

This is an electronic reprint of the original article.

This reprint *may differ* from the original in pagination and typographic detail.

Author(s): Lindblad, Jari

Title: CLT-levyjen käyttö ja kustannukset kantavuuden parantamisessa puunkorjuussa

Year: 2024

Version: Published version

Copyright: The Author(s) 2024

Rights: CC BY-SA 4.0

Rights url: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Please cite the original version:

Lindblad J. (2024). CLT-levyjen käyttö ja kustannukset kantavuuden parantamisessa puunkorjuussa. Metsätieteen aikakauskirja vuosikerta 2024 artikkeli 23012. <https://doi.org/10.14214/ma.23012> .

All material supplied via *Jukuri* is protected by copyright and other intellectual property rights. Duplication or sale, in electronic or print form, of any part of the repository collections is prohibited. Making electronic or print copies of the material is permitted only for your own personal use or for educational purposes. For other purposes, this article may be used in accordance with the publisher's terms. There may be differences between this version and the publisher's version. You are advised to cite the publisher's version.



Jari Lindblad

CLT-levyjen käyttö ja kustannukset kantavuuden parantamisessa puunkorjuussa

Lindblad J. (2024). CLT-levyjen käyttö ja kustannukset kantavuuden parantamisessa puunkorjuussa. Metsätieteen aikakauskirja 2024-23012. Tutkimusartikkeli. 20 s. <https://doi.org/10.14214/ma.23012>

Tiivistelmä

Kuormatraktoreiden käytön aiheuttamat juuristovauriot ja urapainumat ovat todennäköinen riski suometsien puunkorjuussa. Suometsien puunkorjuussa oleellista on soveltuvan korjuukaluston valinta. Työtapaan kuuluu yleensä havituksen käyttö ajourien vahvistamisessa. Erilliset maaperän vahvistamiskäytännöt, kuten erityyppiset ajosillat ja kumimatot, ovat jääneet lähinnä kokeiluasteelle. Projektissa kehitettiin puutavara-autolla ja kuormatraktorilla käsiteltävät ja siirrettävät CLT-levyt (cross laminated timber). CLT-levyjä käytettäisiin kuormatraktorin kokoojaurien ja varastopaikkojen vahvistamiseen heikosti kantavilla turvemaidilla. CLT-levyjen rakenneratkaisuiden lisäksi tutkittiin puutavara-auton ja kuormatraktorin soveltuvuutta, ajanmenekkiä ja kustannuksia CLT-levyjen käsittelyssä ja siirroissa. Logistiikkakustannusten määrittäminen perustui levyjen käsittelyn työaikatutkimuksella määritettyyn ajanmenekkiin sekä kuljetuskapasiteetin osalta levyjen laskennalliseen mitoittamiseen. Kokonaispainoltaan 76 000 kg:n puutavara-auton laskennallinen kuljetuskapasiteetti oli 54 CLT-levyä, joista pystyttäisiin rakentamaan nimellispuutavara-alueeltaan 108 metrin pituinen ajoura. Kuorma täyttäisi puutavara-auton tilavuuskapasiteetin, mutta kantavuudesta jäisi käyttämättä noin 16 000 kg. Kenttäkokeiden kokemusten ja aikatutkimuksen tulosten perusteella levyjen kuormaus (kuormaus sykli noin 40 s/levy) ja kuorman purkaminen (kuormaus sykli noin 35 s/levy) puutavara-autolla ja kuormatraktorilla oli kohtalaisen sujuvaa ja ajanmenekkien hajonta pientä. Sen sijaan varsinkin levyjen asennus ajouralle oli aikaa vievää (kuormaus sykli noin 100 s/levy). Työn sujuvuuteen vaikuttivat merkittävästi muun muassa kuormatraktorin tyyppi, näkyvyys ja levyjen tartuntaratkaisut. Kun levyjen kaukokuljetusmatka korjuukohteelle oli noin 50 kilometriä, oli levyjen edestakaisen autokuljetuksen kokonaiskustannus vetoauton kuormalla (18 levyä) yli 500 euroa ja täysperävaunu kuormalla (54 levyä) alle 800 euroa. Kuljetuskustannus kasvoi jyrkästi kuljetusmatkan suhteen, ja toisaalta muiden kuljetusten ketjuttaminen ja tyhjänä ajon korvaaminen muilla kuljetuksilla vaikuttivat oleellisesti kustannusten tasoon. Levyjen metsäkuljetuksen ja asennuksen yksikkökustannukset olivat pienimmillään 8–9 €/levy ja kasvoivat noin 1 €/levy kun metsäkuljetusmatka kasvoi sadalla metrillä. Levyjen määrän vaikutus yksikkökustannukseen oli vähäinen. Levyjen käytöllä voitaisiin saavuttaa puunkorjuussa suoria kustannussäästöjä tilanteissa, joissa puutavaran metsäkuljetusmatkaa voitaisiin lyhentää merkittävästi ja kuljetettava puutavaramäärä olisi suurehko, vähintään 500–1000 kuutiometriä. Tilanteissa, joissa korjuulohkon sijainti on heikosti kantavan maapohjan takana, voitaisiin levyjen käytöllä mahdollistaa korjuun ajoittaminen sulan maan ajalle.

Avainsanat monikerroslevy; puunkorjuu; kustannuslaskenta; kaukokuljetus; metsäkuljetus; kulkukelpoisuus; kantavuus

Yhteystiedot Luonnonvarakeskus (Luke), Tuotantojärjestelmät, Joensuu

Sähköposti jari.lindblad@luke.fi

Hyväksytty 3.10.2024

1 Johdanto

Suomen metsätalousmaasta runsas kolmannes, ja puuntuotannon metsämaasta noin neljännes, on soita (Luonnonvarakeskus 2023b). Kaikkiaan ojitettujen suometsien määrä on yli viisi miljoonaa hehtaaria, mikä on noin puolet turvemaiden kokonaispinta-alasta (Luonnonvarakeskus 2023c). Suomen metsien puuston kokonaistilavuudesta ja kasvusta suometsissä on noin neljännes (Luonnonvarakeskus 2024).

Ojitettujen suometsien määrässä ja merkityksessä puuntuotannolle on suuria alueellisia eroja. Ojitettujen suometsien osuus puuntuotannon metsämaasta on osassa Pohjanmaata, Meri-Lappia, Kainuuta ja Pohjois-Karjalaa jopa 40–50 prosenttia (Luonnonvarakeskus 2024). Soiden osuus metsätalousmaasta, johon luetaan puuntuotannon metsämaan lisäksi kitu- ja joutomaat, on Etelä-Suomessa 28 prosenttia ja Pohjois-Suomessa 41 prosenttia. Soiden osuus metsätalousmaasta on Keski- ja Pohjois-Pohjanmaalla selvästi yli 50 prosenttia ja Etelä-Pohjanmaalla ja Kainuussa noin 45 prosenttia. Soiden osuus – kymmenen prosentin molemmin puolin – on pienin Uusimaalla, Päijät-Hämeessä ja Ahvenanmaalla (Luonnonvarakeskus 2023b). Puuston tilavuudesta soilla on Etelä-Suomessa noin 23 prosenttia ja Pohjois-Suomessa 30 prosenttia. Pohjois-Pohjanmaalla noin 44 prosenttia puuston tilavuudesta on soilla (Luonnonvarakeskus 2023d).

Metsäteollisuudessa on tehty runsaasti investointeja viime vuosina. Vaikka investointien määrä on kiivaan vaiheen jälkeen taittumassa, on investointien arvo edelleen korkealla tasolla (Elinkeinoelämän keskusliitto 2023). Investointien seurauksena tuotantokapasiteetti on kasvamassa. Samanaikaisesti puuntuotannon selvä vähentyminen, ja Venäjän osalta päättyminen, luo painetta kotimaisen puun kysynnälle (Luonnonvarakeskus 2023a; Viitanen ym. 2023) ja samalla puunhankinnan ja -korjuun lisäämiselle myös suometsissä.

Maa-ilmastonmuutoksella on vaikutuksensa Suomen ilmastoon, ja pidemmällä ajalla myös puunkorjuuolosuhteisiin. Suomessa keskilämpötila on noussut noin kaksi astetta 1880-luvun jälkeen. Kesällä lämpötila on noussut noin yhden asteen, mutta talvella lämpeneminen on ollut voimakkainta, 2–3 astetta (Mikkonen ym. 2015). Vaikka lämpötilan muutos on voimakkainta pohjoisessa, tulee talven pituus lyhentymään erityisen nopeasti Etelä-Suomessa. On arvioitu, että 2020-luvun aikana terminen talvi lyhentyy Pohjois-Suomessa 4–5 päivää ja Etelä-Suomen rannikkoalueilla jopa yhdeksän päivää (Ruosteenoja ym. 2020). Leudommat ja lyhentyvät talvet ja pidentyvät kelirikkoajat huonontavat edellytyksiä pehmeiden maiden puunkorjuussa. Maan roudaton ajanjakso tulee pidentymään (Jylhä ym. 2012) ja siten suometsien puunkorjuuseen luontaisesti sopivin aika lyhentyy.

Ojitettu suometsä on vesitaloudeltaan labiili ekosysteemi, johon vaikuttaa muun muassa ojaverkoston kunto, ojien syvyys ja sarkaleveys (Päivänen 2007). Toisaalta suometsän puuston tilavuus vaikuttaa veden latvuspäntään ja haihduntaan; mitä suurempi on puuston tilavuus, sitä syvemmälle vedenpinnan taso asettuu. Tätä kautta metsänkäsitely ja hakkuut sinänsä vaikuttavat suometsien vesitalouteen (Sarkkola ym. 2013; Leppä ym. 2020). Ojitetulla suolla pohjaveden pinta suon pinnasta on suuruusluokkaa 30–60 senttimetrin syvyydellä. Ojittamattomalla suolla veden pinta on tavallisesti lähellä suon pintaa (Päivänen 2007).

Kuormatraktoreiden käytön aiheuttamat juuristovauriot ja urapainumat ovat olennainen riski lähtökohtaisesti ympärivuoden märkien suometsien puunkorjuussa (Metsänhoidon suositukset 2020). Suomen metsäkeskuksen ohjeessa ajourapainumaksi lasketaan yli kymmenen senttimetrin syvyinen ja vähintään yli 1 metrin pituinen painuma (Tarkastusohje 2023).

