VIIMSI GÜMNAASIUM

MERILIN RADVILAVIČIUS
11. KLASS

MULLA PH JA TOITAINETE SISALDUSE MÕJU HARILIKU MÄNNI (*PINUS SYLVESTRIS* L.) OKKAMÕÕTMETELE PUHATU AMMENDATUD FREESTURBAVÄLJAL

JUHENDAJAD KATRI OTS, MARI TILK, HILLE EEK

SISSEJUHATUS

Põlevkivi põletamisel saadakse kätte üle 80% selles sisalduvast energiast, kuid paratamatult jääb protsessist üle tootmisjääke, näiteks tuhka (Eesti Energia kodulehekülg). Praeguseks on põlevkivi põletamisel põlevkivituhka ladestatud ühtekokku 280 miljonit tonni ja iga aasta lisandub 9,5 miljonit tonni (Kuusik, Meriste ja Pototski, 2012; Uuring selgitab..., 2018). Tuha kõrge leeliselisuse tõttu (pH > 13) käsitletakse seda ohtliku jäätmena, v.a tsüklontuhka (Koroljova, 2016), sest jäätmeseaduse järgi avaldab tuha kasutamine negatiivset mõju keskkonnale ja inimese tervisele (Jäätmeseadus, 2011), mistõttu on tuha kasutusvõimalused piiratud. Õnneks on alustatud põlevkivituha omaduste täpsemate uurimistega (Uuring selgitab..., 2018).

Ülemaailmses energiapoliitikas on eesmärk suunduda taastuvate energiaallikate kasutamise poole, et vähendada sõltuvust fossiilsetest energiaallikatest (Säästva arengu sõnaseletusi s.v. bioenergia). Üks selliseid võimalusi on kasutada puitu, mis on suurima majandusliku potentsiaaliga biokütus energia tootmiseks Eestis (Biomassi ja…, 2007, lk 21). Puiduküttele üle läinud katlamajade arv Eestis on viimastel aastatel suurenenud, mis näitab biokütuste laialdast kasutuselevõttu (Vares, Kask, Muiste, Pihu ja Soosaar, 2005). Praegu kasutatava puidukoguse juures tekib Eestis energiatootmisel jäägina aastas üle 35 000 tonni puutuhka (Pitk, Raave ja Ots, 2016, lk 10). Vältimaks puutuhamägede tekkimist, otsitakse tuhkade kasutamiseks alternatiivseid kasutusalasid (Pärn, Mandre, Ots, Klõšeiko, Lukjanova ja Kuznetsova, 2010). Fosfori- ja kaaliumirikka puutuhaga saab stimuleerida puude kasvu, parimaid tulemusi on see andnud turvasmuldadel (Ots, Tilk ja Aguraijuja, 2017).

Ajalooliselt on turvas olnud Eestis oluline maavara, peamiselt on seda kasutatud kütteks (Eesti Turbaliidu kodulehekülg). Turba kättesaamiseks rajatakse turbakaevandusalasid, mida peale

ammendamist kutsutakse jääksoodeks. Hetkel on Eestis jääksoid ehk maha jäetud turbaalasid ligi 80, kogupindalaga 9800 ha (Jääksoode korrastamine, 2018). Peale turba kaevandamist jäävad need alad sageli korrastamata. Ammendatud kaevandused taastaimestuvad vaevaliselt, mistõttu muutub ökosüsteem selles piirkonnas liikide ja koosluste poolest vaesemaks. Puhatu ammendatud freesturbaväljal katsetatakse alates 2011. aastast puu- ja põlevkivituha mõju puude kasvule, katse on ainulaadne ja seda pole siiani kusagil mujal maailmas tehtud (Ots, 2017). Viimased põhjalikud uuringud tehti Puhatus 2015. aastal, kuid igal aastal kogutud uued andmed annavad teadustööle suure lisaväärtuse. Senine uurimistöö on kinnitanud, et toitainerikaste tuhkade kasutamine loob olulise sümbioosi ammendatud freesturbaväljadele istutatud puude ja peale tuhkade lisamist tekkinud liigirikka taimkatte vahel. Kuna tuhad on orgaanilise päritoluga, siis võib tuhkasid pidada loodussäästlikeks.

Uurimistöö idee pärineb 2018. aasta maist, kui Viimsi Kooli matemaatika-loodussuuna 10. klassi õpilased käisid KIK-i projekti raames õppepäeval Sagadi looduskoolis. Õppepäeva üks osa oli miniuurimistöö tegemine ning oli võimalus uurida, kas erinevate okaspuuliikide okka pikkus sõltub okaste pH_{H2O}-st. Eesti Maaülikooli vanemteaduri PhD Katri Otsa ja Tallinna Botaanikaaia teaduri PhD Mari Tilgaga kontakteeruti 2018. aasta juunis ja peagi sai juhendajatega paika pandud uurimistöö hüpotees, probleemküsimused ning eesmärk.

Uurimistöö hüpoteesiks püstitati, et hariliku männi (*Pinus sylvestris* L.) okka mõõtmed (pikkus ja pindala) on suuremad madalama turba pH-väärtuse ning kõrgema lämmastiku-, fosfori- ja kaaliumisisalduse korral.

Uurimisküsimusi esitati neli:

- Kuidas mõjutab puu- ja põlevkivituhaga väetamine hariliku männi okka kasvunäitajaid?
- Milline tuhk või tuhkade segu on kõige efektiivsem okkamõõtmete mõjutaja?
- Millisel määral mõjutab turba pH-väärtus hariliku männi okka mõõtmeid?
- Milline mineraalelement on määrava tähtsusega hariliku männi okka kasvus?

Uurimistöö eesmärk on uurida, milline on puu- ja põlevkivituha väetamise mõju toitainevaestes tingimustes kasvava hariliku männi okka pikkusele ja pindalale. Uuritavateks parameetriteks valiti viiel katsealal turba ülemise (0–10 cm) ja alumise horisondi (10–20 cm) ning okaste pH-väärtus, (üld)lämmastiku-, fosfori- ja kaaliumisisaldus ja okaste kasvunäitajad (pikkus ja pindala).

24. juulil 2018. aastal koguti välitöödel Puhatu freesturbaväljalt neljalt katsealalt ning ühelt looduslikult alalt okka- ja turbaproovid, mis seejärel kuivatati Tallinna Botaanikaaia termostaadis. Edasi skaneeriti 13. augustil 2018. aastal Eesti Maaülikooli metsakasvatuse ja metsaökoloogia õppetooli laboris WinSeedle programmiga männiokaste pikkused ja pindalad. Eesti Maaülikooli Taimebiokeemia laborist telliti turbaproovide pH_{KCl}- ja turba- ning

okkaproovide üldlämmastiku-, fosfori- ja kaaliumisisalduse määramiseks keemilised analüüsid. Viimsi Kooli laboris määrati 15. augustil 2018. aastal okaste pH_{H20}-väärtus. Järgmiseks koondati Riikliku Ilmateenistuse lehelt Jõhvi meteoroloogiajaama 2018. aasta vegetatsiooniperioodi (aprill–september) kuu sademete hulka ning keskmisi õhutemperatuure käsitlev andmestik. Kogutud andmete analüüsimisel kasutati seoste leidmiseks statistilisi andmetöötluse programme, saadud tulemused kirjeldati ja vormistati jooniste ning tabelitena uurimistöösse. Terve tööprotsessi vältel koostati töö teoreetiline osa. Peamiste lähtematerjalidena kasutati Karin Kikamägi, Liilia Raidi, Heino Kärblase, Heigo Miidla jt koostatud teaduskirjandust.

Minu suur tänu kuulub mu juhendajatele Katri Otsale, Mari Tilgale ja Hille Eekile, kelle nõu ja pühendumiseta poleks mul avanenud võimalus seda tööd teostada. Isiklikult tahan veel esile tuua oma ema, doktorant Marta Górskat, õpetaja Sirli Mändlat ja Karl Hendrik Tamkivi, kelle abikäele ning nõuannetele olen südamest tänulik. Töö on valminud projekti „Eesti metsade süsiniku dünaamika ja jätkusuutlik majandamine” (B21004 MIME) raames.

SISUKORD

SISSEJUHATUS 1

KASUTATUD TERMINITE JA LÜHENDITE LOETELU 7

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE 9

1.1. Hariliku männi (Pinus sylvestris L.) liigikirjeldus 9

1.1.1. Levik maailmas ja Eestis 9

1.1.2. Morfoloogia 9

1.1.3. Kasv ja kasvutingimused 10

1.2. Männiokka formeerumist mõjutavad keskkonnategurid 11

1.3. Mineraalelemendid ja nende olulisus taimedele 12

1.3.1. Lämmastik 12

1.3.2. Fosfor 13

1.3.3. Kaalium 14

1.3.4. Lämmastiku-, fosfori- ja kaaliumisisaldus jääksoo turbas 16

1.3.5. Toiteelementide sisaldus männiokastes 16

1.3.6. Toiteelementide suhted okkas 17

1.4. Väetamise mõju männiokka kasvule 17

1.5. Põlevkivi- ja puutuha koostis ning kasutamine 18

2. MATERJAL JA METOODIKA 19

2.1. Katsealade kirjeldus 19

2.2. Katsepuude istutamine ja väetamine 20

2.3. Morfoloogilised mõõtmised 21

2.4. Keemilised analüüsid 21

2.5. Andmete statistiline analüüs 22

2.6. 2018. aasta vegetatsiooniperioodi kuu sademete hulk ning keskmine õhutemperatuur 22

3. TULEMUSED JA ANALÜÜS 24

3.1. Hariliku männi okaste lämmastiku-, fosfori- ja kaaliumisisaldus 25

3.2. Hariliku männi okaste pH-väärtus 25

3.3. Hariliku männi okaste keskmine pikkus ja pindala 26

3.4. Hariliku männi okka toiteelementide suhe 27

3.5. Turba pH_{KCl}-väärtus 28

3.6. Lämmastikusisaldus turbas 29

3.7. Fosforisisaldus turbas 29

3.8. Kaaliumisisaldus turbas 30

4. ARUTELU 31

KOKKUVÕTE 33

RESÜMEE 34

SUMMARY 36

KASUTATUD MATERJALID 37

LISA 1. Hariliku männi (Pinus sylvestris L.) levila maailmas (Eesti Loodus) 43

LISA 2. Hariliku männi (Pinus sylvestris L.) levila Eestis (Eesti taimede levikuatlas) 44

LISA 3. Hariliku männi (Pinus sylvestris L.) tüvi, okkad, käbi ja võra (Scottish Forestry) 45

LISA 4. Hariliku männi (Pinus sylvestris L.) isasõied (vasakul), avatud ning suletud soomustega käbid ja emasõied (FotoLibra) 46

LISA 5. Programmi WinSeedle kuvatõmmis 47

LISA 6. Männiokka proovid Viimsi Kooli laboris 48

LISA 7. Looduslikul alal kasvanud harilik mänd 49

LISA 8. Kontrollalal kasvanud harilik mänd 50

LISA 9. PT10 alal kasvanud harilik mänd 51

LISA 10. PT15 alal kasvanud harilik mänd 52

LISA 11. PT10 + PõT8 alal kasvanud harilik mänd 53

LISA 12. Lämmastiku-, fosfori- ja kaaliumisisaldused hariliku männi (Pinus sylvestris L.) okastes, kus A on aritmeetiline keskmine ja σ on standardhälve 54

LISA 13. Puhatu ammendunud freesturbavälja turba pH_{KCl}-väärtused, üldlämmastiku-, fosfori- ja kaaliumisisaldused 0–10 cm ja 10–20 cm sügavusel, A on aritmeetiline keskmine ja σ on standardhälve 56

LISA 14. Hariliku männi (Pinus sylvestris L.) okaste pH_{H2O}-väärtused, A on aritmeetiline keskmine ja σ on standardhälve 59

KASUTATUD TERMINITE JA LÜHENDITE LOETELU

Anorgaaniline aine – aine, mis ei pärine taime- ega loomariigist (VSL s.v. anorgaaniline).

Antagonism – elementide vastastikune koosmõju, kus ühe elemendi suurem sisaldus mullas võib suurendada teise elemendi kättesaadavust ja mõne teise elemendi kättesaadavus mullas võib teiste elementide mõjul väheneda. Näiteks on magneesium mullas kaltsiumi ja kaaliumi antagonist – suur magneesiumisisaldus pärsib taimedel kaltsiumi ja kaaliumi omastamist ning suur kaltsiumisisaldus omakorda magneesiumi ja kaaliumi omastamist. (Miidla, 1984)

Assimilatsioon e anabolism – organismis toimuv keemiline protsess, milles lihtsamaist aineist sünteesitakse organismi keerukamad koostisosad (VSL s.v. anabolism).

ATP e adenosiintrifosfaat – universaalne energiakandja, mis vahendab energiat rakus toimuvates protsessides (Geneetikasõnastik s.v. adenosiintrifosfaat).

Embolism – ksüleemisoone tõkestamine õhumulli poolt (Koratkar, 2018).

Empiiriline valem – keemilise ühendi molekuli koostisesse kuuluvate elementide suhteline sisaldus väikseimates täisarvudes (Unioonpeedia s.v. empiiriline valem).

Fosfatiid – glütseriini, fosfor- ja rasvhapet sisaldav keeruka ehitusega rasvataoline ühend (VSL s.v. fosfatiid).

Generatiivorganid – õied ja viljad, esinevad vaid õistaimedel (MRI koduleheküIg).

Hüdrauliline – vedeliku rõhu või liikumise mõjul toimuv (VSL s.v. hüdrauliline).

Klorofüll – taimede roheline pigment, mille molekulid osalevad fotosünteesis ja võimaldavad taimedel muundada valgusenergiat enesele vajaminevaks energiaks (VSL s.v. klorofüll).

Kloroplast – fotosünteesivate taimerakkude plasmas olev organell, milles paikneb klorofüll (VSL s.v. kloroplast).

Ksüleem – taime juhtkimbu puiduosa, mille funktsioon on vee ja mineraalainete transportimine, taime toestamine ja varuainete säilitamine (Kukk, 1999).

MRI – Molekulaar- ja Rakubioloogia Instituut (Molekulaarbioloogid..., 2007).

Orgaaniline ühend – ühend, mis sisaldab süsinikku (VSL s.v. orgaaniline).

Orto- – sirg-, püst-; õige- (VSL s.v. orto-).

Protoplasma – organismi raku elusaine, süsivesikute, rasvade, valkude ja mitmesuguste soolade kolloidne süsteem vees, esinedes tsütoplasma ja tuumaplasmana (VSL s.v. protoplasma).

Reproduktiivorganid – õied ja neid toetav vars (Lepik, 2010, lk 3).

RMK – Riigimetsa Majandamise Keskus (RMK koduleheküIg).

Transpiratsioon – füsioloogiliselt reguleeritud vee aurumine taimedes (Josepson *et al.*, 2007, lk 2).

Vegetatiivorganid – mittesugulised organid; leht, juur ja vars (MRI koduleheküIg).

Vegetatsiooniperiood – taimekasvuperiood, mille jooksul taimed kasvavad, arenevad ja paljunevad intensiivselt, ööpäevane keskmine õhutemperatuur on + 5 °C ja enam (EKSS s.v. vegetatsiooniperiood; Linderholm, 2006, lk 1–14).

Viskoossus – vedeliku või gaasi sisehõõrdumist iseloomustav suurus (VSL s.v. viskoossus).

VPD – veeauru rõhu erinevus taime lehe ja atmosfääri vahel (Alasepp, 2010, lk 6).

Õhulõhe - mikroskoopiline avaus kõrgemate taimede lehepinnal taimede gaasivahetuseks (VSL s.v. hüdatood).

Ühevalentne – elemendi aatomi võime siduda keemiliselt ühe aatomiga (VSL s.v. valents).

Üldlämmastik – kõigi lämmastikuühendite (ammoonium, nitraadid, nitritid, orgaanilised lämmastikuühendid) kogusumma (AA Aqua OÜ koduleheküIg).

