdukiht paksem ja seega on süsinik akumulunud peamiselt just selles kihis. Lagunemine, ja seetõttu süsiniku liikumine mulla alumistesse mineraalsetesse horisontidesse, on okaspuude all aeglasem (Czimeczik *et al.* 2005). Lehtede ja juurte varis mõjutavad otseselt mulla orgaanilise aine kogust ja kvaliteeti, mis on lagundavatele organismidele kättesaadav ja lagundajate aktiivsus omakorda sõltub võraliikide poolt tekitatud mikroklimaatilistest tingimustest (Saetre 1999).

Augusto *et al.* (2002) arvates mõjutavad puud maa-alust ja maapealset keskkonda nii otseselt kui ka kaudselt, muutes ressurside kättesaadavust teistele organismidele, mikrokliimat, mullaomadusi. Puurinne mõjutab valguse, vee ja toitainete kättesaadavust, millest omakorda sõltuvad alumiste rinnete taimede ohtrus ja liigilist koosseisu. Erinevate puuliikide mõju alumistele rinnetele on erinev, siiski pole ühest arvamust selles, kuidas erinevad puuliigid mõjutavad rohurinde liigirikkust ja mitmekesisust. Tundub, et mõned tiheda võraga okaspuuliigid (nt. *Picea abies*, *Abies alba* või *Pseudotsuga menziesii*) ilmselt vähendavad alustaimestikku katvust. Läbi okaspuuvõrade jõuab üldjuhul rohurindeni vähem valgust kui läbi lehtpuuliikide võrade. Sammalde katvus on kõrgem ja rohttaimede katvus

madalam näiteks hariliku kuuse (*Picea abies*) all, võrreldes lehtpuuliikidega. Puuliikide *Picea abies* ja *Pinus sylvestris* all on varise- ja kõdukiht paksem kui lehtpuude all olev kiht (Augusto *et al.* 2002; Augusto *et al.* 2003).

Wallrup *et al.* (2006) kirjeldavad oma töös lehtpuude ja okaspuude erinevat mõju alustaimestiku liigirikkusele ja puude järelkasvu arengule. Uurimus näitab, et võrreldes okaspuudega (*Picea abies* ja *Pinus sylvestris*), on kaskede all (*Betula pendula*, *Betula pubescens*) alustaimestik liigirikkam. Puude järelkasvu hulk on väiksem mändide all, samas kui kuuse ja kase vahel erinevust pole. Erinevate võrastiku puuliikide puhul ei tule nende tööst välja erinevust mulla pH-s. Wallrup *et al.* põhjendavad alustaimestiku liigirikkuse erinevust erinevate puuliikide võrastike all samuti lehe- ja okkavarise erineva mõjuga mullale ja erinevate võrastike struktuuride mõjuga valguse sidumisele võrastikus ja jõudmisega alustaimestikuni. Valguse läbijõudmine võrastikust mõjutab võrastiku aluseid valgustingimusi ja mikrokliimat. Kembel ja Dale (2006) leiavad oma töös, et samadel põhjustel on alusrinde soontaimede katvus positiivses korrelatsioonis ülarinde lehtpuude katvusega ja negatiivses korrelatsioonis okaspuude katvusega. Hill'i (1987) arvates ei erine alustaimestik okaspuude (nagu harilik kuusk) all oluliselt lehtpuupuistute alusest taimestikust, kui okaspuupuistut on tugevalt harvendatud.

Martin *et al.* (2005) leiavad oma artiklis, et kuigi boreaalsed segametsad on nii ökoloogiliselt kui majanduslikult olulised metsad, ei ole need süsiniku varude osas nii hästi uuritud kui puhtpuistud. Boreaalsetes segametsades on tavaliselt erinevas vahekorras (25-75% (mahu järgi)) okaspuid ja lehtpuid, arengu käigus liigiline koosseis puistus oluliselt muutub ning võrastik on mitmekihiline, mistõttu võib nende produktiivsus, bioloogiline mitmekesisus ja süsinikuringe oluliselt erineda puhtpuistute omast. Eesti pindalast moodustab metsamaa 50,1%, millest 46,7% on kaetud metsaga. Metsamaa pindalast hõlmavad 32,7% männikud, 30,7% kaasikud ja 17,6% kuusikud (peapuuliigi järgi) (Adermann 2006).

McKenzie *et al.* (2000) kirjeldavad oma töös ülarinde mõju alumistele rinnetele küpsetes ja hilissuktsessioonilistes metsades, mis on vähem dünaamilised ja struktuurilt keerukamad. Neis vanemates metsades võivad seosed olla rohkem varjatud või segamini suure hulga rinnete vaheliste omavaheliste interaktsioonidega, möödunud häiringute mõjuga või lihtsalt aja mõjuga. McKenzie *et al.* leiavad, et küpsetes metsades on puurinde struktuuriparameetrite (võrastike katvus, puistu tihedus, puude suurus) ja põõsarinde katvuse vahel pisut tugevam (negatiivne) korrelatsioon kui puurinde ja rohurinde katvuse vahel. Kui ülarinde puud mõjutaksid alumisi rindeid eelkõige valguse kättesaadavuse piiramisega, siis peaks põõsaste ja rohhtaimede katvus olema negatiivses seoses eelkõige ülarinde võrastiku katvusega (mitte nii väga muude vaadeldud puistu struktuuri parameetritega: nt. puistu

tihedus, puude suurus), kuid antud uurimuses osutus seos puistu tihedusega tugevamaks kui võrastiku katvusega. See võib McKenzie *et al.* arvates olla seletatav päikeselaikude või madalamate nurkade alt langenud valgusega, mida valgusmõõtja ei mõõtnud, kuid mida võib paremini peegeldada puistu tiheduse indeks. Teine seletus, mida pakutakse, on see, et küpsetes puistutes ei mõjuta alumisi rindeid enam valgustingimused võrastiku all nii palju kui nooremates puistutes. McKenzie *et al.* leiavad, et kui põõsarinne on otseselt seotud puurinde katvusega, siis rohurinde puhul see nii ühene pole. Erinevasse gruppi kuuluvad liigid (dominantliigid, hilissuktsessionilised liigid jm.) reageerivad erinevatele ülarinde parameetritele erinevalt.



## 1.6. Magistritöö eesmärgid

Kuna suur osa süsinikust, mis metsades mulda siseneb pärineb taimsest varisest, millest omakorda suure osa moodustab puude lehestiku varis ja lehepinnaindeks on omakorda tugevas seoses lehestikus seotava (või lehestikust läbi jõudva) päikesekiirgusega (Anderson 1966; Lang 1987; Gleason ja Tilman 1990; Wang ja Jarvis 1990; Vose *et al.* 1994; Heilman *et al.* 1996; Stadt & Lieffers 2005; Hirose 2005) ehk võrastiku päikesekiirguse läbilaskvuse koefitsiendiga ( $ISF_T$ , hajusa kiirguse läbilaskvuse koefitsient;  $DSF_T$ , otsese kiirguse läbilaskvuse koefitsient), siis võiks  $ISF_T$  ja mulla orgaanilise süsiniku hulga vahel olla teatud seos. Puurinde liigilisest koosseisust sõltub teatavasti võrastiku valguse läbilaskvus ja varise hulk, kvaliteet ja lagunemistingimused.

Kuna taimkattelt (nt. metsadelt) peegeldunud kiirguse põhjal arvatud taimkatteindeksid (nt. NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*) on teatavasti heas korrelatsioonis lehepinnaindeksi ja võiks olla heas seoses ka  $ISF_T$ -ga, siis annaks nende seoste olemasolu ja kirjeldamine tulevikus võimaluse kasutada metsade mulla orgaanilise süsiniku hulga prognoosimiseks kaugseire meetodeid. Analoogilise uurimuse mulla orgaanilise süsiniku hulga prognoosimisest kaugseire meetodite abil on karjamaade kohta teinud Szakács *et al.* (2004) ja leidnud, et lehepinnaindeksi ja mulla süsiniku hulga vahel on väga tugev korrelatsioon ( $r=0,97$ ) ning kaugseire andmete põhjal leitud taimkatteindekseid (NDVI) on võimalik kasutada mullasüsiniku hulga hindamiseks. Metsades on taimkate rindeline, seosed tõenäoliselt keerukamad ning neid seoseid mõjutavaid faktoreid on tunduvalt rohkem.

Antud töö peamiseks eesmärgiks on uurida, kas puistu koosseis mõjutab mullasüsiniku tagavara ning leida mudel mulla süsiniku tagavara prognoosimiseks küpsete parasniisketes tingimustes kasvavate metsakoosluste jaoks.

Konkreetseteks sammudeks töö eesmärkide saavutamisel olid:

- 1) rakendada meetodikat, mis võimaldab väljendada puistu liigilist koosseisu liikide osakaalude logaritmiliste suhete abil,
- 2) testida, kuidas sõltuvad varise- ja kõdukihi süsiniku hulk ning kogu mulla süsinikuvaru (varise-, kõdukihi ning mineraalsete horisontide süsinik kokku puurinde liikide ohtrusvahetusest ja
- 3) analüüsida, kuidas sõltuvad võrastiku ja rohurinde valguse läbilaskvus puurinde liikide ohtrusvahetusest.

Võimaldamaks laiemaskaalalisi järeldusi, on edaspidi plaanis uurida ka kuivemates ja niiskemates tingimustes, teistsugustel muldadel ja kasvukohtades kasvavaid metsi.

## 2. MATERJAL JA METOODIKA

### 2.1. Uurimisala iseloomustus

Käesoleva töö materjal on kogutud 2005. aasta juulis Tartu maakonnas, Vara metskonna metsades (58°30' põhjalaiust 26°53' idapikkust). Vara metskond asub Tartu maakonna kirdeosas Vara, Luunja ja Tartu vallas, piirnedes Jõgeva maakonnaga. Valla põhjaosa jääb Kagu-Eesti lavamaa kirdeosa mõhnastikele, kus on suured metsaalad. Vara metskond jääb Madal-Eesti kitsaste seljakutega nõrgalt lainjate tasandike ja Kesk-Eesti voorte asualasse. Sealne pinnavorm on vaheldusrikas, eriti künklik on metskonna kirdeosa, kus asub Selgise mõhnastik. Mõhnastike ümbruses on levinud liivikud (liiva- ja kruusaväljad) (Riigimetsa Majandamise Keskus 2006).

Mullastikult kuulub Vara valla territoorium üleminekualasse Lõuna-Eesti valdkonna Tartu-Viljandi allvaldkonnast Peipsi-äärse valdkonda, kus on nõrgalt ja keskmiselt leetunud kamar-leetmullad punakaspruunil moreenil. Märkadest muldadest on esindatud soostunud kamarmullad ja vahelduva lagunemisastme ning sügavusega madal soo turvasmullad. Muldade lõimis on enamasti saviliiv (tolmjas) või liiv (kruusakas), harvem liivsavi. Põhjavesi on Vara vallas suhteliselt madala mineraalsusega, põhjavees on looduslikult kõrgenenud üldraua foon (Vara vallavalitsus 2005).

Vara metskonna metsamaast suurema osa moodustavad palumetsade (jänesekapsa- mustika kasvukohatüübi), salumetsade (naadi kasvukohatüübi), soovikumetsade (angervaksa kasvukohatüübi) ja laanemetsade (jänesekapsa kasvukohatüübi) tüübirühma metsad. Peapuuliigi järgi moodustavad Vara metskonna metsadest suurema osa (nii pindala kui tihumeetrite järgi) kase, männi ja kuuse enamusega puistud (Riigimetsa Majandamise Keskus 2006).

Proovialadeks on valitud mineraalsetel muldadel paiknevad majandatud metsad. Metsade andmebaasi andmete põhjal on vaatluse alla võetud 43 kolme erineva peapuuliigiga puistut:

- 1) 14 kase (*Betula sp.*),
- 2) 14 kuuse (*Picea abies*) ja
- 3) 15 männi (*Pinus sylvestris*) enamusega puistud.

Uuritavad alad on valdavalt vanuselt küpsed puistud: kaasikud vanuses 60-90 aastat, kuusikud 60-140 aastat, männikud 60-170 aastat (enamuspuliiigi vanus) ning kuuluvad valdavalt 1. või 2. boniteediklassi (metsa takseerandmete põhjal). Lisaks puhtpuistutele on uuritavate alade hulgas ka segapuistuid, kus lisaks peapuuliigile on esimeses rindes või sellesse jõudmas erinevas vahekorras ka teisi puuliike. Puurindes esines lisaks harilikule

männile (*Pinus sylvestris*), harilikule kuusele (*Picea abies*) ja kasele (*Betula sp.*) ka haaba (*Populus tremula*), vähem leppasid (*Alnus incana*, *Alnus glutinosa*) ja üksikuid teisi puuliike (*Fraxinus excelsior*, *Tilia cordata*, *Acer platanoides*). Rohurinde ohtrus sõltus konkreetsest alast, peapuuliigist, võrastikualustest valgustingimustest, kasvukohatüübist. Männi ja kuuse peapuuliigiga aladel oli rohurinne üldiselt hõredam (esinesid nt. *Oxalis acetosella*, *Calamagrostis arundinacea* jt.); puhmarindes esines, sõltuvalt alast, hõredamalt või ohtramalt harilikku mustikat (*Vaccinium myrtillus*) ja harilikku pohla (*Vaccinium vitis-idaea*). Lehtpuu enamusega aladel oli rohurinne lopsakam ja liigirikkam. Põõsarinne uuritavatel aladel puudus või oli hõre. Samblarinne oli kuuse ja männi ülekaaluga puistutes tihedam, lehtpuu enamusega puistutes hõredam.

## 2.2. Andmete kogumine

Käesoleva töö materjal on kogutud 2005. aasta juulis kollektiivse töö käigus. Igas vaatluse all olevas 43 metsaeraldises sai proove võetud viies juhuslikus punktis. Igas punktis tegime rohurinde kohalt tehtud poolsfäärifoto (kasutades digitaalset fotoaparaati Nikon CoolPix950). Valgusmõõtja EMS-7 (PPSystems, UK)) abil mõõtsime fotosünteesiliselt aktiivset kiirgust rohurinde all ja selle kohal (igas punktis tegime kolm mõõtmist).

Igas punktis sai 400 cm<sup>2</sup> suuruselt ruudult kogutud varis. Samast ruudust sai pärast varise eemaldamist võetud ka mullaproov (umbes 30 cm sügavuselt, kasutades puuri, mille läbimõõt oli 4,5 cm), sh. kõduhorisont. Võetud mullaproovis sai eraldatud kõduhorisondi materjal (ei sisalda mineraalset mullamaterjali) ja nn. mineraalne mullamaterjal eraldi kottidesse kaalumiseks.

