

Ammendatud freesturbaväljade taasmetsastamine: puutuha mõju biomassi formeerumisele ja süsiniku bilansile

Katri Ots^{1,*}, Mall Orru^{2,3}, Mari Tilk^{1,4}, Leno Kuura¹ ja Karin Agurajuja¹

Ots, K., Orru, M., Tilk, M., Kuura, L., Agurajuja, K. 2017. Afforestation of cutaway peatlands: effect of wood ash on biomass formation and carbon balance. – Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused 67, 17–36. ISSN 1406-9954. Journal homepage: <http://mi.emu.ee/forestry.studies>

Abstract. Alternatives to the restoration of cutaway peatlands include afforestation, energy forests, agricultural production, wetland restoration (restoration of peat-accumulating function), reed canary grass (energy mower) or wild berries (blueberry, cranberry) cultivation, protected area for birds, and artificial lakes. Investigations made in several countries suggest that one of the most promising ways of regenerating cutaway peatlands is afforestation. The re-vegetation of Estonian cutaway peat production fields is mainly the result of natural processes, which are generally very slow: vegetation covers only 10–20% of a peat field. Carbon dioxide is not bound anymore in cutaway peatlands where vegetation layer has been destroyed and therefore photosynthetic processes no more occur. Using biofuel ashes (wood ash, etc.) for the afforestation of cutaway peatlands helps to balance the content of nutrients in peat substrate, which improves the survival of planted seedlings and significantly increases bioproduction. Drained and mined peatlands have become a significant source of CO₂ but stimulated woody biomass production can be helpful to balance CO₂ emission from cutaway peatlands. Because of the limited resources of fossil fuels and negative impacts on the environment in recent decades alternative sources of energy have been actively looked for. In Scandinavia a lot of attention has been paid to finding possibilities for using biofuels. The situation in Estonia is that only very few types of ashes (for example certified oil shale fly ash with product name Enefix) have been founded to be suitable for utilization and have been used for recycling in agriculture.

Key words: afforestation, wood ash, biomass formation, carbon balance, cutaway peatland.

Authors' addresses: ¹Chair of Silviculture and Forest Ecology, Institute of Forestry and Rural Engineering, Estonian University of Life Sciences, Kreutzwaldi 5, 51014 Tartu, Estonia; ²Institute of Geology, Tallinn University of Technology, Ehitajate tee 5 Tallinn, Estonia; ³Geological Survey of Estonia, Kadaka tee 82 Tallinn, Estonia; ⁴Tallinn Botanic Garden, Kloostrimetsa Road 52, Tallinn, Estonia; *e-mail: katri.ots@emu.ee

Sissejuhatus

Ammendatud freesturbaaladeks ehk jääksoodeks nimetatakse alasid, kus turbala-sund on edasiseks masinatega kaevandamiseks ammendatud ja turba jääklasundi tüsedus ei ületa enamasti 0,1–0,5 meetrit

(Paal, 2011). Ammendatud freesturbavälju on Soomes *ca* 60 000 ha (0,18% kogu riigi pindalast), Kanadas *ca* 12 000 ha (0,01%), Rootsis *ca* 20 000 ha (0,04%) ja Eestis 9371 ha (0,21%) (Vasander *et al.*, 2003; Ramst *et al.*, 2006, Ramst & Orru, 2009; Hytönen *et al.*, 2014; Statistics about Peatland..., 2015).

Esiolgne käsitsi tükkturba varumine Eestis asendus tehnoloogia arenedes freesturba tootmisega (Lode, 1999). Turba kaevandamist freestehnoloogia meetodil alustati Eestis alates 1950. aastatest ja aastast 1980 on see olnud põhiline kaevandamise meetod, mis on võimaldanud kaevandada turvast suurtelt aladelt. Jäänukina Nõukogude Liitu kuulumise ajajärgust on Eestis tänapäeval üksjagu mahajäetud freesturba tootmisalasid. Eesti Geoloogiakeskuse tehtud inventuuri käigus 2005–2008. a täpsustati freesturbaväljade pindala ja asukoht, hinnati jääksoode hetkeseisundit ja edasise kasutuse võimalusi (Ramst & Orru, 2009). Kõige suuremal alal asub jääksoid Pärnu maakonnas (3816 ha) ja Ida-Virumaal (1931 ha), järgnevad juba kordades väiksemate jääksooladega Lääne-Virumaa (609 ha), Võrumaa (499 ha) ja Harjumaa (416 ha) (Ramst *et al.*, 2005, 2006, 2007, 2008). Lähikümnenditel langeb kasutusest välja veel ca 20 000 ha praegu kasutuses olevaid tootmisväljakuid (Paal & Leibak, 2011).

Igasugune maavara kaevandamine on ajutine tegevus ja selle lõppemisel tuleks rikutud maal taastada kaevandamiseelsele võimalikult lähedane seisund (Ilomets, 2001, 2003, 2005). Maapõueseaduse §80 lõige 4 näeb ette, et kaevandatud maa kohandatakse metsamaaks, veekoguks, muuks tarbimisväärseks maaks või tunnustatud väärtusega maastikuks. Jääksoode korrastamine on keskkonnakaitselisest aspektist väga oluline, sest ammendatud turbamaardlad vähendavad märgatavalt looduslikku mitmekesisust, mõjutavad ümbruskonna veerežiimi, on väga tuleohtlikud ning olulised kasvuhoonegaaside allikad. Eesti Keskkonnastrateegia näeb ette loodusliku mitmekesisuse vähendamise peatamist ja maastike taastamise arendamist ehk kaevandatud alade nüüdisaja nõuetele vastava korrastamissüsteemi väljatöötamist ja rakendamist (Eesti Keskkonnastrateegia aastani..., 2007). Ammendatud turbamaardlate edasise saatuse üle otsustamisel lähtutakse seal valitsevatest maastiku ökoloogilistest tingimustest (Paidla, 1975). Rikutud alade

korrastamisel tuleb tagada, et kaevandatud ala põhjavee režiim vastaks maa kasutamise sihtotstarbele, sest korrastamissuuna määrab ära põhjavee tase (Orru *et al.*, 2012). Inventeeritud jääksoodest on Eesti Geoloogiakeskus soovitanud metsastada 22 ala ning 26 osas on tehtud ettepanek need võtta taaskasutusse turbamaardlatena, sest säilinud on teedevõrk ja kuivenduskraavid, mistõttu saab sealt veel turvast kaevandada (Ramst *et al.*, 2005, 2006, 2007, 2008). Inventuuri tulemuste põhjal püstitas Keskkonnaministeerium 2010. aastal eesmärgi: aastaks 2011 korrastada mahajäetud jääksoodest 1,8% ja jõuda 2013. aastaks 3%-ni, mida kahjuks ei suudetud täita (Kohv & Salm, 2012). Euroopa Liit (EL) on eraldanud Eestile jääksoode korrastamiseks EL-i meetme „Saastunud alade ja veekogude korrastamine“ vahenditest 10,915 miljonit eurot finantsperioodiks 2014–2020 kohustusega korrastada selle aja jooksul vähemalt 2000 hektarit ammendatud freesturbaväljasid taassoostamise teel (Keskkonnaministeerium, 2017).

Ammendatud freesturbaväljade taaskasutamise alternatiiviks on soostumis-, seega ka turbatekkeprotsesside taastamine, marjakasvatuse, energianiidu (päideroo ja hundinuia kasvatamine) rajamine, põllumajandus või lindude pesitsemise kaitsealaks planeerimine (Selin, 1995; Hytönen & Kaunisto, 1999; Campbell *et al.*, 2002; Groeneveld & Rochefort, 2002; Karofeld, 2006, 2011; Aapala *et al.*, 2008; Huotari *et al.*, 2008; Silvan & Yli-Petäys, 2008; Paal, 2011; Heinsoo *et al.*, 2011; Karofeld *et al.*, 2015). Mitmes riigis tehtud 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 metsastamine

Eesti jääksoode looduslik taimestumine on üldjuhul vaevaline ja kaootiline (Triisberg *et al.*, 2014; Orru *et al.*, 2016). Jääksoo taas-

taimestumise iseloomu ja kiiruse määraavad mitmed tegurid, nagu veetase, vee ja jääkturba keemiline koostis, pinna lang jne (Ilomets, 2001). Metsastamist kui jääksoode edukat taimestamise viisi kasutatakse mitmes riigis: Soomes (Selin, 1995; Aro, 2008; Hytönen & Saarsalmi, 2009; Hytönen & Aro, 2012; Moilanen *et al.*, 2005; 2013; 2015), Rootsis (Hånell, 1995; Hånell & Magnusson, 2005; Leupold, 2004, 2005), Iirimaa (McNally, 1995; Renou *et al.*, 2007; Renou-Wilson *et al.*, 2010) jm. Eestis on jääksoode metsastamisega tegeletud aastakümneid. Tootmisalade kõrval on rajatud katsealaid ja ilmunud on hulk artikleid (Raid, 1979; Valk, 1981; Kikamägi & Ots, 2010; Pikk, 1982, 2001, 2011; Pikka, 2005, 2008, 2011; Kikamägi *et al.*, 2013, 2014; Agurajuja *et al.*, 2015; Ots *et al.*, 2017). Ammendatud freesturbaväljade metsastamine on ökoloogilistest ja majanduslikest aspektidest lähtudes otstarbekas ja perspektiivne korrastamise viis. Loodusliku mitmekesisuse seisukohalt on rahuldavalt kasvavad soometsad vääruslikumad kui tuhanded hektarid lagedad ja aastakümnete jooksul väga pikkamööda taimestuvad turbaväljad (Valk, 1981). Pealegi on mets sama suur loodusrikkus kui soo ning praeguste turbaväljade metsa alla viimine tähendab kauges minevikus valitsenud olukorra taastamist. Kaevandatud alade metsastamisega taastatakse taimkate ja mulla viljakus, peatatakse turba pealmise kihi mineraliseerumine ja ärakanne, samuti on metsad efektiivsed süsihappegaasi sidujad, võimaldades tasakaalustada antropogeense CO₂ emissiooni.

Alternatiiviks mineraalväetistele on jääksoode viljakuse tõstmiseks erinevate jätmete (reoveesete, puu- ja turbatuhk, põlevkivituhk, tsemenditoll jm) kasutamine (Gradeckas, 1997; Gradeckas *et al.*, 1998; Seemen *et al.*, 2000; Pikka, 2011; Kikamägi & Ots, 2010; Kikamägi *et al.*, 2013, 2014; Agurajuja *et al.*, 2015; Ots *et al.*, 2017). Eelmainitud jätmeid tekib suurtes kogustes, mistõttu nende kasutamine (põllumajanduses, metsanduses vm) vähendab oluliselt prügilatesse ladustatavate heitmete kogust

(Pikka, 2011). Puu- ja turbatuha kasutamine muutub eriti aktuaalseks seoses üha suureneva puidu ja turba tarvitamisega kütteks. Põlevkivi põletamisel tekib rohkelt tuhka – ladustamispaikadesse (nn tuhaväljadele) on seda juba kogunenud 280 miljonit tonni ning aastas lisandub 4–5 mln tonni, millest viimasel kümnendil on taaskasutatud ainult 3–6% (Kuusik *et al.*, 2012). Tuhkade peamiseks kasutusalaaks Eestis on põllumajandus, kuid taimekasvatuseks sobivatest tuhkadest on vaid mõned serifitseeritud tootena müügil (näiteks põlevkivi lendtuhast valmistatud toode Enefix). Keskkonnanõukaitseaspektist on oluline leida uusi ja innovaatilisi võimalusi looduslähedaste ja toitainerikaste jätmete kasutusele võtmiseks.

Metsade väetamine puutuhaga on osutunud tulutoovaks metsamajanduslikuks võtteks, millele pööratakse maailmas, eriti Skandinaavia maades, üha suuremat tähelepanu. Sellele aitab kaasa biokütuste suurenev tarbimine ning tuha ladustamise kallinemine (Silfverberg, 1996; Ludwig *et al.*, 2000; Arvidsson & Lundkvist, 2001a; Lundell *et al.*, 2001; Rumpf *et al.*, 2001; Jacobson, 2003). Kõige paremaid tulemusi puutuha kasutamisel on saadud puude kasvu stimuleerimisel jääksoodes (Kaunisto, 1981; Hytönen, 1995; Demeyer *et al.*, 2001; Moilanen *et al.*, 2002; Tillmann-Sutela *et al.*, 2004; Huotari *et al.*, 2009; Ernfors *et al.*, 2010; Ingerslev *et al.*, 2014). Metsastamise kõrval on jääksoode korrastamisel fookusesse tõusnud ka energiavõsa kasvatamine (Aro, 2008; Hytönen & Aro, 2012). Jääksoodel kultiveeritud kiirekasvulised lehtpuud ja nende hübriidid, samuti erinevad pajuliigid (*Salix* spp.) sobivad hästi bioküttematerjaliks (Karofeld *et al.*, 2017). Soomes korraldatud katsed näitasid, et peale 21 kasvuaastat oli kaske biomass ligi 100 t ha⁻¹ ning keskmine aastane puidu biomassi juurdekasv oli 3–4,6 t ha⁻¹ aastas (Hytönen & Aro, 2012). Heades tingimustes võib mets olla ammendatud freesturbaväljal kõrge tootlikkusega. Lisaks on jääksoodesse rajatud lehtpuuribad heaks tuletokeks (Pikka, 2008).

