

KIKi projekt nr. 47

Puutuha kasutamismõimalused metsanduses

Aruanne

Täitja: EMÜ metsandus- ja maaehitusinstituut

Kestus: september 2006 – juuni 2008

Sissejuhatus

Viimastel aastatel on Põhjamaades ja ka Eestis tähelepanu orbiiti tõusnud taastuvate energiaallikate kasutamine. Rohkem kui 25% üle 50 MW võimsusega katlamajadest Eestis on juba üle läinud puidu ja hakkepuidu kasutamisele. Enamik farme ja ettevõtteid maarajoonides kasutavad aga ainult puitu soojusenergia saamiseks. Kuigi puiduküte majanduslik efektiivsus sõltub paljudest asjaoludest (Tullus, Muiste, 1994), on puit kui taastuv ja keskkonda vähesaastav energiaallikas leidnud poolehoidjaid ja kasutamist Eestis, Taanis, Rootsis ja Soomes. 1996. aastal, võrreldes 1995. aastaga suurenes ligi 10% biokütuste, peamiselt puidu ja turba kasutamine. Kui aga võrrelda 1980. aastaga, suurenes puidu kasutamine kütteks kuni 64% (Eesti Statistika Aastaraamat 1997, 1998). Pärast 1970-ndate aastate energiakriisi on järk-järgult suurenenud puidu ja hakkepuidu osatähtsus energia tootmisel ka Eestis.

Vastavalt RE Eesti Energia andmetele kasutati meil 1998. a. 13 288 TJ (1 757 000 m³) küttepuid ja 8 152 TJ (1 330 000 m³) puidujäätmeid, kokku 21 444 TJ (3 087 000 m³) ulatuses (Eesti Statistika Aastaraamat 1998, 1999). Arvestades, et tuhasisaldus puidus on keskmiselt 0,6%, tekib energiatootmise jäägina praegu teoreetiliselt ligi 13 000 t ja enam tuhka aastas. Kaugemale ette vaadates võib öelda, et puidu osa soojusenergeetikas suureneb tulevikus veelgi ja TTÜ teadlaste Liigi ja Landsbergi (1996) poolt teostatud energiasüsteemide modelleerimise (MARKAL) tulemused näitasid, et kuni aastani 2033 kasvab Eestis puidu kasutamine energia tootmiseks 10–13%.

Puidu kasutamine soojusenergeetikas suureneb. Seoses sellega kerkivad üles ja muutuvad tõsiseks probleemid tekkiva puidutuha kasutamismõimalustest ja utiliseerimisest nii, nagu on praegu probleem industriaalse tolmu ja tuha kasutamisega, mis tekivad põlevkivi kasutatavatest ettevõtetest.

Skandinaaviamaades ja Kesk-Euroopas, kus tekkivad tuhakogused on märkimisväärsed, on puutuhka kasutatud metsade väetamiseks ja selgelt positiivseid tulemusi puude juurdekasvu suurenemise osas on saadud soomuldade puhul (Demeyer *et al.*, 2001; Arvidsson, Lundkvist, 2003; Saarsalmi *et al.*, 2004). Mineraalmuldade väetamisel on tulemused olnud tihti vasturääkivad. Üldiselt ollakse üksmeelel põhimõtte “mets tagasi metsa” keskkonnakaitselises ja ökoloogilises väärtuses. Teaduslikud uuringud puutuhka kasutamismõimaluste kohta metsamuldade väetamiseks ja mulla pH reguleerimiseks Eestis seni puudusid. Arvestades Eesti mullastiku kirjusust, on probleem keeruline ja nõuab mitmekülgeid uuringuid erinevate mulla- ja metsatüüpide jaoks. Metsamuldade neutraliseerimiseks ja puude toitesubstraadi rikastamiseks Eestis puutuhka teadaolevalt seni kasutatud pole. Küll on põlevkivituhka koos mineraalväetisega kasutatud katseliselt Lõuna-Eesti liivmuldadel kasvavate männikute toitumistingimuste parandamiseks (Terasmaa, Sepp, 1994; Terasmaa, Pikk, 1995), mille tagajärjel paranes katse-

puistute seisund ja vähenes haigestumine juuremädanikku ning võrsevähki. Kuid põlevkivituhk on erakordselt kõrge Ca-sisaldusega ja selle kasutamisel on täheldatud ka negatiivseid ilminguid. Näiteks saadi ebasoovitavaid tulemusi või puudus efekt rabamännikute väetamisel põlevkivituhaga (Tälli, Veermets, 1982; Valk, 1982). Kuna puutuhk sisaldab toiteelemente enam-vähem samades suhetes, mis kasvavas puuski, siis võib oletada, et puutuha kasutamine okaspuude, mis vajavad oma elutegevuseks suhteliselt palju K (Driessche, 1991), väetamiseks oleks tunduvalt perspektiivsem.

Informatsiooni puutuha kasutamise kohta metsade väetamiseks võib leida põhjanaabrite Rootsi (Nilsson, Lundin, 1996), Soome (Mälkonen, Kukkola, 1991) ja USA (Ohno, 1992) teadlaste artiklitest, kuid nende tulemused piirduvad puutuha väetava efekti ja mulla neutraliseerimisvõimaluste kirjeldamisega.

