



EESTI MAAÜLIKOOL  
Metsandus- ja maaehitusinstituut  
Metsakasvatuse osakond

**Oksana Tsibernaja**

**PÕLEVKIVITUHA NING PÕLEVKIVI- JA PUUTUHA SEGU  
MÕJU ARUKASE (*BETULA PENDULA* ROTH) BIOMASSI  
FORMEERUMISELE AMMENDATUD  
FREESTURBAVÄLJAL**

THE EFFECT OF OIL SHALE ASH AND MIXTURE OF OIL  
SHALE ASH AND WOOD ASH ON THE BIOMASS FORMATION  
OF SILVER BIRCH (*BETULA PENDULA* ROTH) ON A  
CUTAWAY PEATLAND

Bakalaureusetöö  
Loodusvarade kasutamise ja kaitse õppekava

Juhendajad: vanemteadur Katri Ots (*Dr Sc*)

doktorant Mari Tilk (*M Sc*)

Tartu 2017

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Autor: Oksana Tsibernaja		Õppekava: Loodusvarade kasutamine ja kaitse	
Pealkiri: Põlevkivituha ning põlevkivi- ja puutuha segu mõju arukase ( <i>Betula pendula</i> Roth) biomassi formeerumisele ammendatud freesturbaväljal			
Lehekülgi: 43	Jooniseid: 12	Tabeleid: 9	Lisasid: 3
Osakond:	Metsandus- ja maaehitusinstituut		
Uurimisvaldkond:	Metsaökoloogia		
Juhendaja(d):	Katri Ots ja Mari Tilk		
Kaitsmiskoht ja aasta:	Tartu, 2017		
<p>Eestis on põlevkivi põhiline energiaallikas elektri tootmisel, kuid põlevkivi põletamisel tekib miljoneid tonne tuhka, mis siiani pole märkimisväärset kasutust leidnud ja ladustatakse tuhaväljadele. Põlevkivituhk sisaldab taimedele vajalikke toitaineid, mida saab edukalt taaskasutada põllumajanduses ja metsanduses. Antud töö eesmärgiks oli selgitada põlevkivituha ning põlevkivi- ja puutuha segu kasutusvõimalusi väetisena ammendatud freesturbaaladel. Katseala asub Puhatu ammendatud freesturbaväljal ja istutusmaterjaliks valiti arukase (<i>Betula pendula</i> Roth) 1-aastased potitaimed. Katsealal mõõdeti puude kasvuparameetrid, tehti turba- ja tuhaanalüüsid ning saadud tulemusi võrreldi kontrollala näitajatega. Kontrollalaga võrreldes olid kõik mõõdetud parameetrid väetatud aladel suuremad. Väetamise tagajärjel muutus mulla reaktsioon neutraalsema suunas. Samuti on väetatud aladel fosfori ja kaaliumi sisaldus turbas oluliselt suurem.</p> <p>Põlevkivituha ning puu- ja põlevkivituha seguga väetamine mõjub jääksõos positiivselt puude assimilatsiooniorganite kasvule ja pindalale. Ilmnes, et kõige intensiivsem on kaskede biomassi formeerumine segutuhaga töödeldud aladel. Katse tulemused näitavad, et põlevkivi- ja puutuha segu kasutamine väetisena ammendatud freesturbaaladel on perspektiivne. Antud teema on aktuaalne, sest Eesti Keskkonnastrateegia 2030 üks prioriteete on soodustada tootmisjääkide taaskasutamist ja jäätmetega saastatud alade vähendamist.</p>			
Märksõnad: arukask, ammendatud freesturbaala, põlevkivituhk, põlevkivi- ja puutuha segu			

Estonian University of LifeSciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		<b>Abstract of Bachelor's Thesis</b>	
Author: Oksana Tsibernaja		Specialty: Natural Resources Management	
Title: The effect of oil shale ash and mixture of oil shale ash and wood ash on the biomass formation of silver birch ( <i>Betula pendula</i> Roth) on a cutaway peatland			
Pages: 43	Figures: 16	Tables: 9	Appendixes: 3
Department:	Institute of Forestry and Rural Engineering		
Field of research:	Forest ecology		
Supervisors:	Katri Ots and Mari Tilk		
Place and date:	Tartu, 2017		
<p>Oil shale is main energy resource in Estonia and after usage in power plants, millions of tons of oil shale ash is deposited on oil shale ash fields. Oil shale ash contains multiple elements that are needed for plants growth and can be reused in agriculture and forestry management. The aim of the thesis was to investigate the effect of fertilisation with oil shale ash and a mixture of wood ash and oil shale ash on the biomass formation of silver birch on a cutaway peatland. The study area is located on Puhatu cutaway peatland and experiments were conducted with 1-year-old seedlings of silver birch (<i>Betula pendula</i> Roth). On the study area growth parameters were measured, the peat and ash analysis were made and the results were compared to control plots. The results of the trees that grew on the treated plots showed better results comparing to trees from the control plots. After fertilisation acidic peat soils were more neutral. In the plots treated there was a considerable increase in the concentrations of P and K. After fertilization with oil shale ash and mixture of oil shale ash and wood ash on cutaway peatland there was positive effect on biomass formation and area of assimilation organs.</p> <p>The experiment shows that the use of mixture of oil shale ash and wood ash on a cutaway peatland has a positive effect on the assimilation organs growth of trees. Results of this work showed, that the most intensive silver birch biomass formation is on the substrate fertilised with mixture of oil shale ash and wood ash. The given thesis has long-term aspect and is topical because of the Estonian Environmental Strategy 2030 where the first priority is to promote the reuse of manufacturing waste and reduce waste polluted areas.</p>			
Keywords: silver birch, cutaway peatland, oil shale ash, mixture of oil shale ash and wood ash			

## SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	5
1. ÜLEVAADE KIRJANDUSEST .....	7
1.1. Põlevkivi.....	7
1.1.1 Põlevkivituhk .....	8
1.1.2. Tuha ladustamine .....	9
1.2. Põlevkivituha kasutamise võimalused Eestis.....	10
1.2.1. Põlevkivituha kasutamine metsanduses .....	12
2. MATERJAL JA METOODIKA .....	13
2.1. Katseala asukoht ja kirjeldus.....	13
2.2. Katsealade rajamise meetodika .....	14
2.3. Keemilised analüüsid .....	15
2.4. Andmete statistiline analüüs.....	16
3. TÖÖ TULEMUSED JA ARUTELU .....	17
3.1. Muutused turba keemilistes omadustes.....	17
3.2. Kõrguskasvu ja juurekaela diameetri vaheline seos.....	24
3.3. Assimileeriva pinna, tüve, võrsete ja juurte kuivmass ning biomassi jaotuvus .....	27
3.4. Kaselehe pindala .....	32
KOKKUVÕTE.....	34
SUMMARY .....	36
KASUTATUD KIRJANDUS .....	37
LISAD .....	40
Lisa 1. Arukase kõrguse mõõtmine.....	41
Lisa 2. Fragmenteerimiseks valmis seatud kask .....	42
Lisa 3. Tüve biomassi kaalumise .....	43

## SISSEJUHATUS

Eesti tähtsaim maavara on põlevkivi, mille teine nimetus on kukersiit (Isakar 2011). Tähtsaim on ta sellepärast, et põlevkivi on Eesti riigi jaoks strateegiline energiaressurss. Põlevkivi kasutamine on reguleeritud arengukavaga “Põlevkivi kasutamise riiklik arengukava 2016–2030” (Statistikaamet...2015: 103). Vastavalt Maapõueseadusele on põlevkivi aastane kaevandamismäär 20 miljonit tonni (Maapõueseadus... 2015). Kaevandatavast põlevkivist 80–82% kasutavad soojuselektrijaamad. Teisel kohal olevaks põlevkivi tarbijaks on keemiatööstus, kus kasutatakse 15–17% kaevandatavast põlevkivist ja viimasel kohal on tsemenditööstus 2–3% (Isakar 2011). Riiklik arengukava “Põlevkivi kasutamise riiklik arengukava 2016–2030” näeb ette, et aastane kaevandusmäär jääb samaks kuni aastani 2030–20 miljonit tonni aastas (Põlevkivi kasutamise... 2015: 63).

Põlevkivi kaevandamise, rikastamise ja kasutamisega kaasnevad mitmed keskkonnaprobleemid. Suureks probleemiks on tugevalt leeliseline tuhk, mida tekib põlevkivi põletamisel kuni 50% põlevkivi mahust ja mida on vaja ladustada. Eesti põlevkivil töötavad elektrijaamad toodavad üle 6 miljoni tonni põlevkivituhka aastas, millest 96% ladustatakse tuhaväljadel (Kuusik *et al.* 2012). Probleemsed on ka põlevkivikeemiatööstuse jäätmed. Põlevkivi põletamine elektrijaamades toob kaasa mitmete toksiliste ainete eraldumise: elektrijaamadest emiteerub CO<sub>2</sub> ja teisi gaase. Põlevkivi allmaakaevandamisega kaasneb põhjaveerežiimi muutumine ja võimalik vee reostumine. Põlevkivitööstus muudab keskkonda ja väga tähtis on põlevkivi tootmisel pöörata rohkem tähelepanu keskkonna kaitsmisele (Aaloe *et al.* 2006: 6–7).

Põlevkivitööstuse keskkonnasäästlikkus on väga aktuaalne teema Eesti riigi jaoks, sest 80% tekkivatest jäätmetes on seotud põlevkivisektoriga. Eesti Keskkonnastrateegia aastani 2030 eesmärgiks on jäätmetekke vähendamine ja loodusvarade säästlik kasutamine, sh. efektiivsemate põlevkivi põletustehnoloogiate ja alternatiivsete energiatootmise viiside rakendamine, millega kaasneks põlevkivijäätmete tekke vähenemine. Eesmärkide saavutamiseks tuleb kasutada toormaterjali säästlikult ja stimuleerida jäätmete töötlemist ja taaskasutamist (Statistikaamet... 2015: 143). Riigi jäätmekava 2014–2020 (2014) strateegiliste eesmärkide saavutamiseks on planeeritud näiteks suurendada teadlikkust ressursijuhtimisest ja soodustada ressursitõhusate tehnoloogiate kasutuselevõttu.

Aina enam on maailmas hakatud jäätmeid taaskasutama selleks, et vähendada nende ladustamist. Põlevkivituhka saab edukalt kasutada tsemendi tootmisel, teede ehitamisel ja põllumajanduses (Tamm 2015: 40). Tagasihoidlikult on uuritud põlevkivituhka kui lubiväetist metsanduses puude kasvu stimuleerijana. Bakalaureusetöö eesmärgiks on uurida põlevkivituha kasutamise võimalusi metsanduses ja antud töös uuritakse põlevkivituha ning puu- ja põlevkivituha segu mõju arukase (*Betula pendula* Roth) biomassi formeerumisele. Käesoleva töö andmed on kogutud Puhatu ammendatud freesturbaväljalt (Ida-Viru maakond). Andmete statistiliseks analüüsiks ning jooniste tegemiseks on kasutatud programmi MS Excel 2010. Käesoleva töö autor osales sügisel 2015 toimunud välitöödel ja hilisematel laboritöödel. Töö kirjanduse ülevaate peatükk koosneb põlevkivi ja selle jäägi – tuha – kirjeldusest, põlevkivi kasutamisel tekkivate keskkonnaohtude tutvustamisest ja põlevkivituha kasutamise võimalustest. Materjali ja metoodika osa sisaldab katseala kirjeldust ja tehtud tööde metoodika tutvustust. Tulemuste ja arutelu peatükis analüüsitakse Puhatu freesturbaväljalt kogutud andmeid. Bakalaureusetöö kokkuvõttes võetakse lühidalt kokku töös saadud tulemused ja viimasteks töö osadeks on kasutatud kirjanduse loetelu ja lisad.

# 1. ÜLEVAADE KIRJANDUSEST

## 1.1. Põlevkivi

Eesti geoloogilise põlevkivi varu on 1 mlrd tonni ja kasutatava põlevkivi maht on 1,2 mlrd tonni (Möldre 2014: 16). Põlevkivi kasutamise riiklikus arengukavas aastateks 2008–2015 oli lubatud põlevkivi kaevandada mitte rohkem kui 20 miljonit tonni aastas. Aastatel 2010–2013 oli põlevkivi kaevandamise maht 15 miljonit tonni aastas (Statistikaamet... 2015: 103) ja 2013. aastal oli toodangu maht 20,5 miljonit tonni (Möldre 2014: 18). Kukersiidist toodetakse kütteõli, õlikoksi, pigi, bituumeni ja kõige suurem osa põlevkivist läheb elektrienergia tootmiseks.

Põlevkivide koostis võib olla väga erinev. Eesti põlevkivi erineb teistest põlevkividest värvi ja orgaanilise osa sisalduse poolest, olles enamasti helekollakaspruuni värvi (Kattai 2003: 14). Orgaanilise aine sisaldus on suuremas osas põlevkivides 10–30% ning mõnikord ulatub 70%-ni. Põlevkivi orgaaniline aine koosneb peamiselt kerogeenist, mis on orgaanilistes lahustites lahustumatu aine ja püsiv keemiliste reagentide suhtes.

Põhilised keemilised elemendid, mis põlevad põlevkivides, on süsinik (65–83%) ja vesinik (7–11%). Orgaanilise aine koostisse kuuluvad veel hapnik, väävel, lämmastik, kloor ja vesinik (tabel 1).

**Tabel 1.** Erinevate leiukohtade põlevkivide orgaanilise aine elementkoostis. (Kattai 2003: 15)

Leiukoht (riik)	Keskmine elemenkoostis, %					Aatom- suhe H/C	Õli- saagis (T°),%
	C	H	O	N	S		
Eesti (Eesti)	77,3	9,8	10,8	0,4	1,7	1,5	66
Leningradi (Venemaa)	76,6	9,4	12,4	0,3	1,3	1,4	65
Verhne-Sinevidnoje (Ukraina)	64,3	7,5	20,1	0,4	7,9	1,28	20
Kvarntorp (Rootsi)	68,7	7,2	18,8	0,8	4,5	1,2	22
Green-River (USA)	80,2	10,1	5,6	2,6	1,5	1,51	75

Kloori sisaldus põlevkivist on 0,1–0,9%. Mida suurem on vesiniku ja süsiniku aatomisuhe (H/C), seda suurem on põlevkivi õlisisaldus (Aaloe *et al.* 2006: 8). H/C aatomisuhte järgi on põlevkivid üsna sarnased naftale, põlevkivide aatomisuhe on 1,2–1,7 ja nafta puhul on see

suhe 1,8–2,0 (Kattai 2003: 14). Võrdluseks olgu toodud, et kivi- ja pruunsöe aatomsuhe on 0,4–0,8. Põlevkivide mineraalosa koosneb terrigeensest materjalist (savi, kvarts, päevakivi) ja/või karbonaatidest (kaltsiit, dolomiit) (Aaloe *et al.* 2006: 9). Põlevkivi põletamisel kivimis sisalduv niiskus aurub õhku ja mineraalosa laguneb: 1000 tonnist põlevkivist jääb alles ligikaudu 550 tonni jääkaineid ja niiskust ligikaudu 100 tonni ringis, samas kui põlevat osa, mis annab soojust, on ainult 350 tonni (Aaloe *et al.* 2006: 9).