Jääksoo metsastamisel on vaja head kuivendusvõrku ja korras teed. Tulemused Puhatu jääksoos näitavad, et ebarahuldavalt toimiva kuivendussüsteemi tõttu suureneb istutatud männiseemikute suremus ja pidurdub kõrguse juurdekasv (Kikamägi *et al.*, 2014). Põhjavee tase peab vegetatsiooniperioodil jääma keskmiselt 40–50 cm sügavusele ja kultiveerimistöõde ajal vähemalt 30 cm sügavusele ning jääksoo turba tusedus ei tohi olla alla 30 cm (Valk, 1981). Metsastamisel tuleks jätta eesvoolud ja vahekraavid lahti, et soodustada loodusliku uuenduse teket ja arengut, kuna nendest puutaimedest sirgub hilisem tootlik mets (Saarmets, 1999).

Metsastamise tingimustest lähtudes jagatakse jääksood nelja rühma: 1) alla 50 cm paksuse turbakihi jääksood, kus veerežiim on soodne; 2) alla 50 cm paksuse turbakihi jääksood, mis pidevalt või periooditi kannatavad liigniiskuse all; 3) üle 50 cm paksuse turbakihi jääksood, kus veerežiim on soodne; 4) üle 50 cm paksuse turbakihi jääksood, mis pidevalt või periooditi kannatavad liigniiskuse all (Pikk & Valk, 1995). Jääksoode eduka metsastamise eeldused on õige puuliigi valik, kasvupinnase ettevalmistusmeetod, umbrohu leviku kontroll, toitainete sisalduse reguleerimine jm (Hytönen, 2008). Jääksoid ei ole võimalik ilma väetamiseta hästi metsastada (Raid, 1979; Valk, 1981; Hytönen, 2008), samas võivad väetisainete suured kogused põhjustada noorte taimede hukkumist (Aro, 2008). Tuhaga väetamine mõjutab tugevalt turba pealmise kihi bioloogilisi protsesse, isegi 50 aastat pärast töötlemist saab selgelt märgata muutusi alustaimestikust ja puistu kasvust ning mineraalväetistega võrreldes ilmneb puutuha mõju hiljem (Moilanen *et al.*, 2002).

Puutuha mõju turba omadustele

Puutuhk vähendab ennekõike turbamuldade happesust (Farmer *et al.*, 1985; Silfverberg & Hotanen, 1989; Silfverberg, 1996;

Moilanen & Issakainen, 2000). Tolmjas puutuhk on väga reaktiivne ja aluseline võrreldes töödeldud ehk stabiliseeritud puutuhaga (granuleeritud, isepaakunud tuhk jm) ning tõstab mulla pH-d hüppeliselt (Eriksson *et al.*, 1998; Ring *et al.*, 1999; Steenari *et al.*, 1998, 1999ab; Aronsson & Ekelund, 2004; Karlton *et al.*, 2008). Metsamajanduses sobib paremini kasutamiseks granuleeritud tuhk, sest taimede kasvuks vajalike elementide omastamine toimub järk-järgult, väheneb toitainete leostumise risk ning mõju metsaökosüsteemidele kestab aastaid (Clarholm, 1998; Callesen *et al.*, 2007). Ilmnenud on, et granuleeritud ja isepaakunud tuha mõju on sarnane tolmla tuha mõjule esimese 10 aasta jooksul peale tuhaga töötlemist, kuid eeltöödeldud tuhkadest lahustub toitaineid esimestel aastatel aeglasemalt kui tolmjast tuhast (Moilanen *et al.*, 2013).

Tolmla puutuha koguste 3,1, 3,3 ja 6,6 t ha⁻¹ kasutamisel täheldati neli aastat peale tuhaga väetamist turba pH tõusu 0–5 cm sügavusel kuni 0,4 ühiku võrra ning suurema tuhakoguse puhul kuni 0,9 ühiku võrra (Björk *et al.*, 2010). Tuhakogus 5 t ha⁻¹ tõstis pH väärtust 1,4–2 ühiku võrra 10–19 aastat pärast tuhaga töötlemist (Bramryd & Fransman, 1995; Mälkönen, 1996; Moilanen & Issakainen, 2000). Varem happelise reaktsiooniga Puhatu jääksoo turba pH tõusis mitme ühiku võrra kuni pH-ni 7,7 puutuha koguse 10–15 t ha⁻¹ kasutamisel, millega tekkis istutatavate puutaimede kasvuks ja külvide arenguks sobiv kasvupinnas (Kikamägi *et al.*, 2014). Mulla pH stabiliseerub 5–10 aasta jooksul pärast tuhaga töötlemist (Bramryd & Fransman, 1995; Saarsalmi *et al.*, 2001).

Ammendatud freesturbaväljadele on omane mitme elemendi (nt fosfor, kaalium, kaltsium) vaegus, aga ka mineraalse lämmastiku (NO₃⁻, NH₄⁺; enamik turbas sisalduvast lämmastikust on orgaanilises olekus) vähesus (Paavilainen & Päivänen, 1995; Kaunisto & Aro, 1996; Kaunisto, 1997; Jones *et al.*, 1998; Hytönen & Kaunisto, 1999). Soos kasvavad taimed kannatavad fosfori-vaeguse käes just seetõttu, et suu-

rem osa fosforist on turvasmullas taimedele raskesti omastatav (Aerts *et al.*, 1992). Turbaaladel on fosfor ja kaalium puude kasvu limiteerivad elemendid (Aro & Kaunisto, 1995; Hytönen, 2003), kuid olulisel määral neid elemente sisaldava puutuha kasutamisel jääksoode metsastamisel paraneb lisaks fosfori ja kaaliumi kättesaadavusele ka lämmastiku omastatavus (Hytönen, 1995; Hytönen & Saarsalmi, 2009). Mullas suurenenud toitainete sisalduse mõju kestab järgmised 10–15 aastat, pärast mida hakkab kaaliumisisaldus järk-järgult vähenema (Moilanen *et al.*, 2002). Kuigi raskmetallide sisaldused tuhkades on makroelementidega võrreldes suhteliselt väikesed, tuleb siiski jälgida nende võimalikku leostumist ümbritsevasse keskkonda. Raskmetallidest leidub puutuhas enamasti kaadmiumi (Cd), mangaani (Mn), rauda (Fe), alumiiniumi (Al), vaske (Cu), tsinki (Zn), naatriumit (Na), pliid (Pb) ja kroomi (Cr) (Steenari *et al.*, 1999b; Pärn *et al.*, 2010). Raskmetallide (Cd, Cu ja Zn) leostumine puutuhast on väike (Österås, 2004). Puutuha laotamisel akumulereub Cd mulla kõduhorisondis, kuid pole seal liikuvus olekus, mistõttu pole ka väljaleostumise ohtu (Ingerslev *et al.*, 2014). Perkiömäki (2004) on uurinud puutuhaga väetamise mõju Cd liikuvusele okaspuumetsade mullas ja jõudnud järeldusele, et puutuhka Cd sisaldusega 1–30 mg kg⁻¹ võib kasutada üks kord puistu eluea jooksul, ilma et selle elemendi väljaleostumine võiks jõuda ümbritsevale keskkonnale ohtliku tasemeni. Puutuha kasutamiseiga võib suureneda anorgaaniliste alumiiniumioonide hulk mullalahuse proovides (Lundell *et al.*, 2001; Rumpf *et al.*, 2001).

Skandinaavias on tavapäraseks kasutatavaks tuhakoguseks 5–10 t ha⁻¹, kuid on katsetatud ka palju suuremate kogustega – 25, 50 ja 100 t ha⁻¹ (Moilanen *et al.*, 2012b). Tuhakoguste kasutamisel 2–3 t ha⁻¹ mineraalmuldadel ja 4–5 t ha⁻¹ turbamuldadel räägitakse toitainete kao kompenseerimisest (kompensatsioonväetamine), kuid suuremate tuhakoguste kasutamisel on tegemist metsade väetamisega. Oluline

on arvestada tuhalaotamise ajaga: laotades tuhka talvel lumele, on selle mõju väiksem kui suvisel laotamisel. Piirainen (2001) täheldas suuremat katioonide (kaltsium, kaalium, magneesium) leostumist tuhast selle laotamisel lumele. Tuginedes varasematele uuringutele, soovitatakse tuhagraanulite keskmise koguse (2–4 t ha⁻¹) kasutamisel lämmastikurikkal turbamullal eelistada laotamisajana hilissuve, mil mõju puude kasvule on kõige positiivsem ning negatiivne mõju ümbritsevale keskkonnale on märgatavalt väiksem (Aro, 2008; Hytönen, 2008). Rootsisis teostatud laboratoorses leostumiskatses täheldati väiksemat elementide leostumist tuhagraanulitest võrreldes isepaakunud tuhaga; sellist erinevust ei õnnestunud tõestada looduslikes tingimustes tehtud katses (Larsson, 2012).

Puidu biomassi formeerumisest tuhaga töödeldud jääksoodes

Soomes korraldatud uuringud on näidanud, et puutuha kasutamine ammendatud turbaväljadel tasakaalustab toitainete bilansi turbas, mistõttu paraneb puude kasvamine ning taimedele vajalike toitainete rohkus puutuhas kiirendab oluliselt puude kasvu, olles samas ka säästliku metsanduse üheks väljundiks – tuhast põhjustatud jäätme probleem väheneb tuntavalt (Silfverberg & Huikari, 1985; Hytönen & Kaunisto, 1999; Moilanen *et al.*, 2005; Aro, 2008). Turbaaladel sõltuvad tulemused puutuhaga lisatud toitainete hulgast ja viljakamatel muldadel ka tuha tüübist (granuleeritud või isepaakunud tuhka), mineraalmuldadel ei täheldatud mõju erinevust kasutatava tuha tüübi ega koguse varieerumisel (Moilanen *et al.*, 2013). Granuleeritud puutuha kasutamisel mineraalmuldadel (tuhakogus 3 ja 9 t ha⁻¹) ei leitud mõju puude kasvule, turbamuldadel täheldati seevastu töödeldud tuha (kasutatud tuha kogus 5 ja 15 t ha⁻¹) olulist mõju puude kasvule. Tabelis 1 on toodud puutuha mõju puude kasvule ja biomassi formeerumisele

turbamuldadel. Puutuha kasutamine mineraalmuldadel ei mõjuta üldjuhul puude kasvu (Jacobson & Gustafsson, 2001; Augusto et al., 2008; Moilanen et al., 2013; Ingerslev et al., 2014; Jacobson et al., 2014; Brännvall et al., 2015). Oluline on jälgida ka tuha mõju sõltuvust puistu vanusest (Aronsson & Ekelund, 2004). Metsa tuleks puutuhka laotada puistu maksimaalse kasvuperioodil, sidudes seda esimese raiega (Ozolinčius et al., 2007). Kuna toiteelementide omastamine on puittaimedel eriti intensiivne esimestel kasvuaastatel (Raid, 1975) ja puutuhaga väetamine kiirendab oluliselt istutatud seemikute kasvu (Kikamägi et al., 2013; 2014), võiks esmane tuhaga väetamine toimuda juba toitainevaeste raiesmike metsastamisel.

Nii arukask (*Betula pendula* Roth) kui ka sookask (*Betula pubescens* Ehrh.) on sobilikud liigid puidu biomassi tootmiseks jääksoos lühikese raieringiga puistutes (Hytönen & Saarsalmi, 2009; Hytönen & Aro, 2012). Väikeste puutuha kogustega (2,5 ja 5 t ha⁻¹) väetamisel võib arukase kõrguskasv märgatavalt väheneda juba teisel kasvuaastal peale tuhaga töötlemist (Pärn et al., 2009). Suuremate puutuha koguste (10 ja 15 t ha⁻¹) puhul on mõju arukase kasvule tugevam ja kauakestvam (Kikamägi et al., 2013). Ferm et al. (1992) täheldas, et puutuha mõjul (20 t ha⁻¹) tõusis männiku tagavara enam kui 70 m³ ha⁻¹, väetamata kontrollalal oli sama näitaja vaid 15 m³ ha⁻¹. Katsetuste tulemusena on jõutud järeldusele, et väikesekoguse puutuha (2 t ha⁻¹) mõju puude kasvule on jääksoodes ebaoluline (Silfverberg, 1996).