Puutuha kasutamiskogemusi meie vabariigi teadlastel metsade kasvu ja produktiooni mõjutamiseks pole. Küll aga teavad aiapidajad, et puutuhk võib vähendada taimede haigestumist seenhaigustesse ja olla sobiv K-väetis aiakultuuridele (Kärblane, 1996). Nagu selgub, sisaldab puutuhk üsna rohkesti K ja P, mis on taimedele hästi omastatavad ja seetõttu sobiv ka puistute aineringsse taaslülitumiseks. Samuti on klinkritolmul ja puutuhhal väetisena rida häid omadusi: nad on peened, suure neutraliseerimisvõimega (Kärblane, 1996), klinkritolmu vesilahuse pH on 12,3–12,6 ja puutuhhal pH 11,7–12,1.

Eesmärgid

Käesoleva projekti eesmärgiks oligi välja töötada keskkonnasäästlikud puutuha kontsentratsioonid, mida võiks kasutada väheviljakatel, peamiselt liivmuldadel kasvavate metsade väetamiseks.

Projekti konkreetsed eesmärgid olid selgitada:

- 1) puutuha keemiline koostis;
- 2) puutuha mõju mulla füüsikalise-keemilistele omadustele, taimede toitainete sisaldusele ja suhetele toitainetevaeses liivmullas;
- 3) mineraaltoitainete akumulatsiooni ja sisaldust puudes pärast puutuhaga väetamist;
- 4) puude juurdekasvu, biomassi ja assimileeriva massi muutused puutuhaga mõjutatud aladel;
- 5) puutuha mõju puude puitumisprotsessidele ja selles osalevate ainete sisaldusele;
- 6) puutuha kogused, mis sobiksid muldade väetamiseks hariliku kuuse ja männi näitel.

Uurimisobjektid

Uurimisobjektideks olid erivanuselised harilik kuusk (*Picea abies*) ja harilik mänd (*Pinus sylvestris*). Uuringud toimusid erinevatel proovialadel ja katseistandustes.

- * 20–23-aastases toitainetevaesele liivmullale rajatud männipuistus (Luige, Harjumaa). Külvid on teostatud 1983. a. Väljavalitud ja mõõdetud proovilappide suurus oli 0,1 ha, kus teostati esmased mõõtmised, mille alusel igalt proovilapilt valiti 20 mudelpuud.
- * 4-aastaste seemikutega rajatud hariliku männi ja hariliku kuuse katseistanduses (Raudalu puukool, Harjumaa). Puude arv katselapil 100 tk. Puud on kasvatatud ühe emapuu seemnetest (pärit Lahemaa Rahvusparki territooriumilt).
- * 2-aastased kuusesemikud, istutatud võrdse mahuga vegetatsiooninõudesse (10 l).

Katsevariandid

Uuringutes kasutati Türi katlamajast biomassi põletamisel tekkinud puutuhka. Arvestades töö eesmärke, kasutati katsevariantides puutuha (PT) erinevaid kontsentratsioone, et selgitada erinevate okaspuuliikide erinevas vanuses olevatele puudele sobivamad kogused, puudes toimuvate morfoloogiliste ja biokeemiliste vastusreaktsioonide kvalitatiivset ja kvantitatiivset iseloomu.

- * Puude toitekeskkonda lisati puutuhka koguses 1,0 kg/m²;
- * Puude toitekeskkonda lisati puutuhka koguses 0,5 kg/m²;
- * Puude toitekeskkonda lisati puutuhka koguses 0,25 kg/m²;
- * Puude toitekeskkonda ei lisatud puutuhka – kontrollvariant.

Uuritud parameetrid

Puutuha keemiline koostis

Enne puutuha lisamist mulda selgitati nende keemiline koostis. Analüüsid teostati Eesti Keskkonnauuringute Keskuse laboratooriumis. Puutuhk on pärit keskmise proovina Türi katlamajast, kus kütusena kasutatakse okas- ja lehtpuupuutitu seguna.

Mulla ja mullavee keemiline koostis

Selgitati puude kasvukeskkonna parameetrid enne ja pärast puutuhaga töötlemist. Analüüsiiti mulla pH ja taimede poolt omastatavate põhitoiteelementide (Ca, K, Mg, N, P) sisaldus mullas ja mullavees. Mullavee kogumiseks on mulda paigutatud lüsimeetrid. Elementide sisaldused ökosüsteemide abiootilistes komponentides määrati Põllumajandusuuringute Keskuse agrokeemia laboris (Saku) ja Eesti Keskkonnauuringute Keskuse laboris, kus kasutatakse rahvusvaheliselt tunnustatud standardmeetodeid ISO 10390 (1994), ISO 11261 (1995) jt.