Eeronheimo (1991) esitti käytännön havaintoihin perustuvana arviona, että talvikaudella noin 20 senttimetrin routakerros tai 40 senttimetrin lumikerros ovat edellytyksenä kuormatraktoreilla tehtävälle puutavaran metsäkuljetukselle. Vähäsateisina vuosina kesäajan korjuuolosuhteet voivat kuitenkin olla jopa paremmat kuin leutona talvena. Heikko kantavuus on otettava huomi-

oon puunkorjuun ja erityisesti metsäkuljetuksen suunnittelussa. Osa suunnittelua on sulan maan puunkorjuuseen soveltuvien korjuukohteiden valinta, missä voidaan käyttää apuna turvemaiden kantavuusluokitusta, Suomen metsäkeskuksen korjuukelpoisuusluokitusta ja -karttoja ja muita kantavuutta ilmentäviä tekijöitä (Metsänhoidon suositukset 2020; Suomen metsäkeskus 2021). Oleellinen suometsien kantavuuteen vaikuttava tekijä on puuston juuristo. Suometsien puiden juuret ovat lähellä maanpintaa ja suurin osa juurista on ojitetuissakin suometsissä alle 30 senttimetrin syvyydellä (Laiho ja Finér 1996).

Suometsien puunkorjuussa on keskeistä soveltuvan korjuukaluston valinta ja käyttö. Pehmeiden maiden puunkorjuuseen on olemassa erikoiskalustoa, kuten jäykällä ja kiinteällä telaratkaisulla varustettuja kuormatraktoreita ja kaivinkonepohjaisia metsäkoneita (Metsänhoidon suositukset 2020). Toisaalta myös niin sanottuja yleiskoneita voidaan varustaa soveltuvuutta parantavilla erikoisvarusteilla. Koneiden maastoliikkuvuutta on parannettu leveämmillä renkailla, pidemmällä teleillä ja lisäakseleilla ja varustamalla koneita kantavilla teloilla, joilla maanpintaan kohdistuvaa pintapainetta on pystytty alentamaan merkittävästi. Telojen käytön haittapuolena on niiden taipumus leikata maan pintakerrosta (Ala-Ilomäki ym. 2011).

Suometsissä puunkorjuun työtapaan kuuluu havituksen ja latvusten sekä tarvittaessa puutavaran käyttö lisäämässä ajourien ja heikosti kantavien maastonkohtien kantavuutta (Metsänhoidon suositukset 2020). Sen sijaan muut vahvistamisratkaisut ajourilla tai varastopaikoilla ovat jääneet pitkälti kokeiluasteelle ja myös tutkimus on ollut kohtalaisen vähäistä. Kontinen (2014) tutki ajosiltojen, kumimattojen ja niin sanottujen pitkospuumattojen käyttöä ojien ylittämässä ja ajourien vahvistamisessa. Blinnin ym. julkaisussa (1998) on kartoitettu joukko kantavuuden vahvistamisratkaisuja silloisten parhaiden käytäntöjen löytämiseksi ja tutkimus- ja kehittämistarpeiden tunnistamiseksi.

CLT (cross laminated timber) on monikerroslevy, joka koostuu ristiinliimatuista lautakerroksista. Tavallisesti kerroksia on kolme, viisi tai seitsemän, mutta käyttötarkoituksen vaatimusten mukaisesti niitä voi olla enemmänkin. Tuotteena CLT on 1990-luvulta asti kehitetty niin sanottu insinööripuutuote, jonka tavallisimpia käyttökohteita ovat kantavat seinä- ja lattiarakenteet. CLT on ominaisuuksiltaan luja ja jäykkä, muotopysyvyydeltään hyvä, ja ominaisuuksiinsa nähden verraten kevyt tuote. CLT:een liittyvä tutkimus- ja kehitystyö, tuotanto ja käyttö ovat nykyisin maailmanlaajuisia. (Brandner ym. 2016; Puuinfo 2024)

CLT Acces Matting -projektissa tutkittiin CLT-levyjen käyttöä heikosti kantavien maiden, esimerkiksi turvemaiden ja soiden, kantavuuden parantamisessa puunkorjuussa. Käyttökohteet olisivat lähinnä kokoojaurien ja varastopaikkojen heikosti kantavissa kohdissa. CLT-levyjen kuljettamisessa ja asentamisessa käytettäisiin tavallista puutavaran kuljettamiseen ja käsittelyyn käytettävää kalustoa. Projektissa suunniteltiin puunkorjuussa käytettävien CLT-levyjen rakenneratkaisut, valmistettiin levyjen testisarja ja toteutettiin kenttäkokeet, joissa tutkittiin puutavara-auton ja kuormatraktorin soveltuvuutta CLT-levyjen käsittelyssä ja siirroissa.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli määrittää logistiikkakustannukset CLT-levyjen käytölle maaperän kantavuuden parantamisessa osana puunkorjuuta. Yksityiskohtaiset tavoitteet olivat:

1. Määrittää puutavara-auton ja kuormatraktorin ajanmenekit CLT-levyjen käsittelyssä, mukaan lukien kuormaus ja kuorman purkaminen, levyjen asentaminen ajouralle ja levyjen poistaminen ajuralta.
2. Määrittää CLT-levyjen puutavara-autolla tehtävän kaukokuljetuksen kustannukset korjuukohteelle
3. Määrittää CLT-levyistä kuormatraktorilla tehtävän ajouran asennus- ja purkukustannukset.

2 Aineistot ja menetelmät

2.1 Kenttäkokeet

Projektissa suunniteltiin ja valmistettiin kenttäkokeita varten mitoitukseltaan erilaisia CLT-levyjä. Levykoot olivat 1600 × 4000 mm, 2500 × 4000 mm tai 1600 × 5000 mm, joista jälkimmäiset suunniteltiin pienten ojien ylitykseen. Lisäksi levyt erosivat toisistaan kerrosten määrien (4–7 kerrosta) ja paksuuksien ja siten levyn paksuuksien (150–210 mm) suhteen. Kaikkiaan levyjä valmistettiin 35 kappaletta. Kuvassa 1 CLT-levyt ovat asetettu ajouralle.

Projektissa toteutettiin erikseen järjestettyjä kenttäkokeita vuosien 2021–2022 aikana. Kenttäkokeiden toteutuspaikoiksi valittiin kohteita, joissa oletettu korjuulohko sijaitisi lyhyehkön suovyöhykkeen tai turvemaan takana, ja CLT-levyjä käytettäisiin puunkorjuun kokoojauran kantavuuden parantamiseen sen heikosti kantavissa kohdissa.

Vuonna 2022 kenttäkokeet toteutettiin Rovaniemen Hirvaan kylän Lentokonejängällä. Kokonaisuutena kenttäkokeisiin sisältyivät:

- CLT-levyjen kuljetus korjuukohteille puutavara-autolla,
- levytettävän ajouran merkintä ja mittaukset,
- CLT-levyjen asennus ajouralle kuormatraktorilla,
- ajotestit, joissa ajouraa ylitettiin kuormatulla kuormatraktorilla,
- CLT-levytyksen purku kuormatraktorilla.

CLT-levyt kuljettiin 2.8.2022 puutavara-autolla Hirvaalta Lentokonejängälle (kuva 2), jossa toteutettiin kaksi kenttäkoetta tekemällä CLT-levyillä vahvistetut ajourat noin 200 metrin etäisyydellä toisistaan (jatkossa Lentokonejäntä 1 ja Lentokonejäntä 2). Molemmat ajourat olivat noin 70 metriä pitkiä. Kenttäkokeet ja niiden toimenpiteet ajoittuivat seuraavasti:



Kuva 1. Kantavuuden parantamiseen suunnitellut ja valmistetut CLT-levyt asennettuna ajouralle. Kerrosten määrä CLT-levyissä oli 4–7. Tartunta-aukot oli vahvistettu metallilla. Kuva: Anu Hilli / Suomen metsäkeskus.



Kuva 2. CLT-levyt kuljetettiin korjuukohteille puutavara-autolla. Täysperävaunukuormaan pystyttiin lastamaan kaikki käytettävissä olleet 35 CLT-levyä. Kuva: Helena Pahkala / Suomen metsäkeskus.

Lentokonejänkä 1

- CLT-levyjen asennus kuormatraktorilla ajouralle 3.8.2022
- Yliajotestejä kuormatulla kuormatraktorilla 16.8.2022
- Yleisötilaisuus ja demonstraatio 17.8.2022
- CLT-levytyksen purku kuormatraktorilla ajouralta 6.9.2022

Lentokonejänkä 2

- CLT-levyjen asennus kuormatraktorilla ajouralle 7.9.2022
- Yliajotestejä kuormatulla kuormatraktorilla 7.–8.9.2022
- Yleisötilaisuus ja demonstraatio 8.9.2022
- CLT-levytyksen purku ajouralta ja siirto varastoon Hirvaalle syyskuussa 2022

Kenttäkokeiden lisäksi CLT-levyjä käytettiin Pohjois-Suomen Metsämarkkinat Oy:n Ranualla sijainneella todellisella korjuukohteella loka–marraskuussa 2022. Menettelyllä saatiin lisäaineistoa aikatutkimukseen, urakanantajan ja kuljettajien kokemuksia levyjen käytettävyydestä, ja myös tietoa levyjen kulutuskestävyydestä. Korjuukohteella oli kaksi noin 30 metriä pitkää suonylitystä, joille rakennetuilla kokooaurilla CLT-levyjä käytettiin. CLT-levyjen käytöllä pystyttiin lyhentämään metsäkuljetusmatkaa 600–700 metriä verrattuna siihen, että ajoura olisi linjattu kantavan maan reittiä. Levytettyä ajouraa pitkin kuljetettiin kuormatraktorilla 28 kuormaa.

CLT-levyjen kuljetuksen ja käsittelyn kenttäkokeilla ja korjuukohteella toteuttivat puunkuljetuksen ja -korjuun yritykset. Lisäksi Lentokonejängällä suuren osan kuormatraktoreilla tehtävistä operaatioista toteutti Rovaniemen koulutuskuntayhtymä (REDU). Kuormatraktoreiden kuljettajia kenttäkokeilla ja korjuukohteella oli yhteensä neljä; kaikki kokeneita, ja kaksi heistä lisäksi koneellisen puunkorjuun kouluttajia REDU:ssa.

CLT-levyjen siirrossa sekä Hirvaan kenttäkokeille että Ranuan korjuukohteelle käytettiin 9-akselista Mercedes-Benz -puutavara-autoa, joka oli varustettu Kesla Forester 2010 -nosturilla (kuva 2). Kenttäkokeella Lentokonejänkä 1 CLT-levyjen siirto ja asennus ajouralle tehtiin John



Kuva 3. CLT-levyt asennettiin ajouralle kuormatraktorilla. Kuvassa rakennetaan ajouraa vajaan 70 metrin levyisen suokaistaleen yli kenttäkokeella Lentokonejänkä 1. CLT-levyt nostettiin kuormatilasta ja asennettiin ajouralle kuormatraktorin eteen. Kuva: Jari Lindblad / Luonnonvarakeskus.