Kui jääksoid väetada fosforväetistega, soodustab see märgatavalt lehtpuude kasvaminekut (Raid, 1979; Pikk, 2001), aga ka loodusliku kaseuenduse teket (Hytönen & Aro, 2012). Seda täheldati ka Ulila katsealal (Tartu maakond), kus lisaks istutatud katsepuude kiirele kasvule võis täheldada ka elujõulise loodusliku uenduse teket (Kikamägi & Ots, 2010). Soomes mõõdeti turbamuldadel PK-väetistega väetatud 37-aastasest kasepuistus maapealse

biomassi (v.a lehed) koguseks 160–164 t ha⁻¹ ja aastaseks juurdekasvuks 4,3–4,4 t ha⁻¹, mis on oluliselt suuremad näitajad kui mineraalmuldadel kasvanud kaasikutes (Aro, 2008). Seni Eestis tehtud katsed näitavad, et toitainerikaste tuhcade (puutuhk, põlevkivituhk) segamisel jääksoo turbasse saavutab kõige kiiremini suurima biomassi juurdekasvu kask, ületades talle järgnevat puuliikide – mänd (*Pinus sylvestris* L.) ja kuusk (*Picea abies* (L.) H.Karst.) – juurdekasvu mitu korda (Kikamägi et al., 2013, 2014). Männi puhul täheldati, et puude kasv langeb oluliselt, kui tegemist on vana kaevandusalaga, kus kuivendussüsteem enam ei toimi.

Erinevalt Eestis Elva katlamajast toodud puu- ja turbatuha seguga läbi viidud katsete tulemustest (Kikamägi & Ots, 2010), täheldati Soomes jääksoos turba- ja puutuha segu suuremat mõju kaskede kasvule võrreldes ainult puutuha kasutamisega (Huotari et al., 2007, 2008). Kindlasti on siin määravaks turbatuha ja puutuha vahetegur segus ning toiteelementide sisaldus. 2011. aasta sügisel tehtud mõõtmised, s.o kolm aastat peale tuhkadega väetamist, näitavad, et puutuha kogusega 10 t ha⁻¹ väetatud aladel oli neljaaastaste kaskede aastane kõrguse juurdekasv kuni 108 cm, seevastu sama koguse turbatuhaga töödeldud alal vaid kuni 11 cm ning kontrollalal ainult kuni kaks sentimeetrit (Kikamägi & Ots, 2010). Ulila katsealal aasta peale puutuhaga töötlemist varieerus katsevariantides keskmine mudelpuu maapealne biomass kaheaastastes puistutes 30–64 g m⁻² ja kontrollalal oli see näitaja 0,5 g m⁻², neljaaastastes puistutes oli biomass puutuhaga töödeldud aladel keskmiselt 229 g m⁻² (puutuhk kogusega 5 t ha⁻¹) ja 368 g m⁻² (puutuhk kogusega 10 t ha⁻¹), kontrollpuistus vaid 2,4 g m⁻² (Kikamägi et al., 2013). Soomes korraldatud külvikatsed näitasid, et neli aastat pärast puutuhaga väetamist (7,9 t ha⁻¹) oli sookaskede maapealne biomass 80 g m⁻², samas kui väetamata ala taimede biomass oli vaid 0,2 g m⁻² (Huotari et al., 2009).

Tabel 1. Puutuha mõju puude kasvule ja biomassi formeerumisele turbamuldadel.
 Table 1. The effect of wood ash application on growth and biomass formation on peatlands.

| Asukoht / Location | Tuha kogus, t ha ⁻¹ Amount of ash, t ha ⁻¹ | Puistu vanus, a Stand age, yr | Puuliik Tree species | Kõrguskasv, m Height growth, m | Jooksev aastane biomassi produktioon, t ha ⁻¹ aastas ⁻¹ Current annual biomass production, t ha ⁻¹ year ⁻¹ | Allikas Source |
|------------------------------|---|----------------------------------|-------------------------------|---|---|------------------------------------|
| Rootsi / Sweden | 3.3 | 23 | <i>Pinus sylvestris</i> | 0.23 | 3.3 | Ernfors <i>et al.</i> , 2010 |
| Rootsi / Sweden | 6.6 | 23 | <i>Pinus sylvestris</i> | 0.30 | 3.5 | Ernfors <i>et al.</i> , 2010 |
| Soome / Finland | 8 | 41 | <i>Betula</i> spp. | | 8.1* | Silfverberg & Hotanen, 1989 |
| Soome / Finland | 16 | 41 | <i>Betula</i> spp. | | 9.9* | Silfverberg & Hotanen, 1989 |
| Soome / Finland | 61.4 | 14 | <i>Betula pubescens</i> (46%) | 0.53 | 9.9 | Hytönen & Kaunisto, 1999 |
| | | 14 | <i>Betula pendula</i> (25%) | 0.81 | | |
| | | 14 | <i>Salix</i> spp. (29%) | 0.70 | | |
| Soome / Finland | 8 | 48 | <i>Pinus sylvestris</i> | | 6.9* | Moilanen <i>et al.</i> , 2002 |
| Soome / Finland | 16 | 48 | <i>Pinus sylvestris</i> | | 10.9* | Moilanen <i>et al.</i> , 2002 |
| Soome / Finland | | 14–21 | <i>Betula</i> spp. | | 2.7–4.4 | Aro, 2008 |
| Lõuna-Soome / South Finland | 5 | 21 | <i>Betula pendula</i> (11%) | | 3–4.6 | Hytönen & Aro, 2012 |
| | | | <i>Betula pubescens</i> (60%) | | | |
| | | | <i>Salix</i> spp. (29%) | | | |
| Põhja-Soome / North Finland | 5 | 15–26 | <i>Betula pubescens</i> | | 2.6–3.1 | Jylhä <i>et al.</i> , 2015 |
| Soome / Finland | 20 | 11 | <i>Pinus sylvestris</i> | | 5.4* | Ferm <i>et al.</i> , 1992 |
| Soome / Finland | | | <i>Pinus sylvestris</i> | | 0.5–1.4* | Moilanen <i>et al.</i> , 2005 |
| Soome / Finland | 5 | 50–60 | <i>Pinus sylvestris</i> | | 1–3* | Moilanen <i>et al.</i> , 2013 |
| Soome / Finland | 15 | 50–60 | <i>Pinus sylvestris</i> | | 3–9* | Moilanen <i>et al.</i> , 2013 |
| Kesk-Soome / Central Finland | 4.5 | 56–76 | <i>Pinus sylvestris</i> | | 9* | Moilanen <i>et al.</i> , 2015 |
| Soome / Finland | 4.8 | 30 | <i>Pinus sylvestris</i> | | 0.8–1.1* | Saarsalmi <i>et al.</i> , 2014 |
| Soome / Finland | 7.9 | 4 | <i>Betula pubescens</i> | 0.5 | 0.8 | Huotari <i>et al.</i> , 2008, 2009 |
| Soome / Finland | 7.9 | 4 | <i>Pinus sylvestris</i> | 0.5 | 0.12 | Huotari <i>et al.</i> , 2008, 2009 |
| Soome / Finland | 7.9 | 4 | <i>Salix</i> spp. | 0.4 | 0.19 | Huotari <i>et al.</i> , 2008, 2009 |
| Eesti / Estonia | 2.5 | 2 | <i>Betula pendula</i> | 0.45 | | Pärm <i>et al.</i> , 2009 |
| Eesti / Estonia | 5 | 2 | <i>Betula pendula</i> | 0.43 | | Pärm <i>et al.</i> , 2009 |
| Eesti / Estonia | 10 | 2 | <i>Betula pendula</i> | 0.41 | | Pärm <i>et al.</i> , 2009 |
| Lõuna-Eesti / South Estonia | 5 / 10 | 2 | <i>Betula pendula</i> | 0.78 / 1.08 | 0.2 / 0.5 | Kikamägi <i>et al.</i> , 2013 |
| Lõuna-Eesti / South Estonia | 5 / 10 | 4 | <i>Betula pendula</i> | 0.56 / 0.77 | 0.9 / 1.4 | Kikamägi <i>et al.</i> , 2013 |
| Põhja-Eesti / North Estonia | 10 / 15 | 2 | <i>Betula pendula</i> | 0.33 / 0.50 | 0.3 / 0.5 | Kikamägi <i>et al.</i> , 2013 |
| Põhja-Eesti / North Estonia | 10 / 15 | 3 | <i>Pinus sylvestris</i> | 0.39 / 0.42 | 0.1 | Kikamägi <i>et al.</i> , 2014 |
| Põhja-Eesti / North Estonia | 10 / 15 | 4 | <i>Picea abies</i> | 0.49 / 0.55 | 0.2 / 0.3 | Kikamägi <i>et al.</i> , 2014 |
| Läti / Latvia | 0.5–3 | 4 | <i>Picea abies</i> | 0.1 | | Lazdina <i>et al.</i> , 2017 |

* m³ ha⁻¹ aastas⁻¹ / m³ ha⁻¹ year⁻¹

Kuivendatud turbaaladel täheldati puutuha positiivset mõju männi juurdekasvule: võrreldes kontrollalaga suurenes puude tagavara puutuhaga töödeldud alal kaks korda, seega on turbaaladel kasvavate metsade väetamine majanduslikult põhjendatud (Moilanen *et al.*, 2015). Moilaneni *et al.* (2005) tehtud uuringus täheldati hariliku männi puhul aastast keskmist biomassi juurdekasvu 0,5–1,4 m³ ha⁻¹. Hytönen ja Kaunisto (1999) leidsid oma uurimuses, et puutuhk avaldab mändidele paremat ning pikaajalisemat mõju kui PK-väetis. Männipuistu aastane rinnaspindala suurenes puutuhaga väetades toitainevaesemal kasvupinnal 1,7–1,8 korda ja toitainerikkamal alal 4–5 korda kontrollalaga võrreldes (Moilanen *et al.*, 2013). Lämmastikivaesel turbaalal kasvavas männikus täheldati puistu rinnaspindala mõningast vähenemist 5.–7. aastal peale puutuhaga (1–9 t ha⁻¹) väetamist (Jacobson, 2003).

Toitainete vaeguse kõrval mõjutab puude kasvu jääksoodes märkimisväärselt ka mikrokliima. Jääksoos on sagedased taimede külmakahjustused, puude juurdumist nendes soodes takistavad kevadtalvel esinevad külmakohrutused, kohati võib esineda juurte ümbert turba ärakannet tuulega ning noorte seemikute ellujäämine ammendatud freesturbaväljadel on komplitseeritud (Campbell *et al.*, 2002; Groeneveld & Rochefort, 2002). Üldjuhul esineb soodes öökülmi tunduvalt rohkem kui mineraalaladel, kuna jääksood on suurepinnalised ja taimestikuta. Negatiivselt mõjub ka põhjavee taseme suur kõikumine (Pikka, 2011). Kasvatatavate puuliikide valikul tuleb arvestada hiliskülmade esinemisega. Näiteks harilik kuusk on väga tundlik hiliskülmadele, vajades turvet, kuid võrreldes teiste puuliikidega talub kuusk paremini umbrohutaimede konkurentsi (Aro, 2008; Hytönen, 2008). Skandinaavias ei peeta harilikku kuuske eriti sobivaks puuliigiks ammendatud freesturbaväljade metsastamisel, sest see liik on mõnede elementide (eriti fosfor) suhtes suurema nõudlusega kui mänd või mõni teine jääksoode met-

sastamiseks paremini sobiv puuliik (Päivänen, 1998). Samas oleks võimalik seda liiki kasvatada kase- või männipuistus järelkasvuna. Iirimaal on ammendatud freesturbaväljadest 40–50% metsastatud erinevate okaspuuliikidega: ameerika lehis (*Larix laricina* (Du Roi) K.Koch), must kuusk (*Picea mariana* (Mill.) Britton *et al.*), sitka kuusk (*P. sitchensis* (Bong.) Carrière), keerdmäänd (*P. contorta* Dougl. ex Loud.) ja ainult 10–20% lehtpuudega (McNally, 1995; Jones & Farrell, 2000). Meie katsetulemused Eestis näitavad, et jääksoode metsastamisel on võimalik saada väga häid tulemusi, kui kasutada suuremat kuuse istutusmaterjali ja aidata kaasa puude kasvule erinevaid tuhkaseid turbasse segades. Näiteks Puhatu freesturbaväljal 2012. aasta sügisel tehtud mõõtmised näitasid, et viieaastased kuused olid vastavalt 55 cm (puutuhk 15 t ha⁻¹), 49 cm (puutuhk 10 t ha⁻¹), 49 cm (puutuhk 10 t ha⁻¹ + põlevkivituhk 8 t ha⁻¹) ja kontrollalal 35 cm kõrged (Kikamägi *et al.*, 2014). Toitainerikka puutuha kasutamiseega jääksoos suureneb märgatavalt okaspuude kogu maapealse biomassi juurdekasv (Kikamägi & Ots, 2010). Okaspuudest osutus produktiivsemaks liigiks kuusk, peale teist kasvuaastat oli puutuhaga väetatud alal ühe puu biomass keskmiselt 65,5 g (kontrollalal vastavalt vaid 10,6 g), see on 0,3 t ha⁻¹ aastas (Kikamägi *et al.*, 2014). Puutuha positiivset mõju on täheldatud ka okkapikkusele ja 100 okka kuivmassile (Kikamägi *et al.*, 2014) ning juure biomassile ja kasvule (Majdi *et al.*, 2008).

