

Ympärivuotisen puunkorjuun kustannusvaikutukset ojitetuilla turvemaidilla – korjuuyrittäjätason simulointitutkimus

**Kari Väätäinen, Sami Lamminen, Matti Sirén, Jari Ala-Ilomäki ja
Antti Asikainen**

Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute -sarjassa julkaistaan tutkimusten ennakkotuloksia ja ennakkotulosten luonteisia selvityksiä. Sarjassa voidaan julkaista myös esitelmiä ja kokouskoosteita yms.

Sarjassa ei käytetä tieteellistä tarkastusmenettelyä. Kirjoitukset luokitellaan Metlan julkaisutoiminnassa samaan ryhmään monisteiden kanssa.

Sarjan julkaisut ovat saatavissa pdf-muodossa sarjan Internet-sivuilta.

<http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/>
ISSN 1795-150X

Toimitus

PL 18, 01301 Vantaa
puh. 010 2111
faksi 010 211 2102
sähköposti julkaisutoimitus@metla.fi

Julkaisija

Metsäntutkimuslaitos
PL 18, 01301 Vantaa
puh. 010 2111
faksi 010 211 2102
sähköposti info@metla.fi
<http://www.metla.fi/>

Tekijät Väätäinen, Kari, Lamminen, Sami, Sirén, Matti, Ala-Ilomäki, Jari ja Asikainen, Antti			
Nimeke Ympärivuotisen puunkorjuun kustannusvaikutukset ojitetuilla turvemaidella – korjuuyrittäjätason simulointitutkimus			
Vuosi 2010	Sivumäärä 57	ISBN ISBN 978-951-40-2276-0 (PDF)	ISSN 1795-150X
Yksikkö / Tutkimusohjelma / Hankkeet Joensuun toimintayksikkö; EffTech –Metsäkusteriohjelma; Less is More – Älykäs ja kustannustehokas puuhuolto niukoilla resursseilla –hanke (7333)			
Hyväksynyt Henrik Heräjärvi, PUU-ohjelman johtaja, 14.12.2010			
Tiivistelmä Suomessa turvemaiden puunkorjuu on aiemmin tehty pääosin talvella maan ollessa jäässä. Lyhyemmät ja leudommat talvet, kasvava turvemaiden korjuupotentiaali ja korjuun kausivaihtelun vähentämistarve ovat nostaneet esiin turvemaiden ympärivuotisten korjuuratkaisujen kehittämistarpeen. Suomensien merkitys on suurinta Etelä- ja Pohjois-Pohjanmaalla, jossa niiden osuus on noin 40 % koko metsämaailasta. Kantavuutta ja siten liikkuvuutta parantavat kone- ja varusteluratkaisut luovat mahdollisuuksia ympärivuotiselle puunkorjuulle, mutta selkeä kuva ympärivuotisen puunkorjuun kustannusvaikutuksista turvemaavaltaisilla alueilla puuttuu. Tutkimuksessa selvitettiin ympärivuotisen puunkorjuun kustannusvaikutuksia turvemaavaltaisilla alueilla korjuuyrittäjätasolla. Kone- ja varustelutason, talven pituuden, leimikkorakenteen, kausittaisen ja ympärivuotisen puunkorjuun sekä leimikko-ohjauksen vaikutusta korjuun kustannuksiin selvitettiin simuloimalla. Simuloinnit tehtiin kolmen tapausyrittäjän leimikkoaineistoille, jotka koostuivat todellisista, aiemmin korjatuista leimikoista. Ympärivuotinen turvemaiden puunkorjuu paransi kuljettajien työllistymistä ja koneiden käyttöasteita sekä lisäsi vuotuista korjuumäärää. Kun kolmasosa korjuukalustosta varusteltiin turvemaiden kesäaikaiseen korjuuseen, turvemaiden kertymän osuus oli mahdollista nostaa jopa 40–50 %:iin vuotuisesta kokonaishakkuukertymästä. Pehmeiden maiden kesäaikaisen korjuuvarustelun lisäkustannukset yhdessä kesäkorjuun alemman tuottavuuden kanssa tekivät turvemaiden kesäkorjuusta talvikorjuuta kalliimpaa. Toisaalta ympärivuotinen puunkorjuu ja korkeammat koneiden käyttömäärät vaikuttivat korjuun kokonaiskustannuksiin siten, että korjuun yksikkökustannukset saattoivat olla pelkkään talviseen turvemaiden korjuuseen verrattuna pienemmät. Samoilla vuotuisilla käyttötuntimäärillä kesäkorjuu oli keskimäärin 10–17 % talvikorjuuta kalliimpaa. Liikkuvuutta pehmeällä maalla eniten lisäävien varusteluratkaisujen kustannustehokas käyttö edellytti niiden korkeaa vuotuista käyttömäärää. Turvemaakohteiden kantavuuden mukainen ajoittaminen vähensi kustannuksia. Turvemaakohteiden riittävän tarkka korjuukelpoisuustieto on tärkeää kustannustehokalle korjuulle ja varustellun kaluston järkevälle hyödyntämiselle.			
Asiasanat turvemaiden puunkorjuu, korjuukustannus, simulointi, korjuuvarustelu, ympärivuotinen puunkorjuu			
Julkaisun verkko-osoite http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2010/mwp184.htm			
Tämä julkaisu korvaa julkaisun			
Tämä julkaisu on korvattu julkaisulla			
Yhteydenotot Kari Väätäinen, kari.vaatainen@metla.fi			
Muita tietoja Tutkimuksen rahoittajat: Metsäklusteri Oy, Metsäntutkimuslaitos			

Sisältö

1	Johdanto	5
1.1	Taustaa.....	5
1.2	Metsätalouden turvemaat – potentiaali ja tulevaisuus.....	5
1.3	Turvemaiden puunkorjuun erityispiirteet ja haasteet.....	7
1.4	Kesäaikaisen turvemaiden puunkorjuun ratkaisut.....	8
1.5	Kausiluonteinen vai ympärivuotinen puunkorjuu.....	10
1.6	Tutkimuksen tavoitteet.....	11
2	Aineisto ja menetelmät	11
2.1	Leimikko- ja yrittäjäaineisto.....	11
2.2	Korjuuyrittäjän puunkorjuun simulointi.....	13
2.2.1	Simulointimallin rakenne ja toiminta.....	13
2.2.2	Ajanmenekkimallit.....	16
2.2.3	Ajanmenekkimallien korjaukset turvemaille.....	18
2.2.4	Korjuukaluston varustelutasot ja koneluokat.....	19
2.2.5	Simulointiskenaariot ja satunnaisuus.....	21
2.3	Puunkorjuun kustannuslaskenta.....	22
2.3.1	Konekustannuslaskenta.....	22
2.4	Herkkyystarkastelut.....	23
3	Tulokset	24
3.1	Korjuun yksikkökustannukset.....	24
3.2	Korjuuyrittäjät.....	24
3.2.1	Korjuuyrittäjä A (kertymän ka. 116 m ³ /ha, runkokoon ka. 0,175 m ³).....	24
3.2.2	Korjuuyrittäjä B (kertymän ka. 86 m ³ /ha, runkokoon ka. 0,135 m ³).....	26
3.2.3	Korjuuyrittäjä C (kertymän ka. 53 m ³ /ha, runkokoon ka. 0,1 m ³).....	28
3.3	Turvemaiden kesäaikaisen korjuun varustelutasojen vertailua.....	29
3.4	Turvemaakohteiden korjuujärjestyksen vaikutus kustannuksiin.....	34
3.5	Kuormakoot varustelutasoille ja korjuualueille.....	35
3.6	Herkkyystarkastelut pehmeiden maiden puunkorjuun ratkaisuille.....	36
4	Tulosten tarkastelu	40
4.1	Aineisto ja menetelmät.....	40
4.1.1	Leimikkoaineisto.....	40
4.1.2	Simulointimalli.....	40
4.1.3	Turvemaiden varustelutasot ja tarkastelu.....	41
4.1.4	Kustannuslaskenta.....	42
4.2	Simulointiskenaariot.....	42
5	Päätelmät	45
	Kirjallisuus	47
	Liitteet 1-6	51

1 Johdanto

1.1 Taustaa

”Ympärivuotisen puunkorjuun kustannusvaikutukset ojitetuilla turvemailla – korjuuyrittäjätason simulointitutkimus” kuului ”Less is More – Älykäs ja kustannustehokas puuhuolto niukoilla resursseilla” hankkeeseen, jonka toteutuksesta vastasivat Metsäntutkimuslaitos ja KCL. Less is more -hanke oli osa Metsäklusteri Oy:n koordinoimaa ja rahoittamaa EffTech-ohjelmaa. Ohjelman ja hankkeen kesto oli 2,5 vuotta ja hanke päättyi 30.6.2010.

Less is more -hankkeessa avaintavoitteena oli tutkia ja edistää koneellisen puunkorjuun uusia ja älykkäitä kone-, tieto- ja viestintätekniiikka- ja logistiikkaratkaisuja, jotka parantavat puunkorjuun ja -hankinnan kustannustehokkuutta suomalaisissa, erityisesti pehmeiden maiden korjuuolosuhteissa. Hankkeen tutkimusteemat jakautuivat kolmeen osahankkeeseen;

1. Päätöstukimallit korjuukonekaluston kustannus- ja energiatehokkaampaan hyödyntämiseen erityisesti kohteilla, joissa pehmeiden maiden osuus on merkittävä. (Metla)
2. Älykkäät, metsäkoneenkuljettajaa opastavat ratkaisut apuna pehmeiden maiden puunkorjuussa. (Metla)
3. Kuiduttavan puuraaka-aineen laadun hallinta ja pidennetty välivarastointi hankintaketjussa. (KCL)

Lähtökohtana puunkorjuun ympärivuotisten toimintamallien tutkimiselle turvemaavaltaisilla alueilla teollisuuden ja koneyritysten yhteisestä näkökulmasta oli ympärivuotisempi puunkorjuu ja puunhankinta teollisuudelle, metsäkoneiden käyttöasteiden kasvattaminen ja tasaisempi/ympärivuotisempi työtarjonta koneenkuljettajille sekä turvemaiden raaka-ainepotentiaalinen tehokkaampi hyödyntäminen. Tutkimukseen laaditulla puunkorjuun simulointimallilla tarkasteltiin korjuuolosuhteiden, toimintamallien ja koneiden varustelutasojen vaikutuksia puunkorjuun kustannuksiin korjuuyrittäjätasolla.