Deere 1510 G -kuormatraktorilla (kuva 3). CLT-levytyksen purku kenttäkokeelta Lentokonejänkä 1, sekä edelleen siirto ja kaikki työvaiheet kenttäkokeella Lentokonejänkä 2, tehtiin Ponsse Buffalo -kuormatraktorilla (kuvat 4 ja 5). Ranuan korjuukohteella käytettiin Komatsu 865 -kuormatraktoria.



Kuva 4. CLT-levyistä tehdyt ajourat purettiin kuormatraktorilla. Kuvassa nostetaan CLT-levyä kuormatraktoriin kuormatilaan kenttäkokeella Lentokonejänkä 1. Kuva: Jari Lindblad / Luonnonvarakeskus.



Kuva 5. CLT-levyistä tehty ajoura kenttäkokeella Lentokonejätkä 2 ajotestien ja yleisödemostraaation jälkeen. 70 metrin pituinen ajoura ulottui hyvin kantavalta tienvarsivarastolta kivennäismaan korjuulohkolle. Levytetyn ajouran keskivaiheilla oli siltalevyillä tehty puronylitys. Kuva: Jari Lindblad / Luonnonvarakeskus.

2.2 Aikatutkimus

Lentokonejätkän kenttäkokeissa, samoin kuin Ranuan korjuukohteella, CLT-levyjen käsittelyyn liittyvät työt videoitiin. Työt sisälsivät levyjen kuormauksen ja purkamisen puutavara-autolla, levyjen kuormauksen kuormatraktoriin ja asettelun ajouralle sekä lopuksi levytyksen purkamisen ajouralta ja siirron tienvarsivarastoon kuormatraktorilla.

Videoita käytettiin aikatutkimukseen määrittämällä kaikkien edellisten kuormaus syklien yksittäisten työvaiheiden kestot. Työvaiheet olivat levyyn tarttuminen, levyn nostaminen, levyn asettaminen ja kouran tuonti takaisin.

Aikatutkimusaineiston muodostamiseen, eli niin sanottuun kellotukseen, käytettiin Luonnonvarakeskuksen (Luke) Excel-pohjaista TimeStudies -työkalua, joka mahdollistaa työvaiheiden keston tarkan erittelyn ja aikatutkimuksen mittausaineiston muodostamisen. Taulukossa 1 on esitetty videoilta määritettyjen työvaiheiden lukumäärät tehtävän työn ja ajoneuvon mukaan.

Taulukko 1. Aikatutkimuksessa videoilta mitattujen työvaiheiden lukumäärät (n) ajoneuvon ja tehtävän työn mukaan.

Ajoneuvo	Työ	Työvaihe			
		Levyyn tarttuminen	Levyn nosto	Levyn asettelu	Palautus
Puutavara-auto	Kuormaus varastolla	62	62	59	61
	Purku varastolla	67	67	66	66
Kuormatraktori	Kuormaus varastolla	86	86	84	72
	Asennus ajouralle	64	63	72	58
	Kuormaus ajouralta	67	65	65	57
	Purku varastolla	59	59	60	59

Kustannuslaskentaa varten määritettiin laskennallisesti yksittäisen CLT-levyn käsittelyn kuormaussyklin keston keski- ja hajontaluvut jokaista toteutettavaa työtä kohti. Levyjen käsittelyyn liittyvien töiden kuormaussykliä kokonaisajat muodostuvat siihen kuuluvien neljän työvaiheen (taulukko 1) keston summana. Aikatutkimusaineistossa työvaiheiden kestot olivat jakaumiltaan huomattavan vinoja oikealle. Siten esimerkiksi aikatutkimusaineistosta määritettyjen aritmeettisten keskiarvojen käyttö keskilukuina ei ollut mielekäästä.

Kuormaussykliä keston määrittäminen tehtiin hyödyntämällä Monte Carlo -simulointimenetelmää, joka soveltuu moniulotteisiin ongelmaratkaisuihin erityisesti tilanteissa, joissa lähtötiedoissa on epävarmuutta (esim. Raychaudhuri 2008). Määrittäminen tehtiin siten, että jokaiselle työvaiheen kestolle määritettiin aikatutkimusaineiston perusteella todennäköisyysjakauma. Näiden vinojen jakaumien muotona käytettiin kolmiojakaumia siten, että jakaumien kärkinä olivat aikatutkimusaineiston 1, 50 (mediaani) ja 99 prosenttipisteet. Kuormaussykliä keston generoitiin uusi laskenta-aineisto toistamalla 1000 kertaa laskenta, jossa 1) jokaisen työvaiheen kestolle poimittiin satunnainen arvo annetusta jakaumasta ja 2) summattiin arvot kuormaussykliä kestoksi. Näin muodostettu laskenta-aineisto mahdollisti kuormaussykliä keston todennäköisyysjakauman määrittämisen. Käytännössä kuormaussykliä keston määrittäminen keskiarvo ja keskihajonta, joiden perusteella voitiin määrittää normaalijakaumaoletukseen perustuvat todennäköisyysjakaumat (taulukko 2).

2.3 Puutavara-auton käyttötuntikustannus

CLT-levyjen käytön ja logistiikan kustannuslaskennassa hyödynnettiin Luken muissa projekteissa kehitettyjä puutavaran korjuu- ja kuljetuskustannusten laskentatyökaluja. *Costing models for road, rail and sea transport of roundwood* on excel-pohjainen laskentatyökalu puutavaran kaukokuljetuksen kustannuslaskentaan (Väätäinen ym. 2021). Laskentatyökalun avulla pystytään määrittämään muun muassa puutavara-auton vuositasoisen keskimääräinen käyttötuntikustannus (€/h). Laskentatyökalussa käytetään taustatietoina vuosittaisia työtunti- ja ajomääriä, kuljetusmatkoja (keskimääräinen kaukokuljetusmatka ja varastojen väliset siirtymät), tieluokkien jakaumia, ajonopeuksia, kuormaus- ja purkuaikoja sekä polttoaineen kulutuksia. Edellisten lisäksi laskentatyökalussa otetaan kattavasti huomioon puutavara-auton hankintahinta, elinkaari, vakuutukset ja muut vastaavat vuosittaisiin kiinteisiin kustannuksiin vaikuttavat tekijät, sekä muuttuvat toiminnalliset kustannukset, joihin sisältyvät muun muassa polttoainekustannukset. Laskentatyökalun tekijät olivat päivittäneet laskentatyökalun siten, että kustannustekijät noudattivat vuoden 2022 kustannustasoa.

Laskentatyökalun avulla puutavara-auton täysperävaunun yhdistelmälle määritettiin käyttötuntikustannus 108 €/h ja pelkälle vetoautolle käyttötuntikustannus 98 €/h. Näitä käyttötuntikustannuksia käytettiin CLT-levyjen kaukokuljetuksen kustannuslaskennassa.

2.4 Kuormatraktorin käyttötuntikustannus

Kuormatraktorin käyttökustannusten laskennassa hyödynnettiin Lukessa kehitettyä puunkorjuun systeemanalyysimallia, joka on konekustannuslaskentaan kehitetty laskentatyökalu Excel-ympäristössä (Väätäinen ym. 2023). Laskentatyökalu mahdollistaa puutavaran korjuun kustannusten ja suoritamäärien määrittämisen erilaisissa toimintaympäristöissä. Laskentamallissa otetaan kattavasti huomioon puunkorjuun tuottavuuteen ja kustannuksiin vaikuttavat tekijät, mukaan lukien hakkuutapa- ja runkokokojakaumat, tuottavuusmallit, korjuutoiminnan parametrit (mm. kokonaistyöajat ja työajan jakautuminen) ja koneiden kustannustekijät (mm. hankintahinnat, kiinteät kustannukset, toiminnalliset kustannukset, työkustannukset). Laskentamalli tuottaa tulokset yhdelle

korjuuketjulle siten, että hakkuukone ja kuormatraktori edustavat keskimääräistä yleiskonekokoluokkaa.

Laskennan lähtöparametrit, oleellisesti myös kustannustekijät, oli määritetty vuoden 2022 lopun tasolle (Väätäinen ym. 2023). Laskentatyökalulla määritettiin kuormatraktorin vuositason käyttötuntikustannukseksi 94 €/h. Tätä käyttötuntikustannusta käytettiin CLT-levyjen metsäkuljetuksen, asennuksen ja muun kuormatraktorilla tehtävän käsittelyn kustannuslaskennassa.

2.5 Levyjen mitoitus ja kuljetuskapasiteetti

Kaikki projektissa valmistetut CLT-levyt (35 kappaletta) pystyttiin lastaamaan yhteen puutavara-auton täysperävaunukuormaan, jolloin kuormatila oli käytännössä täysi. Levyjen toisistaan eroavat mitat, ja ennen kaikkea levyjen leveydet (etenemä ajouralla) eivät olleet puutavara-auton kuormatilan käytön kannalta parhaita mahdollisia. Kustannuslaskentaa varten levyjen laskennallinen mitoitus vakioitiin, pyrkimyksenä kuljetuslogistiikan ja kuljetuskapasiteetin käytön kannalta tarkoituksenmukaiset mitat. Levyjen pituudeksi, joka käytännössä määrittää levyistä tehtävän ajouran leveyden, asetettiin kenttäkokeissa käytettyjen levyjen mukaisesti 4000 mm. Kapeammissa levyissä (leveys 1600 mm) tilavuuskapasiteetin ja kuormatilan leveyden käyttö jäi vajaaksi. Toisaalta leveämpiä levyjä (leveys 2500 mm) ei pystytty asettamaan kuormatilaan lappeelleen. Laskennallisena leveytenä käytettiin näiden väliltä olevaa arvoa 2000 mm. Levyjen oletettiin koostuvan neljästä 40 mm kerroksesta, jolloin levyjen paksuus olisi 160 mm. Laskennassa levyjen ulkimitoiksi siis muodostui $2000 \times 4000 \times 160$ mm. Lisäksi laskennassa otettiin huomioon kaksi mitoiltaan 300×700 mm nostoaukkoa. Kenttäkokeiden levyissä nostoaukkojen koko oli 200×700 mm, joka osoittautui tietyissä tilanteissa hieman ahtaaksi.

Mitoiltaan $2000 \times 4000 \times 160$ mm CLT-levyn tilavuus nostoaukot (300×700 mm) vähennettynä on 1213 dm^3 . Jos puuaineen kuivatuoretiheydeksi oletetaan 400 kg/m^3 ja kosteudeksi (wet basis) 20 prosenttia, saadaan levyn tuoretiheydeksi 500 kg/m^3 ja painoksi 606 kg.

