



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut

Aleksandra Dijeva

**PÕLEVKIVITUHA KASUTAMISEST AMMENDATUD FREESTURBAVÄLJADE
TAASMETSASTAMISEL**
USAGE OF OIL SHALE ASH AT REFORESTATION ON CUTAWAY PEATLAND

Bakalaureusetöö
Loodusvarade kasutamise- ja kaitse õppekava

Juhendajad: vanemteadur Katri Ots, *DrSc*

doktorant Mari Tilk, *MSc*

Tartu 2016

SISUKORD

SISSEJUHATUS	7
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE	10
1.1. Jääksood	10
1.2. Põlevkivituha keemiline koostis	13
1.3. Põlevkivituha taaskasutamise võimalused	19
2.MATERJAL JA METOODIKA	24
2.1. Katsealade kirjeldus	24
2.2. Katsepuud	26
2.3. Keemilised analüüsid	27
2.4. Andmete statistiline analüüs	27
3. TULEMUSED JA ARUTLEU	28
3.1. Turba pH ja elementide sisaldus	28
3.2. Puude kõrguskasv	33
3.3. Juurekaela diameeter	35
3.4. Muutused assimilatsiooniorganite morfomeetrias – okkapikkus ja okka pindala	37
KOKKUVÕTE	39
KASUTATUD KIRJANDUS	41
SUMMARY	45
Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta	47

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Bakalaureusetöö lühikokkuvõtte	
Autor: Aleksandra Dijeve		Õppekava: Loodusvarade kasutamine ja kaitse	
Pealkiri: Põlevkivituha kasutamisest ammendatud freesturbaväljade taasmetsastamisel			
Lk.: 47	Jooniseid: 11	Tabeleid: 5	Lisasid: -
<p>Osakond: Metsakasvatuse osakond</p> <p>Uurimisvaldkond: Metsaökoloogia</p> <p>Juhendaja(d): Katri Ots, Mari Tilk</p> <p>Kaitsmiskoht ja aasta: Tartu, 2016</p>			
<p>Eestis leidub kokku 98 frees-turbavälja üldpindalaga 9371 ha. Jääksoode isetaastumine sõltub erinevatest teguritest nagu näiteks kasutatud kaevandustehnoloogiast, kaevandatava ala suuruselt ja mineraalse aluspõhja topoloogiast, kuid valdav osa ammendatud freesturbaväljadest ei ole aastakümnete jooksul taastaimestunud. Igal aastal tekib Eestis 7–10 miljonit tonni põlevkivituha, millest taaskasutatakse ainult 5%. Seega oleks otstarbekas leida veel juurde põlevkivituha taaskasutusvõimalusi.</p> <p>Põlevkivituhk, mis sisaldab rohkelt taimede kasvuks vajalikke toitaineid, võiks olla üheks võimaluseks ammendatud jääksoode turba toitainete sisalduse parandamiseks.</p> <p>Bakalaureusetöö eesmärgiks oli uurida põlevkivituha (PõT10, põlevkivituhk 10 t/ha) ning puu- ja põlevkivi segutuha (PT15+PõT15, puutuhk 15 t/ha ja põlevkivituhk 15 t/ha) mõju hariliku männi kasvule Puhatu ammendatud freesturbaalal (Ida-Viru mk).</p> <p>Tulemused näitasid, et segutuhaga (PT15+PõT15) väetamine suurendab märgatavalt puude kasvu, mõjudes positiivselt kõrguse juurdekasvule kui ka juurekaela diameetritele. Segutuhaga väetatud puude okkapikkuste keskmised näitajad olid 2 korda suuremad kui kontrollalal. Tuhkadega väetamine mõjus positiivselt ka okkapikkusele ja pindalale. Katseala PõT10 näitajad on võrreldes katseala PT15+PõT15 näitajatega väiksemad, kuid siiski suuremad kui kontrollalal, olles keskmiselt 4,9 cm pikad.</p>			

Põlevkivituha (PõT10) ja segutuha (PT15+PõT15) kasutamine vähendab kõige enam turba ülemiste kihtide happesustning tõstab turbas P ja K sisaldust võrreldes tuhaga töötlemata kontrollalal.

Märksõnad: põlevkivituhk, puutuhk, harilik mänd, puude kasv, okkapikkus.

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Bachelor's Thesis	
Author: Aleksandra Dijeva		Specialty: Natural Resources Management	
Title: Usage of oil shale ash at reforestation on cutaway peatland			
Pages: 47	Figures: 11	Tables: 5	Appendixes:-
Department: Department of Silviculture Field of research: Forestecology Supervisor(s): Katri Ots, Mari Tilk Place and date: Tartu, 2016			
<p>In Estonia there are 98 milled peat fields with the total area of 9371 ha. The self-renewing of cutaway peatlands depends on different factors, such as usable mining technology, the size of the mined areas and the topology of mineral substrate, yet the majority of the exhausted milled peat fields have not been revegetated over the decades.</p> <p>Every year there is about 7–10 million tons of oil shale ash produced from which only 5% is recycled. Therefore, it would be practical to find more opportunities for recycling oil shale ash.</p> <p>Oil shale ash which comprises a lot of nutrients that are necessary for vegetation could be one of the opportunities to improve the nutrient content of the peat in the exhausted cutaway peatlands.</p> <p>The purpose of the given bachelor's thesis was to research the influence of oil shale ash (PõT10, oil shale ash 10 t/ha) and the ash mixture of wood and oil shale (PT15+PõT15, wood ash 15 t/ha and oil shale ash 15 t/ha) on the growth of the Scots pine in the exhausted milled peat field in Puhatu (Ida-Viru county).</p> <p>The results showed that fertilizing with the ash mixture (PT15+PõT15) significantly increases the growth of the trees by having a positive effect on the height and the diameter of the root collar.</p>			

Fertilizing with ash had a positive impact on the needles' length and on their surface area. The average lengths of needles of trees fertilized with ash mixture (PT15+PõT15) were 2 times longer compared to the control area. Needles of trees fertilized with oil shale ash (PõT10) were smaller (on average 4,9 cm) compared to needles from ash mixture fertilized area, but still remained taller than needles from control area

Usage of oil shale ash (PõT10) and mixture ash (PT15+PõT15) decreases the acidity of the upper layers of peat and increases the content of P and K compared to the control area which was not treated with ashes.

Keywords: oil shale ash, wood ash, Scots pine, growth of trees, length of needles.

SISSEJUHATUS

Sood peetakse väärtuslikuks ökosüsteemiks – soo puhastab vett, ühtlustab ümbruskonna hüdroloogilist režiimi, sh aitab ära hoida üleujutusi. Laia ulatuslikult toimub soos CO₂ sidumine fotosünteesil ja orgaanilise aine, sh süsiniku akumulatsioon turbana. (Soo ökoloogiline roll... 2016)

Turbaalad hõlmavad Eesti territooriumist 1,2 mln ha ehk 22,5% maismaast (Orru *et al.* 1996). Tuleb meeles pidada, et enamik Eesti soostunud aladest on tänaseks päevaks ära kuivendatud ning sellistel aladel enam turvast juurde ei teki - need alad ei ole enam "elavad" sood. Eelpool mainitud turbaaladel ladestub turvast tänapäeval ligikaudu ¼ pindalal. Seega saame öelda, et Eestis katavad sood praegu ca 6% ja turbaalad (kunagised sood) veel lisaks umbes 16% maismaast (Soo ökoloogiline roll... 2016). Praegu on Eestis looduslikke soid ligikaudu 350 000 hektarit. Peaaegu 90% kunagistest madalsoodest on kultuuristatud või laiaulatusliku kuivenduse tõttu kadunud (Keskkonnaministeerium 2012). Turbaalasad on Eestis kasutatud metsanduse tarbeks umbes 49%, põllumajanduseks 42% ja turba kaevandamiseks 8,5% (Vasander *et al.* 2003). Järjest suurenev jääksoode pindala kasv on tekitanud vajaduse jääksoode korrastamiseks, et taastada kaevandamisega rikutud maa-alade bioloogiline mitmekesisus. Lisaks on jääksoode korrastamine oluline kliimamuutuse seisukohalt, sest kuivendatud ning taimestikuta turbaalad muutuvad seoses turba mineraliseerumisega õhku lenduva süsihappegaasi ja lämmastikdioksiidi allikaks (Salm *et al.* 2011).

Põlevkivitööstus on Eesti traditsiooniline tööstusharu. Põlevkivitööstus varustab Eestit elektrienergiaga ning toodab kütteõli, tekitadesohtralt jäätmeid. Riigi jäätmekava 2014-2020 hinnangul moodustavad Eestis kõigist jäätmetest 79% just põlevkivi kasutamisel ja kaevandamisel tekkinud jäätmed, mistõttu on tekkinud probleem nende utiliseerimisega. Järjest kasvav biokütuste kasutamine tõstatab biokütuste tuhmade utiliseerimise probleemi. (Riigi jäätmekava... 2014) Üheks lahenduseks on biokütuste tuhmade (põlevkivituhk, puutuhk jt) tagasiviimie metsa, millega saab kompenseerida sealt minema viidud toitelemente.

Väetamine on saaki suurendav või selle kvaliteeti parandav agrotehniline võte, mida on kasutatud ka kui ühte metsakasvatustlikku võtet, tõstmaks metsade produktiivsust ja suurendamaks metsast saadavat tulu (Masing 1992).

Põlevkivituhast mullaparendaja aitab taimedel pinnasest toiteelemente omastada ja vähendab taimehaigustesse nakatumist ning puutuhk tasakaalustab väga hästi turba toitainete bilanssi. Põlevkivituha eeliseks on kõrge kaltsiumkarbonaatide sisaldus, mis aitab mulla pH-taset kiiremini neutraliseerida ja seda mikroelementidega rikastada (Eesti Energia 2016).

Ammendatud freesturbaväljade rekultiveerimine aitaks kaasa looduskaitse arengukava nõuete täitmisele, mille üheks eesmärgiks on 2020. aastaks ammendatud jääksoode korrastamine 1000 ha ulatuses. Lisaks aitab jääksoode rekultiveerimine kaasa arengukava üldiste eesmärkide täitmisele, mis puudutavad kasvuhoonegaaside hulga vähendamist, jäätmete kasutamist ning taastuenergia (biokütuste) mahu suurendamist.

Hüpotees: bioenergeetikas tekkivate toitainerikaste, sh. rohkelt K ja P sisaldavate jäätmete (põlevkivituhk segus puutuhaga, põlevkivituhk jt.) kasutamise tulemusel on freesturbaväljade metsastamine olnud tulemusrikas: tasakaalustatud turba toitainete bilanss ja taimedele vajalike toitainete rohkus tuhkades on oluliselt stimuleerinud puude kasvu ja suurendanud puistute bioproduksiooni, sest toitainete optimaalne kättesaadavus mullast ja nende sisaldus kudedes garanteerivad tasakaalustatud füsioloogilised protsessid. Seetõttu suureneb biomassiformeerumine, mille tulemusel on muutunud ühe Eesti suurima CO₂ emissiooniallika – jääksoo – CO₂ bilanss positiivseks.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on uurida nii põlevkivituha kui ka puu- ja põlevkivituha segu mõju puude kasvule Puhatu ammendatud freesturbavälja (Ida-Viru mk) metsastamisel. Selleks hinnati ja võrreldi omavahel põlevkivituha (PõT10, põlevkivituhk 10 t/ha) ja puu- ja põlevkivi segutuha (PT15+PõT15, puutuhk 15 t/ha ja põlevkivituhk 15 t/ha) mõju hariliku männi (*Pinus sylvestris*L.) järgmistele parameetritele:

- kõrguskasv ja juurekaela diameeter
- muutused assimilatsiooniorganite morfomeetrias (okkapikkus ja okka pindala)
- toitainete sisaldus turbas.

Autori osaks antud lõputöö koostamisel oli osalemine välitöödel, laboritöodes, andmetöötlus Exceli programmis, kirjanduse läbitöötamine ning saadud tulemuste interpreteerimine.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1. Jääksood

Laiemas mõistes on jääksood kõik endised turba kaevandamisalad ja põllumajanduslikus kasutuses olnud varasemad soolad, mille majandamine on lõppenud (Paal 2011: 43). Kitsama käsitluse kohaselt on jääksood niisugused alad, kus turba jääklasundi paksus ei ületaenamasti 0,1–0,5 meetrit ning see on edasiseks masinatega kaevandamiseks ammendatud. (Paal 2011: 43)

Jääksoid tüpiseeritakse nende tekkeviisi põhjal või siis neile iseloomulike omaduste alusel. A. Paidla (1975) ning B. D. Wheeler ja S. C. Shaw (1995) eristavad: a) suhteliselt tasase reljeefiga frees-jääksoid ning b) liigendatud pinnamoega karjääri-jääksoid, mis on kujunenud tükkturba kaevandamise tulemusena.

2005.–2009. a viidi Keskkonnaministeriumi tellimusel Eesti Geoloogiakeskuse poolt läbinende alade täpsustav hindamine, mille kohaselt registreeriti kokku 98 frees-jääksoid üldpindalaga 9371 ha (tabel 1) (Ramst, Orru 2009).

Tabel 1. Jääksode arv ja pindala Eestis (Ramst, Orru 2009) (Paal 2011: 43).

Maakond	Jääksode arv	Jääksode pindala, ha
Harju	10	415,6
Rapla	6	346,4
Lääne	2	82,0
Ida-Viru	8	1931,2
Lääne-Viru	12	609,1
Jõgeva	2	68,4
Järva	2	203,3
Tartu	5	253,6
Viljandi	2	86,9
Pärnu	15	3815,8
Saare	4	285,7
Hiiu	1	38,2
Valga	8	215
Võru	10	711
Põlva	10	310
Kokku	98	9371

Turbakaevandamise alt vabanenud jääksoode isetaastumine sõltub kasutatud kaevandustehnoloogiast, kaevandatava ala suurusest ja mineraalse aluspõhja topoloogiast, kuid valdav osa ammendatud freesturbaväljadest ei ole aastakümnete jooksul taastaimestunud (Ramst, Orru 2009).