Biokeemilised uuringud

1. Selgitati kvalitatiivselt ja kvantitatiivselt erinevates toitumistingimustes PT-ga töödeldud katselappidel kasvanud okaspuude mineraalne koostis ja allokatsioon puudes. Analüüsid tehti rahvusvaheliselt akrediteeritud Põllumajandusuuringute Keskuse laboratooriumides (Saku).
2. Puude puitumise intensiivsust hinnati ligniini sisalduse dünaamika alusel. Ligniini ja teiste puidu põhikomponentide tselluloosi ning hemselluloosi hulk määrati Põllumajandusuuringute Keskuse laboratooriumides (Saku), kus kasutatav meetodika baseerub Monties (1989) ja Van Soest (1987) meetodite põhimõttel.

Puude kasvu ja biomassi analüüs

1. Selgitati okaspuude pikkus ja radiaalsed juurdekasvud;
2. Määrati puude üldine biomass, kõikide organite toor- ja kuivmassid. Selgitati biomassi jaotumus puuvõra erinevates horisontides.

Tulemused

Puutuha keemiline koostis

Analüüsid näitasid, et puutuhk sisaldab rikkalikult taimedele vajalikke toitaineid ja selle vesilahus on tugevalt leeliseline. Tuhas on kõrge K, Mg, Ca ja P jt. elementide üldsisaldus, mille

järele okaspuudel on suhteliselt suur nõudlus. Puutuha keemiline analüüs teostati Eesti Keskkonnauuringute Keskuses. Tuha keemiline koostis on järgmine:

Türi katlamajast pärit tuha keemiline koostis (mg/kg) oli järgmine: Ca – 123 000, K – 48 000, Mg – 19 400, Na – 17 900, P – 15 500, S – 10 150, Mn – 9850, Zn – 4340, Al – 3300, Ba – 1560, Pb – 76, Cu – 197. Puutuha keskmine pH oli 12,55–12,68. Puidu põletamisel lendub suur osa N ja tuhka võib N jääda vaid väga väikestes kogustes.

Mulla keemiline koostis

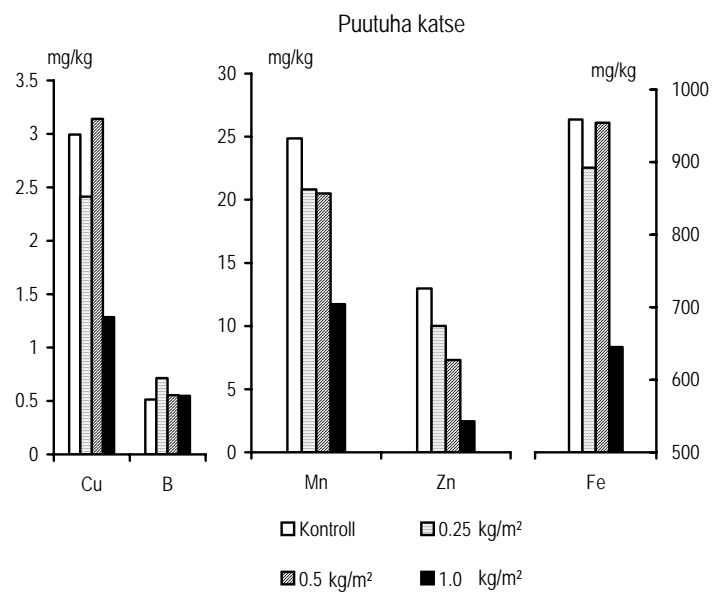
Uuritavate vaatlusalade mullad on toitainete poolest erakordselt vaesed, eriti Luige liivadel asuvad vaatlusalad. Raudalu puukooli ümbritsev mets asub karbonaadiavaesel lähtekivimil kujunenud leetmullal, kuid puukooli muld on seoses seal tehtavate kaevetöödega oma loodusliku iseloomu kaotanud ning sinna rajatud väikesemõõtmeliste katselappide mulda saame iseloomustada kui toitainetevaest inimtegevusest mõjutatud kasvusubstraati. Puutuha erinevate koguste lisamisel rikastus muld mitmete elementidega (K, Ca, Mg, B) ning tõusis mulla pH. Seevastu töödeldud variantide muldades taimede omastatava N sisaldus kas oluliselt ei muutunud (Luigel) või mõnevõrra langes (Raudalus) (N mineralisatsioon), P hulkades täheldati mõningat langust (Raudalus), mis seostub substraadi pH suurenemisel P ühendite lahustuvuse vähenemisega. Seoses mulla pH tõusuga vähenes Mn, Zn, Fe ja Cu liikuvus ning omastatavus taimede poolt (joon. 1).

Analoogilised olid lüsimetritest kogutud mullavee keemilise analüüsi tulemused. Puutuha mõjul vähenes lahustunud $\text{NH}_4\text{-N}$ ja $\text{PO}_4\text{-P}$ kontsentratsioon, suurenes aga Ca, K, B kontsentratsioon ja pH. Taimede kasvusubstraadi keemilise koostise muutust ja elementide kontsentratsiooni dünaamikat jälgiti pidevalt katseaastate jooksul ning hinnati puutuha temporaalset mõju puude mineraalsele koostisele.