Laskelma CLT-levyjen kuljetuskapasiteetista tehtiin kokonaispainoltaan 76000 kg 9-akseliselle puutavara-autolle (Tieliikennelaki 729/2018). Kokonaispainon oletettiin jakautuvan siten, että vetoauton kokonaispaino on 35000 kg (kantavuus nosturin kanssa 16500 kg) ja perävaunun 41000 kg (kantavuus 32500 kg). Kuormatilan korkeutena käytettiin 3000 millimetriä.

Edellisillä oletuksilla puutavara-autoon olisi tilavuuskapasiteetin rajoissa lastattavissa 3×18 levyn nippua, yhteensä 54 levyä. Tällöin kuorman paino olisi noin 32700 kg, eli kantavuudesta jäisi käyttämättä noin 16200 kg.

2.6 Kustannuslaskenta

Kustannuslaskennat toteutettiin tilanteissa, joissa korjuukohteella käytettäisiin 18 levyä (vetoauton kuorma) tai 54 levyä (täysperävaunukuorma). Kaukokuljetuksen kustannukset laskettiin kuljetusmatkan suhteen erilaisilla tyhjänä ajon osuuksilla. Kustannuslaskenta perustui laskentatyökalun (Väätäinen ym. 2021) avulla määritettyihin ajoaikoihin sekä levyjen kuormauksen ja kuorman purkamisen ajanmenekkeihin, ja edellisestä muodostuvaan kokonaistyöaikaan. Levyjen käsittelyn, siis kuormauksen ja kuorman purkamisen, ajanmenekit määritettiin kuljetettavien levyjen määrän ja aikatutkimuksella (kohta 2.2) määritettyjen ajanmenekkien perusteella. Kokonaiskustannuksen laskennassa käytettiin puutavara-auton käyttötuntikustannusta.

Kuormatraktorin kustannuslaskenta toteutettiin CLT-levyjen käsittelyyn liittyvien töiden ajanmenekkien (kohta 2.2) ja levyjen metsäkuljetuksen ajanmenekkien perusteella määritettiin arviot kokonaiskustannuksista. Laskennan muuttujia olivat kuljetettavien levyjen määrä, kuljetusmatka, ajonopeus ja kuorman koko, jota käytettiin kuormien määrän laskentaan. Lisäksi

laskennassa käytettiin levyjen käsittelyyn liittyvien töiden kuormaus syklien ajanmenekkejä, jotka määritettiin aiemmin kuvatulla tavalla hyödyntäen Monte Carlo -simulointia. Näiden tietojen perusteella määritettiin levyjen käyttöön liittyvien töiden, eli levytyksen asennuksen ja poistamisen, kuormaus-, purku- ja ajoajat ja kokonaisajanmenekit. Edelleen kokonaiskustannukset määritettiin käyttötuntikustannuksen perusteella.

Laskennassa muuttujille annettiin odotusarvot, joiden perusteella pystyttiin tuottamaan kuormatraktorin käytön kokonaiskustannuksen odotusarvot. Jotta kokonaiskustannukselle pystyttiin määrittämään arvio vaihteluvälistä, annettiin laskennassa käytettävien muuttujien arvojen vaihdella annetun todennäköisyysjakauman mukaisesti. Kuten edellä kuormaus syklien kestojen laskennassa (Monte Carlo -simulointi), laskenta toistettiin 1000 kertaa muodostaen siten laskenta-aineisto levyjen käyttökustannukselle kuormatraktorin osalta. Tuloksena määritettiin paitsi kustannusten odotusarvot, myös 95 prosentin vaihteluvälit.

Laskennassa kuormatraktorin käyttötuntikustannuksena käytettiin arvoa 94 €/h, jonka annettiin vaihdella ± 10 €/h tasajakauman mukaisesti. Kuormatraktorin ajonopeutena käytettiin arvoa 4 km/h (± 1 km/h, tasajakauma) ja kuorman kokona 10 CLT-levyä (± 3 CLT-levyä, tasajakauma). Annetut jakaumat ovat arvioperusteisia. Kuorman koon vaihtelu vaikutti laskennassa kuormien määrään vaihteluun, millä on merkitystä erityisesti metsäkuljetusmatkan pidentyessä. Kuormaus syklien kestot poimittiin keston odotusarvon ja keskihajonnan perusteella määritetystä normaalijakaumasta (kohta 2.2).

3 Tulokset

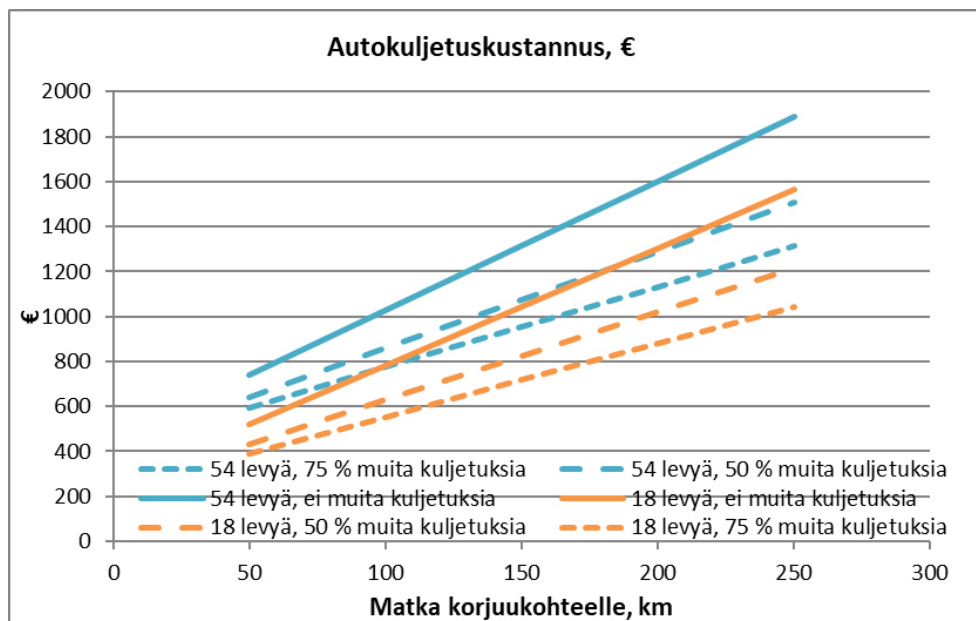
3.1 Levyjen autokuljetus

Taulukossa 2 ovat esitetty aikatutkimukseen ja kohdassa 2.2 esitettyyn laskentamenetelmään perustuvat kuormaus syklin keston keskiarvot ja -hajonnat. Kuormaus sykli tarkoittaa yhden CLT-levyn käsittelyaikaa kuormattaessa tai kuormaa purettaessa, mukaan lukien levyyn tarttuminen, levyn nostaminen, levyn asettaminen ja kouran tuonti takaisin. Kuormaus syklin keston keskiarvon ja keskihajonnan määrittämää normaalijakaumaa käytettiin edelleen autokuljetuksen ajanmenekkien ja kuljetuskustannusten määrittämisessä.

Levyjen autokuljetuskustannukset on laskettu tilanteissa, joissa kuljetettavien levyjen määrä olisi täysi vetoauton kuorma (18 levyä) tai täysi täysperävaunu kuorma (54 levyä). Kuvassa 6 on esitetty levyjen autokuljetuksen kokonaiskustannukset ja kuvassa 7 yksikkökustannukset (€/levy) vetoauton kuormalla (18 levyä) tai täysperävaunu kuormalla (54 levyä) kuljetusmatkan suhteen. Kuljetusmatka tarkoittaa tässä yhden suuntaista etäisyyttä levyjen varastopaikasta korjuukohteelle. Kustannus sisältää sekä levyjen viennin korjuukohteelle, että noudon korjuukohteelta käytön jäl-

Taulukko 2. Yhden kuormaus syklin keston keskiarvot ja keskihajonnat ajoneuvon ja tehtävän työn mukaan.

Ajoneuvo	Työ	Kuormaus syklin kesto (s)	
		keskiarvo	keskihajonta
Puutavara-auto	Kuormaus varastolla	38	6
	Purku varastolla	37	7
Kuormatraktori	Kuormaus varastolla	41	8
	Asennus ajouralle	98	25
	Kuormaus ajouralta	76	16
	Purku varastolla	35	6



Kuva 6. Levyjen autokuljetuksen kokonaiskustannukset vetoauton kuormalla (18 levyä) tai täysperävaunu kuormalla (54 levyä) kuljetusmatkan (yhden suuntainen matka korjuukohteelle) suhteen. Muiden kuljetusten osuus tarkoittaa tyhjänä ajon korvaantumista muilla, esim. puutavaran, kuljetuksilla.

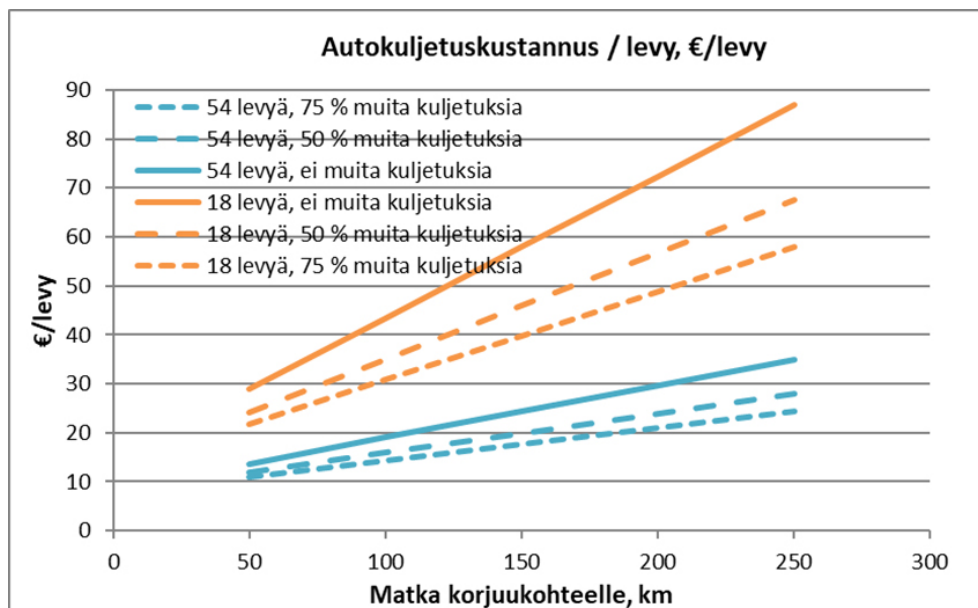
keen. Muiden kuljetusten osuus tarkoittaa tyhjänä ajon korvaantumista muilla, käytännössä puutavaran, kuljetuksilla. Kuvaaja ”ei muita kuljetuksia” osoittaa tilannetta, jossa paluumatka levyjä korjuukohteella vietäessä ajetaan lähtöpaikkaan kokonaisuudessaan tyhjänä, ja vastaavalla tavalla menomatka levyjä korjuukohteelta noudettaessa. Kahdessa muussa tilanteessa 50 tai 75 prosenttia tästä tyhjänä ajosta pystyttäisiin korvaamaan puutavaran kuljetuksilla.