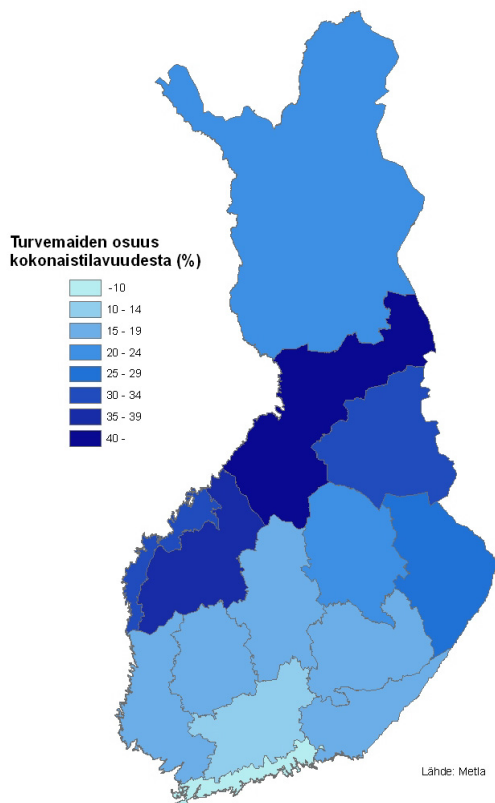
1.2 Metsätalouden turvemaat – potentiaali ja tulevaisuus

Suomessa on yli 6 miljoonaa hehtaaria ojitettuja pehmeitä, veden vaivaamia maapohjia, joista 4,8 milj. hehtaaria on soita ja 1,3 milj. hehtaaria veden vaivaamia kankaita (Metsätaloustilasto 2009). Nämä ojitetut metsäalueet tuottavat jo noin neljänneksen maamme metsien vuotuisesta kasvusta. Puumäärän suhteen turvemaametsien osuus koko metsämaasta on suurimmillaan Etelä- ja Pohjois-Pohjanmaalla, Kainuussa ja Pohjois-Karjalassa (kuva 1). Valtaosin 1960- ja 1970-luvuilla ojitetuilla alueilla puustot ovat varttuneet tilaan, jolloin kasvatushakkuut ovat ajankohdittaisia ja osin jopa kiireellisiä. Viime vuosien hakkuumäärät suometsissä ovat ylittäneet 5–7 miljoonaa kuutiometriä (Hyvän metsänhoidon... 2007). Nuutisen ym. (2007) mukaan suurimman kestävän hakkuusuunnitteen arvio suometsille kymmenvuotiskaudelle 2006–2015 on noin 12 miljoonaa kuutiometriä vuodessa, mikä on kuudesosa kaikkien metsien yhteenlasketusta suunnitellusta (Nuutinen ym. 2007, Bergroth ym. 2008).

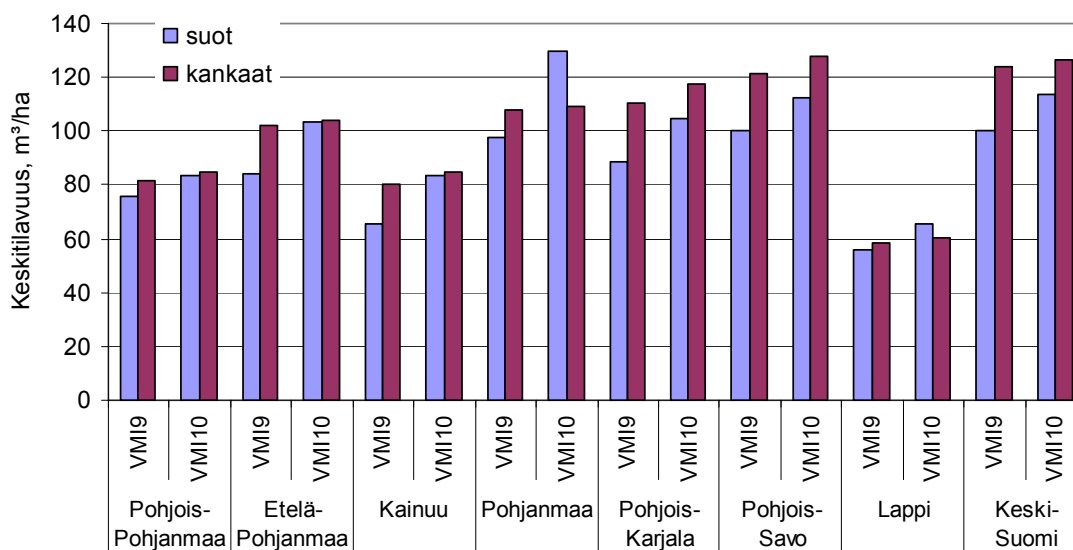
Turvemaiden kehitysluokkajakauma ja samalla metsänhoitotoimenpiteiden tarve poikkeaa kiivenäismaiden metsien tilasta ja hoitotarpeista. Kehitysluokkajakauma painottuu turvemailla voimakkaasti varhaisiin kehitysvaiheisiin, joilla on selvä hoitotarve lähitulevaisuudessa. Kasvatushakkuiden (ensi- ja muut harvennukset) kokonaispinta-alasta suometsien osuus on ollut noin

20 %, kun vastaavasti valtakunnan metsien 10. inventoinnin (VMI10) mukaan turvemaiden kasvatushakkuurästien osuus lähimmällä 5-vuotiskaudella on peräti 35 % kaikista kasvatushakkuurästeistä (VMI10). Kokonaisuudessaan ojitettujen turvemaiden ensiharvennuspotentiaali on seuraavan viisivuotiskauden aikana 22,3 milj. m³ (Bergroth ym. 2008). Ensiharvennuspotentiaalinen ainespuukertymästä on mäntyä 50 %, kuusta 11 % ja koivua 39 % (Bergroth ym. 2008). VMI10:n jälkeisenä kymmenvuotiskautena on suometsissä arvioitu metsänhoidollisen tilan kannalta tarpeelliseksi suorittaa harvennushakkuuta 1,46 miljoonan hehtaarin alueella (VMI10).

Kahden viimeisimmän VMI10:n tulosten mukaan hehtaarikohtainen puumäärän kasvu on ollut turvemailla hieman suurempaa kuin kankailla (kuva 2). Etelä-Suomessa metsämaan keskitilavuus oli soilla 119 m³/ha ja kankailla 134 m³/ha, kun vastaavasti Pohjois-Suomessa soilla oli 76 m³/ha ja kankailla 72 m³/ha (VMI10). Turvemaavaltaisimmissa metsäkeskuksissa, kuten Etelä- ja Pohjois-Pohjanmaalla sekä Kainuussa, ojitetuilla turvemailla puuvaranto hehtaaria kohden on jo lähes samaa luokkaa kuin kivennäismailla. Erityisesti näillä alueilla turvemaametsät ovat aiempaa suotuisammassa tilassa puunkorjuuta ajatellen. Myös Bergroth ym. (2008) ovat todenneet, että ojitettujen turvemaiden ensiharvennusten hehtaarikohtaiset harvennuskertymät eivät merkittävästi poikkea ensiharvennusten keskimääräisistä kertymistä, vaikkakin vaihtelu on suurempaa.



Kuva 1. Turvemaametsien puuston osuus metsämaan alasta Metsäkeskuksittain. Lähde: VMI10.



Kuva 2. Puuston keskitilavuus metsämaalla suolla ja kankaalla turvemaiden puuvarannoltaan merkittävimpien metsäkeskusten alueella VMI9 (1996–2003) ja VMI10 (2004–2008) aineistojen perusteella.

1.3 Turvemaiden puunkorjuun erityispiirteet ja haasteet

Turvemaiden korjuuolot ovat puunkorjuun kannalta haasteelliset. Kivennäismaiden korjuukohteisiin verrattaessa turvemaiden puunkorjuuta vaikeuttavat mm. maaperän huono ja suuresti vaihteleva kantavuus, pitkät metsäkuljetusmatkat, vähäinen hakkuukertymä, puuston pieni koko ja epätasainen jakautuminen leimikolla, puiden pinnallinen juuristo sekä ojaverkoston ja ajourien yhteensovittaminen (Eeronheimo 1991, Högnäs 1986, Sirén 2000, Niemi ym. 2002, Heikkilä 2007). Suometsien harvennuksissa jäljelle jäävä puusto on myös kivennäismaiden puustoa herkempiä korjuuvaurioille erityisesti sulanmaan aikaisissa hakkuissa.

Högnäsin (1997) ja Sirénin (2000) mukaan pieni runkokoko ja alhainen hehtaarikertymä ovat merkittävimmät turvemaiden puunkorjuukustannuksia kasvattavat tekijät. Maaperän heikko kantavuus on ongelma, johon on vastattu tekemällä korjuu pääsääntöisesti talvella maan ollessa roudassa. Toisena vaihtoehtona on sulan maan aikainen puunkorjuu, jolloin korjuukalustona voidaan käyttää pehmeiden maiden erikoiskoneita tai varusteltuja yleiskoneita. Korjuukohteelle soveltumattomalla kalustolla operoidessa huonoissa kantavuusolosuhteissa aiheutetaan tarpeettomasti korjuuvaurioita muun muassa syvine ajourineen ja pystypuiden rikkoutuneine pintajuurineen. Huonolla korjuujäljellä on myös yhteys korjuun ja puuntuotannon kokonaiskustannuksiin, sillä lopulliset kustannukset paljastuvat vasta lisättäessä korjuun välittömiin kustannuksiin korjuun maaperälle, puustolle ja ojille aiheuttamat vauriot.

Hyvissä talvioloissa, kun maa on routaantunut ja lumikerros riittävä, korjuu voidaan tehdä yleiskalustolla. Onnistuneen talvikorjuun edellytyksenä pidetään joko 20 senttimetrin routakerrosta lumettomassa maassa tai 40 senttimetrin lumipeitettä (Airavaara ym. 2008). Merkittävien suon talviaikaisen kulkukelpoisuuden selittäjä on roudan syvyys. Roudan muodostumista ajatellen ratkaisevina tekijöinä ovat pakkassumma sekä lumipeitteen paksuus. Mikäli lumipeite on paksu, se toimii routaantumista vähentävänä eristeenä. Toisaalta lumi lisää myös kantavuutta, vaikka routaa ei olisikaan (Niemi ym. 2002). Myös talvella kantavuus vaihtelee säätilan mukaan. Jos lauhat ja sateiset talvet yleistyvät, turvemaiden potentiaalin hyödyntäminen ei pelkätään talvikorjuuna onnistu.

Sulan maan aikaisessa puunkorjuussa suon kulkukelpoisuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat puiden juuriston ja pintakasvillisuuden muodostaman vahvistusverkon lujuus, pohjaveden taso, turpeen syvyys ja kerroksellisuus sekä turpeen laatu ja maatuneisuus (Rummukainen 1984, Ala-Ilomäki 2005, Airavaara ym. 2008). Puuston määrä hehtaarille on osoittautunut erääksi parhaimmista sekä myös käytännössä mahdollisista keinoista ennustaa kesäkorjuukohteiden kantavuutta ja raiteistumista (Ala-Ilomäki 2005, Airavaara ym. 2008). Runsaspuustoisilla kohteilla juurimatto on vahva ja kantava sekä runsaan puuston ja suuremman haihdunnan vuoksi turve on useimmiten kuivempaa ja kantavampaa. Lisäksi runsaan puuston myötä hakkuukertymä on yleensä suuri, jolloin maanpintaa vahvistavia hakkuutähteitä kertyy enemmän (Airavaara ym. 2008). Kantavuusvaihtelu voi olla kuitenkin suurta leimikon sisällä suurelta osin juuri puuston epätasaisen jakautumisen ja ojien kuivatusvaikutuksen vuoksi. Kesäaikaisen puunkorjuun onnistumiseen turvemaidella voidaan vaikuttaa pitämällä ojat ja ojaverkostot hyvässä kunnossa sekä sijoittamalla kokoojaurat kantavimpiin paikkoihin. Pitkät sateettomat jaksot voivat myös parantaa turvemaiden kantavuutta kesäaikaisessa puunkorjuussa (Ala-Ilomäki 2006). Toisaalta runsaat sateet myös heikentävät nopeastikin kesäkorjuukohteen korjuukelpoisuutta (Airavaara ym. 2008). Korvissa ja turvekankailla raiteenmuodostus ei ole yhtä voimakasta kuin rämeillä ja nevoilla (Saarilahti 1997).