Alternatiivsed variandid ammendatud freesturbaväljade taaskasutamiseks on soostumis-, seega ka turbatekkeprotsesside taastamine, marjakasvatus, energianiidu (päideroo kasvatamine) rajamine, põllumajandus, lindude pesitsemise kaitseala (Selin 1995; Hytönen, Kaunisto 1999; Paal 2011; Huotari *et al.* 2008).

Jääksoode taastamist soodeks on katsetatud Kanadas, Saksamaal, Hollandis ja Soomes (Karofeld 2006). Mitmetes maades läbi viidud uuringud näitavad, et jääksoode üheks perspektiivsemaks taaskasutamise võimaluseks on nende metsastamine (Valk 1981, 1992; McNally 1995; Selin 1995; Kaunisto, Aro 1996; Pikk 2001; Huotari *et al.* 2008).

Jääksoode looduslik taimestumine on reeglina vaevaline. Ammendatud freesturbaväljade metsastamist takistab ennekõike turba jääklasundi toitainete vähesus (eriti taimede kasvu limiteerivaks peetakse turvasmuldades K- ja P-vaegust) ja tasakaalustamatus, ebasoodne mikrokliima (suured lagendikud ja sellest tingitud hilis- ja varakülmade oht, maapinna kõrge temperatuur), turba väike poorsus, ebasobiv niiskusežiim. Seetõttu on oluline inimese sekkumine. Korrastamist takistavateks teguriteks tuleb pidada suurt käsitsitöö vajadust, selle suurt maksumust, sobivate tehnoloogiate puudust. (Ots 2013: 4)

Looduslähedaste jäätmete (tuhkade), mis sisaldavad rikkalikult K (näit. puutuhk), kasutamine freesturbaväljade metsastamisel võimaldab mõjutada olulisi funktsioone puudes – K-sisaldus tõstab puude vastupanu madalatele temperatuuridele, vee tungimist juurtesse, tõstes puude vastupidavust põuale ja intensiivistab rakukestade puitumist, aktiveerides ligniini kaugeellaste sünteesi. (*Ibid.*: 4)

Jääksoode metsastumine on vaevaline, seetõttu kasutatakse mitmetes maades metsastamist näiteks Soomes (Selin 1995; Aro 2008; Hytönen, Saarsalmi 2009; Hytönen, Aro 2012), Rootsis (Hänell, Magnusson 2005; Leupold 2004, 2005), Iirimaal (McNally 1995; Renou *et al.* 2007; Renou-Wilson *et al.* 2010) ja mujal. Metsastamine on ökoloogilistest ja majanduslikest aspektidest lähtuvalt otstarbekas ja perspektiivne rekultiveerimise viis.

Kaevandatud alade metsastamisega taastatakse taimkate ja mulla viljakus, samuti on metsad efektiivsed süsihappegaasi sidujad, võimaldades tasakaalustada antropogeenset CO₂ emissiooni, mis omab suurt lokaalset ja globaalset tähtsust.

Jääksoode metsastamise eduvõtmeks on toitainete sisalduse reguleerimine, õige puuliigi valik, umbrohu leviku kontroll jm (Hytönen 2008). Jääksoid ei ole võimalik ilma väetamiseta edukalt metsastada (Raid 1979, Valk 1981; Hytönen 2008), kuid kõrged väetisainete kogused võivad põhjustada noorte taimede hukkumist (Aro 2008).

Enamasti on soodes ja jääksoodes puude kasvu limiteerivaks teguriks fosfori ja/või kaaliumi puudus, jääksoode turbalasundis on samuti puude kasvuks ebasobiv lämmastiku ja fosfori suhe (Aro, Kaunisto 1995). Üldiselt on fosfori ja kaaliumiga väetamine sageli turvasmuldade metsastamise eeltingimuseks. Alternatiiviks mineraalväetiste kasutamisele on jääksoode viljakuse tõstmiseks erinevate jätmete (reoveesete, puu- ja turbatuhk, põlevkivituhk, tsemenditoolm jm) taaskasutamine (Seemen *et al.* 2000; Pikka 2011) koht- või ülepinnaiseks väetamiseks (Kaunisto, Aro 1996). Kui jääksoid väetada fosforväetistega, soodustab see märgatavalt lehtpuude kasvaminekut (Raid 1979; Pikk 2001), aga ka loodusliku kaseuenduse teket (Hytönen, Aro 2012) (Ots 2013: 5-6).

Mahajäetud ammendatud freesturbaväljadel on võimalik toota kvaliteetset puidu-, tselluloosi- ja kiudainebiomassi (Hall, House 1994) ja taastada puudes CO₂ sidumis- ja süsiniku kogunemisvõime (Huotari *et al.* 2009). Selliste alade taastaimestamine on oluline, et vähendada CO₂ heitkoguseid ja taastada bioloogiline mitmekesisus.

Vajaliku biomassikoguse saamiseks tuleks Kirde Eestis hakata kasvatama lühikese raieringiga puistuid (Padar *et al.* 2011), milleks sobiksid hästi ammendatud jääksood (näiteks Puhatu, Tudulinna – ühtekokku 830 ha).

Lisaks puitu tootvate alade pindala suurendamisele (metsastamiseks sobivad freesturbaväljad) ja puude kasvu kiirendamisele tuleks saada teada – kas me oleme CO₂ tarbijad või tootjad ning kui suur roll selles on Eestis ammendatud freesturbaväljadel.

Eestis on seni hinnatud süsiniku bilanssi mahajäetud turba kaevandusaladel, taimestikuta turbakaevandamise ning loodus ja/või kuivendatud aladel, kuid puuduvad andmed jääksoode metsastunud aladelt (Ots 2013: 6).

Eesti Geoloogiakeskus on andnud soovitusel mahajäetud turbatootmisalade taaskasutamise kohta: jätta looduslikule taas-soostumisele 15, muuta marjakasvatuseks (mustikas, jõhvikas) 8, korrastada 7 ala ja korraldada jäätmekäitlus 1 alal (Ramst *et al.* 2006).

Inventeeritud jääksoodest on soovitatud metsastada 22 ala (RMK prioriteetidena on Puhatu, Tudulinna, Mõrdama ja Tähtvere jääksood) ja 26 osas on tehtud ettepanek need võtta taaskasutusse turbamaardlatena, sest säilinud on teedevõrk ning kuivenduskraavid, mistõttu saab sealt veel turvast kaevandada (Orru *et al.* 2012).

Eesti Geoloogia Keskuse poolt esitatud inventuuri tulemuste põhjal püstitas Keskkonnaministeerium 2010.aastal eesmärgi: aastaks 2011 korrastada mahajäetud jääksoodest 1,8% ja jõuda 2013. aastaks 3%-ni, kuid need eesmärgid on jäänud tänaseks realiseerumata (Ots 2012).

1.2. Põlevkivituha keemiline koostis

Põlevkivi põletamisel tekib suurel hulgal tuhka – iga töödeldud põlevkivi tonni kohta 0,45–0,47 tonni (Kuusik *et al.* 2012). Ladestuspaikadesse (nn tuhaväljadele) on tuhka kogunenud 280 miljonit tonni ning aastas lisandub 4–5 tonni, mille taaskasutusmaht on olnud viimasel kümnendil üsna tagasihoidlik – vaid 3–6%. Seega on vajalik lisaks olemasolevatele võimalustele leida veel võimalusi põlevkivituha taaskasutamiseks.

Aastail 2008-2011 tekkis põlevkivi koldetuhka ja lendtuhka 37 t/TJ energiatoodangu kohta, aastal 2011 tekkis 5,8 mln t kolde- ja lendtuhka ning tahkeid jäätmehäki (poolkoks, tuhk) 3,7 t ühe põlevkiviõli tonni kohta (Energialalgud... 2016).

Põlevkivituhk tekib põlevkivi (kukersiidi) põletamisel küttekolletes ja restpõlevkivituha hapetes lahustuv osa sisaldab keskmiselt: 36–40% CaO; 1,5–3,6% MgO; 1,0–1,4% K₂O; 0,1% P₂O₅; 3,8–5,4% SiO₂; ja 2,3–3,2% sulfaatväävliit (Hallik 1965).

R.Kalmeti (1979) andmetel sisaldab restpõlevkivituhk mikroelemente järgmistes kogustes (mg /kg): B – 12,5; Cu – 8,8; Mn – 305; Mo – 2, 7; Zn – 89; ja Co – 3,7.

Tolmpõlevkivituha fraktsiooniline ja keemiline koostis sõltub suuresti tuhapäätümisseadmete ehitusest ja suitsugaaside liikumiskiirusest, aga ka põlevkivi keemilisest koostisest ning jahvatusastmest (Kärblane 1996).

Selgus, et isegi sama põlevkivi ja ühesuguse põlemisrežiimi korral erineb tolmtuhaliikide keemiline koostis suuresti: mida hiljem suitsugaasidest eraldatud ja peenem on tuhk, seda suurem on selle K- ja S-sisaldus, kuid väiksem Ca- ja Mg-sisaldus ning ka neutraliseerimisvõime. Tolmpõlevkivituhk sisaldab peale Ca olulisel määral veel Mg, K, S ja natuke isegi P, samuti Si, mis teatud juhtudel võib taimedele kasulik olla (Ots 2013: 15).

Halliku (1965) arvates on põlevkivituha positiivse efekti üheks põhjuseks ka tema Mg-sisaldus, kuna ainult Ca sisaldava lubiväetise suur annus võib paljudel juhtudel esile kutsuda häireid taimede arengus, kuid Mg lisand lubiväetises aitab lisaks mullahappesuse vähendamisele parandada ka Ca ja Mg suhet mullalahuses.

Magneesium esineb tolmpõlevkivituhas oksiidina, kaalium aga leutsiidi ja kaaliumkaltsiumsilikaadi koostises. Peale mainitud elementide sisaldab põlevkivituhk ka mikroelemente nagu näiteks Mn, B, Cu jt. Tolmpõlevkivituhal on seega lubiväetisena rida silmapaistvalt häid omadusi: see tuhk on ideaalselt peene, täiesti kuiv, suure neutraliseerimisvõimega, hea lahustuvusega, sisaldab oluliselt mitut taimedele vajalikku elementi, samas aga ei sisalda liigselt kahjulikke elemente. (*Ibid.*)

Teatud ajaperioodil on Narva elektrijaamade kateldes tekkinud segutuhka: aastatel 2009–2010 kasutati 200 000 tonni puiduhaket ja ligikaudu 10 miljonit tonni põlevkivi elektritootmiseks (Padar *et al.* 2011: 6).

Kuna käesolevas töös käsitletakse puutuha ja põlevkivituha kokkusegamisel saadud segutuha mõju puude kasvule ammendatud freesturbaväljadel, siis leiab töös käsitlemist ka puutuhaga seonduv.

Oluline tegur, mis määrab puutuha lõpliku koostise, on kütuse põlemistemperatuur koldes. Puidu põletamisel koduahjudes ning põletamisel tööstuslikes katlamajades, kus põlemistemperatuurid on vastavalt alla 1200 °C ja üle 2000 °C, tekkinud tuhakogused ja omadused erinevad oluliselt (Naylor, Schmidt 1986). Valdava osa puutuha koostisest moodustavad makroelemendid: Ca, K, Mg, S ja P. Põlemistemperatuuri suurenemisel väheneb tuhas K, S ja Cu, vähemal määral Na ja Zn sisaldus.

Erinevate puutuhkade Mg, P, Mn, Al ja Fe sisaldus ei muutunud oluliselt põlemistemperatuuri tõstmisel. Leiti ka, et tuhkade koostis sõltub mõnede elementide, näiteks Si, Mn, Fe ja Al esinemisest või puudumisest. Need elemendid on omavahelistes sünergistilistes seostes mõjutades mitmesuguste ühendite teket tuhas. Raskmetallidest leidub puutuhhas enamasti Mn, Fe, Al, Cu, Na, Pb, Cr ja Cd (Pärn *et al.* 2010).

Väävli kontsentratsioonide kohta on andmeid vähe, kuna selle elemendi kontsentratsioone puutuhhas tavaliselt ei määrata, eeldades et suurem osa väävlist lendub põlemisgaasidega (Ots 2013: 16).

Põlevkivituhha kasutamise puhul kardetakse tuhas sisalduvaid raskmetalle. Kuigi raskmetallide sisaldused tuhkades on võrreldes makroelementidega suhteliselt väikesed, tuleb siiski jälgida nende võimalikku leostumist ümbritsevasse keskkonda. (Ots 2013: 16-17)

Tolmpõlevkivituhhas on mikroelementide (sh. raskmetallide) sisaldus küll märkimisväärne, kuid silmas tuleb pidada, et meie muldade mikroväetiste vajadus on üsna suur ja lubiväetise andmine sageli vähendab mikroelementide liikuvust mullas, kuna tõuseb mulla pH (Kärblane 1996).

Tolmpõlevkivituhhas on Se 15–100 korda rohkem kui mullas. Tsüklontuhhas on ka As natuke rohkem kui mullas, kuid elektrifiltrituhhas on As kuni 5 korda rohkem kui tsüklontuhhas. (Ots 2013)

Tsüklontuhhas võib olla kõrge mitmete raskmetallide sisaldus nagu näiteks Cd, Pb ja U. Analüüsid on näidanud, et As ja Hg on filterpõlevkivituhhas pisut rohkem kui on mulla lubatud piirsisaldus (Gaškov 2011). Tsüklontuhhas on Cd 33, Pb ligemale 6 ja U5 korda rohkem kui mullas (Ots 2013). Oluliselt rohkem sisaldab As elektrifiltrituhk, erinevus tsüklontuhhas sisalduva As kogusest võib olla isegi kuni 5 korda (Kärblane 1996).