Vaatluse all olevate alade hulgas oli nii puhtpuistuid kui enamuspuuliigiga segapuistuid. Kuuse enamusega eraldistes näiteks esines ka märkimisväärse osakaaluga kaskesid või mände. Iga prooviala puurinde liigilise koosseisu kirjeldamiseks koostasime puistu valemi, kus iga puuliigi osa sai näidatud kümnendikes, näiteks 7Ku2Ks1MäHb+ (70% kuuski, 20% kaski, 10% mände ning lisaks üksikuid haabasid) (Kukk 2006). Selle põhjal leidsin, kui palju oli igal uurimisalal keskmiselt protsentuaalselt mände, kuuski ja lehtpuid (kased, haavad, lepad ning teised lehtpuud kokku).

Lisaks mõõtmistele kirjeldasime igas punktis puistu üldist ilmet (sh. põõsa-, puhma-, rohu- ja samblarinde olemasolu ja ohtrust) ning lisaks metsas kogutud proovidest saadud andmetele olid kasutada metsa takseerandmed puistute vanuse, boniteedi ja peapuuliigi kohta.

Proovivõtmise punkte oli 43 ala kohta kokku 215. Kõikidelt proovialadelt tegime kokku 645 rohurinde kohalt ja alt valguse mõõtmist (igas ruudus 3), 215 poolsfäärifotot ning võtsime 215 varise- ja mullaproovi.

### 2.3. Mulla-, kõdu- ja variseproovide analüüs

Teades, et süsiniku sisaldus mineraalses mulla osas sügavusega väheneb eksponentsiaalselt ning nähes, et vaatluse alla võetud aladel ei olnud varise-, kõdukihi ja huumushorisoni paksus kokku üle 30 cm, eeldan, et võetud mullaproovid kirjeldavad ära suurema osa antud koha mullasüsiniku hulgast. Sellest tulenevalt sai mullaproovi võtmise sügavuseks võetud umbes 30 cm (ulatudes sisse- ja väljauhtehorizontideni).

Kõik 43 alal mullaproovid (igalt alalt 5 proovi) kuivatasime 70 kraadi juures. Õhukuivad mullaproovid said sõelutud 2 mm sõelaga. Mullaproovidest eemaldasime üksikud puitunud juuretükid ja mõned kivid (suuremad kui 2 mm) ja kaalusime ülejäänud proovimaterjali.

Enne keemilist analüüsi (määramaks süsiniku sisaldust proovis) segasime igalt proovialalt kogutud 5 prooviruudu mullaproovid kokku ning võtsime osaproovi, jahvatasime, ning sellest osaproov läks süsinikuanalüüsi. Süsinikuanalüüsi tegemiseks kasutati PerkinElmer`i 2400 Series II CHNS/O elementanalüsaatorit (PerkinElmer, USA). Analüüsi tulemusena saime mulla keskmise süsiniku sisalduse protsentidena iga ala (43) mullaproovis.

Kõdukihi- ja variseproovid kuivatasime samuti 70 kraadi juures, segasime igalt proovialalt kogutud 5 prooviruudu proovid kokku ning võtsime osaproovi, jahvatasime, ning sellest osaproov läks süsiniku analüüsi, mille tulemusena saime keskmise süsiniku sisalduse protsentidena iga ala kõduhorisoni ja varisekihi kohta eraldi.

Süsiniku hulgad ruutmeetri maapinna kohta ( $\text{g m}^{-2}$ ) varisekihis, kõduhorisonis ning mineraalses mullaosas arvutasin süsinikuanalüüsist saadud protsentuaalse süsiniku sisalduse ja proovide kaalude põhjal. Kogu süsiniku hulga  $C_T$  all ( $\text{g m}^{-2}$ ) pean ma oma töös silmas süsinikku hulka ( $\text{g m}^{-2}$ ) varisekihis, kõduhorisonis ja ülejäänud prooviks võetud (mineraalses) mullakihis kokku. Kuna mõnedel aladel oli raske kõduhorisoni A-horisonidist eristada, siis vaatan oma töös võrdlevalt eraldi ka süsiniku hulka ( $\text{g m}^{-2}$ ) vaid varisekihis ja kõduhorisonis kokku, mida tähistan edaspidi sümboliga  $C_{FF}$ .

## 2.4. Poolsfäärifotode ja rohurinde valgusandmete analüüs

Puude võrastiku aluseid valgustingimusi kirjeldan igal alal 5 erinevas punktis tehtud poolsfäärifotode analüüsil saadud parameetritega  $ISF_T$  (võrastiku hajusa kiirguse läbilaskvuse koefitsient) ning  $DSF_T$  (võrastiku otsese kiirguse läbilaskvuse koefitsient), millest esimene näitab, kui suur osa puistule (võrastikule) langevast hajusast kiirgusest jõuab (hajusa kiirgusena) võrastiku alla, ning teine näitab, kui suur osa (võrastikule) langevast otsesest kiirgusest jõuab (otsese kiirgusena) võrastiku alla, rohurinde kohale. Iga ala 5 punkti mõõtmisandmete põhjal leidsin iga ala keskmised valguse läbilaskvuse koefitsientide väärtused.

Poolsfäärifotod ehk „kalasilma“-meetod on praegu metsa võrastiku struktuuri ja avatuse, võraaluste valgustingimuste iseloomustamiseks suhteliselt laialt kasutusel olev meetod (Beudet 2002; Madgwick ja Brumfield 1969). Digitaalse fotoaparaadi Nikon CoolPix950 abil saime fotodele poolsfäärkujutise ringina, mille tsenter vastab seniidile ja äärejoon horisondile. Uuritavatel aladel tehtud poolsfäärifotod said analüüsitud arvutiprogrammiga WinSCANOPY 2002A (Regent Instruments, Canada). Igal fotol eraldas taeva ja lehestiku (erinevate värvitoonidega). Seejuures tuleb arvestada, et taimekoosluste, eriti aga metsa ruumiline struktuur ei ole homogeenne, mistõttu võib esineda suuremaid ja väiksemaid päikeselaike, poolvarje, päris hämaraid kohti, mis vähesel määral võivad valgusmõõtmiste ja poolsfäärifotode analüüsi tulemusi mõjutada.

Aparaadi EMS-7 (PPSystems, UK) abil, mis mõõdab kiirgusvoo tihedust kvantühikutes, saime iga proovivõtupunkti (igal alal 5) kohta kolm mõõtmistulemust rohurinde aluse valguse kohta ja kolm rohurinde kohal oleva valguse (fotosüsteetiliselt aktiivse kiirguse) kohta. Saadud tulemuste põhjal leidsin valguse läbilaskvuse koefitsiendid rohurinde jaoks, mis näitavad, kui suur osa rohurinde kohale jõudnud valgusest jõuab rohurinde alla (selleks jagasin rohurinde alt mõõdetud kiirgusvoo tiheduse väärtuse rohurinde kohalt mõõdetud kiirgusvoo tiheduse väärtusega). Iga proovivõtupunkti kohta leidsin kolme rohurinde alla jõudva valguse osakaalu aritmeetilise keskmise ehk rohurinde valguse läbilaskvuse koefitsientide keskmise iga ala viies punktis ning keskmise rohurinde läbilaskvuse koefitsiendi väärtuse ( $ISF_H$ ) iga ala jaoks.

Võrastiku hajusa/otsese kiirguse läbilaskvuse koefitsiendid ja rohurinde valguse läbilaskvuse koefitsient on leitud erineval teel (vastavalt poolsfäärifotode ja valgusmõõtmiste põhjal) ja teineteisest sõltumatult, millest esimene iseloomustab puurinde ja teine rohurinde valguse neelamist, selle efektiivsust, lehestiku paksust.

Nii võrastiku hajusa/otsese valguse läbilaskvuse koefitsientide ( $ISF_T/DSF_T$ ) kui ka rohurinde valguse läbilaskvuse koefitsiendi ( $ISF_H$ ) väärtused jäävad vahemikku 0-st 1-ni. Kui koefitsiendi väärtus on 0, siis 0% võrastiku või rohurinde kohale jõudvast valgusest jõuab selle alla; kui väärtus on 1, siis 100% võrastiku või rohurinde kohale jõudvast valguskiirgusest jõuab võrastiku või rohurinde alla.

## 2.5. Andmete analüüs

Vaatluse alla võetavate alade väljavalimiseks kasutasin arvutiprogrammi MapInfo, poolsfäärifotode analüüsiks arvutiprogrammi WinSCANOPY 2002A. Andmete korrastamiseks on kasutatud arvutiprogrammi MS Excel. Kõik statistilised analüüsid sooritasin kasutades statistikapaketti Statistica 7.0 (StatSoft, Inc. USA).

$C_{FF}$ ,  $C_T$ ,  $ISF_T$  ja  $ISF_H$  keskmiste võrdlemiseks on kasutatud ühemõõtmelist dispersioonanalüüsi ja Tukey testi. Dispersioonanalüüsi eelduseks on sõltuvate tunnuste normaaljaotus faktortunnuste tasemetel, mida kontrolliti Cochran, Hartley ja Bartletti testiga.

Männi, kuuse ja kase osakaalusid protsentides ei saa vaadata kui üksteisest sõltumatuid muutujaid (kui ühe osakaal suureneb, siis teiste komponentide osakaal peab vähenema, kokku alati 100%), nad ei varieeru üksteisest sõltumatult. Selliseid andmeid, mida esitatakse osana koguhulgast (näiteks protsentsid) kirjeldatakse kui nn. koosseisulisi andmeid. Selliseid protsentides esitatud andmeid on parem esitada mitte lihtsalt protsentidena vaid logaritmiliste suhete ja saada sel moel üksteisest sõltumatud ja vabamalt varieeruvad muutujad. Logaritmiliste suhete arvutamine võib tunduda tüütu ja ebaoluline, kuid see aitab protsentides esitatud koosseisulistest andmetest saada üksteisest sõltumatuid muutujaid, mis saavad varieeruda piiramata vahemikus (Aitchison 1982). Metsa koosseisu andmetes on logaritmiliste suhete leidmiseks põhimõtteliselt kaskede protsent jagatud mändide protsendiga ning kuuskede protsent mändide protsendiga, seejärel on leitud kummagi logaritmitud väärtus. Nii sain esialgsetest andmetest kaks sõltumatut puistu liigilist koosseisu iseloomustavat muutujat  $\ln(K_s/M_ä)$  ja  $\ln(K_u/M_ä)$ . Logaritmiliste suhete (ingl. k. *logratio*) arvutamiseks on kasutatud arvutiprogrammi CoDaPack (Thiò-Henestrosa ja Martín-Fernández 2005).

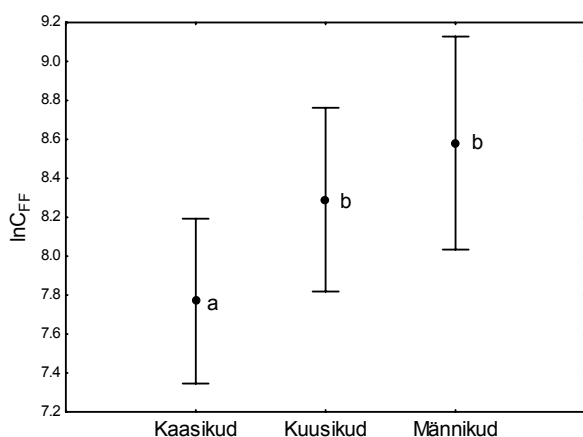
$C_{FF}$ ,  $C_T$ ,  $ISF_T$ ,  $ISF_H$ ,  $\ln(K_s/M_ä)$  ja  $\ln(K_u/M_ä)$  omavaheliste seoste uurimiseks kasutasin mitmest lineaarset regressiooni. Et leida optimaalseimat mudelit  $C_{FF}$  ja  $C_T$  ning  $ISF_T$ ,  $ISF_H$  prognoosimiseks, kasutasin sammregressiooni.

Puurinde liigilise koosseisu ja  $C_{FF}$ ,  $C_T$ ,  $ISF_T$  ning  $ISF_H$  vaheliste seoste piltlikuks kujutamiseks moodustasin 4 erinevat kolmnurkgraafikut. Selleks leidsin eelnevalt saadud regressioonivalemite alusel puurinde liigilistele koosseisudele (85) vastavad prognoosväärtused  $C_T$ ,  $C_{FF}$ ,  $ISF_T$  ja  $ISF_H$  jaoks. Puistu liigilised koosseisud (85) said valitud selliselt, et punktid kataksid hajusalt kolmnurkgraafiku, kus telgedeks on kuuse, männi ja lehtpuude osakaalud ning erinevad värvitoonid näitavad puistu koosseisule vastavaid  $C_T$ ,  $C_{FF}$ ,  $ISF_T$  ja  $ISF_H$  väärtusi.

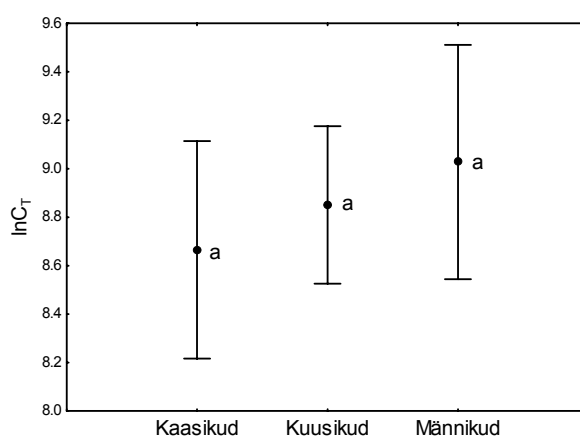
### 3. TULEMUSED

#### 3.1. Varise- ja kõdukihi süsiniku ning kogu mullasüsiniku kogused erineva peapuuliigiga puistutes

Dispersioonanalüüsi tulemusena selgus, et keskmine varise- ja kõdukihi süsiniku kogus ( $C_{FF}$ ) oli erineva peapuuliigiga puistutes erinev. Keskmine  $C_{FF}$  oli okaspuu enamusega puistutes (kuusikutes ja männikutes) suurem kui kase enamusega puistutes (Tukey testi järgi,  $p < 0,05$ ). Männikutes ja kuusikutes keskmine  $C_{FF}$  oluliselt omavahel ei erinenud (joon. 1). Kogu süsiniku koguse ( $C_T$ ) keskmine ei erinenud dispersioonanalüüsi järgi statistiliselt oluliselt kaasikutes, kuusikutes ja männikutes (joon. 2).