1.4 Kesäaikaisen turvemaiden puunkorjuun ratkaisut

Kivennäismaita pienipuustoisemmat ja harvennusvaltaiset turvemaakohteet soveltuvat hyvin harvennuskokoluokan hakkuukoneille. Mäkelän (1990) tutkimuksessa turvemaiden kesäaikaisissa harvennuksissa pienet hakkuukoneet olivat suuria koneita kilpailukykyisempiä, vaikka hakkuun tuottavuus oli pienempi. Turvemaiden kesäaikaisessa korjuussa käytössä onkin ollut pääsääntöisesti harvennuskokoluokan koneita (omapainoltaan alle 14 tonnia), joissa on voinut olla lisänä pehmeiden maiden telavarustelu (Lamminen ym. 2010).

Lähikuljetus on turvemaiden puunkorjuun keskeisin ongelma sekä korjuukustannusten että korjuujäljen osalta (Sirén 2000). Kivennäismaita alhaisemmat hehtaarikertymät, pidemmät lähikuljetusmatkat sekä ongelmat ojien ylityksissä pudottavat lähikuljetuksen tuottavuutta ja siten lisäävät korjuukustannuksia (Sirén 2000). Sulanmaan aikainen maanpinnan heikko kantavuus ja raiteistumisherkkyyys pienentävät usein myös kuormakokoja 10–30 % verrattaessa talviseen kovan maan aikaiseen korjuuseen hyvissä kantavuusolosuhteissa (Lamminen ym. 2010). Sulan maan aikana korjuutyön ajanmenekki on keskimäärin hieman suurempi kuin talvella. Pienempi ajonopeus, pehmeiden kohtien havutus ja ojien ylitykset lisäävät ajanmenekkiä noin 5–15 % verrattuna talvikorjuuseen. Lamminen ym. (2010) haastatteleminen yrittäjien mukaan myös polttoaineen kulutus kasvaa 10–50 % sulan maan aikana talviaikaan verrattuna.

Telamaasturit ja perävaunulla varustetut maataloustraktorit ovat osoittautuneet kannattamattomiksi koneiksi turvemaiden korjuussa. Pieni kuormatila ja suhteellisen vähäinen vuotuinen käyttömäärä ovat merkittävimmät tekijät kuormatraktoreita kalliimpaan kustannustasoon (Niemi ym. 2002, Sirén 2005). Terästelastoalustainen keskikokoinen kuormatraktori, kuten ProSilva 15-4 ST, tarjoaa uuden mahdollisuuden turvemaiden ympärivuotiseen tehokkaaseen korjuuseen.

Turvemaavarusteltu keskikokoinen kuormatraktori on yleisin korjuukone turvemaiden kesäaikaiseen lähikuljetukseen (Sirén 2005, Lamminen ym. 2010). Lähtökohtana yleiskoneiden käytölle on ollut peruskoneen parempi ja ympärivuotisempi työllistyminen sekä niiden soveltuvuus harvennuksille ja päätehakkuille (Sirén 2005, Airavaara ym. 2008). Yleiskoneiden varustelu turvemaille perustuu tätä nykyä kantavien telojen sekä lisäpyöräparien käyttöön (Airavaara ym. 2008, Lamminen ym. 2010).

Tasaiset ja pehmeät turvemaalustat sopivat paremmin teloilla kuin pelkillä pyörillä varustetuille koneille. Telojen avulla saadaan pyöriä suurempi kosketuspinta ja myös kuormitus jakautuu tasaisemmin kosketuspinnalle (Sirén 2005). Turvemaalla toimittaessa ratkaisevaa on kantavan pintamaan ja juuriverkoston säilyminen eheänä (Ala-Ilomäki 2005, Sirén 2005, Airavaara ym. 2008). Kantavan kerroksen rikkouduttua raiteistuminen lisääntyy nopeasti. Pintakerroksen kestävyys voidaan vaikuttaa minimoimalla ajokertoja, ajamalla jo ajetun raiteen vierestä, käyttämällä pintapaineita pienentäviä ja kulkua tasaavia telaratkaisuja sekä käyttämällä riittävää havutusta ajourilla (Sirén 2005, Airavaara ym. 2008).

Oikeanlaisen kaluston ja varustelun valinnan lisäksi kesäaikaisen turvemaiden puunkorjuun sujuvuuteen voidaan vaikuttaa työmaasuunnittelulla. Turvemaiden kesäkorjuun laajentuessa korjuun suunnittelu ja ohjeistus ovat keskeisiä kehittämiskohteita. Talvisilla jäätyneen maan korjuukohteilla ei ole ollut tarvetta ottaa huomioon kantavuutta, mutta sulan maan kohteilla tieto kantavuudesta on olennainen. Sulan maan aikaisen leimikon suunnittelussa tulee ottaa huomioon leimikon järkevä rajausta, kantavien maapohjien käyttö kokoojaurina, tienvarsivarastojen suunnittelu, piennarteiden rakentaminen ja käyttö jatkettuun metsäkuljetukseen, ajourien suunnittelu ja sijoittelu ojalinjoihin nähden sekä tienvarsivarastoille johtavien kokoojaurien hajauttaminen (Airavaara ym. 2008, Högnäs ym. 2009, Piennartieopas 2009). Myös korjuun ajallinen porrastaminen, jossa hakkuu tehdään useita viikkoja lähikuljetusta aikaisemmin, on ollut esillä (Airavaara ym. 2008).

Kesäaikaisen turvemaakorjuun suunnittelua ja toteutusta ovat tarkemmin kuvanneet mm. Suutari ym. (2008), Högnäs ym. (2009) sekä Lamminen ym. (2010). Kantavuusluokituksen sulan maan aikaisille turvemaahakkuille ovat Airavaaran ym. (2008) luokituksen pohjalta esittäneet Högnäs ym. (2009). Turvemaiden kantavuusluokitus on käytössä Metsähallituksella ja muutamilla suurilla metsäyhtiöillä. Korjuukoneiden kuljettajien suurta merkitystä työn sujuvuuteen ja korjuujälkeen turvemaiden kesäaikaisessa korjuussa ei voi liikaa korostaa. Kuljettajien työsuoritusta ja päätöksentekoa helpottamiseksi ollaankin etsimässä ja tutkimassa kuljettajaa opastavaa teknologiaa (Asikainen ym. 2010).

1.5 Kausiluonteinen vai ympärivuotinen puunkorjuu

Puunkorjuu on Suomessa perinteisesti ollut kausiluonteista korjuun painottuessa syys- ja talvi-ajalle. Pennanen ja Mäkelän (2003) mukaan toiminnan kausivaihtelusta aiheutui puuhuollolle noin 100 milj. euron ylimääräiset kustannukset vuodessa. Pääsyyinä ovat sulan maan ajan, erityisesti kelirikkokauden aiheuttamat rajoitteet puunkorjuussa ja sen kaukokuljetuksessa. Leutojen talvien yleistyminen on omiaan voimistamaan kausivaihtelua (Pennanen ja Mäkelä 2003). Kausiluonteisuus aiheutuu suurelta osin säätilan ja vuodenaikojen vaikutuksista puunkorjuuseen, puutavaran varastointiin ja puutavaran kaukokuljetukseen.

Puunhankinnan kausiluonteisuus johtaa metsäkoneiden vajaakäyttöön ja työvoiman työsuhteiden katkoihin. Kärhän ja Peltolan (2004) mukaan seisokkien aikana moni metsäkoneen kuljettaja hakeutuu töihin muualle, kuten esimerkiksi maanrakennusalalle. Puunkorjuun kausittaisuus on ollut erityisen selvää alueilla, joissa suomettien osuus korjatusta puumäärästä on ollut merkittävä. Näillä alueilla kalustokapasiteetti on jouduttu määrittämään talven korjuuhuipun mukaisesti. Sulan maan aikaan kalusto on vajaakäytössä ja kaikille kuljettajille ei ole tarjolla työtä. Tilastojen mukaan talvikuukausina keskimäärin käytetystä puunkorjuukalustosta vain noin 60–65 % on käytössä kevät- ja kesäkuukausina (huhti-syyskuu) (Metsätilastollinen vuosikirja 2009). Kaluston ympärivuotisen käytön mahdollistavat ratkaisut tasaisivat korjuutoimintaa ja nostaisivat koneiden käyttöastetta. Tällöin tarvittava vuosisuorite saavutetaan pienemmällä konemäärällä, ja riippuvuus talven sääoloista vähenee. Kohteiden kantavuutta parantaviin pakkas-talviinkaan ei voida aina luottaa, sillä peräkkäistenkin talvien väliset vaihtelut voivat olla suuria.

Tasainen ja ympärivuotinen puunkorjuu tuo kustannussäästöjä puunhankintaan vähäisempien varastotappioiden, pienemmän varastoihin sitoutuneen pääoman, tehokkaamman korjuu- ja kuljetuskaluston käytön sekä pysyvän ja motivoituneen kuljettajakunnan kautta. Toisaalta puunkorjuun ja -hankinnan kausittaisuus tarjoaa myös mahdollisuuksia uusien toimintamallein. Puunkorjuun talvista sesonkihuippua voitaisiin tasata hyödyntämällä maanrakennuksen ja turvetuotannon työvoimaa, joilla sesonkiaika on kesällä. Henkilöstövuokrauksella osalle kuljettajakunnasta voitaisiin tarjota eri toimialojen työtehtäviä ja näin varmistaa ympärivuotinen työllisyys (Lappalainen 2009).

Puutavaran pidempiaikainen varastointi aiheuttaa puuaineksen kuivumista. Esimerkiksi TMP-prosessiin käytettävän puun kuivuminen vähentää merkittävästi kaukokuljetuksen kustannuksia (Asikainen ym. 2010). Viimeisimmät tulokset pitkään varastoidun ja kuivuneen puutavaran esikäsittelystä TMP-prosessissa ja tuloksena saadusta TMP-massasta ovat olleet rohkaisevia (Asikainen ym. 2010). Erityisesti kuiduttavan metsäteollisuuden osalta puunhankinta tukeutuu jossain määrin muun muassa kesäaikaiseen lumivarastointiin puutermiinaaleissa.

Tasaisessa puunhankinnassa nopean raaka-ainekierron aikaansaamiseksi vaaditaan enemmän korjuun ja kuljetusten suunnittelu- ja ohjausjärjestelmiltä sekä varsinaiselta toteutukselta, mitkä luovat lisäkustannuksensa. Pyrittäessä pieniin varastoihin raaka-aineet saatetaan joutua kuljettamaan pienissä erissä, mikä nostaa kuljetuskustannuksia. Mäkisen ym. (1997) mukaan puunhankinnassa kuljetuserien pienuus on ongelma, johon ei ole näköpiirissä ratkaisua, varsinkin jos metsänomistajarakenne säilyy nykyisen kaltaisena.

1.6 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää eri tekijöiden vaikutuksia puunkorjuun kustannustehokkuuteen korjuualueilla, joissa turvemaiden osuus puunkorjuukohteista ja kertymästä oli suuri. Tarkasteltavina olivat:

1. korjuun kausittaisuus/ympärivuotisuus
2. talven pituuden eli kantavan korjuuajan vaihtelu
3. kaluston varustelutaso kantavuuden suhteen sekä
4. leimikoiden järjestäminen ja ohjaaminen korjuuseen kantavuuden mukaan.

Tarkastelut tehtiin tutkimukseen laaditulla puunkorjuun simulointimallilla koneyrittäjätasolla. Lisäksi herkkyystarkastelua tehtiin koneiden käyttötuntimäärien, varustelutasojen ja kesäisen lisäajanmenekin suhteen turvemaiden puunkorjuuseen soveltuvalla yleiskone- ja erikoiskonekalustolla. Herkkyystarkastelu suoritettiin deterministisesti ilman operaatioiden simulointia.