Puutuha kasutamise järel tekkiv rohttaimestik parandab toitainete sisaldust aineringses tänu kiirele kõdukihi tekkimisele ja lagunemisele (Huotari *et al.*, 2007). Tekkinud taimkattel on ka oluline roll sidumaks puutuhas sisalduvaid toitaineid ja vähendamaks toitainete leostumist jääksoode taasmetsastamise algusjärgus (Huotari *et al.*, 2011). Ulilas ja Puhatus tehtud katsed näitasid, et puutuha segamisel turbasse hoogustus raba-karusambla (*Polytrichum strictum* Brid.) kasv, mis takistas rohttaimede tekkimist katsepuude vahetusse lä-

hedusse. Põlevkivituhk segus puutuhaga soodustas põlengujärgsetele aladele iseloomuliku samblaliigi – hariliku punaharjaku (*Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid.) – kasvu. Samuti hoogustas puutuha kasutamine Ulila freesturbaväljal oluliselt loodusliku kaseuuduse tekkimist väetatud katseruutude ulatuses. Puhatus ilmnis, et toitainerikka puutuha turbasse segamisega aidati kaasa hariliku haava (*Populus tremula* L.), kase ja paju uuenduse tekkeks ning kiiresti hakkas arenema soontaimestik: ümaralehine uibuleht (*Pyrola rotundifolia* L.), harilik luga (*Juncus effusus* L.), ahtalehine põdrakanep (*Epilobium angustifolium* L.), paiseleht (*Tussilago farfara* L.), kõrvenõges (*Urtica dioica* L.), võilill (*Taraxacum* spp.) jt. Kaitsealustest liikidest täheldati III kategooria liigi soo-neiuvaiba (*Epipactis palustris* (L.) Crantz) esinemist (III kaitsekategooria liikide..., 2004).

Süsiniku bilanss jääksoodes

Kasvuhoonegaaside emissiooni soodest käsitlevad paljud uurimused (Gorham, 1991; Mander *et al.*, 2010; Salm *et al.*, 2012; Barthelmes *et al.*, 2015; Karki *et al.*, 2016). Teada on, et kliimasoojenemist põhjustava süsihappegaasi kontsentratsiooni suurenemist on mõjutanud olulised muutused maakasutuses (freestehnoloogial turba kaevandamine, soode kuivendamine metsakasvatamise ja põlluharimise eesmärgil jne) (Picken, 2006; Alm *et al.*, 2007; Kimmel *et al.*, 2010; Salm *et al.*, 2012) ning süsiniku kadu kasvab globaalsel tasemel ka tulevikus (Waddington *et al.*, 2002). Looduslikest soodest emiteerub kasvuhoonegaasidest peamiselt metaani (CH₄) ja naerugaasi ehk dilämmastikoksiidi (N₂O) (Waddington & Roulet, 2000; Mander *et al.*, 2010; Järveoja *et al.*, 2016), ammendatud jääksoodest turba mineraliseerumise tõttu domineerivalt süsihappegaasi (CO₂) (Tuittila *et al.*, 1999; Yli-Petäys *et al.*, 2007).

Taimestumata turbaalad ja aktiivsed turba kaevandusväljad on Eestis ühed

suurimad CO₂ emissiooni allikad (Kaisel & Kohv, 2009; Kimmel *et al.*, 2010; Salm *et al.*, 2010). Mahajäetud kaevandusaladel olenevad süsinikdioksiidi vood pinnasetemperatuurist (kõrgem temperatuur loob paremad tingimused lagundavatele mikroorganismidele ja kiirendab keemilisi reaktsioone, mis omakorda suurendavad gaasiteket) ja aastaajast (emissioonid suurenevad aprillis ja mais, kui sood vabanevad lume ja jääkatte alt) (Salm *et al.*, 2010). CO₂ emissiooni-voog turbaaladelt sõltub ka konkreetse ala veetaseme kõrgusest ja taimestumise osakaalust (Salm *et al.*, 2009; Kimmel & Mander, 2010) ning mullatemperatuurist (Mäkiranta *et al.*, 2007). Turbast emiteeruva CO₂ koguseks metsastatud jääksoodes mõõdeti 18–43 aastases kase- ja männipuistus 276–479 g m⁻² aastas (suvine mullatemperatuur jäi vahemikku 8,6–10,7 °C) (Mäkiranta *et al.*, 2007). Spontaanselt taimestunud jääksoodes mõõdeti vegetatsiooniperioodil emiteeruva CO₂ koguseks 14–118 süsiniku g m⁻² (Yli-Petäys *et al.*, 2007). Täheldatud on suuremat CO₂ emissiooni kõrgema veetasemega ja intensiivsemalt taimestunud aladelt (Komulainen *et al.*, 1999; Anderson, 2010). Kasvuhoonegaaside emissiooni oluliseks mõjutajaks ammendatud freesturbaväljadel on peale veetaseme ka selle kõikumine vegetatsiooniperioodil (Järveoja *et al.*, 2016; Karki *et al.*, 2016). Metsastatud jääksoodes on olulisemateks süsiniku bilanssi mõjutavateks faktoriteks puistute produktiivsus ja jääkturba lagunemisaste (Alm *et al.*, 2007; Huotari *et al.*, 2009).

Mulla pH kasvu tulemusel peale leeliseliste tuhkadega töötlemist intensiivistub mikroorganismide tegevus (Jokinen *et al.*, 2006; Augusto *et al.*, 2008) ning kiireneb kõdu lagunemine, orgaanilise lämmastiku mineraliseerumine ja lämmastiku omastatavus (Ferm *et al.*, 1992; Bååth & Arnebrant, 1994; Fritze *et al.*, 1994). Kuna tuhk aktiveerib mullas mikrobioloogilisi protsesse, suureneb lahustuva orgaanilise süsiniku ja lämmastiku hulk (Ring *et al.*, 1999; Ludwig *et al.*, 2000; Lundell *et al.*, 2001; Rumpf *et al.*, 2001; Genenger *et al.*, 2003), mis omakorda

võib oluliselt mõjutada kasvuhoonegaaside emissiooni. Jääkturba aeroobse lagunemise tõttu suureneb CO₂ emissioon atmosfääri (Tuittila *et al.*, 1999; Yli-Petäys *et al.*, 2007). Viljakamatel turbamuldadel (C/N < 30) on täheldatud C ja N sidumisvõime vähenemist mulla pindmises kihis ning mullavees nitraatide sisalduse tõusu peale tuhaga väetamist (Weber *et al.*, 1985; Sikström *et al.*, 2012). Erakordselt kõrget CO₂ emissiooni tuhaga töödeldud ammendatud freesturbaväljadelt täheldati eelkõige kuival ja soojal suvel (Alm *et al.*, 2007). Huotari *et al.* (2015) väitel püsib CO₂ emissioon jääksoos kõrgem 10–50 aastat pärast puutuhaga töötlemist ning mõju on eriti märgatav lämmastikurikkal turbaalal.

Puutuhaga väetatud ammendatud freesturbaväljade CO₂ emissiooni kohta on vähe andmeid ja need on vastuolulised (Röser *et al.*, 2008). Soomes eraldub turbamuldadelt CO₂-te rohkem, kui seda seovad mineraalmullad, kuid CO₂ bilanssi aitavad tasakaalustada turvasmuldadel kasvavad stimuleeritud biomassi produktiooniga metsad (Tullus, 2011). Mitmes uuringus on täheldatud, et jääksoode edukas metsastamine (taastaimestamine) võib märgatavalt vähendada CO₂ emissiooni. Kesk-Soomes tehtud uuringud näitavad, et lisatav puutuha kogus 5–15 t ha⁻¹ kahekordistab turbaaladelt CO₂ väljavoolu (mulla hingamist) 420–475 g m⁻² aastas (Moilanen *et al.*, 2012a). Puutuhaga töödeldud puistus akumulereus puude stimuleeritud kasvu tõttu süsinikku 11–12 korda rohkem kui puistus, mis kasvab tuhaga väetamata alal. Erinevus turbast emiteeruva süsiniku ja puude poolt seotud süsiniku koguses oli puutuhaga töödeldud (5–15 t ha⁻¹) aladel 43–58 g m⁻², kontrollalal vastavalt 204 g m⁻². Seega suurendab puutuha kasutamine turbaaladel enam puude süsiniku sidumist kui selle emiteerumist turbast (Moilanen *et al.*, 2012a; Silvan & Hytönen, 2016). Samas on uuringuid, kus ei täheldatud puutuha mõju kasvuhoonegaaside emissioonile: puutuhk kogusega 3,1–6,6 t ha⁻¹ ei mõjutanud CO₂, CH₄ või N₂O emissiooni toitainevaesest kuivendatud

jääksoost esimese viie aasta jooksul peale puutuhaga töötlemist (Ernfors *et al.*, 2010).

Süsiniku akumulereumine puidu biomassis korreleerub tugevalt biomassi juurdekasvuga (Uri *et al.*, 2012). Senised uurinud on näidanud, et ammendatud freesturbaväljal tuhaga väetatud arukase kasvukiirus on oluliselt suurem kui kasenoorendiku kasvukiirus metsamaal (Kikamägi *et al.*, 2013, 2014). Uri *et al.* (2012) andmetel kaasneb viljakas kasvukohas arukaasiku kasvuga suurem süsiniku akumulatsioon nii biomassi kui ka mulda. Seega on toitainerikaste väetistega väetamisel oluline osa süsiniku sidumisel metsastatud jääksoodes. Soomlaste pikaajalised kogemused näitavad, et energiapuidu kasvatamisel jääksoos ei tohiks raiering olla lühem kui 21 aastat ja peale raiet tuleks ala uuesti kiiremas korras metsastada, et suureneks süsiniku sidumine (Hytönen & Aro, 2012; Silvan & Hytönen, 2016).

Oluline mõju nii süsiniku akumulereumisele, turba mineraliseerumise vähenemisele kui ka toitainete kao pidurdumisele on taimkatte kiirel arengul ja liigirikuse suurenemisel tuhkadega väetatud jääksoodes, olles määrava tähtsusega ka noorte seemikute ellujäämisel (Huotari *et al.*, 2009). Suur kogus puutuhka (20 t ha⁻¹) soodustab heintaimede kasvu ja väike kogus toitainerikast tuhka (1–2 t ha⁻¹) samblarinde teket (Ferm *et al.*, 1992). Tuittila *et al.* (1999) andmetel piirab liigirikas soontaimkate CO₂ kadu. Vahetult peale puutuhaga väetamist jääksoos oli soontaimede roll biomassi produktioonis ja süsiniku sidumisel isegi suurem kui sookase seemikutel: soontaimede maa-pealne biomass ja süsiniku akumulereimine oli viis korda suurem puutuhaga töödeldud alal võrreldes tuhaga töötlemata kontrollalaga (Huotari *et al.*, 2009).

Ökosüsteemi teenuse mõistes loetakse sood tunduvalt väärtuslikumaks kui metsa (Kimmel & Mander, 2010; Joosten *et al.*, 2012). Võrreldes jääksoos turbas ja puidus aastas seotavat süsiniku hulka, talletub intensiivsel biomassi formeerumisel puitu suuremas koguses süsinikku kui seda emi-

teerub mullahingamise käigus atmosfääri (Silvan & Hytönen, 2016). Soovitatud on fossiilsete kütuste ja põlevkivi asendamist kohalikes katlamajades märgaladel kasvatatud energeetilise materjaliga (päideroog, hundinui) (Kimmel *et al.*, 2010; Mander *et al.*, 2012). Soojusenergia tootmise negatiivse keskkonnamõju vähendamiseks on Keskkonnainvesteeringute Keskuse poolt vahendatud finantsvahendite toel suur osa kohalike katlamajade viidud üle taastuvale kütusele ehk puidu biomassile (Keskkonnainvesteeringute Keskus, 2015). Seega on ammendatud freesturbaväljadel kasvatataval puidu biomassil suur potentsiaal riigisisel kütuseturul, aga ka ekspordiks minevate toodete (puidugraanul, hakkepuit vms) valmistamisel.