Kun etäisyys korjuukohteelle oli noin 50 kilometriä, oli levyjen kaukokuljetuskustannus tarkastelluissa tilanteissa 400–800 euroa (kuva 6). Jo verraten lyhyelläkin kuljetusmatkalla ajoaika muodostaa suurimman tai vähintään merkittävän osuuden kuljetuskustannuksista. Kaukokuljetuksen kokonaiskustannus ei kasva lineaarisesti kuljetettavien levyjen määrän suhteen. Sama on todettavissa kuvan 7 kuljetuksen levykohtaisista yksikkökustannuksista; vetoauton kolmanneksen suuruisella levymäärällä yksikkökustannus oli 2–3-kertainen täysperävaunu kuormaan verrattuna. Kuljetuskustannus kasvoi jyrkästi kuljetusmatkan suhteen, ja toisaalta muiden kuljetusten ketjutaminen ja tyhjänä ajon korvaaminen vaikuttivat oleellisesti kustannusten tasoon.

3.2 Levyjen metsäkuljetus

Taulukossa 2 ovat esitetty aikatutkimukseen ja kohdassa 2.2 esitettyyn laskentamenetelmään perustuvat kuormaussyklin keston keskiarvot ja -hajonnat. Kuormatraktorilla kuormaussykli keston keskiarvo kuormatessa CLT-levyjä oli korkeampi kuin kuormaa purettaessa. Sekä keskiarvot että keskihajonnat olivat verraten lähellä puutavara-auton vastaavia keskilukuja. Sen sijaan ajanmenekki oli selvästi suurempi CLT-levyjen asentamisessa ajouralle ja kuormattaessa ajouralta.

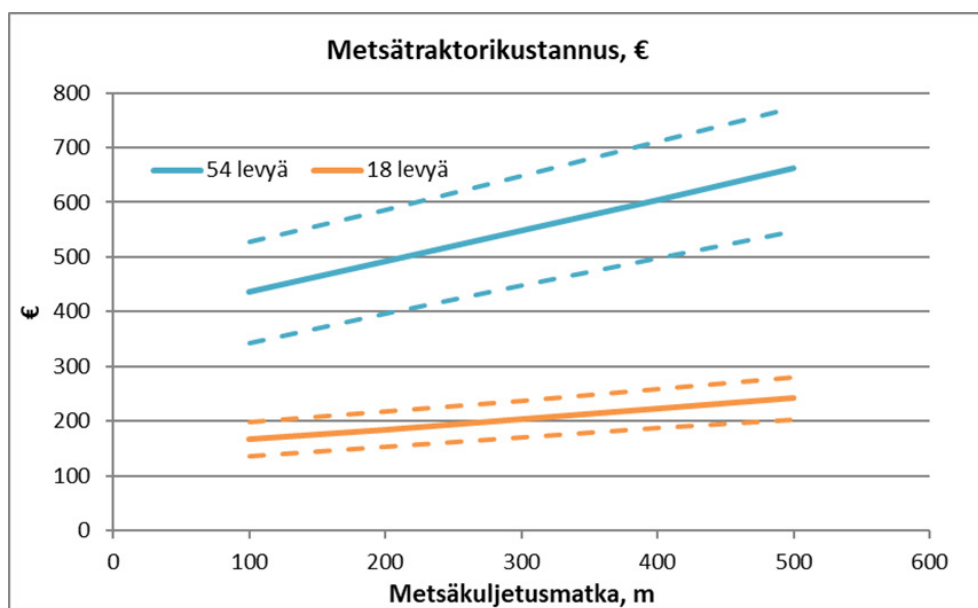
Kuvassa 8 on esitetty levyjen metsäkuljetuksen kokonaiskustannukset ja kuvassa 9 yksikkökustannukset (€/levy) 18 levyllä (vetoauton kuorma) ja 54 levyllä (täysperävaunu kuorma) metsäkuljetusmatkan suhteen. Metsäkuljetusmatka tarkoittaa tässä levyjen yhden suuntaista kuljetusmatkaa tienvarsivarastosta niiden käyttöpaikalle ajouralla. Kustannukset sisältävät levyjen kuormauksen tienvarressa, kuljetuksen, asennuksen ajouralle, purkamisen ajouralta sekä siirtämisen takaisin tienvarsivarastoon. Yhtenäiset viivat osoittavat kustannusten odotusarvon ja katkoviivat



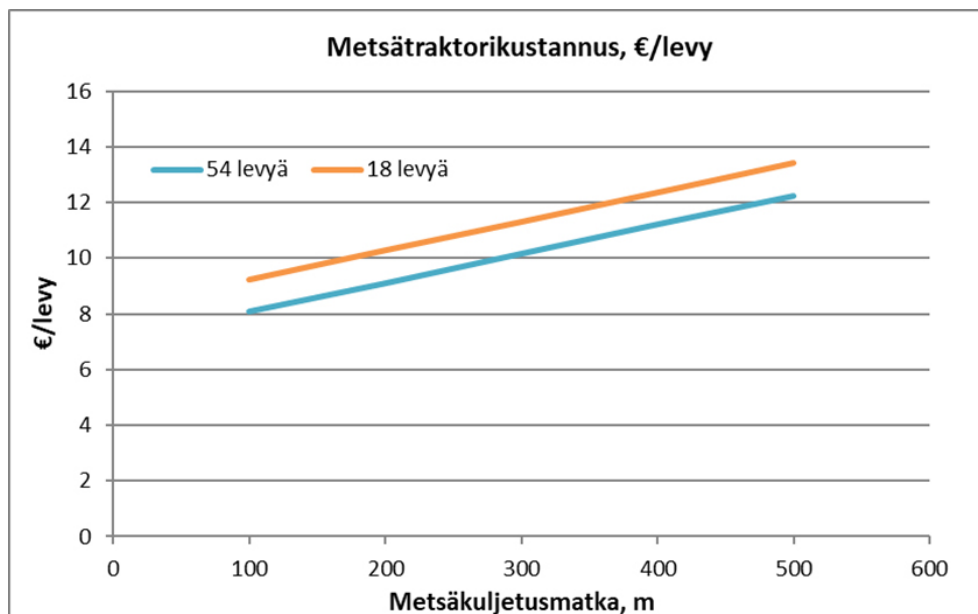
Kuva 7. Levyjen autokuljetuksen yksikkökustannukset (€/levy) vetoauton kuormalla (18 levyä) tai täysperävaunu kuormalla (54 levyä) kuljetusmatkan (yhden suuntainen matka korjuukohteelle) suhteen. Muiden kuljetusten osuus tarkoittaa tyhjänä ajon korvautumista muilla, esim. puutavaran, kuljetuksilla.

95 prosentin vaihteluvälin. Voidaan ajatella, että 95 korjuukohteella sadasta kustannukset olisivat kyseisellä vaihteluvälillä.

Kuormatraktorilla tehtävissä toimenpiteissä levyjen käsittely muodosti selvästi suurimman ajanmenekin ja siten kustannuksen. 18 levyn tapauksessa kokonaiskustannusten nousu metsäkuljetusmatkan suhteen oli selvästi loivempi kuin 54 levyn tapauksessa, jossa ajomatkaa kertyy suuremman kuormien määrän vuoksi enemmän (kuva 8). Yksikkökustannukset olivat pienimmillään 8–9 €/levy tasolla ja kasvoivat noin 1 €/levy kun metsäkuljetusmatka pidentyi sadalla metrillä (kuva 9).



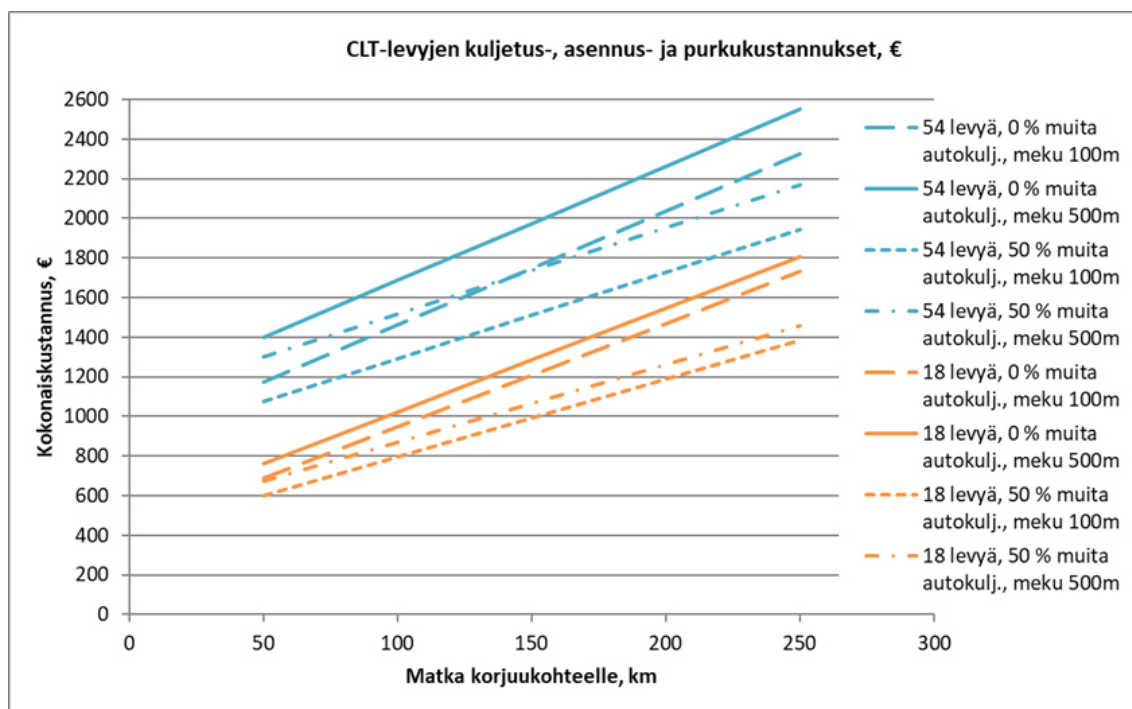
Kuva 8. Levyjen metsäkuljetuksen kokonaiskustannukset 18 levyille (vetoauton kuorma) ja 54 levyille (täysperävaunu kuorma) metsäkuljetusmatkan (levyjen siirtomatka tienvarsivarastosta) suhteen. Kokonaiskustannus sisältää levyjen kuormauksen ja kuljetuksen, asennuksen ajouralle, levytyksen purkamisen ja kuljetuksen tienvarsivarastoon.