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1. Hariliku männi (*Pinus sylvestris L.*) liigikirjeldus

1.1.1. Levik maailmas ja Eestis

Okaspuude seas on üks liigirikkamaid perekondi mänd (perekond *Pinus* L.) üle 100 liigiga. Eesti flooras on looduslikult esindatud ainult üks liik – harilik mänd (*Pinus sylvestris* L.). (Tamm, 2001; Kukk, Laansoo, Luuk, Mäearu, Reier, Savisaar ja Tambets, 2018)

Oma perekonnas on harilik mänd kõige laiema levilaga, kasvades stepivööndist taigavööndini (vt lisa 1), põhja lühikese ja lõuna pika vegetatsiooniperioodi, pika polaarpäeva ja lõuna lühikese päeva tingimustes. Mänd peab vastu ka äärmuslikes õhutemperatuurivahemikes (–60...+40°C), lisaks talub mänd vähest õhu- ja mullaniiskust ning suudab kasvada väga toitainevaesel mullal. (Tamm, 2001)

Levikuala põhjapiiri määravad ära looduslikud tingimused: igikeltsa olemasolu, tihe sammalkate ja sagedased kevadised külmad. Oma levikuala põhjaosas kasvab mänd suuremal jaol tasasel maal ja mägedes kuni 800 m kõrgusel. Lõunas levikualal kindlat piiri ei ole, seal kasvab mänd soojematel aladel saarekestena kohtades, kus teised puuliigid hakkama ei saa (kuni 2400 m kõrgusel mägedes ja kuivadel liivmuldadel), viidates männi erakordsele vastupidavusele. (Tamm, 2001)

Eestis kasvab mänd liivaluidetel ja rabas, väga õhukese mullakihiga loopealsetel ja paljastel kividel. Kõige paremad männikud kasvavad Kagu-Eestis, Lääne- ja Loode-Eesti õhukeste muldade tõttu on sealsed metsad madalad ning puutüved peened. (Tamm, 2001)

Eesti levinuim puuliik katab ligemale 38% metsamaast ja moodustab kõigi puistude tagavarast 39%. Enim domineerib harilik mänd Lääne- ja Loode-Eestis ning Kagu-Eestis (vt lisa 2). Kõige rohkem on männimetsi Saaremaal ja Hiiumaal (75,0% puistude pindalast), Harjumaal (65,0%) ja Läänemaal (58,4%). Jõgeva- (20,8%) ning Tartumaal (25,2%) kohtab kõige vähem männikuid. (Tamm, 2001)

Kõige rohkem on Eestis pohla- (24%), mustika- (19%) ja kanarbikumännikuid (13%). Umbes 4% männikute pindalast moodustavad kuivad liivased sambliku- ja jänesekapsamännikud, veidi vähem loomännikud. Soode pindalast moodustavad männikud alla 20% ja soostunud maadest umbes 15%, olles samal ajal rabades kõige levinum puuliik. (Tamm, 2001; Tikk, 2015, lk 22)

1.1.2. Morfoloogia

Männil on nõeljad muundunud lehed ehk okkad (vt lisa 3). Oksal paiknevad okkad kahekaupa kimbus, olles värvuselt hallikasrohelised ja vahakihiga kaetud (Kollist, 1974, lk 134–161).

Okkad on 4–7 cm pikad, nende pikkus varieerub ühel puul sõltuvalt okaste paiknemiskohast eri aasta okstel ja võra eri osades. Okkad püsivad puul 3–4 aastat (MRI koduleheküIg).

Männi juurestik on plastiline, sobides kasvamiseks erinevatel kasvupinnastel (Kollist, 1974, lk 134–161; Laas 1987). Oluline osa juurest asub 40–50 cm sügavusel mullas (Orlov ja Košelkov, 1971). Vastavalt mulla veerežiimile kujundab mänd oma juurestiku selliseks, mis tagab talle vajaliku veehulga. Muldades, mis on soodsa niiskusrežiimiga ja hästi õhustatud, on männil arenenud sügavale tungiv sammasjuur, mis ulatub põhjaveeni, ja hulgaliselt vertikaalseid külgjuuri (Hanisch ja Kilz, 1990).

Tüvi on üldiselt sirge, alt kaetud paksu pruunikashalli konarliku korbaga, ülemises osas on tüve koor kestendav ja oranžikas. Oksad paiknevad tüvel männastes, alumised võrsed hakkavad kuivama, kui puu on saanud 8–10 aasta vanuseks. Tüve läbimõõt võib olla 1–1,5 m. (MRI koduleheküIg)

Mai lõpus või juuni alguses, kui männiokaste kasv on kõige intensiivsem, hakkab mänd õitsema (Laas 1987). Isasõied moodustavad võra alumises kolmandikus tihedaid kollaseid või punaseid puhmaid (vt lisa 4). Emasõied formeerivad võra ülemises kolmandikus rippuvaid helepunasest hallikaspruunini varieeruvaid pikki varsi (Kollist, 1974, lk 134–161). Võrreldes teiste metsapuudega, on männil rohkelt õietolmu (Tamm, 2001). Männi tolmuteral on kaks õhupõit, mis võimaldavad õietolmul kanduda 900–1000 km kaugusele. Õitsemisest seemnete valmimiseni kulub ligi 18 kuud. Peale viljastumist intensiivistub käbide kasv ja seeme valmib hilissügisel.

Käbid on matjad hallikaspruunid ja piklikmunajad, paiknedes võrsetel üksikult või 2–3 kaupa (Krüssmann, 1983; Laas, 1987). Käbid on valminult 3–7 cm pikad, puu vananedes käbi mõõtmed vähenevad. Üksikult kasvavad männid hakkavad käbisid kandma 10–15-aastaselt, puistudes 25–35-aastaselt (Tamm, 2001).

Seemne kaalu mõjutavad mitmed faktorid, näiteks puu vanus, antud aasta kliimatingimused, mullastikutingimused ja geograafiline asukoht (Kollist, 1974, lk 134–161; Laas, 1987). Põhja pool on seemned väiksemad ning kergemad, lõuna pool suuremad ja raskemad. Männi seemnete idanevus on väga hea, ületades enamasti 90% piiri (Tamm, 2001).

1.1.3. Kasv ja kasvutingimused

Eesti tingimustest alustab mänd kevaditi kasvu tavaliselt mai teisel poolel (Tamm, 2001). Kõrguskasv vaibub üldiselt juuni lõpus, kuid jämedusse kasvavad männid veel augustis ja septembris. Kasvukohast sõltub kasvu kestus: rabas on see märgatavalt lühem kui mineraalmaal. Mänd võib kasvada 40–45 m kõrguseks (Kollist, 1974, lk 134–161; Krüssmann, 1983).

Kõige esimesena hakkavad männil kasvama võrsed, pikkuskasv algab neil aprilli lõpus, peavõrse kiire kasv kestab mai lõpust juuni lõpuni ja külgvõrsel mai lõpust juuli alguseni (Smirnov, 1964). Võrse paiknemine puu võras mõjutab oluliselt võrse mõõtmeid (Kollist, 1974, lk 134–161). Madalamal asetseva oksa aastane juurdekasv on väiksem, kuna võra alumise osa võrsete kasvuperiood on teistega võrreldes lühem. Samal ajal algab ka juurte pikkuskasv, mai keskel järgneb tüve diameetri kasv, saavutades maksimumi juuli alguses. Noored okkad ilmuvad võrsetele mai lõpus. Kõige varem lõpetavad pikkuskasvu võrsed, seejärel augusti keskpaigas lõpetab jämeduskasvu tüvi ja paar nädalat hiljem lõpeb juurte jämenemine.

Okaspuuna eelistab mänd happelisemat kasvupinda (pH < 5,5) (kekkila.ee) Mänd on mulla viljakuse ja niiskuse suhtes leplik, kuid on valgusnõudlik (Tamm, 2001). Männi okkad võrsel ja oksad tüvel paiknevad hõredalt, asetsedes võras sedasi, et saaks kätte maksimaalselt päikesevalgust. Valgusnõudlikkus on sõltuv kasvukohast: kehvematel muldadel ja põhjarajoonides on ta valguse suhtes nõudlikum kui viljakatel muldadel ja lõunapoolsetel aladel (Kollist, 1974, lk 134–161; Laas, 1987).

Puittaimedele iseloomulikult näitab mänd kuivades tingimustes omast põua vältimise strateegiat, vähendades õhulõhede juhtivust põua varases staadiumis. Sedasi välditakse embolismi ja ksüleemi hüdraulilise funktsiooni kadu, samal ajal vähendades anabolismi kiirust, ühtlasi ka kasvu. Vaatamata sellele talub mänd perioodilisi põudasid teatud ajani, kuni lõpuks ei pruugita tulla toime ekstreemselt põuaste kasvutingimustega. (Krivoglazova, 2015, lk 24)

1.2. Männiokka formeerumist mõjutavad keskkonnategurid

Männiokka pikkus sõltub puu geneetilistest omadustest, geograafilisest rajoonist, kasvukoha- ja ilmastikutingimustest, eriti õhutemperatuurist ja veerežiimist. Okkad on üldjuhul lühemad põhja pool ja mägedes. (Tamm, 2001)

Orlovi ja Košelkovi (1971) andmete järgi suureneb sademeterikastel aastatel männiokka pikkus, kuid mais ja juunis pärsib vee defitsiit okka formeerumist. Kõrge õhutemperatuuri mõjul suureneb transpiratsioon ja VPD, kuid samal ajal takistab läbikülmunud muld juurte kaudu vee omastamist (Krivoglazova, 2015, lk 12; Josepson *et al.*, 2007, lk 2; Alasepp, 2010, lk 6). Okaspuud on okaste pikaealisuse tõttu palju tundlikumad põua suhtes, kui on seda lehtpuud (Krivoglazova, 2015, lk 6 ja 7). Mulla veerežiimitingimuste halvenemise tagajärjel vähenevad peaaegu alati okaste mõõtmed (Kollist, 1974, lk 134–161). Männiokaste kasvule mõjub halvasti, kui mullas on toitaineid optimaalsest vähem. Kasvu mõjutab ka õhusaaste. Kõrgete saastekontsentratsioonide või eriti agressiivsete saasteainete mõjul on täheldatud okka pikkuse vähenemist, näiteks fluori- ja klooriühendite toimel väheneb männiokaste pikkus 1,5–

2 korda. Atmosfääris sisalduv suur kogus happelist SO_2 mõjutab männiokaste eluiga: 0,19% okastes sisalduva väävli taseme korral on okaste eluiga 3–4 aastat, 0,24% sisalduse korral 2 aastat ja 0,3% väävli sisaldus põhjustab okka surma esimese kasvuaasta lõpus või teise kasvuaasta alguses (Sergeitšik, 1984).

1.3. Mineraalelemendid ja nende olulisus taimedele

Lisaks toitainete absoluutsele sisaldusele on oluline toitainete tasakaalustatus (Raid, 1996b, lk 92–101). Taim vajab normaalseks eluks kõiki mineraalelemente, omastades neid kindla valiku ja bioloogilise vajaduse järgi, millest ühtegi ei ole võimalik asendada teise keemilise elemendiga vaid talle omaste funktsioonide tõttu (Miidla, 1984). Taimede jaoks on peamised toiteelemendid lämmastik, fosfor ja kaalium. Taimed vajavad vees lahustunud kujul mineraalelemente organismi ülesehitamiseks, fotosünteesiks ja orgaaniliste ainetega ühinemiseks.

1.3.1. Lämmastik

Taimede lämmastikuallikaks on peamiselt lagunemisprotsessidest tekkinud nitraadid ja ammooniumsoolad ning vähesel määral ka molekulaarne lämmastik (N_2), mida on õhus mahu järgi umbes 80% (Kärblane, 1996). Liblikõielistel aitavad õhulämmastiku kättesaadavaks muuta mügarbakterid (Tokko, 1999). Happelises keskkonnas on ülekaalus nitraatse lämmastiku (NO_3^-) omastamine. Kärblase (1996) väitel pole Eesti mineraalmullad lämmastikurikkad. Eesti muldade üldlämmastikusisaldus on 0,1–0,3 %, kuid sellest ligikaudu 97–99% on orgaaniliste ühenditena, millest omakorda vaid 1–3% on taimedele omastatavad mineraalsel kujul. Taimedele omastatavate lämmastikuühendite allikas mullas on orgaanilise aine lagunemisel vabanevad ammooniumühendid. Mulda satub lämmastikku ka sademeveega: õhus äikese elektrilahendusel tekivad erinevad oksiidid (NO ja NO_2) ja vihmavee ühinemisel saadud lämmastikhappe (HNO_3) ja lämmastikushappe (HNO_2) maha sadamisel.

Taimede lämmastikuvormide omastamine sõltub paljudest teguritest, eelkõige ilmastikust ja mullastikust (Kärblane, 1996). Taimed omastavad lämmastikku paremini sademerikkal suvel kui põuasel ajal, seetõttu on lämmastiku liigväetamise oht suurem just kuival ajal. Raid (1992) on täheldatud, et madalatel õhutemperatuuridel eelistavad taimed pigem ammooniumlämmastikku.

Lämmastik on kogu orgaanilise maailma elutegevuse aspektist tähtis element (Miidla, 1984). Sel on suur füsioloogiline tähtsus eelkõige seepärast, et on kohustuslik komponent ainetes, mis moodustavad protoplasma põhilise osa. Taimede kuivainest moodustab lämmastik

ligikaudu 0,5–4%, rohkem on seda seemnetes ja vähem vegetatiivorganites, lämmastikurikkamad on just noored taimed (Kärblane, 1996). Pihelgase (1983) andmetel leidub lämmastikku vähem käbides ja koores, rohkem on seda lehtedes/okastes. Taimede kasvuprotsessis on lämmastik kõige olulisem seetõttu, et kutsub esile valgu sünteesi ja kasvufaktorina taime kvalitatiivsed muutused. Tiits (1989) on täheldanud, et mida rohkem on keskkonnas fosforit, seda paremini omastab taim lämmastikku ja vastupidi.

Lämmastikuvaegus pidurdab taime kasvu (Miidla, 1984). Mineraalmuldadel kasvavad metsapuudel on mineraalainetest kõige sagedamini puudus lämmastikust. (Karoles, 1988). Olukord muutub kriitiliseks kesksuvel, kui taimede omastatavad ammoonium- ja nitraatühendid on mullalahusest ära tarvitatud, aga uusi ühendeid kõdu- ja pindmise mullakihi läbikuivamise tõttu ei vabane. Vaegus mõjutab taimede keemilist koostist ja seega kvaliteeti, selle korral väheneb või lausa lakkab fotosüntees, mille tõttu on lämmastikuvaesel mullal kasvanud taimedes vähem valke ja vitamiine, pidurdub rakkude pooldumine, taimede kasv ja vegetatiivsete organite areng (Kärblane, 1996; Tiits, 1989). Lämmastiku ülekülluse korral aeglustub taimede areng ja pikeneb kasvuperiood (Kärblane, 1996). Erinevates kasvukohtades suhtuvad taimed lämmastikurohkusesse erinevalt. Kui põhja poolt pärit taimedel pikendab lämmastikuküllus kasvuperioodi, siis lõunapoolsema päritoluga taimedele mõjub see õitsemist ja seemnete valmimist kiirendavana.

1.3.2. Fosfor

Fosfori üldsisaldusest Eesti mineraalmuldades moodustab suurema osa mineraalide ja mulla orgaanilise aine koostises olev fosfor, mis on taimedele mitteomastataval kujul (Kärblane, 1996). Taimed toituvad peamiselt mineraalsetest fosforiühenditest, kuid ka neid ei ole kõik taimed suutelised piisavalt omastama. Fosfor allub mullas mitmesugustele mõjudele, mistõttu muutuvad tema vormid nii keemiliste kui ka bioloogiliste protsesside tagajärjel pidevalt. Lämmastikuga võrreldes on fosfori kaod mullas lendumise ja väljauhtumise kaudu tühised, kuid erosiooni tõttu võib fosfor kanduda koos mullaga ära. Taimsete kudede ülesehitamiseks kasutatakse fosforit võrreldes lämmastikuga kuni 10 korda vähem, mistõttu ei ole fosfori omastamise seaduspärasused nii ilmsed (Raid, 1990, lk 24–26).

Eelkõige omastavad taimed fosforit mullast vees või nõrkades orgaanilistes hapetes lahustuvate anioonidena. Omastatud fosfaadid on taimedes hästi liikuvad ja lähevad ennekõike taime kõige noorematesse osadesse. Lisaks anorgaanilisele fosforile satuvad taimedesse ka orgaanilised fosforiühendid (suhkrute fosforestrid ja nende laguproduktid). Nende omastamisel osalevad juurerakus sünteesitud fosfataasid (ensüümid). Anorgaaniliste ühenditena leidub fosforit ortofosfaatide koostises, mida tuleb pidada taime fosfori varuaineteks. Taimes olevate anorgaaniliste fosforiühendite hulk sõltub kasvuperioodil

valitsevatest fosfortoitumise tingimustest. Mida fosforirikkamad on kasvutingimused, seda rohkem on ka anorgaanilisi fosforiühendeid taimedes. Erinevalt lämmastikust, mis forsseerib taimede kasvu, kiirendab fosfor taimede kasvu. (Miidla, 1984; Kärblane, 1996)

Fosfor on üks tähtsamaid elemente, moodustades muljetavaldava osa taime energiavahetusest (Seemen, 1979, lk 144–155), kuid eluks vajavad taimed seda vähem, kui näiteks lämmastikku ja kaaliumit. Fosfor on taimedes jaotunud väga erinevalt, kõige rohkem on seda reproduktiivorganites, kus on seda ligi 5–10 korda rohkem kui vegetatiivorganites (Miidla, 1984). Seetõttu kannatavad fosforipuuduse all eelkõige taimede generatiivorganid. Fosfor esineb taimedes P^+-ioonidena, olles vajalik esmastel fotosünteesi protsessidel, parandades taimede kvaliteeti, suurendades suhkru ja rasvade sisaldust ning sisaldades rohkelt energiat ATP näol. Fosfor kiirendab arenguprotsesse: õite moodustumist, juhtkoe väljaarenemist, viljumist ja suurendab köögiviljade suhkrusisaldust. Fosfor soodustab õitsemise rikkalikust ja normaalne fosforiga varustatus suurendab taimede külmakindlust (Lepik, 2010, lk 13; Tiits, 1989). Fosforit sisaldab taimeraku kõige olulisem elund - rakutuum tuumavalkudena (Miidla, 1984). Fosforiühendid etendavad märkimisväärselt olulist osa ka ensüümide koostisosadena süsivesikute ainevahetuses. Fosfatiididel on taimede elus oluline osa, mille ülesanne on reguleerida taimede plasma läbilaskvust, eriti palju on neid seemnetes ja idudes. Fosforit on veel vitamiinides ja hormoonides.