2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Leimikko- ja yrittäjäaineisto

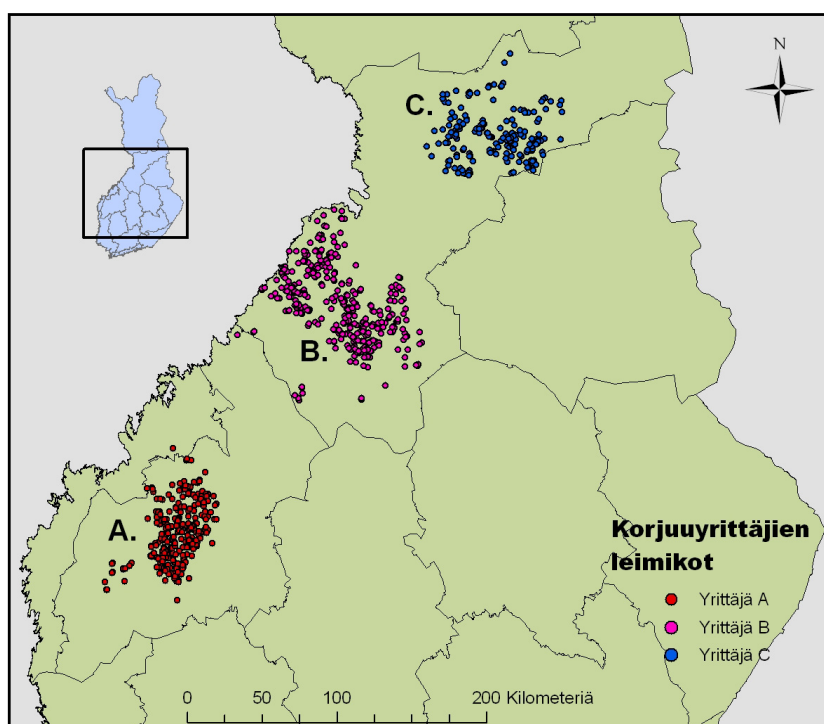
Tutkimuksen perusleimikkoaineisto koostui UPM Metsän, Metsäliiton ja Stora Enso Metsän korjuuhistoriatiedoista vuosilta 2004 ja 2007. Perusleimikkoaineisto rajautui Etelä- ja Pohjois-Pohjanmaan alueille, joissa ojitettujen turvemaametsien osuus metsätalouden pinta-alasta on suuri. Aineistosta poimittiin korjuuyrittäjiä, joilla kaluston koko vastasi tutkimukseen valittua yrittäjäkokoaa. Tästä yrittäjäotoksesta karsittiin yrittäjät, joilla ei ollut kyseisinä vuosina riittävästi korjuukohteita. Valinnassa pyrittiin vaikuttamaan alueelliseen sijaintiin ja sitä kautta turvemaiden suhteeseen yrittäjän korjatuista leimikoista. Simulointitutkimukseen tuli lopullisesti valittua kolme yrittäjää, joiden korjuukohteiden sijainnit on esitetty kuvassa 3.

Yrittäjävalinnan jälkeen korjuuyrittäjien korjuuhistoriaa selvitettiin haastatteluin kyseisten vuosien ajalta. Haastattelussa käytiin läpi kaluston koko sekä koneiden siirtojen toteutus. Tämän lisäksi olennaisena tietona kysyttiin turvemaavalttaisten korjuukohteiden osuutta vuotuisesta kokonaiskorjuumäärästä sekä turvemaakorjuun ajoittumista korjuuvuodelle. Vaikka yrittäjillä B ja C oli kolmen sijaan kaksi kuormatraktoria sekä yrittäjä B käytti yhden sijaan kahta siirtoajoneuvoa, simuloinneissa puunkorjuu perustui kaikilla valituilla yrittäjillä kolmen korjuuketjun (3 hakkuukonetta ja 3 kuormatraktoria) ja yhden koneenkuljetusauton toimintarakenteeseen.

Leimikkoaineistot sisälsivät korjuulohkoittain seuraavat tiedot: sijainti P-/I-koordinaatteina, korjuuyrittäjä, hakkuuajankohta, leimikkotunnus, hakkuutapa, korjuukelpoisuus, hakkuumäärä, puulaji- ja puutavaralajikohtainen hakkuumäärä, metsäkuljetusmatka, pinta-ala sekä runkopoisumat. Näitä tietoja käytettiin simuloinnissa muun muassa leimikoiden välisten etäisyyksien ja siirtymisaikojen laskennassa, leimikoilla operoivien koneiden ajanmenekkien laskennassa sekä korjuukoneiden ohjauksessa kullekin leimikolle. Hakkuukohteista ei ollut saatavilla maalajitietoa ts. tietoa siitä, oliko kohde ollut turvema- vai kivennäismaakohde. Tämä tieto ennustettiin leimikkokohtaisesti päättelyketjulla, jossa hyödynnettiin sekä leimikkotunnuksia että yrittäjiltä saatua tietoa. Leimikoista määritettiin turvemaiksi osuus, jonka yrittäjät kertoivat turvemaiden

osuudeksi kyseisten vuosien korjuukertymästä. Turvemaaleimikoiden valinta kohdistui lähes yksinomaan talviaikaisiin korjuukohteisiin ja niistä enimmäkseen harvennuksiin. Valinta painotui hehtaarikertymiltään keskimääräistä pienempiin sekä metsäkuljetusmatkaltaan pidempiin korjuukohteisiin. Osa turvemaaleimikoiksi valituista kohteista sisälsi myös kantavan maan korjuulohkoja.

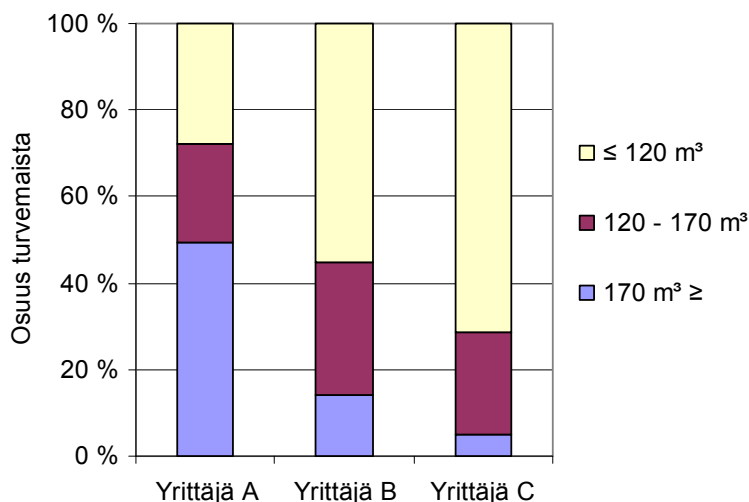
Tutkimukseen valittujen korjuuyrittäjien korjuukohteiden keskitunnukset on esitetty taulukossa 1. Korjuukohteiden ominaisuustiedot muutoin ovat leimikkoaineistosta laskettuja keskiarvoja lukuun ottamatta leimikoiden välistä siirtomatkaa ja konekohtaista vuosittaista siirtomäärää, jotka ovat simuloinneista kerättyjä keskimääräisiä arvoja.



Kuva 3. Tutkimukseen valittujen korjuuyrittäjien leimikoiden sijainnit.

Taulukko 1. Korjuukohteiden keskimääräiset ominaisuustiedot korjuuyrittäjittäin.

	Yrittäjä A	Yrittäjä B	Yrittäjä C
Leimikkokokoo, m ³	334	498	270
Leimikon pinta-ala, ha	2,9	5,8	5,1
Turvemaaleimikoiden osuus, %	16,3	22,2	33,4
Keskirunkokokoo, m ³	0,175	0,135	0,1
Metsäkuljetusmatka, m	269	340	354
Kertymä, m ³ /ha	116	86	53
Lehtipuuosuus, %	23	33	12
Ksm. leimikkosiirtymä, km	24	35	27
Ksm. siirtomäärä, kpl/kone/vuosi	118	62	93



Kuva 4. Tutkimusyrittäjien korjaamien turvemaaleimikoiden luokitus kokonaispuuston suhteen. Luokitus perustuu Högnäsin ym. (2009) turvemaiden kantavuusluokkajakoon.

Korjuuyrittäjien korjuukohteiden keskiarvotunnukset kivennäismaille sekä turvemaille korjuukelpoisuusluokittain on esitetty liitteessä 1. Simulointiskenaariot noudattavat läheisesti kunkin yrittäjän leimikoiden keskimääräistä tilaa, vaikka turvemaakohteiden määrä vaihteli skenaariotasolla.

Kuvassa 4 turvemaaleimikot on luokiteltu Högnäs ym. (2009) kantavuusluokituksen mukaisesti. Kantavuusluokitus perustuu tässä korjattavan kohteen kokonaispuuston määrään korjuulohkotasolla. Leimikon korjuulohkoista kokonaispuuston määrältään pienin lohko määräsi leimikon lopullisen kantavuusluokituksen. Kokonaispuustoluokitus oli pohjana puunkorjuukaluston ja varustelutason valinnalle.

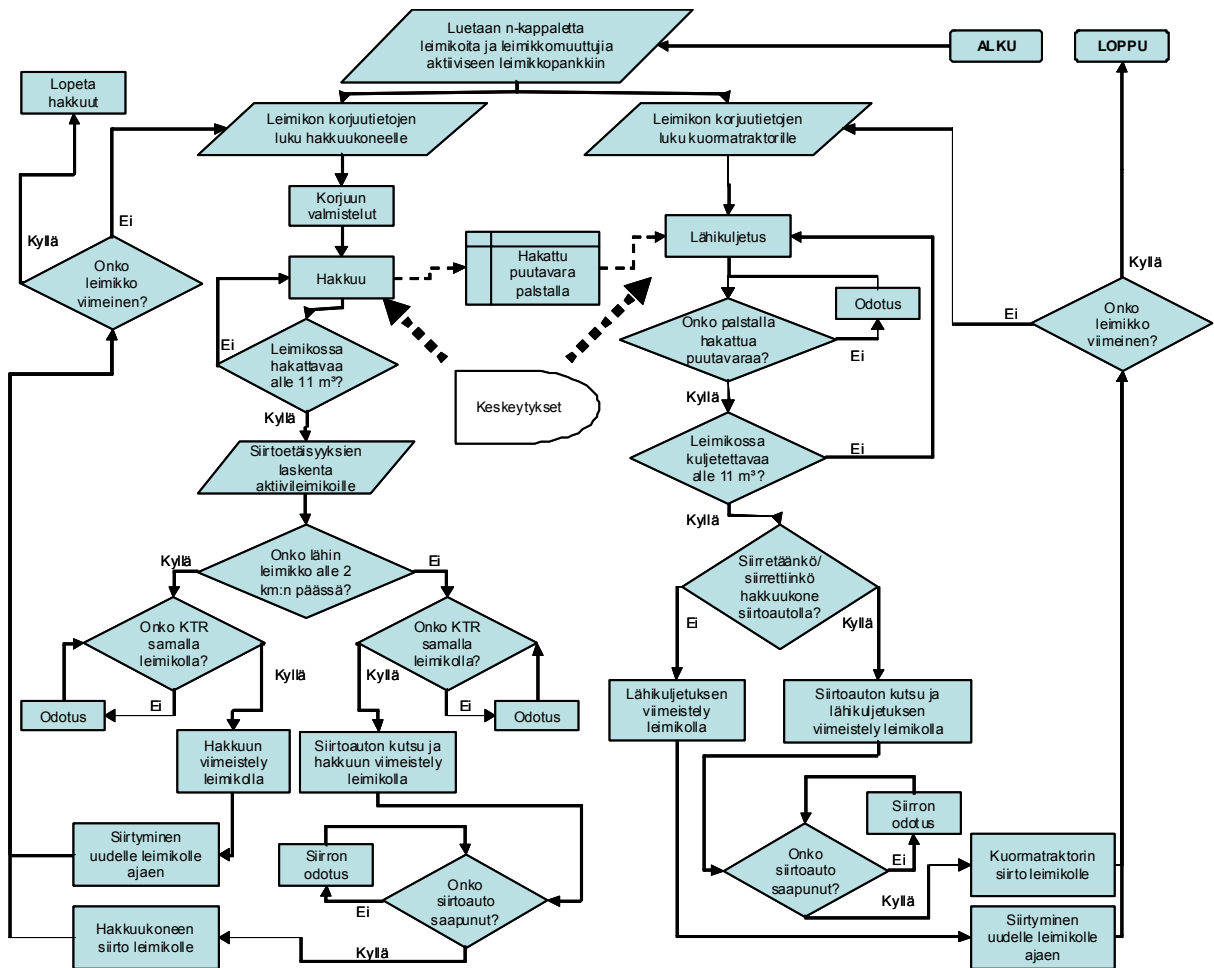
2.2 Korjuuyrittäjän puunkorjuun simulointi