Joonis 1. Varise- ja kõdukihi süsiniku kogus ( $\ln C_{FF}$ ) kolme erineva peapuuliigiga puistutes (keskmine  $\pm$  standardhälve). Homogeensusgrupid Tukey testi järgi: a, b.

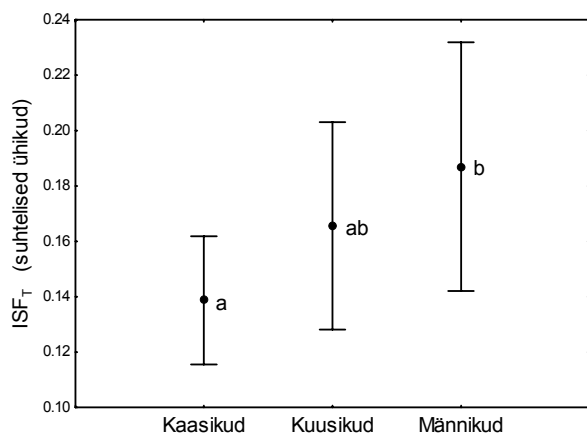


Joonis 2. Kogu varise- ja mulla süsiniku kogus ( $\ln C_T$ ) kolme erineva peapuuliigiga puistutes (keskmine  $\pm$  standardhälve).

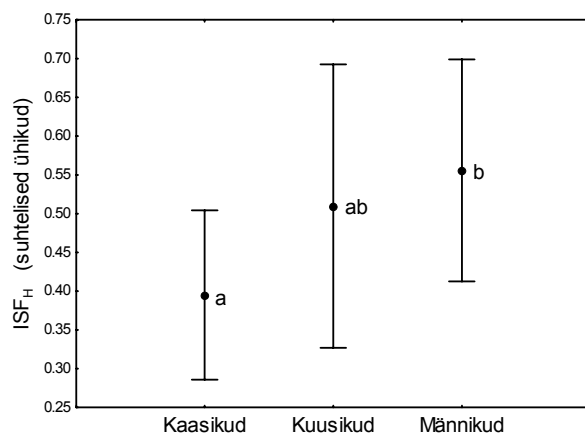
#### 3.2. Puu- ja rohurinde valguse läbilaskvus erineva peapuuliigiga puistutes

Dispersioonanalüüsi tulemused näitasid, et nii  $ISF_T$  kui  $ISF_H$  väärtuste keskmised on erineva peapuuliigiga puistutes erinevad. Tukey testi järgi ( $p < 0,05$ ) on nii keskmine  $ISF_T$  kui keskmine  $ISF_H$  väärtus kaasikutes väiksem kui männikutes (joon. 3 ja 4). Keskmised  $ISF_T$  ja  $ISF_H$  väärtused kuusikus ei erinenud oluliselt männikute ja kaasikute omadest.



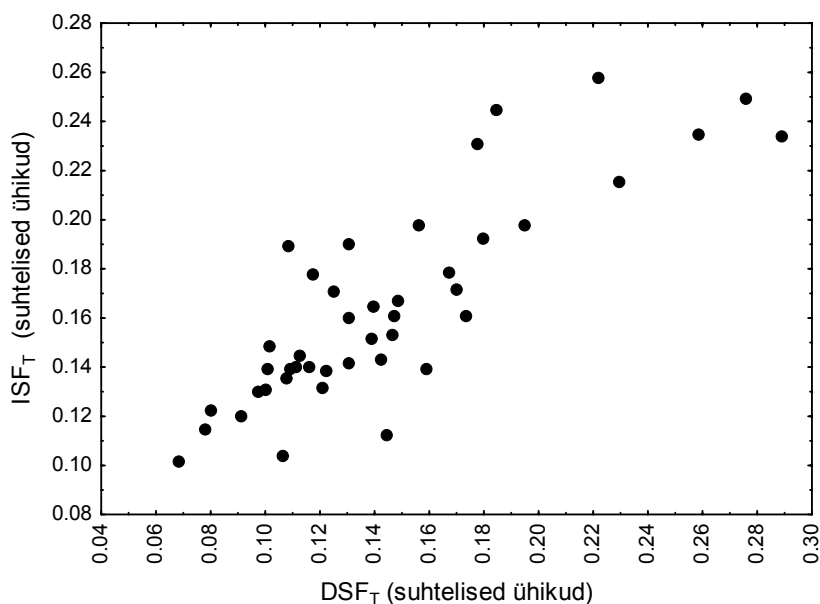


Joonis 3. Võrastiku hajusa kiirguse läbilaskvuse koefitsiendi ( $ISF_T$ ) väärtused kase, kuuse ja männi enamusega puistutes (keskmine  $\pm$  standardhälve). Homogeensusgrupid Tukey testi järgi: a, b.



Joonis 4. Rohurinde valguse läbilaskvuse koefitsiendi ( $ISF_H$ ) väärtused kase, kuuse ja männi enamusega puistutes (keskmine  $\pm$  standardhälve). Homogeensusgrupid Tukey testi järgi: a, b.

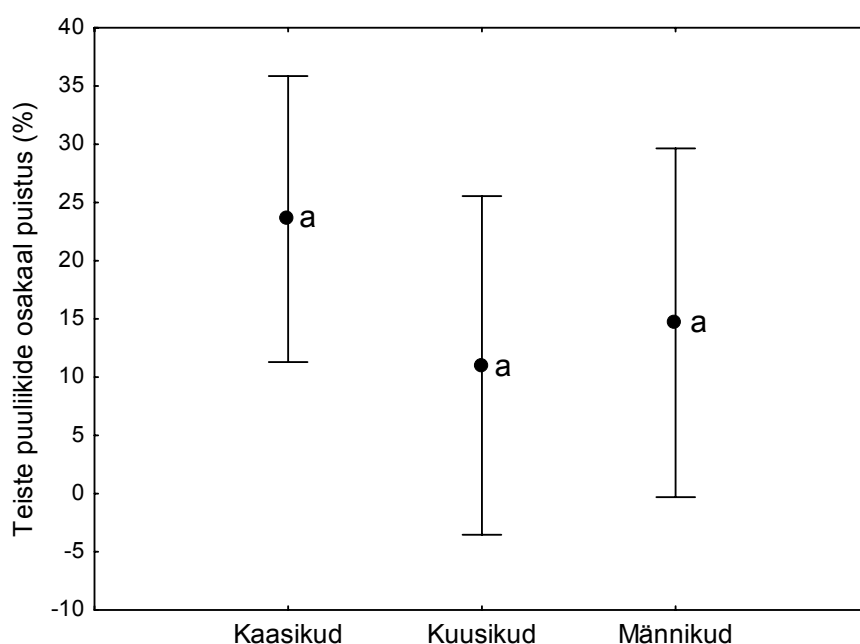
Poolsfäärifotod annavad hinnangu võrastiku läbilaskvusele nii hajusa kui otsese kiirguse osas. Kuna hajusa ja otsese kiirguse läbilaskvuse vahel on tugev korrelatsioon (joon. 5), siis on edaspidi antud töös vaatluse all vaid  $ISF_T$ .



Joonis 5. Võrastiku hajusa ja otsese kiirguse läbilaskvuse koefitsientide (vastavalt  $ISF_T$  ja  $DSF_T$ ) väärtuste vaheline seos üle kõigi vaatluse all olevate alade ( $r=0,8406$ ,  $p<0,001$ ).

### 3.3. Puu- ja rohurinde valguse läbilaskvuse seos puurinde liigilise koosseisuga.

Vaatluse alla võetud puistute seas on lisaks puhtpuistutele ka segapuistuid, kus peapuuliigi kõrval esineb puurindes erinevas osakaalus ka teisi puuliike (joon. 6). Männikutes esineb mändide kõrval ka kuuskesid ja lehtpuid (peamiselt kaskesid), kuusikutes mände ja kaskesid. Dispersioonanalüüsi tulemused näitavad, et peapuuliigi kõrval esinevate teiste puuliikide keskmine osakaal ei erine oluliselt kaasikute, kuusikute ja männikute vahel. Vaadeldud alade puhul on teiste puuliikide keskmine osakaal puurindes 11 - 24% (joon. 6).



Joonis 6. Peapuuliigi kõrval esinenud kaaspuliikide osakaal protsentides kolme erineva peapuuliigiga puistutes (keskmine  $\pm$  standardhälve). a – homogeensusgrupp Tukey testi järgi.

Klassifitseerides puistuid peapuuliigi järgi, on nii süsiniku koguste ( $C_{FF}$ ,  $C_T$ ) kui valguse läbilaskvuse koefitsientide ( $ISF_T$ ,  $ISF_H$ ) väärtuste varieerumine puistutes suhteliselt suur. Et uurida  $C_{FF}$ ,  $C_T$ ,  $ISF_T$  ja  $ISF_H$  seost konkreetsete puuliikide (kase, kuuse ja männi) osakaaludega puurindes, on puurinde liigilise koosseisu kirjeldamiseks kasutusel muutujad  $\ln(Ks/Mä)$  ja  $\ln(Ku/Mä)$ .

Mitmese regressiooni tulemused (Tabel 1) näitavad, et  $ISF_T$  sõltub statistiliselt oluliselt puistu liigilisest koosseisust ( $p=0,001$ ,  $Adj.R^2=0,25$ ).  $ISF_H$  sõltub oluliselt nii puurinde liigilisest koosseisust kui  $ISF_T$  väärtusest ( $p=0,006$ ,  $Adj.R^2=0,21$ ) (Tabel 1).

Tabel 1. Mitmese regressiooni tulemused ISF<sub>T</sub> ja ISF<sub>H</sub> puhul. Adj.R<sup>2</sup> - parandatud determinatsioonikordaja, *p* - olulisuse tõenäosus, S.E.E – hinnangu standardviga.

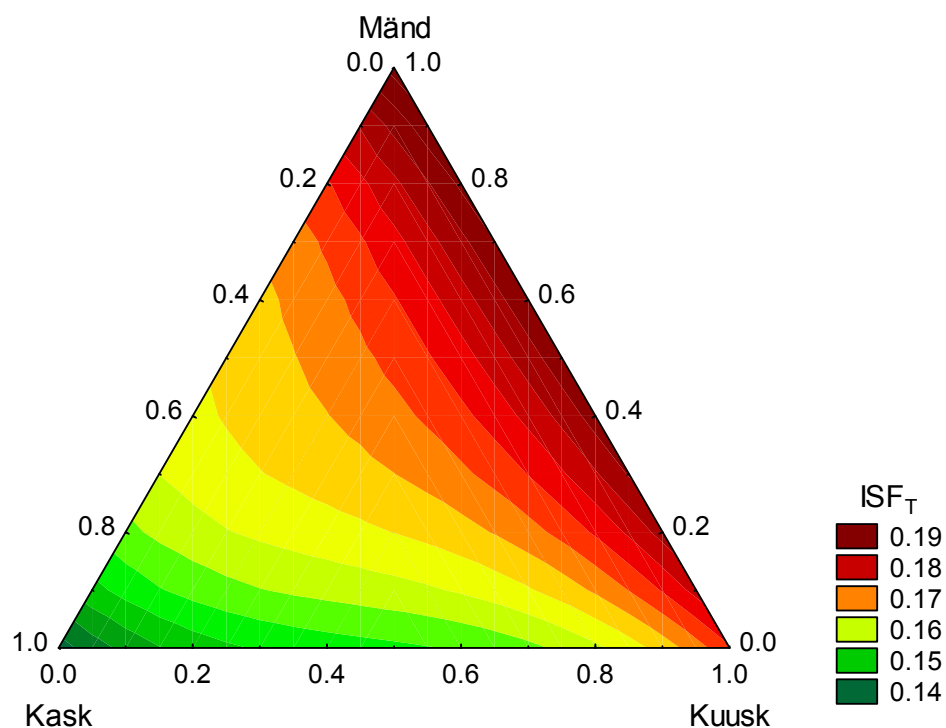
\*\**p*<0,01, \**p*<0,05.

Tunnused	Adj.R <sup>2</sup>	<i>p</i>	S.E.E	Mudeli parameetrid			Vabaliige
				ln(Ks/Mä)	ln(Ku/Mä)	ISF <sub>T</sub>	
ISF <sub>T</sub>	0,25	0,001	0,036	-0,007**	0,001	-	0,168
ISF <sub>H</sub>	0,21	0,006	0,142	-0,028**	0,003	-1,291*	0,717

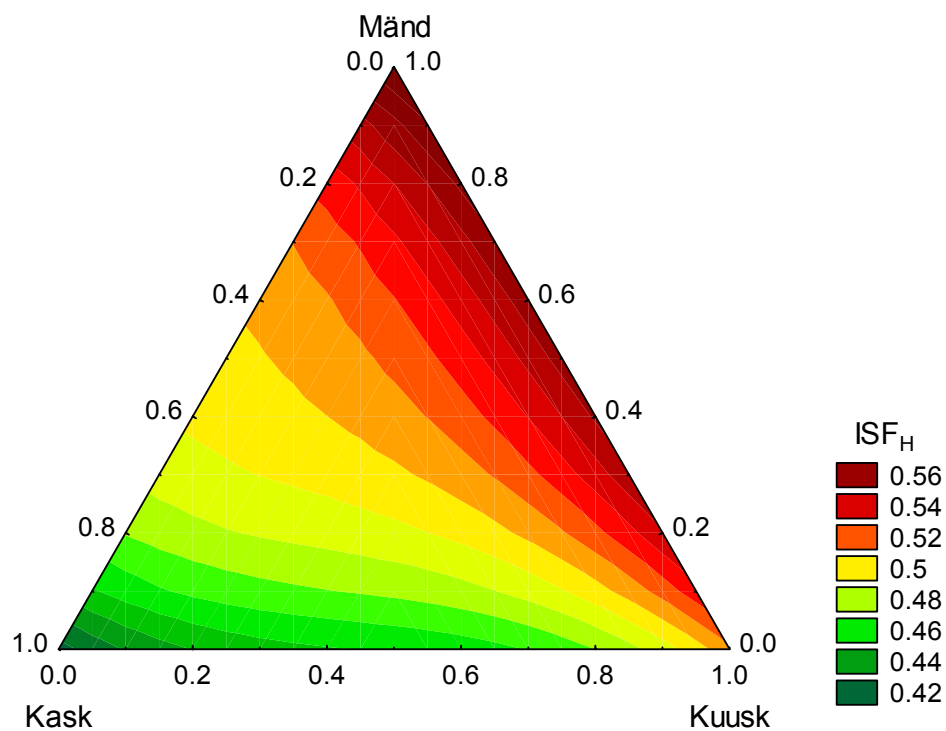
### 3.4. Puu- ja rohurinde läbilaskvuse prognoos sõltuvalt puurinde liigilisest koosseisust

Kolmnurkgraafik (joon. 9) illustreerib Tabel 1 esitatud regressioonivalemite põhjal prognoositud võrastiku hajusa kiirguse läbilaskvuse koefitsiendi (ISF<sub>T</sub>) väärtusi ning männi, kuuse ja kase ohtrusvahekorrale vastavat ISF<sub>T</sub> väärtuste muutumist. Joonis 10 kirjeldab prognoositavaid rohurinde valguse läbilaskvuse koefitsiendi väärtusi (ISF<sub>H</sub>) sõltuvalt puuliikide ohtrusvahekordadest. Kolmnurkgraafiku telgede tippudes on männi, kuuse või kase osakaal puurindes 100% st. üheliigilised puistud. Kolmnurga keskpunktis on olukord, kus kolme puuliigi osakaalud on võrdsed (1/3 ehk 33,3%).