Fosforidefitsiidi korral on taime valgusüntees häiritud, väheneb kloroplastide moodustumine ning klorofülli süntees (Tiits, 1989). Taime kasvu alguses esineva fosforivaeguse negatiivseid mõjusid ei ole võimalik enam hiljem kompenseerida (Miidla, 1984). Fosfori ülekülluse tingimustes kasutatakse fosforit puudulikult ning see kuhjub taimedesse mineraalses vormis. Sel juhul lüheneb taimede vegetatsiooniperiood ja intensiivistub generatiivorganite areng. Kasvuperioodi lühenemise korral võib ka juhtuda, et taimed valmivad enneaegselt ning ei anna suurt saaki.

1.3.3. Kaalium

Kaaliumi leidub Eesti muldades oluliselt rohkem kui lämmastikku ja fosforit, kuid vaatamata sellele on kaaliumi kui toiteelemendi puudus muldades sage. (Miidla, 1984). Eriti kaaliumivaesed on kerged turvas- ja liivmullad. Taimede omastatav kaalium moodustab vaid väikse osa (0,5–1%) mulla üldkaaliumisisaldusest. Kaaliumisisaldus on mullas seda suurem, mida suurem on mulla pH-väärtus ja huumusesisaldus (Kärblane, 1996).

Kaaliumi liikumine taime ja transport selles toimub K^+-ioonina (Kärblane, 1996). Kaalium leelismetallina pole tugevasti seotud orgaaniliste ühenditega ja nõnda tõrjuvad teised ioonid neid kergesti välja (Miidla, 1984; Kärblane, 1996). Orgaaniliste ühenditega ei moodusta K^+-ioonid püsivaid komplekse, mistõttu ei tunta taimes ühtegi orgaanilist ühendit, kus kaalium

kuuluks otseselt keemilisse koostisesse (Kärblane, 1996). Kaalium võib taimedes esineda hüdrokarbonaadi, kloriidide, hüdrofosfaatide või sidrun-, oblik- ja püroviinamarihappe sooladena. Taimedes on kaaliumi keskmiselt 0,4–1,6%, suurem osa sellest paikneb noortes kasvavates organites. Taime kasvu algusest kuni õitsemiseni on kaaliumi tarbimine eriti suur (Tiits, 1989).

Kaaliumi peamine ülesanne on anioonide ja katioonide tasakaalu säilitamine rakumahlas. Lisaks reguleerib kaalium taimes veerežiimi ja stabiliseerib ainevahetust (Tiits, 1989). Kaaliumi füsioloogiline funktsioon on taime elus mitmekülgne:

- tungides ühevalentse ioonina kiiresti rakku, suurendab rakumembraani läbilaskvust teistele toitainetele;
- vähendab protoplasma viskoossust ja aktiviseerib sünteetilisi protsesse;
- soodustab sahhariidide sünteesi, lisaks plastiliste ainete liikumist lehtedest säilitusorganitesse, suurendades sedasi taimede külmakindlust;
- soodustab vee tungimist juurtesse, vähendades samal ajal transpiratsiooni ja suurendades põuakindlust;
- avaldab mõju valgu- ja sahhariidide vahetusele, millest tulenevalt on valgurikkad taimeosad samal ajal ka kaaliumirikkad;
- olles magneesiumi ja kaltsiumi antagonist, võib kaaliumiga liigväetatud muldadel tekkida kaaliumi n-ö luksustarbimine, vähendades magneesiumi võimet siseneda taime;
- aktiveerides sahhariidide sünteesi ning nõnda ka ligniini teket, intensiivistab kaalium rakukestade puitumist;
- mõjutab taimedes hingamisprotsesside intensiivsust;
- aktiveerides mitmete ensüümide tegevust, kindlustab taimes fotosünteesiprotsessi kulgemist. (Miidla, 1984; Kärblane, 1996)

Kaaliumipuuduse korral pidurdub taime kasv, väheneb valgusüntees, langeb seemnete idanevus ning väheneb taimede põua-, külma- ja haiguskindlus (Tiits, 1989; Miidla, 1984; Kärblane, 1996). Kaaliumidefitsiidi korral koguneb taime vähem suhkruid ja sahhariidide äravool lehtedest katkeb ning väheneb ka fosforisisaldus (Kärblane, 1996). Kaaliumipuuduse tunnused avalduvad enne alumistel vanematel lehtedel ja alles hiljem nooremat el, mis on seletatav kaaliumi võimega ümber paikneda vanematest kasvavatesse lehtedesse, kus kaaliumi vajadus on oluliselt suurem. See näitab, et noored lehed saavad kasutada uuesti vanades lehtedes sisalduvat kaaliumi, sellisele kordumisele alluvad mingil määral ka lämmastik ja fosfor.

1.3.4. Lämmastiku-, fosfori- ja kaaliumisisaldus jääksoo turbas

Fosfori- ja kaaliumidefitsiiti mullas peetakse puude kasvu piiravaks teguriks turbamuldadel (Saarsalmi, Mälkönen ja Kukkola, 2004). Fosfori ja kaaliumi kõrged sisaldused tuhas on olulised, sest need parandavad taimede lämmastiku omastamise eeltingimusi, mistõttu on tuhkade kasutamine otstarbekas viis freesturbaväljade metsastamisel (Kikamägi, Ots, Kuznetsova ja Pototski, 2014). Lämmastikurikastel turbamuldadel tuleb tuhaga väetamisel puu kasvu stimuleeriv mõju maksimaalselt esile. Ometi võib kõrge lämmastikusisaldus turbas ja/või turba happesus põhjustada fosforidefitsiiti taimedes ning fosfor võib muutuda taimekasvu piiravaks teguriks. Üldjuhul on puude optimaalseks kasvuks vaja lämmastikku ja fosforit kasvupinnases suhtega 100/10–13, kuid Kikamägi *et al.* uuringus parandati puutuhaga väetamisel kasvupinnase lämmastiku ja fosfori suhet 100/> 18. Puu- ja põlevkivituha leeliseliste omaduste tõttu sobivad need tootmisjäätmed edukalt happeliste turbamuldade neutraliseerimiseks, sest neutraalse turba kasvureaktsiooni (7 < pH < 8) korral toimub toiteelementide omastamine efektiivsemalt ning nõnda tõuseb turbas fosfori- ja kaaliumisisaldus. Varem käsitletud uuringus oli viis kuud pärast tuhaga väetamist töödeldud aladel turbas fosfori- ja kaaliumisisaldused kõrgemad kui kontrollalal, kuid aasta pärast väetamist olid sisaldused eelmise aastaga võrreldes oluliselt madalamad. (Kikamägi, Ots, Kuznetsova ja Pototski, 2014)

Väetamisega on püütud vältida fosforivaegusest tingitud taimede pidurduvat arengut. Raid täheldas oma pikaajaliste katsete jooksul, et kuigi fosforiga väetamine on tähtis puude juurdekasvu suurendamisele (seda kajastab mõnel määral okkaanalüüs), on see eeskätt tähtis mulla bioloogilise aktiivsuse parandamise osas (Raid, 1975). Mullas suureneb taimedele oluliste lämmastiku mineraalsete vormide hulk, kui mulda lagundatakse (Rehfuess, 1969). Fosforiga väetamine soodustab lämmastiku mõju kestust ja vähendab mittesobiliku niiskusrežiimi mõju.

1.3.5. Toiteelementide sisaldus männiokastes

Toiteelementide sisaldus männiokastes muutub vegetatsiooniperioodil paljude tegurite mõjul, see sõltub näiteks õhutemperatuurist, sademetest, toiteelementide sisaldusest kasvusubstraadis ja nende tarbimisest (Raid, 1996a, lk 84–91). Kevadel pungade puhkemisel on puude mineraalelementide vajadus erinev võrreldes puhkeperioodile mineku ajaga. Kasvu alguses nõutakse rohkesti lämmastikku valgusünteesiks, sügisel aga fosforit ja kaaliumit puude kasvu lõpetamiseks, uuel kevadel puhkevad okkad rikastuvad esimeses järjekorras lämmastiku ja fosforiga (Orlov ja Košelkov, 1971). Toitainete omastamine on kõige intensiivsem esimesel kasvuaastal, hiljem need protsessid nõrgenevad (Raid, 1975).

Okaspuude kasv on tihedas seoses toitainete varustatusega, väljendudes okaste toiteelementide sisalduses (Miidla, 1984). Iga okastes oleva elemendi sisaldus sõltub nii toitainete esinemisest kasvukeskkonnas, ent ka mulla niiskustingimustest, mille juures neid omastatakse. Raid on täheldanud, et mida kõrgem on mullaviljakus, seda rohkem omastab üldiselt mänd mullast toiteelemente, kuid seda teatud piirini (Raid, 1979).

1.3.6. Toiteelementide suhted okkas

Eri autoritelt leidub mitmesuguseid seisukohti okaste toiteelementide suhete kohta. Näiteks Ivanova ja Lavritšenko väidavad, et toiteelementide suhe kohandatud tingimustes ei sõltu mullastiku klimaatilistest ja geograafilistest tingimustest ega taimede vanusest. Nimetatud lämmastiku (N), fosfori (P) ja kaaliumi (K) suhe on männi jaoks 69 : 6 : 25. Samuti väidab Berzin, et lämmastiku, fosfori ja kaaliumi suhe männiokastest on absoluutne suurus ning sõltumata metsakasvutingimustest väljendub see suhtes 68 : 9 : 23. Nii Pobedovi kui ka Rjabuha järgi muutub suhe okastes toitumistingimuste muutumiste järgi, seejuures on mõlema autori andmetel optimaalseks peetav vahekord küllaltki ligilähedane – vastavalt 69 : 6 : 25 ja 67 : 7 : 26. (Ivanova ja Lavritšenko, 1980; Berzin, 1974; Pobedov, 1972; Rjabuha, 1972)

Ingestadi kinnitatud optimaalsed toiteelementide suhted okkas on harilikul männil 100N : 14P : 45K, kuid Kikamägi *et al*. tehtud uuringus oli 10 tonni puutuhk/ha väetatud katsealal suhe 100N : 9P : 41K, 15 tonni puutuhk/ha väetatud alal 100N : 10P : 36K, 10 tonni puutuhk ja 8 tonni põlevkivituhk/ha seguga väetatud alal 100N : 7P : 37K ning tuhaga töötlemata alal 100N : 3P : 22K, viidates kaaliumi-, ent eriti fosforidefitsiidile. (Ingestad, 1978; Kikamägi *et al.*, 2014)

1.4. Väetamise mõju männiokka kasvule

Mineraalmuldadel on puuseemikute toitumises kõige olulisem toiteelement just lämmastik, sest ühegi teise elemendi defitsiit ei mõjuta fotosünteesi nii tugevalt kui lämmastiku puudujääk. Halb lämmastikuga varustatus kutsub esile nii lehepinna kui ka assimilatsiooni kahanemise lehepinna ühiku kohta. Klorofülli sünteesimiseks vajaminev osa üldlämmastikust väheneb, kui lämmastikupuudus suureneb. (Raid, 1996b, 92–101)

Lämmastikuvaeguse negatiivset mõju männiseemikute kasvule on üritatud kõrvaldada kasvupinnase väetamisega, kuid tulemused on näidanud, et lämmastiku omastamine halveneb, kui väetatakse ainult fosfori või kaaliumiga, sest sellisel viisil väetiste kasutamine rikub toitainete bilansi kasvusubstraadis. Üheaastaste männiseemikute lämmastiku omastamine ei olene niivõrd kasutatud väetiste hulgast kuivõrd nende vahekorrast toitekeskkonnas. Ühe- ning kaheaastastes männiokastes on lämmastikusisaldus sageli seotud

antud lämmastikuväetise kogusega, kuid okaste lämmastikusisaldust võib tõsta fosfori- ning harva ka kaaliumiväetisega. (Raid, 1979, lk 89–107)

Taimekasvu jaoks pole hea ka toitainete liiga kõrge sisaldus kasvupinnases, mille järel hakkab puu kannatama toitainete liia all. Smoljaninovi ja Klimovaja (1978) järgi kasvab lämmastiku suure sisalduse korral puu jõudsalt, kuid on mehaaniliste omaduste poolest nõrk.

1.5. Põlevkivi- ja puutuha koostis ning kasutamine

Põlevkivi orgaanilise osa koostist kirjeldab empiiriline valem $C_{10}H_{15}OCl_{0,03}S_{0,07}$ (Ots, 2004, lk 47). Põlevkivi orgaanilise osa koostise teeb eripäraseks kõrge vesiniku- (9,7%) ja hapnikusisaldus (10%) ning madal lämmastikusisaldus (0,3%). Puhatu freesturbaväljal kasutatud põlevkivituhas on lämmastikusisaldus < 1000 mg kg^{-1}, fosforisisaldus 658 mg kg^{-1} ja kaaliumisisaldus 9800 mg kg^{-1} (Kikamägi *et al.*, 2014).

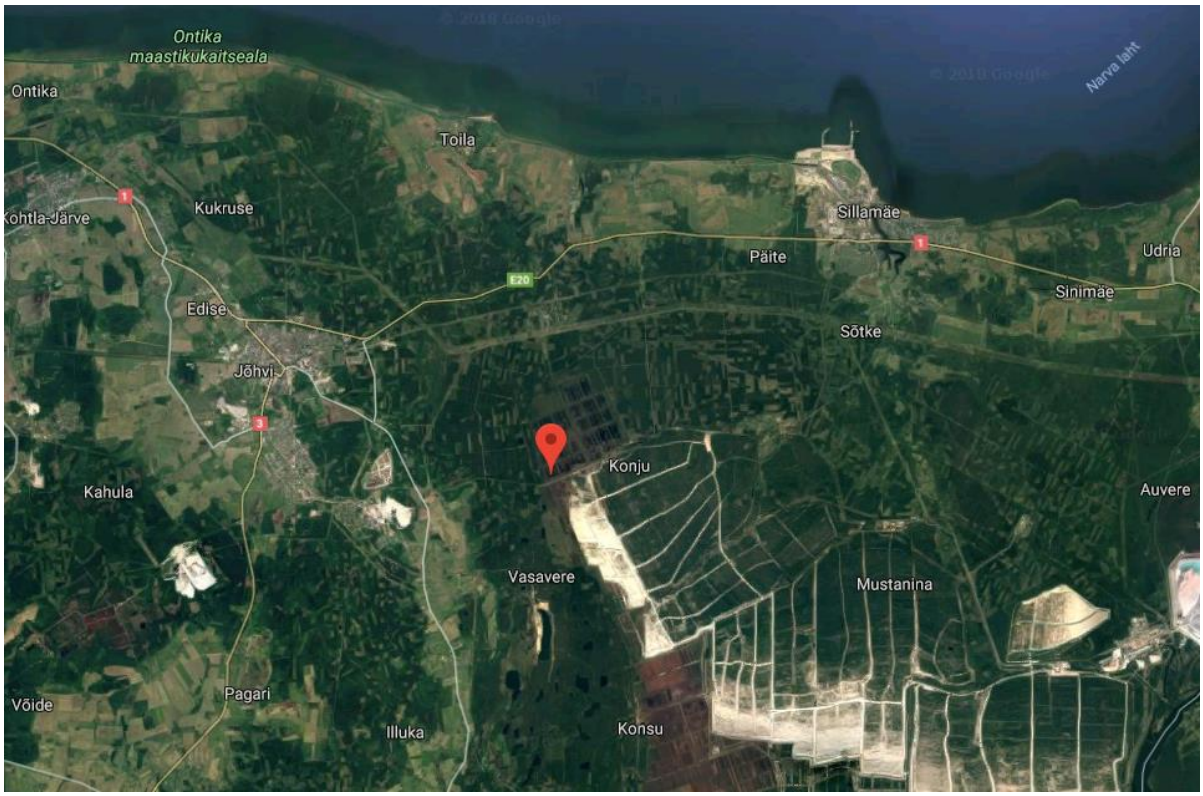
Põlevkivituha kasutusmaht on olnud viimastel kümnenditel väga madal (3–6%). Suurte tuhakoguste tekkimisega kerkib esile probleem, kuidas utiliseerida tootmisjäägina tekkivaid tuhkasid. Põlevkivituha kasutamise juures on probleemiks raskmetallide sisaldus (Kärblane, 1996). Raskmetallidega saastumise ohtu tuhaga väetamisel märgitakse harilikult pea kõigis tuhast tehtud uurimistöödes, kuid valdavas osas neist ei ole leitud, et see praktikas realiseeruks, pigem on tulemused kas neutraalsed või kardetule vastupidised (Levula, Saarsalmi ja Rantavaara, 2000, lk 269–279; Bougnom, Niederkofler, Knapp, Stimpfl ja Insam, 2012, lk 290–295). Tuhk neutraliseerib mulla happesust ja vähendab seeläbi taimede raskmetallide omastamist (Clapham ja Zibilske 1992, lk 1209–1227; Moilanen *et al.*, 2002, lk 321–338; Steenari *et al.*, 1999, lk 119–136; Zimmermann ja Frey, 2002, lk 1727–1737).

