

Research paper

Hariliku kuuse (*Picea abies* (L.) H. Karst.) kändude juurimise tootlikkus juurimisagregaadiga Pallari KH-160 neljal Eesti katsealal

Vahur Kurvits*, Peeter Muiste, Allar Padari ja Veiko Uri

Kurvits, V., Muiste, P., Padari, A., Uri, V. 2023. Productivity of stump lifting of Norway spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.) stumps with the Pallari KH-160 stump-lifting device in four sample areas in Estonia. – Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused 79, 37–50, ISSN 1406-9954. Journal homepage: <http://mi.emu.ee/forestry.studies>

Abstract. The aim of this paper was to provide an overview of the productivity of the stump lifting device Pallari KH-160, the distribution of working time, and to assess the dependence of the time and productivity of lifting operations on stump diameter in four different sample areas. Viru and Orguse sample areas were located in the *Hepatica* site type, Elva sample area in the *Oxalis* site type, and Rõuge test area in the *Myrtillus* site type. Viru sample area had smaller stumps compared to the others and had more stumps affected by decay. The highest productivity in terms of dry mass or volume was observed in stump lifting in Rõuge sample area, where 9.8 t of stumps were lifted per hour based on dry mass. The productivity of Viru and Orguse sample areas was lower, but these sample areas are located in the *Hepatica* site type, characterized by limestone substrates and leached soils. In contrast, Elva and Rõuge test areas are in the *Oxalis* and *Myrtillus* site types, respectively, with soils that are predominantly sandy. As the diameter of the stumps increased, the time required per stump increased, but the lifting speed per unit mass also increased. In other words, the productivity of lifting in stands with larger stumps is higher than in stands with smaller stumps. For example, the average productivity of lifting 10 cm diameter stumps is 0.8 t/h, for 20 cm stumps it is 2.2 t/h, and for 60 cm stumps it is 11.8 t/h.

Key words: Pallari KH-160, stump lifting, Norway spruce, productivity.

Authors' address: Chair of Forest and Land Management Planning and Wood Processing Technologies, Institute of Forestry and Engineering, Estonian University of Life Sciences, Kreutzwaldi 5, 51006 Tartu, Estonia; *e-mail: vahur.kurvits@emu.ee

Sissejuhatus

Puitu kui alternatiivset ja taastuvat energiaallikat on järjest enam hakatud väärustama. Kui minevikus kasutati energia saamiseks peamiselt halupuitu, siis tänapäeval järjest enam hakkpuitu. Eestis on hakkpuidu tarbimine kasvanud viimase 10 aasta jooksul üle kahe korra (Statistikaamet, 2023). Hakkpuitu toodetakse nii tüve-

puidust kui ka raidmetest (oksad, ladvad jms), aga ka kraavipervedel ja elektriliini trassidel kasvavast võsast ja muust puitsest biomassist.

Lisaks traditsioonilisele toorainele on hakatud aina rohkem kasutama biokütusena kände, millest on võimalik saada märkimisväärne hulk energiat. Pikaajalise keskmise raiemahu järgi on Eesti lageraie lankide kändude potentsiaalne maht

DOI: 10.2478/fsmu-2023-0011



© 2023 by the authors. Licensee Estonian University of Life Sciences, Tartu, Estonia. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

hariliku männi (*Pinus sylvestris* L.) puhul 308 000 m³ ja hariliku kuuse (*Picea abies* (L.) H. Karst.) puhul 240 000 m³ aastas ("Forest Energy Atlas," 2023). Peale selle on kännupuitu ajalooliselt kasutatud tõrva ajamiseks, laevaehituses, kelkude jalastena ja atrade valmistamisel (Walmsley & Godbold, 2010).

20. sajandi alguses katsetati ühe meetodina puude juurimist lõhkeainega, aga peamiselt kasutati käsitsi juurimise tehnikat (Athanassiadis et al., 2011). Industrialiseeritud juurimise alguseks võib pidada 1960. aastaid. Kändude juurimisel kasutati tollal põhiliselt suuri roomiktraktoreid ning juurimisseadmetena leidsid kasutust spetsiaalsed haaratsiga varustatud lõiketead (Spinelli et al., 2005).

Kännu- ja juurepuidu kasutamise võimalusi kütuse saamise eesmärgil hakati nii Soomes kui ka Rootsis aktiivsemalt uurima 1970-ndatel ja 80-ndatel (Hakkila, 2003a). Tööstuslikku kändude juurimist kütuse saamise eesmärgil alustas Soomes UPM Kymmene 2001. a (Hakkila, 2003a). Juuritavate alade pind hakkas kiiresti suurenema – juba 2006. a. oli see 6000 ha (Laitila, 2006) ja 2010. aastal 20 000 ha (Juntunen, 2011). Aastatel 2005 kuni 2021 oli Soomes toodetud kännupuidu maht vahemikus 0,3–1,2 miljonit m³ aastas, kusjuures suurima tootlikkusega olid aastad 2010–2013 ning sellest alates on juurimise mahud langenud (2021. a oli 288 000 m³) (Finnish Forestry Yearbook, 2023). Soomes on loodud toetused raiesmikelt kändude juurimiseks, kuna see tegevus peaks vähendama juurepessu (*Heterobasidion* spp.) kahjustuse riski järgmise metsapõlvkonna puudes (Flynn & Kumar, 2005; Hakkila, 2003a). Kändude juurimine on levinud ka Kanadas ja USAs Vaikse ookeani rannikul (Hope, 2007; Thies & Nelson, 1988; Thies & Westlind, 2005) ning Inglismaa idaosas, kus peamiseks eesmärgiks on hoida kontrolli all putukate kahjustused (pms. *Hylobius abietis* (L.)) ja juurepessu levik (Walmsley & Godbold, 2010).

Aastatega on välja töötatud erinevaid

juurimisseadmeid, mis parandavad töö kvaliteeti ja suurendavad efektiivsust. Põhjalik uurimus on koostatud juurimisseadmete Terosa, Väkevä, Xteho tootlikkuse kohta sõltuvalt kännu diameetrist (Palander et al., 2015), kus kännu diameetrist sõltumata näitas paremaid tulemusi Terosa juurimispea. Juurimispea CBI tootlikust on uuritud Lätis (Lazdinš et al., 2009).