### 1.1.1 Põlevkivituhk

Nagu juba eespool mainitud, ei ole põlevkivi puhas kütus. Põlevkivi tekkimisel settis koos orgaanilise ainega karbonaatset materjali, liiva ja savi, mis lähevad ahju koos põlevkiviga. Sellepärast jääb põlevkivi põletamisel alles suur hulk jäätmeid (Mõtlep 2012).

Umbes 90% kogu riigi tööstusjäätmetest annab Ida-Virumaa, kus asuvad peamised põlevkivikaevandused (Kattai 2003: 77). Põlevkivitööstuse ja energeetikaga seonduvad jäätmed moodustasid 79% kogu Eesti jäätmetekkest (Möldre 2014: 18). Statistika järgi tekkis aastal 2011 ühe Eesti elaniku kohta 4,9 tonni põlevkivienergeetika jäätmeid. Elektri saamise eesmärgil kaevandatud põlevkivi kogusest ligi pool muutub põlevkivituhaks. Elektrijaamades põlevkivi põletamisel tekkinud tuha kogus ulatub tänaseks umbes 300 miljoni tonnini ja igal aastal lisandub tuhka umbes 5–7 miljonit tonni (Mõtlep 2012). Põlevkivituhka ladustatakse tuhaväljadele, kus aastakümnete jooksul muutub tuhk stabiilseks ja selle keskkonnamõju on üsna süütu (Möldre 2014: 18). Võrreldes tolmpõletust keevkihtpõletusega on peamiseks erinevuseks tekkiva tuha suurem väävlisisaldus, mille ladestamisel tuhaväljale kaasneb väävli emissioon atmosfääri.

Põlevkivi mineraalosa hulk on tema tööstusliku kasutamise hindamise kriteeriumiks (Aarna 1989: 54). Mineraalosa hulga kaudseks väljendajaks on põlemisel tekkiva tuha hulk, mis põlevkivide puhul varieerub 45–85% piires. Mineraalse hulga järgi liigitatakse põlevkivi tuharikasteks (tuhka tekib kuni 85% ulatuses), keskmise tuhasisaldusega (kuni 70% tuhka) ja tuhavaesteks (alla 60% tuhka). Osades põlevkivituhkades on suurem osatähtsus räni- ja alumiiniumoksiidil, teistes kaltsiumoksiidi sisaldusel (tabel 2). Kõige väiksem on Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, SO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O ja Na<sub>2</sub>O sisaldus erinevates põlevkivituhkades (tabel 2). Põhiliste oksiidide – alumosilikaatide (SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ja karbonaatide (CaO+MgO) suhe võib varieeruda väga laiades piirides (tabel 2) (Kattai 2003: 16).



**Tabel 2.** Erinevate leiukohtade põlevkivide tuha keemiline koostis (Kattai 2003: 17)

Leiukoht	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	Keskmine keemiline koostis, %								CaO + MgO
Eesti	31,0	8,2	5,9	39,5	4,8	5,0	4,2	0,3	0,9
Leningrad	37,1	10,4	4,9	35,7	3,2	4,2	4,2	0,2	1,9
V.Sinevidnoje	70,7	15,1	6,9	1,8	1,1	0,9	2,0	1,5	1,9
Kvarntorp	61,5	17,3	10,5	1,2	1,7	1,3	6,3	0,2	27,2
Green-River	43,0	12,0	4,6	21,7	9,1	2,2	2,9	3,3	1,9

Suurem osa põlevkive on raskmetallide poolt suhteliselt vaesed: kukersiidituhas on raskmetallide sisaldus madal ega ületa settekivimite klarki (Kattai 2003: 17). Vastavalt Euroopa Komisjoni otsusele 2000/ 532/EC kuulub põlevkivi põletamisel tekkiv tuhk ohtlike jäätmete hulka. Põlevkivi termilise töötlemise jäätmed on leeliselised ja võivad sisaldada ohtlikke raskmetalle ja polütsükklilisi aroomaatseid süsivesinikke (PAH-e) (Jefimova 2015). Võrreldes elementide keskmise sisaldusega savis ja lubjakivis, on põlevkivituhas mõnevõrra kõrgem Cd-, Cl- ja Br- sisaldus. Sulfiidse väävli sisaldus tuhaväljadele minevas tuhas jääb 0,1–0,2% piiridesse, polüaromaatse süsivesiniku benso(a)püreeni (BP) sisaldus vastavalt 2–30 µg/kg piiridesse (Lahtvee 2003: 94). Elektriijaamades põlevkivi põletamisel tekkiv lendtuhk sisaldas raskmetalle (g/t) järgmiselt: Zn 284, Mn 279, Pb 164, Cu 83, V 56, Cr 47, As 38, Ni 19, Mo 15, Co6, Sb3, Cd 3 ja Hg 1 (Anttila *et al.* 1996: 188).

### 1.1.2. Tuha ladustamine

Kuna Eesti põlevkivi tuhasisaldus on väga kõrge (keskmiselt 46%), toodavad Narva elektriijaamad praegu miljonites tonnides tuhka aastas (Lahtvee 2003: 94). Kokku on elektriijaamade tuhaväljadele ladustatud umbes 300 miljonit tonni põlevkivituhka (Mõtlep 2012). Balti Elektriijaama tuhaväli hõlmab hetkel 10 km<sup>2</sup> suuruse maa-ala ning tuha koguseks on ligikaudu 113 miljonit tonni; Eesti Elektriijaama tuhaväli on umbes 5 km<sup>2</sup> suurune ning sinna on kuhjatud ligikaudu 90 miljonit tonni tuhka (Lahtvee 2003: 94). Tuha ladustamine toimub vastavalt kehtivatele jäätmelubadele.

2013. aastal ladestati Eestis põlevkivi kaevandamise ja kasutamisega seotud jäätmeid järgmistes kogustes (miljonit tonni): põlevkivituhk 8,3, põlevkivi aheraine 1,8 ja põlevkivi poolkoks 0,4 (Statistikaamet... 2015: 141).

Põlevkivi koldetuhk ja lendtuhk kuuluvad Euroopa jäätmeloendil põhineva jäätmeliikide ja ohtlike jäätmete nimistu alusel ohtlike jäätmete hulka koodinumbritega vastavalt \*10010104 ja \*100198. Iseenesest pole põlevkivituhk loodusele kahjulik, aga ta on ohtlik seda transportiva vee tõttu. Värskest ladestatud tuha kõige olulisem ohtlik omadus on tema tugevalt leeliseline reaktsioon ( $\text{pH} > 12$ ). Kuna põlevkivituhas on vaba lubja  $(\text{CaO})_x$  sisaldus keskmiselt 20%, siis juba esimesel kokkupuutel tuhaga muutub vesi tugevalt leeliseliseks, saavutades viiendaks-kuuendaks kokkupuuteks tasakaalulise leeliselisuse, olles muutunud kaltsiumhüdroksiidi  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ja kaltsiumkarbonaadi  $\text{CaCO}_3$  küllastunud lahuseks (Arro *et al.* 2002).

Kokkupuutel veega liiguvad tuhas sisalduvad mikro- ja makroelemendid ning ühendid mõningal määral ka vette ja võtavad osa erinevatest keemilistest reaktsioonidest ning hüdroloogilisest ja hüdrogeoloogilisest migratsioonist. (Lahtvee 2003: 94)

## 1.2. Põlevkivituha kasutamise võimalused Eestis

Statistikaameti andmeil suureneb Eestis jäätmete taaskasutus aasta aastalt. 2000. aastal taaskasutati vaid 13% tekkinud jäätmetest, sellest 0,7 miljonit tonni moodustas põlevkivi aheraine taaskasutus (Statistikaamet... 2015: 139). 2013. aastal kasutati juba rohkem kui pool tekkinud jäätmetest ja põlevkivi aheraine moodustas nendest 9,2 miljonit tonni. 2009. aastal taaskasutati 81000 tonni põlevkivituhka ja 2014. aastal oli see tõusnud 128000 tonnini (Keskkond... 2015).

Alates 1959. aastast Balti Soojuselektrijaama käivitumisega Narvas hakkas põlevkivituhka tekkima suurtes kogustes ja vaja oli hakata otsima võimalusi tuha kasutamiseks. Üheks võimaluseks oli põlevkivituha kasutamine happeliste muldade lupjamiseks. Eestis kasutati aastatel 1950–1994 ühtekokku 10870 tuhat tonni väetisi, sellest tolmjaid lubiväetisi (sh. põlevkivituhka) 8752 tuhat tonni (Kärblane 1996). Põlevkivituha mõju mulla omadustele ja taimede kasvule on Eesti Energia põhjalikult uurinud koostöös Eesti Maaülikooliga (PKI-s uuritakse põlevkivituha mõju põllumuldadele ja MMI metsakasvatuse osakonnas mõju puude kasvule ammendatud freesturbaaladel) ja suurtalu pidajatega (Hansalu 2016; Pinn 2016). Põlevkivituhka saab kasutada põllumajanduses edukalt leelismeliorandina, põldude väetamiseks ja muldade happesuse vähendamiseks (Arro *et al.* 2002). AS-le Narva Elektrijaamad on omistatud Taimse Materjali Kontrolli Keskuse poolt sertifikaat, mis

tõendab, et meliorant-tolmpõlevkivituhk vastab Eesti Vabariigi väetiseseadusega kehtestatud kvaliteedi ja ohutuse nõuetele. Põlevkivituha mulda viimisega muutuvad pinnase füüsikalise-keemilised näitajad, mis ei jäta oma mõju avaldamata ka mulla füüsikalistele omadustele, sest lupjamise tagajärjel paraneb mulla struktuur, mille tulemusel väheneb mulla mahukaal ning millega kaasneb õhu- ja veeläbilaskvuse tõus mullas (Hallik 1956: 137). Põlevkivituha parema mõju põhjuseks nõrglubjaga võrreldes on eeskätt K ja S olemasolu põlevkivituhas (Hallik 1956: 153).

Põlevkivituhka saab kasutada koostisosana ehitusmaterjalide nagu tsement, klinker, betoon, gaasbetoonplokid ja kuivad ehitussegud tootmisel (Tuha ja killustiku müük... 2015). Tallinna Tehnikaülikoolis tekkis 1970.-ndatel aastatel terve põlevkivituha uurimise koolkond (Bachmann *et al.* 2014: 87). Professor Verner Kikase juhtimisel uuriti põlevkivituha fraktsioonide lisamist Kundas toodetud tsemendile ja nii sündis heade omadustega põlevkivituhk – portlandtsement, millest on ehitatud Tallinna teletorn, Iru elektrijaama korsten ja Sosnovõi Bori tuumaelektrijaam. Just põlevkivituhk annab tsemendile mitmeid väärtuslikke omadusi – tsement kivistub kiiremini ja vajab vähem vett. Põlevkivituha sisaldusega portlandtsemendist toodetud betoonid on külma- ja korrosioonikindlamad. Samuti uuriti aktiivselt põlevkivituha kasutamist poorbetooni tootmisel ja nii sündis legendaarne ehitusmaterjal „Narva plokk”.

Üks võimalus põlevkivituha kasutamiseks on sadamarajatiste ehitamine (Gaškov 2011). Sadama-aladele kogunevat tugevalt reostatud põhjamuda stabiliseeritakse tänasel päeval tsemendiga, aga otsitakse ka lahendusi, kuidas osa tsemendist asendada põlevkivituha. Põlevkivituhka saab kasutada keskkonnakaitselistes projektides energiatootmises tekkiva CO<sub>2</sub> ja väävli sidujana (Tuha ja killustiku müük... 2015).

Põlevkivituhka ja aherainet kasutatakse ka kaevanduskäikude taastäitmiseks: põlevkivituhka pumbatakse ammendatud kaevanduskäikudesse, kus see kivistub ja välistab hilisemad maapinnalangetused (Pototski *et al.* 2012). Esialgset katsetused näitavad, et kaevanduskäikude täitmisel põlevkivituha koosneva betoonilaadse seguga tagab lae kindla püsimise (Gaškov 2011).

Eesti Energia ja Maanteeamet koos uurivad põlevkivituha kasutamismõimalusi tealuste stabiliseerimiseks ja pinnaste mass-stabiliseerimiseks. Praegu kaevatakse teedehitusel turvas välja ja asendatakse kruusa ja liivaga. Selle asemel on plaanis põlevkivituha ja liiva segu lisada turbapinnasele, mis peaks tõstma pinnase kandevõimet ja vähendama külmakergete tekkimist. (Gaškov 2011)

### 1.2.1. Põlevkivituha kasutamine metsanduses

Metsamuldade neutraliseerimiseks ja puude toitesubstraadi rikastamiseks on Eestis põlevkivituha mõju vähe uuritud. Põlevkivituhka koos mineraalväetistega on kasutatud katseliselt Lõuna-Eesti liivmuldadel kasvavate männikute toitumistingimuste parandamiseks, mille tagajärjel paranes katsepuistute seisund ja vähenes haigestumine juuremädanikku ning võrsevähki (Terasmaa, Sepp 1994; Terasmaa, Pikk 1995). 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 (Seemen *et al.* 2000). Põlevkivituhka on kasutatud ammendatud freesturbaväljadel turba toiteelementide bilansi tasakaalustamiseks ja puude kasvu stimuleerimiseks (Ots 2013; Kikamägi *et al.* 2014).