Puutuha koostise määrab ära kasutatav biomass, põletamise tehnoloogia ja tuha tekkimise asukoht, kuid ka puuliik ning puude kasvutingimused (Pärn *et al.*, 2010, lk 40–59; Ots, 2013, lk 15). Enamasti sisaldab puutuhk süsinikku, hapnikku, vesinikku, lämmastikku ja kaaliumi, vähem leidub tuhas magneesiumi ja fosforit (Vassilev, Baxter, Andersen ja Vassileva, 2013, lk 40–76). Puhatu freesturbaväljal kasutatud puutuha lämmastikusisaldus on < 1000 mg kg^{-1}, fosforisisaldus 14 275 mg kg^{-1} ja kaaliumisisaldus 12 200 mg kg^{-1}. Puutuha leeliseliste omaduste pärast tõuseb tuhaga väetades mulla pH-väärtus, mille järel kiireneb orgaanilise lämmastiku mineraliseerumine ja selle omastatavus (Kikamägi, 2008; Fritze, Smolander, Levula, Kitunen ja Mälkönen, 1994, lk 57–63). Kuna turvasmuldades leidub lämmastikku külluslikult, siis peetakse taimede kasvu piiravaks teguriks fosfori- ja kaaliumivaegust (Pärn *et al.*, 2010, lk 40–59).

2. MATERJAL JA METOODIKA

2.1. Katsealade kirjeldus

Puhatu mahajäetud turbatootmisala (59º19.368´N, 27º34.024´E) asub Konju külas Toila vallas RMK Ida-Virumaa metskonna territooriumil (vt joonis 1). Puhatu freesturbavälja (karjäärid ja väljakud kokku) pindala on Keskkonnaregistri andmetel 1486,13 ha (riigi reservmaa 558,08 ha, RMK hallatav ala 864,66 ha ja eramaa 63,39 ha) (Ramst, Orru, Salo ja Halliste, 2006, lk 8). Hästilagunenud turbakihi paksus on 1,8 m, hästi lagunenud turba aktiivvaru on 938 000 tonni, passiivne varu 2485 ha.



Joonis 1. Puhatu ammendatud freesturbaväli Konju külas Toila vallas (Google Maps).

Väljakutel on ebasoodsate kasvutingimuste tõttu (hiliskülmad, ekstreemsed õhutemperatuurid südasuvel ja turba pealmise kihi läbikuivamine) puid vähe, tupp-villpea (*Eriophorum vaginatum* L.) katvus on keskmiselt 10%, madalamates kohtades kasvab soontaimedest pilliroog (perekond *Phragmites* Adans.*)*, ahtalehine villpea (*Eriophorum angustifolium* Honck.) ja erinevat liiki tarnad (perekond *Carex* L.). Kraavides, mis on osaliselt sissevarisenud, kasvab ohtralt tupp-villpead, ahtalehist villpead, laialehist hundinuia (*Typha atifolia* L.), kraavtarna (*Carex pseudocypeus* L.), harilikku luga (*Juncus effusus* L.), kraavluga (*Juncus bufonius* L.). (Ramst *et al.,* 2006; Kukk *et al.*, 2018)

Toitainete tasakaalustamata bilansile, eriti kaaliumidefitsiidile, viitab männiokaste kolletumine Puhatu jääkturbaaladel. Metsa kasvatamist Puhatu jääksoos soodustab turba toitainerikkus (v.a. fosfori ja kaaliumi), hea ligipääs tänu rabasisesele teedevõrgule ja väljakutevaheline kraavitatus. Harilik mänd (*Pinus sylvestris* L.), kask (perekond *Betula* L.) ja paju (perekond *Salix* L.) kasvavad kuivenduskraavide ääres, samuti pilliroog, hundinui (perekond *Typha* L.), tupp-villpea, harilik vaarikas (*Rubus idaeus* L.), paiseleht (*Tussilago farfara* L.), metsmaasikas (*Fragaria vesca* L.), tulikaliigid (perekond *Ranunculus* L.), osjad (perekond *Equisetum* L.), tarnad ning isegi kanarbik (*Calluna vulgaris* (L.) Hull) ja harilik pohl (*Vaccinium vitis-idaea* L.). Lagedate alade vahel on metsasiilud, kus alustaimestikust vohab nõges (perekond *Urtica* L.), viidates pinnase lämmastikurikkusele. Looduslikult kasvama hakanud mändide ja kaskede juures võis täheldada sageli külmakohrutuse nähte ning turba mineraliseerumist ja ärakannet puujuurte ümbert. (Ots, 2017; Kukk *et al.,* 2018)

Puutuhaga töödeldud aladel tärkas alustaimestik peaaegu ühe kuu möödudes peale tuha segamist turbasse: 1 m^2 suurustel katseruutudel võis täheldada dominantliikidena ümaralehist uibulehte (*Pyrola rotundifolia* L.), harilikku luga, tupp-villpead, harilikku lakklehte (*Orthilia secunda* (L.) House), sarik-hunditubakat (*Hieracium umbellatum* L.). Pärast segutuha (puutuhk segus põlevkivituhaga) lisamist turbasse tekkis väetatud alale hõredam soontaimestik võrreldes puutuhaga rajatud katsealadega. Võrreldes kontrollalaga, kus alustaimestik puudus täielikult, võis segutuhaga töödeldud katsealadel täheldada kõrvenõgese (*Urtica dioica* L.), pilliroo, ahtalehise põdrakanepi (*Epilobium angustifolium* L.) ja paiselehe (üldkatvus kuni 10%) esinemist. Täheldati isegi III kategooria kaitsealuse liigi – soo-neiuvaip (*Epipactis palustris* (L.) Crantz) – esinemist segutuhaga töödeldud alal. Sammaldest eelistas puutuhaga töödeldud katsealadel kasvada raba-karusammal (*Polytrichum strictum* Brid.) (üldkatvus kuni 65%) ja segutuhaga alal harilik punaharjak (*Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid.) (üldkatvus 100%). (Ots, 2017; Kukk *et al.*, 2018)

2.2. Katsepuude istutamine ja väetamine

Töös püstitati hüpotees, et hariliku männi okka mõõtmed (okka pikkus ja pindala) sõltuvad olulisel määral mulla pH-väärtusest ja toitainete (lämmastik, fosfor ja kaalium) sisaldusest turbas. Uuringu tegemiseks vajalikud okkaproovid koguti Puhatu jääksoos puutuha ja põlevkivituhaga rajatud proovikatsealadelt. Katsealad rajati 2011. aasta aprillis KIKi projekti nr 3705 raames ja istutusmaterjaliks valiti üheaastased hariliku männi potitaimed, mis pärinesid RMK taimlast. Taimed istutati käsitsi seaduga 1,2 × 2 m. Igale katsealale (9 × 14,5 m) istutati 50 puud. Väetamine toimus enne taimede istutamist ruutsüsteemi näol (taime ümber 1 × 1 m ulatuses). Puhatu freesturbaväljadel kasutati Sonda katlamajast pärit puutuhka (PT;

koldetuhk) ja Eesti Energia Narva Elektrijaamad AS-ist saadud põlevkivituhka (PõT; tsüklontuhk). Tuhad segati omavahel mehaaniliselt, varieerides erinevates katsevariantides tuhakogustega. (Ots, 2017)

Mõõtmised tehti tuhaga töötlemata ning koldepuutuha ja põlevkivi tsüklontuhaga rajatud proovikatsealadel:

1. looduslikult ise kasvama hakanud mändidega ala (looduslik); (vt lisa 7)
2. tuhaga töötlemata ala (kontroll); (vt lisa 8)
3. PT 10 t ha^{-1} (PT10); (vt lisa 9)
4. PT 15 t ha^{-1} (PT15); (vt lisa 10)
5. PT 10 t ha^{-1} + PõT 8 t ha^{-1} (PT10 + PõT8). (vt lisa 11)

2.3. Morfoloogilised mõõtmised

24. juulil 2018. aastal koguti Puhatu freesturbaväljalt okkaproovid okaste pikkuse ja pindala mõõtmiseks. Kogutud okkaproovid herbariseeriti Tallinna Botaanikaaia termostaadis (Termaks B8133) vajalike mõõtmiste tegemiseks. Üksikokka pindalad ja pikkused skaneeriti 13. augustil 2018. aastal Eesti Maaülikooli metsakasvatuse ja metsaökoloogia õppetooli laboris arvutiprogrammi WinSeedle'i (*Regent Instruments Inc*) abil (vt lisa 5). Igalt alalt korjati kolmelt üksikpuult kolm jooksva aasta võrset, seega kokku 5 x (3 x 3) = 45 võrset. Laboris võeti igalt võrselt 15 okast, seega mõõdeti iga katseala kohta (3 x 3) x 15 = 135 okast, mis teeb kõigi alade peale kokku 675 okast.

2.4. Keemilised analüüsid

Peamiste turbas sisalduvate toiteelementide (NPK) ja kasvukeskkonna reaktsiooni (pH_{KCl}) ning männiokka kasvu vaheliste seoste selgitamiseks leidmiseks võeti Puhatu ammendunud freesturbavälja erinevate katsevariantide juhuslikest katseruutudest 0–10 cm ja 10–20 cm sügavuselt turbaproovid (n = 3). Proovid kuivati Tallinna Botaanikaaia termostaadis (Termaks B8133). Turba keemilised analüüsid tehti Eesti Maaülikooli Taimebiokeemia laboratooriumis spetsiaalselt selle töö jaoks.

Männiokaste pH_{H20}-väärtust määrati Viimsi Kooli laboris pH-meetri PH-BTA sensoriga ning andmekoguja Vernier LabQuestiga. Enne mõõtmist purustati männiokkaproovid kohviveskiga. Männiokkaproovid segati destilleeritud veega vahekorras 1 : 20 (1 g okkaid ja 20 g

destilleeritud vett). Iga katseala kohta tehti kolm männiokkaproovi (vt lisa 6). Proovide ettevalmistamiseks kulus kokku kolm tundi.

2.5. Andmete statistiline analüüs

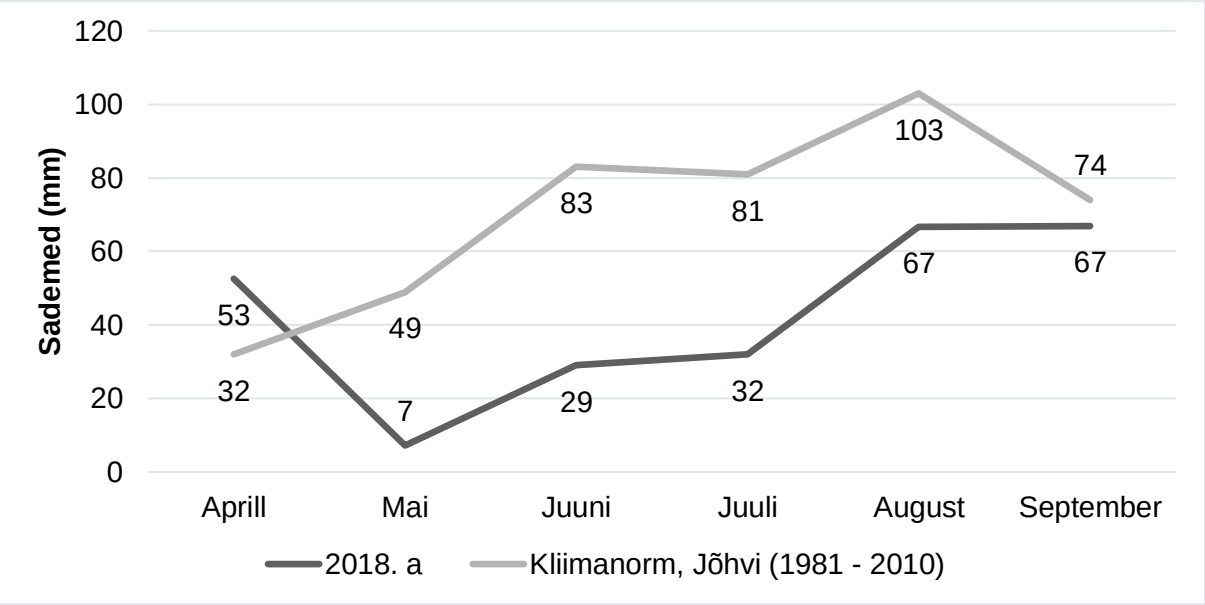
Katsetöötlustes määrati turba keemiliste näitajate (pH_{KCl}-väärtus ja NPK-sisaldused) ning männitaimede okkapikkuste ja -pindalade aritmeetilised keskmised ja standardhälbed erinevate katsealade kaupa. Samuti arvutati kõiki valimeid iseloomustavad erinevad statistilised näitajad (maksimum, miinimum jt). Andmete koondamiseks, korrelatsioonianalüüsi ning jooniste tegemiseks kasutati programmi Microsoft Excel 2018.

2.6. 2018. aasta vegetatsiooniperioodi kuu sademete hulk ning keskmine õhutemperatuur

Rõhutamaks 2018. aasta erakordset kuivust üleüldisemas pildis, võrreldi 2018. aasta vegetatsiooniperioodi sademete kuu hulka ja keskmist õhutemperatuuri Eesti kliimanormide ehk pikaajaliste keskmistega. Kliimanormid on alates 2015. aastast arvutatud perioodi 1981–2010 kohta, varem arvutati 1971–2000 perioodi kohta (Eestis võeti..., 2015; Riigi Ilmateenistuse koduleheküig). Siinses töös on Eesti kliimanormide aluseks võetud Jõhvi meteoroloogiajaamas arvutatud kliimanormid. Võrdluse jaoks kasutati Jõhvi meteoroloogiajaama andmeid 2018. aasta aprill–september perioodi kohta.

Vegetatsiooniperioodide sademete kuu summade andmed saadi Riigi Ilmateenistuse lehelt (http://www.ilmateenistus.ee/ilm/ilmavaatlused/sademed/sademete-kuu-summad/). Vaadeldud on sadememõõturi andmeid.

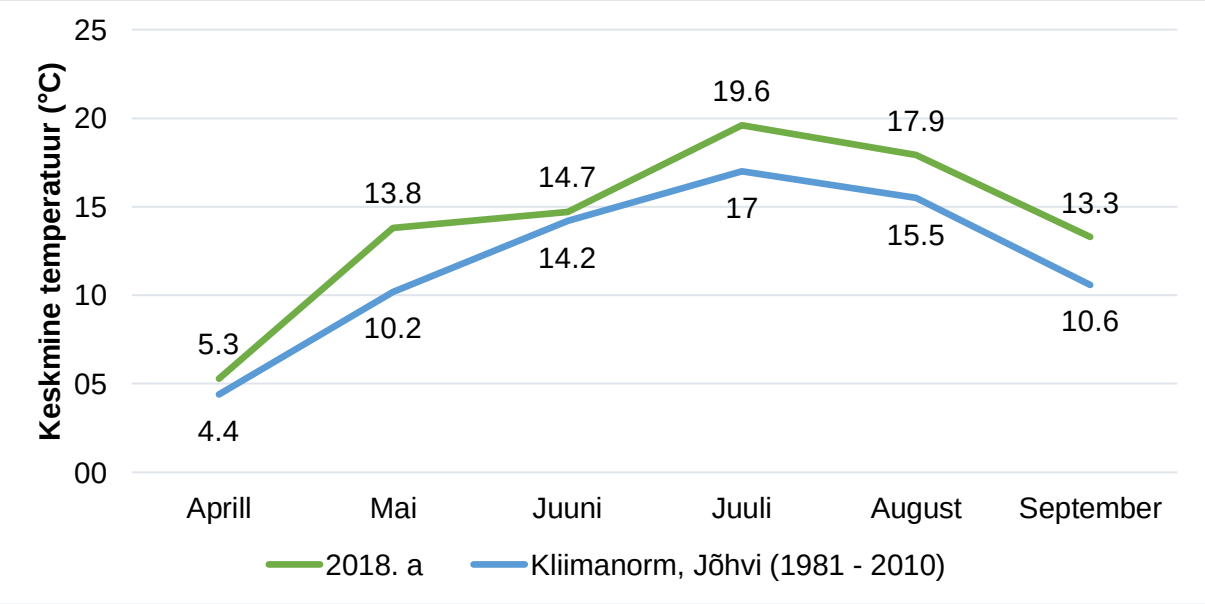
Joonis 2 iseloomustab 2018. aasta vegetatsiooniperioodi kuu sademete hulka võrrelduna Eesti kliimanormiga. Võrreldes kuu keskmist sademete hulka Eesti kliimanormiga, oli 2018. aastal normist kõrgem ainult aprillikuu, teiste kuude tulemused olid normist madalamad. Võrdlus näitab, et 2018. aastal oli vegetatsiooniperioodi normist oluliselt kuivem.