Eestis on kändude juurimise mahud tagasihoidlikud ja bioenergia saamiseks kasutatakse kände väga vähe. Kändude juurimise protsess on energiakulukas (Eriksson et al., 2008). Kändude juurimine vajab suuri alginvesteeringuid, kuna tuleb soetada ekskavaatorile sobiv juurimispea ja hakkimine toimub spetsiaalseid purusteid kasutades. Lisandite sisaldus (liiv, kivid) hakitud materjalis tekitab probleeme kännupuidust toodetud kütuse põletamisel (Vares et al., 2005).

Kändude juurimine on saanud aktuaalseks tänu puiduressursside suurenevale kasutamisele taastuenergia tootmisel. Üha enam on hakatud otsima lisaks raidmetele alternatiivseid puiduressursse (energiavõsa, kännud, juured jms), mida oleks võimalik puitkütusena kasutusele võtta. Kändude ja juurte kasutusele võtmine suurendaks ühtlasi taastuenergia kasutamise osakaalu Eestis.

Praegusel ajal juuritakse põhiliselt hariliku kuuse kände, peamiselt pindmise juurestiku tõttu, aga ka sellepärast, et kuusk kasvab viljakatel muldadel, mis on vähem tundlikud toitainete vähenemise ja tulevikus väheneva kasvukoha tootlikkuse vastu (Athanassiadis et al., 2011). Kuuse kändudel on kõrge kütteväärtus ja kändude ladustamisega parandatakse nende kvaliteeti, sest kännud ei ima vett nii kergesti kui raidmed ning seega on kändude tarbimine koondunud talvistele perioodidele, millal energiavajadus on kõige suurem (Hakkila, 2003b). Kändude purustamine kiirendab kuivamist ja edasist transporti ning suurendab peenestamise töö kiirust (Laitila et al., 2007). Kändude peenestamine toimub hakkurite asemel spetsiaalsete purustite-

ga, sest purustid võimaldavad peenestada koos lisanditega (muld, kivid jms) materjali (Vares *et al.*, 2005).

Metsa majandamise eeskirja kohaselt on Eestis lubatud juurida kuues kasvukohatüübis. Metsa uuendamisel pohla, jänesekapsa-pohla, mustika, jänesekapsa-mustika, jänesekapsa ja sinilille metsak kasvukohatüübis võib maapinna ettevalmistamise käigus juurida kuuse kände kogu uuendatava ala ulatuses (Metsa majandamise eeskiri, 2007). Eeskirja järgi võib viljakates kasvukohtades kändude juurimisel kahjustada metsamulda sügavamalt kui 30 cm. Pentti Hakkila (2003a) hinnangute järgi on kändudest võimalik toota energiat 140–160 MWh/ha, kui hektaril on ligikaudu 400 kändu. Eestis näitavad erinevate arvutuste tulemused, et okaspuu lageraie aladelt on võimalik juurida aastas ligikaudu 480 000 m³ (3,12 TJ) (Padari *et al.*, 2009) kuni 548 000 m³ (3,57 TJ) (Forest Energy Atlas, 2023) kände.

Selles töös on käsitletud kändude mehhaniseeritud juurimist ja purustamist roomikekskavaatorile agregeeritud spetsiaalse kändude juurimise seadmega Pallari KH-160. Töö eesmärkideks oli välja selgitada ekskavaatori tootlus juurimisel, erinevate tööoperatsioonide ajaline jaotus ja kännu diameetri mõju juurimise ajale ning tööoperatsioonide jaotusele.

Materjal ja metoodika

Töös kasutatud materjal pärineb neljalt katsealalt (Uri *et al.*, 2015). Neist kaks asusid Virumaal, üks Tartumaal ja üks Võrumaal. Iga katseala oli jaotatud neljaks proovitükiks, kus kaks proovitükki olid kontrollalad, kus juurimist ei teostatud, ja kaks juuritud alad. Sõltuvalt juurimisalade suurusest teostati filmimine ja kronometreerimine kas iga katseala mõlemal juurimisalal või ühel neist. Juurimine toimus 2011. a sügisel heades ilmastikuoludes.

Katsealade detailne kirjeldus on esitatud varasemas töös (Uri *et al.*, 2015). Parema ülevaate saamiseks on esitatud tabelis 1 andmed asukoha koordinaatide, kronometreerimisel kasutatud proovitükkide summaarse pindala ning juuritud kändude ruutkeskmise diameetri ja arvu kohta.

Tabelis 1 on näha, et Viru katseala erines teistest väiksemate kändude poolest. See oli tingitud puistu raie nooremas eas juurepessust tingitud kahjustuse tõttu.

Juurimiseks kasutati baasmasinana roomikekskavaatorit ja selle küljes olevat juurimisseadet Pallari KH-160 (joonis 1). Ekskavaatoriks oli New Holland Kobelco E235B, mis kaalus ligikaudu 25 tonni (New Holland, 2012).

Tabel 1. Kändude juurimise kronometreerimise proovitükkide koond.

Table 1. Data of the time measurement sample plots for stump lifting.

Prooviala Sample area	Geograafilised koordinaadid Geographical coordinates	Pindala Area ha	Kasvukoha- tüüp Site type	Ruutkeskmise kännu diameeter Quadratic mean stump diameter cm	Juuritud kändude arv tk Number of lifted stumps	Juuritud kändude arv tk/ha Number of lifted stumps ha ⁻¹
Viru	59°14'34.3»N 26°24'26.1»E	0,20	<i>Hepatica</i>	24,2	175	875
Elva	58°19'50.4»N 26°31'34.7» E	0,25	<i>Oxalis</i>	48,2	86	344
Orguse	59°04'17.3»N 26°21'51.6»E	0,32	<i>Hepatica</i>	45,3	60	188
Rõuge	57°42'33.9»N 26°45'20.7»E	0,12	<i>Myrtillus</i>	44,8	39	325



Joonis 1. Kännu juurimisseade Pallari KH-160 (Athanassiadis et al., 2011).

Figure 1. Stump lifting device Pallari KH-160 (Athanassiadis et al., 2011).