2.2.1 Simulointimallin rakenne ja toiminta

Koneellisen puunkorjuun simulointimalli on laadittu WITNESS -simulointiohjelmalla (WITNESS 1998). Metsäklusteri Oy:n rahoittamassa Less is more- hankkeessa käytetty puunkorjuun simulointimalli on päivitetty versio (2.01) edellisestä kehitysversiosta (1.01), jota käytettiin ”Kohti kustannustehokkaampaa puunkorjuuta – Puunkorjuuyrittäjän uusien toimintamallien simulointi” -tutkimuksessa (Väättäinen ym. 2008).

Less is more -hankkeeseen modifioitu puunkorjuun simulointimalli perustui kolmen korjuuketjun ja yhden siirtoajoneuvon puunkorjuuyrittäjään. Yrittäjän korjuuketjun koneita voitiin vapaasti muuttaa kokoluokan ja varustelutason suhteen sekä määrittää koneiden leimikkoallokointia skenaariokohtaisesti. Tässä tutkimuksessa turvemaiden kesäaikaiseen korjuuseen käytettiin yhtä korjuuketjua kolmesta. Koneyrittäjän korjuuketjun koneet olivat sidoksissa toisiinsa siten, että tietyn korjuuketjun kuormatraktori seuraa ketjuun kuuluvaa hakkuukonetta ja kuljettaa sen

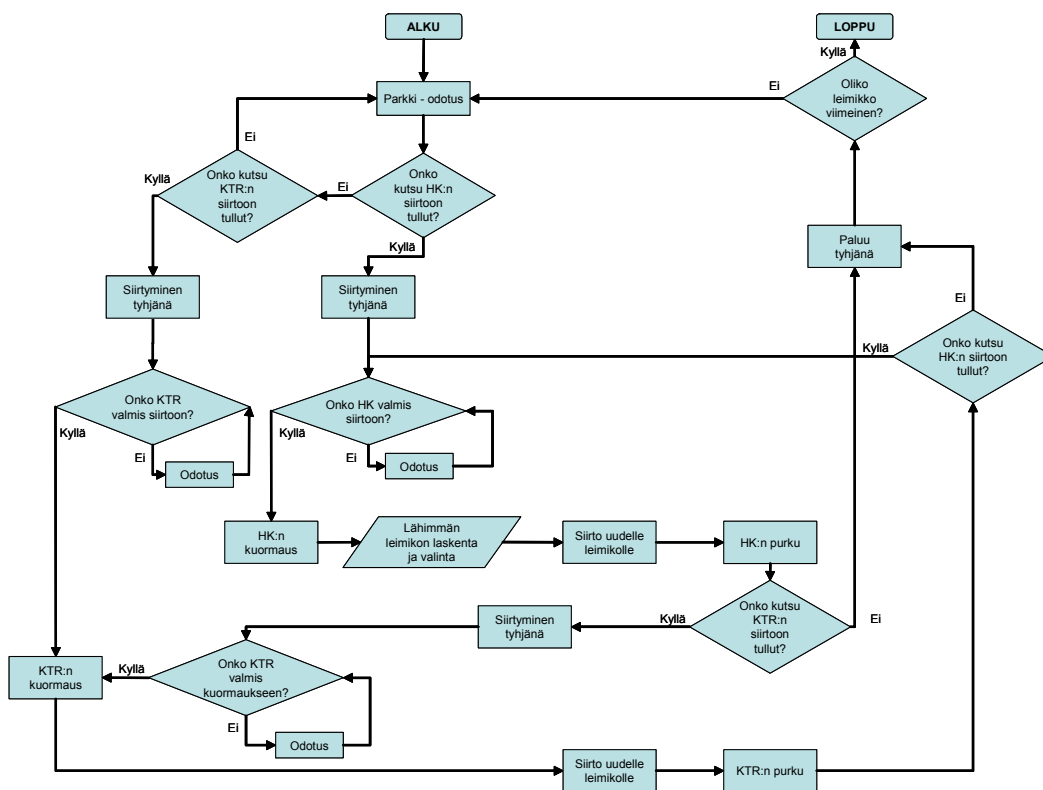
hakkaaman puun. Korjuun edetessä koneiden tuottavuuseroista aiheutunut epätasapaino korjattiin mallissa mukautuvalla työvuorojärjestelyllä: hakkuukoneen suurempi hakkuutuotos kompensoitiin kuormatraktorille määrätetyllä pidemmällä työvuorolla. Simulointimallissa otettiin huomioon myös toisensuuntainen tuottavuusero. Silloin hakkuukone saattoi hakata kahta vuoroa ja kuormatraktori ajaa yhtä vuoroa korjuutilanteen mukaisesti. Talviaikana puunkorjuu tapahtui pääsääntöisesti kahdessa vuorossa ja muuna aikana (kelirikko- ja kesäkorjuu-aika) yhdessä vuorossa. Korjuuketjun toiminta simulointimallissa on esitetty kuvan 5 toimintakaaviossa.



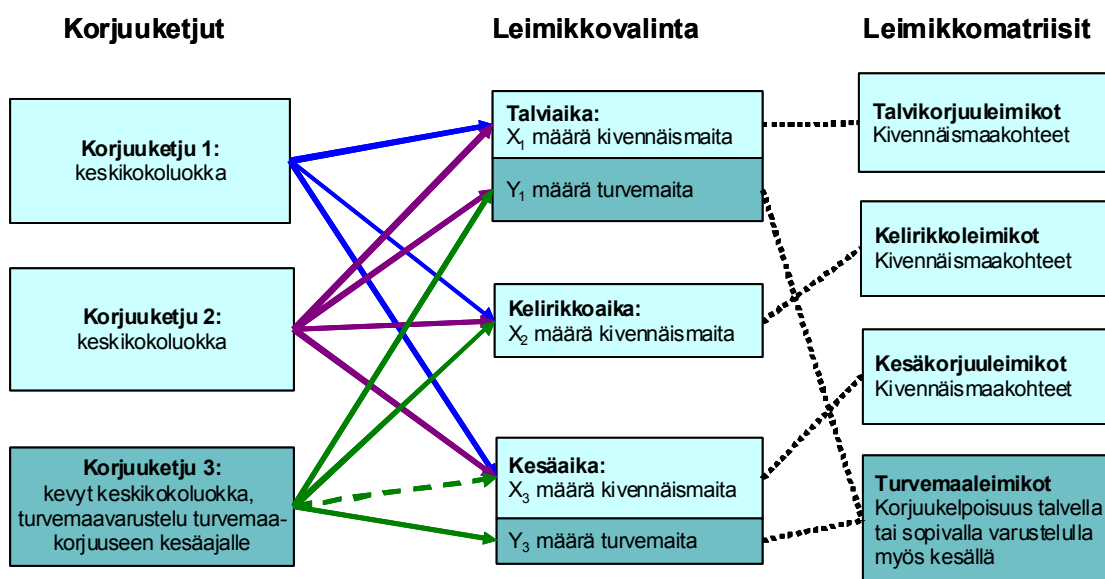
Kuva 5. Hakkuukone – kuormatraktori ketjun toimintakaavio puunkorjuun simulointimallissa.

Metsäkoneiden siirto tapahtui korjuuyrittäjän omalla siirtoajoneuvolla, jota ajoi yrittäjä tai huoltomies. Koneenkuljetusajoneuvo kutsuttiin leimikolle, kun hakkuukoneen tai kuormatraktorin työsuoritetta leimikolla oli jäljellä 10 m³. Jos siirtoajoneuvo oli jo varattu tai tekemässä kone-siirtoa, siirtoajoneuvo saapui paikalle käynnissä olevan tehtävän päätyttyä. Hakkuukoneiden siirto ennen kuormatraktoreita oli etusijalla tilanteessa, jossa siirtoa tarvitsi useampi kone samanaikaisesti. Metsäkoneiden kuormaaminen kuljetusalustalle ja purkaminen sieltä määritettiin kukin kestämään 20 minuuttia. Siirtoauton nopeus määritettiin puutavara-autojen kaukokuljetus-tutkimuksen nopeusmallien avulla (liite 2). Keskimäärin alle kahden kilometrin leimikkosiirty-mät toteutettiin metsäkoneella ajaen. Näiden siirtojen osuus kaikista siirroista oli noin 10 %. Koneenkuljetusajoneuvon toiminta on esitetty kuvan 6 toimintakaaviossa.

Leimikoiden korjuun ketjutusta mukaillen puunkorjuun simulointimalliin oli asetettu konesiirto- ja minimoiva toiminto, jossa etsittiin seuraava lähin vapaana oleva ja korjuuketjulle soveltuva leimikko. Lähin leimikko etsittiin yrittäjän työmääräkseen kuuluvista leimikoista (aktiivinen leimikkomatriisi), joiden määrä vaihteli kahdesta kuuteen simuloinnin tilan mukaan. Yrittäjän aktiiviseen korjuukohdematriisiin leimikoita luettiin perusleimikkomatriiseista, joita oli neljä: talvileimikot, kelirikolleimikot, kesäleimikot ja turvemaaleimikot (kuva 7). Kolme edellistä olivat kivennäismaaleimikoita. Turvemaaleimikoita voitiin korjata joko talvella tai kesällä riip-puen kaluston varustelutasosta sekä maaston kantavuusluokituksesta. Perusleimikkomatriisien leimikoiden korjuujärjestys oli mahdollista järjestää puuta jalostavan teollisuuden tarpeen mu-kaisesti. Tutkimuksessa leimikkojärjestys pidettiin käytännössä toteutuneen korjuujärjestyksen mukaisena. Kuvassa 7 on havainnollistettu korjuuketjujen ja leimikoiden kohdentaminen.



Kuva 6. Koneenkuljetusajoneuvon toimintakaavio puunkorjuun simulointimallissa.



Kuva 7. Esimerkki korjuuketjujen ja leimikoiden kohdentamisesta simulointimallissa. Korjuuketjun koneet ohjattiin niille sopiville leimikoille kunkin simulointiskenaarion mukaisen asetusten määrääminä.