Puhatu freesturbaväljadele rajatud katsealadel kasutatud Narva elektrijaamade põlevkivi filtrituhhas oli As 2,3 korda enam kui tsüklontuhhas (tabel 2) (Ots 2013). Analüüsitulemused näitavad, et põlevkivituhhaga töödeldud katsealadelt kogutud turbaproovid sisaldavad As, Hg, Cd ja Pb väga väikestes kogustes, lisaks vähendab tuhkadega töödeldud katsevariantides ülemise turbakihi leeliline pH oluliselt raskmetallide liikuvust (Ots 2013: 24).

Tabel 2. Puu- ja põlevkivituha pH ja keemiline koostis (mg/kg) (Ots 2013: 18)

Element	Puutuhk (koldetuhk)	Põlevkivituhk (tsüklontuhk)	Põlevkivituhk (filtrituhk)	Põlevkivituhk (tsüklontuhk / filtrituhk) (Kärblane 1996)
pH _{KCl}	9.8	12.5	12.6	
N	<1 000	<1 000	1 020	
P	14 275	658	1 180	900/1 000
K	12 200	9 800	23 690	21 000/32 000
Ca	155 000	270 000	207 560	336 000/288 000
Mg	2 040	39 750	11 340	27 000/26 000
B	1,67	82,5	191	12,0/16,5
S	1 100	16 000	34 000	20 000/33 000
Cd	1,67	1,2	1,13	
Cr	17,6	15,4	25,9	
Ni	34,1	11,1	10,2	
Pb	28,9	20,7	42,6	
Fe	13 040	24 150	15 500	
Zn	711	49,4	58,3	61/97
Cu	96,1	8	8,19	10,8/10,3
As		6,76	15,2	
Hg		<0,01	0,02	
Niiskus, %	35	0	0	

Tolmpõlevkivituhk, mis eraldatakse põlemisgaasidest elektrifiltrite abil, on tolmjas lubiväetis ja leidnud aastakümneid kasutamist põllumuldadel meliorandina. Varem köeti tükkpõlevkiviga vedureid ja paljusid kohalikke tööstusettevõtteid, mistõttu olid põlevkivituha veomaad põldudele kaunis lühikesed ja tuha kättesaadavus hea. Hiljem hakati restpõlevkivituhka vedama raudteel Lõuna-Eestisse Kiviõli Põlevkivikeemia Kombinaadist, Kohila Paberivabrikust jt Põhja-Eesti suurtest tööstusettevõtetest. Vahel kasutati lubiväetise laotamiseks buldooseri. Katsetati isegi tuhahunniku laotamist lõhkeainega õhkimise teel, kuid rahuldavalt ühtlustsee ei taganud, vaatamata tuhahunnikute suuruse ja paigutuse ning lõhkelaengute varieerimisele. (Kärblane 1996)

Tootmisprotsessis tekkiv tolmpõlevkivituhk jaotatakse kambertuhaks, tsüklontuhaks ja elektrifiltertuhaks. Kambertuhk on neist kõige jämedam, kuid lubiväetise seisukohalt on kõik kolm ideaalselt peened. (Kärblane 1996).

(PÕT1) andmetel kuulub tolmpõlevkivituhk kaltsiumsilikaatide, alumosilikaatide ja kaltsiumsulfaadi koosseisu, kuid tolmpõlevkivituhas leidub ka 7–32% vaba CaO. Seejuures on vaba CaO sisaldus tuha jämedamates fraktsioonides suurem kui peenemates.

Näiteks klinkritolmu kaltsiumi lahustuvus vees on palju väiksem kui tolmpõlevkivituhal ja ka klinkritolmu neutraliseerimisvõimest avaldus vesileotises ainult mõni protsent. (Kärblane 1996)

Tabelist 3 selgub, et boori sisaldus suureneb tuha peensusastme tõusuga. Kui võrrelda lupjamiseks kõige rohkem kasutatud tsüklontuha mikroelementide sisaldust varem kasutatud nõrglubja omaga, siis selgub, et tsüklontuhas on taimedele olulisi mikroelemente rohkem järgmises ulatuses: B 4,8, Cu1,7, Mn 4,5, Mo isegi 104, Zn 5,5 ja Co14 korda. (Kärblane 1996)

Tabel 3. Mikroelementide sisaldus tolmjates lubiväetistes, mg/kg (Kärblane 1996: 286)

Lubiväetis	n	B	Cu	Mn	Mo	Zn	Co
Kambertuhk	4	8,5	12,5	300	5,9	104	1,67
Tsüklontuhk	13	12,0	10,8	223	7,3	61	2,10
Elektrifiltertuhk	7	16,5	10,3	210	8,5	97	2,40

Eriti tuleb hinnata tuhas sisalduvat Mg ja K, mis aitavad tasakaalustada lupjamisel suures koguses mulda sattuva Ca ühekülgsel mõju mullalahuses. Pealegi on paljud lubjatavad mullad nagunii juba enne lupjamist Mg ja/või K poolest vaesed. Kloori anname lubiväetise suure normiga mulda vähem kui ühe tsentneri kaaliumkloriidiga.

Tolmjate lubiväetiste mikroelementide sisaldus on küll märkimisväärne, kuid siiski anname 5 t lubiväetistega mulda mitu korda või isegi mitukümmend korda vähem mikroelemente, kui neid vastavate mikroväetistega mikroelementide korral mulda antakse. Silmas tuleb pidada ka seda, et meie muldade mikroväetiste vajadus on üsna suur ja lubiväetise andmine sageli vähendab mikroelementide liikuvust mullas. (Kärblane 1996)

Tabelist 4 selgub, et tolmjate lubiväetisega antakse mulda defitsiitsematest elementidest peale Ca üsna rohkesti veel Mg, K ja S, vähesel määral ka P ja mikroelemente.

Tabel 4. Muldade lupjamiseks kasutatud tolm põlevkivituhha ja klinkritolmu keskmine koostis (% või mg/kg) ja 5 t lubiväetisega mulda antud kogused (kg/ha või g/ha) (Kärblane 1996: 286)

Näitaja	Tolmpõlevkivituhk		Klinkritolm	
	%	kg/ha	%	kg/ha
CaCO ₃ (neutr.võime)	85,3	4265	75,7	3785
Ca	34,9	1745	30,8	1540
Mg	2,7	135	1,9	95
K	1,7	85	4,5	225
S	1,8	90	2,9	145
P	0,1	5	0,2	10
Si	11,2	560	6,5	325
C	0,5	25	6,2	310
Cl	0,2	10	0,5	25
R ₂ O ₃	12,4	620	6,7	335
	mg/kg	g/ha	mg/kg	g/ha
B	10	50	9	45
Cu	14	70	23	115
Mn	223	1115	203	1015
Mo	11	55	4	20
Co	3	15	2	10
Zn	98	490	74	370

Praeguste teadmiste kohaselt võivad muldade pikaajalisel süstemaatilisel lupjamisel põlevkivituhhaga teatud ohtu kujutada Cd, Pb, U ja As, kuid neid elemente võib sattuda mulda ka mujalt. Kui ühe tonni tolm põlevkivituhhaga antakse mulda kuni 60 g Pb ja 2 g Cd, siis 1996 a. andmetel langeb niisama suur kogus neid elemente aasta jooksul hektari kohta ka õhust, suurte teede ääresveel rohkemgi. (Kärblane 1996)

Tabelis 5 on toodud kohalike kütuste tuha koostis. Nagu selgub, sisaldavad puu- ja põhutuhk üsna rohkesti Ca ja P. Need on taimedele hästi omastatavad, mida tuleb nende kasutamisel lubiväetisena arvestada, et väärtuslikud väetisained kaotsi ei läheks.

Tabel 5. Kohalike kütuste tuha kuivaine orienteeruv neutraliseerimisvõime (CaCO₃) ja taimetoiteelementide sisaldus, % (Kärblane 1996: 286)

Tuha liik	CaCO ₃	Ca	Mg	K
Turbatuhk	27...50	15	1,5	1,2
Puutuhk	70...90	30	3	6
Põhutuhk	30	5	1,5	15

Puutuha kogused on seni olnud väikesed ja ta on leidnud kasutamist just aiaväetisena, milleks ta sobib suurepäraselt (Kärblane 1996). Puiduhakke ja turba kasutamine kütteks laieneb. Mitmesuguste küttekollete tuha koostis võib tunduvalt erineda tabelis 5 toodud keskmistest arvudest (*Ibid.*).

Tuha keemiline koostis sõltub suuresti kütuse põlemisrežiimist, kuid see oleneb ka taimeliigist, vanusest ja kasvutingimustest (Pärn *et al.* 2010). Nii võib kasepuidu tuhas olla K kolm korda ja P kaks korda rohkem kui kuusepuidu tuhas. Okstes (haos) on tuhasisaldus kõrgem ja tuhk K-rikkam kui tüves jne. (*Ibid.*).

Kuna põlevkivituhk on suhteliselt P-vaene, siis segus P-rikkapuutuhaga võiks see olla alternatiiviks ammendatud freesturbaväljadel puude kasvu stimuleerimisel (Kikamägi *et al.* 2014).

1.3. Põlevkivituha taaskasutamise võimalused

Üle 90% Eesti üldisest energia vajadusest kaetakse põlevkiviga köetavate soojuselektrijaamade abil. Igal aastal põletatakse umbes 11 miljonit tonni põlevkivi. Põlevkivi tuhasisaldus on väga suur – sõltuvalt põlevkivi kvaliteedist jääb elektrijaamas põletades sellest umbes pool tuhana alles.

Põlevkivituha taaskasutamine on Eestis praegu üks kõige tõsisemaid keskkonnaprobleeme. Põlevkivituha kasutamisega on aga võimalik oluliselt vähendada teiste taastumatute loodusressursside tarbimist. (Bachmann *et al.* 2014)

Eesti Energia põlevkivituha taaskasutus on viie aasta jooksul järjekindlat kasvutrendi näidanud. 2013. aastal suunas Eesti Energia taaskasutusse ligi 126 000 tonni põlevkivituha, mis on 45 000 tonni rohkem kui viis aastat tagasi. Ligi 70% taaskasutatavast põlevkivituha leiab kasutust Eestis ja umbes 30% Venemaal. Väiksemates kogustes põlevkivituha on läinud taaskasutusse ka Soome, Rootsi, Läti ja Leetu, kuid viimaste puhul on tegemist pigem teadus- ja arendustööga leidmaks tuhale uusi kasutusvõimalusi. (Eesti Energia 2014)

Tuhajääkide ladustamise vältimine on keskkonna seisukohalt parim lahendus. Üks lahendus on muuta põlevkivituha ehitusturgudele mõeldud toodeteks. Samas põlevkivituha sisaldavatel toodetel puudub tänapäeval üldsuse heakskiit ja sellest lähtuvalt turuväärtus. (Maran 2015)

Juba nõukogude ajal otsiti põlevkivituha kasutust ehitusmaterjalide tööstuses ja ka põllumajanduses. Aktiivselt uuriti põlevkivituha kasutamist poorbetooni tootmisel ja nii sündis legendaarne ehitusmaterjal „Narva Plokk”. (Bachmann *et al.* 2014: 87)

Põlevkivituhal on erinevaid rakendusi. Tee-ehituses hinnatakse põlevkivituha ebastabiilsete pinnaste mass-stabiliseerijana, põllumajanduses on põlevkivituha tuntud standardiseeritud väetisena. Põlevkivituha on oluliseks komponendiks portlandtsemendi tootmisel. Just põlevkivituha annab tsemendile mitmeid väärtuslikke omadusi – tsement kivineb kiiremini ja vajab vähem vett. Põlevkivituha sisaldusega portlandtsemendist toodetud betoonid on külma- ja korrosioonikindlamad. (Eesti Energia 2014)

Põlevkivituha kasutatakse autoklaav-meetodil tuhaplokkide tootmisel. See aitab kokku hoida taastumatu loodusvarasid nagu liiva, lubjakivi ja kipsi ning suurendab ühtlasi põlevkivist saadavat väärtust (Bachmann *et al.* 2014: 87).

Eesti Energia pöörab tänapäeval põlevkivituha osas järjest suuremat tähelepanu teadus- ja arendustööle, sest tuha omadused on seoses energiatootmises kasutusele võetavate kaasaegsete tehnoloogiatega ja heitmete emissioonide piiramisega muutunud. Seetõttu teeb Eesti Energia koostööd nii teadlaste kui tuha tarbimisest huvitatud partneritega, et leida uueneva koostisega tuhale optimaalseid kasutusvõimalusi. Näiteks on käimas Euroopa Liidu programmi LIFE+ toetusel mitmeaastane projekt OSAMAT, mille raames teevad koostööd Eesti Energia, Euroopa Komisjon, Maanteeamet ja Nordecon eesmärgiga analüüsida, kuidas oleks kõige tõhusam muuta põlevkivituha väärtuslikuks tee-ehituses

kasutatavaks materjaliks. Põlevkivituhka kasutati ka Läänemere suuremaid sadamaid ühendavas projektis SMOCS, mille eesmärk oli leida parim lahendus sadamate reostunud põhjasetete stabiliseerimiseks.

Nii OSAMAT kui SMOCS projektides on põlevkivituhk kasutusel eelkõige ebastabiilsete pinnaste (nagu turba- ja savipinnased) mass-stabileerimisel. (Eesti Energia 2014)

Põlevkivituhha taaskasutamise võimaluste laiendamiseks teeb Eesti Energia koostööd näiteks Tallinna Tehnikaülikooli, Tartu Ülikooli, Põlevkivi Kompetentsikeskuse ning Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudiga, aga ka Skandinaavia ja Venemaa teadusasutustega (Eesti Energia 2014). Põlevkivituhha mõju mullale on Eesti Energia põhjalikult uurinud koos Eesti Maaülikooliga (PKI-s uuritakse põlevkivituhha mõju põllumuldadele ja MMI metsakasvatuse osakonnas mõju puude kasvule) ja suurtalu pidajatega (Hansalu 2016).

Jäätmeregis ohtliku jäätmeha kirjas oleva põlevkivituhha puhul on tegemist tugevalt aluselise materjaliga ja selle vees lahustumine ning keskkonda lekkimine võib olla tõsine keskkonnaoht (Maran 2015).