Joonis 2. 2018. aasta vegetatsiooniperioodi kuu sademete hulk võrrelduna Eesti kliimanormiga (1981–2010).

Vegetatsiooniperioodi kuu keskmine õhutemperatuur arvutati aritmeetiline keskmine kalendrikuu iga antud ööpäeva keskmisest õhutemperatuurist. Ööpäeva andmed saadi Riigi Ilmateenistuse koduleheküljelt (https://www.ilmateenistus.ee/ilm/ilmavaatlused/vaatlusandmed/oopaevaandmed/).

Joonis 3 iseloomustab 2018. aasta vegetatsiooniperioodi keskmist õhutemperatuuri võrrelduna Eesti kliimanormiga. Võrreldes Jõhvi meteoroloogiajaama keskmiseid õhutemperatuure Eesti kliimanormiga, olid 2018. aasta kõikide kuude tulemused normist kõrgemad. Võrdlus näitab, et 2018. aastal oli vegetatsiooniperioodil normist oluliselt soojem.



Joonis 3. 2018. aasta vegetatsiooniperioodi keskmine õhutemperatuur võrrelduna Eesti kliimanormiga (1981–2010).

3. TULEMUSED JA ANALÜÜS

Siinses töös koguti igalt katsealalt kolm turbaproovi 0–10 cm ja kolm turbaproovi 10–20 cm sügavuselt ning kolmelt männilt kolm selle aasta kasvu. Saadud tulemusi võrreldi Kikamägi *et al.* (2014) töös esitatud üldlämmastiku-, fosfori- ja kaaliumisisaldustega ning turba pH_{KCl}-väärtusi eri sügavustel aastatel 2011 ja 2012, mida kirjeldab tabel 1. Töötlusalasid võrreldakse kontrollala tulemustega.

Tabel 1. Turba pH_{KCl}-väärtus ning üldlämmastiku-, fosfori- ja kaaliumisisaldus Puhatu ammendatud freesturbaväljal eri sügavustel 2011. ja 2012. aastal (Kikamägi *et al.*, 2014).

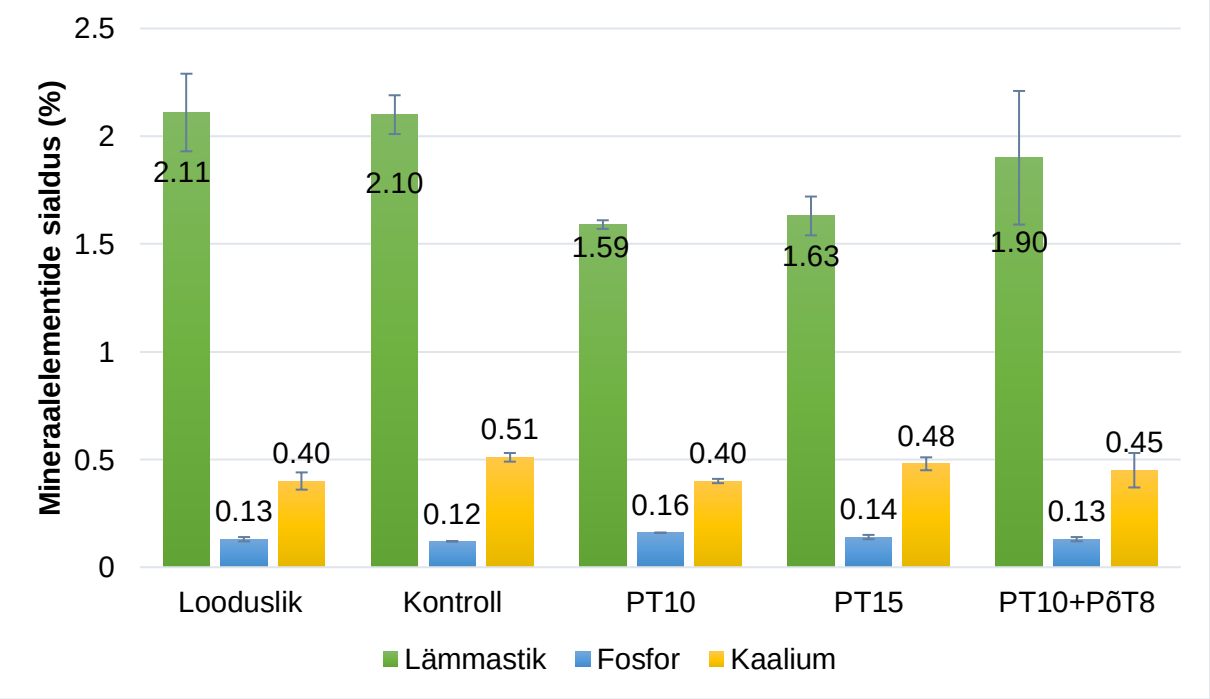
KATSEALA	**Sügavus (cm)**	**pH_{KCl}**	**N %**	**P mg kg^{-1}**	**K mg kg^{-1}**
2011					
Kontroll	0–10	4,3	2,89	3,04	38,45
PT10	0–10	6,89	2,66	513,86	2127,52
PT15	0–10	7,25	2,4	745,71	4131,96
PT10 + PõT8	0–10	7,41	2,22	20,5	454,01
2012					
Kontroll	0–10	4,29	2,87	2,77	63,17
PT10	0–10	4,52	2,81	72,81	93,98
PT15	0–10	4,71	2,85	18,75	193,69
PT10 + PõT8	0–10	4,76	2,78	36,15	145,09
Kontroll	10–20	4,44	2,64	2,89	26,52
PT10	10–20	4,54	2,72	6,2	23,53
PT15	10–20	4,51	2,55	4,35	24,31
PT10 + PõT8	10–20	4,57	2,7	3,09	104,32

3.1. Hariliku männi okaste lämmastiku-, fosfori- ja kaaliumisisaldus

Joonisel 4 on esile toodud lämmastiku-, fosfori- ja kaaliumisisaldus hariliku männi okastes. Kõige suurem lämmastikusisaldus on looduslikul alal kasvanud okastes ning kõige väiksem on lämmastikusisaldus PT10 väetatud alal kasvanud okastes. Kontrollala okastes olev lämmastikusisaldus oli PT10 ja PT15 alaga võrreldes ligi 1,3 korda suurem ning PT10 + PõT8 alal 1,1 korda suurem.

Kõige suurem fosforisisaldus on PT10 väetatud alal kasvanud okastes ning kõige väiksem kontrollalal kasvanud okastes. Kontrollala fosforisisaldus oli võrreldes PT10 alaga 0,8 korda väiksem ja PT15, PT10 + PõT8 ning loodusliku ala korral 0,9 korda väiksem.

Kõige suurema kaaliumisisaldusega on kontrollalal kasvanud okkad ning kõige väiksema sisaldusega PT10 väetatud ja looduslikul alal kasvanud okkad. Kontrollala kaaliumisisaldus on PT10 ja loodusliku alaga võrreldes 1,3 korda, PT10 + PõT8 ja PT15 ala korral 1,1 korda suurem. Antud juhul oli PT10 väetatud alal kõige väiksema lämmastiku- ja kaaliumisisalduse, ent kõige suurema fosforisisaldusega okkad.

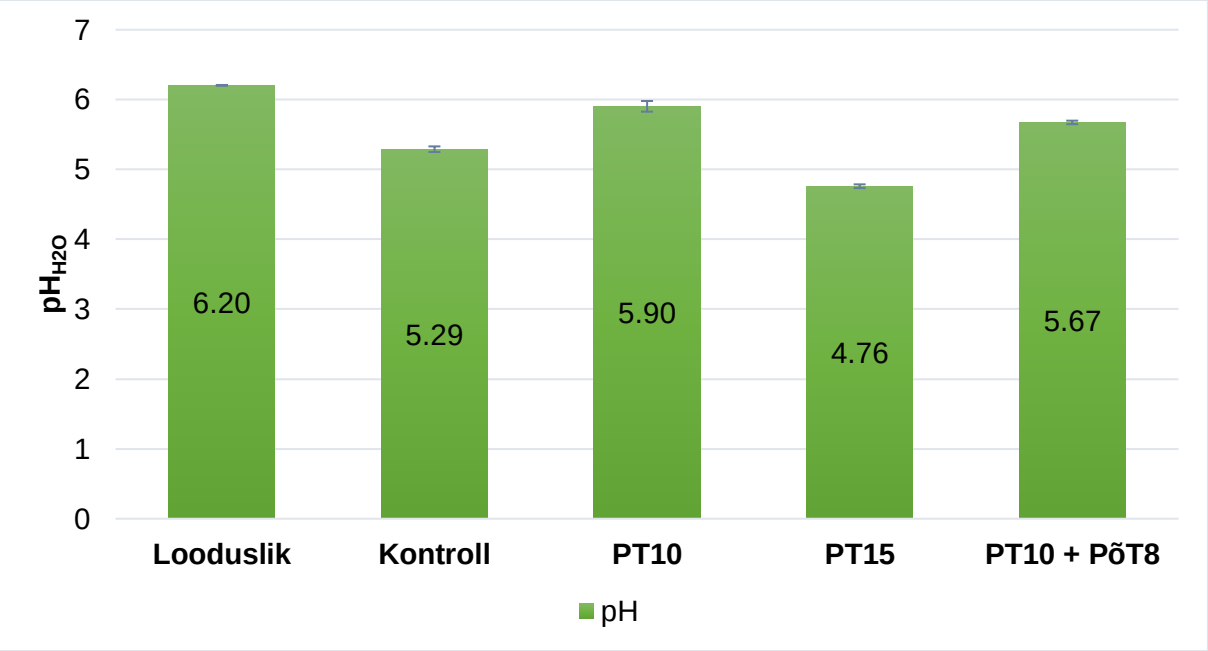


Joonis 4. Lämmastiku-, fosfori- ja kaaliumisisaldus hariliku männi (Pinus sylvestris L.) okastes. (Kohandatud lisa 12 alusel)

3.2. Hariliku männi okaste pH-väärtus

Joonisel 5 on esitatud hariliku männi okaste pH_{H2O}-väärtused. Kõige madalama pH_{H2O}-väärtusega ehk kõige happelisemad okkad kasvavad PT15 väetatud alal ning kõige

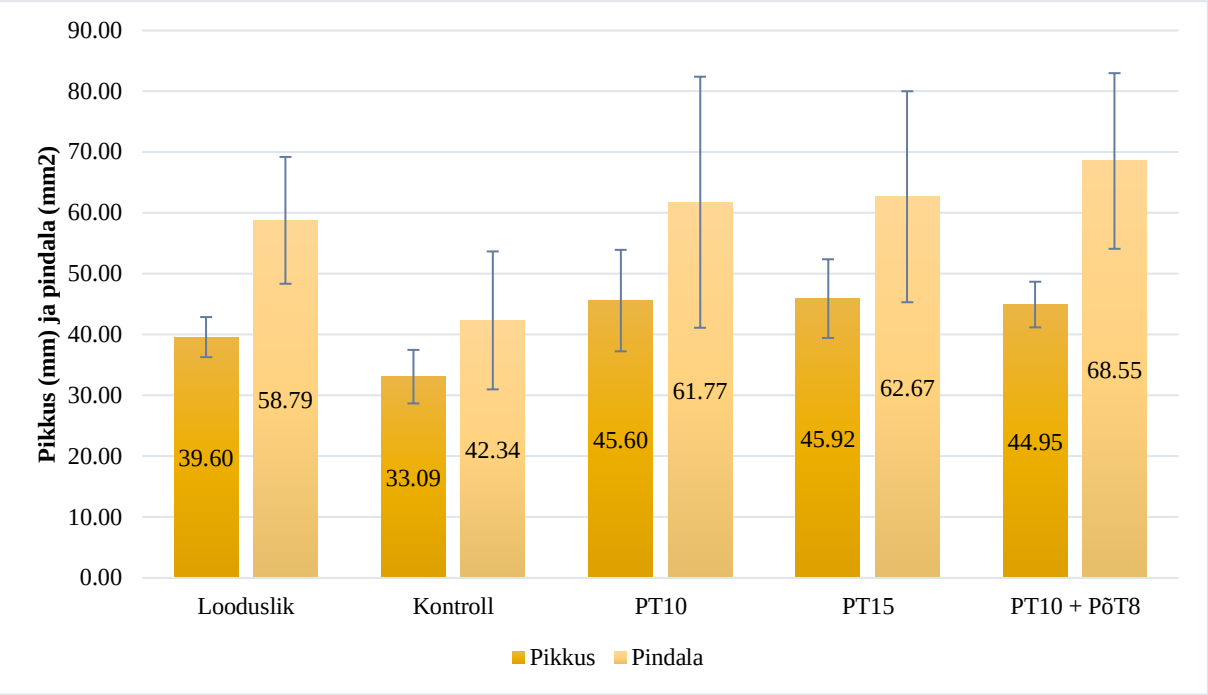
aluselisemad okkad kasvavad looduslikul alal. Võrreldes kontrollalaga, on okaste pH_{H2O}-väärtus PT15 alal 1,1 korda kõrgem, ent PT10 + PõT8 ja PT10 korral 0,9 ning loodusliku ala korral 0,85 korda madalam.



Joonis 5. Hariliku männi (Pinus sylvestris L.) okaste pH_{H2O}-väärtused. (Kohandatud lisa 14 alusel)

3.3. Hariliku männi okaste keskmine pikkus ja pindala

Joonisel 6 on esitatud hariliku männi okka keskmine pikkus ja pindala. Kõige pikemad okkad kasvasid PT15 väetatud alal ning kõige lühemad kontrollalal. Kõige suurema pindalaga oli PT10 + PõT8 väetatud alal kasvanud okas ning kõige väiksema pindalaga okas kasvas kontrollalal. Võrreldes kontrollalaga, on okka pikkus ja pindala PT15 ala suhtes vastavalt 0,7 lühem ja 0,6 korda väiksem. Mida suurem on assimileeriva organi pinda, seda intensiivsem on fotosüntees - seega on kõige parema funktsionaalsusega siinsete tulemuste põhjal PT10 + PõT8 alal kasvanud okkad.



Joonis 6. Hariliku männi (Pinus sylvestris L.) okka keskmine pikkus ja keskmine pindala.

3.4. Hariliku männi okka toiteelementide suhe

Ingestadi (1987) kinnitatud optimaalsed toiteelementide suhted hariliku männi okkas on 100N : 14P : 45K. Siinses töös saadud tulemusi võrreldakse Kikamägi *et al.* (2014) töös saadud tulemustega

Tabel 2 iseloomustab toiteelementide suhteid hariliku männi okkas võrrelduna 2012. ja 2018. aasta uuringute tulemustega. Saadud tulemused näitavad, et 2012. aasta tulemustega võrreldes on okkas märgatavalt vähenenud kaaliumisisaldus. Kikamägi *et al.* (2014) töös märgiti ära, et need suhted viitavad kaaliumi- ning eriti fosforidefitsiidile. Kontrollalal on fosfori- ja kaaliumisuhe tõusnud. Kui 2012. aastal oli kõige kõrgem kaaliumisuhe PT10 alal kasvanud okkas, siis 2018. aastal oli selleks PT15 katseala okkas, millel oli ühtlasi ka kõige madalam kaaliumisuhte langus. PT10 katsealal oli 2012. aastaga võrreldes kõige kõrgem kaaliumisuhte langus.