Juurimisseade Pallari KH-160 on mitmeotstarbeline seade hüdraulilistele ekskavaatoritele ja on mõeldud kändude ning juurte purustamiseks ja eemaldamiseks. Väiksema ja keskmise suurusega kändud saab eemaldada ühes tükis, suuremad kändud esmalt tükeldatakse ja siis eemaldatakse tükkidena (Tervolan Konepaja, 2010). Seadet kasutatakse igasuguste metsas ja ümbertöötlemiskeskustes olevate puitmaterjalide hakkimiseks, lõikamiseks ja lõhkumiseks. Kändu raputades väheneb kännu kaal liigse ballasti arvelt. Seade on vastupidav (karastatud teras), tasuv ja seda on võimalik paigaldada paljudele ekskavaatoritele (Tervolan Konepaja, 2010). Juurimisseadme kaal on ligikaudu kaks tonni ja ava suurus 135 cm. Seadme löikejõuks on 50 t ehk ligikaudu 500 kN ning soovituslikult võiks seadet kasutada 18–20-tonnise ekskavaatoriga (Tervolan Konepaja, 2010).

Väli- ja kameraaltööde metoodika

Juurimismasina tootlikkust hinnati filmitud videomaterjali põhjal. Proovitükkidel märgistati kändud numbritega, et hinnata seoseid kännu diameetri ja juurimiseks kuluva aja vahel. Igale proovitükile teostati enne juurimist ülepinnaline klappimine. Igale kännul mõõdeti kaks teineteisega risti

olevat diameetrit ja arvutati kännu keskmine diameeter.

Uurimustöö on esimene omataoline Eestis. Varasemate sarnaste uurimustööde puudumise tõttu puudus ka võrdlusmaterjal. Samuti oli juuritavaks puuliigiks ainult kuusk, seega puudus võrdlus ka teiste puuliikidega. Kõigil katsealadel tegi töid sama operaator, juurimismasin ja -seade. Töid teostas erafirma Riigimetsa Majandamise Keskuse tellimusel.

Esmalt kronometreeriti videomaterjali põhjal roomikekskavaatori tööprotsessi kändude juurimisel. Kronometreerimisel saadud andmeid kasutati efektiivse tööaja leidmiseks ja masina tootlikkuse arvutamiseks. Ekskavaatori tööprotsessi kronometreerimise jooksul mõõdeti aega, mis kulus järgmisteks operatsioonideks:

- 1) kännu juurimine:
 - a) juurimisseadme positsioneerimine kännule;
 - b) kännu tõstmine;
 - c) kännu raputamine ja purustamine;
 - d) kännu kuhjamine hunnikutesse;
 - e) augu silumine;
- 2) liikumine ühelt tööpositsioonilt teisele;
- 3) pausid.

Kännu juurimine ja masina liikumine järgmisele tööpositsioonile moodustasid efektiivse tööaja ehk aja ilma seisakute ja pausideta. Kändude juurimise alguseks loeti seda, kui juurimisseade positsioneeriti kännule ning lõpuks seda, kui kändudest järele jäänud augud vajadusel siluti. Liikumine algas siis, kui ekskavaatori linnid alustasid liikumist ja lõppes siis, kui linnid peatusid ning algas juurimisseadme positsioneerimine kännule. Väiksemate kändude juurimisel tõsteti känd üles, raputati ja purustati. Suuremate kändude puhul esmalt tükeldati känd maa sees ja seejärel tõmmati osade kaupa maast välja. Liigsest pinnasest vabanemiseks kände raputati ja lasti kõrgelt hunnikusse kukkuda. Sageli toimus ühel ajal mitu etappi (näiteks täiendav purustamine õhus ja hunnikusse asetamine).

Andmeanalüüs

Kõikide kändude kohta saadi teada kändu diameeter ja juurimiseks kulunud aeg töötappide kaupa. Andmetesse lisati veel kändu mass ja maht. Massi arvutamiseks kasutati samadelt proovitükkidelt koostatud kändu kuivmassi mudeleid (Uri *et al.*, 2015):

$$m = a \cdot D^b, \quad (1)$$

kus m – kändu kuivmass, kg; D – kändu diameeter, cm; a ja b – proovialast sõltuvad konstandid (Uri *et al.*, 2015).

Kuivmassist mahu arvutamiseks kasutati Soomes leitud kuuse kändude-juurte keskmist tihedust, milleks oli 432 kg/m³ (Hakkila, 1975).

Kändu diameetri ja juurimiseks kulunud aja vahelise seose kirjeldamiseks kasutati regressioonianalüüsi, valemikujuks valiti eksponentvalem:

$$Aeg = a_0 \cdot e^{a_1 \cdot D}, \quad (2)$$

mille teisendus lineaarsele kujule on järgmine:

$$\ln(Aeg) = \ln(a_0) + a_1 \cdot D, \quad (3)$$

proovialade erinevuse hindamiseks kasutati dispersioonianalüüsi sama valemikujuks kasutades:

$$\ln(Aeg) = \ln(a_0 + a_2) + a_1 \cdot D, \quad (4)$$

kus Aeg – juurimiseks kulunud aeg, s; D – kändu diameeter; a_0 , a_1 – valemi parameetrid; a_2 – prooviala kirjeldav parameeter.

Analoogselt leiti seos kändu diameetri ja juurimise kiiruse vahel, kus kasutati astmefunktsiooni:

$$\frac{m}{Aeg} = b_0 \cdot D^{b_1}, \quad (5)$$

mis regressioonianalüüsi jaoks teisendati lineaarsele kujule:

$$\ln\left(\frac{m}{Aeg}\right) = \ln(b_0) + b_1 \cdot \ln(D), \quad (6)$$

proovialade erinevuse hindamiseks kasutati dispersioonianalüüsi sama valemikujuks kasutades:

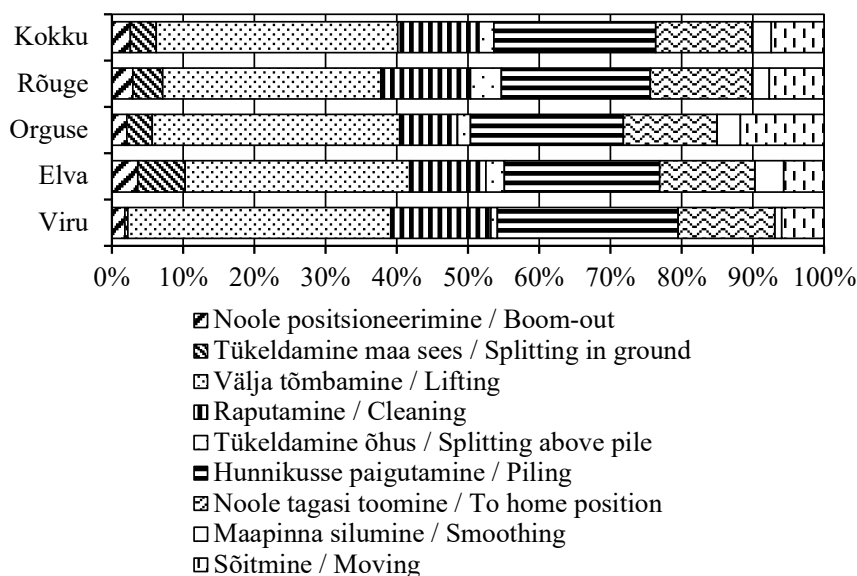
$$\ln\left(\frac{m}{Aeg}\right) = \ln(b_0 + b_2) + b_1 \cdot D, \quad (7)$$

kus m – kändu mass, kg; Aeg – juurimiseks kulunud aeg, s; D – kändu diameeter; a_0 , a_1 – valemi parameetrid; b_1 – prooviala kirjeldav parameeter.

Tulemused ja arutelu

Kokku filmiti neljal katsealal 360 kuusekändu juurimistööd. Juurimiseks kulunud kogu tööaeg jaotus efektiivseks tööajaks (E_h) ja muuks ajaks. Muuks ajaks loeti aega, mis kulus erinevatele seisakutele ja pausidele. Efektiivset tööaega oli kokku 5,62 tundi. Muu aja alla kuuluvat aega oli nelja ala kohta kokku 20 minutit. Tegemist oli kahel juhul juurimispea hüdraulika rikkega, mis kohe likvideeriti. Efektiivseks tööajaks loeti aega, mis kulus kändude juurimisoperatsioonideks koos sõitude aegadega. Efektiivne tööaeg leiti igale katsealale eraldi. Kogu tööajast moodustas juurimisoperatsioonidele kuluv aeg 86%, sõidu aeg 8% ja muu aeg 6%. Muu aja osakaal kogu tööajast oli märgatavalt väike, mis on hea näitaja.

Nende tulemuste põhjal võib tõdeda, et tööaja veelgi efektiivsemaks kasutamiseks ja kogu juurimiseks kuluva aja vähendamiseks peaks tegema muudatusi just kändu juurimisega seotud operatsioonides, sest ligikaudu 94% efektiivsest tööajast moodustasid juurimisoperatsioonid. Samas tuleb tõdeda ka seda, et pinnas, operaatori oskused, masina võimsus, kaal ja



Joonis 2. Kändude juurimisoperatsiooni etappide ajaline jaotus katsealadel.

Figure 2. Temporal distribution of stump lifting operation stages in the experimental areas.

korrasolek mõjutavad töö efektiivsust ja kvaliteeti.

Latila *et al.* (2007) hinnangute järgi on kändude juurimise operatsioonidest kõige ajakulukam kändude purustamine ja raputamine. Meie andmete järgi olid kõige ajakulukamad kändude maa seest välja tõstmine ja hunnikusse paigutamine, samas kändude түкeldamine ja raputamine kokku olid ajakulu järgi kolmandal kohal (joonis 2). Kändude õhus түкeldamine ja kuhjamine hunnikutesse teostati suhteliselt üheaegselt. Aukude silumist teostati väga vähesel määral ja ühe liigutusega. Joonisel 2 on toodud ainult efektiivse tööaja arvutustes kasutatud aega ehk erinevate põhjustega pausid on jäetud arvestusest välja.

Kändude koguse, suuruse, juurimise efektiivse tööaja ja juurimise tootlikkuse koondtulemused proovialade kaupa on esitatud tabelis 2.

Viru prooviaala eristub teistest keskmiselt väiksemate kändudega ruutkeskmise diameetriga 24,2 cm. Sellel alal oli suur osa kändudest nakatunud juurepessuga

ning mädaniku tõttu olid kändud keskmiselt pudedamad kui teistel proovialadel. Samuti lõigati kändud Viru katsealal enamasti kaheks, teistel aladel tänu suurematele kändudele enamasti neljaks. Lisaks asetsesid Viru katsealal kändud tihedamalt ning ühelt positsioonilt juuriti keskmiselt 2,5 kändu (suurus leiti kändude arvu ja sõitmisoperatsioonide jagatisena), mis on teiste aladega võrreldes 1,3 kuni 1,9 korda suurem. Eespool kirjeldatud tegurite tõttu juuriti Viru katsealal tunnis umbes kaks korda rohkem kände kui teistelt proovialadelt. Samas olid sellel tükil kändud keskmiselt kergemad ja väiksema mahuga ning seetõttu juurimise tootlikkus massi või mahu järgi osutus 2,3 kuni 3,5 korda väiksemaks kui teistel proovialadel. Kõige suurema tootlikkusega massi või mahu järgi oli kändude juurimine Rõuge katsealal, kus tunnis juuriti 9,8 t kände kuivmassi järgi. Rõuge alal oli kändude ruutkeskmise diameeter (51,3 cm) suurem kui Elva (48,2 cm) ja Orguse (30,3) proovialal, kuid tunnis juuriti kände rohkem (54 *versus* vastavalt 47 ja 46). Üheks põhjuseks on see,

Tabel 2. Kändude juurimise tootlikkus proovialade kaupa.

Table 2. Stump lifting productivity by sample areas.