Kuigi elektrifiltri põlevkivituhk omab meliorandinatendentsi suuremale efektiivsusele võrreldes kamber- ja tsüklon põlevkivituhaga, peab siinkohal siiski silmas pidama, et selle tuhaliigi väiksema neutraliseerimisvõime pärast tuleb seda tuhka lisada mulda suuremates kogustes kui kamber- ja tsüklonituhka. Suurema tuhakoguse kasutamine tõstab küll tööde maksumust, kuid filtrituhaga satub mulda rohkem toitaineid kui teiste põlevkivituhkadega.

Tuhkade granuleerimine nende transportimise ja laotamise hõlbustamiseks vähendab märkimisväärselt nende efektiivsust paljudeks aastateks, kuna need tolmu tsementeeruvad mullas. Happeliste põllumuldade lupjamiseks tuleb kasutada põlevkivituhka tolmu kujul mitte graanulitena. Tehnika ja tehnoloogia on selleks väljatöötatud ja toimib (Turbas, Hiis 1971).

Põlevkivituhhas on kõrge lubjasisaldus (CaO), mis on väärtuslik põlevkivituhha kasutamisel tsiviilehituse eesmärkideks. Põlevkivituhk sisaldab ka kriitilisi, vees lahustavaid ja keskkonnakahjulikke aineid, nagu raskmetallid, mille omavaheline toime sõltub suuresti pH-st.

Seda tuleb ehitusmaterjalide töötlemisel arvestada. Inimeste tervise ja keskkonna kaitsmise eesmärgil tuleb enne täieulatuslikku põlevkivituha taaskasutamise lubamist teha keskkonnakatsed pikaajalise leostumise kohta. Mitmed varasemad leostustestid näitavad, et väljaleostumine on tõesti väga väike ja püsib seadusega ette nähtud piirides. (Maran 2015)

Lisaks põllumuldade lupjamisele on põlevkivituha mõju katsetatud ka metsamuldadele ja puistute kasvule. Terasmaa ja Sepa (1994) üle viie aasta kestnud lupjamiskatses põlevkivituhaga männipuistus tõusis liivmuldadel huumushorisoni pH 2,5–3,0 ühiku võrra ja hüdroloogiline happesus vähenes huumushorisonis ligikaudu 90% ja leethorisonis 50%. Rae rabasse 1960-ndatel rajatud katsetes põlevkivituha kogusega 20–25 t ha⁻¹ ilmnes, et põlevkivituha kasutamine ei ole otstarbekas kuivendatud rabamullal: puude kasv ei paranenud, jäädes enamasti alla töötlemata ala puude kasvule ning puudel suurenes külmakahjustuste esinemine. (Seemen *et al.* 2000)

Biokütuste populaarsuse suurenemisega on kaasnud probleem tootmisjäätmete utiliseerimisest, mistõttu oleks vajalik välja selgitada tootmisjäätmetena tekkiva puutuhaga keskkonnasäästlikud taaskasutusvõimalused. Väga edukalt on puutuhaga võimalik kasutada väetisena taimedele vajalike toitainete sisalduse tõttu, et säilitada mineraalainete tasakaalu või kompenseerida nende kadu majandatavates metsades, kust kogu puitmaterjal on välja veetud (Olsson *et al.* 1996, Eriksson 2003, Vares *et al.* 2005).

Puude kasvu stimuleerimisel biokütuste tuhaga on paremaid tulemusi saadud kasutades neid turvasmuldadel, kuna puutuhk sisaldab taime kasvuks kõiki vajalikke elemente (eriti K ja P), välja arvatud N. Lämmastik piirab kasvu mineraalmullal, kus seda leidub vähe, samal ajal on seda elementi turvasmuldades külluslikult. Turvasmuldades peetakse aga taimede kasvu limiteerivaks teguriks just P- ja K-vaegust (Pärn *et al.* 2010). Puutuhk on leeliseline ja puutuhaga väetamisel mulla pH tõuseb, samas viiakse mulda vajalikke toitaineid. Mulla pH kasvu tulemusel suureneb mullas kõdu lagundavate bakterite arvukus ja aktiivsus ning kiireneb metsakõdu lagunemine, orgaanilise lämmastiku mineraliseerumine ja lämmastiku omastatavus (Kikamägi 2008; Bååth, Arnebrant 1994; Frize *et al.* 1994). Puutuhaga lisamisel rikastub muld mitmete elementidega, nagu näiteks K, Ca, Mg, B (Saarsalmi *et al.* 2004).

Kaevandatud turbaalade piirkondi iseloomustab muutuv turbalasundi paksus, madal pH, kõrge N ja madal P ning K sisaldus (Hytönen 1996).

Nii nagu ülejäänud turbakiht on tunduvalt toitainevaesem, tuleb ka see enne metsastamist toitainetega rikastada. Puutuhka on juba ammu kasutatud mulla viljakuse parandamiseks. Soomes on puutuha väetisena kasutamine oluliselt kasvanud, praegu kasutatakse seda tuhka väetisena iga-aastaselt ligi 10 000 ha, enamasti kuivendatud soodel (Moilanen *et al.* 2013).

Näiteks bioenergeetikas tekkiv puutuhk sisaldab rohkelt taimedele vajalikke toitaineid ja mis praegu ladustatakse enamasti jäätmetena prügilatesse, võiks olla alternatiiviks ammendatud jääksoode turba toitainete sisalduse parandamisel. Lubiväetised puu- ja põlevkivituhk on head väetised happelistele turvasmuldadele, sest toimiv lubiaine tõstab mulla pH-d (Kikamägi *et al.* 2014).

Tuha (puutuhk, põlevkivituhk) kasutamine väetisena tõsta bnii turba viljakust, kui stimuleerib oluliselt ka puude kasvu. Katsealadel, mida töödeldi puutuha või puu- ja põlevkivituhka seguga, täheldati nii turbaskui ka puude assimilatsiooniorganites märkimisväärset fosfori- ja kaaliumisisalduse tõusu, mis on peamised kaevandatud jääksoodes puudekasvu limiteerivateks elementideks. Väetamine toitaineterikka tuhaga suurendab märgatavalt puude kasvu (biomassi juurdekasv, kõrguse juurdekasv, juurekaela diameeter). (Kikamägi *et al.* 2014)

Metsastamine on kõige lootustandvam ja jätkusuutlikum kaevandatud turbaalade taastamisvõimalus, kuna loob võimalused taastuvate energiaallikate kasvatamiseks ja taastab piirkonna bioloogilise mitmekesisuse ning esteetilise väärtuse.

2.MATERJAL JA METOODIKA

2.1. Katsealade kirjeldus

Ammendatud freesturbaväljade turba toiteelementide bilansi tasakaalustamiseks ja puude kasvu stimuleerimiseks biokütuste tuhaga (põlevkivituhk, puu- ja põlevkivi segutuhk) valiti logistilistel (rentaabel tuhaveokaugus) kaalutlustel ja korrastamisele minevate alade nimistust üks prioriteetsemaid: Puhatu freesturbaväli (Ots 2013: 9).

Puhatu mahajäetud turbatootmisala (joonis 1) ($59^{\circ}19.368'N$, $27^{\circ}34.024'E$) asub Illuka vallas RMK Ida-Virumaa metskonna territooriumil. Puhatu freesturbavälja (karjäärid ja väljakud kokku) pindala on Keskkonnaregistri andmetel 1486,13 ha (riigi reservmaa 558,08 ha: RMK hallatav ala 864,66 ha; eramaa 63,39 ha); hästilagunenud turbakihi paksus on 1,8 m, hästi lagunenud turba aktiivvaruks on 938 000 tonni, passiivseks varuks 2485 ha (Ramst *et al.* 2006)



Joonis 1. Puhatu mahajäetud turbatootmisala (Maa-amet12.05.2016)

Geoloogiline ehitus: soo on tekkinud ulatuslikus jääjärvelises nõos, kus turba all lasuvad jääjärvelised liivsavid ja liivad. Karjäärides oli 2006. aasta oktoobris kuni 0,5 m vett, põhjas keskmiselt 1 m turvast. Seal kasvavad harilik pilliroog (*Phragmites australis*), tarnad (pk *Carex*), konnaosi ja penikeeled. Osasid karjääre lahutavad vaid kitsad vahetervikud, ala idaosas aga ka endised freesväljad. Väljakutel on puid vähe, tupp-villpea katvus on keskmiselt 10 %, madalamates kohtades kasvab pilliroogu, ahtalehist villpead ja tarnasid. Kraavid on pooleldi turbamuda täis, neis kasvab ohtralt tupp-villpead, ahtalehist villpead, laialehist hundinuia, kraavtarna, harilikku luga, kraavluga. Veetase on keskmiselt 0,5 m maapinnast. Ala keskosas vahelduvad 1–6 m kaskede ja mändidega kaetud vanad väljakud madalate, pilliroogu täis kasvanud karjääridega (Ramst *et al.* 2006).

Võrreldes Ramsti ja tema kolleegide (2006) toodud kirjeldusega suuremaid muutusi 2015. aastal Puhatu mahajäetud turbatootmisalal ei täheldatud. Kuna kaevandamisega avatud turbalasundi sügavamad kihid on äärmiselt halva veehoide ja veemahutavuse võimega, võivad jääsoodele langevad sademed kergesti moodustada pinnapealseid ajutisi veekogusid, mida võis ka uuritud aladel täheldada. Maist kuni detsembrini (tavaliselt kuu viimasel nädalal) kestnud vaatlused näitasid, et mida sügise poole, seda suurema ala võtsid freesturbaväljadel enda alla nn. veetiigid, aga isegi suvekuudel kattis mõnede alade pindalast 70–80% ulatuses vesi. Toitainete tasakaalustamata bilansile (eriti K-defitsiidile) viitab männiokaste kolletumine Puhatu jääkturbaaladel. (Ots 2013: 8)

Tugev kuivendatud turbapinnas (kraaviperved) hakkab õhu käes lagunema ja seal on endale leidnud soodsad kasvutingimused mänd ja kask, millest võib kasvada hiljem tarbimisväärtust omav mets, loomulikult sellele ise kaasa aidates (väetamine, raied). Metsa kasvatamist Puhatu jääksoos soodustab ka rabasisene teedevõrk ja kraavitatus. Mänd, kask ja paju kasvavad kuivenduskraavide ääres, samuti pilliroog, hundinui, tupp-villpea, vaarikas, paiseleht, metsmaasikas, tulikaliigid, osjad, tarnad ning isegi kanarbik ja pohl. (*Ibid.*: 9)

Uuritud freesturbaväljadel paiknevad suured vett täis tiigid, taimestunud on peamiselt ainult kuivenduskraavide äärne ja pinnavormilt kõrgem ala. Lagedate alade vahel on metsasiilud, kus alustaimestikust vohab nõges, viidates pinnase N-rikkusele. Alla 10-aastaste mändide ja kaskede puhul võis täheldada sageli külmakohrutuse nähte ning turba mineraliseerumist ja ärakannet puude ümbrusest. (*Ibid.*: 9-10).

2.2. Katsepuud

Katsematerjaliks valiti 1-aastased hariliku männi (*Pinus sylvestris*L.) potitaimed. Iga katsevariandi (kolmes korduses) kogumiks on 30 puud. Väetamine toimus enne taimede istutamist ruutsüsteemi näol (taime ümber 1 × 1 m ulatuses). Puhatu freesturbaväljal kasutati Sonda katlamajast pärit puutuhka (PT) (koldetuhk) ja Eesti Energia Narva Elektriijaamad AS-i 6. ploki põlevkivituhka (PõT) (filtrituhk), mis segati omavahel mehaaniliselt, varieerides erinevates katsevariantides tuhakogustega.

Narva Elektriijaamade 6. ploki filtrituhk valiti välja ülejäänud kahe põlevkivituha (6. bloki tsüklontuhk ja 7. bloki tsüklontuhk) seast, kuna see tuhk sisaldab 3 korda enam kaaliumi ja 1,5 korda vähem Ca, mille sisaldus on Põhja-Eesti jääksoode turbas niigi kõrge, ületades 10 korda Lõuna-Eestis asuvate jääksoode vastavaid Ca-näitajaid.

Mõõtmised viidi läbi 2015. aastal Puhatusse põlevkivi tsüklontuhaga rajatud pilootkatsealadel:

- 1) põlevkivituhk 10 t/ha (PõT10)
- 2) puutuhk 15 t/ha + põlevkivituhk 15 t/ha (PT15+PõT15)
- 3) töötluseta ala (kontroll)

Pärast segutuha (puutuhk segus põlevkivituha) lisamist turbasse tekkis väetatud alale alustaimestik. Võrreldes kontrollalaga, kus alustaimestik puudus täielikult, võis segutuhaga töödeldud katsealadel täheldada kõrvenõgeste, põdrakanepi ja paiselehtede (katvus 35%) vahel kasvamas paju ja mändi.

Põlevkivituha töödeldud aladel puudus alustaimestik praktiliselt täiesti: 1 m² suurustel katseruutudel võis täheldada vaid mõnda paiselehetaimet ning üksikuid loodusliku uuenduse mände.

Septembris 2015 peale kasvu formeerumist mõõdeti katsepuude kõrguskasv ($n = 30-50$, cm) ja juurekaela diameeter ($n = 30-50$, cm). Männiokaste ($n = 90$, cm) pikkus ja pindala mõõdeti arvutiprogrammiga WinSeedle (*Regent Instruments Inc.*) 2016. aasta kevadel.

2.3. Keemilised analüüsid

Turvas. Toitainete sisalduse selgitamiseks kasvukeskkonnas võeti Puhatu ja freesturbavälja erinevate katsevariantide juhuslikest katseruutudest 5–10 cm sügavuselt turbaproovid ($n = 3$) 2015. aasta septembris. Peamiste elementide väljaleostumise hindamiseks koguti turbaproovid ($n = 3$) 0–60 cm sügavuselt 10 cm-se sammuga. Proovid kuivati ja sõeluti läbi 2 mm sõela. Keemilised analüüsid teostati Eesti Maaülikooli Taimebiokeemia laboratooriumis (pH_{KCl} , N, P, K; Ca, Mg).