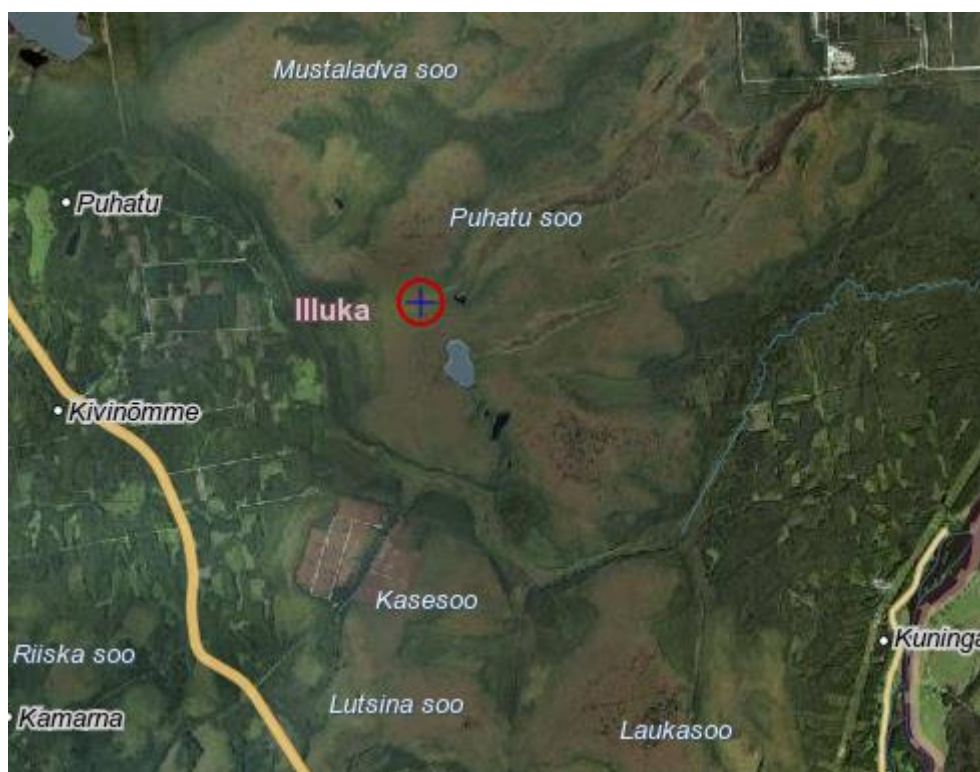
Põlevkivituhas pole piisavas koguses fosforit ja kaaliumit puude kasvu oluliseks parandamiseks, seetõttu katsetati KIK-i poolt finantseeritud lepingulise töö nr 3708 käigus segutuha (põlevkivituhk segus puutuhaga) mõju puittaimede kasvule Ida-Virumaa ammendatud freesturbaväljadel (Ots 2013). Skandinaaviamaaades ja Kesk-Euroopas on turvasmuldade väetamisel puutuhaga saadud puude juurdekasvu märgatav suurenemine ja nende kogemuse põhjal on soovitatav puutuhka kasutada okaspuude kasvatamisel, mis vajavad suhteliselt palju kaaliumi, mida on puutuhas enam-vähem sama palju kui kasvavas puus (KIK projekt nr. 47... 2006: 2).

Metsade väetamisel peaks kasutama granuleeritud tuhka. Põlevkivituha graanuli ümber püsib rikkalikum mikrofloora ja vees lahustuva fosforhappe sisaldus on suurem ning taimede juured põimuvad tihedalt graanuli ümber (Hallik 1956: 208). Samas on granuleeritud tuhk vähem reaktiivne kui töötlemata puutuhk (Callesen *et al.* 2007). Tuha granuleerimine aeglustab toitainete leostumist mulda. Soomes tehtud katsed näitasid, et peale väetamist granuleeritud tuhaga suurenes K- ja P- sisaldus turbas ning paranes puude kasv (Moilanen *et al.* 2013).

## 2. MATERJAL JA METOODIKA

### 2.1. Katseala asukoht ja kirjeldus

Katseala paikneb Ida-Virumaal Toila ja Illuka valla territooriumil asuval Puhatu mahajäetud turbatootmisalal. Katsealade kordused on rajatud freesturbaväljakule, mis jääb Sirgala kaevandust teenindavast raudteest põhjapoole ja paikneb RMK Ahtme metskonna territooriumil (joonis 1).



**Joonis 1.** Puhatu mahajäetud turbatootmisala asukoht (maaamet.ee)

Katseala geograafilised koordinaadid on 59°19'55,9''N, 27°36'20,4''E. Katsealast lääne poole jääb Kurtna maastikukaitseala. Puhatu mahajäetud turbatootmisala pindala karjääride ja väljakutega kokku on Keskkonnaregistri andmetel ca 1486 ha (Ramst *et al.* 2006: 31). Väljakud on suurepinnalised ja tasased, mistõttu on isetaimestumise protsessid toimunud väga aeglaselt ja ainult kohtades, kus mikroreljeef on seda soosinud. Väljakutel

kasvavad kaootiliselt üksikud kased ja männid, freesturbaväljadele iseloomulikku tuppvillpead esineb Puhatus tagasihoidlikult – keskmiselt alla 10%. Kuivenduskraavid on sissevajunud ja ei täida oma funktsiooni. Kui varasematel aastatel olid väljakud suures osas üleujutatud (Ots 2013: 8), siis 2015. aasta sügisel oli isetekkeliste veekogude pindala oluliselt vähenenud tõenäoliselt seoses turbamaardlaga piirnevas põlevkivi allmaakaevanduses vee väljapumpamisega.

Enamusel Puhatu mahajäetud turbatootmisalast on turbavaru arvatud passiivseks ja turba freesimise taasalustamist ei peeta siin enam otstarbekaks (Ramst *et al.* 2006: 37). Eesti Geoloogiakeskuse hinnangul kujuneb aja jooksul tänu karjääride rohkusele ja kõrgele veetasemele Puhatu ammendatud freesturbaväljal suhteliselt mitmekesine loodusmaastik. Soovituslikult on tehtud ettepanek rakendada aktiivseid korrastamismeetmeid väljakute loodusliku mitmekesistumise protsessi kiirendamiseks.

Puhatus on erinevate tuhcade segamine turbasse toonud endaga kaasa liigirikkuse kasvu tänu taime- ja samblarinde tekkimisele. Võrreldes kontrollalaga (tuhaga töötlemata), kus alustaimestik puudus täielikult, võib segutuhkadega (puutuhk segus põlevkivituhaga) töödeldud aladel täheldada järgmisi soontaimi: kõrvenõges, ahtalehine põdrakanep, paiseleht, harilik puju, karvane hunditubakas, põldohakas, harilik vereurmarohi ja valge pusurohi katvusega ruutmeetrisel katseruudul 1–35%. Põlevkivituhaga töödeldud aladele eriti alustaimestikku ei tekkinud: 1 m<sup>2</sup> suurustel katseruududel võis täheldada vaid mõnda paiselehe- ja osjataime ning pilliroogu.

## **2.2. Katsealade rajamise meetodika**

Katsematerjaliks olid RMK taimlas kasvatatud 1-aastased arukase (*Betula pendula* Roth) potitaimed. Vahetult enne taimede istutamist 2013. aasta mais toimus katseruutude väetamine tuhkadega ruutsüsteemi näol (taime ümber 1 × 1 m ulatuses). Taimed istutati käsitsi seaduga 1,2 × 2 m. Iga katsevariant rajati kolmes korduses ja ühe korduse kogumiks on 30 puud. Puhatu freesturbaväljal kasutati Sonda katlamajast pärit puutuhka (PT, koldetuhk) ja Eesti Energia Narva Elektriijaamad AS-i 6. ploki põlevkivituhka (PõT, filtrituhk). Tuhad segati omavahel mehaaniliselt, varieerides erinevates katsevariantides tuhakogustega: olenevalt katseskeemist segati katseruudule 1–3 kg tuhka. Eelistati Narva Elektriijaamade 6. ploki filtrituhka, kuna ülejäänud kaks põlevkivituhka (6. bloki tsüklontuhk ja 7. bloki tsüklontuhk)

sisaldasid 3 korda vähem kaaliumi. Samuti sisaldasid valikust välja jäänud kaks tuhka 1,5 korda rohkem Ca, mille sisaldus on Põhja-Eesti jääksoode turbas aga niigi kõrge, ületades 10 korda Lõuna-Eestis asuvate jääksoode vastavaid Ca-näitajaid. Liiga kõrge Ca-sisaldus kasvukeskkonnas võib hakata pärssima teiste toiteelementide (näit. Mg) omastamist taimede poolt.

2013. aasta kevadel rajati Puhatu freesturbaväljale kolmes korduses katsealad (istutus), kasutades erinevate tuhakoguste kombinatsioone:

- 1) puu- ja põlevkivituha segu: puutuhk 15 t/ha + põlevkivituhk 15 t/ha (PT15+PõT15);
- 2) puu- ja põlevkivituha segu: puutuhk 15 t/ha + põlevkivituhk 10 t/ha (PT15+PõT10);
- 3) puu- ja põlevkivituha segu: puutuhk 10 t/ha + põlevkivituhk 15 t/ha (PT10+PõT15);
- 4) põlevkivituhk kogusega 10 t/ha (PõT10);
- 5) töötluseta ala (kontroll).

Peale kasvu formeerumist mõõdeti katsepuude kõrguskasvud ( $n=80-90$ , cm) ja juurekaela diameetrid ( $n=80-90$ , mm) septembris 2014 ja 2015. Kase lehelabade (projektsioonide) pindala ( $n=10-30$ , cm<sup>2</sup>) analüüsimiseks võeti 2015. aasta septembris biomassi määramiseks langetatud mudelpuude ( $n=3-5$ ) võradest 10-30 lehte, mis herbariseeriti. Üksiklehtede pindalad mõõdeti arvutiprogrammi WinFolia (Regent Instruments Inc.) abil. Puude bioproduktiooni allokatsiooni määramiseks eraldati katsepuud fraktsioonideks (lehed, võrsed, tüvi ja juured) ja kaaluti iga fraktsiooni kuivmass ( $n=3-5$ , g) eraldi.

### 2.3. Keemilised analüüsid

Toitainete sisalduse selgitamiseks võeti Puhatu freesturbavälja erinevate katsevariantide juhuslikest katseruutudest turbaproovid ( $n=3$ ) 2015. aasta septembris. Turbaproovid koguti 0-30 cm sügavuselt 10 cm-se sammuga hindamaks muutuste ulatust ja peamiste elementide väljaleostumist alumistesse turbahorisontidesse peale puu- ja põlevkivituha segamist turbasse. Proovid kuivatati ja sõeluti 2 mm sõelaga laboritingimustes. Turbaproovide keemilised analüüsid (pH<sub>KCl</sub>, N<sub>üld</sub>, P<sub>üld</sub>, K, Ca, Mg,  $n=15$ ) lasti määrata Eesti Maaülikooli Taimebiokeemia laboratooriumis.

Katsealadel kasutatud põlevkivi- ja puutuha keemilised analüüsid (pH<sub>KCl</sub>, N, P, K, Ca, Mg,  $n=5$ ) lasti määrata Eesti Maaülikooli Taimebiokeemia laboratooriumis. Katses kasutatud põlevkivi- ja puutuha pH on vastavalt 12,5 ja 9,8. Elementide sisaldus (mg/kg) tuhkaades oli

vastavalt järgmine: N sisaldus < 1000, P sisaldus 658 ja 14275, K sisaldus 9800 ja 12200, Ca sisaldus 270000 ja 155000 ning Mg sisaldus 39750 ja 2040.

## 2.4. Andmete statistiline analüüs

Katsetöötluste puhul arvutati taimede tunnuste aritmeetilised keskmised ning standardhälbed. Andmete koondamiseks ning jooniste tegemiseks kasutati programmi MS Excel 2010. Keskmiste võrdlemisel kasutati *t-Test: Paired Two Sample for Means*, et välja selgitada tulemuste statistiliselt usaldatavad erinevused kontrollist. Statistilised erinevused kontrolliti erinevate olulisuste nivoodega (0,05, 0,01, 0,001). Joonistele on lisatud erinevuste tasemed vastavalt analüüsi tulemustele  $p \leq 0,05$  \*,  $p \leq 0,01$  puhul kaks tähti \*\*,  $p \leq 0,001$  puhul \*\*\* ja  $p > 0,05$  puhul (–).



### 3. TÖÖ TULEMUSED JA ARUTELU

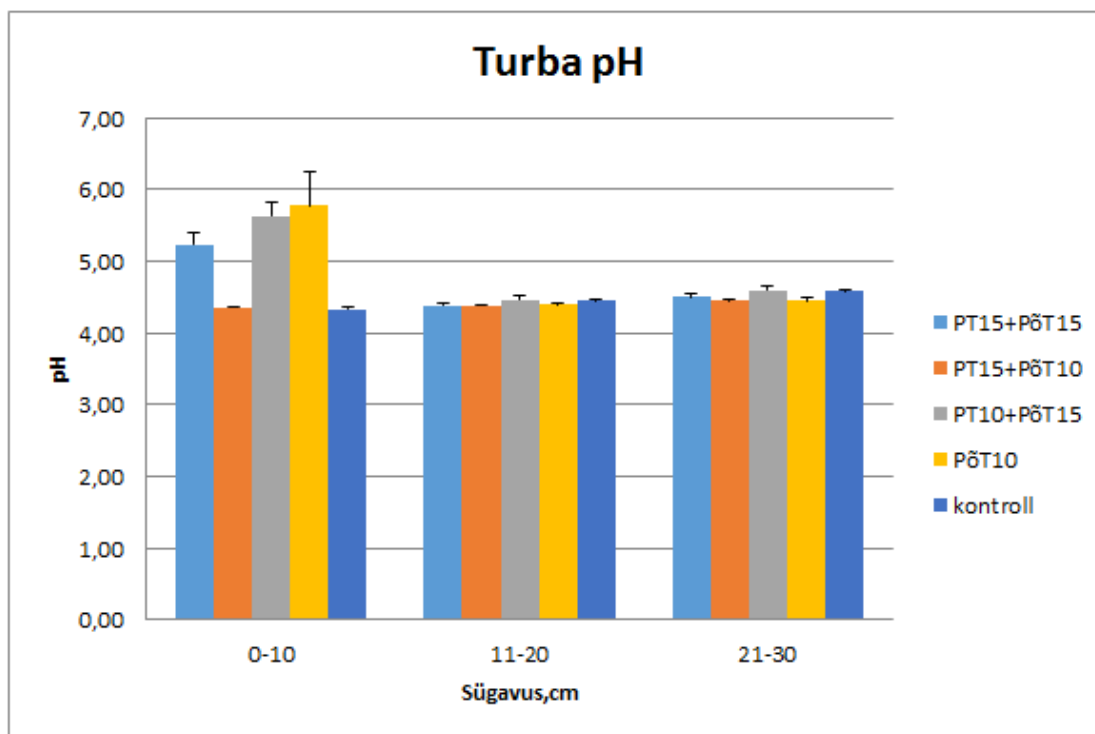
#### 3.1. Muutused turba keemilistes omadustes

Jääksodes varieerub turbakihi tusedus palju, turba pH on happeline, fosfori- ja kaaliumisisaldus on madal ning lämmastiku sisaldus on kõrge (Hytönen 2012: 378). Happelised mullad ei ole sobivad taimede kasvuks, sest peamised toitelemendid esinevad happelistes muldades taimedele raskesti omastataval kujul. Seepärast tuleb selliseid muldasid lubiväetistega neutraliseerida. Läbi aegade on Eestis kasutatud lupjamiseks mitmesuguseid materjale, millest populaarsemateks on olnud magevee-lubisetted (nõrglubi, järvekriit) ja põlevkivituhk (Hallik 1956: 148). Lupjamiseks sobib hästi ka puuküttel katlamajade tootmisjääde – puutuhk, mis on leeliseline (pH=12–13) ja toitainerikas (Pitk jt. 2016). Metsaistutusmaterjali kasvatamisel taimlates pole puu- ja põlevkivituha kasutamise korral mikrovaetisi vaja eraldi anda, sest mikroelemente on taimede kasvuks nendes tuhkades piisavalt (Taimre 1989: 196). Tuhkade kasutamise tulemusena paraneb märgatavalt taimede kasv. Puhatu ammendatud freesturbaväljal halvendab puude kasvu mitte ainult halvasti toimiv kuivendusvõrgustik vaid ka toitainete vähesus ja taime kasvuks olulisemate elementide bilansi tasakaalustamatus turbas (Kikamägi *et al.* 2014).