ISF<sub>T</sub> ning ISF<sub>H</sub> prognoosväärtuste graafikutelt (joon. 9 ja 10) on näha, et kase ja männi osakaalud on ühed olulisemad ISF<sub>T</sub> ning ISF<sub>H</sub> mõjutavad faktorid (regressioonimudelil ln(Ks/Mä) olulisus on ISF<sub>T</sub> puhul *p*<0,01, ISF<sub>H</sub> puhul *p*=0,01). ISF<sub>T</sub> ning ISF<sub>H</sub> prognoosväärtused on suurimad (vastavalt ca 0,19 ja ca 0,56) männi puhtpuistustes ning vähimad (vastavalt ca 0,14 ja ca 0,42) kase puhtpuistutes. Puhtkuusikutes on ISF<sub>T</sub> ja ISF<sub>H</sub> väärtused puhtmännikute ja kaasikute vahepealsed ning kuuse enamusega puistutes sõltuvad ISF<sub>T</sub> ja ISF<sub>H</sub> väärtused oluliselt kase ja männi osakaalust puistus. Vähimgi männi ja kase osakaalu muutus puurindes mõjutab oluliselt ISF<sub>T</sub> ja ISF<sub>H</sub> väärtusi ja eelkõige on muutused märgatavad ühe või teise domineerimise tingimustes (osakaal üle 75%). Kuuse-männi või kuuse-kase segapuistutes on kuuse osakaalu vähenemisega kaasnevad muutused ISF<sub>T</sub> ja ISF<sub>H</sub> väärtustes vähem märgatavad ja on kiiremad, kui kuuse osakaal on vähemalt 75% (joon. 9 ja 10).

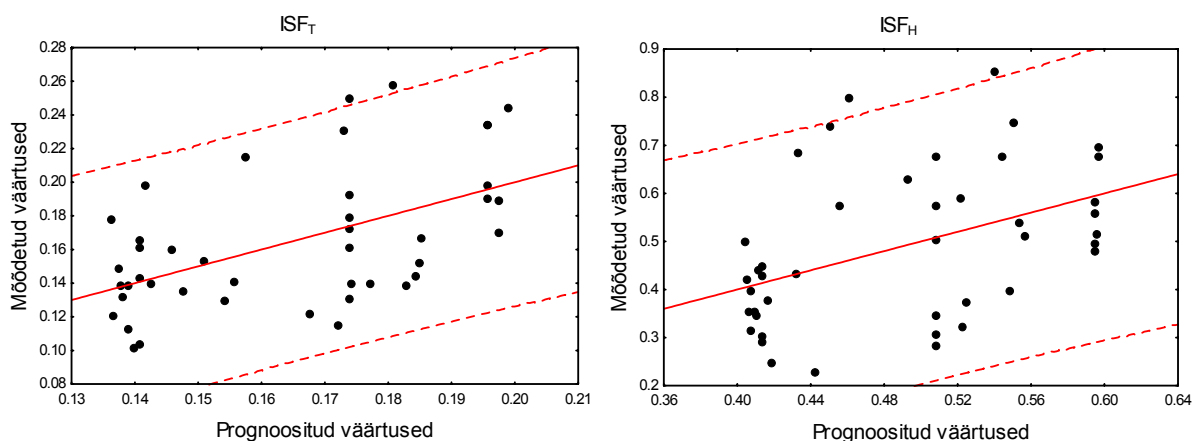


Joonis 9. Puurinde hajusa kiirguse läbilaskvuse koefitsiendi ( $ISF_T$ ) väärtuste prognoos sõltuvalt puurinde liigilisest koosseisust. Puuliikide osakaalu väärtused varieeruvad 0-st 1-ni (0 - antud liiki puid on puurindes 0%; 1 - antud liiki puid on puurindes 100%).



Joonis 10. Rohurinde hajusa kiirguse läbilaskvuse koefitsiendi ( $ISF_H$ ) väärtuste prognoos sõltuvalt puurinde liigilisest koosseisust. Puuliikide osakaalu väärtused varieeruvad 0-st 1-ni (0 - antud liiki puid on puurindes 0%; 1 - antud liiki puid on puurindes 100%).

Kui joonised 9 ja 10 kirjeldavad  $ISF_T$  ja  $ISF_H$  prognoositud väärtuste keskmist trendi siis joonis 11 illustreerib tegelikult mõõdetud ja prognoositud väärtuste vahelist vastavust ning varieeruvust. Enamus vaatlusi jääb katkendjoontega tähistatud regressiooniseose 95% usaldusintervalli piiresse. Seega on prognoosimudeli kasutamine igati põhjendatud.



Joonis 11. Mõõdetud ja prognoositud väärtuste vaheline seos võrastiku hajusa kiirguse läbilaskvuse koefitsiendi ( $ISF_T$ ) ja rohurinde hajusa kiirguse läbilaskvuse koefitsiendi ( $ISF_H$ ) jaoks. Pidevjoon kujutab regressiooni mõõdetud ja prognoositud väärtuste vahel, katkendjoon vahemikku, milles asetsevad punktid 95% tõenäosusega.

### 3.5. Süsiniku koguste seos puurinde liigilise koosseisu ning puu- ja rohurinde valguse läbilaskvusega

Mitmese regressiooni tulemused (Tabel 2) näitavad, et  $C_{FF}$  sõltub nii puurinde liigilisest koosseisust kui  $ISF_T$  ja  $ISF_H$  väärtustest. Seega kirjeldavad  $C_{FF}$  varieerumist kaks erinevat mudelit, millest üks seletab  $C_{FF}$  varieerumist puurinde liigilise koosseisu abil ( $p < 0,001$ ,  $Adj.R^2 = 0,31$ ) ja esitub kujul:

$$\ln C_{FF} = -0,099 \cdot \ln(Ks/Mä) + 0,013 \cdot \ln(Ku/Mä) + 8,278.$$

Teine mudel (Tabel 2) kirjeldab  $C_{FF}$  varieerumist  $ISF_T$  ja  $ISF_H$  abil ( $p < 0,001$ ,  $Adj.R^2 = 0,30$ ) ja esitub kujul:

$$\ln C_{FF} = 5,770 \cdot ISF_T + 1,523 \cdot ISF_H + 6,530.$$

$C_T$  ja puurinde liigilise koosseisu vaheline seos on statistiliselt piiripealse olulisusega ( $p = 0,065$ ). Samas mudel (Tabel 2), milles statistiliselt olulisteks  $C_T$  väärtusi mõjutavateks

faktoriteks on  $\ln C_{FF}$  ( $p=0,0001$ ),  $ISF_H$  ( $p=0,0009$ ),  $ISF_T$  ( $p=0,022$ ) kirjeldab ära  $C_T$  varieerumisest ära 81% ja esitub kujul:

$$\ln C_T = -1,950 * ISF_T - 0,763 * ISF_H + 0,798 * \ln C_{FF} + 2,986.$$

Tabel 2. Mitmese regressiooni tulemused varise- ja kõdukihi süsiniku kogus (logaritmitud,  $\ln C_{FF}$ ) ning kogu süsiniku kogus (logaritmitud,  $\ln C_T$ ) kohta.  $Adj.R^2$  on parandatud determinatsioonikordaja, S.E.E – hinnangu standardviga,  $p$  - mudeli olulisuse tõenäosus.

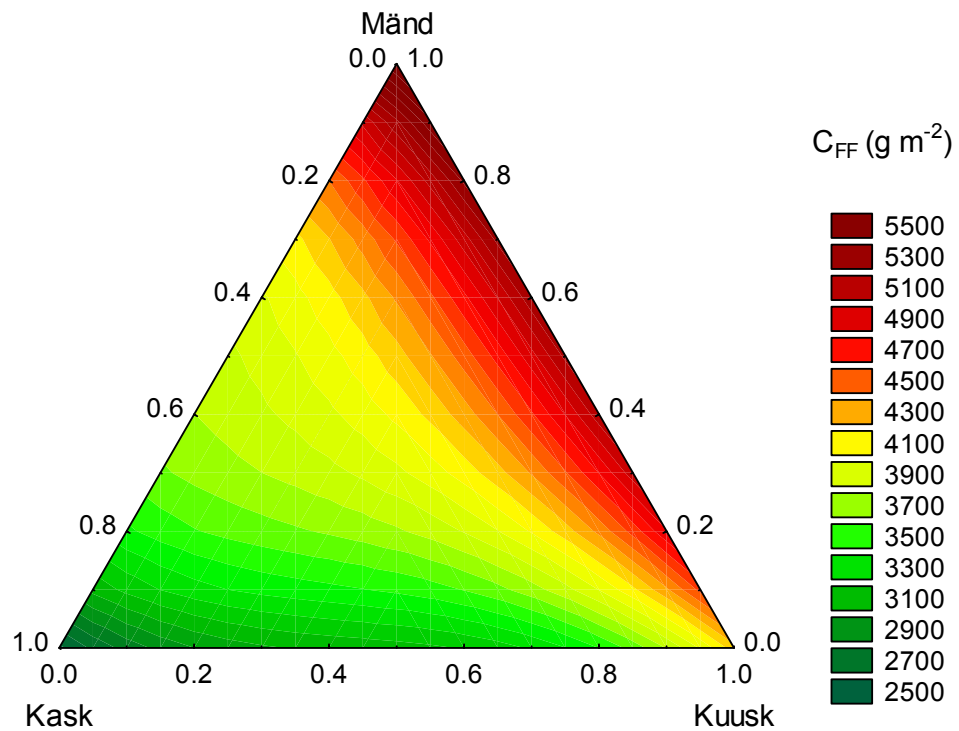
\*\*\* $p < 0,001$ , \*\* $p < 0,01$ , \* $p < 0,05$ .

Tunnused	Adj.R <sup>2</sup>	S.E.E	p	Mudeli parameetrid					Vabaliige
				ln(Ks/Mä)	ln(Ku/Mä)	ISF <sub>T</sub>	ISF <sub>H</sub>	lnC <sub>FF</sub>	
lnC <sub>FF</sub>	0,31	0,483	<0,001	-0,099**	0,013	-	-	-	8,278
lnC <sub>FF</sub>	0,30	0,487	<0,001	-	-	5,770**	1,523**	-	6,530
lnC <sub>T</sub>	0,81	0,195	<0,001	-	-	-1,950*	-0,763***	0,798***	2,986
lnC <sub>T</sub>	0,08	0,423	0,065	-0,046	0,006	-	-	-	8,878

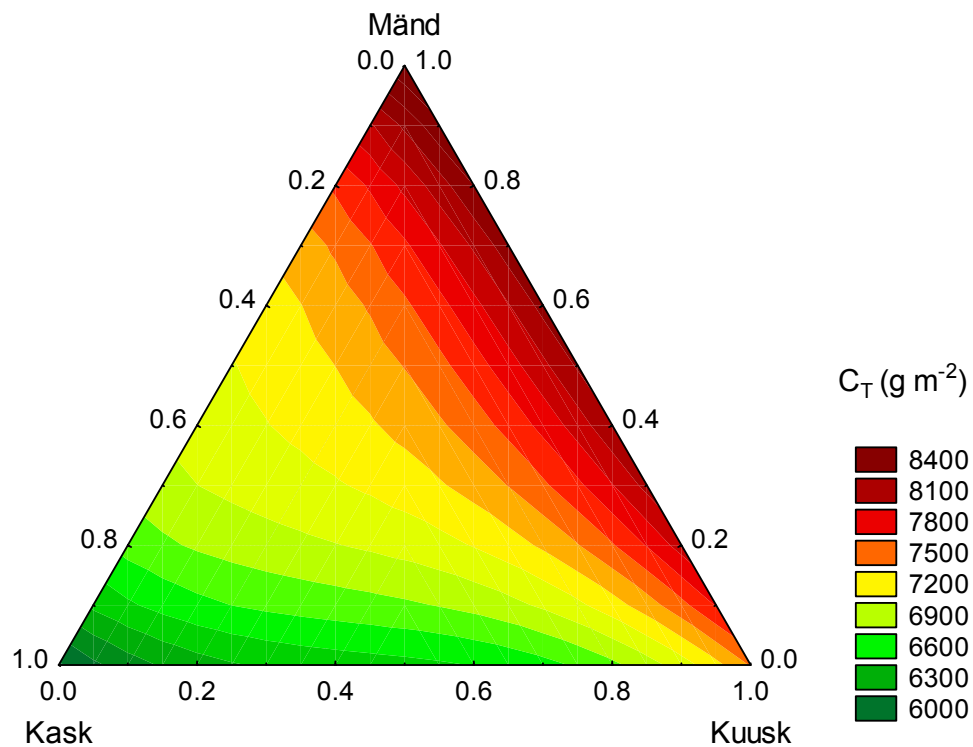
### 3.6. Varise- ja kõdukihi süsiniku hulga prognoos sõltuvalt puurinde liigilisest koosseisust

Kolmnurkgraafik (joon. 14) illustreerib Tabel 2 esitatud regressioonivalemite põhjal prognoositud varise- ja kõdukihi süsiniku kogus ( $C_{FF}$ ) väärtusi ning nende muutumist vastavalt männi, kuuse ja kase ohtrusvahekorrale. Joonis 15 kirjeldab prognoositavat kogu süsiniku hulga ( $C_T$ ) väärtusi sõltuvalt puuliikide ohtrusvahekorrast.