Tuhad. Katses kasutatava puu- ja põlevkivituha pH_{KCl} ja $\text{N}_{\text{üld-}}$, $\text{P}_{\text{üld-}}$, K-, Ca- ja Mg-sisalduste määramiseks teostati analüüsid Eesti Maaülikooli Taimebiokeemia laboratooriumis. Tuhkades sisalduvad raskmetallide analüüsi OÜ Eesti Keskkonnauuringute Keskuses. Ülevaade erinevates tuhkades sisalduvate elementide kogustest on esitatud eelnevalt tabelis 2.

2.4. Andmete statistiline analüüs

Katsetöötluste puhul arvutati taimede tunnuste aritmeetilised keskmised ning standardhälbed. Tunnuste kooskõla normaaljaotusega kontrolliti Shapiro – Wilkins'i testiga. Keskmiste võrdluseks kasutati Tukey Unequal N testi, et välja selgitada tulemuste statistiliselt usaldatavad erinevused kontrollist. Statistilised erinevused kontrolliti erinevate olulisuste nivooodega (0,05, 0,01, 0,001). Statistiliseks analüüsiks ning jooniste tegemiseks kasutati programmi MS Excel 2010.

3. TULEMUSED JA ARUTLEU

3.1. Turba pH ja elementide sisaldus

Puutuhk sisaldab taimedele vajalikke toitaineid enam-vähem samades vahekordades kui esineb kasvavates puudes. Biokütuse põlemise tagajärjel oleks tekkivat tuhka otstarbekas kasutada happeliste turvasmuldade neutraliseerimiseks ja pealmise turbakihi eemaldamisega taime toitainete kompenseerimiseks ammendatud freesturbaväljadel. Seega oleks üheks biokütuste tuhkade taaskasutamise võimaluseks nende kasutamine ammendatud freesturbaväljade metsastamisel. Niiviisi kompenseeritaks turba pealmisest kihist eemaldatud toitained ja tuhk utiliseeritakse ehk taaskasutatakse (Huotari *et al.* 2015). M. Moilanen märgib oma töödes puutuha positiivset mõju freesturbaväljadel, kus puude kasvu pidurdab K-vaegus ja P halb kättesaadavus (Moilanen *et al.* 2002, 2013).

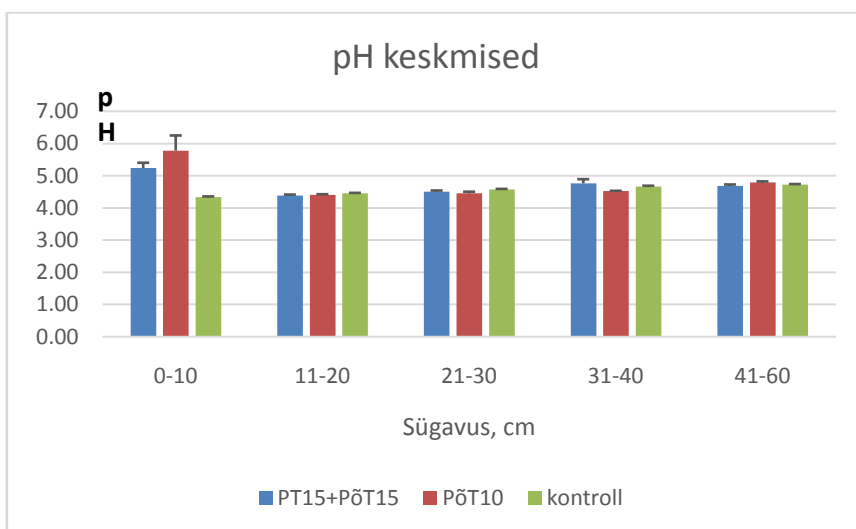
Põlevkivituha keemiline koostis varieerub vastavalt leiukohale, kuid 1997. aasta andmetel domineeris põlevkivituhas CaO – umbes 41,5%, sellele järgnes SiO₂ 30%-ga, ning Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O, SO₃ ja MgO leidis tuhas juba alla 10%. Seega koosneb põlevkivituhk põhiosas oksiididest. Tuha keemiline koostis sõltub kasutatud meetodist. Näiteks tolm põletamisel juhitakse põlevkivi koldesse peenestatud kujul ja paljud ühendid aurustuvad (Hg), samas mõned ei aurustu üldse (Ca, Mn, Mg). Põlevkivi lendtuhk on kompleksne segu erinevatest osakekestest ja see sisaldab peaaegu kõiki perioodilisus tabeli elemente kaasa arvatud raskmetalle (Laja 2003). Põlevkivituhk iseenesest pole loodusele kahjulik – seda võib kasutada väetistena ja pinna happesuse vähendamiseks. Balti soojuselektrijaama tuhaväljal, mida ei kasutatud pikka aega, kasvasid kased ja paljud vees lahustuvad komponendid olid vihmaveega minema viidud – see tõestab, et tuhk ise pole kahjulik (Arro *et al.* 2003).

Ka puutuha (pH_{KCl} = 12,5) keemilisest koostisest on näha, et puutuhk sisaldab peale Ca, K, P ja Mg rohkesti ka raskmetalle. Raskmetallidest leidub puutuhhas enamasti Mg, Fe, Al, Cu, Na, Pb, Cr ja Cd.

Kuigi põlevkivituhk sisaldab rohkesti erinevaid elemente siis on nende sisaldus erinev, näiteks on põlevkivi suhteliselt P-vaene. Puutuhk seevastu on P-rikas. P on taimedele eluks vajalike fosfaatide allikas, mis mõjutavad taimede saagikust. Siit järeldub, et põlevkivi- ja puutuhk annavad koos segus taimedele efektiivse väetise.

Puhatu ammendatud freesturbaväljal võeti proovid erinevatelt sügavustelt: 0-10cm, 11-20 cm, 21-30 cm, 31-40 cm ja 41-60 cm. Proovid on võetud kontrollalalt ja tuhkadega väetatud kastealadelt PT15+PõT15 ja PõT10.

Joonisel 2 on näha, et kontrollala ja katsealade turba pH tase on peaaegu ühesugune - keskmiselt 4,6. Erinevus tekib sügavusel 0-10 cm, kus kontrollala turba pH tase on 4,3; alal PT15+PõT15 vastavalt 5,2 ja katsealal PõT10 vastavalt 5,8 (joonis 2).



Joonis 2. Turba pHväärtused (keskmine±standardhälve)

Turba pH on seega tuhkadega töödeldud aladel nõrgalt happeline. Kontrollala turba pH on tugevalt kuni mõõdukalt happeline. Happelise kasvupinnase puhul on taimede toitelementide omastamine häiritud ning taimede kasv võib olla kiratsev. Eelnevalt happelise reaktsiooniga Puhatu jääsoo turba pH tõusis mitme ühiku võrra kuni pH-ni 7,7, millega tekkis istutatavatele puutaimedele ja külvide arenguks sobiv kasvupinnas (Kikamägi *et al.* 2014).

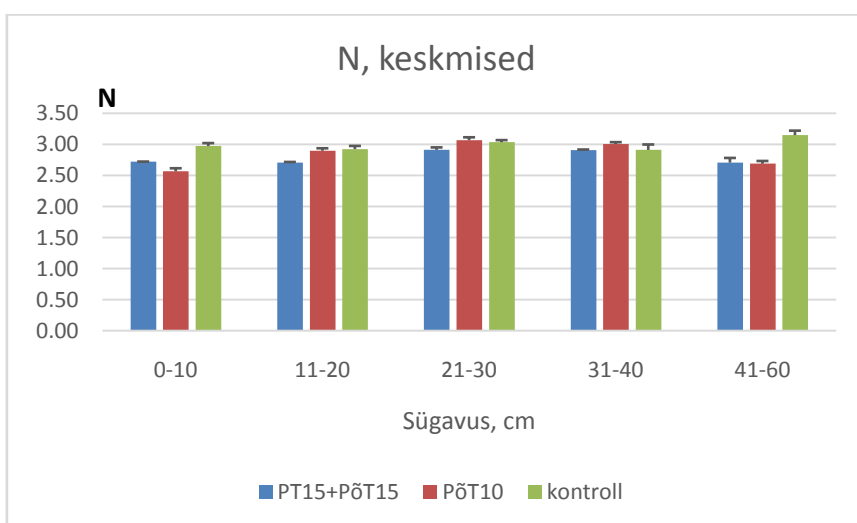
Puutuha kasutamine parandab kasvupinnase happesust, mis on täheldatav sügavusel 0-10 cm. Põlevkivituhaga väetades mõõdeti turba pH maksimaalseks väärtuseks 7.(Kikamägi *et al.* 2014).

Puutuhk on leeliseline ning aitab happelist turbamulda neutraliseerida ning toitainetega rikastada, mis parandab oluliselt taimede kasvu. Näiteks Soome soode väetamis katsete puhul oli 30 aastat pärast puutuhaga väetamist mulla ülemise kihi pH kahe ühiku võrra kõrgem kui väetamata aladel (Silfverberg, Hotanen 1989).

Hapniku vähesus mullas on liigniisketel aladel puude halva kasvu üheks põhjuseks. Lisaks hapnikusisaldusele esineb rabas veel teine puude kasvu takistav tegur – toiteelementide vähesus turbas. Eesti rabamuldades ei ole puude rahuldavaks kasvuks küllaldaselt omastatavat N ja P. (Valk 2005)

Taimede kõige tähtsamateks toiteelementideks peetakse N, P ja K, mida tihti leidub muldades vähesel määral.

Joonisel 3 on näha, et Puhatu katseala turba keskmine N-sisaldus on erinevates turbakihtides vahemikus 2,9-3,2% (joonis 3). On näha, et aladel PT15+PõT15 ja PõT10 on N-sisaldus kõrgem sügavustel 11-20 cm, 21-30 cm ja 31-40 cm ning mõnevõrra madalam sügavusel 41-60 cm.

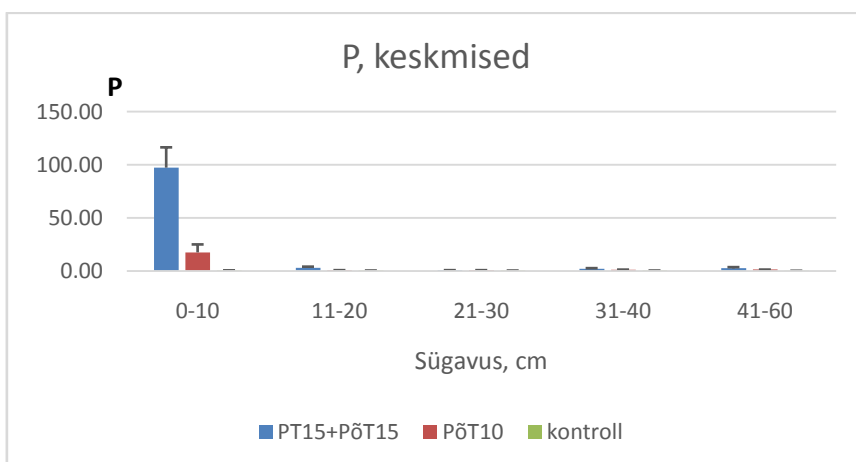


Joonis 3. Turba N-sisaldus (%), keskmine±standardhälve)

Kõige stabiilsemad tulemused on katsealadel PT15+PõT15, kus N-sisaldus jääb vahemikku 2,7-2,9% (joonis 3). Samas katsealal PõT10 tõuseb sügavustel 21-30 cm ja 31-40 cm N-sisalduse protsent isegi 3-ni (joonis 3).

Joonisel 4 on näha P sisaldust (mg/kg) Puhatu katsealadel. Selgelt on näha, et väetamine on oluliselt tõstnud P-sisaldust turba ülemises kihis (0-10 cm).

Katsealal PT15+PõT15 on P-sisaldus kihis 0-10 cm kõige suurem, olles 97 mg/kg. Kontrollalal on P-sisaldus kõige madalam, olles alla 0,7 mg/kg (joonis 4).

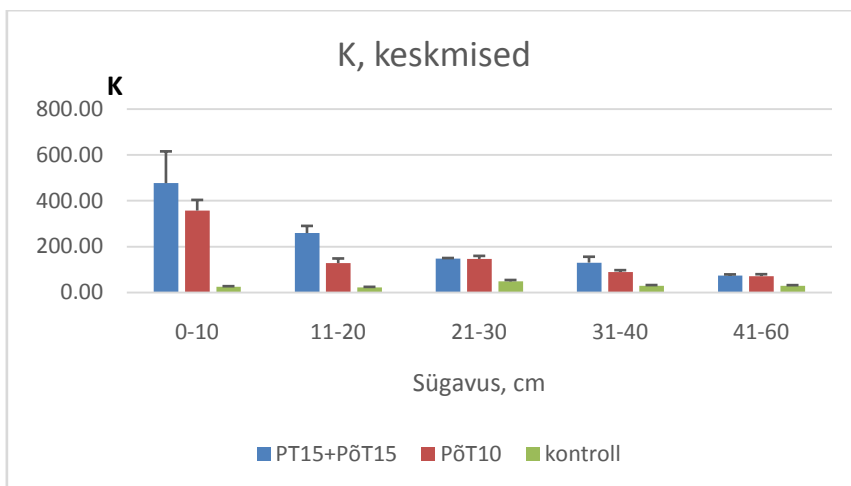


Joonis 4. Turba P sisaldus (mg/kg, keskmine±standardhälve)

Kaaliumi olemasolu on oluline taimedele lämmastiku paremaks omastamiseks ja seega ka ammendunud turbavälja edukamaks metsastamiseks (Hytönen 2005). Kui kaaliumirikas pindmine turbakiht freesimisega eemaldatakse, siis selle varu taimkatte puudumise tõttu enam ei taastu (Wind-Mulder *et al.* 1996).