Tuha kasutamine väetisena aitab kiirendada ja suurendada puidu biomassi tootmist. Puude kiirem kasv toimub tänu nende paremale toitainetega varustatusele. Oluline on, et turvasmuldade väetamise mõju oleks efektiivne ja kestaks aastaid, et vähendada kordusväetamise sagedust. Näiteks katsetused Soomes näitasid, et väetamine aitas suurendada turba pH-d võrreldes kontrollalaga ja seda tendentsi oli märgata isegi 30 aastat peale väetamist (Saarsalmi *et al.* 2001). Peale tuhkade segamist turbasse täheldati ka mitmete toiteelementide (näiteks P ja K) sisalduse tõusu turba ülemises kihis, muutusi ei täheldatud lämmastiku puhul (Ots 2013: 18-19).

Puhatu freesturba väljal toimus väetamine enne taimede istutamist. Turba happesuse välja selgitamiseks võeti proovid kontrollalal ja tuhkadega väetatud katsealadel erinevatest sügavustest: 0–10 cm, 11–20 cm ja 21–30 cm. Mõõtmised näitasid, et Puhatu jääkturba pH oli kontrollalal enne väetamist tugevalt happeline (pH=4,3) (joonis 2). Peale tuhkadega töötlemist

oli turba pH tõusnud ülemises kihis (0–10 cm) kõikidel katsealadel. Kõige kõrgemad turba pH näitajad on katsealadel PõT10 (pH=5,8), PT10+PõT15 (pH=5,6) ning PT15+PõT15 (pH=5,2), olles mõõdukalt kuni nõrgalt happelised mullad (joonis 2). Segutuhaga töödeldud alal PT15+PõT10 ei esinenud katse käigus järsku mulla pH tõusu. Selle variandi mulla pH erines kontrollvariandi omast ainult 0,02 ühiku võrra.



**Joonis 2.** Puhatu jääkturba happesus ( $\text{pH}_{\text{KCl}}$ , keskmine + standardhälve)

Analüüsitulemused näitasid, et tuhkadega töödeldud katsealadel on pH oluliselt muutunud ainult ülemises turbakihis ja happesus suureneb sügavamates turbakihtides. Segutuhkadega ja põlevkivituhaga väetatud aladel püsis turba pH 11–20 cm ja 21–30 cm sügavusel katse vältel ligilähedane kontrollvariandi turba pH-le.

Ammendunud freesturbaväljade metsastamisel on suurimaks probleemiks toiteelementide kättesaadavus ning metsastamise edu sõltub palju kasvupinnase väetamisest (Elm 2013: 22). Taim vajab kasvamiseks ja arenemiseks päikeseenergiat, gaase, vett ning mineraalaineid. Mineraalseid toitelemente vajab taim koguliselt küll märgatavalt vähem kui mittemineraalseid (C; O; H), kuid orgaanilise aine süntees ehk assimilatsiooniprotsess on sõltuv mineraalsete toitelementide sisaldusest taimes ja nende omastamisest kasvupinnasest (Hallik 1956). Mineraalseid toitelemente peetakse tunduvalt defitsiitsemateks, mis tõttu

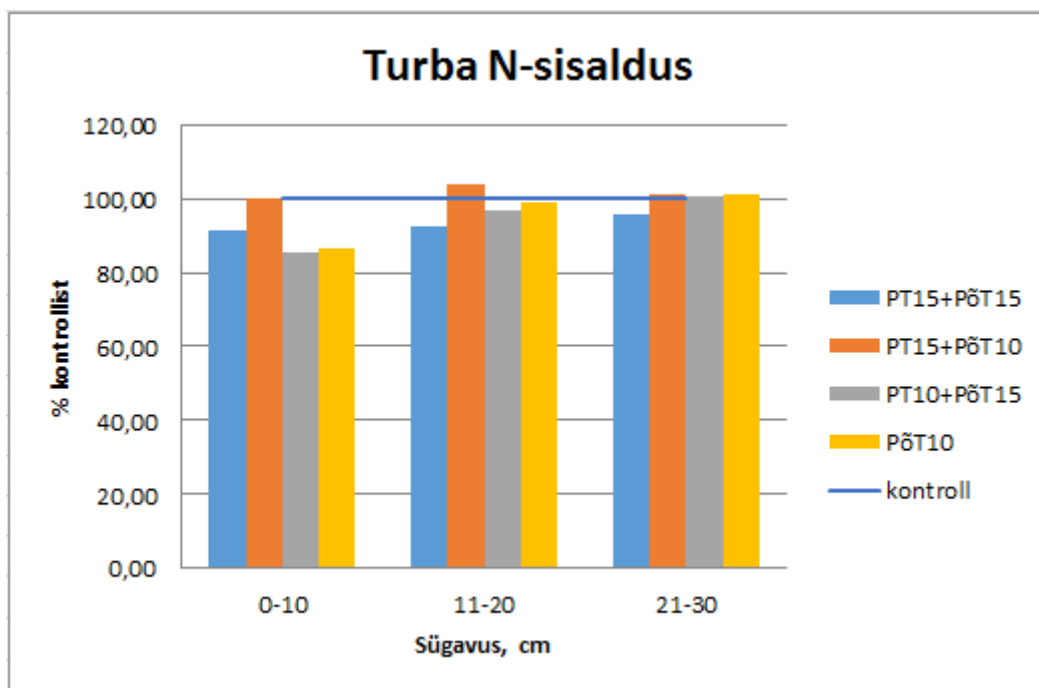
tuleks neid väetistega juurde anda (Kalmet *et al.* 1996: 13). Taimede kasvuks on hädavajalikud kindlad mineraalained – igal toitainel on oma kindel roll taime arengus ja kasvus ning nende bilanss peab olema tasakaalus. Kevadel vajavad puud kasvu alguses valkude sünteesimiseks N, sügisel aga vajavad nad enne talve kasvu lõpetamiseks P ja K (Hallik 1956). Eriti oluline on toitainete piisav olemasolu esimestel kasvuaastatel.

Jääksoos valitseb toiteelementide vaegsus, aga puu- ja põlevkivituhaga väetamine rikastab turvast toitainetega ja aitab oluliselt puude kasvu kiirendada. Kuna tuhk sisaldab vähe lämmastiku, siis ei suurenenud selle elemendi sisaldus turbas peale väetamist. Puhatu jääkturba N-sisaldus on toodud tabelis number 4, kus on näha, et võrreldes kontrollalaga on tuhaga väetatud aladel N mõnevõrra vähem (tabel 4 ja joonis 3). Segutuhaga töödeldud katsealal PT15+PõT10 on N-sisaldus kõige suurem.

**Tabel 4.** Puhatu jääkturba N-sisaldus (%)

Ala	Sügavus, cm					
	0–10		11–20		21–30	
	Keskmine	Standard-hälve	Keskmine	Standard-hälve	Keskmine	Standard-hälve
PT15+PõT15	2,7	0,0	2,7	0,0	2,9	0,0
PT15+PõT10	3,0	0,1	3,1	0,0	3,1	0,1
PT10+PõT15	2,6	0,1	2,8	0,1	3,1	0,0
PõT10	2,6	0,1	2,9	0,0	3,1	0,1
Kontroll ala	3,0	0,1	2,9	0,1	3,0	0,0

Joonisel 3 on näha, et võrreldes kontrollalaga vähenes tuhkadega väetamise järgselt N-sisaldus 0–10 cm sügavusel turbakihi, olles vahemikus 2,6–3,0%. Kõige stabiilsem on N-sisaldus (2,9–3,1%) 21–30 cm sügavusel turbas. Sügavuse suurenedes tõuseb ka turba viljakus ehk N-sisaldus.



**Joonis 3.** Turba N-sisaldus (keskmine + standardhälve) Puhatu freesturbaväljal erinevatel katsealadel

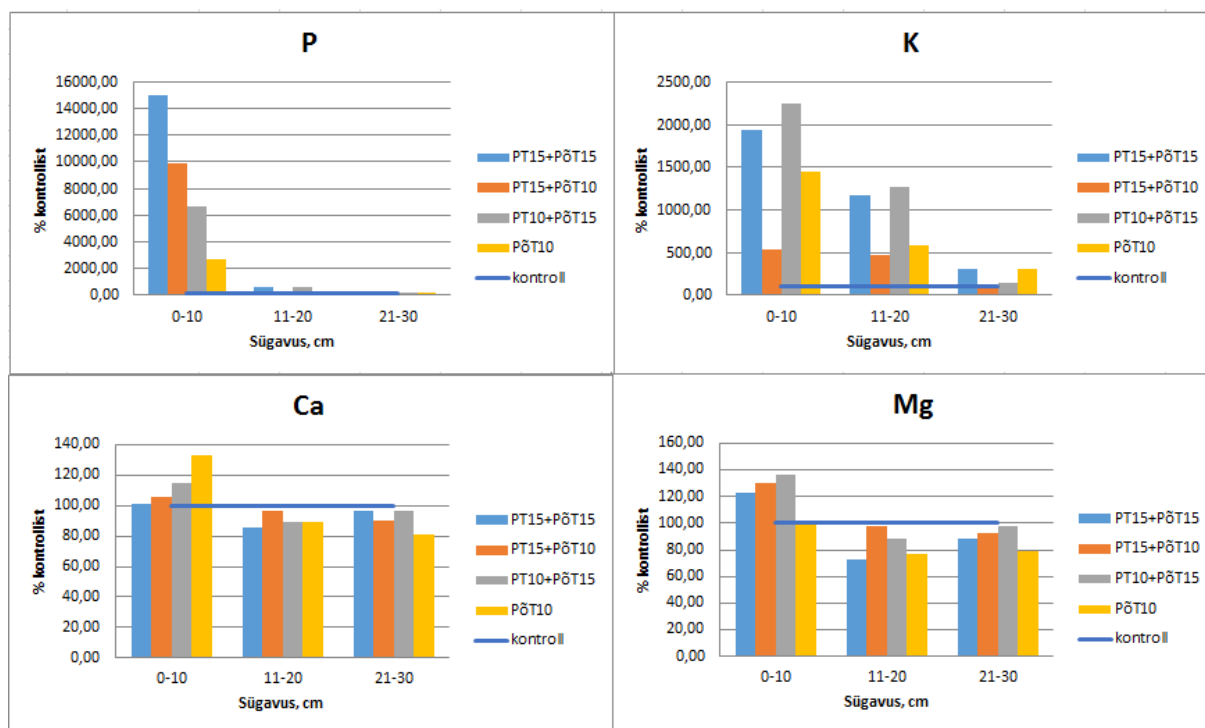
Looduslikes rabades on K ja P sisaldus turbalasundi pindmises kihis turbasammalde kasvust tulenevalt suhteliselt kõrge, kuid väheneb lasundi sügavamates kihtides (Wind-Mulder *et al.* 1996). Kuna freesimisel eemaldatakse pealmised kihid, siis ei toimu enam varude taastamist, sest ei ole enam taimkatet. Taimedele kasvuks on väga oluline K ja P olemasolu, mis on eriti tähtis N omastamiseks. Sageli on just P puudus turbaalades üks tähtsaim puude kasvu piirav tegur (Ots 2013: 19). Kaaliumi defitsiidile viitab männiokaste kolletumine Puhatu jääkturbaaladel (Ots *et al.* 2009: 33).

Tulemused näitavad, et väetatud aladel on P ja K sisaldus turbas oluliselt suurem kui kontrollalal (tabel 5 ja 6). Eriti on see märgatav segutuhkadega väetatud aladel. Fosfori sisaldus kasvas teistega võrreldes kõige rohkem PT15+PõT15 alal, olles 97,4 mg/kg (tabel 5). See on 150 korda suurem kui kontrollalal.

**Tabel 5.** Puhatu jääturba P-sisaldus (mg/kg)

Sügavus, cm						
Ala	0–10		11–20		21–30	
	Keskmine	Standardhälve	Keskmine	Standardhälve	Keskmine	Standardhälve
PT15+PõT15	97,4	19,1	3,1	1,1	0,8	0,0
PT15+PõT10	64,3	15,2	0,9	0,1	0,9	0,1
PT10+PõT15	43,5	14,3	2,9	2,5	0,7	0,1
PõT10	17,6	7,5	0,8	0,1	0,8	0,1
Kontroll ala	0,7	0,1	0,5	0,0	0,5	0,0

Puhatu jääsoos määrati turba P-sisalduseks segutuhaga töödeldud katsealal PT15+PõT10 64,3 mg/kg ja alal PT10+PõT15 43,5 mg/kg, mis on vastavalt 92 ja 67 korda suurem kontrollala näitajatest (joonis 4).



**Joonis 4.** Turba P-, K-, Ca- ja Mg- sisaldus Puhatu freesturbaväljal erinevatel katsevariantidel (% kontrollist)

Joonisel 4 on näha, et P- ja K-sisaldus vähenes turbas sügavuse suurenedes. Kaaliumisisaldus oli turbas peale segutuhkadega väetamist katsealadel PT15+PõT15 ja PT10+PõT15 vastavalt 19 ja 22 korda suurem kui kontrollalal (tabel 6). Head tulemused saadi ka põlevkivituhaga

kogusega 10 t/ha töödeldud alal, kus K-sisaldus turbas oli 357 mg/kg, mis on 14,5 korda suurem kui kontrollalal (tabel 6).