2.2.2 Ajanmenekkimallit

Simulointimallissa hakkuutyön sekä metsäkuljetuksen ajanmenekkimallit koostettiin päätyövaihekohtaisista malleista, jotka on kerätty Kuiton ym. (1994), Sirénin (1998), Ryytäsen ja Rönkön (2001), Väkevän ym. (2001), Väätäisen ym. (2005a) ja Nurmisen (2006) tutkimuksista. Edellä mainitut päätyövaihekohtaiset ajanmenekkimallit on esitetty kootusti Väätäisen ym. (2007) tutkimuksessa. Hakkuukoneen sekä kuormatraktorin ajanmenekkimallit perustuvat pääosin puunkorjuun yleiskonekokoluokkaan ja ne edustavat kantavien kivennäismaiden keskimääräisiä korjuuolosuhteita. Hakkuutyön ajanmenekkimalli laskee runkokoon ja hehtaarikohtaisen runkopoistuman avulla ajanmenekin hakatulle kuutiometrille (sekuntia/m³). Harvennushakkuille sekä uudistushakkuille oli käytössä omat ajanmenekkimallit (taulukko 2).

Metsäkuljetuksen kuutiometrikohtainen ajanmenekki lasketaan kaksivaiheisesti. Ensimmäisessä vaiheessa kuormatraktorille estimoidaan kuormakoko, johon vaikuttavat kuormatraktorin kuormatilan poikkipinta-ala, leimikon keskijäreys, puutavaran keskipituus sekä puulajijakauma. Kuormakoon laskentamallit on esitetty liitteessä 3. Kuutiometrikohtainen ajanmenekki metsäkuljetukselle lasketaan kuormatilan koon, hehtaarikertymän ja metsäkuljetusmatkan avulla. Hakkuutyön ja metsäkuljetuksen tehotyön ajanmenekkimallit on esitetty taulukossa 2 sekä ajanmenekkimalleista lasketut tuottavuuskäyräesimerkit on esitetty kuvassa 8.

Koska simuloinnin ajanmenekkimallit on koottu puunkorjuun aikaturkimuksista laadituista malleista, tehotuntiajat korjattiin vastaamaan puunkorjuun käytännön tilaa. Hakkuun tehotuntiaikaa korjattiin kertoimella 1,25 ja vastaavasti metsäkuljetuksen tehotuntiaikaa kertoimella 1,2. Konekeskeytysjakaumista määräytyneistä keskeytysajoista alle 15 minuutin keskeytykset otettiin mukaan koneiden käyttötuntiaikoihin.

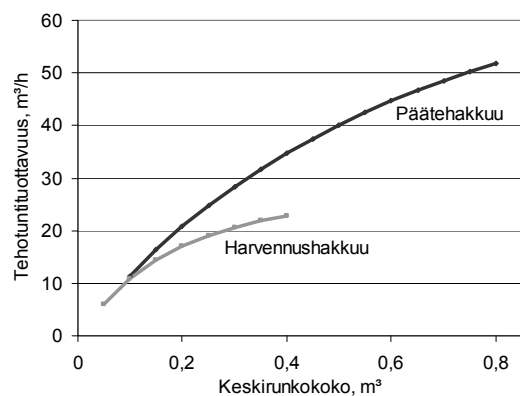
Taulukko 2. Korjuutyön tehoajanmenekkimallien tilastolliset suureet hakkuukoneelle ja kuorma-
traktorille. Mallit ovat muotoa $y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_n \cdot x_n$.

Korjuukone hakkuutapa	ja	R ²	F-arvo	p	n	Termit*	kerroin- estimaatti	Sd- error	t-arvo	p
Hakkuukone -harvennushakkuu		98,9	39580,8	<0,001	851	b ₀	1,712	0,016	106,685	<0,001
						1/V	0,446	0,002	252,525	<0,001
						T	-0,001	0,000	-35,110	<0,001
Hakkuukone -uudistushakkuut		90,1	5219,3	<0,001	1146	b ₀	0,682	0,015	45,376	<0,001
						1/V	0,500	0,005	97,038	<0,001
						T	-0,00042**	0,000	-15,367	<0,001
Kuorma- traktori -kaikki hakkuutavat		91,0	20157,2	<0,001	5996	b ₀	6,261	0,033	188,421	<0,001
						M/Ktila	0,029	0,000	191,025	<0,001
						ln(K)	-0,680	0,006	-109,410	<0,001
						Ktila	-0,046	0,002	-25,228	<0,001

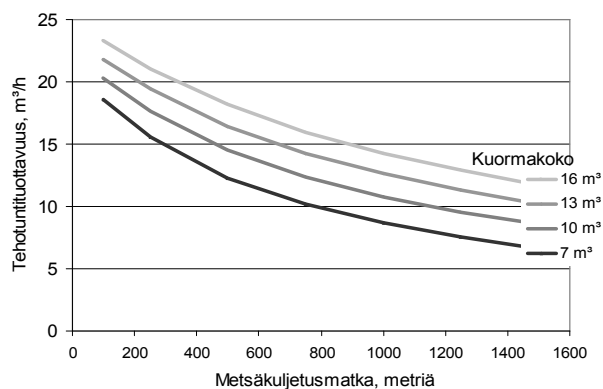
* Korjuutyön ajanmenekkimallien termit ja yksiköt:

- b₀ = vakiotermi
- V = rungon keskikoko leimikolla, m³
- T = hakkuun runkopoistuma, runkoa/ha
- M = metsäkuljetusmatka, m
- K = hehtaarikohtainen kertymä, m³/ha
- Ktila = kuormatilan koko, m³

** Alkuperäisestä Väätäisen ym. (2008) julkaisun estimaatin arvosta puuttui miinusmerkki, tässä kerroin on oikein.



a



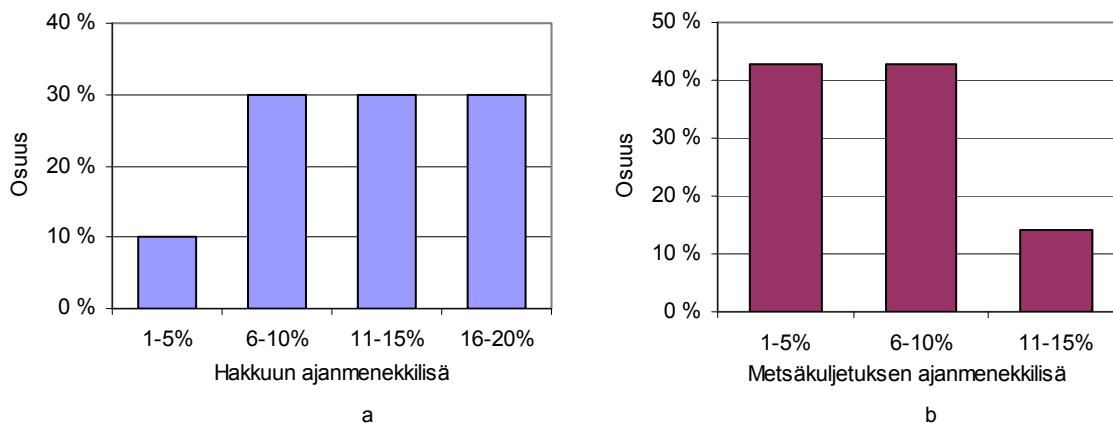
b

Kuva 8. Hakkuukoneen (a) ja kuorma-
traktorin (b) tuottavuuskäyräesimerkit tehotunnille tutki-
muksen ajanmenekkimalleilla laskettuna (metsäkuljetuksessa korjuukertymänä 100 m³/ha).

2.2.3 Ajanmenekkimallien korjaukset turvemaille

Hakkuun ja metsäkuljetuksen kantavien maiden ajanmenekkimalleja korjattiin ottamaan huomioon turvemaiden kesäaikaisen puunkorjuun erityispiirteitä. Hakkuussa ja metsäkuljetuksessa ajanmenekkilisät turvemaille perustuivat Lammisen ym. (2010) yrittäjähaastattelun tuloksiin. Hakkuun sekä metsäkuljetuksen ajanmenekkilisät saatiin kuljettajien arvioista koostetuista jakaumista, jotka on esitetty kuvassa 9. Kyseiset ajanmenekkilisäjakaumat muutettiin simulointimalliin jatkuviksi satunnaisjakaumiksi esitetylle vaihteluvälille. Metsäkuljetuksen osalta jakaukseen ei sisälly kuormakoon muutoksesta aiheutuvaa ajanmenekin muutosta. Hakkuun ajanmenekkilisä muodostuu pääosin ajouran havutuksesta sekä ajouraston suunnitteluun kuluva ajasta. Metsäkuljetuksessa lisäaikaa kului hakkuutähteiden siirtoon pehmeiköille, ojien täyttämiseen puilla, sekä lisääntyneeseen tarkkailuun pehmeällä maapohjalla ajettaessa (Lamminen ym. 2010).

Turvemaiden kesäkohteiden osalta kuormakokoa korjattiin taulukoissa 3 ja 4 esitetyillä kuormatilan täyttöasteilla. Tällöin kullakin kuormatraktorin varustelutasolla kyettiin operoimaan eri kantavuusluokkien turvemaakohteilla. Kuormakoon täyttöasteen laskenta perustui kuormatraktorin ja turvemaavarustelun kokonaismassoihin rungon etu- ja takaosassa, telaston ja renkaiden mittoihin sekä niistä laskettuihin pintapaineisiin. Kokonaismassalla ja telaston pinta-alalla laskettiin keskimääräiset pintapaineet rungon etu ja takaosalle liitteessä 4 esitetyillä laskukaavoilla. Kuormatilan täyttöasteet laskettiin jokaiselle kuormatraktorin varustelutasolle sekä turvemaiden kantavuusluokalle (Högnäs ym. 2009). Kivennäismaakohteilla kuorman keskipainona oli 95 % laskennallisesta maksimiarvosta.



Kuva 9. Hakkuun (a) ja metsäkuljetuksen (b) ajanmenekkilisät kesäaikaisessa turvemaiden puunkorjuussa kantavan maan korjuuseen verrattuna. Jakaumat perustuvat Lammisen ym. (2010) yrittäjähaastatteluihin.

Taulukko 3. Laskennallisen kuormakoon korjausarvot kuormatraktorin eri varustelutasoille sekä turvemaakohteen kantavuusluokille. ”Parannettu” = pintapaine \leq 50 kPa, ”Kantava” = pintapaine \leq 40 kPa harvennuskoneluokan kuormatraktorille (kantavuus: 10 000 kg, kuormatilan poikkipinta-ala: 3,7 m²).

Kokonaispuuston määrä, m ³ /ha	Vaadittava kaluston suokelpoisuus	Kuormakoko laskennallisesta maksimista, %	
		”Parannettu”	”Kantava”
170 \geq	pintapaine \leq 50 kPa	90	95
120 - 170	pintapaine \leq 40 kPa	65	85
\leq 120	pintapaine \leq 30 kPa	50*	65

* arvot ylittävät hieman laskennalliset pintapainerajat

Taulukko 4. Laskennallisen kuormakoon korjausarvot kuormatraktorin eri varustelutasoille sekä turvemaakohteen kantavuusluokille. ”Parannettu” = pintapaine \leq 50 kPa, ”Kantava” = pintapaine \leq 40 kPa, ”Superkantava” = pintapaine \leq 30 kPa (10-pyöräratkaisu) yleiskoneluokan kuormatraktorille (kantavuus: 12 000 kg, kuormatilan poikkipinta-ala: 4,4 m²).