Tabel 2. Toiteelementide suhted hariliku männi (*Pinus sylvestris* L.) okkas 2012. ja 2018. aasta võrdluses (Kikamägi *et al.*, 2014)

	Looduslik	**Kontroll**	**PT10**	**PT15**	**PT10 + PõT8**
2012	-	100N:3P:22K	100N:9P:41K	100N:10P:36K	100N:7P:37K
2018	100N:6P:19K	100N:6P:24K	100N:10P:25K	100N:9P:29K	100N:7P:24K

3.5. Turba pH_{KCl}-väärtus

Tabelis 7 on esitatud pH_{KCl}-väärtus, üldlämmastiku- ja fosforisisaldus turbas 0–10 cm ja 10–20 cm sügavusel. Kontrollala ülemises turbahorisondis on pH_{KCl}-väärtus 4,1 ning sügavamas kihis 4,2 korda. Võrreldes kontrollalaga, on kõikide teiste katsealade horisondid aluselisemad, neist kõige aluselisemate omadustega on loodusliku ala turbahorisondid. Kõikidel töötlusaladel on turba alumised horisondid aluselisemate omadustega, erandiks on siin looduslik ala, kus on aluselisemate omadustega ülemine horisont.

Kikamägi *et al.* (2014) uuringus oli aasta peale väetamist pinnas muutunud happelisemaks, kõige väiksem erinevus esines kontrollalade tulemuste vahel, kus aastaga langes pH_{KCl}-väärtus 0,01 ühiku võrra. Kui väetades olid PT10, PT15 ja PT10 + PõT8 pinnased neutraalsed või neutraalilähedased, siis aasta hiljem olid pH_{KCl}-väärtused langenud 2,4–2,7 ühiku võrra. Võrreldes töös saadud tulemusi 2012. aasta andmetega, on kõikide töödeldud alade pinnase pH_{KCl}-väärtused langenud 0,08–0,4 ühiku võrra.

Tabel 3. Turba pH_{KCl}-väärtus, üldlämmastiku- ja fosforisisaldus turbas 0–10 cm ja 10–20 cm sügavusel. (Kohandatud lisa 13 alusel)

TURBAPROOVID	pH	Lämmastik %	Fosfor mg kg^{-1}	Kaalium mg kg^{-1}
Looduslik (0–10 cm)	6,31	2,65	59,57	255,66
Looduslik (10–20 cm)	5,07	2,73	33,98	67,77
Kontroll (0–10 cm)	4,07	3,01	7,15	67,59
Kontroll (10–20 cm)	4,24	2,95	3,26	54,59
PT10 (0–10 cm)	4,34	2,71	6,26	47,95
PT10 (10–20 cm)	4,42	2,75	2,39	23,85
PT15 (0–10 cm)	4,31	2,82	1,46	33,53
PT15 (10–20 cm)	4,42	2,72	2,62	24,84
PT10 + PõT8 (0–10 cm)	4,45	3,82	9,00	70,04
PT10 + PõT8 (10–20 cm)	4,49	2,72	5,81	45,09

3.6. Lämmastikusisaldus turbas

Kõige suurem lämmastikusisaldus on katseala PT10 + PõT8 ülemises turbahorisondis ja kõige väiksem loodusliku ala ülemises horisondis (vt joonis 7). Kontrollala ülemises horisondis on lämmastikusisaldus 3,01% ja alumises horisondis 2,95%. Võrreldes kontrollalaga on lämmastikusisaldus väiksem katsealade PT10 ja PT15 horisontides, jäädes vahemikku 2,7–2,8%. Seevastu on PT10 + PõT8 väetatud alal ülemises horisondis lämmastikusisaldus 1,3 korda suurem (3,82%), ent sügavamas horisondis jälle 0,92 korda väiksem sisaldus (2,72%).

Okastes ja turbas sisalduv lämmastik on üldiselt positiivses korrelatsioonis, ent kontrollala ülemises turbahorisondis (r = –0,93) ja katseala PT10 + PõT8 mõlemas horisondis (r = –0,95 ja r = –0,90) on väga tugevas negatiivses korrelatsioonis. Loodusliku ala ülemise horisondi tunnuste juures ei täheldatud seost (r = 0,08).

Kikamägi *et al.* (2014) uuringus oli aasta peale väetamist lämmastikusisaldus vähenenud ainult kontrollalal, erinedes 0,02 ühiku võrra, kõigil teistel aladel oli lämmastikusisaldus suurenenud 0,15–0,56 ühiku võrra (vt tabel 1). Võrreldes töös saadud tulemusi 2012. aasta andmetega, on lämmastikusisaldus vähenenud katseala PT10 ülemises turbahorisondis 0,1 ühiku võrra ja katseala PT15 ülemises horisondis 0,03 ühiku võrra. Kõikidel teistel aladel on lämmastikusisaldus suurenenud. Katseala PT10 + PõT8 ülemises horisondis on lämmastikusisaldus suurenenud selle ajaga 1,04 ühiku võrra, mis on ka kõige suurema lämmastikusisaldusega kiht tuhatöötlusega aladest, viidates ülemise turbahorisondi mineraliseerumisele.

3.7. Fosforisisaldus turbas

Kontrollala ülemises turbakihis on fosforisisaldus 7,15 mg kg^{-1} ning alumises horisondis 2,2 korda väiksem (vt joonis 7). Võrreldes kontrollalaga, on nii PT10 kui ka PT15 turbas fosforisisaldus väiksem. Seevastu on PT10 + PõT8 katsealal fosforisisaldus mõlemas horisondis suurem, vastavalt 1,3 ja 1,8 korda. Kõige suurem fosforisisaldus on loodusliku ala ülemises horisondis, olles üle 8 korra kõrgem kontrollala ülemise horisondi sisaldusest. Tasub ära märkida, et katseala PT15 alumises horisondis on fosforisisaldus suurem kui PT15 ülemises horisondis, mis viitab leostumisele.

Okkas ja turbas sisalduv fosfor on üldiselt tugevas negatiivses korrelatsioonis (r = –0,50…–1,00), ent PT10 alumises horisondis (r = 0,49) ja PT10 + PõT8 ülemises horisondis (r = 0,61) on fosforisisaldus positiivses korrelatsioonis. Seevastu on kontrollala ülemise horisondi korrelatsioon funktsionaalses sõltuvuses ja loodusliku ala ülemise horisondis on tunnused praktiliselt sõltumatud (r = 0,05).

Kikamägi *et al.* (2014) uuringus oli aasta peale väetamist fosforisisaldus vähenenud kõigil töödeldud aladel, välja arvatud PT10 + PõT8 katsealal, kus oli fosforisisaldus umbes 1,5 korda suurem (vt tabel 1). Võrreldes töös saadud tulemusi 2012. aasta andmetega, on katsealade PT10 ja PT15 mõlemas turbahorisondis ning PT10 + PõT8 ülemises horisondis fosforisisaldused vähenenud, ent kontrollala mõlemas horisondis ja PT10 + PõT8 alumises horisondis on fosforisisaldused suurenenud. Erinevusena võib esile tõsta, et fosforisisaldus on PT15 alumises horisondis 0,6 korda suurem (2,62 mg kg^{-1}) võrrelduna PT15 ülemise horisondiga, seevastu on 2012. aasta tulemustes kontrollala ülemises horisondis fosforisisaldus 4,3 korda suurem võrrelduna kontrollala alumise horisondiga.

3.8. Kaaliumisisaldus turbas

Kontrollalal on ülemises turbahorisondis kaaliumisisaldus 67,59 mg kg^{-1} ja alumises horisondis 54,59 mg kg^{-1}. Võrreldes kontrollalaga, on katsealade PT10 ja PT15 turbas kaaliumisisaldus väiksem. PT10 + PõT8 ülemises horisondis on kaaliumit rohkem kui kontrollala samal sügavusel, ent sügavamal on kaaliumisisaldus ligi 0,8 korda väiksem. Kaaliumisisaldus on kõige suurem ülemises looduslikus freesimata horisondis, erinedes kontrollala ülemise horisondi tulemusest 4 korda. Samal ajal on loodusliku ala alumise ning kontrollala ülemise horisondi kaaliumisisaldused samaväärsed.

Okkas ning turbas sisalduv kaalium on üldiselt negatiivses korrelatsioonis (r = –0,83...–0,18), ent loodusliku ja kontrollala sügavamas ning PT10 + PõT8 ülemises turbahorisondis on see tugevalt positiivne. Seevastu kontrollala ülemises horisondis on korrelatsiooni tunnused praktiliselt sõltumatud (r = 0,04).

Kikamägi *et al.* (2014) uuringus oli aasta peale väetamist kaaliumisisaldused vähenenud kõigil töödeldud aladel, ent kontrollala ülemises turbahorisondis oli kaaliumisisaldus 1,5 korda suurem (vt tabel 1). Võrreldes töös saadud tulemusi 2012. aasta andmetega, on enam-vähem sama kaaliumisisalduse säilitanud katsealade PT10 ja PT15 alumised horisondid ning kontrollala ülemine horisont. Tulemuste võrdlus näitab, et taimed on kasutanud pigem ülemises horisondis olevat kaaliumi.

4. ARUTELU

Uurimistöö hüpotees oli, et hariliku männi okkamõõtmed on suuremad turba suurema lämmastikusisalduse korral. See hüpotees sai kinnituse, sest üldlämmastikusisaldus oli kõige suurem PT10 + PõT8 tuhaga väetatud katsealal, kus kasvasid ka kõige suurema pindalaga okkad. Raidi (1996b) ja Tiitsu (1989) andmetel on männi kasvu jaoks kõige olulisem toiteelement lämmastik, sest ühegi teise elemendi defitsiit ei mõjuta valgu- ja fotosüntees nii tugevalt kui lämmastiku puudujääk. Halb lämmastikuga varustatus kutsub esile nii lehepinna kui ka assimilatsiooni kahanemise lehepinna ühiku kohta. Seega suurem okka pindala näitab piisavat lämmastikuga varustatust. Samuti on segutuhas lisaks kõrgemale toiteelementide sisaldusele parem omavaheline vahekord, olles taimede toitumise jaoks väga oluline (Veski, 2018; Raid, 1979).

Hüpotees, et hariliku männi okkamõõtmed on suuremad turba suurema fosfori- ja kaaliumisisalduse korral, leidis osaliselt kinnitust. Võrreldes teiste tuhatöötlusaladega, oli PT10 + PõT8 ala fosfori- ja kaaliumisisaldused turbas suuremad, kuid looduslikul alal olid elementide sisaldused turbas seevastu veel suuremad. Raidi (1990) väitel on fosforikogused taimsete kudede ülesehitamiseks sedavõrd marginaalsed, et fosfori omastamise seaduspärasused pole nii ilmsed. Lisaks on loodusliku ala okka ja turba fosforisisaldused ülemises horisondis tunnused põhimõtteliselt sõltumatud. Seega tuleks fosfori seaduspärasusi okaste kasvul lähemalt uurida.

Hüpotees, et hariliku männi okkamõõtmed on suuremad madalama turba pH-väärtuse korral, ei leidnud kinnitust. Kikamägi ja Fritze *et al.* andmetel tõuseb puutuha leeliseliste omaduste tõttu mulla pH-väärtus, mille tulemusena kiireneb orgaanilise lämmastiku mineraliseerumine ja lämmastiku omastatavus (Kikamägi, 2008; Fritze *et al.*, 1994). Kikamägi *et al.* (2014) uurimuses tõusis aasta peale tuhkadega väetades pH-väärtus 1,65 korda, kuid sellest järgmisel aastal oli pH-väärtus langenud väetamiseelsele tasemele. Seega on pikaajaline madal turba pH ebaefektiivsem männi kasvule.

Okka toiteelementide sisaldust silmas pidades võib kõige optimaalsemaks pidada PT15 väetamist, sest 6 aasta jooksul toimus sel alal kõige väiksem kaaliumisuhte langus võrreldes teiste katsealadega, mis näitab, et PT15 tuhaga väetamisel püsib mullas pikas perspektiivis kõige stabiilsem kaaliumisisalduse tase.

Põlevkivi- ja puutuhaga väetamine soodustas oluliselt okkamõõtmete suurenemist, neist kõige efektiivsemaks okkamõõtmete mõjutajaks osutus PT10 + PõT8 ja PT15 tuhaga väetamine. Okka kasvu kõige määravamaks mineraalelemendiks võib pidada lämmastikku, kuid jääksoos võib pidada piisavat fosfori- ja kaaliumisisaldust. Tiitsu (1989) andmetel on taimede kasvuprotsessis elementidest kõige olulisem lämmastik, kuna see makroelement kutsub esile

valgu sünteesi ja kasvufaktorina taime kvalitatiivsed muutused. Okka mõõtmete suurenemist soodustab neutraalne (pH 7–8) kasvukeskkond.

Eestis tekib igal aastal hiigelkogustes tuhka, eriti põlevkivituhka, mistõttu tuleks probleemiga tegeleda aktiivselt. Sellel teemal tuleks uuringuid jätkata, et selgitada, milline on puu- ja põlevkivituha kui bioinnovaatilise väetise sünergiline mõju taime kasvule, arvestades mullatüüpi ja klimaatilisi aspekte. Saadud tulemuste põhjal on võimalik valmistada kõige efektiivsemate mõjudega tuhasegud lähtudes kasvupinnase omadustest ja kasvatatava taimeliigi spetsiifikast. Edasi tuleks rakendada tuhkasid jääksoode taastamiseks, sest sedasi saab tõsta piirkonna bioloogilist mitmekesisust ja parendada turba süsiniku sidumise võimet. Kasutades tuhkasid väetistena, väheneb jäätmetena ladustatava tuha hulk, seega ei pea jäätmemajanduslikust aspektist tuhkade ladustamisega enam tegelema.

Siinses töös uuriti kliimanormidega vaid ühe aasta sademete ja õhutemperatuuri andmeid, mistõttu tuleb tulevaste tööde juurde koondada vastavaid andmed. Sel juhul muutuvad tulemused võrreldavaks, millest saab teha ka järeldusi, et milliste mineraalelementide järele on kuival või liigniiskel kasvuperioodil suurem vajadus.

Teadvustamaks laiemat üldsust siinsel teemal, tuleks varem kitsale ringkonnale teada olevad uuringud avaldada ning kajastada saadud uuringutulemusi, mis omakorda tooks tootmisjääkide ressursisäästliku kasutamise päevakorda.

KOKKUVÕTE

Siinses töös uuriti mulla pH ja toitainete sisalduse mõju hariliku männi (*Pinus sylvestris* L.) okkamõõtmetele Puhatu ammendatud freesturbaväljal põlevkivi- ja puutuhaga töödeldud aladel. 2018. aasta suvel koguti Puhatu jääksoost kolmelt tuhkadega töödeldud, kontroll- ja looduslikult alalt okka- ja turbaproovid. Vajalikud mõõtmised (okka pikkus ja pindala, turba ja okka NPK-sisaldused ning pH-väärtused) tehti Eesti Maaülikooli ja Viimsi Kooli laborites. Lisaks koguti Riigi Ilmateenistuse kodulehelt 2018. aasta vegetatsiooniperioodi kohta sademete ja õhutemperatuuride andmed.

Töös jõuti järeldusele, et kõige enam mõjutab okaste kasvu mulla lämmastikusisaldus, kuid jääksoos on olulisem piisav turba fosfori- ja kaaliumisisaldus. Saamaks teada, millised seaduspärasused esinevad fosforil okaste kasvul, tuleks antud aspekti lähemalt uurida. Põlevkivi- ja puutuha kasutamine aitab tõsta pinnase pH-väärtust (pH 7–8), sest selle tulemusena kiireneb orgaanilise lämmastiku mineraliseerumine ja lämmastiku omastatavus. Kõige sobivamaks tuhaväetiseks võib selle töö tulemuste põhjal pidada puu- ja põlevkivituha segu (PT10 + PõT8) piisava fosfori- ja kaaliumisisalduse pärast ja puutuhka PT15, kuna puutuhaga töödeldud alal kasvanud okastes oli NPK-suhe 6 aasta vältel kõige stabiilsem. Olenemata katses kasutatud tuhkade kogustest, soodustas tuhaga väetamine okaste mõõtmeid.

Eestis tekib igal aastal ligi 35 000 tonni puutuhka ja 9,5 miljonit tonni põlevkivituhka, mistõttu tuleb nende omaduste ja mõju uurimisega aktiivselt tegeleda, et neile rakendus leida. Esmalt tuleb teha uuringud selgitamaks, kuidas mõjutab põlevkivi- ja puutuha kui bioinnovaatiliste väetiste kasutamine taimede kasvu, arvestamaks mullatüüpi ja klimaatilisi aspekte. Saadud tulemuste põhjal on võimalik valmistada kõige efektiivsemate mõjudega tuhasegud lähtudes kasvupinnase omadustest ja taimeliigi spetsiifikast. Edasi tuleb tuhkasid rakendada jääksoode taastamisel, tõstes nõnda antud piirkonna bioloogilist mitmekesisust ning parendades turba võimet siduda süsinikku. Arvestamaks ka klimaatilisi aspekte, tuleb välja selgitada, milliste ilmastikuolude korral on muldades teatud mineraalelementide vajadus. Oluline on teadvustada probleemi, publitseerida uuringute tulemused ja tutvustada avalikkusele tuhkade kasutusvõimalusi alternatiivina ladestumise asemel, et vähendada oluliselt põlevkivitööstuse ökoloogilist jalajälge.