$C_{FF}$  ja  $C_T$  prognoosväärtuste graafikutelt (joon. 14 ja 15) on näha, et kase ja männi osakaalud on ühed olulisemad  $C_{FF}$  ja  $C_T$  väärtusi mõjutavad faktorid (mida näitasid ka regressioonanalüüsi tulemused Tabel 2).  $C_{FF}$  ja  $C_T$  prognoosväärtused on suurimad (vastavalt ca 5500 ja 8400 g m<sup>-2</sup>) männi puhtpuistustes ning vähimad (vastavalt ca 2500 ja 6000 g m<sup>-2</sup>) kase puhtpuistutes. Puhtkuusikutes on  $C_{FF}$  ja  $C_T$  väärtused puhtmännikute ja kaasikute vahepealsed ning kuuse enamusega puistutes sõltuvad  $C_{FF}$  ja  $C_T$  väärtused oluliselt kase ja männi osakaaludest puistus. Vähimgi männi ja kase osakaalude muutus puurindes mõjutab oluliselt  $C_{FF}$  ja  $C_T$  väärtusi. Kuusikutes mändide või kaskede osakaalu suurenemine põhjustab samuti kiiremaid muutusi  $C_{FF}$  ja  $C_T$  väärtustes just väikestel kase või männi osakaalu lisandumistel. Kuuse-männi või kuuse-kase segapuistutes on kuuse osakaalu vähenemisega kaasnevad muutused süsiniku tagavaras vähem märgatavad (joon. 14 ja 15).

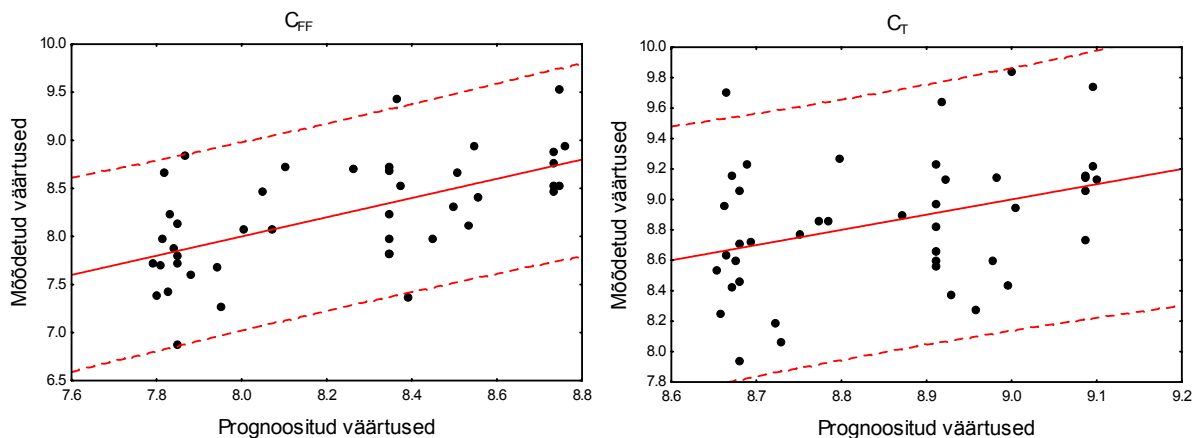


Joonis 14. Varise- ja kõdukihi süsiniku koguse ( $C_{FF}$ ,  $g\ m^{-2}$ ) prognoos sõltuvalt puurinde liigilisest koosseisust. Puuliikide osakaalu väärtused on vahemikus 0 kuni 1 (0 - antud liiki puid on puurindes 0%; 1 - antud liiki puid on puurindes 100%).



Joonis 15. Kogu süsiniku koguse ( $C_T$ ,  $g\ m^{-2}$ ) prognoos sõltuvalt puurinde liigilisest koosseisust. Puuliikide osakaalu väärtused on vahemikus 0 kuni 1 (0 - antud liiki puid on puurindes 0%; 1 - antud liiki puid on puurindes 100%)

Joonis 16 illustreerib tegelikult mõõdetud ja prognoositud väärtuste vahelist vastavust ning varieeruvust. Peaaegu kõik vaatlused jäävad katkendjoontega tähistatud regressiooniseose 95% usaldusintervalli piiresse.



Joonis 16. Mõõdetud ja prognoositud väärtuste vaheline seos varise- ja kõdukihi süsiniku koguse ( $C_{FF}$ ) ja kogu süsiniku koguse ( $C_T$ ) puhul (logaritmitud väärtused), pidev joon kujutab regressiooni mõõdetud ja prognoositud väärtuste vahel, katkendlik joon vahemikku, milles 95% tõenäosusega punktid asetsevad.



#### 4. ARUTELU

On teada, et suur osa maailma süsinikuvarudest paikneb boreaalsete metsade muldades. Kuna otsene mullasüsiniku hulga mõõtmine nii suures skaalas oleks kahtlemata mõeldamatu (iseegi vaid Eesti piires), siis on antud ligikaudseid hinnanguid boreaalsete metsade mullasüsiniku sisalduse kohta. Üks võimalus teada saada, kui palju süsinikku tegelikult boreaalsete metsade mullas koguseliselt on, oleks kasutada selle hindamiseks kaudseid meetodeid (prognoosmudeleid või/ja kaugseire meetodeid). Kasutatakse küll prognoosmudeleid ja kaugseire meetodeid taimkatteta maapinnalt peegelduva kiirguse põhjal mulla süsiniku koguse prognoosimiseks, kuid taimkattega, eriti metsaga, kaetud muldade süsiniku varu suuruse hindamiseks eriti häid mudeleid veel pole. Kuna üks võimalus mullasüsiniku hindamiseks kaugseire meetoditega on kasutada selleks taimkattelt peegelduvat või selles neelduvat kiirgust, oleks tarvis kõigepealt teada, kas võrastiku valguse läbilaskvuse ja mullasüsiniku hulga vahel on seost ning kuidas mõjutavad seda puistu koosseis ja muud faktorid. Antud töös on seoseid uuritud vanuselt küpsete, parasniisketes tingimustes kasvavate metsade puhul.

Võrastiku valguse läbilaskvust iseloomustab antud töös  $ISF_T$  väärtus.  $ISF_T$  (võrastiku hajusa kiirguse läbilaskvuse koefitsient) peegeldab teatavasti ka puurinde biomassi, lehepinnaindeksi väärtust, võrastiku tihedust, lehestiku katvust ja ohtrust. Rohurinde valguse läbilaskvust iseloomustab antud töös  $ISF_H$  väärtus, mis peegeldab ühtlasi rohurinde biomassi, katvust ja ohtrust. Mida suuremad on  $ISF_T$  ja  $ISF_H$  väärtused, seda tihedam on tõenäoliselt võrastik ja rohurinne (vähem valgust jõuab sellest läbi) (Anderson 1966; Lang 1987; Gleason ja Tilman 1990; Wang ja Jarvis 1990; Vose *et al.* 1994; Heilman *et al.* 1996; Stadt & Lieffers 2005; Hirose 2005). Seega teatud mõttes peegeldavad  $ISF_T$  ja  $ISF_H$  väärtused taimse varisena mulda sisenevat süsiniku voogu.  $ISF_T$ ,  $ISF_H$  ja mullasüsiniku vahelised seosed peegeldavad mullasüsiniku seoseid maapealse taimestiku hulgaga. Kaudselt muidugi võivad  $ISF_T$  ja  $ISF_H$  väärtustest (puurinde-ja rohurinde tihedusest) sõltuda lisaks tekkiva varise hulgale ka mullatemperatuur ja selle kaudu varise lagunemistingimused ja –kiirus. Eeldades, et  $ISF_T$  ja  $DSF_T$  vahel on tugev seos (joon. 5), kasutatakse analüüsidest sageli vaid esimest (nagu ka Kull ja Tulva 2000). Küpsetes metsades, kus otsest kiirgust võrastiku alla, alustaimestikuni peaaegu ei jõuagi, on suurem osa selleni jõudvast päikesekiirgusest hajuskiirgus. Samal põhjusel peegeldab tõenäoliselt ka rohurinde valguse läbilaskvuse koefitsient ( $ISF_H$ ) eelkõige rohurinde hajuskiirguse läbilaskvust.

On teada, et puistu liigiline koosseis mõjutab võrastikualuseid valgus- ja mullatingimusi (Binkley ja Giardina 1998; Saetre 1999; Bengtsson *et al.* 1999; Thelin *et al.*

2002; Augusto *et al.* 2002; Augusto *et al.* 2003; Czimeczik *et al.* 2005; Wallrup *et al.* 2006). Kaugseire meetoditega on võimalik erineva enamuspüüliigiga puistuid (männikuid, kuusikuid, lehtpuupuistud) üksteisest eristada (Nilson 1994). Enamasti langeb enamuspüüliik kokku metsanduslikus andmebaasis esitatud peapüüliigiga. Kui võrrelda  $C_{FF}$ ,  $C_T$ ,  $ISF_T$  ja  $ISF_H$  väärtusi erineva peapüüliigiga puistutes, siis näitavad dispersioonanalüüsi ja Tukey testi tulemused ( $p < 0,05$ ), et varise- ja kõdukihi süsiniku hulk ( $C_{FF}$ ) on keskmiselt okaspuu enamusega puistutes (kuusikutes ja männikutes) suurem kui lehtpuu enamusega puistutes (kaasikutes) (joon. 1). Kogu süsiniku hulga keskmistes väärtustes ( $C_T$ ) olulisi erinevusi männikute, kuusikute ja kaasikute vahel ei ole (joon. 2). Keskmised  $ISF_T$  ja  $ISF_H$  väärtused on männikutes oluliselt suuremad kui kaasikutes. Kuusikute ja kaasikute puhul Tukey testi järgi olulist erinevust ei olnud (joon. 3 ja 4).

Okaspuupuistute suurem  $C_{FF}$  väärtus tuleneb tõenäoliselt sellest, et varist tekib küll vähem kui kasepuistuistes ( $ISF_T$  keskmine männikutes suurem kui kaasikutes, männi okkad püsivad puul 3-4 aastat), kuid varis on hapestava toimega, laguneb aeglasemalt ning seetõttu akumulereb suhteliselt paksu varise- ja kõdukihina ning mida paksem on see kiht, seda suurem on ka selles sisalduva süsiniku hulga väärtus. Lehtpuupuistutes aga seevastu moodustub küll palju varist (madalad  $ISF_T$  ja  $ISF_H$  väärtused, heitlehisus), kuid selle lagunemine on kiirem (keskmiselt aastaga on lagundatud), seetõttu ka varise- ja kõdukiht on suhteliselt õhuke, mis tingib ka süsiniku hulga madalama väärtuse. Sarnastele järeldustel on oma töös jõudnud ka Czimeczik *et al.* (2005). Okaspuude ja lehtpuude varise erinevat kvaliteeti ja toodetava varise erinevat hulka on kirjeldatud ka varasemates uuringutes (Bengtsson *et al.* 1999; Thelin *et al.* 2002; Augusto *et al.* 2002; Augusto *et al.* 2003).

$ISF_T$  ja  $ISF_H$  väärtused erinevad statistiliselt oluliselt vaid kaasikute ja männikute vahel (vastavalt joon. 3 ja joon. 4). Suurem  $ISF_T$  väärtus männikute puhul võrreldes lehtpuupuistutega võib olla tingitud erinevast võrastiku ehitusest, lehtede asetusest, hulgast jm. Kõrgetes lehtpuupuistutes võib olla küllaltki tihe lehestik. Samuti on lehtpuude lehed laiemad kui okaspuude okkad ning lehtede asetus, võrastiku paiknemine (jaotumine ruumis) ja struktuur soodustavad efektiivsemat valguse sidumist. Kõrgetes männikutes jõuab suur osa võrastikule langevast kiirgusest selle alla, tõenäoliselt tingituna puude hõredamast paiknemisest (mänd vajab kasvuks häid valgustingimusi), võrastiku ehitusest (võrastik koondunud tüve tippu, ei ole väga laiuv, erinevate puude võrastike vahelt jõuab suhteliselt palju valgust võrastiku alla).

$C_{FF}$  ja  $C_T$  väärtuste varieerumine sama peapüüliigiga puistutes (joon. 1 ja joon. 2) on ühest küljest tingitud tõenäoliselt sellest, et metsade muld on ruumis väga heterogeenne. Muld on varieeruvate omadustega nii vertikaalses kui horisontaalses skaalas (Kimble *et al.* 2001).

Mullaproovid, mis on võetud samas puistus vaid paarimeetrise vahega, võivad olla omadustelt, süsiniku sisalduselt, mullahorisontide paksuste poolest väga erinevad. Federer (1982) näitab oma uurimuses, kui subjektiivne ja keerukas on üldse mullahorisontide ja selle peal olevate orgaanika kihtide eristamine ja kuivõrd varieeruvad on ka samas kohas, sama inimese poolt, kuid erinevatel ajahetkedel võetud proovide mullahorisontide paksustele antavad hinnangud. Tõenäoliselt on  $C_{FF}$  ja  $C_T$  varieerumine osaliselt tingitud ka puistute liigilise koosseisu varieerumisest, sest taimne varis on peamine mullasüsiniku allikas ja puurinde liigiline koosseis mõjutab otseselt varise kvaliteedi ja kvantiteedi kaudu mulla süsiniku hulka (nii  $C_T$  kui  $C_{FF}$  väärtusi).

$ISF_T$  ja  $ISF_H$  väärtuste varieerumine sama peapuuliigiga puistutes (joon. 3 ja 4) võib üheltpoolt olla tingitud valgustingimuste varieerumisest (päikselaigud, ebaühtlane võrastiku ja rohurinde jaotumine ruumis jm), teisest küljest võib see tõenäoliselt olla tingitud ka erinevustest lehtpuude ja okaspuude ohtrusvahekordades, millest omakorda sõltuvad võrastikualused valgustingimused.

Vaatluse alla võetud puistute seas on lisaks puhtpuistutele ka segapuistuid, kus peapuuliigi kõrval puurindes esinevate liikide osakaal puurindes oli 11 – 24% (joon. 6). Vaadeldud kaasikutes, kuusikutes ja männikutes teiste puude keskmine osakaal oluliselt ei erinenud (Tukey testi järgi). Kaaspuuliigid (peapuuliigi kõrval puurindes esinevad puuliigid) võivad varjutada peapuuliigi mõju  $ISF_T$ ,  $ISF_H$ ,  $C_{FF}$  või  $C_T$  väärtustele, mis võib olla üheks põhjuseks, miks ei tarvitse erinevused erineva peapuuliigiga puistute vahel olla statistiliselt olulised (nt. erinevus kaasikute ja kuusikute vahel  $ISF_T$  väärtuses), kuigi eeldatavalt võiks see nii olla.