Tuha lisamisel puude toitekeskkonda tõusis mulla pH sõltuvalt lisatud kogustest 0,9–1,3 ühiku võrra ($p < 0,05$). Suurim mulla pH tõus täheldati variantides, kus mullale lisati tuhka $1,0 \text{ kg/m}^2$. Kui töötlemata muldade pH oli keskmiselt 6,3, siis puutuhaga töödeldud muldade pH varieerus vahemikus 7,3–8,1 sõltuvalt mulda lisatud tuha kogustele ja sõltuvalt sesoonsetest iseärasustest. Töötlemata kontrollalaga võrreldes täheldati puutuhaga töödeldud erinevate katsete ja vaatlusalade muldades K sisalduse suurenemist 2–4 korda, Ca ja Mg sisaldused mulla ülemistes kihtides suurenesid vaid töötlusvariandis $0,25 \text{ mg/m}^2$, suuremate puutuha koguste lisamisel nende sisaldus mullas vähenes. Mulla pH tõus põhjustab muldades taimede poolt omastatava N, P, Mn ja Zn sisalduste vähenemise. Regressioonanalüüs näitas mullas keemiliste elementide sisalduse olulist sõltuvust mulla pH-st ja mulda lisatud puutuha kogusest (tabel 1).

Tabel 1. Mulla toiteelementide sisalduse sõltuvused mulla pH-st ja puutuha kogusest
Regressioonkoefitsient (R^2) on arvatud $p = 0,05$ olulisuse juures

	R^2					
	N	P	Ca	K	Mg	Mn
Mulla pH	0,501	0,768	0,384	0,511	0,462	0,933
Puutuha kogused	0,521	0,544	0,344	0,436	0,611	0,675



Joonis 1. Puutuha mõju taimede poolt omastatavate metallide sisaldusele mullas.

Et puutuhas N praktiliselt ei sisaldu ja mulla pH tõusuga väheneb mõnevõrra ka taimedele kättesaadava N hulk, siis on otstarbekas tuhaga väetamise korral lisada tuhaga koos ka teatud kogused N-väetisi, mida tuleks edaspidi kindlasti uurida. See vajab aga edaspidiseid uuringuid.

Muutused puude mineraalses kompositsioonis

Kuna uurimise eesmärgiks oli puude mineraaltoitumise reguleerimine ja toitesubstraadi rikastamine puutuhas sisalduvate toiteelementidega, siis pöörati olulist tähelepanu puude mineraalse koostise muutuste identifitseerimisele.

Mulla ja mullavee analüüsides selgus, et puutuha mõjul tõusis töötlusvariantides pH ja muutus mitmete elementide omastatavus taimede poolt.

Männi ja kuuse okaste ja võrsete analüüsid kinnitasid eespooltoodud ja näitasid, et variantides 0,25 kg/m² ja 0,5 kg/m² vähenes okastes N, Mn ja P keskmine sisaldus ning okaste vananemisega kaasnevad nende elementide osas on muutused tunduvalt intensiivsemad kui kontrollis. Seevastu suurenesid okastes ja võrsetes K, Mg ja B hulgad, mille omastamine meie katsevariantide kasvusubstraadi pH väärtuste juures on intensiivne. Ilmneb taimede mineraaltoitumises kujunev antagonism Ca, K ja Mg vahel, mistõttu Ca akumulatsioon puude kudedesse on puutuhaga töötlemisel takistatud intensiivistunud K ja Mg omastamise korral. Erinevalt kuusest reageerib harilik mänd puutuhaga töötlemisele Ca sisalduse 15–20%-lise langusega okastes, seevastu N ja P sisaldused suurenesid ca 3–5% kontrolliga võrreldes.

Puude arengu ja biomassi produktsiooni suhtes on eriti oluline toitainete tasakaalustatud akumulatsioon kudedesse. Saadud tulemused näitasid, et kuuseseemikutes puutuhaga töötlemise tagajärjel tõusis kõikides variantides K/P, K/N, kuid oluliselt ei muutunud N/P; keskmiselt 40–50% võrra vähenes aga Ca/K okastes, võrsetes, tüves ja juurtes. Järelikult sõltub puutuha toime oluliselt puude liigilistest iseärasustest. Saadud andmete põhjal peaks nii kuusele kui ka männile sobivamaks olema puutuha kogus 0,25 kg/m². Analoogilisi uuringuid tuleks teostada ka lehtpuudega.

Puutuha mõju puude lignifikatsioonile ja puidukomponentidele

Et hinnata puutuha mõju puude lignifitseerimisele ja puidu kvaliteedile, hinnati töötlemise mõju puude füsioloogilisele seisundile, millest otseselt sõltub ka puidu kvaliteet. Vaatamata rikkaliku informatsioonile erinevate väetiste kasutamise kohta okaspuude toitumistingimuste parandamiseks ja juurdekasvu stimuleerimiseks, on praktiliselt uurimata veel mitmed okaspuudega seotud väga olulised probleemid. Eeskätt puudutab see kasutatavate väetiste mõju puude puitumisprotsessidele.