**Tabel 6.** Puhatu jääkturba K-sisaldus (mg/kg)

Sügavus, cm						
Ala	0–10		11–20		21–30	
	Keskmine	Standardhälve	Keskmine	Standardhälve	Keskmine	Standardhälve
PT15+PõT15	476,9	138,6	256,0	31,3	147,9	2,4
PT15+PõT10	133,2	10,4	104,0	3,3	56,7	5,8
PT10+PõT15	554,0	73,8	278,3	16,8	66,6	11,9
PõT10	357,3	46,4	128,0	20,2	146,1	13,4
Kontroll ala	24,6	2,7	22,0	2,4	48,6	5,7

Teistest toitelementidest on suurema tähtsusega taimede elus kaltsium ja magneesium. Kaltsium mõjub hästi eelkõige mulla füüsikalistele ja keemilistele omadustele ning avaldab olulist mõju mullas toimuvatele mikrobioloogilistele protsessidele (Laas 1987: 44). Samuti on Ca tähtis mulla sõmralise struktuuri moodustamisel, parandades samal ajal selle füüsikalisi omadusi. Magneesium omakorda kuulub klorofüllü koostisesse (Miidla 1984).

Kahtlemata on põlevkivituha kõrge positiivse efekti üheks põhjuseks tema Mg-sisaldus, mis on antagonistiks Ca-le. Magneesiumi piisav olemasolu vähendab ühekülgsel lubiväetisega ülelupjamisel tekkinud negatiivseid efekte, näiteks tähtsuse alanemist säilitusorganites. Arvestades, et põlevkivituhk sisaldab mitmeid toiteelemente, võib eeldada, et ta tõstab saake ka karbonaatsetel muldadel. (Hallik 1956: 153, 155)

Antud katses tõusis Ca- ja Mg- sisaldus väetatud turbas. Põlevkivituhaga töödeldud alal PõT10 Ca-sisaldus oli 10942,5 mg/kg (tabel 7), mis on 1,3 korda suurem võrreldes kontrollvariandiga (joonis 4).

**Tabel 7.** Puhatu jääturba Ca-sisaldus (mg/kg)

Sügavus, cm						
Ala	0–10		11–20		21–30	
	Keskmine	Standard-hälve	Keskmine	Standard-hälve	Keskmine	Standard-hälve
PT15+PõT15	8359,4	681,2	7914,2	207,2	9412,6	142,5
PT15+PõT10	8693,3	252,7	8926,2	142,6	8785,7	97,2
PT10+PõT15	9460,6	695,4	8262,8	304,4	9390,7	163,8
PõT10	10942,5	1388,8	8244,6	226,8	7875,3	66,2
Kontroll ala	8246,0	90,3	9245,3	82,5	9744,4	118,3

Magneesiumisisaldus turbas tõusis kõikidel segutuhaga väetatud aladel (joonis 4). Kõige suurem tõus on täheldatav segutuhaga väetatud alal PT10+PõT15, kus Mg-sisaldus 0–10 cm sügavusel turbakihis oli 905,9 mg/kg (tabel 8), mis on 1,4 korda kõrgem kui väetamata alal (joonis 4). Kõige suurem tõus Mg- ja Ca- sisalduses ilmses turba ülemises kihis (0–10 cm) (joonis 4). Sügavuse suurenedes Mg- ja Ca- sisaldus vähenes võrreldes kontrollalaga.

**Tabel 8.** Puhatu jääturba Mg-sisaldus (mg/kg)

Sügavus, cm						
Ala	0–10		11–20		21–30	
	Keskmine	Standard-hälve	Keskmine	Standard-hälve	Keskmine	Standard-hälve
PT15+PõT15	816,8	25,4	695,8	31,8	944,6	40,7
PT15+PõT10	867,1	18,2	937,1	6,6	985,0	9,5
PT10+PõT15	905,9	40,3	845,1	3,5	1044,4	11,4
PõT10	659,5	46,2	741,5	10,0	840,2	13,1
Kontroll ala	664,3	16,2	958,8	4,2	1062,5	14,5

Puhatu ammendatud freesturbaväljal läbi viidud katse tulemused näitavad, et kontrollalal jäi mulla pH endiselt tugevalt happeliseks (pH=4,3), kuid tuhkadega väetatud aladel oli pH tõusnud kuni 1,3 ühiku võrra, olles vahemikus 4,4–5,8. Kõrgeimat pH väärtust täheldati põlevkivituhaga (PõT10) väetatud alal, kus pH tõusis turba pindmises kihis 5,8-ni. Turba N sisaldust tuhkadega väetamine olulisel määral ei mõjutanud. Antud uurimuses suurenes peale väetamist P- ja K-sisaldus turbas. Fosforisisalduse poolest erines segutuhaga töödeldud katsealal PT15+PõT15 kontrollalaga võrreldes 150 korda ja rohkem. Kaaliumisisaldus oli kõrgem segutuhaga töödeldud katsealal PT10+PõT15, olles 22 korda suurem kui kontrollalal. Samuti tõusis nii Ca kui ka Mg sisaldus turbas väetamisega oluliselt. Mulla Ca-sisaldus oli

kõige suurem põlevkivituhaga töödeldud alal PõT10. Magneesiumisisaldus oli kõige suurem segutuhaga väetatud alal PT10+PõT15. Turba sügavuse suurenedes vähenes P- ja K-sisaldus turbas, kuid Ca- ja Mg- sisaldus suurenes.

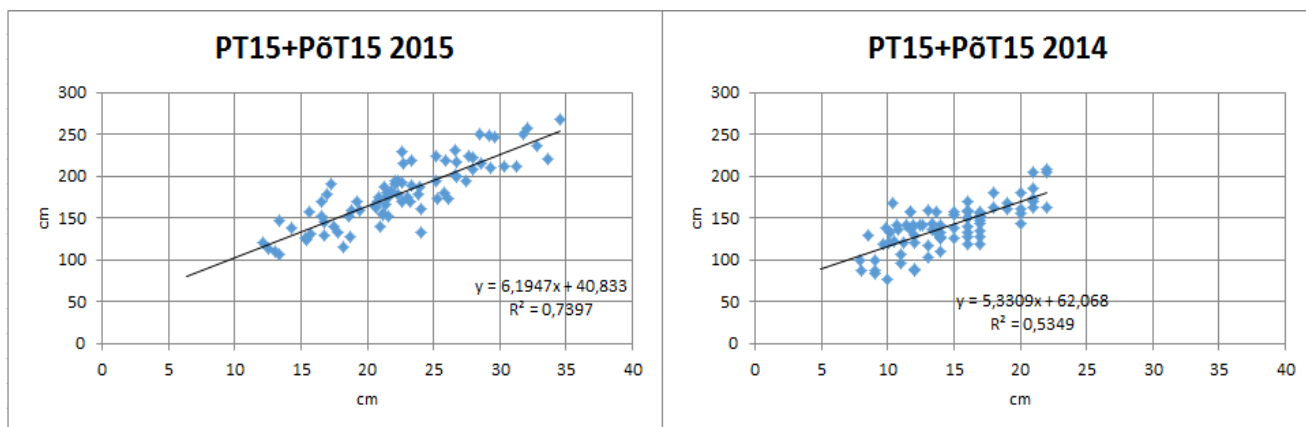
Sarnased tulemused on saadud 2012. aastal Puhatu freesturbaväljal tehtud uurimuses, kus viis kuud peale väetamist tõusis oluliselt turbas P-, K-, Ca- ja Mg- sisaldus (Kikamägi *et al.* 2013: 61).

### 3.2. Kõrguskasvu ja juurekaela diameetri vaheline seos

Teades puude vajadusi kasvukoha kohta, ökoloogilisi iseärasusi ja toitumiskeskkonda on võimalik suunata ja parandada nende kasvu ja arengut (Sibul 2009: 2). Seega, tundes puude suhteid neid ümbritseva keskkonnaga saame nende kasvule kaasa aidata. Senised katsetused Eestis erinevate toitainete rikaste tuhkadega on näidanud, et kaskede kõrguse juurdekasv võib küündida aastas kuni 108 cm-ni, samas kui tuhaga töötlemata alal kasvasid kased maksimaalselt kuni 6 cm aastas (Kikamägi *et al.* 2013: 56). Puhatusse 2013. aasta kevadel rajatud katsealade tulemused näitavad, et kõige produktiivsemaks puuliigiks osutus kask, mille aastane keskmine kõrguse juurdekasv oli vastavalt erinevate katsevariantide puhul 36 cm (PT15+PõT15), 41 cm (PT10+PõT15), 34 cm (PT15+PõT10 ja PõT10) ning kontrollalal 15 cm (Ots 2013: 24).

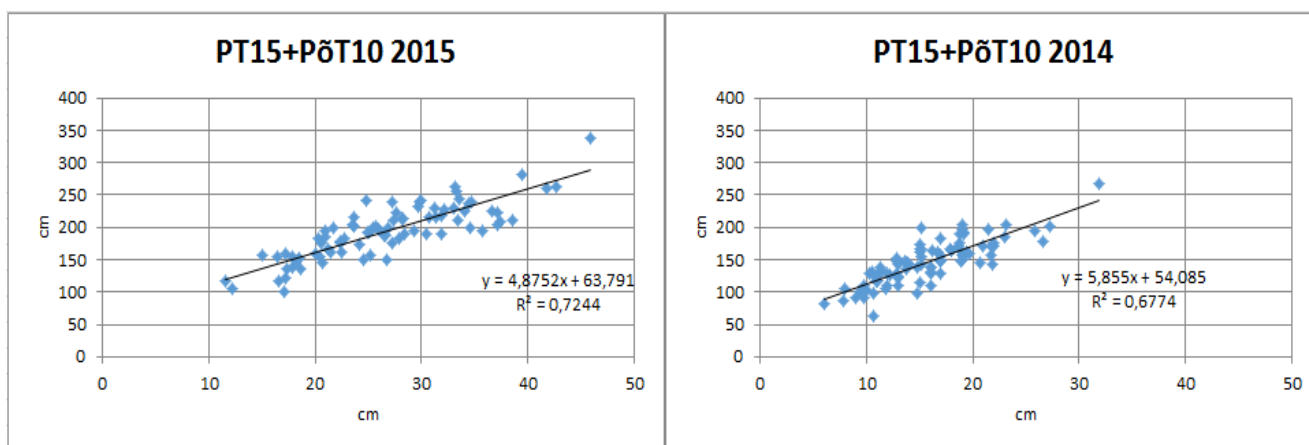
Segutuhkadega rajatud katsealade puude keskmised juurekaela diameetrid olid kasel vahemikus 9,1–11,1 cm (kontrollalal 7,2 cm) (Ots 2013: 27). Kõrguskasvu ja juurekaela diameetri vahelise seose jaoks mõõdeti katselade puude dendromeetrilised tunnused 2014. aastal ja 2015. aastal: puu kõrgus (H) ja juurekaela diameeter (D). Joonistel 5–9 on näha tõusev trend: kõrguskasvu suurenemisel suureneb ka kaskede juurekaela diameeter. Mida lähemal on lineaarne determinatsioonikordaja ( $R^2$ ) absoluutväärtus ühele, seda tugevamalt on tunnused omavahel seotud. 2015. aastal täheldati oluliselt tugevam seos kõrguse ja juurekaela diameetri vahel kui aasta varem. Kõige tugevam seos ilmnes katsealal PT15+PõT15 kasvanud kaskedel, kus  $R^2=0,739$  (joonis 5). 2014. aastal on determinatsioonikordaja  $R^2=0,534$  (joonis 5).



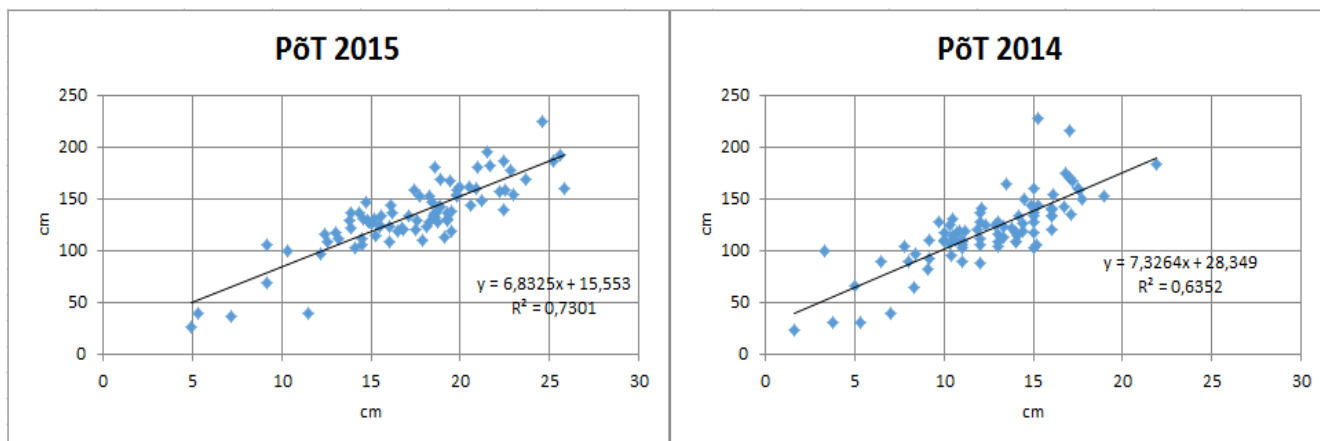


**Joonis 5.** Kaskede kõrguste ja juurekaela diameetrite vaheline seos puu- ja põlevkivituhaga (PT15+PõT15) väetatud alal 2015. ja 2014. aastal

Head tulemused saadi ka segutuhaga väetatud katsealalt PT15+PõT10, kus  $R^2=0,724$  (joonis 6) ja põlevkivituhaga töödeldud katsealal PõT10, kus  $R^2=0,730$  (joonis 7). Võrreldes aastaga 2014 on alal PõT10 seos oluliselt paranenud, katsealadel PT15+PõT10 ja PõT10 alal on determinatsioonikordaja väärtused vastavalt 0,677 ja 0,635 (joonis 6, 7).