Parameeter / Parameter	Viru	Elva	Orguse	Rõuge
Proovitüki suurus / Area of sample plots (ha)	0,20	0,25	0,32	0,12
Efektiivne tööaeg / Effective time (E_h)	1,78	1,82	1,30	0,72
Juuritud kände / Number of lifted stumps	175	86	60	39
Ühelt positsioonilt juuritud kände / Stumps lifted from a single position	2,5	1,9	1,3	1,5
Kände hektaril / Stumps per hectare (ha^{-1})	875	344	188	325
Ruutkeskmine diameeter / Quadratic mean diameter (cm)	24,2	48,2	30,3	51,3
Keskmine juurimisoperatsiooni aeg / Average time for stump lifting (s)	36,6	76,2	78,2	66,8
Tunnitootlikkus / Production per stump (E_h^{-1})	98	47	46	54
Tunnitootlikkus / Production per dry weight (t_{dm}/E_h)	2,8	8,5	6,4	9,8
Tunnitootlikkus / Production per solid m^3 (m^3/E_h)	6,4	19,7	14,8	22,7

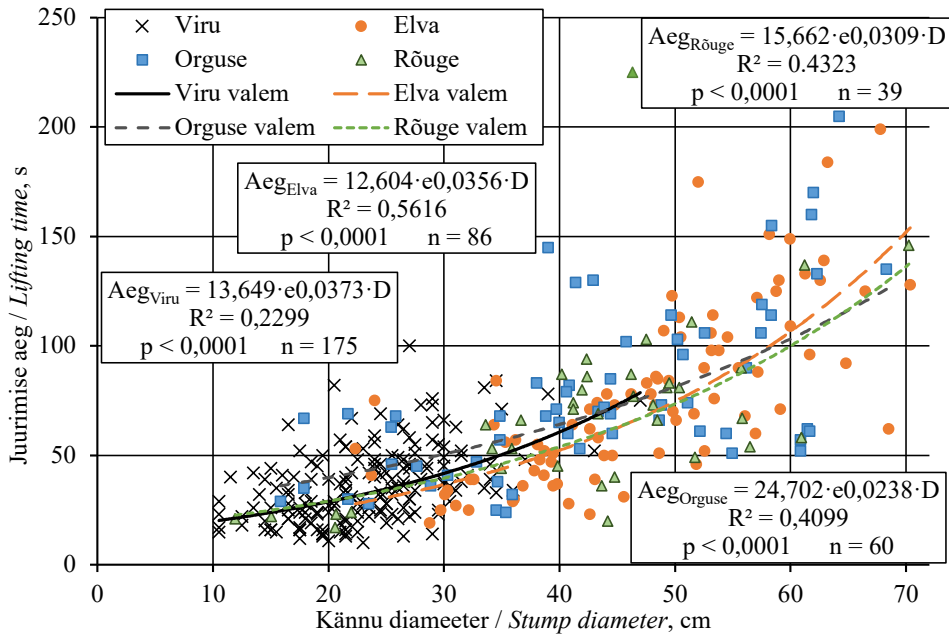
et pinnas eraldus kändude küljest hõlpsa-
mini kui teistel proovialadel. Tabelist 1 on
näha, et Viru ja Orguse katsealad asuvad
sinilille kasvukohatüübis, mis on paekivi-
se aluspõhjaga leetjatel ja leostunud mul-
dadel. Seevastu Elva ja Rõngu katsealad
asuvad vastavalt jänesekapsa ja mustika
kasvukohatüübis, mille mullad on liivasel
aluspõhjal.

Kirjeldamaks kändude juurimiseks ku-
luva aja sõltuvust kännu diameetrist teos-
tati katsealade kaupa regressioonanalüüs,
kasutades valemikuju 2 ja 3. Kõikide proo-
vialade andmed koos regressioonanalüüsi
tulemustega on esitatud joonisel 3. Kõigil
neljal juhul osutus mudel oluliseks ($p < 0,0001$). Lisaks teostati regressioonanalüüs
kõikide alade puudele kokku ehk 360 kändu-
le. Tulemuseks saadi valem ($R^2 = 0,562$
ja $p < 0,0001$):

$$Aeg = 15,598 \cdot e^{0,0319 \cdot D}. \quad (8)$$

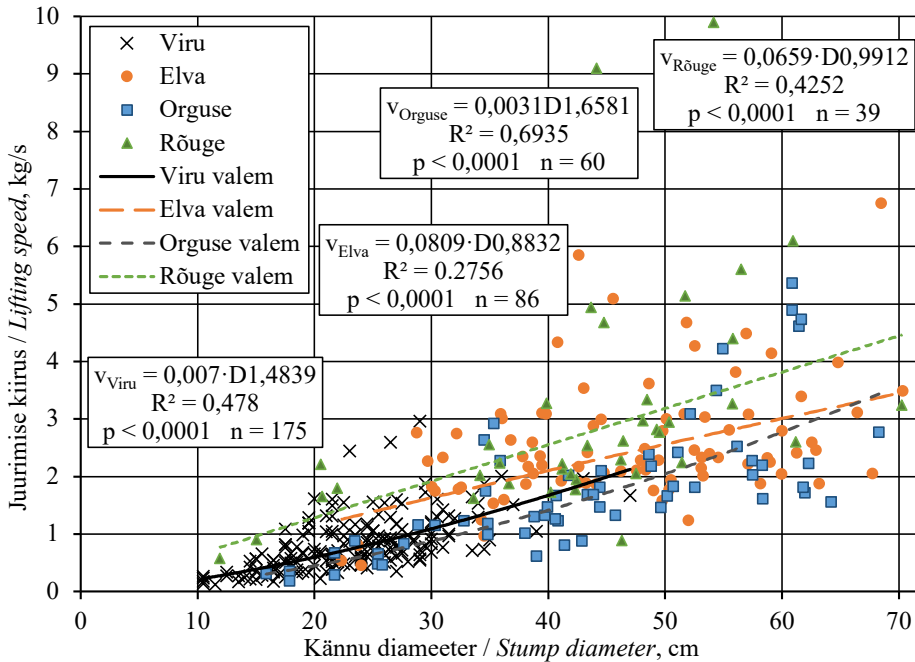
Joonisel 3 on toodud kändude juurimisaja
sõltuvus diameetrist, aga ettevõtjaid huvi-
tab pigem juurimise tootlikkus. Seega ar-
vutati igale kännule ka kännu kuivmassi
ja juurimiseks kulunud aja suhe ehk kändu-
de juurimise kiirus (kg/s), kasutades
selleks regressioonanalüüsi (valemid 5 ja
6). Joonisel 4 on toodud kändude juurim-
ise kiiruse ja diameetri vaheline suhe igale
proovialale eraldi. Kõikide kändude kohta
korraga (360 tk) tehtud regressioonanalüü-
si tulemusel saadi valem ($R^2 = 0,686$ ja $p < 0,0001$):

$$v = 0,00679 \cdot D^{1,50915}. \quad (9)$$



Joonis 3. Kännu juurimise aja sõltuvus kännu diameetrist katsealade kaupa (Aeg – juurimiseks kulunud aeg, s; D – kännu diameeter, cm).