Turbakaevandamisest tulenevate lisaemissioonide vältimiseks tehakse kaevandusaladel nende sulgemise järel taastamistegevusi, esmase eesmärgiga luua tingimused soode taastekkeks, sh süsiniku sidumiseks turbana. Kindlasti on olulised kompromissid turba tootmise ja ammendatud väljakute taastamise vahel (Kimmel *et al.*, 2010) ja arvestama peab taastamis-suuna mõjuga süsiniku akumulereumisele (Picken, 2006). Taassoostamise eelistamisel, võrreldes teiste jääksoo korrastamise võimalustega, lähtutakse asjaolust, et sellise taastamisviisi valikuga väheneb antropogeense CO₂ emissioon ammendatud turbaaladelt (Vasander *et al.*, 2003; Joosten *et al.*, 2012). Teiseks võimalikuks maakasutuseks näeb arengukava „Eesti võimalused liikumaks konkurentsivõimelise madala süsinikuga majanduse suunas aastaks 2050“ (2013) ette, et mahajäetud kaevandusalad metsastatakse, mis samuti võimaldab teatud määral kompenseerida kaevandamata turba jätkuval mineraliseerumisel atmosfääri lenduva süsiniku hulka. Edasiste järelduste tegemiseks tuleks metsastatud jääksoodes viia läbi põhjalik süsiniku bilansi muutuste mõõtmine ja analüüs.

Kokkuvõte

Aastaid kestnud intensiivse turbatootmise tulemusena on Eestis tekkinud ligikaudu 10 000 hektarit ammendunud turbaalaid. Maapõueseaduse kohaselt on alade omanikud kohustatud kaevandamise järel maad korrastama (Maapõueseadus, 2016). Kaevandusalade laiendamisel lähtutakse põhimõttest, et samavõrra korrastatakse kaevandusest mahajäetud sooalaid või rakendatakse nende metsastamist.

Taimestumata jääksoid iseloomustab esmajärjekorras kõrge CO₂ emissioon ja kõrge tuleohtlikkus, mistõttu on hädavajalik need alad korrastada. Kuna jääkturba lasund on toitainevaene, kasutatakse Skandinaavia maades jääksoode metsastamisel juba aastakümneid toitainerikkaid tootmisjäätmeid (puutuhk jt), mille tulemusel intensiivistub oluliselt puidu biomassi formeerumine. Süsihappegaasi eraldumine jääksoodest asendub süsiniku akumulereumisega puidus, väheviljakate maade puiduproduktioon suureneb tunduvalt ja nende alade majanduslik kasutus muutub tõhusamaks. Uuringud kinnitavad, et puutuha kasutamine turbaaladel suurendab puude süsiniku sidumist enam kui selle emiteerumist turbast. Metsastamisega tuleksid metsamajanduslikku käibesse tagasi hetkel kasutusest väljas olevad ammendatud freesturbaväljad ning antud alade bioloogiline mitmekesisus suureneks.

Puitkütuse kui kodumaise taastuva ressursi kasutamisega vähendame sõltuvust energia impordist ja suure ökoloogilise jalajäljega fossiilsete kütuste tarbimisest. Veel kinnitamata energiamajanduse arengukavas on eesmärgiks seatud aastaks 2030 kasutada soojamajanduses 80% taastuvaid energiaallikaid, millest suure osa moodustab tõenäoliselt puit. Seega tõuseb lähiaastakümnetel vajadus puidu biomassi järele hüppeliselt (Biomassi ja bioenergia... 2007). Alates aastast 2021 arvestatakse EL-s ka metsanduse ja maakasutuse sektorit CO₂ heitmete vähendamise kontekstis, mille põhieesmärk on saavutada sektoris süsiniku

sidumise ja emissiooni vahel tasakaal. Ammendatud jääksoode metsastamine võimaldaks muuta need alad CO₂ sidujaks ning suurendada riigisiseses energiatootmises kasutatava või ekspordiks mineva biokütuse valmistamiseks kuluva puidu biomassi mahtu.

Jääksoo metsastamise majanduslik tasuvus sõltub nii metsastamisega kaasnevast kulust kui ka tulevikus puidu biomassi raiumisega kaasnevast tulust. Mahajäetud freesturbaalad tingivad paratamatult kuivendamise ja teedevõrgu rajamise kulud. Eestis korraldatud katsed on veel liiga lühiajalised, et ennustada tulevikus saadava puidu kvaliteeti ja sortimenti. Esialgseid kalkulatsioonid näitavad, et isegi kui jääksoodes toitainerikaste jäätmetega produtseeritud puidu biomass sobib ainult kütteks, saab kulud kaetud kümnendaks aastaks (Pikka, 2011). Soome kogemused näitavad, et jääksoodes kasvava metsa väetamine granuleeritud puutuhaga on väga kasumlik investeering: tehtava investeeringu sisemine tasuvus on 3–12% (Väättäinen et al., 2011). Rootsis on viimase aja suundumuseks väheviljakatel aladel kasvavate puistute väetamine eesmärgiga rakendada piiranguteta puidu juurdekasvu stimuleerimise meetodeid, et toota enam taastuvat energiat (Tullus, 2011).

Viimastel aastatel on hakatud suurt tähelepanu pöörama taastuvate energiaallikate kasutusvõimalustele ja eeskätt puidu kasutamisele kütusena. Tuha vedamine kuni 50 km kaugusele jääksoole on katlamajadele palju mõistlikum, kui lasta see ladustada prügilasse. Näiteks tuha ladestamine Paikre prügilasse maksab 70,74 € t⁻¹ (Paikre prügi-la, 2017) ning sellele lisanduvad veel kulutused transpordile. Eesti turbaalade kaitse ja säästliku kasutamise kontseptsioon näeb ühe punktina ette arendada looduslähedaste jäätmete (sh puu- ja turbatuhk) taaskasutamist jääksoodes metsakasvatustel eesmärkidel (Eesti turbaalade kaitse..., 2010). Eesti Vabariigi Valitsuse tegevusprogrammis 2007–2011 oli keskkonnapoliitika üks eesmärk muuta jäätmete taaskasutusnõuete

täitmise kontrolli süsteem toimivaks, viidates jäätmete taaskasutuse aktuaalsuse olulisele suurenemisele (Vabariigi Valitsuse..., 2007). Oluline on, et puutuha kui looduslähedase tootmisjäätise ehk väärtusliku sekundaarse tooraine ringlusse suunamisega vähendatakse jäätmete keskkonnamõju ja edendatakse ressursitõhusa ringmajanduse arengut Eestis.

Toitainerikaste tuhkade kasutamise teadlikkuse tõstmiseks metsanduses tuleks korraldada õppeseminare metsaomanikele, metsandusvaldkonna konsulentidele jt huvilistele. Tänapäeval on Eesti metsaomanike oskused ja teadmised oma metsa tagavara kasvatamiseks seotud õigeaegsete hooldusvõtetega (nt raied), kuid see teadmistepagas peaks täiendust saama puutuha kasutamise kaasnepvast suurenevast puistu mahukasvust. Samamoodi nagu lähiriikides (Soome, Rootsi, Leedu) tuleks puutuha kasutamiseks metsanduses ja põllumajanduses Eestis välja töötada juhendmaterjal, võttes aluseks Põhjamaade aastakümnete pikkuse kogemuse.

Tänuõnad. Käesolev töö on valminud Haridus- ja Teadusministeeriumi finantseeritava uurimisteema IUT 21-4 „Eesti metsade süsiniku dünaamika ja jätkusuutlik majandamine“ toetusel.

Kasutatud kirjandus

- Aapala, K., Sallantausta, T., Haapalehto, T. 2008. Ecological restoration of drained peatlands. – Korhonen, R., Korpela, L., Sarkkola, S. (eds.). Finland – Fenland. Helsinki, Finnish Peat Society, Maahenki Ltd, 243–249.
- Aerts, R., Wallen, B., Malmer, N. 1992. Growth-limiting nutrients in *Sphagnum*-dominated bogs subjects to low and high atmospheric nitrogen supply. – The Journal of Ecology, 80, 131–140.
- Agurajaja, K., Klõšeiko, J., Ots, K., Lukjanova, A. 2015. Effect of wood ash on leaf and shoot anatomy, photosynthesis and carbohydrate concentrations in birch on a cutaway peatland. – Environmental Monitoring and Assessment, 187(7), 444–454.
- Alm, J., Shurpali, N. J., Minkkinen, K., Aro, L., Hytönen, J., Laurila, T., Lohila, A., Maljanen, M., Martikainen,

- P. J., Mäkiranta, P., Penttilä, T., Saarnio, S., Silvan, N., Tuittila, E.-S., Laine, J. 2007. Emission factors and their uncertainty for the exchange of CO₂, CH₄ and N₂O in Finnish managed peatlands. – *Boreal Environment Research*, 12, 191–209.
- Anderson, R. 2010. Restoring afforested peat bogs: results of current research. – Forestry Commission publications, 1–8.
- Aro, L. 2008. Cut-away peatlands in Forestry. – Korhonen, R., Korpela, L., Sarkkola, S. (eds.). Finland – Fenland. Research and sustainable utilisation of mires and peat. Finnish Peatland Society, Maahenki Ltd, 207–211.
- Aro, L., Kaunisto, S. 1995. Nutrition and initial growth of trees in peat cutaway areas in Finland. – Peat Industry and Environment. Ministry of Environment Information Centre, Tallinn, 90–92.
- Aronsson, K.A., Ekelund, N.G.A. 2004. Biological effects of wood ash application to forest and aquatic ecosystems. – *Journal of Environmental Quality*, 33, 1595–1605.
- Arvidsson, H., Lundkvist, H. 2001a. Effects of crushed wood ash on soil chemistry in young Norway spruce stands. – Doctoral thesis. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala.
- Arvidsson, H., Lundkvist, H. 2001b. Wood ash application to young Norway spruce stands shortly after clearfelling – Effects on soil water chemistry. – Doctoral thesis. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala.
- Augusto, L., Bakker, M.R., Meredieu, C. 2008. Wood ash applications to temperate forest ecosystems – potential benefits and drawbacks. – *Plant Soil*, 306, 1–2, 181–198.
- Bääth, E., Arnebrant, K. 1994. Growth rate and response of bacterial communities to pH in limed and ash treated forest soils. – *Soil Biology and Biochemistry*, 26, 995–1001.
- Barthelmes, A., Couwenberg, J., Risager, M., Tegetmeyer, C., Joosten, H. 2015. Peatlands and Climate in a Ramsar context. A Nordic-Baltic Perspective. Rosendahls-Schultz Grafisk. 245 pp.
- Biomassi ja bioenergia kasutamise edendamise arengukava aastateks 2007–2013. 2007. (Development plan for the promotion of biomass and bioenergy 2007–2013). [WWW document]. URL <http://www.agri.ee/public/juurkataloog/BIOENERGEETIKA/bioenergia.pdf> [Accessed 14 October 2017]. (In Estonian).
- Björk, R.G., Ernfors, M., Sikström, U., Nilsson, M.B., Andersson, M.X., Rütting, T. 2010. Contrasting effects of wood ash application on microbial community structure, biomass and processes in drained forested peatlands. – *FEMS Microbiology Ecology*, 73, 550–562.
- Bramryd, T., Fransman, B.O. 1995. Silviculture use of wood ashes – effects on the nutrient and heavy metal balance in a pine (*Pinus sylvestris* L.) forest soil. – *Water, Air, and Soil Pollution*, 85, 1039–1044.
- Brännvall, E., Wolters, M., Sjöblom, R., Kumpiene, J. 2015. Elements availability in soil fertilized with pelletized fly ash and biosolids. – *Journal of Environmental Management*, 159, 27–36.
- 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 & Bioenergy*, 31, 693–699.
- Campbell, D.R., Lavoie, C., Rochefort, L. 2002. Wind erosion and surface stability in abandoned milled peatlands. – *Canadian Journal of Soil Science*, 82, 85–95.
- Clarholm, M. 1998. Wood ash to counteract potential phosphorus and potassium limitations in a Norway spruce forest subjected to air pollution. – *Scandinavian Journal of Forest Research Suppl*, 2, 67–75.
- Demeyer, A., Nkana, J.C.V., Verloo, M.G. 2001. Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: An overview. – *Bioresource Technology*, 77, 287–295.
- Eesti Keskkonnastrateegia aastani 2030. 2007. (Estonian Environment Strategy until 2030). Riigi Teataja, RT I, 15.10.2017, 60. (In Estonian).
- Eesti turbaalade kaitse ja säästliku kasutamise alused. 2010. (Basics of protection and sustainable use of Estonian peatlands). [WWW document]. – URL https://www.envir.ee/sites/default/files/turbakontseptsioon_kodulehele_taiendatud.pdf [Accessed 10 October 2017]. (In Estonian).
- Eesti võimalused liikumaks konkurentsivõimelise madala süsinikuga majanduse suunas aastaks 2050. 2013. (Estonia's opportunities to move towards a competitive low carbon economy until 2050). Lõppraport. 429 pp. (In Estonian).
- Eriksson, H.M., Nilsson, T., Nordin, A. 1998. Early effects of lime and hardened and non-hardened ashes on pH and electrical conductivity of the forest floor, and relations to some ash and lime qualities. – *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2, 56–66.
- Ernfors, M., Sikström, U., Nilsson, M., Klemetsson, L. 2010. Effects of wood ash fertilization on forest floor greenhouse gas emissions and tree growth in nutrient poor drained peatland forests. – *Science of the Total Environment*, 408, 4580–4590.
- Farmer, V.C., McHardy, W.J., Robertson, L., Walker, A., Wilson, M.J. 1985. Micromorphology and submicroscopy of allophane and imogolite in a podzol Bs horizon: evidence for translocation and origin. – *European Journal of Soil Science*, 36, 87–95.
- Ferm, A., Hokkanen, T., Moilanen, M., Issakainen, J. 1992. Effects of wood bark ash on the growth and nutrition of a Scots pine afforestation in central Finland. – *Plant and Soil*, 147, 305–316.
- Fritze, H., Smolander, A., Levula, T., Kitunen, V., Mälkönen, E. 1994. Wood-ash fertilization and pre treatments in a Scots pine forest stand: Effects on the organic layer, microbial biomass and microbial activity. – *Biology and Fertility of Soils*, 17, 57–63.