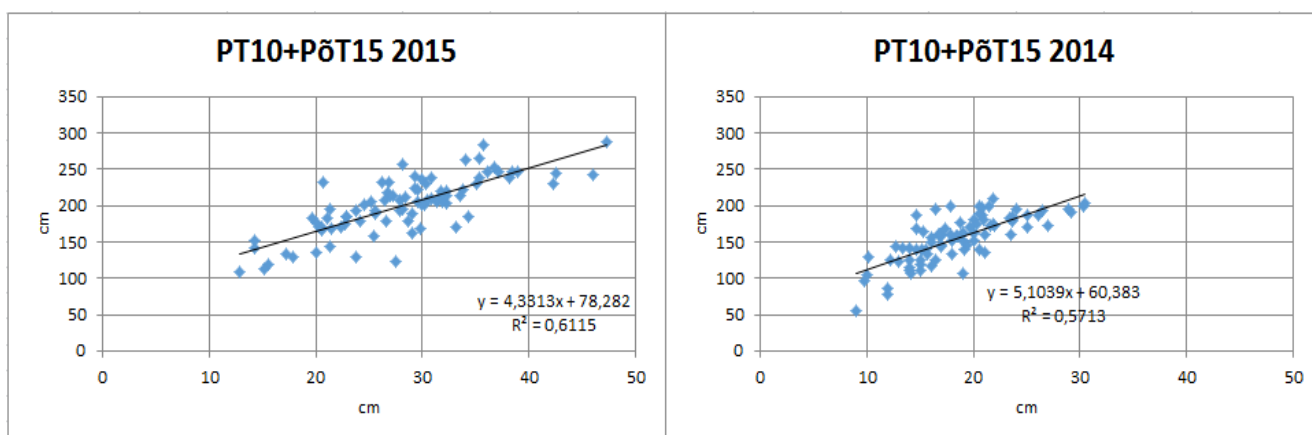


**Joonis 6.** Kaskede kõrguste ja juurekaela diameetrite vaheline seos puu- ja põlevkivituhaga (PT15+PõT10) väetatud alal 2015. ja 2014. aastal

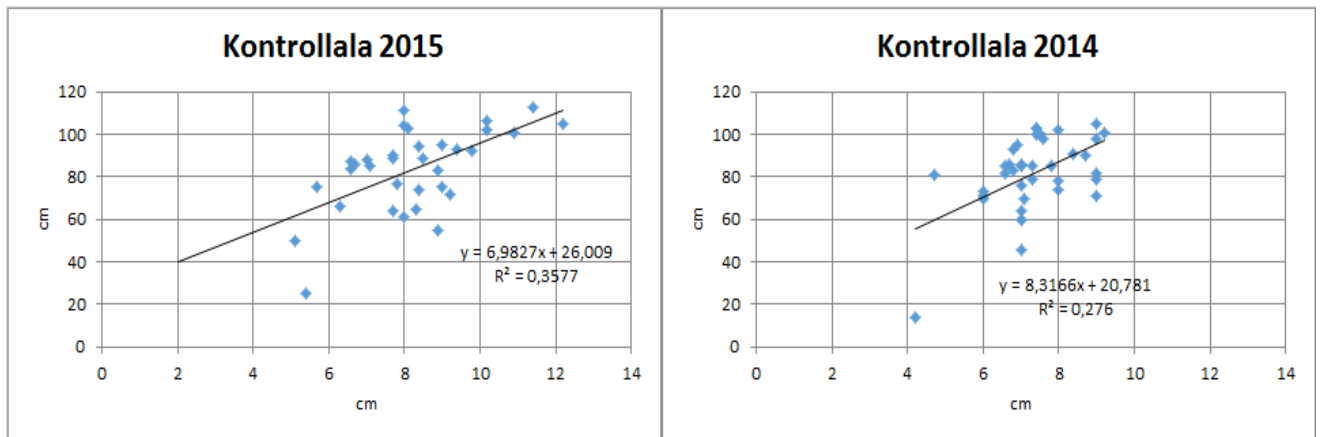


**Joonis 7.** Kaskede kõrguste ja juurekaela diameetrite vaheline seos põlevkivituhaga (PõT10) väetatud alal 2015. ja 2014. aastal

Katsealal PT10+PõT15 on determinatsioonikordaja  $R^2=0,611$  (joonis 8). See seos on kõige nõrgem võrreldes saadud tulemustega teistelt tuhaga töödeldud aladelt. Aastal 2014 oli antud alal determinatsioonikordaja  $R^2=0,571$  (joonis 8).



**Joonis 8.** Kaskede kõrguste ja juurekaela diameetrite vaheline seos puu- ja põlevkivituhaga (PT10+PõT15) väetatud alal 2015. ja 2014. aastal



**Joonis 9.** Kaskede kõrguste ja juurekaela diameetrite vaheline seos kontrollalal 2015. ja 2014. aastal

Kontrollaladel on diameetri ja kõrguse vaheline seos tunduvalt nõrgem (joonis 9) kui väetatud aladel (joonised 5–8).

### 3.3. Assimileeriva pinna, tüve, võrsete ja juurte kuivmass ning biomassi jaotuvus

Mineraalsed ja orgaanilised toitained sisenevad taime organismi lahustunud ühenditena peamiselt juurte kaudu. Mullalahuses esineb alati happeid ning taimede kaudu eritub neid pidevalt juurde. Hapete tõttu lahustuvad mullalahuses ka puhtas vees lahustumatud taimetoitaineid sisaldavad ühendid. (Kalmet *et al.* 1996: 35)

Toitaineid sisaldav lahus paikneb mullasõmerates ja sõmeratevaheline ruumala on täidetud õhuga. Selleks, et taim saaks paremini omastada mullas olevaid toitaineid, peavad taimejuured tiheda võrguna mullasõmeraid ümbritsema, mistõttu peab taimel olema nii pindmiselt kui ka sügavuti hästi väljaarenenud juurestik. Eeltoodust tulenevalt langebki taime üldisest massist suur osa (1/4–1/3) juurestiku arvele. Kindlasti avaldab juurestiku arenemise ulatusele ning paiknemisele mullas suurt mõju mullas sisalduvate toitainete olemasolu ja kontsentratsioon, ilmastik ja üldised kasvutingimused. (Kalmet *et al.* 1996: 35)

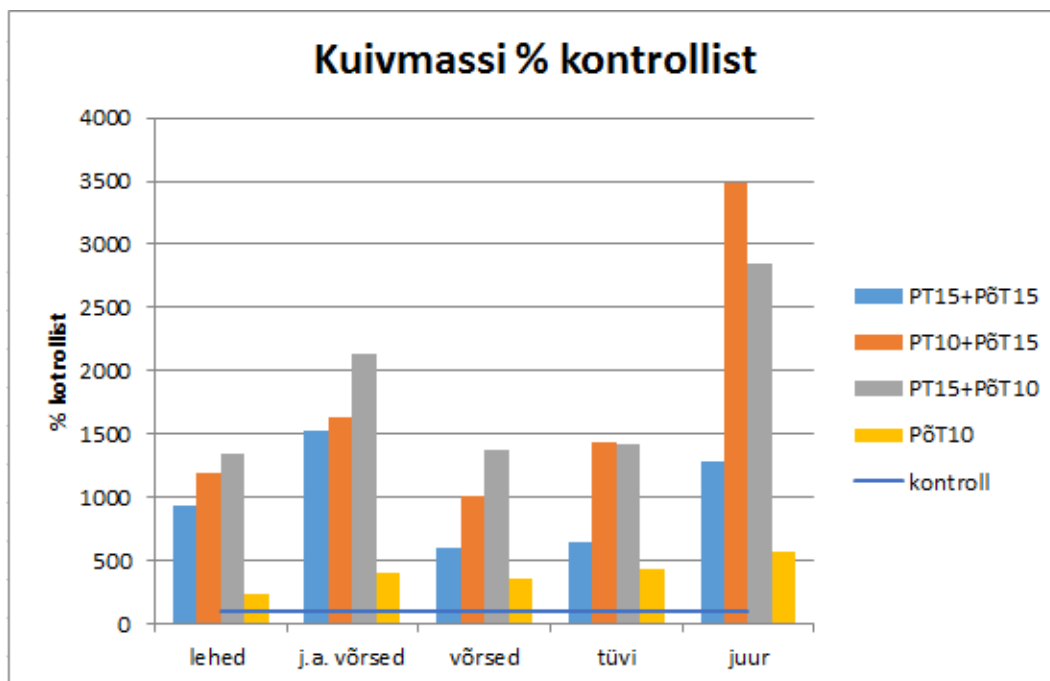
Taime normaalseks kasvuks piisab, kui kogu juure kavast on ainult väike murdosa kontaktis toitainega. Toitelementi sisaldava ühendiga kontakti sattunud juurte omastamisvõime suureneb mitmekümnekordseks ning tulemuseks on kogu taime häireteta kasv, vaatamata

sellele, et ainult väike osa juurestikust otseselt võtab osa taime varustamisest vastava toitainega. (Hallik 1956: 208)

Taastuvate energiaallikate kasutamine soojusenergia saamiseks on viimastel aastatel märgatavalt tõusnud. Suurenenud vajadus puidu biomassi järele sunnib otsima puistute kasvu kiirendavaid meetodeid. Puidu kiirema ja suurema biomassi produktsiooni saavutamiseks sobivad freesturbaväljadel toitaineterikkad lubiväetised.

Katsepuud istutati 2013 aastal ning katse aja jooksul kasvasid puud jõudsalt. Biomassi formeerumise analüüsimiseks kaevati 2015. aasta septembris välja 3 mudelpuud igalt katsetöötlaste alalt ja tuhaga töötlemata kontrollalalt. Laboris mõõdeti mudelpuude kõrgus (lisa 1), juurekaela diameeter ja seejärel puud jaotati fraktsioonidesse (lisa 2). Kõik fraktsioonid (tüvi, oksad, jooksva aasta võrsed, lehed, juured) kaaluti. Iga mudelpuu erinevate fraktsioonide kuivmassid arvutati kogu puu kuivmassi põhjal. Lisas 3 on toodud foto biomassi kaalumisest.

Tabelis 9 on esitatud ülevaade põlevkivituhaga, põlevkivi- ja puutuha seguga ning kontrollvariandi kaskede erinevate fraktsioonide biomassidest. Võib öelda, et mulla ühekordne põlevkivituhaga ning põlevkivi- ja puutuha seguga töötlemine stimuleeris puude biomassi produktsiooni oluliselt. Läbiviidud katse tõestas, et jääksoo pinna töötlemisel tuhaga suureneb assimileeriva pinna, tüve, võrsete ja juurte mass (joonis 10). Arukase keskmine juure kuivmass oli suurim segutuhaga PT10+PõT15 väetatud alade puudel, olles 718,4 g (tabel 9), mis on 35 korda suurem kontrollala arukase keskmisest juure massist (joonis 10). Segutuhaga PT15+PõT10 väetamine mõjus samuti positiivselt, alal kasvanud kaskede juuremass oli 28,5 korda suurem kontrollala puude keskmise juuremassiga võrreldes (joonis 10). Ainult põlevkivituhaga töödeldud alal oli puude keskmine juure kuivmass 118,1 g (tabel 9), mis moodustab 573% kontrollala puude vastavast näitajast (joonis 10).



**Joonis 10.** Kase erinevate fraktsioonide kuivmassi % kontrollist

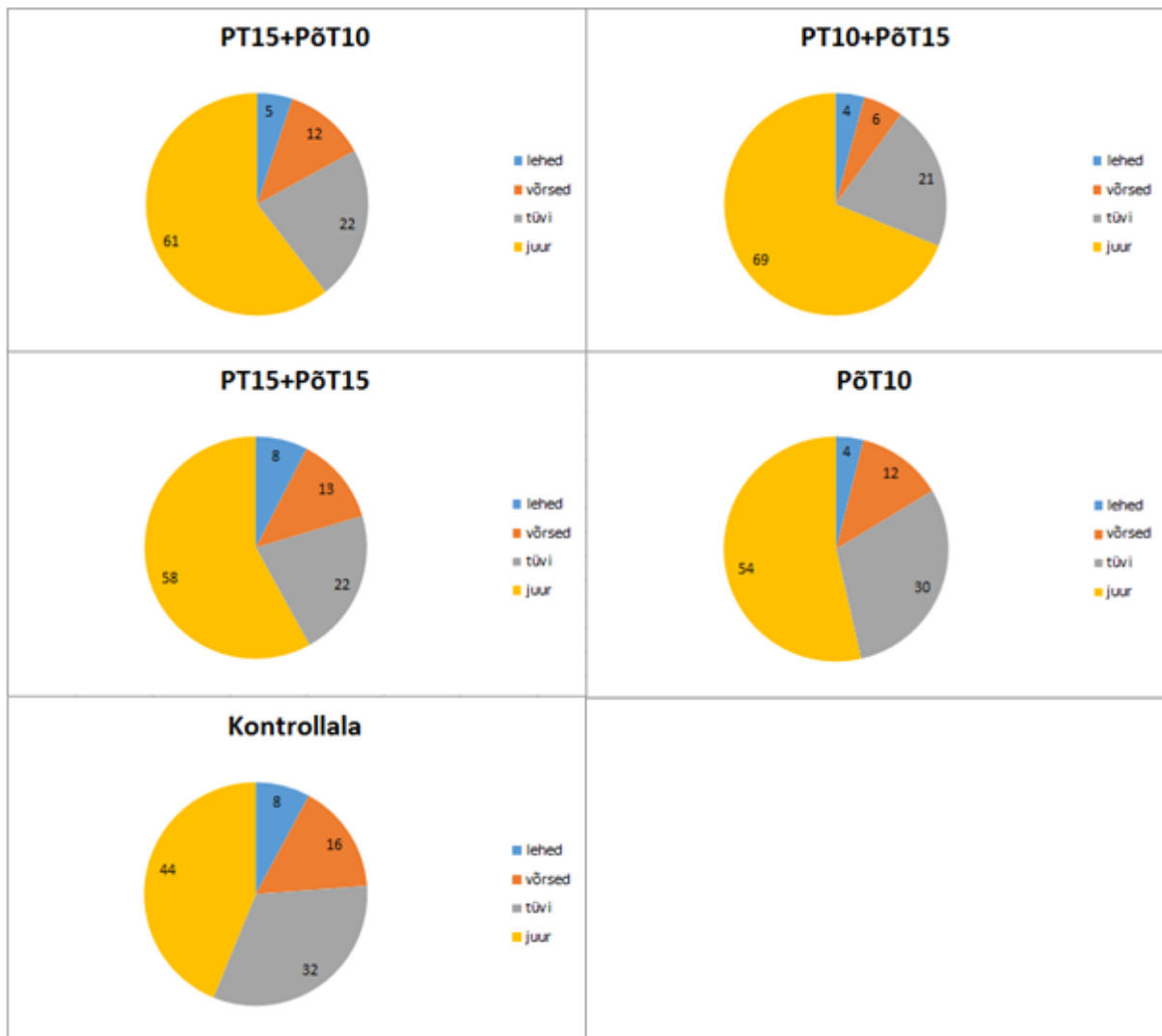
Puu- ja põlevkivituhk sisaldavad puude kasvuks vajalikke toitaineid. Kasutades toitainerikkad tuhkasid ammendatud freesturbaväljadel saavutatakse märgatav puude kogu maapealse biomassi juurdekasv. Kuna tuhas sisaldub rohkesti P ja K, siis nende mõjul toimub taimede õigeaegne valmistumine talvekülmadeks (Kikamägi, Ots 2010).