Figure 3. The dependence of stump lifting time and stump diameter by sample areas (Aeg – time spent on lifting, s; D – stump diameter, cm).



Joonis 4. Kännu juurimise kiiruse (kg/s) sõltuvus kännu diameetrist katsealade kaupa.

Figure 4. The dependence of stump lifting speed (kg/s) and stump diameter by sample areas.

Jooniselt 4 on näha, et mida suuremad kändud, seda suurem on tootlikkus. Näiteks 10 cm läbimõõduga kändu keskmine tootlikkus efektiivse aja kohta on 0,22 kg/s ehk 0,79 t/h, 20 cm kändu puhul 0,62 kg/s ehk 2,25 t/h, aga 60 cm kändu puhul 3,28 kg/s ehk 11,79 t/h. Võrdluseks saadi Lätis juurimispeaga CBI keskmiseks tootlikkuseks 5,2 t/h (Lazdinš *et al.*, 2009), mis vastab meie andmetel kändu diameetrile 34,9 cm (joonis 5). Soomes tehtud uurimuses (Palander *et al.*, 2015) võrreldi kolme juurimispead, millest juurimispea Terosa andis suurema tootlikkuse ning juurimispead Väkevä ja Xteho andsid väiksema tootlikkuse sinise uuringu tulemustega võrreldes (joonis 5).

Uurimustöö kirjeldab ja analüüsib ainult ühe juurimismasina tunnitootlikkust, tööaegade jaotumist, ning kändu juurimise aja sõltuvust kändu diameetrist neljal erineval proovialal. Uurimuse käigus ei selgunud, kas mädade kändude juurimine on efektiivsem kui tervete kändude juurimine. Samas uuriti dispersioonanalüüsiga alade statistilist erinevust valemiga 4, kust selgus, et usaldusväärne erinevus juurimiseks kulunud aja ja kändu diameetri vahel on vaid Elva (jänesekapsa kasvukohatüüp) ja Orguse (sinilille kasvukohatüüp)

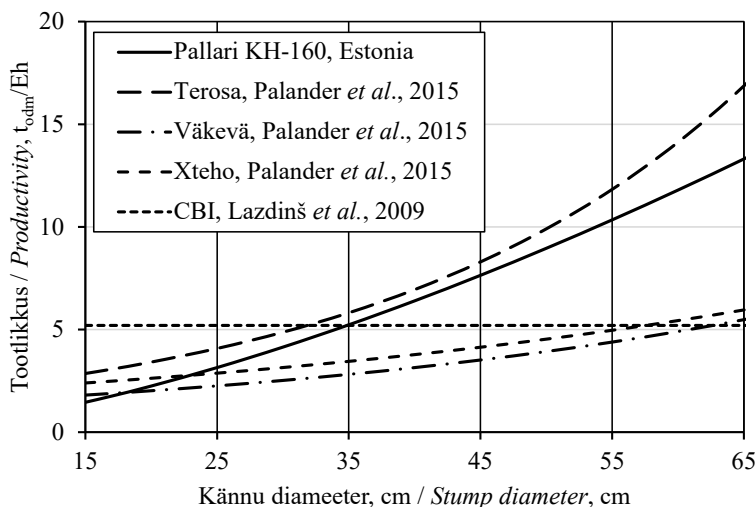
proovia vahel (tabel 3).

Tabel 3. Valem 4 parameetrid kändude juurimise aja ja proovia sõltuvuse hindamiseks kändu diameetrist.

Table 3. ANCOVA parameters for the dependence of stump lifting time and stump diameter by sample areas (Equation 4).

Parameeter / Parameter	Prooviala / Sample area	Hinnang / Estimate	p / p-value
a_0		2,728	<0,0001
a_1		0,03143	<0,0001
	Elva	0	-
a_2	Orguse	0,1497	0,0322
	Rõuge	0,0004	0,9965
	Viru	0,0221	0,7688
R^2		0,5683	
P		<0,0001	

Sarnaselt uuriti dispersioonanalüüsiga alade statistilist erinevust kändude juurimise kiiruse ja diameetri vahel valemiga 7, kust selgus, et usaldusväärne erinevus juurimise kiiruse ja kändu diameetri vahel ei ole vaid Orguse ja Viru katseala vahel (mõlemad sinilille kasvukohatüübiga) (tabel 4).



Joonis 5. Käesoleva uuringu tulemuse (Pallari KH-160, Estonia) võrdlus teiste uurimustulemustega.

Figure 5. Comparison of the results of this study (Pallari KH-160, Estonia) with other research findings.

Tabel 4. Valemi 7 parameetrid kändude juurimise kiiruse ja prooviala sõltuvuse hindamiseks kännu diameetrist.

Table 4. ANCOVA parameters for the dependence of stump lifting speed and stump diameter by sample areas (Equation 7).

Parameeter / Parameter	Prooviala / Sample area	Hinnang / Estimate	p / p-value
b_0		-4,582	<0,0001
b_1		1,338	<0,0001
	Orguse	0	-
	Elva	0,3307	<0,0001
b_2	Rõuge	0,5768	<0,0001
	Viru	0,0765	0,324
R^2		0,7283	
P		<0,0001	

Lisaks kändude mõõtudele sõltub juurimisoperatsioonide kestus väga paljudest teistest faktoritest: masina võimekusest, korrasolekust ja tehnilistest näitajatest, raiesmiku pinnase omadustest, tööoperatsioonidest, operaatori töökogemusest jms. Purustamine ja raputamine on vägagi oluline kändude juurimisel ja mitte ainult sellepärast, et on kõige ajakulukam, vaid seepärast, et purustatud ja puhtamad kännud on väiksema mahuga, mis omakorda mõjutab kändude transpordi ja peenestamise tootlikkust (Athanassiadis et al., 2011). Seega, kui vähendada ajakulu purustamisele ja raputamisele, väheneks juurimisoperatsioonideks kuluv aeg ja suureneks efektiivses töötunnis juuritud kändude arv, kuid väheneks ladustatavate kändude kvaliteet.

Kokkuvõte

Töö eesmärk oli anda ülevaade juurimisagregaadi Pallari KH-160 tootlikkusest, tööaja jagunemisest ning hinnata juurimisoperatsioonidele kuluva aja ja tootlikkuse sõltuvust kännu diameetrist neljal erineval katsealal. Katsealade kändude ning

juurimisaja analüüsi koondtulemused on esitatud tabelis 2.