Kui kaaliumi ülekaal fosfori suhtes parandab puuliikide vastupidavust ebasoodsatele keskkonnatingimustele, siis fosfori üleküllus põhjustab rakkude pikenemist, koredat puitu ja olulist juurdekasvu suurenemist. Võrsed ei jõua puituda ning nendel arenevad hästi seenhaigused (Paal 2011).

Joonisel 5 on selgelt näha, et väetamine on tõstnud K-sisaldust ülemistes kihtides (0-10 cm ja 11-20 cm). K-sisaldus on kõrgem katsealadel PT15+PõT15 ja PõT10 võrreldes kontrollalaga, kuid madalamates kihtides (21-30 cm, 31-40 cm ja 41-60 cm) see vahe ei ole nii märgatav (joonis 4). Katseala PT15+PõT15 turbas on kõige kõrgem K-sisaldus, olles kuni 30 cm sügavusel turbas vahemikus 148-477 mg/kg (joonis 5).

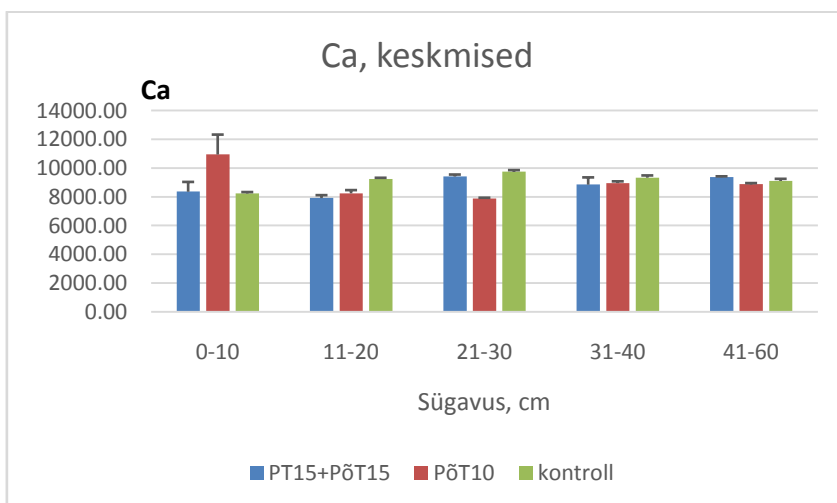


Joonis 5. Turba K sisaldus (mg/kg, keskmine±standardhälve)

Kaltsium on üks olulisemaid makroelemente, millest sõltub turvasmuldade viljakus (Valk 2005). Kõrgema Ca-sisaldusega turvas võib tõsta mikrobioloogilist tegevust, aidates kaasa turba lagunemisele ning orgaaniliselt seotud lämmastiku vabanemisele (Renou-Wilson 2007).

Kaltsium reguleerib süsivesikute ainevahetust taimes. Kaltsiumil on positiivne mõju ka juurte kasvule ning ta annab taimedele tugevust ning selle puuduse korral on märgatavad okaste suuremus ning juuretipu ja võrsete moonutatud kasvamine. (Clatterbuck 2013)

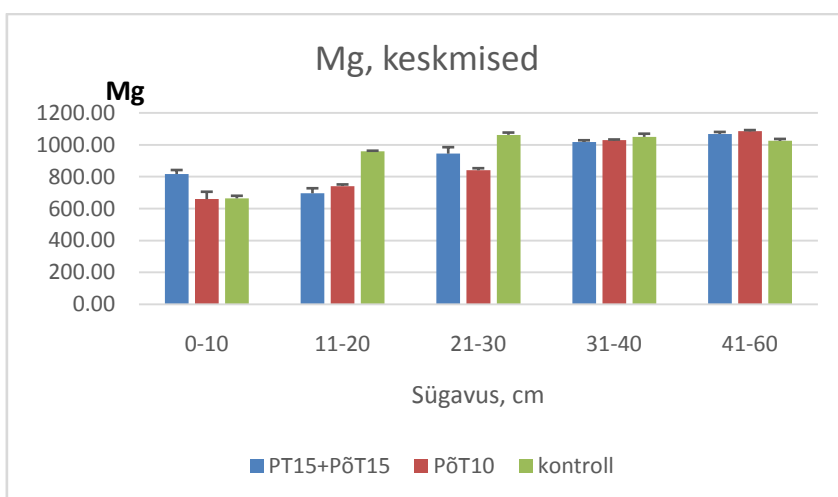
Joonise 6 on näha, et Ca sisaldus tõusis oluliselt katseala PõT10 kõige ülemises turbakihi (0-10 cm), Ca-sisaldus on ülejäänud aladel võrdlemisi sarnane (joonis 6).



Joonis 6. Turba Ca sisaldus (mg/kg, keskmine±standardhälve)

Magneesium kuulub klorofülli koostisesse ja seetõttu võtab see element osa süsihappegaasi assimilatsioonist. Magneesiumi puudusel algab klorofülli lagunemine - lehed muutuvad kollakaks, oranžiks või punakasvioletseks, välja arvatud leheroodude ümber, varred on nõrgad, õitsemise aeg hilineb, õite värv kahvatub. Mg üleküllus põhjustab Ca ja K omastamise häiringuid (st on takistatud nende elementide omastamine). Samuti Ca ja kõrgesisaldus turbas takistab taimedel Mg kättesaadavust (Otsus 2004; Valk, Raid 1996).

Joonisel 7 on näha, et kõrgem Mg-sisaldus on täheldatav kontrolliala turbas. Turba ülemises kihis, 0-10 cm sügavusel, on Mg-sisaldus kõige kõrgem katseala PT15+PõT15 turbas (joonis 7).



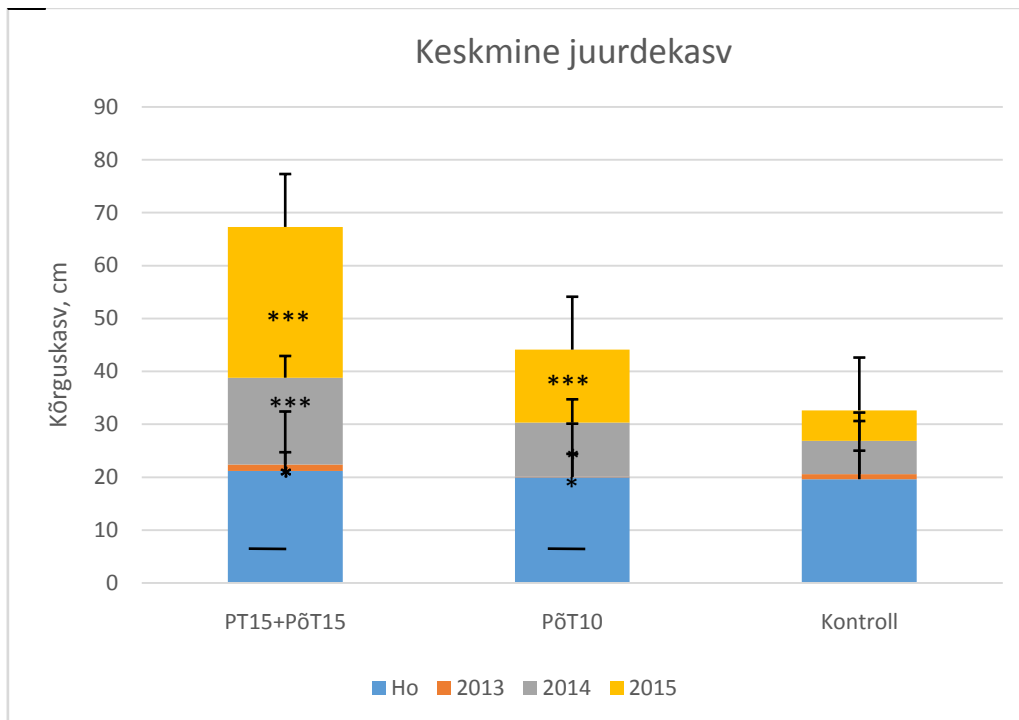
Joonis 7. Turba Mg sisaldus (mg/kg, keskmine±standardhälve)

Teiste elementide turbakihtides paiknemise dünaamikat vaadates näeme, et kõige suuremad kogused paiknevad ülemistes kihtides, aga magneesiumi puhul on suurima sisaldusega turba alumised kihid (joonis 7).

3.2. Puude kõrguskasv

Puude kõrguskasvu hindamiseks koguti andmeid Puhatu freesturbaväljal igast töötlustest ja kontrollialalt. Katsealal PõT10 oli esimesel aastal mändide keskmine kõrguse juurdekasv 0,1 cm, teisel aastal 10,2 cm ning kolmandal aastal 13,8 cm (joonis 8).

Katsealal PT15+PõT15 oli mõned kuud peale tuhaga väetamist mändide keskmine kõrguse juurdekasv 1,2 cm, teisel aastal 16,4 cm ning kolmandal aastal 28,5 cm (joonis 8). Kontrollalal näitajad olid kõige madalamad, vastavalt: esimese aasta mändide keskmine juurdekasv 1, teisel aastal 6,3 ning kolmandal aastal 5,7 (joonis 8).



Joonis 8. Puude kõrguse juurdekasv (cm, keskmine±standardhälve) erinevatel aastatel tuhkadega töödeldud katsevariantides ja kontrollalal. Statistiliste erinevuste arvutamiseks kasutati *t*-testi, *** $p \leq 0,001$

Kui võrdleme katsealadel PT10, PT15+PõT15 ja kontrollalal esimese aasta kõrguse juurdekasve, siis näeme, et see oli kõigil aladel võrreldes järgnevate aastatega kõige madalam. Seda võib selgitada mändide istutusjärgse stressiga.

Aastatel 2014 ja 2015 suurenes katsealadel PõT10 ja PT15+PõT15 mändide kõrguse juurdekasv, kuid kontrollala puudekõrguse juurdekasv langes (joonis 8). Mitmed uurimused tõestavad, et tuhaga (näiteks puutuhk) väetamisel on positiivne mõju puude kasvule (Huotari *et al.* 2008; Hytönen, Aro 2012). See näitab, et tuhaga väetamisel on potentsiaali ja tuha kasutamine õiges koguses stimuleerib puude kasvu.

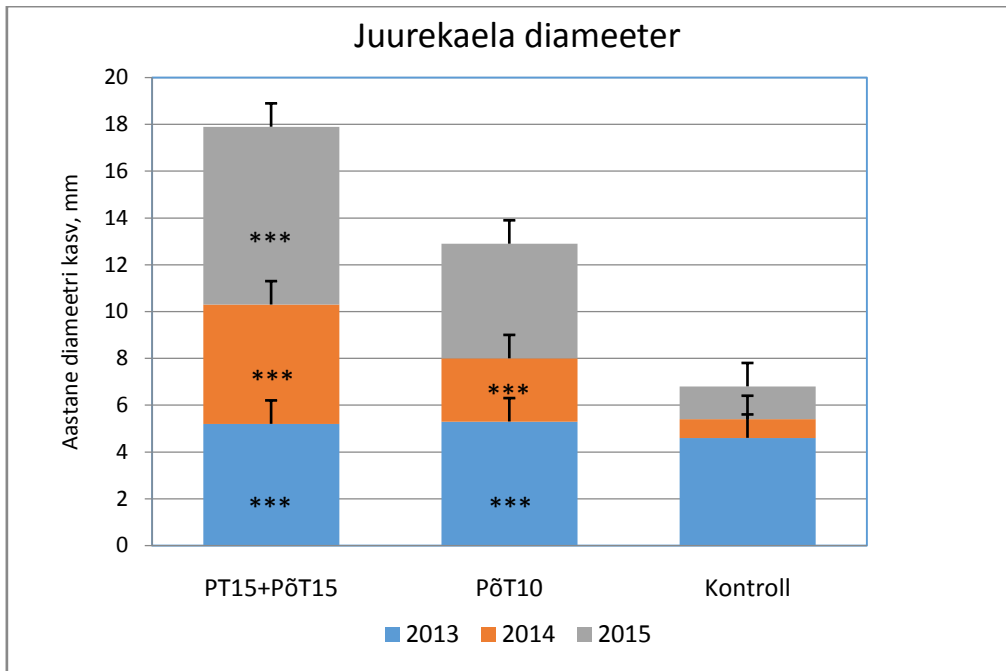
Kõige paremad tulemused saadi katsealalt PT15+PõT15, kus mändide keskmine kõrguse juurdekasv igal aastal suurenes (joonis 8).

Viimasel aastal täheldati kõrguse juurdekasvu 5-kordset erinevust katsealal PT15+PõT15 võrreldes kontrollala puudega (joonis 8). Katseala PõT10 ja kontrollala puude kõrguste võrdlemisel selgus, et põlevkivituhaga väetatud alal olid puud 2,4 korda parema kasvuga (joonis 8). Võime öelda, et põlevkivi- ja puutuha segutuhk on väetisena efektiivsem kui puhas põlevkivituhk.

Analoogselt selle tööga on sarnased tulemused saadud ka 2011. aastal Puhatu freesturbaväljale rajatud katsealadel (Kikamägi *et al.* 2014). Esimesel aastal peale istutamist ja tuhaga väetamist oli mõju männi keskmisele juurdekasvule kõikidel nii tuhaga väetatud aladel kui ka kontrollalal peaaegu võrdne ($p > 0,05$) (*Ibid.*). Analoogset istutusjärgset stressi täheldati männi puhul ka antud töös. Teisel aastal oli tuhaga väetatud aladel keskmine männi kõrgus juba märkimisväärselt suurem ($p < 0,05$) kui kontrollalal (Kikamägi *et al.* 2014). Segutuhaga PT10+PõT8 töödeldud alal oli puude kõrgus 1,5 korda suurem kui kontrollala puude kõrgus, mis on mõnevõrra väiksem kui käesolevas töös saadud tulemused segutuhaga PT15+PõT15 töödeldud katsevariandis, kus puude kõrguse juurdekasv oli 2,6 korda suurem kui kontrollala puude kõrguse juurdekasv.