On selgunud, et puude puitumine on mõjutatav väga erinevatest endogeensetest ja eksogeensetest faktoritest, mille hulgas tuleb rõhutada piisavat varustatust toitainetega (Chapin, 1991; Schopfer, 1995). Ühekülgne väetamine ja toitainete disbalansseerumine substraadis ja organismis võib põhjustada puude hilinevat või liiga varajast lignifikatsiooni, mis oluliselt mõjutab puude kasvuprotsesside kulgu. Näiteks rikkaliku N korral mullas puude vegetatsiooniperiood pikeneb, nad ei jõua puituda ja valmistuda talveks ning võivad talvekülmadest kahjustuda (Miidla, 1984). Kõrgete ja tasakaalustamata Ca sisalduste korral kasvukeskkonnas muutub puudes puidu keemilise koostise kuuluvate ainete vahekord ja puude lignifikatsioon intensiivistub (Tohver, Mandre, 1995; Mandre, Ots, Rauk, 1999), mistõttu pidurdub juurdekasv (Mandre, Ots, 1995). Muutused puidu keemilises koostises mõjutavad aga nende tööstuslikku väärtust, mistõttu igasuguste väetiste või tööstusjäätmete kasutamisel tuleb puude lignifikatsiooniuringutele tähelepanu pöörata.

Saadud analüüsitulemused näitasid, et töödeldud puudel muutus nii okastes kui ka võrsetes polüsahhariidide – tselluloosi (C) ja hemitselluloosi (HC) – sisaldused ja süsivesikuid lähteainena kasutava fenoolse ainevahetuse lõppprodukti ligniini (L) kontsentratsioonid (joon. 2). Kuna nimetatud ühendid on puitunud rakukesta põhikomponentideks, järeldeb sellest puutuha puude puitumisprotsesse intensiivistav toime. Muutuste sesoonse dünaamika uurimisel selgus, et statistiliselt olulised erinevused kontrollpuudest ilmnevad augustiks. Seejuures puidu põhikomponentide suhe (L : HC : C) on kõikides uuritud variantides kasvanud mändide võrsetes (1 : 0,53 : 1,05) ja okastes (1 : 0,97 : 2,3) enam-vähem sarnane. Sellest võib järeldada, et puutuhk intensiivistab puitumisprotsesse, kuid ka rakukestade koostisainete vahekord assimileerivates organites ja noortes võrsetes kontrollvariandiga võrreldes muutub vähe.

Muutustele kasvukeskkonnas reageerivad puud erinevustega tüves, juurtes, okastes ja võrsetes. Puutuhaga töötlemise tagajärjel suurenes mõnevõrra ligniini sisaldus okastes ja võrsetes, kuid statistiliselt ebaolulised muutused esinesid tüves ja juurtes. Tselluloosi sisaldus suurenes mõnevõrra okastes ja juurtes, kuid tüves tselluloosi sisaldus keskmisena ei muutu. Seevastu vähenes puutuhaga töödeldud kuuseistikute okastes 5–20%, võrsetes 1–15% ja juurtes 3–15% võrra hemitselluloosi sisaldus, kuid tüves erinevusi töötlemata puudega ei täheldatud. Järeldati, et puutuhaga väetamise tagajärjel muutub puidu keemiline koostis, st. kvaliteet, muutub puidu põhikomponentide suhe, mis metsatööstuslikust seisukohast on oluliselt tähtis ja mida on ka nendest aspektidest edaspidi vaja uurida. Kuigi käesolev lühiajaline uuring näitas, et puidu põhikomponentide suhted oluliselt ei erinenud erinevates töötlusvariantides, võib pikaajaline mõju olla siiski olulisem.

	Ligniini	:	Tselluloos	:	Hemitselluloos
Kontrollvariant	1	:	1,26	:	0,42
0,25 kg/m ²	1	:	1,32	:	0,44
0,5 kg/m ²	1	:	1,27	:	0,48
1,0 kg /m ²	1	:	1,31	:	0,44