RESÜMEE

Turba kättesaamiseks rajatakse turbakaevandusalasid, mida peale ammendamist nimetatakse jääksoodeks. Turba kaevandamise lõppedes on jääkturbas kõrge toitainete defitsiit (eriti fosfori- ja kaaliumipuudus), mistõttu on uuel taimkattel seal keeruline kasvama hakata. Hetkel on Eestis jääksoid ligi 80 kogupindalaga 9800 ha. Jääksoo alade taastamise üks võimalusi on kasutada väetisena puu- ja põlevkivituhka, mis pärinevad elektrijaamade ja katlamajade ladestusaladelt. Alates 2011. aastast uuritakse Puhatu ammendatud freesturbaväljal puu- ja põlevkivituha mõju puude kasvule, mida pole siiani kusagil mujal maailmas katsetatud.

Uurimistöö eesmärk oli selgitada, milline on puu- ja põlevkivituhaga väetamise mõju mahajäetud turbakaevandusaladel looduslikult kasvava või istutatud hariliku männi (*Pinus sylvestris* L.) okka pikkusele ja pindalale. Uuritavateks parameetriteks valiti turba ning okaste pH-väärtus, lämmastiku-, fosfori- ja kaaliumisisaldus ning okkakasvu näitajad (pikkus ja pindala).

Välitööna koguti Puhatu freesturbaväljalt neljalt katsealalt ning ühelt looduslikult alalt okka- ja turbaproovid. Proove mõõdeti Eesti Maaülikooli ja Viimsi kooli laborites. Riikliku Ilmateenistuse lehelt koondati Jõhvi meteoroloogiajaama 2018. aasta vegetatsiooniperioodi kuu sademete hulk ning keskmist õhutemperatuuri käsitlev andmestik.

Töös jõuti järelduseni, et kõige enam mõjutab okaste kasvu mulla lämmastikusisaldus, kuid jääksoodes on taime kasvule olulisem piisav fosfori- ja kaaliumisisaldus. Okaste kasvu ja fosforikoguste vahel seaduspärasuste puudumise tõttu tuleks seda aspekti lähemalt uurida. Põlevkivi- ja puutuhaga väetamine aitab hoida pinnast neutraalsena (pH 7–8), mille tulemusena kiireneb orgaanilise lämmastiku mineraliseerumine ja lämmastiku omastatavus. Töö tulemuse põhjal võib kõige efektiivsemaks tuhaväetiseks pidada segutuhka (PT10 + PõT8) piisava fosfori- ja kaaliumisisalduse tõttu ning puutuhka PT15, kuna sel alal kasvanud okastes oli NPK-suhe 6 aasta vältel kõige stabiilsem. Olenemata väetise koostisest ja kogusest, mõjutas tuhaga väetamine okka mõõtmeid positiivselt. Kasutades tuhkasid väetistena, väheneb jäätmetena ladustatava tuha hulk, seega ei pea jäätmemajanduslikust aspektist tuhkade ladustamisega enam tegelema.

Leidmaks tuhkadele rakendust, tuleb nende omaduste ja mõju uurimisega aktiivselt tegeleda. Tuleb läbi viia uuringud, selgitamaks välja puu- ja põlevkivituha kui bioinnovaatilise väetise mõjust taimede kasvule sõltuvalt mullatüübist ja klimaatilistest aspektidest, saadud tulemuste põhjal on võimalik valmistada kõige efektiivsemate mõjudega tuhasegud lähtudes kasvupinnase omadustest ja taimeliigi spetsiifikast. Edasi tuleks tuhkade väetamist rakendada jääksoo aladel, kus saab luua uuele taimkattele soodsat kasvupinnast ning parendada turba

süsiniku sidumise võimet. Oluline on teadvustada probleemi ja tutvustada avalikkusele tuhkade kasutusvõimalusi kui alternatiivi ladestumise asemel, vähendamaks oluliselt põlevkivitööstuse ökoloogilist jalajälge.

SUMMARY

After peat extraction is completed, cutaway peatlands are usually abandoned and the deficit of nutrients in remained peat complicates the growth of new flora. The total area of cutaway peatlands in Estonia is currently about 9,800 hectares. To recultivate those areas, one option is to reuse oil shale ash and wood ash as fertilizers from power stations and boiler houses on wood fuel. Since 2011, experiments have been carried out on Puhatu cutaway peatland with the industry's ash to research the impact of ash on the growth of trees – this has not been done anywhere in the world. The purpose of this research was to find out what kind of effect fertilization with ashes has on the growth of the needles of natural or planted Scots pine trees (*Pinus sylvestris* L.) growing on cutaway peatland. The investigated parameters were pH level, contents of nutrients in peat and needles, the length and area of needles from five sample areas. The methodology of this research consists of samples of the needles and peat collected from Puhatu cutaway peatland during fieldwork. The above-mentioned parameters were measured in the laboratories of the Estonian University of Life Sciences and Viimsi School.

The most important conclusions of this research are that the most effective mineral element for the growth of Scots pine needles is nitrogen, but in cutaway peatlands a sufficient content of phosphorus and potassium is even more important. Fertilization with the industry's ash helps maintain the soil pH within neutral limits (pH 7–8) when the mineralization and assimilation of organic nitrogen increases. According to this research, the most effective fertilizer is the ash mixture because of its abundance of phosphorus and potassium. Fifteen tons of wood ash/ha used as fertilizer sustained the nutrient ratio in needles in the period of 2012–2018. Fertilizing with ashes affected the growth of needles positively irrespective of the fertilizer composition or quantity.

In order to find uses for ashes, further research is needed concerning the properties of ash mixtures as bioinnovative fertilizers and their impact on plant growth considering the soil type and climatic aspects. It is essential to fertilize cutaway peatlands with ashes to create favourable growing conditions for the establishment of new flora and enhance the carbon sequestration capacity of peat. One important task is to raise awareness of the problems related to ashes, also to publish and present the results of the research as a prospective possibility for waste management to reduce the amount of accumulated ashes and to significantly decrease the ecological footprint of the oil shale industry.

KASUTATUD MATERJALID

AA Aqua OÜ. Kättesaadav: https://aaqua.weebly.com/uumlldlaumlmmastik.html(13.02.2019).

Alasepp, K. C3 ja C4 taimede öist veekadu põhjustavad tegurid ja selle tagajärjed. Tartu Ülikool. Tartu, 2010 [Bakalaureusetöö]. Kättesaadav: https://moritz.botany.ut.ee/kaitsmised_2010/Katlin_Alasepp_bakalaureusetoo.pdf (3.02.2019).

Berzin, I. A. 1974. Sudies of Pine Crops in the Main Types of Forest Conditions of Pine of the Latvian SSR Abstract of Cand diss. Jelgava, 31.

Biomassi ja…= Biomassi ja bioenergia kasutamise edendamise arengukava aastateks 2007–2013. – Maaeluministeerium. Kättesaadav: https://www.agri.ee/sites/default/files/public/juurkataloog/BIOENERGEETIKA/bioenergia.pdf (12.02.2019).

Bougnom, B. P., Niederkofler, C., Knapp, B. A., Stimpfl, E., Insam, H. 2012. Residues from renewable energy production: Their value for fertilizing pastures. *Biomass and Bioenergy*, 39, lk 290–295.

Clapham, W. M., Zibilske, L. M. 1992. Wood ashes a liming amendment. *Communications in Soil Science and Plant Analyses,* 23, lk 1209–1227.

Eesti Energia. Kättesaadav: https://www.energia.ee/et/keskkond (6.01.2019).

Eesti Turbaliit. Kättesaadav: http://www.turbaliit.ee/turvas/ (12.02.2019).

Eestis võeti…= Eestis võeti kasutusele uued kliimanormid. – Ilm.ee. Kättesaadav: https://ilm.ee/?513278 (26.01.2019).

Fritze, H., Smolander, A., Levula, T., Kitunen, V., Mälkönen, E. 1994. Wood-ash fertilization and fire 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. Kättesaadav: https://link.springer.com/article/10.1007/BF00418673 (3.02.2019).

Geneetikasõnastik. Kättesaadav: http://geneetika.ee/lexicon-tag/adenosiintrifosfaat/ (21.01.2019).

Google Maps. 59°19'22.1"N 27°34'01.4"E. Kättesaadav: https://bit.ly/2M5FTOy (12.01.2019).

Hanisch, B., Kilz, E. 1990. Monitoring of forest damage: spruce and pine. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer.

Kekkila.ee. Happelise mulla taimede väetamine. Kättesaadav: https://www.kekkila.ee/artikkel/happelise-mulla-taimede-vaetamine/ (2.02.2019).

Ilomets, M. 2001. Mis saab jääksoodest. *Eesti Loodus*. Kättesaadav: http://vana.loodusajakiri.ee/eesti_loodus/EL/vanaweb/0106/mati.html (22.04.2019)

Ingestad, T. 1987. New concepts on soil fertility and plant nutrition as illustrated by research on forest trees and stands. *Geoderma,* 40, lk 237–252.

Ivanova, Z. A., Lavritshenko, V. A. 1980. Determination of Forest Nutritional Needs by the Method of Plant Diagnostics. *Plant Psychology*, 1, lk 69–77.

Josepson, M., Vares, J., Tamm, T. Vee liikumine taimedes. Tallinna Ülikool. Tallinn, 2007 [Referaat]. Kättesaadav: https://bit.ly/2EJusvW (3.02.2019).

Jääksoode korrastamine 2018. Keskkonnaministeerium, 22.03.2018. Kättesaadav: https://www.envir.ee/et/eesmargid-tegevused/maapou/turvas/jaaksoode-korrastamine (22.04.2019).

Jäätmeseadus 2011. Riigi Teataja I, 9.11.2011, 2[1]. Kättesaadav: https://www.riigiteataja.ee/akt/114062013006 (22.04.2019).

Karoles, K. 1988. Metsakaitse: Lühiülevaade metsakahjurite ja haiguste levikust Eesti NSV-s 1986. aastal ning prognoos nende esinemiseks 1987. aastal: abinõud metsade sanitaarse seisundi parandamiseks. Tallinn: Eesti NSV Agrotööstuskomitee Info- ja Juurutusvalitsus.

Kikamägi, K. Erinevate tootmisjääkide (puu-ja turbatuhk) mõju kuusetaimede kasvule. Eesti Maaülikool. Tartu, 2008 [Magistritöö].

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, lk 53–64.

Kollist, P. 1974. Karusambla kasvukohatüübi puistutest ja seniste kivenduste mõjust nende tootlikkusele takseereraldiste andmetel. *Forestry Studies. Metsanduslikud uurimused*, 11, lk 134–161.

Koratkar, S. Cavitation an embolism in vascular plants (with diagram). Kättesaadav: http://www.biologydiscussion.com/plants/cavitation-and-embolism-in-vascular-plants-with-diagram/22732 (2.08.2018).

Koroljova, A. Põlevkivituhk - erineva kasutamise otstarbega materjal. Tallinn, 2016. Kättesaadav: http://www.estis.ee/Failid/Koolitused/2016_11_21_Polevkivituhk_otstarbega_materjal.pdf (23.04.2019).

Krivoglazova, A. Ekstreemsete ilmastikutingimuste ja kliimamuutuste mõju puittaimede talitlusele ja kasvule. Tartu Ülikool. Tartu, 2015 [Bakalaureusetöö]. Kättesaadav: http://dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/47317/krivoglazova.pdf (3.02.2019).

Krüssmann, R. 1983. The activation energy of phosphorus donors in silicon-rich silicon-germanium alloys. Physica Status Solidi.

Kukk, T. 1999. Taimerakk. Kättesaadav: http://www.zbi.ee/~tomkukk/anatoom/anato1.htm#2.5.1 (24.01.2019).

Kukk, T., Laansoo, U., Luuk, O., Mäearu, S., Reier, Ü., Savisaar, S., Tambets, K. 2018. Eestikeelsete taimenimede andmebaas. Eesti Loodusuurijate Seltsi botaanika terminoloogia komisjon. Index of Estonian Plant Names. Kättesaadav: http://taimenimed.ut.ee (5.08.2018).

Kuusik, R., Meriste, T., Pototski, A. 2012. Põlevkivi tuhakasutamise laiendamiseks on käivitunud mitu uut projekti. *Keskkonnatehnika*, 3, lk 8–9. Kättesaadav: https://keskkonnatehnika.ee/wp-content/uploads/2017/09/KKT_2012_03.pdf (3.02.2019).

Kärblane, H. 1996. Taimede toitumise ja väetamise käsiraamat. Tallinn: Eesti Vabariigi Põllumajandusministeerium.

Laas, E. 1987. Dendroloogia. Tallinn: Valgus.

Lepik, A. Liikidevahelised erinevused taimede reaktsioonides konkurentide kasvutihedusele ja sugulusastmele. Tartu Ülikool. Tartu, 2010 [Magistritöö]. Kättesaadav: https://www.botany.ut.ee/kaitsmised_2010/Anu_Lepik_magistritoo.pdf (3.02.2019).

Levula, T., Saarsalmi, A., Rantavaara, A. V. 2000. Effects of ash fertilisation and prescribed burning on macronutrient, heavy metal, sulphur and 137 Cs concentrations in lingonberries (Vaccinium vitis-idaea). *Forest Ecology and Management*, 126, lk 269–279.

Linderholm, H. W. 2006. Growing season changes in the last century. *Agricultural and Forest Meteorology*, 137, lk 1–14.

Miidla, H. 1984. Taimefüsioloogia. Tallinn: Valgus.

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, lk 321–338.

Molekulaarbioloogid…= Molekulaarbioloogid kogunevad aasta tippsündmuseks Tartusse. (10.12.2007). *Tartu Postimees*. Kättesaadav: https://tartu.postimees.ee/1736865/molekulaarbioloogid-kogunevad-aasta-tippsundmuseks-tartusse (22.11.2018).

MRI loodusteaduste didaktika lektoraat. Tartu Ülikool. Kättesaadav: http://bio.edu.ee (3.10.2018).

Orlov, A. J. & Košelkov, S. P. 1971. Soil ecology of pine. Moscow: Science.

Ots, A. 2004. Põlevkivi põletustehnika. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.

Ots, K., Tilk, M., Aguraijuja, 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 cutaway peatland. *Ecological Engineering,* 108 (Part A), 296−306.

Pihelgas, E. 1983. Metsabioloogia. Õpik. Tallinn: Valgus.

Pitk, P., Raave, H., Ots, K. Puidutuha väärindamise võimalused ja perspektiiv granuleeritud kompleksväetisena põllumajanduses ja metsanduses. KIK projekt nr 10053 aruanne. Tartu, 2016. Kättesaadav: https://www.kik.ee/sites/default/files/uuringud/kik_10053_aruanne-05.07.16.pdf (3.02.2019).

Pobedov, V. S. 1972. Fertilizer application in forestry household. Moscow: Forest Promst.

Pärn, H., Mandre, M., Ots, K., Klõšeiko, J., Lukjanova, A., Kuznetsova, T. 2010. Bioenergeetikas tekkivate jäätmete kasutamine metsanduses. *Forestry Studies. Metsanduslikud uurimused*, 52, lk 40-59. Kättesaadav: http://mi.emu.ee/userfiles/instituudid/mi/MI/FSMU/2010/52/FSMU52_art4_40-59.pdf (3.02.2019).

Raid, L. 1975. Mineraalväetiste mõjust männiseemikute okaste keemilisele koostisele pohla kasvukohatüübis. *Forestry Studies. Metsanduslikud uurimused*, 12, lk 116.

Raid, L. 1979. Männiseemikute kasvust erinevates toitumistingimustes. *Forestry Studies. Metsanduslikud uurimused*, 14, lk 89–107.

Raid, L. 1982. Männiseemikute kasvu ja okaste keemilise koostise vahelistest seostest. *Forestry Studies. Metsanduslikud uurimused*, 17, lk 80–93.

Raid, L. 1990. Ühest metsamuldade väetistarbe hindamise võimalusest. *Eesti Mets*, 4, lk 24–26.

Raid, L. 1992. Metsakultuuride väetamisest. *Forestry Studies. Metsanduslikud uurimused*, 25, lk 96–109.

Raid, L. 1996a. Toiteelementide dünaamika männiokastes. *Forestry Studies. Metsanduslikud uurimused*, 27, lk 84–91.

Raid, L. 1996b. Ühekordse ja korduva väetamise mõju okaspuuseemikute toitumisele. *Forestry Studies. Metsanduslikud uurimused*, 27, lk 92–101.

Ramst, R., Orru, M., Salo, V., Halliste, L. Eesti mahajäetud turbatootmisalade revisjon. 2. etapp. Ida-Viru, Lääne-Viru, Jõgeva, Järva ja Tartu maakond. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn, 2006 [Revisjon]. Kättesaadav: https://www.envir.ee/sites/default/files/2_etapp.pdf (7.11.2018).