Uuring näitas, et segutuhkadega väetamine mõjub väga hästi puu jooksva aasta võrsete massi formeerumisele. Võrsete aastane juurdekasv väetatud aladel moodustades 1500–2100% kontrollala puude võrsete massist (joonis 10). Parim tulemus on saadud segutuhaga PT15+PõT10 väetatud katsealal, jooksva aasta võrsete kuivmass oli 31,9 g (tabel 9).

**Tabel 9.** Katsepuude keskmine kuivmass grammides

Katseala	Lehed, g	Jooksva aasta võrsed, g	Võrsed, g	Võrsed kokku, g	Tüvi, g	Jooksva aasta latv, g	Tüvi kokku, g	Juur, g	Kogu puu mass, g
PT15+PõT15	34,8	22,8	36,1	58,9	97,9	1,1	99,0	266,4	459,1
PT10+PõT15	44,2	24,4	60,4	84,8	218,2	1,8	220,0	718,4	1067,4
PT15+PõT10	50,0	31,9	83,0	114,9	215,3	1,9	217,2	586,7	968,8
PõT10	8,7	6,0	21,3	27,4	65,7	0,7	66,4	118,1	220,6
Kontrollala	3,7	1,5	6,0	7,5	13,3	2,0	15,3	20,6	47,1

Peale turba töötlemist tuhkadega on näha, et arukaskedel moodustab suurema osa kogu puu biomassist juur, eriti segutuhkadega PT10+PõT15 ja PT15+PõT10 väetatud katsealadel kasvanud puudel (vastavalt 69% ja 61%) (joonis 11), kus juure kuivmass on vastavalt 1067,4 g ja 968,7 g (tabel 9). Head tulemused on saadud ka segutuhaga PT15+PõT15 ja põlevkivituhaga PõT10 väetatud katsealal, kus keskmine juurte biomass on vastavalt 58% ja 52% kogu puu biomassist (joonis 11). Kontrollalal on arukasel suurema kuivmassiga tüvi ning juured (joonis 11).



**Joonis 11.** Arukase biomassi jaotuvus erinevatel katsealadel

Arvestades puu kogumassiks 100%, jaotub puude keskmine kuivmass järgmiselt: esimesel kohal on juured, teisel tüvi, kolmandal võrsed ja viimasel kohal on lehed. Segutuhkadega väetatud katsealadel moodustab tüve biomass 21–22% kuivmassist (joonis 11).

Põlevkivituhaga väetatud alal on tüve osa biomassist suurem (30%) võrreldes segutuhkadega väetatud aladel ja sarnaneb väga kontrollala tüve biomassi jaotuvusega (32%) (joonis 11). Tabelil 9 on näha, et väetamine segutuhkadega ja põlevkivituhaga suurendab puude tüve massi võrreldes kontrollala puudega. Keskmise tüve kuivmass oli kõrgeim segutuhkadega PT10+PõT15 ja PT15+PõT10 väetatud alade puudel, olles 220 g ja 217,2 g, mis on 14,4 ja 14,2 korda suurem kontrollala puude keskmisest tüve kuivmassist. Ka segutuhaga PT15+PõT15 väetatud alal täheldati suurt kase tüve kuivmassi, olles 99,0 g, mis on 6,5 korda suurem kontrollala kase keskmisest tüvi kuivmassist. Põlevkivituhaga töödeldud alal oli kase keskmine tüve kuivmass 4,3 korda suurem kui kontrollalal, olles 66,4 g.

Segutuhkadega ja põlevkivituhaga väetamise positiivne mõju avaldus ka võrsete biomassis. Segutuhkadega PT15+PõT15 ja PT15+PõT10 ning põlevkivituhaga PõT10 väetatud aladel on võrsete osaterve puu biomassist sarnane kontrollalaga (16%), olles vastavalt 13%, 12% ja 12% (joonis 11). Segutuhaga PT10+PõT15 väetatud katsealal ilmnes, et võrsete biomass moodustab ainult 6% kogu puu massist (joonis 11). Võrsete biomass väetatud katsealadel varieerus 27,4–114,9 g ja kontrollala oli võrsete biomass 7,5 g (tabel 9). Kõige produktiivsemat võrsete kasvu täheldati segutuhaga PT15+PõT10 väetatud alal, kus võrsete kuivmass oli 114,9 g, mis on 15,3 korda suurem kui kontrollalal. Hea tulemus saadi ka segutuhaga PT10+PõT15 väetatud alalt, kus võrsete kuivmass oli 84,8 g. Võrreldes teiste väetatud aladega oli põlevkivituhaga PõT10 töödeldud alal kaskedel võrsete biomass märkimisväärselt väike, olles vaid 27,4 g, mis on 3,7 korda suurem kui kontrollala puude võrsete biomass.

Katse näitas, et kõige jõudsamat võrsete juurdekasvu ühe aasta jooksul täheldati segutuhaga PT15+PõT10 väetatud alal, olles 31,9 g ja kontrollalal vaid 1,5 g (tabel 9). Aastane keskmine kaskedevõrsete juurdekasv segutuhaga PT10+PõT15 väetatud alal oli 24,4 g. See on 16,3 korda suurem kui kontrollala puude vastav näitaja ja sarnane segutuhaga PT15+PõT15 väetatud alal saadud tulemusele, kus jooksva aasta võrsete kuivmass oli 22,8 g.

Kõige väiksema osa biomassist moodustavad lehed. Segutuhaga PT15+PõT15 väetatud alal moodustasid lehed 8% kogu puu biomassist (joonis 11), olles sarnane kontrollalalt saadud tulemustele (joonis 11). Segutuhkadega PT15+PõT10 ja PT10+PõT15 ning põlevkivituhaga PõT10 väetatud katsealadel moodustasid lehed 4% kogu puu biomassist (joonis 11).

Põlevkivituhk ning põlevkivi- ja puutuha segu on avaldanud üldkokkuvõttes puude kasvule ja biomassi formeerumisele stimuleerivat toimet. Saadud tulemuste põhjal võime järeldada, et kontrollalaga võrreldes olid kõigi kaalutud fraktsioonide (tüvi, oksad, jooksva aasta võrsed,

lehed, juured) biomassid suuremad väetatud aladel. Kõige tagasihoidlikum tulemus on saadud ainult põlevkivituhaga väetud katsealal. Parim tulemus on saadud puu- ja põlevkivituhaga PT10+PõT15 ja PT15+PõT10 väetatud aladel. Segutuhkadega PT10+PõT15 ja PT15+PõT10 töödeldud alal on puude keskmine biomass 21,6 korda suurem kontrollalal puude kuivmassist. Biomassi jaotavuse analüüs näitas, et segutuhkadega väetamine mõjus kõige paremini juurte biomassile. Kikamägi *et al.* (2014) uurimuses saadi sarnane tulemus, kus juurte biomass moodustas võrreldes teiste fraktsioonidega suurim osa kogu puu kuivmassist.

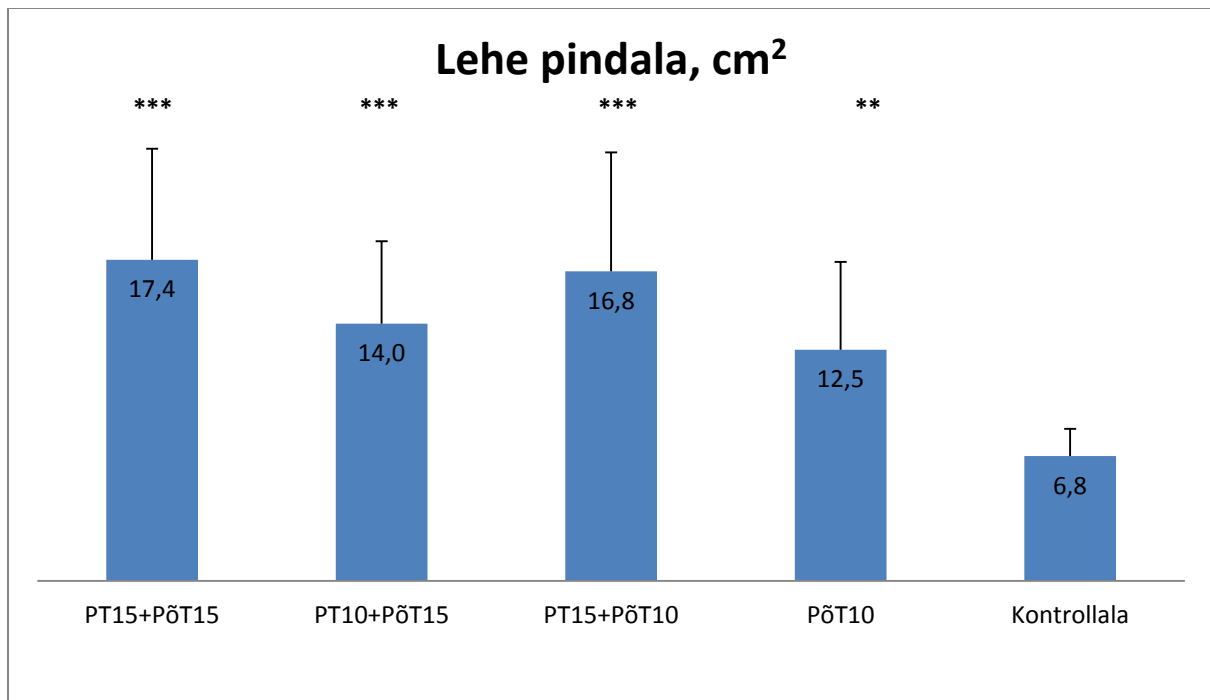
### 3.4. Kaselehe pindala

Puu lehepindala suurenemisel toimuvad fotosünteesi protsessid intensiivsemalt ning suureneb ka taimede assimilatsioonivõime (Miidla 1984). Väetiskatsete puhul ilmneb väetamise esmane positiivne mõju assimilatsiooniorganite pindala olulises suurenemises. Puhatu mahajäetud turbatootmisalal täheldati väetamisel puutuha ning segutuhaga positiivset mõju mitte ainult biomassi formeerumisele vaid ka puude lehepindala kasvule, kuna lehed reageerivad hästi toitekeskkonna muutumisele (Ots 2013: 28).

Herbariseeritud ja hiljem skänneritud kaselehtede analüüs näitas, et kase lehelaba pindala on 2015 aastal kõige suurem tuhkadega töödeldud aladelkasvanud kaskedel (joonis 12). Statistiliste erinevuste arvutamiseks kasutati *t*-testi. Selle tulemusel selgus, et alal PT15+PõT15 kasvavate kaskede lehepindala on kontrollalal puudelehtedega võrreldes statistiliselt usaldatavalt suurema pindalaga (joonis 12). Seega on väetamine oluliselt parandanud kaselehtede kasvu. Puu- ja põlevkivituhaga seguga PT15+PõT15 väetatud alal on kaselehe pindala 2,6 korda suurem kui kontrollalal kasvanud kaskedel (joonis 12).

Võrreldes omavahel segutuhaga PT10+PõT15 töödeldud alal ja kontrollalal kasvanud kaskedel lehepindala andmeid ilmnes, et väetamine on statistiliselt oluliselt ( $p=0,0004$ ) suurendanud lehe kasvu: kase lehelaba suurus on segutuhaga töödeldud alal ligikaudu kaks korda suurem kui väetamata alal (joonis 12).





**Joonis 12.** Keskmise kaselehe pindala

Katsealalt PT15+PõT10 ja kontrollalalt kogutud lehtede andmete võrdlemisel selgus, et selline segutuha kombinatsioon mõjutab positiivselt kaselehe kasvamist: kase lehelaba on 2,5 korda suurem kontrollala puude lehtede mõõtmetest (joonis 12). Seega mõjub paremini kase lehe kasvule puu- ja põlevkivituhaga segu. Võrreldi põlevkivituhaga PõT10 töödeldud katsealal ja kontrollalal kasvanud puude lehepindala andmeid. Nenede andmete *t*-testi analüüsi tulemus näitas, et PõT10 alal kasvavate kaskede lehepindala on võrreldes kontrollala puude andmetega statistiliselt usaldatavalt ( $p=0,0095$ ) suurema pindalaga ehk põlevkivituhaga väetamine on oluliselt parandanud kaselehtede kasvu. Võrreldes väetamata alal kasvanud kaskede lehe pindalaga on põlevkivituhaga väetatud alal kase lehe pindala suurem kontrollist 1,8 korda (joonis 12).

Kokkuvõtteks võib öelda, et põlevkivituhaga ja segutuhaga väetatud puude lehepindala näitajad olid keskmiselt 2,2 korda suuremad kui kontrollalal.

Varem läbiviidud uuringud Puhatu freesturbaväljal 2011. ja 2012. aastal näitasid, et pärast väetamist täheldati kõige suurema lehepindalaga kaski puutuhaga kogusega 15 t/ha ja segutuhaga (puutuhk kogusega 10 t/ha ja põlevkivituhk kogusega 8 t/ha) töödeldud katse aladel (Ots 2013: 28).

## KOKKUVÕTE

Antud töös ilmnes, et toitaineterikka põlevkivituha ning puu- ja põlevkivituha segu kasutamine tõstab oluliselt jääksoode korrastamise õnnestumist metsastamise teel ja suureneb nende alade looduslik mitmekesisus, aga ka keskkonnakaitseline ja majanduslik väärtus.

Puhatu jääkturbal saadud tulemused näitavad, et võrreldes kontrollalaga tõusis turba pH reaktsioon kõikidel katsealadel, millega tekkis istutatavatele puittaimedele sobivam kasvupinnas.

1. Väetamise tagajärjel muutus mulla reaktsioon neutraalsema suunas. Väetatud aladel tõusis mitmete mineraalelementide sisaldus märgatavalt, eriti kaaliumi- ja fosforisisaldus. Eriti märgatav on see segutuhkadega PT15+PõT15 ja PT10+PõT15 väetatud aladel, kus fosforisisaldus on vastavalt 150 korda ja 67 korda suurem kontrollala näitajatest. Kaaliumisisaldus oli turbas peale väetamist segutuhkadega PT15+PõT15 ja PT10+PõT15 vastavalt 19 ja 22 korda suurem kui kontrollalal. Antud katses tõusis ka kaltsiumi ja magneesiumi sisaldus väetatud turbas.
2. Kõige tugevamad kõrguskasvu ja juurekaela diameetrite vahelised seosed ilmsesid segutuhaga väetatud katsealadel PT15+PõT15 ja PT15+PõT10 ning põlevkivituhaga töödeldud katsealal PõT10 kasvanud kaskedel.
3. Arukase suurimat biomassi produktsioon täheldati katsealadel PT10+PõT15 ja PT15+PõT10. Põlevkivituhaga väetatud alal olid tulemused palju tagasihoidlikumad võrreldes puu- ja põlevkivituha segutöödeldud aladega.
4. Uurimuses selgus, et jääksoo pinnase väetamine puutuha ning puu- ja põlevkivituha seguga mõjub positiivselt puude assimilatsioonorganite kasvule ja pindalale. Kase lehelaba pindala on kõige suurem katsealadel PT15+PõT15 ja PT15+PõT10 kasvanud kaskedel.