Metsaala on tõenäoliselt puhtpuistuna ka raske hoida, sest alati leidub teiste puuliikide seemneid (nt. kõrvalasuvast puistust) ning nende idanemiseks ja arenguks mõni sobivate tingimustega koht (nt. häiludes). Varjutaluv kuusk suudab kasvada ka kaskede ja mändide all ning on nüüd küpsetes puistutes jõudmas või jõudnud kasvult esimesse rindesse. Samuti võivad kiirekasvulised kased hakata arenema kuuskede all ja kasvada kuuskedest üle (eriti võib see nii olla viljakamates kasvukohtades). Nii võib vahel ka juhtuda, et konkreetse puistu peapuuliik metsanduslikus andmebaasis ei ole (kuigi tavaliselt on) sama, mis puistu enamuspuuliik. Peapuuliigi all peetakse metsanduses silmas antud kohale kõige sobivamaks peetavat puistus piisavalt esindatud puuliiki, mille järgi majandatakse seda puistut. Enamuspuuliigi (valitseva puuliigi) all aga puuliiki, mis on puistus suurima tüvemahu või rinnaspindalaga (Vaus 2005).

Et uurida mullasüsiniku hulga ja võrastiku läbilaskvuse seost konkreetsete puuliikide (kase, kuuse ja männi) osakaaluga puurindes, on puurinde liigilise koosseisu kirjeldamiseks

kasutatud logaritmilisi suhteid, mis on arvutatud kasutades andmete kogumisel määratud puistu valemit.

Mitmese regressiooni tulemused (Tabel 1) näitavad, et võrastiku hajuskiirguse läbilaskvus ( $ISF_T$ ) sõltub statistiliselt oluliselt puistu puurinde liigilisest koosseisust ( $p=0,001$ ,  $Adj.R^2=0,25$ ). Kolmnurkgraafik (joon. 9) illustreerib  $ISF_T$  ja puistu puurinde liigilise koosseisu vahelist seost ning Tabel 1 esitatud regressioonivalemite põhjal prognoositud võrastiku hajuskiirguse läbilaskvuse koefitsiendi ( $ISF_T$ ) väärtusi. Prognoosgraafikult on näha, et  $ISF_T$  prognoosväärtused on suurimad (ca 0,19) männi puhtpuistustes ning vähimad (ca 0,14) kase puhtpuistutes. Mis on ka loogiline, sest männi võrastik on hõre, puude paiknemise tihedus on männikutes tavaliselt väiksem, mistõttu jõuab rohkem valgust võrastiku alla ( $ISF_T$  väärtus on suur). Kaasikutes on võrastiku katvus suurem ( $ISF_T$  väärtus on väiksem). Kase ja männi ohtrusvahekorra muutumine mõjutab oluliselt  $ISF_T$  väärtust ja seda juba kase või männi osakaalude vähesel suurenemisel.

$ISF_T$  väärtus puhtkuusikus on kõrgem kui puhtkaasikus ning eriti kiired muutused  $ISF_T$  väärtuses toimuvad kuusikus, kui kaskede osakaal suureneb kuni 25%-ni ( $ISF_T$  väärtus langeb kiiresti). See on pisut üllatav, sest eeldades, et  $ISF_T$  peegeldab ka puurinde katvust ja seega ka võrastikualuseid valgustingimusi, siis näitavad antud töö tulemused, et puhtkuusikus jõuab võrastiku alla rohkem hajuskiirgust kui puhtkaasikus. Üks seletus sellele võib seisneda selles, et poolsfäärifotod fikseerivad võrastiku liituse konkreetsel hetkel, arvestama nt. kaselehtede liikumisi jm., mis tegelikkuses võimaldavad suuremal hulgal valgusel jõuda võrastiku alla ja seetõttu võib kaskede all leitud  $ISF_T$  väärtus olla pisut väiksem, kui tegelikud valgustingimused näitaksid. Teine seletus on see, et kuusikus satub poolsfäärifoto tegemine tihti kuuskede vahele, võrastike liitumiskoha alla, kus võrastike vahel on avaus ning kuna  $ISF_T$  väärtuse arvutus poolsfäärifotode põhjal arvestab, et otse ülevalt (seniidist) jõuab võrastiku alla kõige rohkem valgust, siis tulebki kuuskede alune  $ISF_T$  väärtus ehk pisut ülehinnatud, võrreldes tegelike valgustingimustega. Kuigi  $ISF_T$  peegeldab kaudselt võrastikualuseid valgustingimusi, näitab  $ISF_T$  väärtus eelkõige võrastiku liituvust ja hakates tegema järeldusi võrastikualuste valgustingimuste kohta, tuleks ilmselt arvestada ka puistu koosseisuga ja sellest tingitud võrastiku ehituse iseärasustega. Kolmas seletus sellele, miks puhtkaasikus on  $ISF_T$  väärtus madalam kui kuusikus, võib olla seotud kasvukoha ja mullaviljakusega. Kuigi liigiomaselt on kuusk kõige efektiivsem valguse siduja, võib kaskede domineerimine olla seotud viljakama kasvukohaga, mis võimaldabki tihedamat taimestikku, mille puhul on nii  $ISF_T$  kui  $ISF_H$  väärtused väiksemad.

Männi ja kuuse ohtrusvahekorra muutumisel ei ole prognoosgraafiku järgi muutused  $ISF_T$  väärtustes eriti kiired ja suured (joon. 9). Puhtmännikute ja puhtkuusikute vaheline väike

erinevus  $ISF_T$  väärtuses võib olla seletatav sellega, et kuusikus on võrastikualused valgustingimused tavaliselt kehvemad kui männikus (ilmselt tingituna samuti erinevustest võrastikuehitusest). Isegi, kui tegemist on antud juhul küpsete kuusikutega ja isehõrenemise tulemusena on valgustingimused võrastiku all tunduvalt paremad kui noortes kuusikutes, on valguse sidumine kuuskede võrastikes tavaliselt efektiivsem kui mändide võrastikes.

Mitmese regressiooni tulemused (Tabel 1) näitavad, et rohurinde valguse läbilaskvus ( $ISF_H$ ) sõltub nii puurinde liigilisest koosseisust kui  $ISF_T$  väärtusest ( $p=0,006$ ,  $Adj.R^2=0,21$ ) (Tabel 1).  $ISF_H$  prognoosväärtuste graafikul (joon. 10) on näha samad trendid, mis  $ISF_T$  prognoosväärtuste graafikul (joon. 9).  $ISF_H$  keskmised väärtused on suurimad (ca 0,56) männi puhtpuistustes ning vähimad (ca 0,42). Kui eeldada, et puistualune rohurinne sõltub ainult võrastikualustest valgustingimustest, siis peaks  $ISF_H$  trend olema vastupidine  $ISF_T$  omale, st. puhtmännikutes, kus  $ISF_T$  on maksimaalne, peaks rohurinde katvus olema suurim, seega  $ISF_H$  minimaalne, ning puhtkaasikutes, kus  $ISF_T$  on minimaalne, peaks rohurinde katvus olema väikseim, seega  $ISF_H$  maksimaalne. Tegelikult mõjutavad rohurinde ohtrust ja katvust lisaks võrastikualustele valgustingimustele ka mullatingimused. Ka varasematest uuringutest (Bengtsson *et al.* 1999; Thelin *et al.* 2002; Augusto *et al.* 2002; Augusto *et al.* 2003; Czimczik *et al.* 2005 jt.) on teada, et okaspuude varis on ebakvaliteetsem ja hapestab mulda, luues seega rohttaimedele ebasoodsamad kasvutingimused. Lehtpuuvaris on toitaineterikkam ja vähem hapestava toimega, erinevalt okaspuuvarisest, varise kiire lagunemine tekitab rohttaimedele viljaka kasvupinnase. Miks aga lehtpuude alused kehvad valgustingimused rohurinde arengut oluliselt ei piira ( $ISF_H$  väärtus on madal), võib olla seletatav ka lehtpuude heitlehisusega. Erinevalt okaspuupuistutest on kevadel, kui rohurinne saab jõudsalt areneda, raagus lehtpuude all veel väga head valgustingimused, andes arenguks hea stardivõimaluse. Seetõttu ei ole üllatav, et prognoosi kohaselt järgib  $ISF_H$  sama trendi, mis  $ISF_T$  ja on maksimaalne puhtmännikute ja minimaalne kaasikute puhul, st. suurema mändide osakaalu puhul on  $ISF_T$  väärtused küll suuremad, kuid rohurinne on puhtmännikutes hõre ja  $ISF_H$  väärtused seega suured (ilmselt tingituna rohttaimede jaoks ebasoodsatest mullatingimustest, paksust happelisest varise- ja kõdukihist). Kuuskede all on rohu- ja puhmarinne pisut tihedam ja liigirikkam kui mändide all, kuid, võrreldes lehtpuupuistutega, siiski tunduvalt hõredam. Wallrup *et al.* (2006) ning Kembel ja Dale (2006) uurimuse tulemused kinnitavad samuti, et rohurinde katvus ja liigirikkus on positiivses korrelatsioonis ülarinde lehtpuude katvusega ning negatiivses korrelatsioonis okaspuude katvusega.

Samas tihti on erinev puistu liigiline koosseis vastava kasvukoha mullastiku erinevuse tagajärg (kui just tahtlikult kasvukohale ebasobivamat liiki pole istutatud). Seega mõjutab ühelt poolt muld seda, millised puuliigid konkreetses kohas kasvavad ja samas teiselt poolt

erinevad puuliigid mõjutavad mulda. Mis tähendab, et vähese alustaimestikuga paljas liiv männiku all ei pruugi olla ainult mändide varise poolt põhjustatud, vaid ka sellest, et tihti kasvatatakse mändi (või mänd suudab edukalt kuuse ja kasega konkureerida) vähem viljakas kasvukohas ja varem väheviljakal mullal kasvama hakanud männiku all ei saagi suurt alustaimestikku olla, sest kasvukoht võis olla väheviljakas juba enne kui mänd seal kasvama hakkas. Kask domineerib tihti just viljaka mullaga kasvukohtades, mis võimaldab tihedamat taimeestikku, mistõttu võibki seal  $ISF_T$  väärtus madal olla. Seega seosed mulla ja  $ISF_T$ ,  $ISF_H$  vahel on kahesuunalised, üheltpoolt määrab mulla viljakus paljuski selle, kui suur on puurinde lehestiku ohtrus või rohurinde katvus, teiselt poolt mõjutavad erinevad puuliigid mullaomadusi ja võrastikualuseid valgustingimusi, mullatemperatuuri ning seeläbi rohurinde katvust, varise lagunemistingimusi ja –kiirust.

Kui joonised 9 ja 10 kirjeldavad  $ISF_T$  ja  $ISF_H$  prognoositud väärtuste keskmist trendi (millest tõenäoliselt ka suhteliselt väike maksimaalsete ja minimaalsete  $ISF_T$  ja  $ISF_H$  väärtuste erinevus), siis joonis 11 illustreerib tegelikult mõõdetud ja prognoositud väärtuste vahelist vastavust ning varieeruvust. On näha, et tegelikuses võivad väärtused varieeruda suhteliselt laiades piirides ja samas jääb enamuse vaatlusi katkendjoontega tähistatud regressiooniseose 95% usaldusintervalli piiresse. Seega on prognoosimudeli kasutamine igati põhjendatud ja prognoosgraafikult nähtud trendid usaldusväärsed.

Varise- ja kõdukihi süsiniku hulk ( $C_{FF}$ ) sõltub mitmese regressiooni tulemuste järgi (Tabel 2) üheltpoolt puurinde liigilisest koosseisust ( $p < 0,001$ ,  $Adj.R^2 = 0,31$ ), teiselt poolt nii  $ISF_T$  kui  $ISF_H$  väärtustest ( $p < 0,006$ ,  $Adj.R^2 = 0,30$ ). Kogu süsiniku hulga ( $C_T$ ) ja puistu liigilise koosseisu vahel on statistiliselt piiripealse olulisusega ( $p = 0,065$ ) seos (Tabel 2).

Joonistel 14 ja 15 kujutatud kolmnurkgraafikud illustreerivad  $C_{FF}$  ja  $C_T$  ning puistu puurinde liigilise koosseisu vahelist seost ning Tabel 2 esitatud regressioonivalemite põhjal prognoositud varise- ja kõdukihi süsiniku koguse ( $C_{FF}$ ) ja kogu süsiniku koguse ( $C_T$ ) väärtusi.  $C_{FF}$  ja  $C_T$  prognoosväärtused on suurimad (vastavalt ca 5500 ja 8400 g m<sup>-2</sup>) puhtmännikus, kus varise- ja kõdukiht on paksem, selle lagunemine aeglasem, ja vähimad (vastavalt ca 2500 ja 6000 g m<sup>-2</sup>) puhtkaasikus, kus varise- ja kõdukiht on õhem ja lagunemine tavaliselt kiirem. Puhtkuusikus on  $C_{FF}$  ja  $C_T$  väärtused enamvähem puhtmännikute ja puhtkaasikute vahepealsed.

Kogu mullasüsiniku ( $C_T$ ) prognoosimudeli puurinde liigilise koosseisu või  $ISF_T$ ,  $ISF_H$  kaudu väga hästi  $C_T$  varieerumist ei kirjelda (Tabel 2). Ilmselt on see tingitud sellest, et kui  $C_{FF}$  sõltub oluliselt mulda sisenevast varisest, siis mineraalse mullaosa süsiniku varu sõltub puurinde liigilisest koosseisust ja puurinde või rohurinde katvusest vaid kaudselt  $C_{FF}$  kaudu ning muutused selles mullaosa süsiniku koguses on tõenäoliselt ka tunduvalt aeglasemad.

Ilmselt mõjutab mineraalses mullaosas olevat süsiniku kogust ja selle varieerumist veel teisedki tegurid, mida antud töös otseselt pole uuritud (nt. kasvukohatüüp, mulla niiskus, mullatüüp, reljeef).

Kogu mullasüsiniku mudel parameetertunnustega  $ISF_T$ ,  $ISF_H$  ja  $C_{FF}$  näitab, et varise- ja kõdukihi süsiniku hulk koos  $ISF_T$  ja  $ISF_H$ -ga kirjeldavad ära olulise osa  $C_T$  varieerumisest ( $Adj.R^2=0,81$ ). Mõnes mõttes on see ka oodatav, sest mullaproovid on võetud 30 cm sügavuseni, mistõttu suure osa  $C_T$ -st moodustabki  $C_{FF}$  (Tabel 2). Proovide võtmise sügavus on valitud eeldusega, et süsiniku sisaldus mullas väheneb sügavusega (eksponentsiaalselt) ja sel moel võetud proovid (ulatudes enamasti mulla sisse- ja väljauhtehorisondini (liiv)) kirjeldavad ära suurema osa mineraalses mullaosas sisalduvast süsinikust. Samas võib seetõttu mineraalse mullaosa süsiniku hulk olla mõnede alade puhul pisut alahinnatud. Kuna süsinikuringe uurimise seisukohast oleks oluline leida mudel ka mineraalses mullaosas oleva süsiniku prognoosimiseks, siis vajaks see valdkond veel lähemat uurimist ja võibolla ka sügavamalt võetud mullaproove ning ka ala sisese mullasüsiniku hulga varieerumise uurimist.