Kuva 9. Levyjen metsäkuljetuksen yksikkökustannukset 18 levyille (vetoauton kuorma) ja 54 levyille (täysperävaunu kuorma) metsäkuljetusmatkan (levyjen siirtomatka tienvarsivarastosta) suhteen. Yksikkökustannus sisältää levyjen kuormauksen ja kuljetuksen, asennuksen ajouralle, levytyksen purkamisen ja kuljetuksen tienvarsivarastoon.

3.3 Logistiikan kokonaiskustannukset

Kuvassa 10 on esitetty levyjen kauko- ja metsäkuljetuksen kokonaiskustannukset kaukokuljetusmatkan (etäisyys korjuukohteelle) suhteen tilanteissa, joissa 1) levyjen määrä on 18 tai 54 kappaletta, 2) kaukokuljetuksen tyhjänä ajosta voidaan korvata muilla kuljetuksilla 0 tai 50



Kuva 10. Levyjen kauko- ja metsäkuljetuksen kokonaiskustannukset 18 levyille (vetoauton kuorma) ja 54 levyille (täysperävaunu kuorma) 100 ja 500 metrin metsäkuljetusmatkalla (meku) kaukokuljetusmatkan suhteen, kun kaukokuljetusmatkan tyhjänä ajosta voidaan korvata 0 tai 50 prosenttia muilla kuljetuksilla.

prosenttia ja 3) metsäkuljetusmatka on 100 tai 500 metriä. 50 kilometrin kaukokuljetusmatkalla logistiikkakustannukset olivat edellä määritellyissä tilanteissa 18 levyllä 600–800 euroa ja 54 levyllä 1000–1400 euroa. Kaukokuljetusmatkan ohella kokonaiskustannukseen vaikuttaa merkittävästi se, korvataanko tyhjänä ajoa muilla kuljetuksilla. Lisäksi tyhjänä ajon osuus vaikuttaa kokonaiskustannuksen nousun nopeuteen; jos tyhjänä ajoa ei korvata muilla kuljetuksilla (0 prosenttia), kasvoi kokonaiskustannus kaukokuljetusmatkan suhteen 5–6 euroa/km. Vastaavasti silloin, kun tyhjänä ajosta korvattiin 50 prosenttia, oli kasvu noin 4 euroa/km.

3.4 CLT-levyjen käytön kiinteät kustannukset

Tätä projektia varten suunniteltuja ja valmistettuja CLT-levyjä käytettiin kenttäkokeissa ja yhdellä puunkorjuukohteella. Kokonaisuudessaan ns. A-sarjan levyille kertyi noin 160–180 yliajokertaa ja myöhemmin valmistetuille B-sarjan levyille 120–140 yliajokertaa. Ajokerrat muodostuivat pääosin kuormatraktorin ajosta sekä kuormattuna että tyhjänä, ja hakkuukoneen ajokerroista.

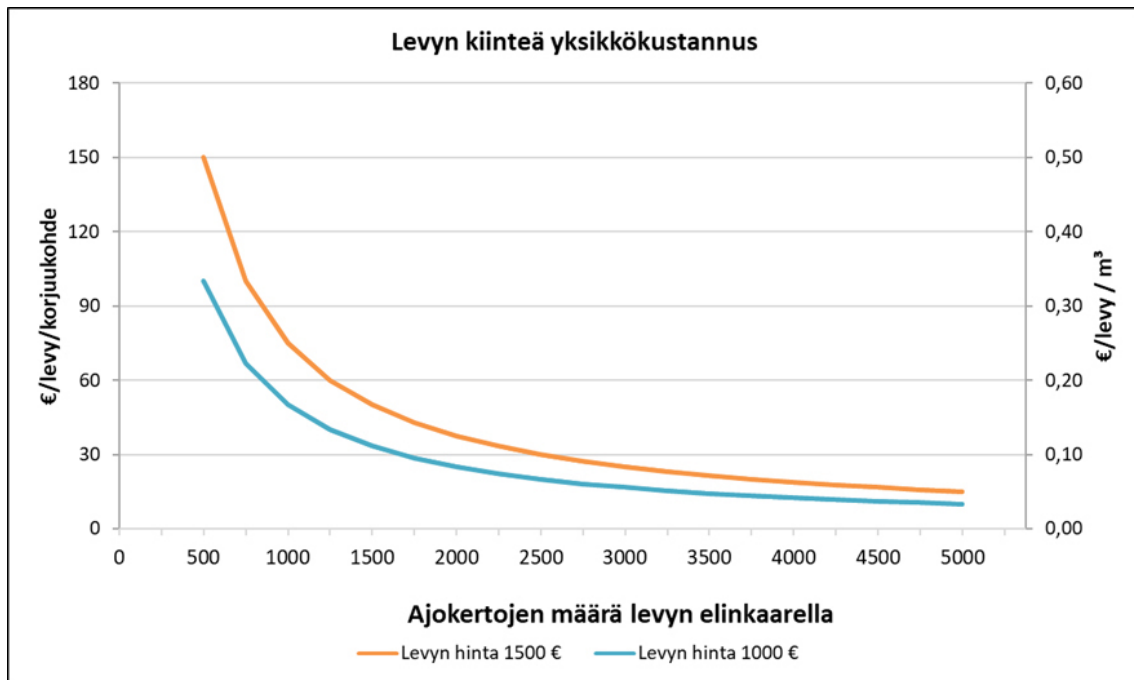
Taulukossa 3 on esitetty arvio levyjen käytön kiinteistä kustannuksista elinkaaren aikana, elinkaaren pituuden suhteen. Elinkaaren pituus on määritetty yliajokertojen lukumääränä käytämällä pienimpänä arvona 200 ajokertaa. Arvio elinkaaren aikana levyjen kautta kuljetettavasta puumäärästä on määritetty ajokertojen ja kuormatraktorin kuormakoon 12 kuutiometriä kiintotilavuutta perusteella. Edelleen arvio korjuukohteiden määrästä, joilla levyjä voitaisiin elinkaaren aikana käyttää, on määritetty kuljetettavan kokonaispuumäärän ja korjuukohteelle annetun puumäärän 300 kuutiometriä kiintotilavuutta perusteella. Levyjen kappalehintana käytettiin 1500 euroa, mikä vastaa tätä hanketta varten valmistettujen levyjen hintatasoa. Vastaava tarkastelu on esitetty myös kuvassa 11, jossa on tarkasteltu levyjen kiinteää kustannusta elinkaaren teoreettisen ajokertojen määrän suhteen, kun levyn hankintahinnaksi annetaan 1500 tai 1000 euroa.

3.5 Puutavaran metsäkuljetusmatkan lyhentämisellä saavutettava kustannussäästö

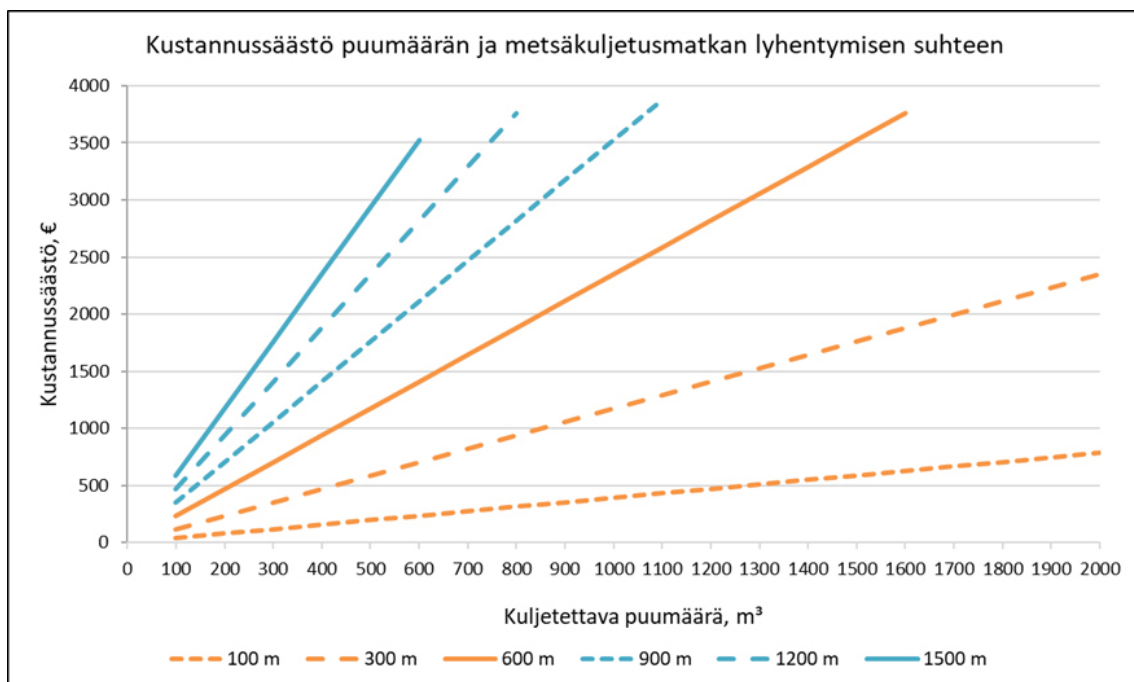
Kuvassa 12 on esitetty arvio puutavaran metsäkuljetuksen kustannussäästöstä puunkorjuun tilanteessa, jossa levyjen käytöllä pystyttäisiin lyhentämään metsäkuljetusmatkaa. Kustannussäästö on esitetty erilaisilla metsäkuljetusmatkan lyhenemillä (100–1500 metriä) kuljetettavan puutavaran kokonaistilavuuden suhteen. Laskennassa käytettiin samoja metsäkuljetuksen käyttötuntikustannuksia ja keskimääräistä ajonopeutta kuin levyjen metsäkuljetuskustannuksiin liittyvissä laskelmissa. Puutavaran kuormakokona käytettiin 12 kuutiometriä. Esimerkiksi noin 600 euron kustannussäästö saavutettaisiin tilanteessa, jossa puutavaran metsäkuljetusmatkan lyhenemä on 300 metriä ja kuljetettava puumäärä 500 kuutiometriä.