Antud töös saadud tulemustele tuginedes võib öelda, et kasutades freesturbaväljadel arukase kasvatamiseks puu- ja põlevkivituha segu saadakse paremaid tulemusi kui kasutades puhast põlevkivituhka. Saadud tulemustele tuginedes võib järeldada, et segutuhk (puutuhka 15 t/ha ja põlevkivituhka 15 t/ha) on kõige efektiivsem kase kasvatamiseks Puhatu mahajäetud turbatootmisalal.

Töös tehtud järeldused on olulised toitainevaestel freesturbaväljadel kasvavate metsapuude kasvutingimuste parandamiseks. Saadud tulemusi saab kasutada teiste jääksoode metsastamisel.

## SUMMARY

This work demonstrated that the usage of nutrient-rich mixture of wood ash and oil shale ash as fertilizer could be useful for afforestation of cutaway peatlands; results can have positive environmental protection and economic value.

These results from Puhatu cutaway peatland showed the increase of the substrate pH compared to the control plot, creating appropriate conditions for seedlings growth.

1. After fertilisation acidic peat soils became more neutral. The teated substrate had higher concentrations of mineral components, especially content of potassium and phosphorus. Increase was especially noticeable on mixture ash PT15+PöT15 and PT10+PöT15 fertilised plots, where concentration of phosphorus was 150 and 67 times higher compared to the control area. The concentration of potassium in the mixture ashes PT15+PöT15 and PT10+PöT15 treatment plots is accordingly 19 and 20 times higher than on control. An increase in Ca and Mg content was found in all fertilised plots.
2. The strongest relationship between hanges in height growth and root collar diameters is noticed on the plots teated with mixture ash PT15+PöT15 and PT15+PöT10 and on pure oil shale ash PöT10 plots.
3. The biggest biomass production of silver birchis was shown on the plots PT10+PöT15 and PT15+PöT10. Results of oil shale ash fertilised plots are more modest compared to mixture of wood ash and oil shale ash.
4. Fertilisation with oil shale ash and mixture of oil shale ash and wood ash had positive effect on the growth of assimilation organs and their surface area on cutaway peatlands. The strongest effect on silver birch leaf area is on trees grown on PT15+PöT15 and PT15+PöT10 fertilised plots.

Based on the results of this workit can be said that using wood and oil shale ash mixture on a cutaway peatland to promote silver birch growth is more effective than using pure oil shale ashes.

Conclusions made from this work are important for improving growth conditions of forest trees on nutrient-poor cutaway peatlands. Received results can be used for afforestation of ohter cutaway peatlands.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Aaloe, A., Bauert, H., Soesoo, A.** (2006). Kukersiit- Eesti põlevkivi. Tallinn: MTÜ GEOGuide Baltoscandia. 36 lk.
2. **Aarna, A.** (1989). Põlevkivi. Tallinn: Valgus. 142 lk.
3. **Anttila, P., Frey, T., Ojanen, M., Puhakka, M., Vuorisalo, T.** (1996). Globaalsed Keskkonnaprobleemid. Tartu: Eesti Loodusfoto. 208 lk.
4. **Arro, H., Prikk, A., Pihu, T.** (2002). Balti elektrijaama tuhaväljade keskkonnaohtlikkuse vähendamine. *Keskkonnatehnika ajakirja kodulehekülg*. [e-ajakiri] [http://www.keskkonnatehnika.ee/arhiiv/2002/4\\_2002/arro.htm](http://www.keskkonnatehnika.ee/arhiiv/2002/4_2002/arro.htm) (12.12.2015).
5. **Bachmann, M., Ilp, R., Ilves, A., Kilk, K., Kopti, M., Leies, E., Loorents, K., Metusala, T., Nõgene, M., Sipelgas, K., Sirkel, E., Sokmann, T., Tammiksaar, E., Vennik, E., Vseviov, D.** (2014). Kukersiit ja konnatahvel: Meie energia lugu. Tallinn: Motor. 206 lk.
6. **Callesen, I., Ingerslev, M., Raulund-Rasmussen K.** (2007). Dissolution of granulated wood ash examined by in situ incubation: Effects of tree species and soil type. *Biomass and Bioenergy* 31, lk 693–699
7. **Elm, K.** (2013). Puutuha ning puu- ja põlevkivi segutuha mõju puude maapealse ja maaaluse biomassi formeerumisele ammendatud freesturbaväljadel. (Magistritöö). Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu.
8. **Gaškov, A.** (2011) Mida põlevkivituhast tegelikult teha annaks ja võiks? –*Forte delfi kodulehekülg*. [e-ajaleht] <http://forte.delfi.ee/archive/mida-polevkivituhast-tegelikult-teha-annaks-ja-voiks?id=56067684> (11.12.2015).
9. **Hallik, O.** (1956). Väetised ja nende kasutamine. Tallinn: Eesti Riiklik Kirjastus. 271 lk.
10. **Hansalu, L.** (2016). Eesti Energia hakkab põlevkivituhast tehtud väetist müüma. – Postimehekodulehekülg. [e-ajaleht] <http://majandus24.postimees.ee/3664167/eesti-energia-hakkab-polevkivituhast-tehtud-vaetist-muuma> (21.04.2016).
11. **Hytönen, J., Aro, L.** (2012). Biomass and nutrition of naturally regenerated and coppiced birch on cutaway peatland during 37 years. *Silva Fenn.* 46, lk 377–394.
12. **Isakar, M.** (2011). Põlevkivi. –*TÜ geoloogiamuuseumi kodulehekülg*. [on-line] <http://www.ut.ee/BGGM/maavara/pqlevkivi.html> (13.12.2015).
13. **Jefimova, J.** (2015). Polütsükliiliste aroamatsete süsivesinikke (PAH-ide) ja raske metallide leostus põlevkivitöötlemise jäätmetest ja põlvkivi jäätmete – põhinevatest produktidest. (Doktoritöö). Tartu Ülikooli keemia instituut. Tartu.
14. **Kalmet, R., Kanger, J., Kevvai, L., Kevvai, T., Kuldkepp, P., Kärblane, H., Raudväli, E., Turbas, E.** (1996). Taimede toitumise ja väetamise käsiraamat. Tallinn: Eesti Vabariigi Põllumajandusministeerium. 283 lk.
15. **Kattai, V.** (2003). Põlevkivi – õlikivi. Tallinn: Eesti Geoloogiakeskus. 170 lk.

16. Keskkond. (2015). – *Eesti Energia kodulehekülj*. [on-line] <https://www.energia.ee/et/keskkond> (12.12.2015).
17. KIK projekt nr. 47. (2006). Jääsoode turba toiteelementide bilansi tasakaalustamine ja puude kasvu stimuleerimine biokütuste tuhkadega (puu- ja turbatuhk). Projekti nr. 47 „Puutuha kasutamise võimalused metsanduses“. Täitja: EMÜ metsandus- ja maaehitusinstituut.
18. **Kikamägi, K., Ots, K.** (2010). Puittaimede kasvu stimuleerimine erinevate biokütuste (puit, turvas) tuha liikidega ammendatud freesturbaväljadel. – *Metsanduslikud Uurimused (Forestry Studies)*. Nr 52. lk 60–71.
19. **Kikamägi, K., Ots, K., Kuznetsova, T., Pototski, A.** (2013). The growth and nutrients status of conifers on ash-treated cutaway peatland. – *Trees – Structure and Function*, lk 53-64.
20. **Kuusik, R., Uibu, M., Kirsimäe, K., Mõtlep, R., Meriste, T.** (2012). Open-air deposition of Estonian oil shale ash: formation, state of art, problems and prospects for the abatement of environmental impact. *Oil Shale*, 29(4). lk 376–403.
21. **Kärblane, H.** (1996). Lubiväetiste kasutamine ja lupjamistehnoloogia areng. Rmt-s: Taimede toitumise ja väetamise käsiraamat. Tallinn, EV Põllumajandusministeerium, lk 86-89.
22. **Laas, E.** (1987). Dendroloogia: Teine, ümbertöötatud trükk. Tallinn: Valgus. 824 lk.
23. **Lahtvee, V.** (2003). Ohtlikud ained Eesti keskkonnas. Tartu: Tartu Ülikooli Kirjastus. 249 lk.
24. Maa-ameti Geoportaal [on-line] [https://xgis.maaamet.ee/maps/XGis?app\\_id=UU82A&user\\_id=at&LANG=1&WIDTH=1620&HEIGHT=985&zlevel=0,5919559,2736204](https://xgis.maaamet.ee/maps/XGis?app_id=UU82A&user_id=at&LANG=1&WIDTH=1620&HEIGHT=985&zlevel=0,5919559,2736204)
25. Maapõuaseadus. (2015). (vastu võetud 23.11.2004, redaktsiooni jõustumise 17.07.2015) – *Riigi Teataja*. [on-line] <https://www.riigiteataja.ee/akt/MaaPS>
26. **Miidla, H.** 1984. Taimefüsioloogia. Tallinn, Valgus, 424 lk.
27. **Moilanen, M., Saarsalmi, A., Kukkola, M., Issakainen J.** (2013). Effects of stabilized wood ash on nutrient status and growth of Scots pine – Comparison between uplands and peatlands. *Forest Ecology and Management*, 295. lk. 136–144
28. **Mõtlep, R.** (2012). Mis jääb põlevkivist järele? – *Eesti Loodus ajakiri kodulehekülj*. [e-ajakiri] <http://www.eestiloodus.ee/uudised313.html> (06.12.2015).
29. **Möldre, I.** (2014). “Energiamajanduse arengukava aastani 2030” keskkonnamõju strateegiline hindamine. – Aruanne. – *Eesti Arengufond*.
30. **Ots, K., Kikamägi, K., Kuznetsova, T.** (2009). The ecological status of Puhatu cutover peatland. – *Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused* 51, lk 28–39.
31. **Ots, K.** (2013). Ida-Virumaa ammendatud freesturbaväljade turba toiteelementide bilansi tasakaalustamine ja puude kasvu stimuleerimine põlevkivituha ning põlevkivi- ja puutuha seguga. Tallinn: KIK metsanduse programmi 2012. aasta projekti nr. 3708.

32. **Pototski, A., Karu, V., Pastarus, J.** (2012). TalveAkadeemia 2012: Kaevandamisel tekkivate jääkide taaskasutamine – samm ressursi paremaks kasutamiseks. Kaevandamine ja keskkond (2012). Tallinn: TTÜ Mäeinstituut, lk. 193 - 199
33. Põlevkivi kasutamise riiklik arengukava 2016-2030. (2015). Tallinn: Keskkonnaministeerium. 140 lk.
34. **Ramst, R., Orru, M., Salo, V., Halliste, L.**(2006). Eesti mahajäetud turbatootmisalade revisjon: 2. etapp. Ida-Viru, Lääne-Viru, Jõgeva, Järva ja Tartu maakond. Tallinn: OÜ Eesti Geoloogiakeskus, rakendusgeoloogia ja maavarade osakond. 239 lk.
35. Riigi jäätmekava 2014–2020. (2014). Tallinn: Keskkonnaministeerium. 94 lk.
36. **Saarsalmi, A., Mälikönen, E., Kukkola, M.**(2001). Effects of wood ash fertilization on forest soil chemical properties. *Silva Fennica*.Nr 35, lk 355–368.
37. **Seemen, H., Pikk, J., Valk, U.** (2000). Unikaalne metsanduslik katseala Rae rabas. Akadeemilise Metsaseltsi Toimetised XII. Töid Eesti metsanduse ajaloost III . Tartu. lk 95–112.
38. **Sibul, I.** (2009). Dendroloogia üldkursus. (Lehtpuude ja -põõsaste lühikonspekt 2007-2010.) Metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu.
39. Statistikaamet. (2015). Säästva arengu näitajad. Tallinn: Statistikaamet. 153 lk.
40. **Tamm, K.** (2015). Põlevkivituhk – kas keskkonnasaastaja või taskukohane tooraine? *TööstusEST*. Nr 3. lk 40-41.
41. **Terasmaa, T., Pikk, J.** (1995). Liming with powdered oil-shale ash in a heavily damaged forest ecosystems. The effect on forestconditionin a pinestand. *Proceedings of the EstonianAcademy of Sciences*. Nr5. lk 77-84.
42. **Terasmaa, T., Sepp, R.** (1994). Liming with powdered oil-shale ash in a heavily damaged forest ecosystem. 1. Theeffect on forestsoilsin a pinestand. *Proceedings of theEstonianAcademy of Sciences. Ecology*. Nr 4, lk 101–108
43. Tuha ja killustiku müük. –*Eesti Energia kodulehekülg*. [on-line] <https://www.energia.ee/tuha-killustiku-myyk> (12.12.2015).
44. **Wind-Mulder, H., Rochefort, L., Vitt, D.** (1996). Water and peat chemistry comparisons of natural and post-harvested peatlands across Canada and their relevance to peatland restoration. – Ecological Engineering. *The Journal of Ecotechnology*.Nr 7, lk 161–181.

## **LISAD**



## Lisa 1. Arukase kõrguse mõõtmine



**Lisa 2. Fragmenteerimiseks valmis seatud kask**



### Lisa 3. Tüve biomassi kaalumine



Mina, Oksana Tsibernaja,

sünniaeg 13.01.1981,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö

„Põlevkivituha ning põlevkivi- ja puutuha segu mõju arukase (*Betula pendula* Roth) biomassi formeerumisele ammendatud freesturbaväljal”,

mille juhendaja(d) on vanemteadur Katri Ots (*Dr Sc*) ja doktorant Mari Tilk (*M Sc*)

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

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

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

Lõputöö autor \_\_\_\_\_

(*allkiri*)

Tartu, \_\_\_\_\_

(*kuupäev*)

**Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

Katri Ots \_\_\_\_\_

(*juhendaja nimi ja allkiri*) (*kuupäev*)

Mari Tilk \_\_\_\_\_

(*juhendaja nimi ja allkiri*) (*kuupäev*)