Viru ja Orguse katsealad asusid sinilille, Elva katseala jänesekapsa ning Rõuge katseala mustika kasvukohatüübis. Viru katseala oli teistega võrreldes väiksemate kändudega ja enam esines mädanikuga kände ning kändude juurimine oli seetõttu ka kiirem. Samas tootlikkus kuivmassi või mahu järgi oli väiksem kui teistel katsealadel. Viru katsealal juuriti tunnis umbes kaks korda rohkem kände kui teistelt proovialadelt, samas oli sellel proovialal kändude juurimise tootlikkus massi või mahu järgi 2,3 kuni 3,5 korda väiksem kui teistel proovialadel. Kõige suurema tootlikkusega massi või mahu järgi oli kändude juurimine Rõuge katsealal, kus tunnis juuriti 9,8 t kände kuivmassi järgi.

Kõige ajakulukamad juurimisoperatsiooni etapid olid kändude maa seest välja tõstmine ja hunnikusse paigutamine, kändude tükeldamine ja raputamine kokku olid ajakulu järgi kolmandal kohal (joonis 2). Aukude silumist teostati väga vähesel määral ja ühe liigutusega.

Lisaks teostati regressioonanalüüs kõikide alade puudele kokku ehk 360 kännule (valem 8). Praktikuid huvitab juurimise tootlikkus ja seega leiti kändude juurimise kiiruse (kg/s) sõltuvus kännu diameetrist (joonis 4). Kõikide kändude kohta korraga tehtud regressioonanalüüsi tulemusel saadi valem 9.

Rõuge alal oli kändude ruutkeskmise diameeter (51,3 cm) suurem kui Elva (48,2 cm) ja Orguse (30,3 cm) proovialal, kuid tunnis juuriti kände rohkem (54 versus vastavalt 47 ja 46). Üheks põhjuseks on see, et pinnas eraldus kändude küljest hõlpsamini kui teistel proovialadel. Tabelist 1 on näha, et Viru ja Orguse katsealad asuvad sinilille kasvukohatüübis, mis on paekivi aluspõhjaga leetjatel ja leostunud muldadel. Seevastu Elva ja Rõngu katsealad asuvad vastavalt jänesekapsa ja mustika kasvukohatüübis, mille mullad ei ole nii kivised.

Proovitükkide kaupa loodud mudelite erinevuse hindamiseks kasutati disper-

sioonianalüüsi, kusjuures juurimisaja ja kännu diameetri vahelist seost kirjeldati valemiga 4, mille tulemused on tabelis 3. Selgus, et teistest erineva tulemuse annavad Elva ala kändude juurimise tulemused. Analoogselt teostati dispersioonianalüüs ka kändude juurimise kiiruse (kg/s) ja kännu diameetri vahel valemiga 7, mille parameetrid on esitatud tabelis 4. Selgus, et ainult Viru ja Orguse prooviala vahel puudus usaldusväärne erinevus. Mõlemad alad asusid teistest erinevalt sinilille kasvukohatüübis.

Mida suurema diameetriga oli känd, seda rohkem aega kulus ühe kännu kohta, samas kasvas kändude juurimise kiirus massiühiku kohta. Seega on suuremate kändudega puistus juurimise tootlikkus kõrgem kui väiksemate kändudega puistus.

Tänuavaldus. Uuringu läbiviimist toetasid Eesti Riigimetsa Majandamise Keskuse projekt nr 1-18/212 (T11082MIMK) ning Haridus- ja Teadusministeeriumi institutsionaalne teadusrahastus IUT21-04.

Kasutatud kirjandus

- Athanassiadis, D., Lindroos, O., Nordfjell, T. 2011. Pine and spruce stump harvesting productivity and costs using a Pallari KH 160 stump-lifting tool. – *Scandinavian Journal of Forest Research*, 26, 437–445. <https://doi.org/10.1080/02827581.2011.573502>.
- Eriksson, L. N., Gustavsson, L. 2008. Biofuels from stumps and small roundwood - Costs and CO₂ benefits. – *Biomass and Bioenergy*, 32 (10), 897–902.
- Finnish Forestry Yearbook. 2023. Finnish Statistical Yearbook of Forestry 2022. Helsinki, Luonnonvarakeskus (Luke). 198 pp.
- Flynn, P.C., Kumar, A. 2005. – Trip Report: Site Visit to Alholmens 240 MW Power Plant, Pietarsaari, Finland, August 29 to September 2. Ministry of Forests and Range. 13 pp.
- Forest Energy Atlas. 2023. Forest Energy Atlas. [WWW document]. – URL <https://forest-energy-atlas.luke.fi/>. [Accessed 1 December 2023].
- Hakkila, P. 1975. Bark percentage, basic density, and amount of acetone extractives in stump and root wood. (Kanto- ja juuripuun kuoriprosentti, puuaineen tiheys ja asetoniuutteitten määrä). – *Folia Forestalia*, 224. (In Finnish).
- Hakkila, P. 2003a. Developing technology for large-scale production of forest chips Wood Energy Technology Programme 1999-2003. – Interim Report (No. 952-457-101-3). Helsinki, National Technology Agency. 58 pp.
- Hakkila, P. 2003b. Stumps as a source of fuel wood. (Juurakot polttoainelähteenä). – *BioEnergiä*, 4, 32–35. (In Finnish).
- Hope, G.D. 2007. Changes in soil properties, tree growth, and nutrition over a period of 10 years after stump removal and scarification on moderately coarse soils in interior British Columbia. – *Forest Ecology and Management*, 242, 625–635. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.01.072>.
- Juntunen, M.L. 2011. Stump harvesting area is almost 20 000 hectares per year. (Kannonnostola lähestyy 20 000 hehtaaria vuodessa). – Ylitalo, E. (ed.). Finnish Statistical Yearbook of Forestry. Sastamala, Vammalan Kirjapaino, 118–119. (In Finnish).
- Laitila, J. 2006. Current use of bioenergy from forests in Finland and future prospects. – Presented at the NFSP seminar: Forest Regeneration and Bioenergy, Finland, Vaanta. 13 pp.
- Laitila, J., Ranta, T., Antti, A. 2007. Productivity of stump harvesting for fuel. – *International Journal of Forest Engineering*, 37–47. <https://doi.org/10.1080/14942119.2008.10702566>.
- Lazdinš, A., von Hofsten, H., Lazdina, D., Valentins, L. 2009. Productivity and cost of stump harvesting for bioenergy production in Latvian conditions. – *Engineering for Rural Development*, 194–201.
- Metsa majandamise eeskiri. 2007. Forest management regulation. – RT I, 13.07.2023, 34. (In Estonian).
- New Holland. 2012. Products, Crawler excavators E235B SR. [WWW document]. – URL <http://europe.construction.newholland.com/product.php?productId=169>. [Accessed 30 November 2023].
- Padari, A., Muiste, P., Mitt, R., Pärn, L. 2009. Estimation of Estonian wood fuel resources. – *Baltic Forestry*, 15, 77–85.
- Palander, T., Smolander, J., Kärhä, K. 2015. Work system study of three stump-lifting devices in Finland. – *Scandinavian Journal of Forest Research*, 30, 558–567. <https://doi.org/10.1080/02827581.2015.1027731>.
- Spinelli, R., Nati, C., Magagnotti, N. 2005. Harvesting and transport of root biomass from fast-growing poplar plantations. – *Silva Fennica*, 39, 539–548. <https://doi.org/10.14214/sf.365>.