- Genenger, M., Zimmermann, S., Frossard, E., Brunner, I. 2003. The effects of fertiliser or wood ash on nitrate reductase activity in Norway spruce fine roots. – *Forest Ecology and Management*, 175, 413–423.
- Gorham, E. 1991. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climate warming. – *Ecological Application*, 1(2), 182–195.
- Gradeckas, A. 1997. Selection of willow clones for energy forests on exploited peatlands, utilising wastewater sludge. – *Baltic Forestry*, 3, 24–32.
- Gradeckas, A., Kubertavičiune, L., Gradeckas, A. 1998. Utilization of wastewater sludge as a fertilizer in short rotation forests on cut away peatlands. – *Baltic Forestry*, 4(2), 7–13.
- Groeneveld, E., Rochefort, L. 2002. Nursing plants in peatland restoration: on their potential use to alleviate frost heaving problems. – *Suo*, 53, 73–85.
- Hånell, B. 1995. Afforestation experiments on excavated peat-winning areas in Sweden. *Peat Industry and Environment*. 96 pp.
- Hånell, B., Magnusson, T. 2005. An evaluation of land suitability for forest fertilisation with biofuel ash on organic soils in Sweden. – *Forest Ecology and Management*, 209, 45–55.
- Heinsoo, K., Hein, K., Melts, I., Holm, B., Ivask, M. 2011. Reed canary grass yield and fuel quality in Estonian farmers' fields. – *Biomass & Bioenergy*, 35, 617–625.
- Huotari, N., Tillman-Sutela, E., Kauppi, A., Kubin, E. 2007. Fertilization ensures rapid formation of ground vegetation on cut-away peatlands. – *Canadian Journal of Forest Research*, 37, 874–883.
- 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.
- Huotari, N., Tillman-Sutela, E., Kubin, E. 2011. Ground vegetation has a major role in element dynamics in ash-fertilized cut-away peatland. – *Forest Ecology and Management*, 261, 2081–2088.
- Huotari, N., Tillman-Sutela, E., Moilanen, M., Laiho, R., 2015. Recycling of ash – For the good of the environment? – *Forest Ecology and Management*, 348, 226–240.
- 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.
- Hytönen, J. 1995. Effect of fertilizer treatment on the biomass production and nutrient uptake of short-rotation willow on cut-away peatlands. – *Silva Fennica*, 29(1), 21–40.
- Hytönen, J. 2003. Effects of wood, peat and coal ash fertilization on Scots pine foliar nutrient concentrations and growth on afforested former agricultural peat soils. – *Silva Fennica*, 37, 219–239.
- 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.
- Hytönen, J., Aro, L. 2012. Biomass and nutrition of naturally regenerated and coppiced birch on cutaway peatland durnung 37 years. – *Silva Fennica*, 46(3), 377–394.
- Hytönen, J., Aro, L., Jylhä, P., Reinikainen, O. 2014. Rehabilitating cut-away peatlands to downy birch thickets. – Tolvanen, A., Hekkala, A.-M. (eds.). The 9th European Conference on Ecological Restoration, Abstracts, August 3–8 2014, Oulu, Finland, 64.
- Hytönen, J., Kaunisto, S. 1999. Effect of fertilisation on the biomass production of coppiced mixed birch and willow stands. – *Biomass & Bioenergy*, 17, 455–469.
- 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.
- Ilomets, M. 2001. Mis saab jääsoodest? (What will become of abandoned peatlands?). – *Eesti Loodus*, 6, 218–221. (In Estonian).
- Ilomets, M. 2003. Mille arvel kaevandame turvast? (On price of extracting peat?) – *Eesti Loodus*, 2/3, 76–80. (In Estonian).
- Ilomets, M. 2005. Turba juurdekasv Eesti soodes. (Peat increment (and accumulation) in Estonian mires). Tallinn. 60 pp.
- Ingerslev, M., Hansen, M., Pedersen, L. B., Skov, S. 2014. Effects of wood chip ash fertilization on soil chemistry in a Norway spruce plantation on a nutrient-poor soil. – *Forest Ecology and Management*, 334, 10–17.
- Jacobson, S. 2003. Addition of stabilized wood ashes to Swedish coniferous stands on mineral soils – effects on stem growth and needle nutrient concentrations. – *Silva Fennica*, 37, 437–450.
- Jacobson, S., Gustafsson, L. 2001. Effects on ground vegetation of the application of wood ash to a Swedish Scots pine stand. – *Basic and Applied Ecology*, 2, 233–241.
- Jacobson, S., Lundström, H., Nordlund, S., Sikström, U., Petersson, F. 2014. Is tree growth in boreal coniferous stands on mineral soils affected by the addition of wood ash? – *Scandinavian Journal of Forest Research*, 29, 675–685.
- Jokinen, H.K., Kiiikilä, O., Fritze, H. 2006. Exploring the mechanism behind elevated microbial activity after wood ash application. – *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 2285–2291.
- Jones, S., Farrell, E.P. (eds.). 2000. Research programme to develop a forest resources on industrial cutaway peatland in the Midlands, BOGFOR 3 project, final report. Report No. 52, Forest Ecosystem Research Group, Department of Environmental Resource Management, University College Dublin, Dublin, Ireland. 145 pp.
- Jones, S.M., Boyle, G.M., Farrell, E.P. 1998. Forestry on milled cutaway peatland. – Tom, E. (conf. coord.). The future use of cutaway bogs. Lough Boora

- Parklands. Cutaway Bogs Conference. Brosna Press Ltd, Ferbane, Ireland, 22–26.
- Joosten, H., Gaudig, G., Krawczynski, R., Tanneberger, F., Wichmann, S., Wichtmann, W. 2012. Paludicultures: sustainable productive use of wet and rewetted peatlands. – Bonn, A., Allott, T., Evans, M., Joosten, H., Stoneman, R. (eds.). Peatland restoration and ecosystem services: science, practice, policy. Cambridge, Cambridge University Press. 493 pp.
- Järveoja, J., Peichl, M., Maddison, M., Soosaar, K., Vellak, K., Karofeld, E., Teemusk, A., Mander, Ü. 2016. Impact of water table level on annual carbon and greenhouse gas balances of a restored peat extraction area. – *Biogeosciences*, 13, 2637–2651.
- Jylhä, P., Hytönen, J., Ahtikoski, A. 2015. Profitability of short-rotation biomass production on downy birch stands on cut-away peatlands in northern Finland. – *Biomass & Bioenergy*, 75, 272–281.
- Kaisel, M., Kohv, K. (eds.). 2009. Environmental impact of drying. Overview. (Metsakuivenduse keskkonnamõju. Ülevaade). Tartu, Ecoprint. 38 pp. (In Estonian).
- Karki, S., Elsgaard, L., Kandel, T.P., Lærke, P.E. 2016. Carbon balance of rewetted and drained peat soils used for biomass production: a mesocosm study. – *Global Change Biology Bioenergy*, 8, 5, 969–980.
- Karltun, E., Saarsalmi, A., Ingerslev, M., Mandre, M., Andersson, S., Gaitnieks, T., Ozolinčius, R., Varnagiryte-Kabasinskiene, I. 2008. Wood ash recycling – possibilities and risks. – Röser, D., Asikainen, A., Raulund-Rasmussen, K., Stupak, I. (eds.). Sustainable use of forest biomass for energy. A synthesis with focus on the Baltic and Nordic region. Dordrecht, Springer, 79–108.
- Karofeld, E. 2006. Remnant mires back to real mires. (Jääksood soodeks tagasi). – *Eesti Loodus*, 6, 16–20. (In Estonian).
- Karofeld, E. 2011. Experiences of the world. (Kogemusi maailmast). – Paal, J. (ed.). Cutover peatlands, their use and rehabilitation. (Jääksood, nende kasutamine ja korrastamine). Tartu, 111–130. (In Estonian).
- Karofeld, E., Ravis, R., Tõnisson, H., Vellak, K. 2015. Rapid changes in plant assemblages on mud-bottom hollows in raised bog: a sixteen-year study. – *Mires and Peat*, 16, 11, 1–13.
- Karofeld, E., Jarašius, L., Priede, A., Sendžikaitė, J. 2017. On the reclamation and restoration of extracted peatlands in the Baltic countries. – *Restoration Ecology*, 25 (2), 293–300.
- Kaunisto, S. 1981. Natural regeneration of *Betula pendula* and *B. pubescens* on a peat cut-away area. – *Suo, Peat and Mires*, 32(3), 53–60.
- Kaunisto, S. 1997. Peatland forestry in Finland: problems and possibilities from the nutritional point of view. Trettn, C. (ed.). Northern Forested Wetlands – Ecology and Management. New York, CRC Press, Inc. Lewis Publishers, 387–401.
- Kaunisto, S., Aro, L. 1996. Forestry use of cutaway peatlands. – Vasander, H. (ed.). Peatlands in Finland. Helsinki, Finnish Peatland Society, 130–134.
- Keskonnainvesteeringute Keskus. 2015. (Environmental Investment Centre). [WWW document]. URL <https://kik.ee/et/toetatav-tegevus/atmosfaariohu-kaitse-programm-0> [Accessed 16 May 2015]. (In Estonian).
- Keskonnaministeerium. 2017. (Ministry of the Environment). [WWW document]. URL <http://www.envir.ee/et/eesmargid-tegevused/maapou/turvas/jaaksoode-korrastamine> [Accessed 15 October 2017]. (In Estonian).
- Kikamägi, K., Ots, K. 2010. Stimulating the growth of trees with ashes of various biofuels (wood, peat) on a cutaway peatland. (Puittaimede kasvu stimuleerimine erinevate biokütuste (puit, turvas) tuha liikidega amendatud freesturbaväljal). – *Forestry Studies / Metsanduslikud Uurimused*, 52, 60–71. (In Estonian with English summary).
- Kikamägi, K., Ots, K., Kuznetsova, T. 2013. Effect of wood ash on the biomass production and nutrient status of young silver birch (*Betula pendula* Roth) trees on cutaway peatlands in Estonia. – *Ecological Engineering*, 58, 17–25.
- Kikamägi, K., Ots, K., Kuznetsova, T., Pototski, A. 2014. The growth and nutrients status of conifers on ash-treated cutaway peatland. – *Trees – Structure and Function*, 28(1), 53–64.
- Kimmel, K., Kull, A., Salm, J.-O., Mander, Ü. 2010. The status, conservation and sustainable use of Estonian wetlands. – *Wetlands Ecology and Management*, 18, 375–395.
- Kimmel, K., Mander, Ü. 2010. Ecosystem service of peatlands: Implication for restoration. – *Progress in Physical Geography*, 34(4), 491–514.
- Kohv, M., Salm, J.-O. 2012. Restoring of Estonian bogs. (Soode taastamine Eestis). – *Eesti Loodus*, 4, 10–16. (In Estonian).
- Komulainen, V.-L., Tuittila, E.-S., Vasander, H., Laine, J. 1999. Restoration of drained peatlands in southern Finland: initial effects on vegetation change and CO₂ balance. – *Journal of Applied Ecology*, 36, 634–648.
- Kuusik, R., Meriste, T., Pototski, A. 2012. Several new projects have been started to expand the use of oil shale ash. (Põlevkivituha kasutamise laiendamiseks on käivitunud mitu uut projekti). – *Keskonnatehnika*, 3, 8–9. (In Estonian).
- Larsson, P.-E. 2012. Leaching of wood ash, laboratory and field studies. (Lakning av vedaska, laboratorie- och fältstudier). – *Värmeforsk Report No. 1229*. Stockholm, Värmeforsk Service AB. 37 pp. (In Sweden with English summary).
- Lazdina, D., Bebe, I., Dūmiņš, K., Skranda, I., Lazdins, A., Jansons, J., Celma, S., 2017. Wood ash – green energy production side product as fertilizer for vigorous forest plantations. – *Agronomy Research*, 15(2), 468–477.
- 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.