Rehfuess, K. E. 1960. The nutritional status of southern European silver fir (Abies alba Mill.) populations as a function of nutrient element stocks in the soil. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 88, lk 359–372.

Riigi Ilmateenistus. Kättesaadav: https://www.ilmateenistus.ee (26.01.2019).

Riigimetsa Majandamise Keskus. Kättesaadav: https://www.rmk.ee (3.10.2018).

Rjabuha, E. V. 1972. Consumption of nitrogen and basic ash elements of middle-aged pine plantations of the centre of Polesia. *Forestry and Agroforestry,* lk 84–91.

Saarsalmi, A., Mälkönen, E., Kukkola, M. 2004. Effect of wood ash fertilization on soil chemical properties and stand nutrient status and growth of some coniferous stands in Finland. Scandinavian Journal of Forest Research, 19, lk 217–233.

Seemen, H. 1979. Karbamiidiga väetamise aja mõjust pohla kasvukohatüübi männikultuurile. *Forestry Studies. Metsanduslikud uurimused*, 14, lk 144–155.

Sergeitshik, S. A. 1984. Woody Plants and Industrial Environment Optimization. Minsk: Science and Technology, lk 168.

Smirnov, V. V. 1964. Seasonal Growth of Main Tree Species. Moskva: Nauka.

Smoljaninov, I. I., Klimova, O. A. 1978. How and What Feeds the Forest. Moscow: Publishing Forestry.

Steenari, B. M., Karlsson, L. G., Linquist, O. 1999. Evaluation of the leaching characteristics of wood ash and the influence of ash agglomeration. *Biomass and Bioenergy*, 16, lk 119–136.

Säästva arengu sõnaseletusi. Kättesaadav: http://www.seit.ee/sass/?ID=4 (12.02.2019)

Zimmermann, S., Frey, B. 2002. Soil respiration and microbial properties in an acid forest soil: effects of wood ash. *Soil Biology and Biochemistry*, 34, lk 1727–1737.

Tamm, Ü. 2001. Mänd – vastupidavuse sümbol. *Eesti Loodus*. Kättesaadav: http://vana.loodusajakiri.ee/eesti_loodus/EL/vanaweb/0101/ylo.html (30.07.2018).

Tiits, A. 1989. Põõsasküdoonia. Tallinn: Valgus.

Tikk, K. Õhusaaste mõju uurimine puude kasvule Kirde-Eesti rabades. Air pollution influence to growth of pines in bogs of North-East Estonia. Eesti Maaülikool. Tartu, 2015 [Magistritöö]. Kättesaadav: http://dspace.emu.ee/xmlui/bitstream/handle/10492/1937/Kristo_Tikk_2015MA_MH_täistekst.pdf?sequence=1&isAllowed=y (3.02.2019).

Tokko, U. 1999. Taimefüsioloogia. Tartu Tamme Gümnaasium. Kättesaadav: http://www.ebu.ee/tokko/15_TF.html (5.02.2019).

Unioonpeedia. Kättesaadav: https://et.unionpedia.org (22.01.2019).

Uuring selgitab... = Uuring selgitab põlevkivituha ohtlikke omdausi. – Keskkonnaministeerium, 28.09.2018. Kättesaadav: https://www.envir.ee/et/uudised/uuring-selgitab-polevkivituha-ohtlikke-omadusi (2.05.2019).

Vares, V., Kask, Ü., Muiste, P., Pihu, T., Soosaar, S. 2005. Biokütuste kasutaja käsiraamat. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.

Vassilev, S., Baxter, D., Andersen, L., Vassileva, C. 2013. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification. *Fuel*, 105, lk 40–76.

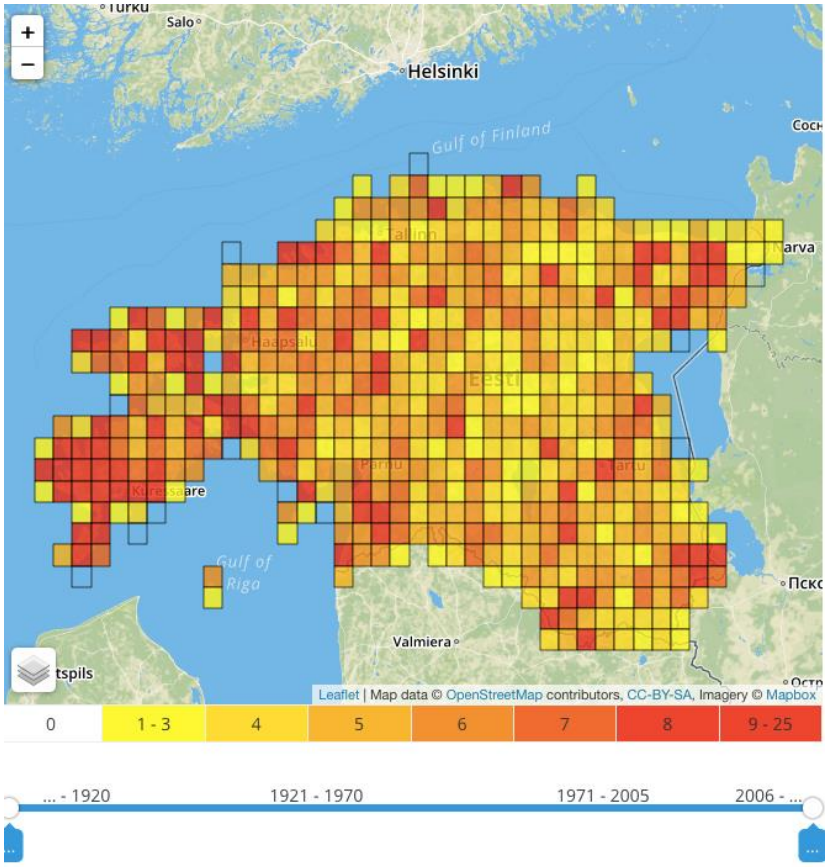
Veski, V. 2018. Sobivate liikide ja õigete võtete puhul kasvab mets ka seal, kus vesi liiga teeb. *Eesti Mets,* 4, lk 24–28.

VSL (võõrsõnade leksikon) 2012. Kättesaadav: http://www.eki.ee/dict/vsl/ (3.10.2018).

LISA 1. Hariliku männi (*Pinus sylvestris* L.) levila maailmas (Eesti Loodus)

(http://vana.loodusajakiri.ee/eesti_loodus/EL/vanaweb/0101/mannilevila.gif)

LISA 2. Hariliku männi (*Pinus sylvestris* L.) levila Eestis (Eesti taimede levikuatlas)



(https://elurikkus.ee/plant-atlas/taxon/id:6318)

LISA 3. Hariliku männi (*Pinus sylvestris* L.) tüvi, okkad, käbi ja võra (Scottish Forestry)

(https://scotland.forestry.gov.uk/images/recreationimages/recotherimages/botanical-scots-pine.jpg)

LISA 4. Hariliku männi (*Pinus sylvestris* L.) isasõied (vasakul), avatud ning suletud soomustega käbid ja emasõied (FotoLibra)

(http://gb.fotolibra.com/images/larger-thumbnails/1205355-scots-pine-male-and-female-pinus-sylvestris.jpeg)

LISA 5. Programmi WinSeedle kuvatõmmis

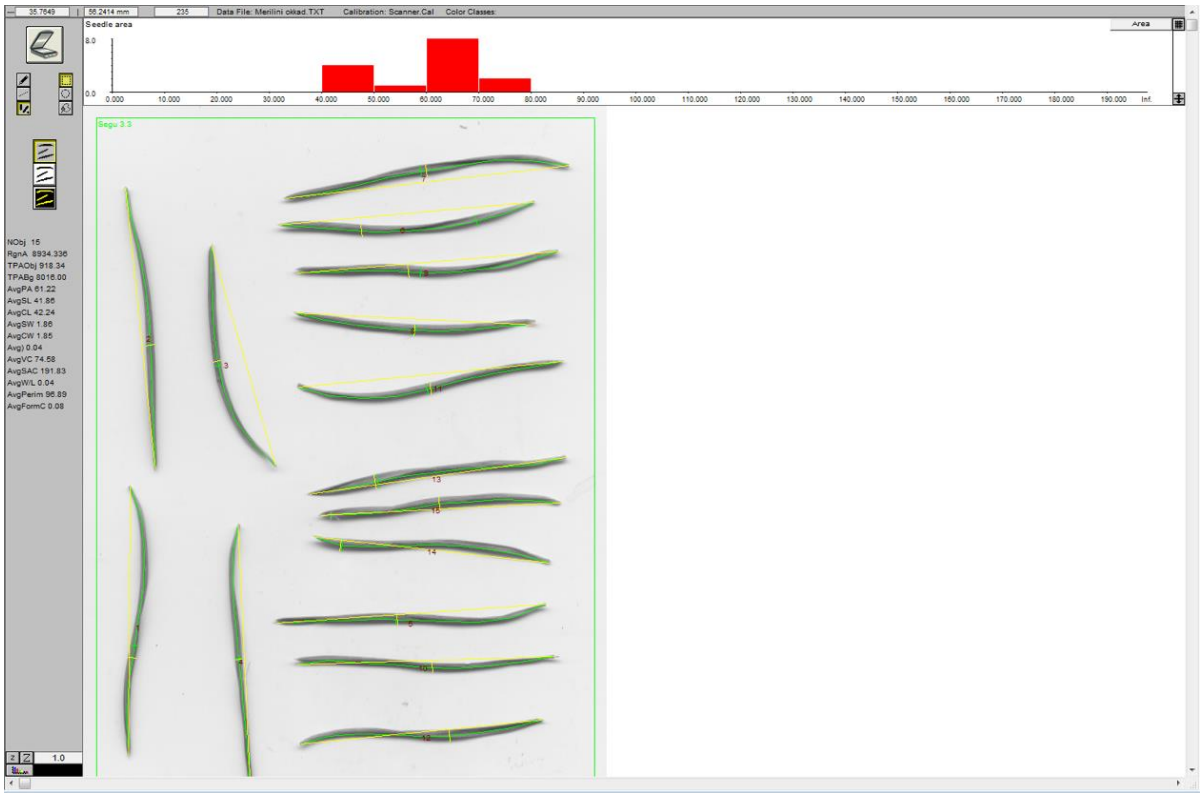


Foto: Merilin Radvilavičius

LISA 6. Männiokka proovid Viimsi Kooli laboris

Foto: Merilin Radvilavičius

LISA 7. Looduslikul alal kasvanud harilik mänd

Foto: Merilin Radvilavičius

LISA 8. Kontrollalal kasvanud harilik mänd

Foto: Merilin Radvilavičius

LISA 9. *PT10 alal kasvanud harilik mänd*

Foto: Merilin Radvilavičius

LISA 10. PT15 alal kasvanud harilik mänd

Foto: Merilin Radvilavičius

LISA 11. PT10 + PõT8 alal kasvanud harilik mänd

Foto: Merilin Radvilavičius

LISA 12. Lämmastiku-, fosfori- ja kaaliumisisaldused hariliku männi (*Pinus sylvestris* L.) okastes, kus A on aritmeetiline keskmine ja σ on standardhälve

Katseala	N %	P %	K %
Looduslik I	1,93	0,12	0,37
Looduslik II	2,10	0,13	0,38
Looduslik III	2,30	0,13	0,44
A	**2,11**	**0,13**	**0,40**
σ	**0,18**	**0,01**	**0,04**
Kontroll I	2,00	0,12	0,53
Kontroll II	2,12	0,13	0,54
Kontroll III	2,17	0,13	0,51
A	**2,10**	**0,12**	**0,51**
σ	**0,09**	**0,00**	**0,02**
PT15 I	1,64	0,14	0,50
PT15 II	1,73	0,15	0,48
PT15 III	1,54	0,14	0,45
A	**1,63**	**0,14**	**0,48**
σ	**0,09**	**0,01**	**0,03**
PT10 I	1,57	0,16	0,39
PT10 II	1,60	0,17	0,41
PT10 III	1,59	0,17	0,39
A	**1,59**	**0,16**	**0,40**
σ	**0,02**	**0,00**	**0,01**
PT10 + PõT8 I	2,23	0,14	0,55
PT10 + PõT8 II	1,61	0,13	0,38
PT10 + PõT8 III	1,85	0,13	0,42

A	**1,90**	**0,13**	**0,45**
σ	**0,31**	**0,01**	**0,08**

LISA 13. Puhatu ammendunud freesturbavälja turba pH_{KCl}-väärtused, üldlämmastiku-, fosfori- ja kaaliumisisaldused 0–10 cm ja 10–20 cm sügavusel, A on aritmeetiline keskmine ja σ on standardhälve

Katseala	Turba sügavus	pH_{KCl}	N %	P mg kg^{-1}	K mg kg^{-1}
Looduslik I	0–10 cm	6,60	2,60	64,33	319,26
Looduslik II	0–10 cm	6,03	2,73	73,37	189,28
Looduslik III	0–10 cm	6,31	2,62	41,02	258,45
	A	**6,31**	**2,65**	**59,57**	**255,66**
	σ	0,29	0,07	16,69	6503
Kontroll I	0–10 cm	4,12	3,02	5,78	87,12
Kontroll II	0–10 cm	4,06	3,00	7,76	53,53
Kontroll III	0–10 cm	4,04	3,00	7,90	62,13
	A	**4,07**	**3,01**	**7.15**	**67.59**
	σ	0,04	0,01	1,19	17,45
PT15 I	0–10 cm	4,34	2,74	5,91	46,54
PT15 II	0–10 cm	4,36	2,72	5,77	45,67
PT15 III	0–10 cm	4,33	2,68	7,09	51,65
	A	**4,34**	**2,71**	**6,26**	**47,95**
	σ	0,02	0,03	0,73	3,23
PT10 I	0–10 cm	4,31	2,81	1,66	33,11
PT10 II	0–10 cm	4,32	2,81	1,58	32,44
PT10 III	0–10 cm	4,29	2,83	1,15	35,04
	A	**4,31**	**2,82**	**1,46**	**33,53**
	σ	0,02	0,01	0,27	1,35
PT10 + PõT8 I	0–10 cm	4,42	2,77	10,27	80,49
PT10 + PõT8 II	0–10 cm	4,46	2,89	6,07	52,81

PT10 + PõT8 III	0–10 cm	4,46	2,81	10,66	76,81
	A	**4,45**	**2,82**	**9,00**	**70,04**
	σ	0,02	0,06	2,54	15,03
Looduslik I	10–20 cm	5,09	2,75	42,85	66,64
Looduslik II	10–20 cm	4,94	2,71	19,47	55,31
Looduslik III	10–20 cm	5,18	2,73	39,63	81,35
	A	**5,07**	**2,73**	**33,98**	**67,77**
	σ	0,12	0,02	12,67	13,06
Kontroll I	10–20 cm	4,24	2,95	3,73	54,07
Kontroll II	10–20 cm	4,30	2,93	2,57	57,34
Kontroll III	10–20 cm	4,18	2,97	3,48	52,37
	A	**4,24**	**2,95**	**3,26**	**54,59**
	σ	0,06	0,02	0,61	2,53
PT15 I	10–20 cm	4,42	2,83	2,92	26,58
PT15 II	10–20 cm	4,43	2,67	2,03	20,49
PT15 III	10–20 cm	4,42	2,65	2,92	27,44
	A	**4,42**	**2,72**	**2,62**	**24,84**
	σ	0,01	0,10	0,51	3,79
PT10 I	10–20 cm	4,42	2,72	1,71	23,27
PT10 II	10–20 cm	4,46	2,81	1,68	21,63
PT10 III	10–20 cm	4,39	2,72	3,78	26,65
	A	**4,42**	**2,75**	**2,39**	**23,85**
	σ	0,04	0,05	1,20	2,56
PT10 + PõT8 I	10–20 cm	4,42	2,70	4,68	41,18
PT10 + PõT8 II	10–20 cm	4,46	2,73	5,29	42,28
PT10 + PõT8 III	10–20 cm	4,59	2,74	7,45	51,81
	A	**4,49**	**2,72**	**5,81**	**45,09**

	σ	0,09	0,02	1,46	5,85

LISA 14. Hariliku männi (*Pinus sylvestris* L.) okaste pH_{H2O}-väärtused, A on aritmeetiline keskmine ja σ on standardhälve

	Proov nr 1 (pH_{H20})	Proov nr 2 (pH_{H20})	Proov nr 3 (pH_{H20})	A	σ
Looduslik	6,2	6,2	6,21	**6,203**	0,006
Kontroll	5,25	5,29	5,33	**5,29**	0,04
PT10	5,82	5,97	5,92	**5,903**	0,076
PT15	4,79	4,74	4,75	**4,76**	0,026
PT10 + PõT8	5,65	5,7	5,67	**5,673**	0,025