Kokonaispuuston määrä, m ³ /ha	Vaadittava kaluston suokelpoisuus	Kuormakoko laskennallisesta maksimista, %		
		”Parannettu”	”Kantava”	”Superkantava”
170 \geq	pintapaine \leq 50 kPa	85	90	95
120 - 170	pintapaine \leq 40 kPa	60	75	90
\leq 120	pintapaine \leq 30 kPa	50*	60*	80

* arvot ylittävät hieman laskennalliset pintapainerajat

2.2.4 Korjuukaluston varustelutasot ja koneluokat

Turvemaiden kesäaikaista puunkorjuuta varten kuormatraktori varusteltiin pääosin erilaisin telaratkaisuin (kuva 10). Lisäksi kantavimpaan varusteluluokkaan lisättiin pyöräpari rungon takaosan telin taakse. Hakkuukone varusteltiin kantavampaan tasoon ainoastaan korjuuyrittäjällä C, jolla kesäiset korjuukohteet turvemailla olivat kertymältään hyvin pieniä ja siten kantavuus oli heikkoa myös hakkuukoneelle (taulukko 5). Taulukossa 6 on esitetty kuormatraktorin varustelutasot ja niiden investointikustannukset pehmeiden maiden kesäaikaisessa puunkorjuussa. Superkantava (pintapaine \leq 30 kPa) varustelutaso oli käytettävissä ainoastaan kuormatraktoreiden yleiskoneluokassa.

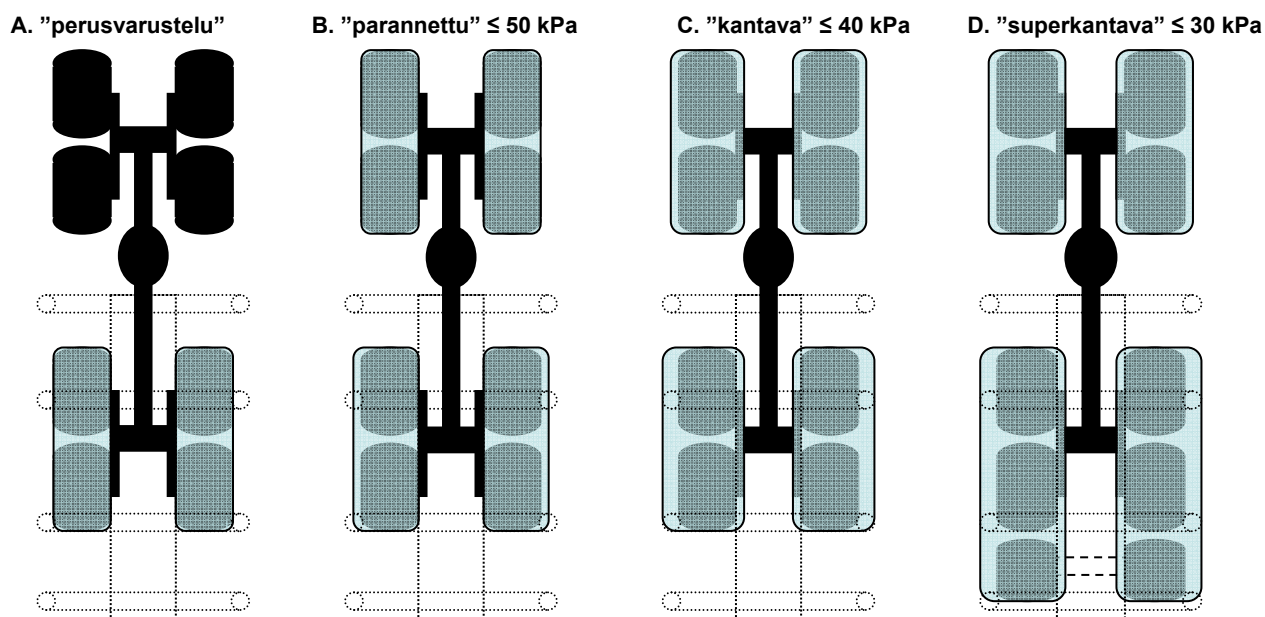
Taulukko 5. Hakkuukoneen kesäaikainen varustelutaso turvemailla korjuuyrittäjällä C. Yrittäjillä A ja B oli edessä ketjut ja takana Eco-Track -telat, jotka sisältyivät peruskoneen hankintaan. Yleiskoneluokassa rengaskokona oli 710-26,5.

Koneluokka	Varustelu (telat)		Massa, kg ja telaveveys, mm		Investointikustannus, ALV 0% Yhteensä	Yrittäjä-tarkastelut Yrittäjä
	Edessä	Takana	Edessä	Takana		
Yleiskone, 6 pyörää	Eco-Magnum	Eco-wheel-Magnum*	1772 (916)	1087 (925)	13 400	C

* pyörätela

Taulukko 6. Korjuuyrittäjien (A, B ja C) kuormatraktorin varustelutasot turvemaiden kesäkorjuussa sekä hankintahinnat harvennus- ja yleiskoneiluokassa. Rengaskoot harvennuskoneilla 710-22,5 ja yleiskoneilla 710-26,5. Huom.: Eco-Track telat sisältyivät vakiokoneen hankintahintaan.

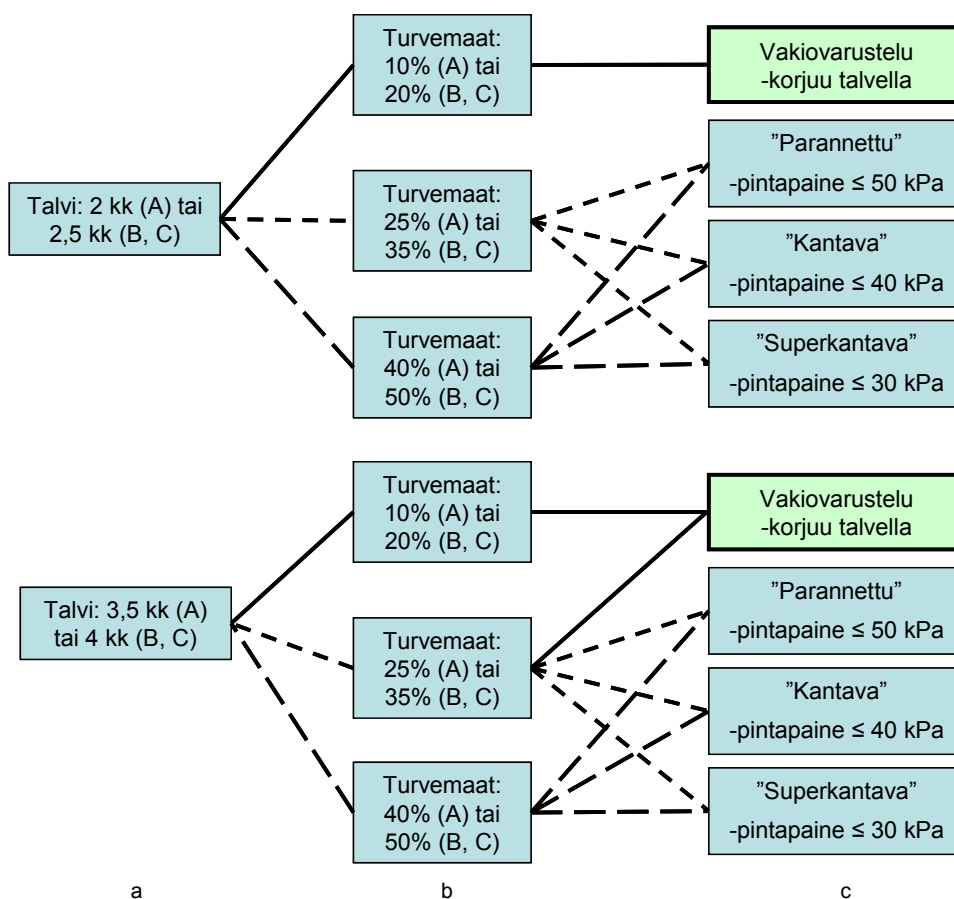
Koneiluokka ja varustelutaso	Varustelu (Telat+lisäpyörät)		Massa, kg ja telaleveys, mm		Investointikustannus, ALV 0% Yhteensä	Yrittäjä-tarkastelut Yrittäjä
	Edessä	Takana	Edessä	Takana		
Harvennuskone						
Parannettu, ≤50kPa	Eco-Track	Eco-Baltic	1528 (840)	1428 (840)	5 300	B, C
Kantava, ≤40kPa	Eco-Magnum	Eco-Magnum levennetty	1611 (916)	1763 (1023)	15 200	B, C
Yleiskone						
Parannettu, ≤50kPa	Eco-Track	Eco-Baltic	1778 (850)	1622 (850)	6 300	A
Kantava, ≤40kPa	Eco-Magnum	Eco-Magnum levennetty	1772 (916)	1946 (1023)	17 600	A
Superkantava (10-pyöräinen), ≤30kPa	Eco-Magnum	Eco-Magnum levennetty + pyöräpari	1772 (916)	2614 + 1000 (1023)	45 100	A, B, C



Kuva 10. Kuormatraktoreiden varusteluvaihtoehdot turvemaiden kesäaikaisessa puunkorjuussa. Perusvarustelu sisälsi ketjut etutelin takapyörissä ja yleiskäyttöiset harvennustelat (Eco-Track) takateleissä. Parannettuun varusteluun kuului etuteleihin harvennustelat ja takateleihin kantavat telat (Eco-Baltic). Kantavassa varustelussa oli etuteleissä kantavat telat ja takana levennetyt kantavat telat (Eco-Magnum). Superkantavassa ratkaisussa edessä oli kantavat telat ja takana telin ja lisäpyöräparin ympärille asennetut levennetyt kantavat telat.

2.2.5 Simulointiskenaariot ja satunnaisuus

Koneyrittäjien korjuun vuosisuoritteita ja korjuukustannuksia tutkittiin kolmen eri pääskenaarion avulla. Pääskenaarioissa tarkasteltiin a) talven pituuden, b) turvemaiden osuuden ja c) turvemaakaluston varustelutason vaikutusta korjuuseen kesäleimikoiden määrän vaihdellessa. Simuloinnin pääskenaariot olivat yhteydessä toisiinsa kuvan 11 esittämällä tavalla. Kuvassa esitetyt simuloinnit ajettiin kahdella eri kesäleimikkomäärällä, jotka erosivat yrittäjittäin. Yrittäjällä A talviaikaisen puunkorjuun pituudet olivat 2 ja 3,5 kuukautta (talvileimikot), kun taas yrittäjillä B ja C talven pituudet olivat 2,5 ja 4 kuukautta. Vastaavasti turvemaiden osuudet koko korjuumäärästä yrittäjällä A oli keskimäärin 10, 25 ja 40 %, kun taas yrittäjillä B ja C osuudet olivat 20, 35 ja 50 %. Jokaisessa simulointiskenaariossa talvileimikoita oli aina riittävästi tarjolla hakkuuseen. Kivennäismaapohjaisten kesäkorjuukohteiden niukkuus oli vallalla kaikissa simulointiskenaarioissa.



Kuva 11. Tutkimuksen simulointivaihtoehdot pääskenaarioittain. Talven pituus (a), turvemaiden osuus (b) ja kuormatraktorin varustelutaso (c) vaihtelivat yrittäjittäin (A, B ja C).

Kukin skenaario simuloitiin viidellä kalenterivuoden mittaisella toistolla. Toistot erosivat toisistaan satunnaistekijöiden muutosten vaikutuksesta. Kelirikkoajan kesto vaihteli normaalijakautuneesti jakauman odotusarvon ollessa keväällä 500 kalenterituntia ja syksyllä 320 kalenterituntia. Kelirikkoajakajakauman keskihajonta oli 70 tuntia. Talven pituus asetettiin skenaariokohtaisesti vakioksi (lyhyt talvi: 2 kk tai 2,5 kk, pitkä talvi: 3,5 kk tai 4 kk). Kesän pituus määräytyi jäljelle jääneestä ajasta, kun vuoden tunneista vähennettiin talvi- ja kelirikkokorjuun kestot. Skenaariokohtaiset simulointitulokset on esitetty viiden simulointiajon keskiarvoina.