Olen oma töös keskendunud peamiselt süsiniku hulgale varise- ja kõdukihis, eeldades, et maapealse taimse varisena ning peenjuurte (<2 mm) varisena mulda sisenev süsinikuvoog on üks olulisemaid mullasüsiniku varu mõjutajaid. Lisaks sellele mõjutab kogu mullasüsiniku hulka mingil määral kindlasti ka puitunud juurte varisena mulda sisenev süsinikuvoog. Siinkohal tuleb loomulikult arvestada, et puurinde liikide erinev mõju mulla süsiniku hulgale ei seisne vaid produtseeritava varise kvaliteedis ja kvantiteedis, vaid ka erinevustes näiteks juurdumismustris (kuidas juurestik mullas paikneb ja areneb), kuuskedel on juurestik pinnalähedasem, mändidel, lehtpuudel sügavamale mullakihtidesse arenev, see mõjutab samuti süsiniku jaotumist ja hulka mullas.

$C_{FF}$  väärtuste prognoosimiseks oleks üheltpoolt võimalik kasutada mudelit, mis kirjeldab  $C_{FF}$  varieerumist puurinde liigilise koosseisu abil. Teisest küljest aga seletab enamvähem sama suure osa  $C_{FF}$  varieerumisest ära ka mudel, milles parameetritena on sees  $ISF_T$  ja  $ISF_H$  (Tabel 2). Sammregressiooni tulemused näitasid, et puistukoosseis ja  $ISF_T$  korraga olulistena mudelisse ei jäänud.

Ühe või teise mudeli eelistamine sõltub konkreetsest uurimiseesmärgist, vahenditest või oskustest. Üldjuhul arvatakse, et puistu koosseisu on tunduvalt lihtsam määrata kui poolsfäärifotode tegemine, analüüsimine ning rohurinde kohalt ja alt valguse mõõtmine. Samas ei saa sellega päris nõustuda, sest segapuistute puhul võib puurinde koosseisu, erinevate puurinde liikide osakaalude määramine silma järgi olla küllaltki keerukas, vilumust ja aega nõudev ja väga subjektiivne. Kui edasine kaugem eesmärk on leida mudel, mille abil kaugseire mõõtmiste abil prognoosida mulla süsiniku kogust, siis tegelikult oleks ehk

otstarbekam edasi arendada (nt. vaadeldes erinevaid kasvukohatüüpe, niiskustingimusi jm.) mudelit, mille abil saaks varise- ja kõdukihi süsiniku kogust ( $C_{FF}$ ) prognoosida võrastiku valguse läbilaskvuse kaudu.

Kuna antud töös olid esialgu vaatluse all vaid parasniiskete kasvukohtade vanuselt küpsed puistud, keskmiselt või nõrgalt leetunud kamar-leetmullal (punakaspruunil moreenil), siis saab leitud seoste ja mudelite põhjal teha esialgu üldistusi vaid sarnaste puistute kohta, sarnastes tingimustes. Et teha laiemaskaalalisi järeldusi kaugseire meetodite rakendamisvõimalusest metsade mullasüsiniku hulga prognoosimisel, on tulevikus plaanis analüüsida võrastiku valguse läbilaskvuse seost taimkatteindeksitega (NDVI), samuti uurida antud töös leitud seoseid ja leida mullasüsiniku prognoosmudelid ka kuivemates ja niiskemates kasvukohtades ning teistsugustel muldadel kasvavate metsade puhul.



## 5. KOKKUVÕTE

### Varise- ja kõdukihi süsiniku hulga seos võrastiku valguse läbilaskvuse ja puistu koosseisuga

Magistritöö peamiseks eesmärgiks oli uurida, kas puistu koosseis mõjutab mullasüsiniku tagavara ning leida prognoosimudel selle hindamiseks küpsete parasniisketes tingimustes kasvavates metsades. Selleks on rakendatud meetodikat, mis lubab väljendada puistu liigilist koosseisu liikide osakaalude logaritmiliste suhete abil. Järgnevalt analüüsiti, kuidas sõltuvad puuvõrastiku ja rohurinde valguse läbilaskvus puistu liigilisest koosseisust ning kuidas sõltuvad varise- ja kõdukihi süsiniku hulk ning kogu mulla süsiniku hulk (varise-, kõdukihi ning mineraalse mullaosa süsinik kokku) puurinde liigilisest koosseisust ja puurinde hajuskiirguse läbilaskvusest.

Andmed on kogutud 2005. aasta juulis. Vaatluse alla on võetud 15 männi (*Pinus sylvestris*), 14 kuuse (*Picea abies*) ja 14 kase (*Betula sp.*) enamusega küpset ja parasniisketes tingimustes kasvavat puistut Tartu maakonnas Vara metskonnas.

Dispersioonanalüüsi ja Tukey testi tulemused näitasid, et keskmine varise- ja kõdukihi süsiniku hulk ( $C_{FF}$ ) oli okaspuu (männi ja kuuse) enamusega puistutes oluliselt suurem kui kase enamusega puistutes. Kogu süsiniku hulk ( $C_T$ ) erineva peapuuliigiga puistutes oluliselt ei erinenud. Võrastiku valguse läbilaskvuse koefitsiendi ( $ISF_T$ ) ja rohurinde valguse läbilaskvuse koefitsiendi ( $ISF_H$ ) väärtused olid männi enamusega puistute puhul statistiliselt oluliselt ( $p < 0,05$ ) suuremad kui kase enamusega puistute puhul. Kuuse enamusega puistute  $ISF_T$  ja  $ISF_H$  väärtused oluliselt ei erinenud männi ja kase enamusega puistute omadest.

Peapuuliigi kõrval esinevate kaapuuliikide osakaal vaadeldud puistute puurindes oli keskmiselt 11-24%. Et uurida puistu liigilise koosseisu seost võrastiku läbilaskvuse ja mulla süsiniku hulgaga, on kasutusel puurinde liigilist koosseisu kirjeldavad sõltumatud muutujad – erinevate puurinde liikide osakaalude logaritmilised suhted.

Mitmese regressiooni tulemused näitavad, et  $ISF_T$  sõltub statistiliselt oluliselt puistu liigilisest koosseisust ( $p = 0,001$ ).  $ISF_H$  sõltub oluliselt nii puurinde liigilisest koosseisust kui  $ISF_T$  väärtusest ( $p = 0,006$ ). Prognoosi kohaselt on  $ISF_T$  ja  $ISF_H$  keskmised väärtused maksimaalsed (vastavalt ca 0,19 ja ca 0,56) puhtmännikutes ja minimaalsed (vastavalt ca 0,14 ja ca 0,42) puhtkaasikutes ning muutused männi ja kase osakaaludes põhjustavad  $ISF_T$  ja  $ISF_H$  väärtuses kiiremaid ja ulatuslikumaid muutusi (eriti olukorras, kus üks neist domineerib) kui muutused männi ja kuuse osakaaludes. Kuuse ja kase ohtrusvahekordade muutumisel toimuvad kiired muutused  $ISF_T$  ja  $ISF_H$  väärtustes just kuuse enamusega puistutes.

$C_T$  jaoks rakendusliku väärtusega ja statistiliselt olulist prognoosmudelit antud töös mitmese regressiooni tulemusena välja ei tulnud. Puurinde liigilise koosseisu ja  $C_T$  vaheline seos on statistiliselt piiripealse olulisusega ( $p=0,065$ ,  $\text{Adj.R}^2=0,08$ ). Mudel, mille parameetertunnusteks on  $\text{ISF}_T$ ,  $\text{ISF}_H$  ja  $C_{FF}$  oli statistiliselt oluline ( $p<0,001$ ) ja kirjeldas  $C_T$  varieeruvusest ära 81%.

Mitmese regressiooni tulemused pakuvad  $C_{FF}$  prognoosimiseks kaks erinevat mudelit, millest üks kirjeldab  $C_{FF}$  varieerumist puurinde liigilise koosseisu abil ( $p<0,001$ ,  $\text{Adj.R}^2=0,31$ ) ja teine  $\text{ISF}_T$  ja  $\text{ISF}_H$  kaudu ( $p<0,001$ ,  $\text{Adj.R}^2=0,30$ ).

## 6. SUMMARY

### **The relationships between forest floor and soil carbon, canopy light transmittance and forest composition**

The focus of the work was to determine the relationship between forest composition and soil carbon stock and to develop a model to predict the soil or forest floor carbon stock in mature stands under typical moisture conditions. This required use of a methodology to describe stand species composition with using logratios of species proportions. In addition, this research addressed the relationships between diffuse radiation transmittance of tree layer ( $ISF_T$ ), light transmittance of herb layer ( $ISF_H$ ) and forest species composition. The relationships between amount of carbon in forest floor, total carbon in soil and forest species composition and diffuse radiation transmittance of tree layer ( $ISF_T$ ) were also studied.

The field data were collected in July 2005. I studied 15 mature pine (*Pinus sylvestris*), 14 spruce (*Picea abies*), 14 birch (*Betula sp.*) stands in typical moisture conditions in the Vara Forest Range in Tartu county.

The result of dispersion analysis and Tukey tests showed that the mean amount of carbon in the forest floor ( $C_{FF}$ ) is significantly greater in conifer (pine and spruce) stands than in birch stands. Total soil carbon ( $C_T$ ) did not differ between stands with different dominant tree species.  $ISF_T$  and  $ISF_H$  values were significantly ( $p < 0,05$ ) higher in stands dominated by pine rather than birch stands. The values of  $ISF_T$  and  $ISF_H$  in spruce stands did not differ significantly from stands dominated by birch and pine.

In addition to the dominant tree species, the amount of secondary species in the stands averaged 11-24%. To investigate the relationships between forest species composition and  $ISF_T$  or soil carbon, logratios of different tree species to describe tree species composition were used as independent variables.

The results of multiple regression showed a strong relation between  $ISF_T$  and forest species composition ( $p = 0,001$ ).  $ISF_H$  demonstrated a significant correlation with forest species composition and  $ISF_T$  as well ( $p = 0,006$ ). According to the model the values of  $ISF_T$  and  $ISF_H$  are maximal (accordingly ca 0,19 and 0,56) in pure pine stands and minimal (accordingly ca 0,14 and ca 0,42) in pure birch stands. Changes in pine and birch proportions resulted in faster and larger changes in the values of  $ISF_T$  and  $ISF_H$  (especially where pine or birch was dominating) than changes in pine and spruce proportions.

The results of multiple regressions showed no statistically significant or applicable prediction model for  $C_T$ . There was a statistically marginally significant relation between  $C_T$

and forest species composition ( $p=0,065$ ,  $\text{Adj.R}^2=0,08$ ). The model with  $\text{ISF}_T$ ,  $\text{ISF}_H$  and  $C_{FF}$  as parameters was statistically significant ( $p<0,001$ ) and described 81% of variation of  $C_T$ .

The results of multiple regression suggest two different models to predict the value of  $C_{FF}$ ; one describes the variation of  $C_{FF}$  through forest species composition ( $p<0,001$ ,  $\text{Adj.R}^2=0,31$ ) and the other through  $\text{ISF}_T$  and  $\text{ISF}_H$  ( $p<0,001$ ,  $\text{Adj.R}^2=0,30$ ).

## **7. TÄNUAVALDUS**

Olen väga tänulik oma juhendajatele Olevi Kullile ja Robert Szava-Kovatsile igakülge toetuse eest käesoleva töö valmimisel. Välitöödel olid suureks abiks Kersti Loolaid ja Olaf Räim. Samuti soovin tänu avaldada Jaan Liirale, Arne Sellinile ja Lea Hallikule asjakohaste nõuannete eest. Suur tänu ka Marika Mäesalule süsinikuanalüüsi teostamise eest.

## 8. KASUTATUD KIRJANDUS

- Aitchison J (1982) The statistical analysis of compositional data (with discussion). *Journal of the Royal Statistical Society B* 44:139-177
- Anderson MC (1966) Stand structure and light penetration. II. A theoretical analysis. *The Journal of Applied Ecology* 3: 41-54
- Augusto L, Ranger J, Ponette Q, Rapp M (2000) Relationships between forest tree species, stand production and nutrient amount. *Annals of Forest Science* 57:313-324
- Augusto L, Ranger J, Binkley D, Rothe A (2002) Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility. *Annals of Forest Science* 59:233-253
- Augusto L, Dupouey JL, Ranger J (2003) Effects of tree species on understory vegetation and environmental conditions in temperate forests. *Annals of Forest Science* 60: 823-831
- Bandaranayake W, Qian YL, Parton WJ, Ojima DS, Follett RF (2003) Estimation of Soil Organic Carbon Changes in Turfgrass Systems Using the CENTURY Model. *Agronomy Journal* 95: 558-563
- Bengtsson J, Saetre P, Brandtberg P-O, Lundkvist H (1999) Soil organisms and carbon, nitrogen and phosphorus mineralisation in Norway spruce and mixed Norway spruce – Birch stands. *Biology and Fertility of Soils* 28:382-388
- Beaudet M, Messier C (2002) Variation in canopy openness and light transmission following selection cutting in northern hardwood stands: an assessment based on hemispherical photographs. *Agricultural and Forest Meteorology* 110:217-228
- Binkley D, Giardina C (1998) Why do tree species affect soils? The warp and woof of tree-soil interactions. *Biogeochemistry* 42:89-106
- Black TA, Gaumont-Guay D, Jassal RS, Amiro BD, Jarvis PG, Gower ST, Kelliher FM, Dunn A, Wofsy SC (2005) Measurement of CO<sub>2</sub> exchange between Boreal forest and the atmosphere. In: Griffiths H, Jarvis PG (eds) *The Carbon Balance of Forest Biomes*, Cromwell Press, Trowbridge, UK, pp 151-185
- Bolstad PV, Vose JM (2001) The Effects of terrain Position and elevation on soil C in the southern Appalachians. In: Lal R *et al.* (ed) *Assessment methods for soil carbon*. Lewis Publ, Boca Raton, FL, pp 45-52
- Bormann FH, Likens GE (1994). *Pattern and Processes in a Forested Ecosystem*. Springer, New York. 253 p
- Chen SG, Ceulemans R, Impens I (1994) A fractal-based Populus canopy structure model for the calculation of light interception. *Forest Ecology and Management* 69:97-110
- Cheng HH, Kimble JM (2001) Characterization of soil organic carbon pools. In: Lal R *et al.* (ed) *Assessment methods for soil carbon*. Lewis Publ, Boca Raton, FL, pp 117-130
- Cole DW, Rapp M (1980) Elemental cycling in forest ecosystems. Reichle DE (ed). Cambridge, Cambridge University Press, pp 341-409
- Conant RT, Paustian K (2002) Spatial variability of soil organic carbon in grasslands: implications for detecting change at different scales. *Environmental Pollution* 116:S127-S135
- Conant RT, Smith GR, Paustian K (2003) Spatial variability of soil carbon in forested and cultivated sites: implications for change detection. *Journal of Environmental Quality* 32:278-286
- Conen F, Zerva A, Arrouays D, Joulivet C, Jarvis PG, Grace J, Mencuccini M (2005) The carbon balance of forest soils: detectability of changes in soil carbon stocks in temperate and Boreal forests. In: Griffiths H, Jarvis PG (eds) *The Carbon Balance of Forest Biomes*, Cromwell Press, Trowbridge, UK, pp 235-249