3.3. Juurekaela diameeter

Mändide juurekaela keskmised diameetrid erinevatel katsealadel on toodud joonisel 9. Katsealal PõT10 mõõdeti esimesel aastal juurekaela diameetri juurdekasvuks 2,7 mm, teisel aastal 4,9 mm (joonis 9). Segutuhaga töödeldud alal PT15+PõT15 mõõdeti esimesel aastal juurekaela diameetri juurdekasvuks 5,1 cm, teisel aastal 7,6 cm (joonis 9). Tuhaga töötlemata kontrollalal oli mändide juurekaela juurdekasv esimesel aastal 0,8 cm ja teisel aastal 1,4 cm (joonis 9).



Joonis 9. Mändide juurekaela diameetrid (mm, keskmine±standardhälve) erinevatel aastatel tuhkadega töödeldud katsevariantides ja kontrollalal. Statistiliste erinevuse arvutamiseks kasutati *t*-testi, *** $p \leq 0,001$

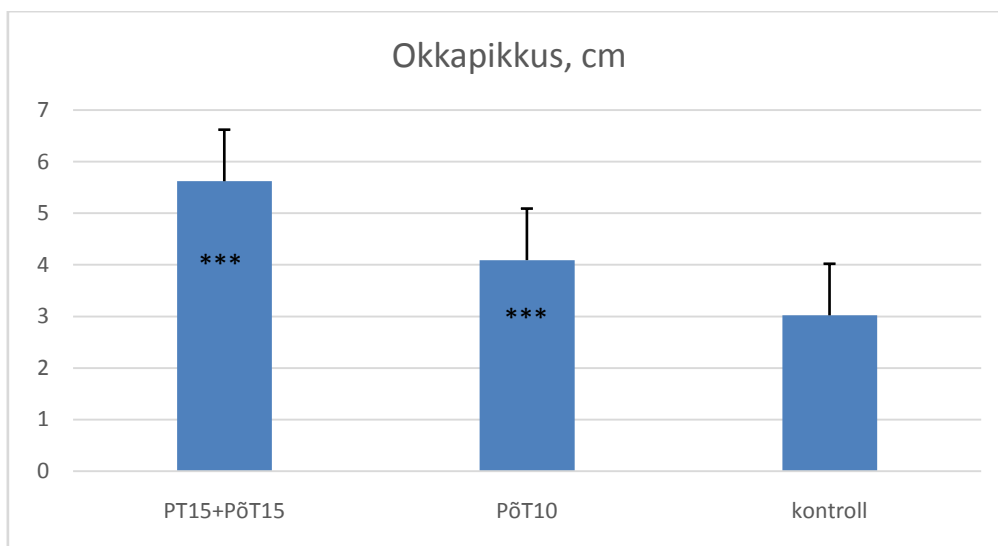
Paremaid tulemusi täheldatikatsealal PT15+PõT15, kus mändide juurekaela diameeter on iga aastaga suurenenud (joonis 9). Ka katsealal PõT10 suurenes juurekaela diameeter igal aastal võrreldes kontrollalal mändide juurekaela mõõtmetega (joonis 9). Aastal 2015 oli juurekaela diameeter katsealal PT15+PõT15 5,4 korda suurem võrreldes kontrollalal mõõdetud juurekaela diameetriga (joonis 9). Alal PõT10 oli 2015. aasta keskmine juurekaela diameeter 3,5 korda suurem võrreldes vastava kontrollalal näitajaga (joonis 9).

Segutuha (puu- ja põlevkivituhk) suuremat mõju puude juurekaela diameetrile võrreldes põlevkivituha mõjuga täheldati lisaks varem läbiviidud katsetele (Kikamägi *et al.* 2014) ka käesolevas uurimuses. Sarnaselt varasematele tulemustele (Kikamägi *et al.* 2014) täheldati ka käesolevas töös, et toitainerikka tuhaga väetamine suurendab märgatavalt puude kasvu, mõjudes positiivselt nii kõrguse juurdekasvule kui ka juurekaela diameetri suurenemisele.

3.4. Muutused assimilatsiooniorganite morfomeetrias – okkapikkus ja okka pindala

Kui vaadelda puude okkapikkust, siis näeme, et kontrollalal mändide okkad on võrreldes katsealade mändide okastega kõige lühemad. Okkapikkuste vahe on keskmiselt kuni 3 cm (joonis 10). Kõige paremad tulemused mõõdeti katsealal PT15+PõT15, kus okkapikkuste keskmised näitajad olid kuni 2 korda suuremad kui kontrollalal, erinedes statistiliselt usaldatavalt ($p \leq 0,001$). Kõige pikemad on okkad segutuhaga töödeldud alal – kuni 8,4 cm pikad (joonis 10).

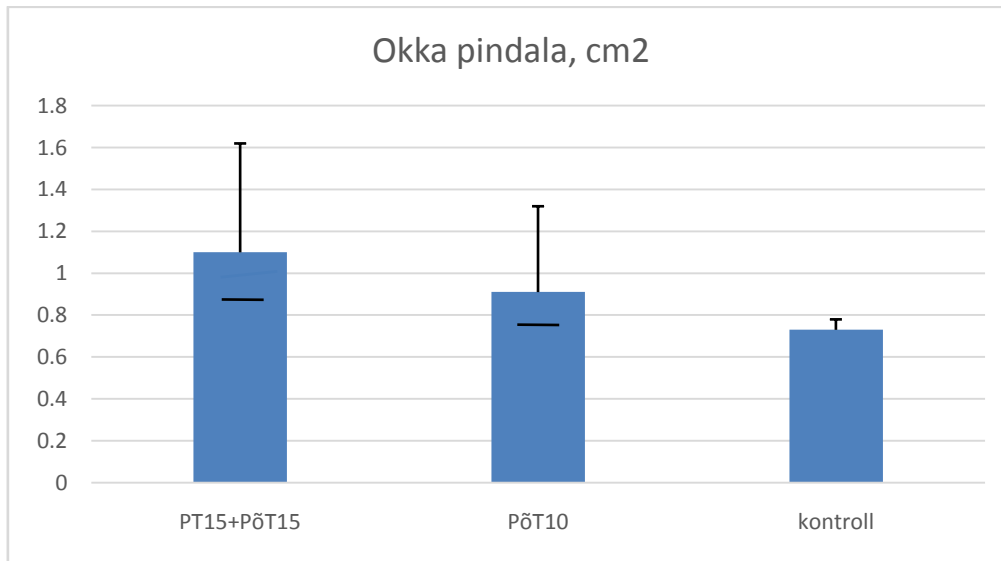
Katseala PõT10 näitajad on võrreldes katseala PT15+PõT15 näitajatega väiksemad, kuid siiski suuremad kui kontrollalal – okkad on keskmiselt 4,9 cm pikad ja erinevad statistiliselt usaldatavalt kontrollpuude keskmisest okkapikkusest ($p \leq 0,001$) (joonis 10). Tuhkadega töödeldud katsealade keskmiste võrdlemine näitas, et segutuhaga töödeldud mändide okkad on statistiliselt usaldatavalt ($p \leq 0,001$) pikemad põlevkivituhaga väetatud puude okaste pikkusest.



Joonis 10. Männiokaste pikkuskasv (cm, keskmine±standardhälve) tuhkadega töödeldud katsealadel ja kontrollalal. Statistiliste erinevuste arvutamiseks kasutati t -testi *** $p \leq 0,001$

Kuna okaste pindala on tugevalt seotud okaste pikkuskasvuga, siis on okka pindalade puhul täheldatav samasugune tendents nagu okkapikkuste puhul.

Puutihaga väetatud alal on okka keskmine pindala 1,2 korda suurem kontrollala puude okaste keskmisest pindalast (joonis 11). Puu- ja põlevkivituhaga väetatud aladel on okaste keskmine pindala männil 1,5 korda suurem kontrollala okaste keskmisest pindalast (joonis 11).



Joonis 11. Hariliku männi keskmine okka pindala (cm^2 , keskmine \pm standardhälve) tuhkadega töödeldud katsealadel ja kontrollalal

Okkapindala suurenemisel suureneb ka taimede assimilatsioonivõime ning fotosüntees on intensiivsem.

KOKKUVÕTE

Jääksoode kaevandusjärgne seisund sõltub mitmest asjaolust: tootmistehnoloogiast, ajast, mis on kulunud freesimise lõppemisest, soo tüübist, kuivendusvõrgu olukorrast, mineraalsele aluspõhjale jäänud turbakihi tüsedusest, mineraalse aluskihi omadustest ja ala suurusest. Olemasolevast seisundist sõltub ammendatud freesturbavälja taasmetsastamise edukus. Turbakaevanduse alt vabanenud jääksoode pinnas on enamasti toitainete vaene, halva niiskusrežiimiga ja liialt happeline. See loob puude kasvamaminekuks väga ebasoodsad tingimused. Biokütuste tuhkade kasutamine rikastab pinnast makro- ja mikroelementidega ning neutraliseerib pH-taset. See mõjub metsastamisele positiivselt, parandades oluliselt puude kasvu. Nii suureneb ka alade keskkonnakaitseline väärtus üldisemalt.

Käesolevas töös läbiviidud katsete tulemused Puhatu ammendatud freesturbaväljadel näitasid, et põlevkivituha (PõT10, põlevkivituhk kogusega 10 t/ha) ja puu- ja põlevkivituha segu (PT15+PõT15, puutuhk 15 t/ha ja põlevkivituhk 15 t/ha) kasutamine jääksoo turba toitainete sisalduse parendamiseks andsid positiivseid tulemusi. Antud töö käigus jõuti järgmiste tulemusteni:

- Põlevkivituha (PõT10) ja segutuha (PT15+PõT15) kasutamine vähendab turba happesust ning loob istutatavatele taimedele ja külvide arenguks sobiva kasvupinnase.
- Samuti tõstab tuhkadega väetamine turbas P ja K sisaldust võrreldes tuhaga töötlemata kontrollalal. Väetamine tõstab oluliselt P-sisaldust turba ülemises kihis (0-10 cm). Katsealal PT15+PõT15 on P-sisaldus kihis 0-10 cm kõige suurem, olles 97 mg/kg. Kontrollalal on P-sisaldus kõige madalam, olles alla 0,7 mg/kg. Ka K-sisaldus tõuseb väetatud aladel võrreldes kontrollalaga oluliselt. Kuigi madalamates kihtides ei ole see vahe nii märgatav, siis kontrollalal jääb K-sisaldus kõigil sügavustel alla 1 mg/kg, kuinaiteks katseala PT15+PõT15 on kuni 30 cm sügavusel turbas K-sisaldus vahemikus 148-477 mg/kg.

- Kasvupinnase toitelementide sisaldus paraneb kõige enam segutuha (PT15+PõT15) kasutamisel. Erinevust täheldati Ca-sisalduses, mille puhul on pisut kõrgemad näitajad põlevkivituhaga (PõT10) väetamisel. Kaltsium reguleerib süsivesikute ainevahetust taimes ning võib tõsta pinnase mikrobioloogilist tegevust
- Toitainerikka segutuhaga (PT15+PõT15) väetamine suurendab märgatavalt puude kasvu, mõjudes positiivselt nii kõrguse juurdekasvule kui ka juurekaela diameetri suurenemisele. Ka ainult põlevkivituhaga (PõT10) väetamine mõjutas oluliselt nii kõrguse juurdekasvu kui ka juurekaela diameetri kasvu võrreldes väetamata kontrollalaga.
- Tuhkadega töödeldud katsealade keskmiste okkapikkuste võrdlemine näitas, et segutuhaga töödeldud mändide okkad on statistiliselt usaldatavalt ($p \leq 0,001$) pikemad kui põlevkivituhaga väetatud puude okkad. Kuna okaste pindala on tugevalt seotud okaste pikkuskasvuga, siis on okka pindalade puhul täheldatav samasugune tendents nagu okkapikkuste puhul.

Töö sissejuhatuses esitatud hüpotees leidis kinnitust - bioenergeetikas tekkivate toitainerikaste, sh. rohkelt K ja P sisaldavate jäätmete (põlevkivituhk segus puutuhaga, põlevkivituhk) kasutamise tulemusel on freesturbaväljade metsastamine olnud tulemusrikas: tasakaalustatud turba toitainete bilanss ja taimede vajalike toitainete rohkus tuhkades on oluliselt stimuleerinud puude kasvu, sest toitainete optimaalne kättesaadavus mullast ja nende sisaldus kudedes garanteerivad tasakaalustatud füsioloogilised protsessid ja seetõttu suureneb biomassi formeerumine.