Taulukko 3. Arvio levykohtaisista yksikkökustannuksista (kiinteä kustannus) elinkaaren aikana, elinkaaren pituuden mukaan.

Ajokerrat, kpl	Levyjen elinkaari		Yksikkökustannus, €	
	Kuljetettava puumäärä, m ³	Korjuukohteet, kpl	kustannus/levy/korjuukohde, €/levy/korjuukohde	kustannus/levy/puumäärä, €/levy/m ³
200	1200	4	375	1,25
500	3000	10	150	0,50
1000	6000	20	75	0,25
2000	12000	40	38	0,13



Kuva 11. Arvio levykohtaisesta kiinteästä kustannuksesta elinkaaren ajokertojen lukumäärän suhteen.



Kuva 12. Puutavaran metsäkuljetuksen kustannussäästö metsäkuljetusmatkan lyhenemän ja kuljetettavan puumäärän suhteen.

4 Tarkastelu

CLT-levyjen käytön logistiikkakustannusten määrittäminen puunkorjuussa perustui keskeisesti Luken laskentatyökaluilla määritettyihin puutavara-auton ja kuormatraktorin käyttötuntikustannuksiin. Laskentatyökaluissa otetaan kattavasti huomioon käyttötuntikustannuksen muodostamiseen vaikuttavat tekijät. Laskentatyökalut ovat Luken asiantuntijoiden laatimia, ja niiden sisältöön ovat vaikuttaneet ja sisältöä arvioineet myös muut tutkimusorganisaatiot ja käytännön toimijat. Laskentatyökaluissa ja edelleen käyttötuntikustannuksissa on otettu huomioon viime aikojen voimakas kustannustason nousu. Kustannuslaskennassa käytetyt käyttötuntikustannukset ovat todennäköisesti todenmukaisella tasolla. Tulosten käyttäjät voivat kuitenkin tarvittaessa suhteuttaa esitetyt tulokset muihin käyttötuntikustannuksiin.

Tehdyissä kenttäkokeissa puutavara-auton täysperävaunu kuormassa pystyttiin kuljettamaan kaikki käytettävissä olleet 35 CLT-levyä. CLT-levyjen erilaisten ja kuljetuskapasiteetin käytön kannalta osin epätarkoituksenmukaisten mittojen vuoksi logistiikkakustannusten määrittäminen levyjen laskennallisella mitoituksella ja edelleen puutavara-auton kuljetuskapasiteetin määrittämisellä. Menettelyllä pyrittiin oleellisesti parantamaan tulosten yleistettävyyttä siten, ettei muun muassa käytettävissä oleva CLT-levyjen määrä tai mitat rajoittaneet tulosten laskentaa. Kokonaispainoltaan 76 000 kg:n puutavara-autolle määritetty kuljetuskapasiteetti 54 levyä on laskennallinen, eikä sitä luonnollisesti ollut mahdollista todentaa kenttäkokeissa. 54 levyä täyttäisi puutavara-auton tilavuuskapasiteetin, mutta kantavuutta jäisi käyttämättä. Kantavuuden osalta on syytä varautua siihen, että levyt olisivat merkittävästi oletettua painavampia, mikä varsinkin kosteuden muuttumisen ja levyihin tarttuvan ja kuorman kulkeutuvan maan ja turpeen vuoksi on mahdollista.

54 levyllä, joiden leveydet ovat 2000 mm, muodostetun ajouran nimellisipituus on 108 metriä. Käytännössä ajouran pituus olisi suurempi, sillä levyjen asettaminen täysin kiinni toisiinsa ei ole yleensä muun muassa alustan epätasaisuuksien vuoksi mahdollista. Tarkemmalla levyjen mitoituksella suhteessa kuljetuskapasiteettiin ajouran suurinta nimellisipituutta voisi olla pidennettävissä yli 108 metrin, mutta ei kuitenkaan todennäköisesti merkittävästi.

Levyjen kaukokuljetuksessa suurimman ajanmenekin ja siten kustannuksen muodostaa ajoaika jo melko lyhyilläkin kuljetusmatkoilla. Aikatutkimuksen tulosten perusteella levyjen kuorma ja kuorman purkaminen puutavara-autolla olisi kohtalaisen sujuvaa ja ajanmenekkiä hajonta pientä. Edellisistä syistä levyjen käsittelyn tehokkuuden parantamisella on vähäinen potentiaali kaukokuljetuksen kokonaiskustannuksen kannalta. Sen sijaan oleellista olisi pystyä korvaamaan tyhjänä ajoa puutavaran kuljetuksilla ja ketjuttamaan levyjen käyttöä ja siirtoa korjuukohteelta toiselle.

Kuormatraktorilla tehtävissä toimenpiteissä levyjen käsittely muodostaa selvästi suurimman ajanmenekin ja siten kustannuksen. Kenttäkokeiden kokemusten ja aikatatutkimuksen tulosten perusteella kuorma varastolla ja kuorman purkaminen varastoon ovat verraten sujuvia työvaiheita. Sen sijaan varsinkin asennus ajouralle on aikaa vievää. Lisäksi asennuksen ajanmenekkiin ja ylipäättään työn sujuvuuteen vaikuttavat merkittävästi muun muassa koneen tyyppi, näkyvyys ja levyjen tartuntaratkaisut.

Kaikki kuormatraktoreiden kuljettajat olivat kokeneita ammattilaisia. Tästä huolimatta heillä ei luonnollisesti ollut tottumusta CLT-levyjen käsittelystä kenttäkokeissa toteutetulla tavalla. Kenttäkokeiden aikana tehtiin runsaasti subjektiivisia havaintoja CLT-levyjen käsiteltävyyden ja työtapojen parantamismahdollisuuksista, jotka myös erikseen kartoitettiin projektin muissa tehtävissä. Oleellinen, työn sujuvuuteen ja ajanmenekkiin vaikuttava ja toistuvasti esille tullut seikka oli näkyvyys; käsiteltäessä CLT-levyjä kuormatraktorin perän yli kuormatilan takana olisi kameranäyttö miltei välttämätön.

Kuormatraktorilla tehtävien toimenpiteiden kokonaiskustannusten laskennallinen 95 prosentin vaihteluväli on varsin laaja etenkin 54 levyllä, suuruusluokkaa yli ± 100 euroa (kuva 8). Vaihtelun taustalla on levyjen käsittelyyn liittyvien ajanmenekkien (kuormaus, asennus, purku, siirto tienvarteen), ajonopeuden ja kuormakoon vaihtelut; suurella levyjen määrällä vaihtelut näissä tekijöissä kertautuvat kokonaiskustannuksessa. Laskennassa käytetyt käyttötuntikustannusten, ajonopeuksien ja kuormakokojen vaihtelut odotusarvojen ympärillä olivat arvioperusteisia. Lopputuloksena määritetty kokonaiskustannusten vaihteluväli kuvaa suuntaa antavasti kaluston sopivuuden, kuljettajan tottumuksen ja ylipäätään työn sujumisen vaikutusta kokonaiskustannukseen. Levyjen käsittelyyn ja erityisesti asennuksen tehostamiseen liittyvillä parannuksilla ja ratkaisuilla olisi siten kohtalainen potentiaali kokonaiskustannusten pienentämiseksi.

Käyttötestien perusteella ei pystytty tarkasti määrittämään mahdollisten ajokertojen määrää levyjen elinkaaren aikana. Levyjen käytön kiinteiden kustannusten tarkastelua varten voidaan arvioida suuntaa antavasti, että testattuja levyjä olisi voitu käyttää 2–3 kertainen ajokertojen määrä toteutuneeseen verrattuna. Suuruusluokkana tämä voisi tarkoittaa 300–500 ajokertaa levyn elinkaaren aikana. Tällä ajokertojen määrällä levyjen kiinteä kustannus korjuukohtetta tai kuljettua puutavaramäärä kohti muodostuu huomattavan korkeaksi. Levyjen elinkaarta pitäisi pystyä pidentämään 5–10 kertaiseksi, jotta kiinteä kustannus tasaantuu.

Luonnollisesti levyjen hankintahinta vaikuttaa kiinteisiin yksikkökustannuksiin. Hankkeessa suunniteltujen levyjen valmistuksen aikana sahatavaran hinta oli pitkän ajan tasoon verrattuna huomattavasti korkeammalla (Sahateollisuus ry 2022). Levyjen käytön kiinteiden yksikkökustannusten kannalta levyjen hankintahinta on oleellinen, mutta miltei tärkeämmäksi kustannuksien ja edelleen levyjen käyttömahdollisuuksien kannalta muodostuu niiden elinkaaren pituus.

Levyjen käytöllä voitaisiin saavuttaa puunkorjuun suoria kustannussäästöjä tilanteissa, joissa puutavaran metsäkuljetusmatkaa voitaisiin lyhentää merkittävästi ja kuljettava puutavaramäärä olisi suurehko. Mahdollisesti suoria kustannussäästöjä tärkeämpää olisi arvioida levyjen käyttömahdollisuuksia sulan maan aikaisten korjuumahdollisuuksien parantamisen kannalta. Levyjen käyttö voisi tietyissä tilanteissa – esimerkiksi silloin, kun korjuulohko sijaitsee huonosti kantavan maaperän, ojan tai noron takana tai korjuuseen liittyy vesistöhaitan riski – mahdollistaa talvileimikoiden korjuun sulan maan aikana. Tämä osaltaan mahdollistaisi tasaisemmat puunkorjuumäärän ja työmahdollisuudet korjuuryityksille ja kuljettajille.

Oleellinen kysymys on, kuinka suuri levyjen käytöstä johtuva lisäkustannus puunkorjuulle voitaisiin kohdentaa tilanteissa, joissa levyjen käyttö olisi puunkorjuun mahdollistaja. Koneellisen puunkorjuun yksikkökustannus, mukaan lukien hakkuu ja metsäkuljetus, oli keskimäärin $11,02 \text{ €/m}^3$ vuonna 2021 (Luonnonvarakeskus 2021). Esimerkkinä, jos levyjen käytölle olisi kohdennettavissa 2 €/m^3 kustannus (noin neljänneksen lisäys uudistushakkuulla ja noin kymmenyksen lisäys ensiharvennuksella), tulisi korjuukohteella korjattavan puumäärän olla suuruusluokkaa yli tuhat kuutiometriä, luonnollisesti käytettävien levyjen määrän ja niiden kuljetusmatkan suhteen muuttuen. Edellisessä tilanteessa levyjen hankintahinnan ja elinkaaren pituuden tulisi muodostua sellaisiksi, että levyjen kustannus korjattua puutavaran määrää kohti olisi suuruusluokkaa $0,05 \text{ €/levy/m}^3$.