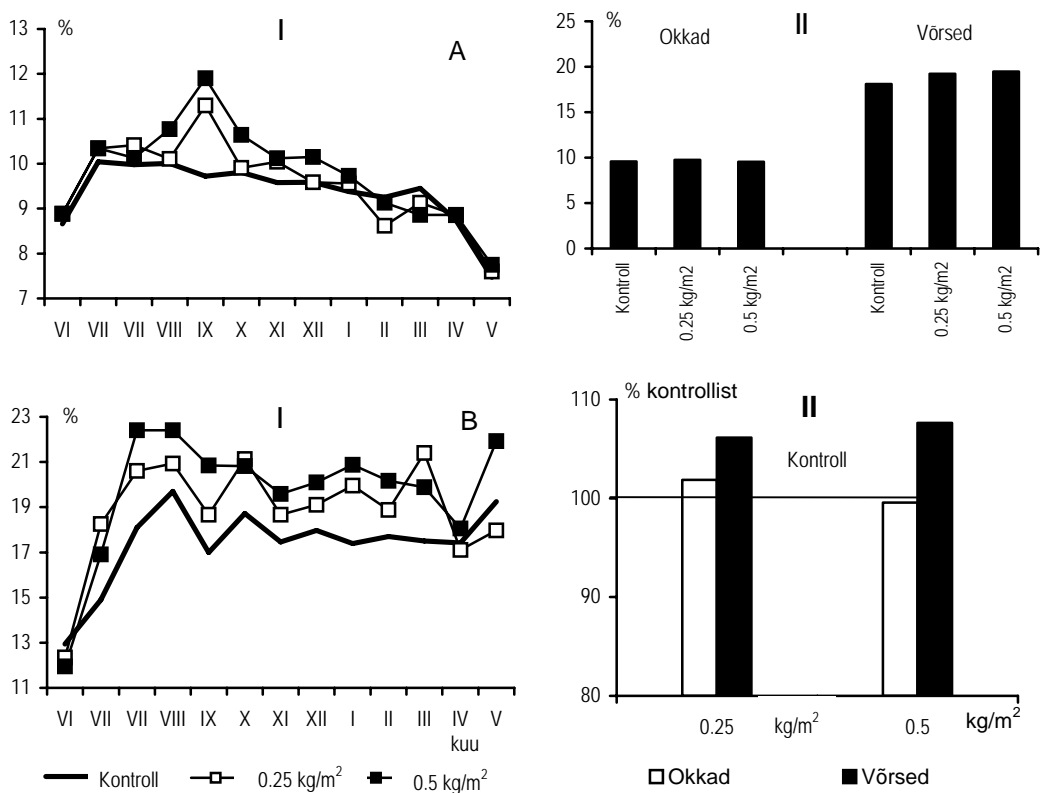
Huvitava tulemuseni jõuti siis, kui selgitati ligniini sisaldust puude võra erinevates kihtides. Näiteks kontrollmändide võra erinevate kihtide okaste ligniinisalduses puuduvad statistiliselt olulised erinevused või võis täheldada langustendentsi võra ülemistes okastes alumistega võrreldes. Puutuhaga (0,5 kg/m²) töödeldud mullal kasvavate mändidel leiti statistiliselt olulised erinevused võra erinevate kihtide vahel ja võra ülemistes kihtides oli ligniini sisaldus 10–20% kõrgem kontrollmändidega võrreldes. Katsevariandis, kus mullale lisati 0,25 kg/m² puutuhka, suurenes samuti võra kõige ülemistes kihtides ligniinisaldus, kuid alumistes kihtides oli ligniini isegi vähem kui kontrollpuudel.

Metsatööstuslikust seisukohast on oluline ligniini ja teiste puidukomponentide sisaldus puude tüves. Saadud tulemused näitasid, et puutuhaga töötlemisel puidukomponentide keskmise sisaldus oluliselt ei muutu, kuid tüve alumises kolmandikus täheldati ligniinisalduse suhtelist ülekaalu tselluloosi ja hemitselluloosiga võrreldes, mis viitav puidu paindlikkuse vähenemisele.

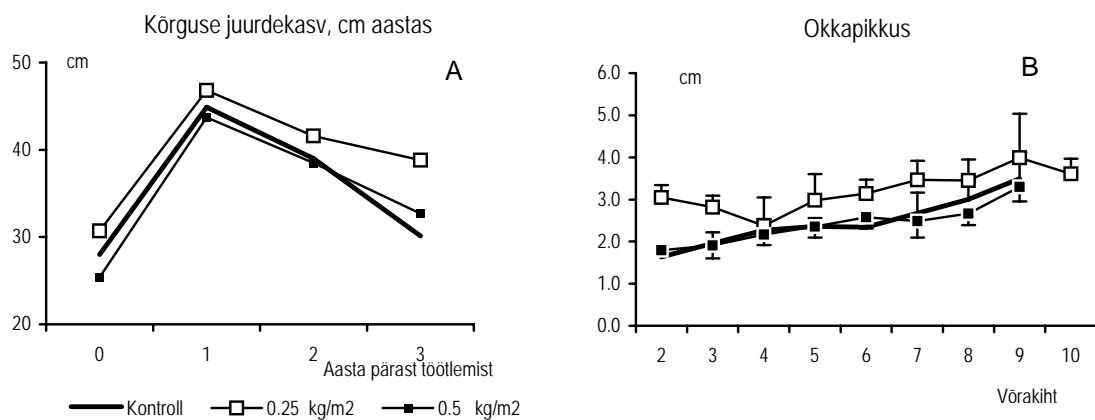
Puutuha mõju okaspuude kasvule ja biomassi formeerumisele

Puutuha mõju hariliku kuuse ja männi kasvule ning arengule oli oluliselt sõltuv toimeainete kvaliteedist ja kvantiteedist.

Puutuhaga mõjutatud katsetes mõõdeti igal aastal igast töötlus- ja kontrollvariandist 50 mändi (kokku 200) ja selgus, et puutuha kogused 0,25 kg/m² stimuleerivad mändide kõrguskasvu, kõrguse ja diameetri aastaseid juurdekasve (joon. 3), puu kõrguskasvu ja juurekaela diameetri



Joon. 2. Ligniinisalduse aastaringne dünaamika (I) hariliku männi jooksva aasta okastes (A) ning võrsetes (B) ja ligniini keskmine sisaldus (II) puutuha eri koguste lisamisel mulda.