Teema on aktuaalne, kuna loob edukad eeldused Looduskaitse arengukava 2014-2020 nõuete täitmiseks, mille üheks eesmärgiks on 2020. aastaks ammendatud jääksoode rekultiveerimine 1000 ha ulatuses. Ka Euroopa Liidu keskkonnastrateegia näeb ette, et tuleb peatada loodusliku mitmekesisuse vähenemine ja arendada maastike taastamist ning välja töötada ja rakendada kaevandatud alade kaasaja nõuetele vastav rekultiveerimise süsteem. Lähtudes nimetatud arengukavast ja strateegiast ning toetudes käesolevas töös ning sarnastes töödes läbiviidud uuringutele, tuleks kiiremas korras töötada välja keskkonnaohutud, ressursisäästlikud ja jätkusuutlikud võtted põlevkivituhaga taaskasutamiseks, et vähendada reostussurvet keskkonnale.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Aro, L.** (2008). Cut-away peatlands in Forestry. – Korhonen, R., Korpela, L., Sarkkola, S. (eds.). Finland– Fenland. Research and sustainable utilisation of and peat. Finnish Peatland Society Maahenki Ltd., 207–211 pp.
2. **Arro, H., Prikk, A., Pihu T.** (2003). Reducing the environmental impact of Baltic power plant ash fields. Tallinn: Oil Shale, 2003, Vol. 20, No. 3 [e-ajakiri] http://www.kirj.ee/public/oilshale/12_prikk_2003_3s.pdf (28.04.2016).375-382 pp.
3. **Andersson, L., Emilsson, S.** (2006). Regular recycling of wood ash to prevent waste production RECASH–ALIFE Environment Demonstration Project. Recash 2nd International Seminar, Karlstad Sweden 26–27 (28) September 2006. Seminar Proceedings. 5–9 pp.
4. **Bachmann, M., Ilp, R., Kilk, K., Kopti, M., Leies, E., Loorents, K., Metusala, T., Nõgene, M., Sipelgas, K., Sirkel, E., Sokmann, T., Tammiksaar, E., Vennik, E.** (2014). Põlevkivituha kasutamine. Pöörlemise vägi. - Rmt: Kukersiit ja konnatahvel. Meie energia lugu. Tallinna Raamatutrükikoda. 87 lk.
5. Energiatalgud. (2016). Jäätmete teke http://www.energiatalgud.ee/index.php?title=J%C3%A4%C3%A4tmete_teke&menu-18 (28.04.2016).
6. Eesti Sood.- Soo ökoloogiline roll <http://www.soo.ee/soo-okoloogiline-roll> (15.04.2016).
7. **Gaškov, A.** (2011). Mida põlevkivituhasst tegelikult teha annaks ja võiks? Forte Uudised, 19. august 2011.
8. **Hånell, B., Magnusson, T.** (2005). An evaluation of land suitability for forest-fertilization with biofuel ash on organic soils in Sweden. – Forest Ecology and Management, 209, 45–55 pp.
9. **Huotari, N., Tillman-Sutela, E., Pasanen, J., Kubin, E.** (2008). Ash-fertilization improves Germination and early establishment of birch (*Betula pubescens* Ehrh.) seedlings on a cut-away peatland. –Forest Ecology and Management, 255, 2870–2875 pp.
10. **Hytönen, J.** (2008). Afforestation of Peatlands Fields. – Korhonen, R., Korpela, L., Sarkkola, S. (eds.).Finland – Fenland. Research and sustainable utilisation of mires and peat. Finnish Peatland Society, Maahenki Ltd., 212–216 pp.

11. **Hytönen, J., Saarsalmi, A.** (2009). Long-term biomass production and nutrient uptake of birch, alder and willow plantations on cut-away peatland. – Biomass and Bioenergy, 33, 1197–1211 pp.
12. **Huotari, N., Tillman-Sutela, E., Moilanen, M., & Laiho, R.** (2015). Recycling of ash – For the good of the environment? Forest Ecology and Management, lk 1-15 pp.
13. **Huotari, N., Tillman-Sutela, E., Kubin, E.** (2009). Ground vegetation exceeds tree seedlings in early biomass production and carbon stock on an ash-fertilized cut-away peatland. Biomass Bioenergy 33:1108–1115 pp.
14. **Hansallu, K.** (2016). Postimees: Eesti Energia hakkab põlevkivi tuhast tehtud väetist müüma. <http://majandus24.postimees.ee/3664167/eesti-energia-hakkab-polevkivituha-st-tehtud-vaetist-muuma> (25.04.2016).
15. **Karofeld, E.** (2006). Jääksood soodeks tagasi. (Remnant mires back to real mires). Eesti Loodus (Estonian Nature), 6, 16–20 pp. (In Estonian).
16. **Kaunisto, S., Aro, L.** (1996). Forestry use of cutaway peatlands. Vasander, H. (ed.). Peatlands in Finland. Finnish Peatland Society, Helsinki, 130–134 pp.
17. **Kuusik, K.** (2016). Eesti Energia: põlevkivituha kasutamine põllumajanduses on Hoogu kogumas. <https://www.energia.ee/uudised/-/news/2016/04/21/eesti-energia-polevkivituha-kasutamine-pollumajanduses-on-hoogu-kogumas> (28.04.2016).
18. **Kuusik, R., Meriste, T., Pototski, A.** (2012). Põlevkivi tuhakasutamise laiendamiseks on käivitunud mitu uut projekti. – Keskkonnatehnika, 3, 8–9 pp. (In Estonian).
19. **Kikamägi, K., Ots, K., Kuznetsova, T., Pototski, A.** (2014). The growth and nutrients status of conifers on ash-treated cut a way peatland. Trees-Structure and Function, Vol 28(1), 53 – 64 pp.
20. **Kohv, M., Salm, J.O.** (2012). Sisuline aruanne 2012. Tallinn: Ida-Virumaa ammendatud freesturbaväljade turba toiteelementide bilansi tasakaalustamine ja puude kasvu stimuleerimine põlevkivituha ning põlevkivi- ja puutuha seguga https://www.kik.ee/sites/default/files/Uuringud/aruanne_ida_virumaa.pdf (15.04.2016) 4-6 lk.
21. **Kopti, M.** (2014). Eesti Energia põlevkivituha taaskasutus on viie aasta jooksul Stabiilselt suurenenud Eesti Energia. <https://www.energia.ee/uudised/-/news/2014/01/21/eesti-energia-polevkivituha-taaskasutus-on-viie-aasta-jooksul-stabiilselt-suurenenud-> (25.03.2016).
22. **Kärblane, H.** (1996). Lubiväetiste kasutamine ja lupjamistehnoloogia areng. Rmt-s: Taimede toitumise ja väetamise käsiraamat. Tallinn, EV Põllumajandusministeerium, 86-89 lk.
23. **Kärblane, H.** (1996). Taimede toitumise ja väetamise käsiraamat. Tallinn: Põllumajandusministeerium, 1996 (Tallinn: Tallinna Raamatutrükikoda).

24. **Leupold, S.** (2005). Vegetation succession and biomass production after peat ash and PK-fertilization on the cutaway peatland of Näsmyran in Hälsingland, Sweden. Graduate Thesis in Biology. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Ecology. Umea. 38 pp.
25. **Leupold, S.** (2004). After use of cutaway peatlands – an overview of options and management planning. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Ecology, Individually directed course, 63 pp.
26. **Laja, M.** (2003). Põlevkivituhk, omadused ja käitumine keskkonnas. (Magistritöö). Tartu Ülikooli füüsikalise keemia instituut Tartu.
27. **McNally, G.** (1995). The utilisation of industrial cutaway peatlands. Peat Industry and Environment. Ministry of Environment Environment Information Centre. Tallinn, 84–86 pp.
28. **Masing, V.** (1992). Ökoloogialeksikon. Tallinn: Eesti Entsüklopeediakirjastus, 275–276 lk.
29. **Maran, K.** (2015). Põlevkivituhast võib saada väärtuslik tee-ehitusmaterjal Äripäev, nr. 47, 11 märts, 16 lk.
30. **Naylor, L.M., Schmidt, E.** (1989). Paper mill wood ash as a fertilizer and liming material: field trials. Tapp Journal, 72, 199–206 pp.
31. **Ots, K.** (2013). Sisulinearuanne 2012. Tallinn: Ida-Virumaa ammendatud freesturba väljadeturba tootelementide bilansitasakaalustamine ja puude kasvu stimuleerimine põlevkivituha ning põlevkivi- ja puutuhaseguga. (15.04.2016).
32. **Paal, J.** (2011). Jääksood, nende kasutamine ja korrastamine. Tartu : Eesti Turbaliit. 43 lk.
33. **Pikka, J.** (2005). Reoveesette kasutamisest ammendatud freesturbaväljade metsastamisel. Metsanduslikud uurimused, 42. Tallinn, 95–105pp.
34. **Pärn, H., Mandre, M., Ots, K., Klõšeiko, J., Lukjanova, A., Kuznetsova, T.** (2010). Use of biofuel ashes in forestry. For Stud 52:40–50 pp.
35. **Raid, L.** (1979). Külvikultuuride väetamisest jääksoodel. – Mets. Puit. Paber (Forest. Wood. Paper), 6, 16–18pp. (In Estonian).
36. Riigi jäätmekava 2014-2020. (2014). Keskkonnaministeerium. http://www.envir.ee/sites/default/files/riigi_jaatmekava_2014-2020.pdf (15.04.2016).
37. **Renou, F., Scallan, Ú., Keane, M.** (2007). Early performance of native birch (*Betula* spp.) planted on cutaway peatlands: influence of species, stock types and seedlings size. – European Journal of Forest Research, 126, 545–554 pp.

38. **Renou-Wilson, F., Pöllänen, M., Byrne, K., Wilson, P., Farrell, E.** (2010). The potential of birch afforestation as an after-use option for industrial cutaway peatlands. – *Suo*, 61, 3–4, 59–76 pp.
39. **Ramst, R., Orru, M.** (2009). Eesti mahajäetud turbatootmisalade taastaimestumine. Eesti Põlevloodusvarad ja –jäätmed.
40. **Selin, P.** (1995). After-use of peatlands in Finland. Peat Industry and Environment. Ministry of Environment Information Centre, Tallinn.
41. **Seemen, H., Pikk, J., Valk, U.** (2000). Unikaalne metsanduslik katseala Rae rabas (The Rae bog - a unique patch of experimental forestry). Akadeemilise Metsaseltsi Toimetised XII (Proceedings of the Estonian Academical Forestry Society XII). Töid Eesti metsanduse ajaloost III (Studies of the History of Estonian Forestry III). Tartu, 95–112 pp. (in Estonian, Abstract in English).
42. **Turbas, E., Hiis, V.** (1971). Klinkertolmu efektiivsuse ja erinevuse võrdlus põlevkivi lendtuhaja granuleeritud põlevkivituhaga põldkatsetes. 128-145 lk.
43. **Valk, U.** (1981). Freesturbaväljad erekultiveerimise võimalused. – *Keskkonnakaitse* 6, 7–9 pp. (In Estonian).
44. **Valk, U.** (1992). Turbaväljakute metsastamiskatsete tulemustest. (The results of forestation of peatlands) – *Eesti Mets (Estonian Forest)*, 4–5, 13–16 pp. (In Estonian).

SUMMARY

The condition of the cutaway peatlands after mining depends on several factors, such as production technology, time since the milling, type of the peat, condition of the drainage system, thickness of the peat layer on the mineral substrate, properties of the mineral substrate and the size of the area. The success of the reforestation of the cutaway peatland depends on the existing conditions. Soil of the cutaway peatland released under the peat mining is mostly poor in nutrients, it has a bad moisture regime and it is too acidic. It creates extremely unfavourable conditions for vegetation and trees to grow. Using biofuel ash enriches the soil with micro- and macro elements and neutralizes the pH value. It affects the afforestation in a positive manner by significantly improving the trees' growth. Therefore the environmental value of the areas increases in general.

The results of the performed experiment within the given research on the cutaway peatland in Puhatu showed that the usage of oil shale ash (PöT10, oil shale ash with the amount of 10 t/ha) and the ash mixture of wood and oil shale (PT15+PöT15, wood ash 15 t/ha and oil shale ash 15 t/ha) for improving the nutrient content of cutaway peatland gave positive results. The following conclusions were reached in the course of the given research work:

- The usage of oil shale ash (PöT10) and ash mixture (PT15+PöT15) decreases the acidity of peat and creates a suitable growing soil for the plants and for the sowing.
- Fertilizing with ash also increases the content of P and K in peat compared to the control area which was not treated with ash/ashes. Fertilization significantly increases the content of P in the upper layer of peat (0-10 cm). The content of P in the upper layer 0-10 cm of the test area PT15+PöT15 is the highest which is 97mg/kg. The content of P in the control area is the lowest which is below 0,7 mg/kg. Compared to the control area, the content of K also increases significantly in the areas which have been fertilized. Even though in lower layers the difference is not that considerable, in control area the content of K remains below 1 mg/kg in all depths. Whilst in the test area PT15+PöT15 the content of K in peat up to 30 cm in depth is between the ranges of 148-477 mg/kg. The content of nutrients in the soil improves best in case of using ash mixture (PT15+PöT15).

- The difference was noticed in the content of Ca which content was slightly higher when fertilized with shale ash (PöT10). Calcium adjusts the metabolism of carbohydrates in plants and may improve the microbiological activity in soil.
- Fertilizing with nutritious ash mixture (PT15+PöT15) significantly increases the growth of trees by having a positive effect on the height and the diameter of the root collar. Fertilizing with only oil shale ash (PöT10) had a remarkable effect on the height and the diameter of the root collar compared to the control area which was not fertilized.
- Comparing the average needles' length with the test areas treated with ash showed that the pine needles which were treated with ash mixture were statistically longer ($p \leq 0,001$) than the ones fertilized with oil shale ash. Since the surface area of the needles is strongly related to the needles' growth rate, the same tendency can be observed in the surface areas of the needles as in the needles' lengths.

The hypothesis set up in the introduction part of the research work was confirmed – as a result of using bioenergetics nutritious waste material (oil shale ash mixed with wood ash, oil shale ash), which content is rich in K and P, the afforestation of milled peatlands has been successful: the balance of nutrients of peat and the abundance of nutrients in ash which are necessary for vegetation has significantly stimulated the trees' growth because the optimal availability of the nutrients in soil and their content in tissues ensure the balanced physiological processes and therefore the biomass formation increases.

The subject is topical because it creates successful preconditions to fulfil the requirements of the Conservation Development Plan 2014-2020. One of its purposes is to recultivate the exhausted cutaway peatlands by the year of 2020 in the extent of 1000 ha. The environmental strategy of the European Union also envisages that the diminishing of the natural diversity has to be stopped and the landscape restoration has to be promoted. Therefore the recultivation systems of the mined areas with the respective contemporary requirements have to be developed and implemented.

Based on the mentioned development plan and the strategy and relying on the research carried out in the given work and in similar works, environmentally safe, resource-saving and sustainable methods about recycling oil shale ash need to be elaborated as soon as possible, in order to decrease the pollution pressure on the environment.

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

Mina, AleksandraDijeva
_____,
(autori nimi)

sünniaeg _27.11.1985 a. _____,

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

”Põlevkivituha kasutamisest ammendatud freesturbaväljade taasmetsastamisel”

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja(d) on Katri Ots, *DrSc* ja Mari Tilk,
MSc _____,

(juhendaja(te) nimi)

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.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)