- 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.
- Lode, E. 1999. Restoration of mires – the question of ethics, aesthetics and environmental awareness! (Soode taastamine – eetika, esteetika ja keskkonnateadvuse küsimus!). – Turvas, 1–3, 5–12. (In Estonian).
- Ludwig, B., Heil, B., Flessa, H., Beese, F. 2000. Use of ^{13}C and ^{15}N mass spectrometry to study the decomposition of *Calamagrostis epigeios* in soil column experiments with and without ash additions. – Isotopes in Environmental and Health Studies, 36, 49–61.
- Lundell, Y., Johannisson, C., Hogberg, P. 2001. Ion leakage after liming or acidifying fertilization of Swedish forests – a study of lysimeters with and without active tree roots. – Forest Ecology and Management, 147, 151–170.
- Lundell, Y., Johannisson, C., Hogberg, P. 2001. Ion leakage after liming or acidifying fertilization of Swedish forests – a study of lysimeters with and without active tree roots. – Forest Ecology and Management, 147, 151–170.
- Maapõueseadus. 2016. (Earth crust law). Riigi Teataja, RT I, 40. (In Estonian).
- Majdi, H., Truus, L., Johansson, U., Nylund, J.-E., Wallander, H., 2008. Effects of slash retention and wood ash addition on fine root biomass and production and fungal mycelium in a Norway spruce stand in SW Sweden. – Forest Ecology and Management, 255, 2109–2117.
- Mander, Ü., Järveoja, J., Maddison, M., Soosaar, K., Aavola, R., Ostonen, I., Salm, J.-O. 2012. Reed canary grass cultivation mitigates greenhouse gas emissions from abandoned peat extraction areas. – GCB Bioenergy, 4, 462–474.
- Mander, Ü., Uuemaa, E., Kull, A., Kanal, A., Maddison, M., Soosaar, K., Salm, J.-O., Lesta, M., Hansen, R., Kuller, R., Harding, A., Augustin, J. 2010. Assessment of methane and nitrous oxide fluxes in rural landscapes. – Landscape and Urban Planning, 98, 172–181.
- McNally, G. 1995. The utilisation of industrial cutaway peatlands. Peat Industry and Environment. Ministry of Environment Environment Information Centre. Tallinn, 84–86.
- Moilanen, M., Hytönen, J., Hökka, H., Ahtikoski, A. 2015. Fertilization increased growth of Scots pine and financial performance of forest management in a drained peatland in Finland. – Silva Fennica, 49(3), 18 pp.
- Moilanen, M., Hytönen, J., Leppälä, M. 2012a. Application of wood ash accelerates soil respiration and tree growth on drained peatland. – European Journal of Soil Science, 63, 467–475.
- Moilanen, M., Issakainen, J. 2000. Effects of wood ash on forests. (Tuhkalannoituksen metsävaikutukset). Metsätalon raportti / Forestry report, 93, 18 pp. (In Finnish).
- Moilanen, M., Issakainen, J., Silfverberg, K. 2012b. Peat ash as a fertilizer on drained mires effects on the growth and nutritional status of Scots pine. – Working Papers of the Finnish Forest Research Institute, 231, 18.
- 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, 136–144.
- Moilanen, M., Silberberg, K., Hökka, H., Issakainen, J. 2005. Wood ash as a fertilizer on drained mires – growth and foliar nutrients of Scots pine. – Canadian Journal of Forest Research, 35(11), 2734–2742.
- Moilanen, M., Silfverberg, K., Hokkanen, T.J. 2002. Effects of wood-ash on tree growth, vegetation and substrate quality of a drained mire: a case study. – Forest Ecology and Management, 171, 321–338.
- Mäkiranta, P., Hytönen, J., Aro, L., Maljanen, M., Pihlatie, M., Potila, H., Shurpali, N. J., Laine, J., Lohila, A., Martikainen, K. 2007. Soil greenhouse gas emissions from afforested organic soil croplands and cutaway peatlands. – Boreal Environment Research, 12, 159–175.
- Mälkönen, E. 1996. Tuhka kangasmetsien lannoitteena. (Ash as forest fertilization on mineral soils). – Finér, L., Leinonen, A., Jauhiainen, J. (eds.). Nutrients contained in wood ash back to the forest? (Puun ravinteet tuhkana takaisin metsään?). Metsätutkimuslaitoksen tiedonantoja / Finnish Forest Research Institute, Research Papers, 599, 21–26. (In Finnish).
- Orru, M., Ots, K., Orru, H. 2016. Re-vegetation processes in cutaway peat production fields in Estonia in relation to peat quality and water regime. – Environmental Monitoring and Assessment, 188(12), 655–665.
- Orru, M., Rübe, M., Nurme, M. 2012. The dependence of revegetation from peat composition and water level on cutaway peatlands. (Mahajäetud turbaalade taastaimestumise sõltuvus turba koostisest ja veetasemest). – Kaevandamine ja keskkond. TTÜ Mäeinstituut. Tallinn, 114–118. (In Estonian).
- Ozolinčius, R., Varnagirytė-Kabašinskienė, I., Stakėnas, V., Mikšys, V. 2007. Effects of wood ash and nitrogen fertilization on Scots pine crown biomass. – Biomass & Bioenergy, 31, 700–709.
- Ots, K., Tilk, M., Agurajujaja, K. 2017. The effect of oil shale ash and mixtures of wood ash and oil shale ash on the above- and belowground biomass formation of Silver birch and Scots pine seedlings on a cutaway peatland. – Ecological Engineering, 108 (Part A), 296–306.
- Paal, J. 2011. Cutover peatlands, their use and rehabilitation. (Jääksood, nende kasutamine ja korrastamine). Tartu, 159 pp. (In Estonian).

- Paal, J., Leibak, E. 2011. Estonian mire inventory. – International Mire Conservation Group Newsletter, 37–41.
- Paavilainen, E., Päivänen, J. 1995. Peatland forestry. Ecology and principles. Ecological Studies 111. Berlin, Springer Verlag. 141 pp.
- Paidla, A. 1975. What will happen with cutaway peatlands? (Mis saab jääksoodest?) – Eesti Loodus, 11, 617–623. (In Estonian).
- Paikre prügilala. 2017. (Paikre landfill). [WWW document]. – URL <http://www.paikre.ee> [Accessed 1 November 2017]. (In Estonian).
- Perkiomäki, J. 2004. Wood ash use in coniferous forests: a soil microbiological study into the potential risk of cadmium release. – Academic dissertation in Microbiology Faculty of Agriculture and Forestry, University of Helsinki. Finnish Forest Research Institute, Research Papers, 917, 54 pp.
- Piirainen, S. 2001. Ash fertilization and leaching of nutrients from drained peatland. – Höglblom, L., Nohrstedt, H.-Ö. (eds.). Environmental consequences of recycling wood-ash to forests. Extended abstracts from the SNS Workshop at Grimsö, Sweden, 22–25 May 2000. SkogForsk Report, 2, 21–24.
- Picken, P.T. 2006. Landuse scenarios for Finnish cutover peatlands – based on the mineral subsoil characteristics. – Bulletin of the Geological Society of Finland, 78, 106–119.
- Pikk, J. 1982. On the optimum time of fertilizing pine cultures growing in a denuded peat bog. (Männikultuuri optimaalsest väetamisajast jääksool). – Forestry Studies / Metsanduslikud Uurimused, 17, 128–136. (In Estonian).
- Pikk, J. 2001. Birches on peatlands. (Kased turvasmuldadel). – Tullus, H., Vares, A. (eds.). Silviculture of deciduous in Estonia. (Lehtpuupuistute kasvatamine Eestis). Proceedings of the Estonian Academical Forestry Society, 14. (Akadeemilise Metsaseltsi Toimetised, 14). Eesti Põllumajandusülikool, Metsanduslik Uurimis-instituut, Tartu, 95–102. (In Estonian).
- Pikk, J. 2011. Afforestation. (Metsastamine). – Paal, J. (ed.). Use of wastewater sludge for afforesting cutover peatlands. (Jääksood, nende kasutamine ja korrastamine). Tartu, 69–81. (In Estonian).
- Pikk, J., Valk, U. 1995. Results of cutaway peatlands afforestation experiments in Estonia. (Jääksood metsastamiskatsete tulemused Eestis). (In Estonian).
- Pikka, J. 2005. Use of wastewater sludge for soil improvement in afforesting cutover peatlands. – Forestry Studies / Metsanduslikud Uurimused, 42, 95–105.
- Pikka, J. 2008. Does wastewater sludge is suitable for silviculture? (Kas reoveesete sobib metsakasvatuseks?) – Eesti Mets, 4, 24–28. (In Estonian).
- Pikka, J. 2011. Use of wastewater sludge for afforesting cutover peatlands. (Jääksood metsastamine reoveesete kasutamisega). – Paal, J. (ed.). Cutover peatlands, their use and rehabilitation. (Jääksood, nende kasutamine ja korrastamine). Tartu, 82–88. (In Estonian).
- Päivänen, J. 1998. Tree stand structure of peatlands – before and after forest drainage. – Sopo, R. (ed.). The spirit of peatlands Proceedings of the International Peat Symposium. International Peat Society, Jyväskylä, Finland, 82–83.
- Pärn, H., Mandre, M., Ots, K., Klõšeiko, J., Lukjanova, A., Kuznetsova, T. 2010. Use of biofuel ashes in forestry. (Bioenergeetikas tekkivate jäätmete kasutamine metsanduses). – Forestry Studies / Metsanduslikud Uurimused, 52, 40–50. (In Estonian with English summary).
- Pärn, H., Mandre, M., Tilk, M. 2009. Changes in the growth of Silver birch (*Betula pendula* Roth) and black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) seedlings on peat soils fertilised with wood and peat ashes. – Baltic Forestry, 15(2), 168–176.
- Raid, L. 1975. Mineraalväetiste mõjust männiseemikute okaste keemilisele koostisele pohla kasvukohatüübis. (Effect of mineral fertilizers on chemical composition of pine seedlings in *Rhodococcum* forest site type). – Forestry Studies / Metsanduslikud Uurimused, 12, 96–116. (In Estonian).
- Raid, L. 1979. About fertilization of sown plantations on cutaway peatlands. (Külvikultuuride väetamisest jääksoodel). – Mets. Puit. Paber, 6, 16–18. (In Estonian).
- Ramst, R., Orru, M. 2009. Revegetation of cutaway peatlands in Estonia. (Eesti mahajäetud turba- tootmisalade taastaimestumine). – Eesti Põlev- loodusvarade ja -jäätmel, 1–2, 6–7. (In Estonian).
- Ramst, R., Orru, M., Halliste, L. 2005. Revision of Estonian cutaway peatlands. (Eesti mahajäetud turba- tootmisalade revisjon). The first stage: Harju, Rapla and Lääne counties. (1 etapp. Harju, Rapla ja Lääne maakond). Geological Survey of Estonia. (OÜ Eesti Geoloogiakeskus). Tallinn. 132 pp. (In Estonian).
- Ramst, R., Orru, M., Salo, V., Halliste, L. 2006. Revision of Estonian cutaway peatlands. (Eesti mahajäetud turba- tootmisalade revisjon). The second stage: Ida-Viru, Lääne-Viru, Jõgeva, Järva and Tartu counties. (2. etapp. Ida-Viru, Lääne-Viru, Jõgeva, Järva ja Tartu maakond). Geological Survey of Estonia. (OÜ Eesti Geoloogiakeskus). Tallinn. 204 pp. (In Estonian).
- Ramst, R., Orru, M., Salo, V., Halliste, L. 2007. Revision of Estonian cutaway peatlands. (Eesti mahajäetud turba- tootmisalade revisjon). The third stage: Viljandi, Pärnu, Saare and Hiiu counties. (3. etapp. Viljandi, Pärnu, Saare ja Hiiu maakond). Geological Survey of Estonia. (OÜ Eesti Geoloogiakeskus). Tallinn. 164 pp. (In Estonian).
- Ramst, R., Salo, V., Halliste, L. 2008. Revision of Estonian cutaway peatlands. (Eesti mahajäetud turba- tootmisalade revisjon). The fourth stage: Valga, Võru and Põlva counties. (4. etapp. Valga, Võru ja Põlva maakond). Geological Survey of