Joon. 3. Mändide keskmise kõrguse juurdekasvud puutuha erinevate kogustega töödeldud proovialadel (A) ja puutuha mõju üheaastaste okaste pikkuskasvule männivõra erinevates kihtides (B).

suhet. Analoogilised tendentsid täheldati tüvede toor- ja kuivmassi näituses. Kuid suuremate koguste korral ($0,5 \text{ kg/m}^2$) võis täheldada ka vastupidiseid tendentse. Suurema kuivainesisaldusega on kontrollala mändide tüved (52%), puutuhaga töödeldud aladel vahemikus 40–43%. Statistiliselt oluline erinevus kontrollala näitajatest täheldati männitüvede toor- ($p = 0,02$) ja kuivmassi ($p = 0,01$) osas suurima puutuha kogusega töödeldud alal ($0,5 \text{ kg/m}^2$).

Männitüvede toor- või kuivmassi (g) suhe puu pikkusesse (cm) leiab käsitlemist kui tüvede jässakus, mis oli suurem kontrollist ja sõltus kasutatud puutuha kogustest.

Kontrollalal ja väiksema puutuha hulgaga töödeldud alal ($0,25 \text{ kg/m}^2$) kasvanud mändide juurekaelad on diameetrilt 1,2 cm võrra jämedamad kui suurema tuhakogusega töödeldud alal kasvanud puudel.

Sarnaselt mitmele teisele uuritud parameetrile (kõrguskasv, tüve biomassid) on puutuha väiksemate koguste kasvu stimuleeriv mõju täheldatav männiokaste pikkusele.

Puude võra seisundi kirjeldamise üheks võimaluseks on selgitada assimilatsioonipinna vertikaalset jaotumist võras (võrakihtides). Uuringud on näitavad, et okkamassi jaotumine võras pole ühtlane ja sõltub kasvukohatüübist, puistu tihedusest, valgustingimustest, puu vanusest, võra pikkusest ja struktuurist. Meie 20-aastastel männi katsepuudel suurima okkamassiga on võra 6.–8. kiht, kus paiknenud okaste hulk kogu võra okkamassist moodustas 17–25% (kontrollala) ja mõnevõrra väiksem puutuhaga töödeldud puudel – 16–18% ($0,25 \text{ kg/m}^2$) ja 16–20% ($0,5 \text{ kg/m}^2$). Kuigi puutuha mõjul on stimuleeritud üksiku okka toor- ja kuivmass ning ka okka jämedus, eriti võra ülemistes kihtides. Okaste kuivainesisaldus varieerus erinevates võrakihtides vahemikus 41–51% (kontrollala), 39–49% ($0,25 \text{ kg/m}^2$) ja 38–65% ($0,5 \text{ kg/m}^2$). Okkamassi sellist diferentseerumist võib vaadelda kui männaste ja okste vahelise valguskonkurentsi tulemust, mis tagab võra siseruumi ühtlase kasutamise ja optimaalse suhte okka- ja okstemassi vahel.

Tulemused näitasid, et puutuhk võib stimuleerida okaste pikkust (joon. 3). Erinevalt okaste pikkuskasvust ei ole puutuha mõju täheldatav võrsete kasvule. Samas võib aga täheldada suuremat võrsete biomassi puutuhaga ($0,25 \text{ kg/m}^2$) töödeldud alal.

Võrsete primaarkasv (puu kõigi sektsioonide viimase aasta võrsete absoluutkuiva massi summa) on kontrollalal 31–48 g, puutuhaga töödeldud aladel 25–40 g ($0,25 \text{ kg/m}^2$) ja 16–24 g ($0,5 \text{ kg/m}^2$).

Erinevate aastakäikude võrsete biomasside analüüs näitas, et kõige suurema osa moodustasid kõigi proovialade mändide võras 2-aastased võrsed, järgnesid 1- ja 3-aastased võrsed.

Kuigi mändide diameetri suhteline juurdekasv puutuhaga väetatud proovialadel oli väetamisjärgsel aastal märkimisväärselt suurem kui kontrollproovialal, ei saa järgnevatel aastatel täheldada puutuha olulist mõju puude kasvule. Saadud puude jämedus- ja kõrguskasvu tulemuste alusel võib oletada, et kui üldse, siis männipuude kasvu toitainete vaestel liivadel on teataval määral soodustanud puutuhk doosiga $0,25 \text{ kg/m}^2$. Puutuha kogusega $0,5 \text{ kg/m}^2$ töödeldud puude juurdekasvu protsent on jäänud enamikel juhtudel madalamaks kui puutuhaga töötlemata kontrollvariandi puhul.