- Czimczik CI, Mund M, Schulze E-D, Wirth C (2005) Effects of reforestation, deforestation, and afforestation on carbon storage in soils. In: Griffiths H, Jarvis PG (eds) *The Carbon Balance of Forest Biomes*, Cromwell Press, Trowbridge, UK, pp 319-330
- Dixon RK, Brown S, Houghton RA, Solomon AM, Trexler MC, Wisniewski J (1994) Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263:185-190
- Ebermayer E (1876) *Die Gesamte Lehre der Waldstreu mit Rücksicht auf die Chemische Statik des Waldbaues*. Julius Springer Verlag, Berlin
- Ellert BH, Janzen HH, McConkey BG (2000) Measuring and comparing soil carbon storage. In: Lal R *et al.* (ed) *Assessment methods for soil carbon*. Lewis imprint of the CRC Press, Boca Raton, FL, pp 131–146
- Federer CA (1982) Subjectivity in the separation of organic horizons of the forest floor. *Soil Science Society of America Journal*. 46:1090-1093
- Fernandez IJ, Rustad LE, Lawrence GB (1993) Estimating total soil mass, nutrient content, and trace metals in soils under a low elevation spruce-fir forest. *Canadian Journal of Soil Science* 73:317-328
- Finzi AC, Schlesinger WH (2002) Species control variation in litter decomposition in pine forest exposed to elevated CO<sub>2</sub>. *Global Change Biology* 8:1217-1229
- Garten CT Jr, Post WM III, Hanson PJ, Cooper LW (1999) Forest soil carbon inventories and dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian Mountains. *Biogeochemistry* 45:115-145
- Gleeson SK, Tilman D (1990) Allocation and the transient dynamics of succession on poor soils. *Ecology* 7:1144-1155
- Grace J (2001) Carbon cycle. In: Levin SA (ed) *Encyclopedia of Biodiversity*, Vol. 1, Academic Press, pp 609-628
- Grieg CC, Running SW (1977) Leaf area of mature northwestern coniferous forests: relation to site water balance. *Ecology* 58:893-899
- Heilman PE, Hinckley TM, Roberts DA, Ceulemans R (1996) Production physiology. In: Stettler RF, Bradshaw HD, Heilman PE, Hinckley TM (eds) *Biology of Populus and its implications for management and conservation*. Part II, Chapter 18. NRC Research Press, National Research Council of Canada, Ottawa, ON, pp 459-489
- Hill MO (1987) Opportunities for vegetation management in plantation forest. In: Good JEG (ed) *Environmental aspects of plantation forestry in Wales*. Institute of Terrestrial Ecology, UK, pp 64-69
- Hirose T (2005) Development of the Monsi-Saeki Theory on Canopy Structure and Function. *Annals of Botany* 95:483-494
- Homann PS, Bormann BT, Boyle JR (2001) Detecting treatment differences in soil carbon and nitrogen resulting from forest manipulations. *Soil Science Society of America Journal*. 65:463-469
- Huntington TG, Ryan DF, Hamburg SP (1988) Estimating soil nitrogen and carbon pools in a northern hardwood forest ecosystem. *Soil Science Society of America Journal* 52:1162-1167
- Högberg P, Nordgren A, Högberg MN, Ottosson-Löfvenius M, Bhupinderpal-Singh, Olsson P, Linder S (2005) Fractional contributions by autothrophic and heterothrophic respiration to soil-surface CO<sub>2</sub> efflux in Boreal forests. In: Griffiths H, Jarvis PG (eds) *The Carbon Balance of Forest Biomes*. Cromwell Press, Trowbridge, UK, pp 251-267
- Janssens IA, Lankreijer H, Matteucci G, Kowalski AS, Buchmann N, Epron D *et al.* (2001) Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests. *Global Change Biology* 7:269-278

- Joffe JS (1949) *Pedology*. Pedology Publications, 2nd Edition, News Brunswick, 662 p
- Johansson M-B (1995) The chemical composition of needle and leaf litter from Scot pine, Norway spruce and white birch in Scandinavian forests. *Forestry* 68:49-62
- Kemmel S.W., Dale M.R.T (2006) Within-stand spatial structure and relation of boreal canopy and understorey vegetation. *Journal of Vegetation Science* 17: 783-790
- Khanna PK, Ludwig B, Bauhus J, O'Hara C (2001) Assessment and significance of labile organic C pools in forest soils, In: Lal R, *et al.* (ed) *Assessment methods for soil carbon*. Lewis Publ, Boca Raton, FL, pp 167-184
- Kimble JM, Grossman RB, Samson-Liebiog SE (2001) Methodology for sampling and preparation for soil carbon determinations. In: Lal R et al (ed) *Assessment methods for soil carbon*. Lewis Publ, Boca Raton, FL, pp 15-30
- Kull O, Tulva I (2000) Modelling canopy growth and steady-state leaf area index in an aspen stand. *Annals of Forest Science* 57:611-621
- Lang ARG, Yueqin X, Norman JM (1985) Crop structure and the penetration of direct sunlight. *Agricultural and Forest Meteorology* 35:83-101
- Lang ARG (1987) Simplified estimate of leaf area index from transmittance of the sun's beam. *Agricultural and Forest Meteorology* 41:179-186
- Linder S (1985) Potential and actual production in Australian forest stands. In: Landsberg JJ, Parsons W (eds). *Research for forest management*. Commonwealth Scientific Industrial Research Organization, Melbourne, Australia, pp 11-35
- Liski J (1995) Variation in soil organic carbon and thickness of soil horizons within a boreal forest stand – effect of trees and implications for sampling. *Silva Fennica* 29:255-266
- Madgwick HAJ, Brumfield GL (1969) The use of hemispherical photographs to assess light climate in the forest. *Journal of Ecology* 57:537-542
- Malhi Y, Baldocchi DD, Jarvis PG (1999) The carbon balance of the tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell and Environment* 22:715-740
- Martin JL, Gower ST, Plaut J, Holmes B (2005) Carbon pools in a boreal mixedwood logging chronosequence. *Global Change Biology* 11:1883-1894
- McKenzie D, Halpern CB, Nelson CR (2000) Overstory influences on herb and shrub communities in mature forests of western Washington U.S.A. *Canadian Journal of Forest Research* 30:1655-1666
- Monteith JL (1994) Validity of the correlation between intercepted radiation and biomass. *Agricultural and Forest Meteorology* 68:220-231
- Muraoka H, Takenaka A, Tang Y, Koizumi H, Washitani I (1998) Flexible leaf orientation of *Arisaema heterophyllum* maximize light capture in a forest understorey and avoid excess irradiance at a deforested site. *Annals of Botany* 82:297-307
- Nabuurs G-J, Schelhaas M-J, Mohren GMJ, Field CB (2003) Temporal evolution of the European forest sector carbon sink from 1950 to 1999. *Global Change Biology* 9:152-160
- Nilson T. (1994) *Metsade kaugseire*. Eesti Metsaamet. (Eesti Põllumajandusülikool, Metsanduse Instituut.) Tartu, 160 p
- Oker-Blom P, Kellomaki S (1983) Effect of grouping of foliage on the with-stand and within-crown light regime: comparison of random and grouping canopy models. *Agricultural Meteorology* 28:143-155



- Perala DA, Alban DH (1982) Biomass, nutrient distribution and litterfall in *Populus*, *Pinus* and *Picea* stands on two different soils in Minnesota, *Plant Soil* 64:177-192
- Prescott CE, Zabek LM, Staley CL, Kabzems R (2000) Decomposition of broadleaf and needle litter in forests of British Columbia: influences of litter type, forest type, and litter mixtures. *Canadian Journal of Forest Research* 30:1742-1750
- Raich JW, Schlesinger WH (1992) The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus Series B – Chemical and Physical Meteorology* 44:81-99
- Rosell RA, Gasparoni JC, Galantini JA (2001) Soil organic matter evaluation. In: Lal R *et al.* (ed) *Assessment methods for soil carbon*. Lewis Publ., Boca Raton, FL, pp 311–322
- Saetre P (1999) Spatial patterns of ground vegetation, soil microbial biomass and activity in a mixed spruce-birch stand. *Ecography* 22:183-192
- Saleska SR, Shaw MR, Fischer ML, Dunne JA, Still CJ, Holman ML, Harte J (2002) Plant community composition mediates both large transient decline and predicted long-term recovery of soil carbon under climate warming. *Global Biogeochemical Cycles* 16: 1055. doi: 10.1029/2001GB001573
- Schimel D, Enting IG, Heimann M, Wigley TML, Raynaud D, Alves D, Siegenthaler U (2000) CO<sub>2</sub> and the carbon cycle (extracted from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Report, „Climate Change, 1994“). In: Wigley TML, Schimel DS (eds) *The carbon cycle*, Cambridge University Press, New York, pp 7-36
- Schlesinger WH, (1997) *Biogeochemistry. An Analysis of Global Change*, 2nd edition, Academic Press, San Diego, CA, 588 p
- Schlesinger WH, Lichter J (2001) Limited carbon storage in soil and litter of experimental forest plots under increased atmospheric CO<sub>2</sub>. *Nature* 411:466-469
- Schlesinger WH, Winkler JP, Megeonigal JP (2000) Soils and the Global Carbon cycle. In: Wigley TML, Schimel DS (eds) *The carbon cycle*, Cambridge University Press, New York, pp 93-101
- Smith FW, Sampson DA, Long JN (1991) Comparison of leaf area index estimates from tree allometrics and measured light interception. *Forest Science* 37:1682-1688
- Stadt KJ, Lieffers VJ (2005) Comparing PAR transmission models for forest understorey vegetation. *Applied Vegetation Science* 8:65-76
- Szakacs GG, Eschenbrenner V, Cerri CC, Bernoux M (2004) Soil Carbon Stocks under Pastures in The Brazilian Cerrado Region Their Assessment by Orbital Remote Sensing. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 35:796-800.
- Teskey RO, Bongarten BC, Cregg BM, Dougherty PM, Hennessy TC (1987) Physiology and genetics of tree growth response to moisture and temperature stress: an examination of the characteristics of loblolly pine (*Pinus taeda* L.). *Tree Physiology* 3:41-61
- Thelin G, Rosengren U, Callesen I, Ingerslev M (2002) The nutrient status of Norway spruce in pure and in mixed-species stands. *Forest Ecology and Management* 160:115-125
- Vaus M. (2005) *Metsatakseerimine*. OÜ Halo Kirjastus. Tartu. 178 p
- Vose JM, Allen HL (1988) Leaf area, stemwood growth, and nutrient relationships in loblolly pine. *Forest Science* 34:547-563
- Vose JM, Swank WT (1990) A conceptual model of forest growth emphasizing stand leaf area. In: Dixon RK, Meldahl RS, Ruark GA, Warren WG (eds) *Process modeling of forest growth responses to environmental stress*, Portland, OR: Timber Press, pp 278-287

- Vose JM, Dougherty PM, Long, JN, Smith FW, Gholz HL, Curran PJ (1994) Factors influencing the amount and distribution of leaf area of pine stands. *Ecological Bulletins* 43:102-114
- Wallrup E, Saetre P, Rydin H (2006) Deciduous trees affect small-scale floristic diversity and tree regeneration in conifer forests. *Scandinavian Journal of Forest Research* 21:399-404
- Wang YP, Jarvis PJ (1990) Influence of crown structural properties on PAR adsorption, photosynthesis, and transpiration in Sitka spruce: application of a model (MAESTRO). *Tree Physiology* 7:297-316
- Watson RT, Noble IR, Bolin B, Ravindranath NH, Verardo DJ, Dokken DJ (2000) Land Use, Land-Use Change, and Forestry. Special Report, IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 375 p
- Webb WL, Lauenroth WK, Szarek SR, Kinerson RS (1983) Primary production and abiotic controls in forests, grasslands, and desert ecosystems in the United States. *Ecology* 64:134-151

### **Internetiallikad:**

- Adermann V (2006) Eesti metsad 2005. Metsavarude hinnang statistilisel valikmeetodil. Metsakaitse- ja Metsauuenduskeskus. [<http://www.metsad.ee/main.html>] 03.04.07
- Eerme K (1996) Keskkonnaõpetus. Tartu Ülikooli keskkonnafüüsika instituut ja Tartu Observatoorium. [[http://ael.physic.ut.ee/KF.public/Oppetuy/Keskkonnaopetus\\_2001.doc](http://ael.physic.ut.ee/KF.public/Oppetuy/Keskkonnaopetus_2001.doc)] 05.04.07
- EV Keskkonnaministeerium (2005) Kliimamuutusi on tähtsustatud pea 15 aastat. [<http://www.envir.ee/4860>] 26.03.07
- Hofmann DJ (2006) Radiative climate forcing by long-lived greenhouse gases: the NOAA annual greenhouse gas index (AGGI). [<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/#figure2>] 22.03.07
- Kukk T (2006) Eesti taimkatte loengud. [<http://www.zbi.ee/~tomkukk/taimkate/taimkate1.ppt>] 15.03.07
- Rice CW (2002) Storing carbon in soil: why and how? [[http://www.geotimes.org/jan02/feature\\_carbon.html](http://www.geotimes.org/jan02/feature_carbon.html)] 27.03.07
- Riigimetsa Majandamise Keskus (2006) Vara metskond: Looduslikud tingimused. [<http://www.rmk.ee/pages.php3/0119030605>] 29.03.07
- Vara vallavalitsus (2005) Vara valla üldplaneeringu lähteandmestiku analüüs. [<http://www.varavald.ee/yldplaneering/Yldplaneeringu%20analyyys.pdf>] 31.03.07