- Estonia. (OÜ Eesti Geoloogiakeskus). Tallinn. 88 pp. (In Estonian).
- 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.
- 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.
- Ring, E., Lövgren, L., Nohrstedt, H. O., Jansson, G. 1999. Ash fertilization in a clearcut and in Scots pine stand in Central Sweden. – *SkogForsk Report*. 251 pp.
- Rumpf, S., Ludwig, B., Mindrup, M. 2001. Effect of wood ash on soil chemistry of a pine stand in Northern Germany. – *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 164, 569–575.
- Röser, D., Asikainen, A., Raulund-Rasmussen, K., Stupak, I. 2008. Sustainable use of forest biomass for energy. A synthesis with focus on the Baltic and Nordic region. Dordrecht, Springer, 259 pp.
- Saarmets, T. 1999. Restoration of cutaway peatlands. (Ammendatud turbamaardlate taastamine). – *Eesti Turvas*, 4, 5–7. (In Estonian).
- Saarsalmi, A., Mälkönen, E., Piirainen, S. 2001. Effects of wood ash fertilization on forest soil chemical properties. – *Silva Fennica*, 35, 355–368.
- Saarsalmi, A., Smolander, A., Moilanen, M., Kukkola, M. 2014. Wood ash in boreal, low-productive pine stands on upland and peatland sites: Long-term effects on stands growth and soil properties. – *Forest Ecology and Management*, 327, 86–95.
- Salm, J.-O., Kimmel, K., Uri, V., Mander, Ü. 2009. Global warming potential of drained and undrained peatlands in Estonia: a synthesis. – *Wetlands*, 29, 4, 1081–1092.
- Salm, J.-O., Maddison, M., Tammik, S., Soosaar, K., Truu, J., Mander, Ü. 2012. Emission of CO₂, CH₄ and N₂O from undisturbed, drained and mined peatlands in Estonia. – *Hydrobiologia*, 692, 41–55.
- Salm, J.-O., Soosaar, K., Maddison, M., Tammik, S., Mander, Ü. 2010. Greenhouse gases and carbon losses from Estonian mires. (Kasvuhoonegaasid ja süsinikukaod Eesti soodest). – *Eesti Loodus*, 9. (In Estonian).
- Seemen, H., Pikk, J., Valk, U. 2000. The Rae bog – a unique patch of experimental forestry. (Unikaalne metsanduslik katseala Rae rabas). – *Proceedings of the Estonian Academic Forestry Society*, 12. (Akadeemilise Metsaseltsi Toimetised, 12). Studies of the History of Estonian Forestry III. (Tõid Eesti metsanduse ajaloost III). Tartu, 95–112. (In Estonian with English abstract).
- Selin, P. 1995. After-use of peatlands in Finland. Peat industry and Environment. Ministry of Environment Information Centre, Tallinn.
- Sikström, U., Högbom, L., Jacobsson, S., Ring, E. 2012. Ash addition after whole-tree harvesting on fertile sites in Southern Sweden. (Ash-tillsats efter helträdet på fertiöle platser i södra Sverige). Project No. A27. (In Swedish with English summary).
- Silfverberg, K. 1996. Nutrient status and development of tree stands and vegetation on ash-fertilized drained peatlands in Finland. – PhD thesis. Finnish Forest Research Papers, 588. University of Helsinki, Faculty of Science.
- Silfverberg, K., Hotanen, J.P. 1989. Long-term effects of wood-ash on a drained mesotrophic *Sphagnum papillosum* fen in Oulu district, Finland. (Puuntuhkan pitkäaikaisvaikutukset ojitetulla mesotrofisella kalvakkanevalla Pohjois-Pohjanmaalla). – *Folia Forestalia*, 742, 1–23. (In Finnish with English summary).
- Silfverberg, K., Huikari, O. 1985. Wood-ash fertilization on drained peatlands. (Tuhkalannoitus metsäojitetuilla turvemaidella). – *Folia Forestalia*, 633, 1–25.
- Silvan, N., & Hytönen, J. 2016. Impact of ash-fertilization and soil preparation on soil respiration and vegetation colonization on cutaway peatlands. – *American Journal of Climate Change*, 5, 178–192.
- Silvan, N., & Yli-Petäys, M. 2008. Restoration of cutaway peatlands. – Korhonen, R., Korpela, L., Sarkkola, S. (eds.). Finland – Fenland. Helsinki, Finnish Peat Society, Maahenki Ltd, 238–242.
- Statistics about Peatland Areas Managed for Horticultural Peat Harvesting in Canada. 2015. [WWW document]. URL <http://peatmoss.com/peatmoss-industry-figures> [Accessed 15 January 2018].
- Steenari, B.-M., Karlsson, L.G., Lindqvist, O., 1999a. Evaluation of the leaching characteristics of wood ash and the influence of ash agglomeration. – *Biomass & Bioenergy*, 16, 119–136.
- Steenari, B.M., Marsic, N., Karlsson, L.G., Tomsic, A., Lindqvist, O. 1998. Long-term leaching of stabilized wood ash. – *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2, 3–16.
- Steenari, B.-M., Schelander, S., Lindqvist, O. 1999b. Chemical and leaching characteristics of ash from combustion of coal, peat and wood in a 12 MW CFB – a comparative study. – *Fuel*, 78, 249–258.
- Tillmann-Sutela, E., Pasanen, J., Karhu, J. 2004. Fertilization improves the establishment of birch seedlings on the cutover peatland. – Päivänen, J. (ed.). Wise use of peatlands. Proceedings of the 12th International Peat Congress, Tampere, Finland. International Peat Society, Saarijärvi, 1281–1286.
- Triisberg, T., Karofeld, E., Liira, J., Orru, M., Ramst, R., Paal, J. 2014. Microtopography and the properties of residual peat are convenient indicators for restoration planning of abandoned extracted peatlands. – *Restoration Ecology*, 22(1), 31–39.
- Tuittila, E.-S., Komulainen, V.-M., Vasander, H., Laine, J. 1999. Restored cut-away peatland as a sink for atmospheric CO₂. – *Oecologia*, 120, 163–174.
- Tullus, H. 2011. Forest management and carbon linking. (Metsamajandus ja süsiniku sidumine). – *Eesti Mets*, 4, 16–20. (In Estonian).
- Uri, V., Varik, M., Aosaar, J., Kanal, A., Kukumägi, M., Lõhmus, K. 2012. Biomass production carbon sequestration in a fertile silver birch (*Betula pendula*

- Roth) forest chronosequence. – *Forest Ecology and Management*, 267, 117–126.
- Vabariigi Valitsuse 2007.–2011. aasta tegevusprogramm. 2007. (Republican Government action program 2007–2011). Riigi Teataja Lisa, RTL 12906477, 09.01.2009, 74. (In Estonian).
- Valk, U. 1981. Freesturbaväljade rekultiveerimise võimalused. (Recultivation possibilities of cutaway peatlands). – *Keskonnakaitse* 6, 7–9. (In Estonian).
- Valk, U. 1992. The results of forestation of peatlands. (Turbaväljakute metsastamiskatsete tulemustest). – *Eesti Mets*, 4–5, 13–16. (In Estonian).
- Vasander, H., Tuittila, E.-S., Lode, E., Lundin, L., Ilomets, M., Salantaus, R., Heikkilä, R., Pitkänen, M.L., Laine, J. 2003. Status and restoration of peatlands in northern Europe. – *Wetlands Ecology and Management*, 11, 51–63.
- Waddington, J. M., Roulet, N. T. 2000. Carbon balance of a boreal patterned peatland. – *Global Change Biology*, 6, 87–97.
- Waddington, J. M., Warner, K. D., Kennedy, G. W. 2002. Cutover peatlands: A persistent source of atmospheric CO₂. – *Global Biogeochemical Cycles*, 16, 1, 1002–1009.
- Weber, A., Karsisto, M., Leppänen, R., Sundman, V., Skujinš, J. 1985. Microbial activities in a histosol: effects of wood ash and NPK fertilisers. – *Soil Biology and Biochemistry*, 17, 291–296.
- Väätäinen, K., Sirparanta, E., Räisänen, M., Tahvanainen, T. 2011. The costs and profitability of using granulated wood ash as a forest fertilizer in drained peatlands. – *Biomass & Bioenergy*, 35, 3335–3341.
- Österås, A.H. 2004. Interactions between calcium and heavy metals in Norway spruce. Accumulation and binding of metals in wood and bark. Stockholm, Department of Botany, Stockholm University.
- Yli-Petäys, M., Laine, J., Vasander, H., Tuittila, E.-S. 2007. Carbon gas Exchange of a re-vegetated cutaway peatland five decades after abandonment. – *Boreal Environment Research*, 12, 177–190.
- III kaitsekategooria liikide kaitse alla võtmine. 2004. (Protection of species protected by category III). Riigi Teataja, RT I, 14.07.2014, 4. (In Estonian).

Afforestation of cutaway peatlands: effect of wood ash on biomass formation and carbon balance

Katri Ots, Mall Orru, Mari Tilk, Leno Kuura and Karin Aguraijuja

Summary

According to different sources there are approximately 10,000 hectares of cutaway peatlands in Estonia and they represent a threat due to wind erosion, fires and CO₂ emission. It is very important to recultivate these areas. Cutaway peatlands are characterized by variable peat thickness, low pH, high nitrogen content and low phosphorus and potassium contents. Tree seedlings planted on an unfertilized cutaway peatland suffer from nutrient deficiency, which leads to poor growth and low biomass production. Because of rich chemical composition wood ash is an important source of plant nutrients for restoring the fertility of nutrient-poor soils. As cutaway peatlands suffer shortage of nutrients, one way for improving growth conditions of trees and accelerate their growth would be to add wood ash to the growth substrate. Better results have been achieved by using biofuel

ashes to stimulate tree growth in peat soils because wood ash contains all elements necessary for tree growth except for nitrogen. Treatment of mineral soils with wood ash shows no effect on the growth of trees.

Using biofuel ashes in the afforestation of cutaway peatlands helps to balance the content of nutrients in peat substrate (shortage of phosphorus and potassium is considered to be growth limiting in peat soils). After fertilizing with wood ash the pH of the top layer of peat may rise by several units. The higher pH of peat improve aeration conditions, as well as the microbial activity of top peat layer and development of plant cover. In the upper layers of peat of the ash-treated plots the contents of phosphorus and potassium were significantly higher compared to unfertilized control plots. Long-term effects of fertilisation with wood ash have been observed in several ex-

periments, especially on peatlands, which contain large amounts of organically bound nitrogen. High concentrations of phosphorus and potassium in ash are of great importance, creating preconditions for better uptake of nitrogen and thus for successful forestation of cutaway peatlands. Earlier studies showed that fertilization with wood ash could be an opportunity to stimulate the growth of trees in cutaway peatlands.

Carbon dioxide is not bound any more in cutaway peatlands where vegetation layer has been destroyed because photosynthetic processes do not occur there anymore. At the same time air can penetrate deeper due to the significantly lowered water table and peat mineralization occur in a much thicker peat layer, and leftover peat volatilises into the air in the form of greenhouse gases, i.e. carbon dioxide, taking part in climate change. Therefore, reclamation of cutaway peatlands is of vital importance from the standpoint of environmental protection. One of the most promising ways of regenerating cutaway peatlands is their afforestation for short-rotation biomass production. Rewetting of cutaway peatlands is suggested as an effective option to reduce anthropogenic CO₂ emission. Some studies show that using wood ash for stimulating tree biomass formation is the reason why carbon balance of cutaway peatlands becomes negative. Other research has observed

that changes in the peat upper layer after treating with wood ash (increased microbiological activity, etc.) enlarge the emission of greenhouse gases.

The results of this literature review show that afforestation and biomass cultivation would yield the biggest profit. Today many industrialized countries put increased emphasis on the use of renewable energy sources, including biomass combustion for heat and electricity production. The stimulated biomass formation of cutaway peatland forests is an important renewable biofuel source in Finland and could be a potential bioenergy source also in Estonia. The use of low-quality wood for electricity production has increased and will continue to rise: the share of electricity produced from biomass has more than doubled during the last five years and makes up two thirds of the total renewable electricity production in Estonia.

Application of nutrient-rich ashes to abandoned peat-milling fields promotes the afforestation of these areas, as a result their biological diversity will increase and the emission of greenhouse gases will decrease because much faster growing plants linking effectively carbon. Also it is important to develop environmentally safe, resource saving and sustainable techniques for recycling wood ash to reduce environmental pollution.

Received November 10, 2017, revised January 4, 2018, accepted February 26, 2018