Kuuskede võrdlusuuringud puutuhaga töödeldud variantides teostati Raudalu puukooli territooriumile rajatud katseistanduses. Katsepuudeks valiti ühtlase haabitusega noored kuused. Juulikuul lõpus kaevati üles igast variandist 10 puud, võeti proovid eraldatud tüvedest, juurtest, eri vanuseklassi võrsetest ja okastest (kokku ca 9000 proovi). Mõõtmistulemused näitasid, et puutuhaga töödeldud kuuskede pikkuskasv oli kontrolliga võrreldes 7–15% võrra väiksem, kuid juurte biomass töötlusvariantides ületas kontrollnäidud 13–47%. Hilisematest, 2007. a. rajatud katsetest

selgus aga, et puutuha mõjul suurenes seemikute kõrguskasv variandis $0,5 \text{ kg/m}^2$ ca 4% võrra, juurekaela läbimõõt kõikides töötlusvariantides 6–9% kontrolliga võrreldes. Need muutused on statistiliselt väheolulised ja näitavad ainult tendentsi suurenemisele. Arvestades sellega, et kuusk on suhteliselt tundlik mulla pH tõusu suhtes, eelistades happelisi muldi, siis on vara teha järel-
dusi kuuse reaktsioonist puutuhaga mõjutamisele.

Võra tihedus ületas kontrollpuude näidud puutuhaga töödeldud puudel, mis tingib võras fotosünteesiliselt aktiivse radiatsiooni (PAR) intensiivsema neeldumise. USA-st pärit ceptomeetriga AccuPar määrati kolmel korral ($n = 12$) suhe PAR puude all/PAR puude kohal ja selgus, et puutuha variandis $0,25 \text{ kg/m}^2$ on võra PAR läbilaskvus 9%, $0,5 \text{ kg/m}^2$ – 12% ja $1,0 \text{ kg/m}^2$ – 8% väiksem (st. võra on tihedam) kui kontrollis.

Võib öelda, et mulla ühekordne puutuhaga töötlemine rikastas toitesubstraati toitainetega ja üldkokkuvõttes stimuleeris puude biomassi. Tuleb aga rõhutada, et erinevate organite biomassi muutused kuusel varieerusid ning kuuse üldise biomassi suurenemine toimus juurte, võrsete ja okkamassi arvelt. Arvestades puu kogumassiks 100%, jaotub puude keskmine kuivmass järgmiselt:

	Juured	:	tüved	:	võrsed	:	okkad
Kontrollpuud (%)	26,7		20,6		22,0		30,7
PT $0,25 \text{ kg/m}^2$	28,1		17,2		23,6		31,1

Puutuha kogused $0,25 \text{ kg/m}^2$ on avaldanud üldkokkuvõttes puude kasvule ja biomassi formeerumisele stimuleerivat toimet.

Morfoloogilisi okkamõõtmisi kuusel alustati kohe pärast katsevariantide töötlemist puutuhaga. Esimese vegetatsiooniperioodi lõpuks selgus, et puutuhaga töödeldud seemikud olid 7–15% kontrollist lühemad.

Käesoleva projekti andmetest lähtudes võiks arvata, et puutuha lisamine koguses $0,25 \text{ kg/m}^2$ on mõningal määral positiivselt mõjunud okaspuude seisundile. Samas tuleb aga märkida, et erinevused kontrollpuude ja puutuhaga väetatud puude vahel ei ole statistiliselt olulised. Positiivse tulemuse puhul saame rääkida vaid tendentsist. Kuid seda, et puutuhaga väetamine ei anna kiiret efekti, vähemalt toitainetevaestel liivmuldadel, on näidanud ka Soome ja Rootsi teadusuuringute tulemused. Kuid käesoleva projekti puhul on uuritud ajavahemik siiski nii lühike, et mulda lisatud puutuhk ei lagune nii kiiresti ja taimed ei omasta vajalikul hulgal toitaineid. Teisest küljest tekib tasakaalustamatus N ja teiste mineraaltoitainete vahel. Kuna mulla pH tõusuga vähenes N omastamine ja puutuhas puudub praktiliselt N, siis tuleks jätkata uurinuid lisades puutuhaga toitekeskkonda ka N, mis teoreetiliselt peaks kiirustama ka puutuha efekti, stimuleerima veelgi puude kasvu.

Kokkuvõtteks teostatud uuringutest tuleb rõhutada, et puutuhk rikastab okaspuude toitekeskkonda, millega kaasneb toitainete, v.a. N, intensiivsem akumulatsioon puudesse ja mõnevõrra intensiivistub biomassi formeerumine ja kasv.

Töös tehtud järeldused on olulised toitainetevaestel muldadel kasvavate metsapuude kasvutingimuste parendamiseks. Edaspidistes uuringutes tuleks muuta katsedisaini ja lisada koos puutuhaga ka lämmastikväetisi. Teoreetiliselt peaks selline kombinatsioon soodustama vähemalt mändide juurdekasvu. Samuti leiaksid tööstusheitmed kasulikku ja keskkonnasäästlikku teaduslikult põhjendatud rakendust.

Töö tulemusena on ilmunud 2 artiklit (vt. lisa), plaanitud kirjutada 2 artiklit (andmed on läbitöötatud) ja kaitstud magistritöö teemal “Erinevate tootmisjääkide (puu- ja turbatuhk mõju kuusetaimede kasvule” (Karin Kikamägi, EMÜ, 2008, juhendaja Katri Ots).