Eeronheimon (1991) mukaan turvemaidella toteuttavan koneellisen puunkorjuun mahdollistavan kauden vuosittainen pituus oli eteläisimmässä Suomessa noin 60 päivää ja Lapissa yli 160 päivää. Lehtonen ym. (2019) päätyivät tasoltaan samaan tulokseen vuosien 1981–2010 vertailujaksolle tehdyissä laskelmissa. Jakson 2021–2050 loppuun tultaessa koneellisen puunkorjuun mahdollistavan vuosittaisen kauden pituus tulisi lyhentymään noin kuukaudella. Ilmastonmuutokseen liittyvän kehityksen vuoksi pehmeiden ja sulien maiden puunkorjuuseen liittyvät ratkaisut tulevat entisestään korostumaan.

Kiitokset

Tämä tutkimus toteutettiin osana CLT-levyt maanpinnan kantavuuden vahvistajan puunkorjuussa (CLT Acces Matting) -projektia. Projektin päätoteuttaja oli Lapin ammattikorkeakoulu ja osatoteuttajina Suomen Metsäkeskus, Kemin Digipolis Oy ja Luonnonvarakeskus (Luke). Projektia rahoitti Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskus Euroopan aluekehitysrahastosta. Projektin projektipäällikkö oli Anne Saloniemi (Lapin ammattikorkeakoulu) ja projektiryhmän ytimen muodostivat Harri Lindeman (Luke), Tytti Ahoranta (Kemin Digipolis Oy), Oiva Hiltunen (Lapin ammattikorkeakoulu), Anu Hilli ja Helena Pakkala (Suomen Metsäkeskus). Pohjois-Suomen Metsämarkkinat Oy:n Kimmo Karjalainen järjesti CLT-levyjen käytön todellisella puunkorjuukohteella. Luonnonvarakeskuksen erikoistutkijat Kari Väätäinen ja Juha Laitila esittivät tutkimuksessa käytettyihin menetelmiin ja käsikirjoituksen sisältöön arvokkaita kommentteja. Kaikille edellisille esitän kiitokseni. Erityisen kiitoksen esitän kenttäkokeiden toteutuksessa operoineille kuljettajille.

Liitetiedostot

Metatietolomake.pdf; saatavissa osoitteessa <https://doi.org/10.14214/ma.23012>.

Lähteet

- Ala-Ilomäki J, Högnäs T, Lamminen S, Sirén M (2011) Equipping a conventional wheeled forwarder for peatland operations. *Int J For Eng* 22: 7–13. <https://doi.org/10.1080/14942119.2011.10702599>.
- Brandner R, Flatscher G, Ringhofer A, Schickhofer G, Thiel A (2016) Cross laminated timber (CLT): overview and development. *Eur J Wood Wood Prod* 74: 331–351. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5>.
- Blinn CR, Dahlman R, Hislop L, Thompson MA (1998) Temporary stream and wetland crossing options for forest management. United States Department of Agriculture. General technical report 202. <https://doi.org/10.2737/NC-GTR-202>.
- Eeronheimo O (1991) Suometsien puunkorjuu. *Folia Forestalia* 779. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1173-2>.
- Elinkeinoelämän keskusliitto (2023) Investointitiedustelu: tammikuu 2023. Teollisuuden kiinteät investoinnit ja suunnitelmat 2021–2023. <https://ek.fi/tavoitteemme/talouspolitiikka/suhdantiedustelut/investointitiedustelu-tammikuu-2023/>. Viitattu 30.5.2024.
- Jylhä K, Ruosteenoja K, Räisänen J, Fronzek S (2012) Ilmasto. Julkaisussa: Ruuhela R (toim) Miten väistämättömään ilmastonmuutokseen voidaan varautua? – yhteenveto suomalaisesta sopeutumistutkimuksesta eri toimialoilla. Maa- ja metsätalousministeriö. MMM:n julkaisuja 6/2011: 16–23. ISBN 978-952-453-682-0.
- Kontinen K (2014) Huonosti kantavien maiden ja teiden vahvistamisratkaisut. Mikkelin ammattikorkeakoulu. Tutkimuksia ja raportteja 92. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/81258/URNISBN9789515884404.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Laiho R, Finér L (1996) Changes in root biomass after waterlevel drawdown on pine mires in southern Finland. *Scand J For Res* 11: 251–260. <https://doi.org/10.1080/02827589609382934>.
- Lehtonen I, Venäläinen A, Kämäräinen M, Asikainen A, Laitila J, Anttila P, Peltola H (2019) Projected decrease in wintertime bearing capacity on different forest and soil types in Finland under a warming climate. *Hydrol Earth Syst Sc* 23: 1611–1631. <https://doi.org/10.5194/>

- hess-2017-727.
- Leppä K, Korkiakoski M, Nieminen M, Laiho R, Hotanen J-P, Kieloaho A-J, Korpela L, Laurila T, Lohila AK, Minkkinen K, Mäkipää R, Ojanen P, Pearson M, Penttilä T, Tuovinen J-P, Launiainen S (2020) Vegetation controls of water and energy balance of a drained peatland forest: responses to alternative harvesting practices. *Agr Forest Meteorol* 295, article id 108198. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108198>.
- Luonnonvarakeskus (2021) Teollisuuspuun korjuu ja kaukokuljetus 2021: Teollisuuspuun korjuun ja kaukokuljetuksen yksikkökustannukset. <https://www.luke.fi/fi/tilastot/teollisuuspuun-korjuu-ja-kaukokuljetus-tietojen-paivitys-paattynyt-2022-lopussa/teollisuuspuun-korjuu-ja-kaukokuljetus-2021>. Viitattu 30.5.2024.
- Luonnonvarakeskus (2023a) Metsäteollisuuden puunkäyttö 2023. <https://www.luke.fi/fi/tilastot/puun-kaytto/metsateollisuuden-puunkaytto-2023>. Viitattu 30.5.2024.
- Luonnonvarakeskus (2023b) Metsävarat maakunnittain 2023: Kankaat ja suot metsätalousmaalla. https://statdb.luke.fi/PxWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE__04%20Metsa__06%20Metsavarat/1.02_Kankaat_ja_suot_metsatalousmaalla.px/. Viitattu 30.5.2024.
- Luonnonvarakeskus (2023c) Metsävarat maakunnittain 2023: Ojitustilanne metsätalousmaalla. https://statdb.luke.fi/PxWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE__04%20Metsa__06%20Metsavarat/1.04_Ojitustilanne_metsatalousmaalla.px/. Viitattu 30.5.2024.
- Luonnonvarakeskus (2023d) Metsävarat maakunnittain 2023: Puuston tilavuus metsä- ja kitumaan kankailla ja soilla. https://statdb.luke.fi/PxWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE__04%20Metsa__06%20Metsavarat/1.17_Puuston_tilavuus_metsa_ja_kitumaan_kan.px/. Viitattu 30.5.2024.
- Luonnonvarakeskus (2024) Avainlukuja suometsistä. <https://www.luke.fi/fi/ajankohtaista/teemat-ja-kampanjat/suometsat/avainlukuja-suometsista>. Viitattu 30.5.2024.
- Metsänhoidon suositukset (2020) Turvemaiden puunkorjuu. Maa- ja metsätalousministeriö. Tapio Oy. <https://metsanhoidonsuositukset.fi/fi/toimenpiteet/turvemaiden-puunkorjuu>. Viitattu 30.5.2024.
- Mikkonen S, Laine M, Mäkelä HM, Gregow H, Tuomenvirta H, Lahtinen M, Laaksonen A (2015) Trends in the average temperature in Finland, 1847–2013. *Stoch Env Res Risk A* 29: 1521–1529. <https://doi.org/10.1007/s00477-014-0992-2>.
- Puuinfo (2024). Tietoa puurakentamisesta ja puun käytöstä. <https://puuinfo.fi/>.
- Päivänen J (2007) Suot ja suometsät – järkevän käytön perusteet. Metsäkustannus Oy. ISBN 978-952-5694-02-4.
- Raychaudhuri S (2008) Introduction to Monte Carlo simulation. Julkaisussa: Mason SJ, Hill RR, Mönch L, Rose O, Jefferson T, Fowler JW (toim) Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference. <https://www.informs-sim.org/wsc08papers/012.pdf>.
- Ruosteenoja K, Markkanen T, Räisänen J (2020) Thermal seasons in northern Europe in projected future climate. *Int J Climatol* 40: 4444–4462. <https://doi.org/10.1002/joc.6466>.
- Sahateollisuus ry (2022) Tilastot. Sahatavaran vientihinta 2003–2021. <https://sahateollisuus.com/tilastot/>.
- Sarkkola S, Nieminen M, Koivusalo H, Laurén A, Ahti E, Launiainen S, Nikinmaa E, Marttila H, Laine J, Hökkä H (2013) Domination of growing-season evapotranspiration over runoff makes ditch network maintenance in mature peatland forests questionable. *Mires and Peat* 11: 1–11. http://mires-and-peat.net/media/map11/map_11_02.pdf.
- Suomen metsäkeskus (2021) Kuvaus korjuukelpoisuus -tietotuotteesta. <https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/document/tietotuotokuvaus-korjuukelpoisuus.pdf>.
- Tarkastusohje (2023) Leivo J, Partanen J, Hytönen H, Leppijoki N, Pulkkanen T, Haataja L, Pirkonen J, Partamies M, Santapukki R, Nousiainen M, Pakkanen N (2022) Suomen metsäkeskus. <https://>

- www.metsakeskus.fi/sites/default/files/document/tarkastusohje.pdf.
- Tieliikennelaki 729/2018. 1.6.2020. <https://www.finlex.fi/fi/laki/smur/2018/20180729>.
- Viitanen J, Mutanen A, Karvinen S (toim) (2023) Metsäsektorin suhdannekatsaus 2023–2024. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 93/2023. Luonnonvarakeskus. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-795-2>.
- Väätäinen K, von Hofsten H, Noreland D, Ingeborg C, Lazdins A (2021) A common Nordic-Baltic costing framework for road, rail and sea transport of roundwood. NIBIO rapport 7, nr. 8. Norsk Institutt for Bioekonomi. <https://hdl.handle.net/11250/2723839>.
- Väätäinen K, Mutanen A, Anttila P, Laitila J, Routa J, Kniivilä M, Ahtikoski A, Lindblad J (2023) EU-politiikkojen mahdollisia vaikutuksia puun korjuukustannuksiin: kustannuslaskentamallin kehittäminen ja skenaariotarkastelu. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 37/2023. Luonnonvarakeskus. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-670-2>.

30 viitettä.