- Statistikaamet. 2023. KE062: Kütuse tarbimine | Aasta, Tegevusala ning Kütuse liik. [WWW document]. – URL https://andmed.stat.ee/et/stat/majandus__energeetika__energia-tarbimine-ja-tootmine__aastastatistika/KE062. [Accessed 1 December 2023]. (In Estonian).
- Tervolan Konepaja. 2010. Products, Stump-harvester Pallari KH-160. [WWW document]. – URL <https://www.tervolankonepaja.fi/en/products?id=1&catid=1>. [Accessed 30 November 2023].
- Thies, W.G., Nelson, E.E. 1988. Bulldozing stumps and nitrogen-fertilization affect growth of douglas-fir seedlings. – Canadian Journal of Forest Research, 18, 801–804.
- Thies, W.G., Westlind, D.J. 2005. Stump removal and fertilization of five *Phellinus weirii*-infested stands in Washington and Oregon affect mortality and growth of planted Douglas-fir 25 years after treatment. – Forest Ecology and Management, 219, 242–258. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.050>.
- Uri, V., Aosaar, J., Varik, M., Becker, H., Kukumägi, M., Ligi, K., Pärn, L., Kanal, A. 2015. Biomass resource and environmental effects of Norway spruce (*Picea abies*) stump harvesting: An Estonian case study. – Forest Ecology and Management, 335, 207–215. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.10.003>.
- Vares, V., Kask, Ü., Muiste, P., Pihu, T., Soosaar, S. 2005. Biofuel User's Manual. (Biokütuse kasutaja käsiraamat). Tallinn, TTÜ kirjastus. 172 pp.
- Walmsley, J.D., Godbold, D.L. 2010. Stump harvesting for bioenergy – A review of the environmental impacts. – Forestry: An International Journal of Forest Research, 83, 17–38. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpp028>.

Productivity of stump lifting of Norway spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.) stumps with the Pallari KH-160 stump-lifting device in four sample areas in Estonia

Vahur Kurvits, Peeter Muiste, Allar Padari and Veiko Uri

Summary

The objective of this study was to present a comprehensive analysis of the productivity of the Pallar KH-160 stump lifting device, delineate the distribution of working time, and assess the correlation between the time required for stump lifting operations and the stump diameter across four distinct experimental areas. The findings from the stump lifting analysis are summarized in Table 2.

Viru and Orguse experimental areas were situated in the *Hepatica* site type, while Elva experimental area was in the *Oxalis* site type, and Rõuge experimental area was in the *Myrtillus* site type. Compared to other areas, Viru sample area featured smaller stumps with a higher prevalence of rot, resulting in a faster stump lifting process. However, the productivity in terms of dry weight or volume was comparatively lower than in other experimental areas. Viru sample area exhibited roughly twice the hourly stump lifting rate as other trial areas, yet the productivity in this sample area was 2.3 to 3.5 times lower by weight than in other trial areas. The highest productivity in terms of mass was observed in Rõuge sample area, where 9.8 tons of stumps were harvested per hour by dry weight.

The most time-consuming stages of the lifting operation were identified as extracting and stacking the stumps, with the subsequent steps of chopping and shaking the stumps together being the third most time-consuming (Figure 2). The smoothing of the holes was minimally conducted and completed in a single motion.

Figure 3 illustrates the dependence of

the time required for stump lifting on the diameter of the stump across the sample areas. Additionally, regression analysis was performed for trees in all areas, encompassing a total of 360 stumps (Equation 8). The dependence of stump lifting speed (kg/s) on stump diameter was derived to address practitioners' interest in lifting productivity (Figure 4). The regression analysis for all stumps collectively resulted in Equation 9.

The square mean diameter of stumps in Rõuge sample area (51.3 cm) surpassed that of Elva (48.2 cm) and Orguse (30.3 cm) sample areas, yet more stumps were lifted per hour (54 versus 47 and 46, respectively). This can be attributed to the soil detaching more easily from the stumps in Rõuge area compared to the other test areas. Table 1 outlines that Viru and Orguse experimental areas are situated in the *Hepatica* site type, characterized by limestone bedrock and leached soils. Conversely, Elva and Rõuge experimental areas are located in the *Oxalis* and *Myrtillus* site types, respectively, with non-stony soils.

ANCOVA was employed to assess differences between the models created by sample areas, while the relationship between the time of stump lifting and stump diameter was characterized by Equation 4, the results of which are detailed in Table 3. Significant differences in the time required for stump lifting and stump diameter were identified only between Elva (*Oxalis* site type) and Orguse (*Hepatica* site type) sample areas (Table 3). Similarly, a variance analysis was conducted between the speed of stump lifting (kg/s) and the diameter

of the stump using Equation 7, the parameters of which are presented in Table 4. There was no significant difference between Viru and Orguse sample areas only. Both sample areas were distinct from the others in the *Hepatica* site type.

As the diameter of the stumps in-

creased, the time required for stump lifting also increased; however, the speed of lifting stumps per unit mass demonstrated an increase. In other words, in a stand with larger stumps, the productivity of stump lifting is higher than in a stand with smaller stumps.