Satunnaisuutta simulointiin aiheutui leimikkovalinnoista, konekeskeytyksistä, kelirikkoajan keston muutoksista sekä turvemaakorjuuketjun kesäaikaisen korjuuajan vaihtelusta. Korjuutyön keskeytykset määräytyivät teoreettisten keskeytysjakaumien perusteella. Konetyön keskeytysajoille sekä keskeytysten välisille ajoille käytettiin Väätäisen ym. (2008) esittämiä konetyön keskeytysjakaumia. Konetyön keskeytyksiin määritettiin sisältyvän kaikki korjuutyön työmaakeskeytykset, jotka eivät sisällyneet koneen teholliseen työaikaan. Keskeytykset koostuvat konerikkojen ja -huoltojen lisäksi kahvi- ja ruokatauoista sekä muista työmaakeskeytyksistä. Taulukossa 7 on esitetty konetyön keskeytysten todennäköisyysjakaumien mallit sekä niiden parametrit.

Taulukko 7. Hakkuun ja metsäkuljetuksen keskeytysjakaumien keskitunnukset sekä simuloineissa käytetyt todennäköisyysjakaumat.

Keskeytysmuoto:	Keskiarvo, h	Keskihajonta, h	Todennäköisyysjakauma
Hakkuun keskeytykset	0,33	0,60	Lognormaali
Metsäkuljetuksen keskeytykset	0,30	0,45	Lognormaali
Keskeytysten väli hakkuussa	1,64	1,32	EkspONENTTI
Keskeytysten väli metsäkuljetuksessa	2,2	1,77	EkspONENTTI

2.3 Puunkorjuun kustannuslaskenta

2.3.1 Konekustannuslaskenta

Koneiden kustannuslaskenta toteutettiin yleisesti käytetyllä metsäkoneiden kustannuslaskentatavalla, jossa koneen kiinteät kustannukset jaetaan koneen käyttöajalle (vuosille) ja muuttuvat kustannukset lasketaan kustannuksiin suoraan vuotuisen käyttötuntimäärän perusteella (Mäkelä 1984). Kustannuslaskennan kustannustaso vastasi lokakuun 2009 tasoa. Laskennassa käytettyjen kustannustekijöiden arvot esitetään konekohtaisesti (hakkuukone, kuormatraktori ja koneen kuljetusajoneuvo) liitteissä 5 ja 6.

Kesäaikaisen turvemaiden puunkorjuun varustelun telojen investointikustannus selvitettiin Metsätyö Oy:ltä ja lisäpyöräparin investointikustannus 10-pyörä kuormatraktorissa Ponsse Oyj:ltä. Kaikista tutkimuksessa käytetyistä telaratkaisuksista ei ollut valmista hintatietoa, joten alkuperäisiin telainvestointeihin on tehty hintalisäys esim. lisäveikepaloista ja niiden asennuksesta aiheutuen.

Keskimääräiset koneiden poistoajat valittiin yrittäjäkohtaisesti ja ne pidettiin vakiona jokaisessa simulaatioskenaariossa (taulukko 8). Turvemaiden kesäaikaisen korjuuvarustelun investoinnin poisto aika vastasi peruskoneen poistoaikaa ollen keskimäärin 6–7 vuotta kuormatraktoreilla.

Metsäkoneiden hankintahinnat olivat uushankintahintoja, joihin sisältyi koneiden tavanomaisen perusvarustelutason investointikustannus. Koneiden perusvarusteluihin kuuluivat myös ketjut ja harvennustelat. Päivitetyt hankintahinnat saatiin korjaamalla Väättäisen ym. (2008) tutkimuksessa esitetyt hankintahinnat Tilastokeskuksen julkaisemilla Metsäalan konekustannusindekseillä (tasona lokakuu 2009) (ks. liite 5, taulukko 20).

Taulukko 8. Korjuuyrittäjien kaluston poistoajat vuosina.

Yrittäjä	Hakkuukone (hak- kuulaite)	Kuormatraktori	Koneenkuljetusauto
A, B	5 (2,5)	6	12
C	5 (2,5)	7	12

2.4 Herkkyystarkastelut

Korjuukustannuksiin vaikuttavien tekijöiden suhteen tehtiin herkkyystarkasteluja. Turvemaa-
leimikoiden korjuujärjestyksen vaikutusta korjuukustannuksiin tutkittiin tarkemmin tilanteissa,
joissa korjuukohteet olivat kantavuuden suhteen joko järjestettyjä tai järjestämättömiä (ts. lei-
mikot satunnaisesti kantavuuden suhteen). Tarkastelu toteutettiin puunkorjuun simulointimallil-
la kullekin korjuuyrittäjälle. Taulukkolaskennan avulla tarkasteltiin turvemaiden talvi- ja kesä-
korjuun kustannuksia yleiskorjuukalustolle keskimääräisellä harvennushakkuukohteella, kun
koneiden vuotuiset käyttötuntimäärät, metsäkuljetusmatkat ja varustelutasot vaihtelivat. Lisäksi
selvitettiin turvemaiden kesäkorjuun lisäajan vaikutusta yksikkökustannuksiin. Herkkyystarkas-
teluissa oli mukana myös turvemaille erityisesti soveltuvana korjuuketjuna tela-alustainen hak-
kuukone ja kuormatraktori.

3 Tulokset

3.1 Korjuun yksikkökustannukset

Simulointiskenaarioiden tuottamat korjuun kokonaiskustannukset esitetään kuvissa korjuuyrittäjittäin. Turvemaiden kesäkorjuun varustelutasoja on käytetty tilanteissa, joissa ei ole ollut järkevästi mahdollista korjata turvemaiden puunkorjuumäärää talviseen aikaan. Turvemaiden korjuu toteutettiin siten, että heikoimmin kantavat turvemaat korjattiin kantavan talvikorjuuajan puitteissa ja kantavammat turvemaakohteet jäivät kesälle. Osassa yrittäjätapauksista on ollut mahdollista verrata samanaikaisesti talvista turvemaakorjuuta ympärivuotiseen turvemaiden korjuuseen. Skenaariovertailuissa talvi- ja kelirikolleimikoita oli aina riittävästi, kun taas kesäleimikoista oli niukkuutta. Korjuuyrittäjällä A kuormatraktorit olivat yleiskoneluokkaa (kantavuus 12 t) ja muilla yrittäjillä (B ja C) harvennuskoneluokkaa (kantavuus 10 t). Poikkeuksena oli ”superkantava” varustelutaso (< 30 kPa), joka oli yleiskoneluokkaa (kantavuus 12 t).

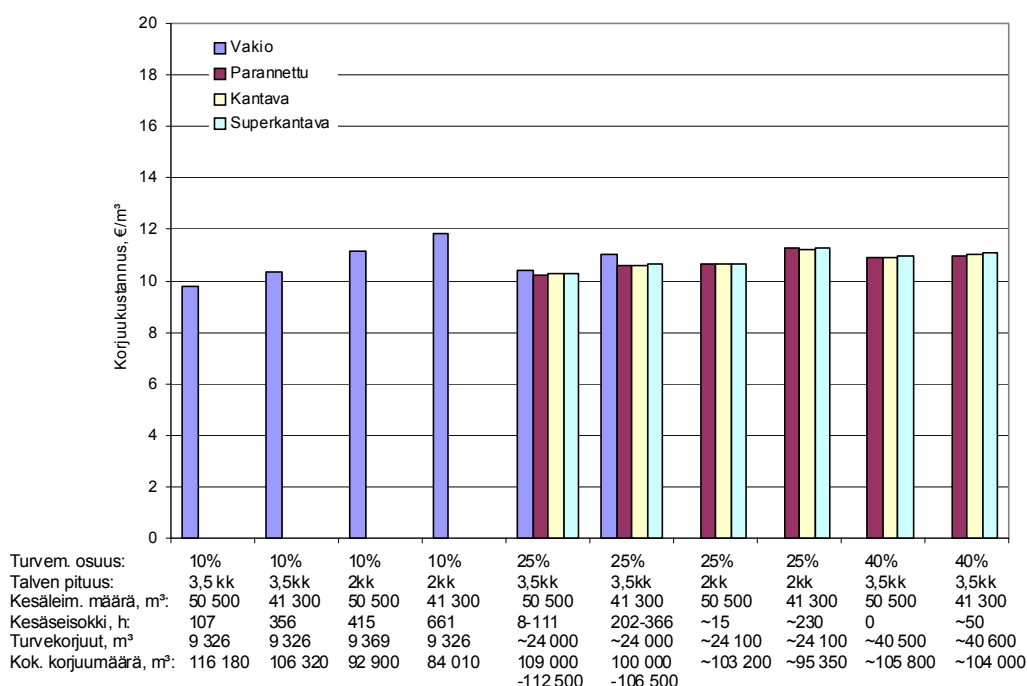
3.2 Korjuuyrittäjät

3.2.1 Korjuuyrittäjä A (kertymän ka. 116 m³/ha, runkokoon ka. 0,175 m³)

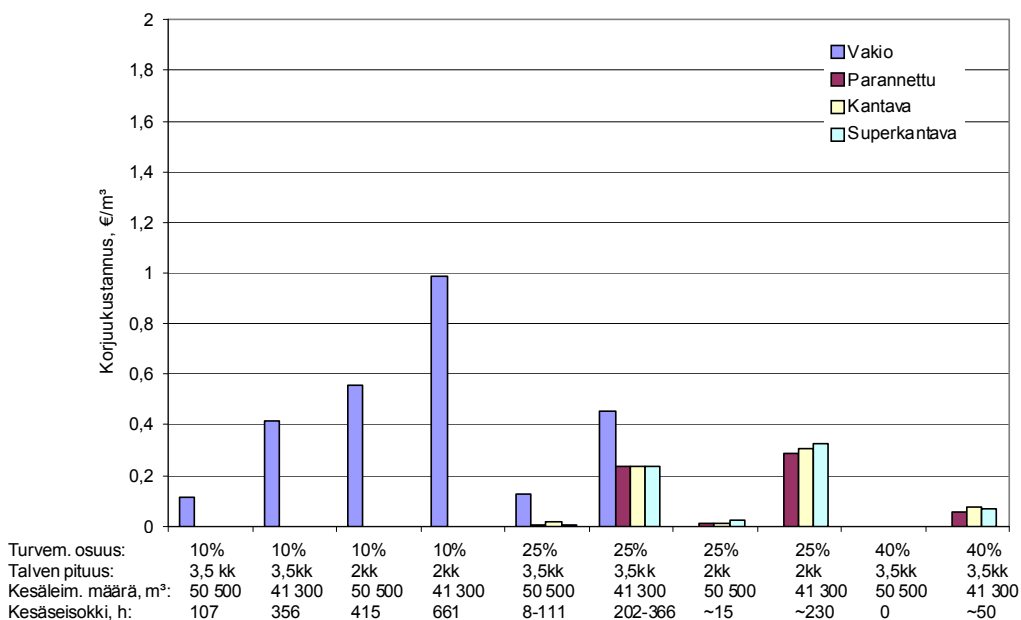
Korjuuyrittäjä A kykeni korjaamaan turvemaaleimikot talvella, kun turvemaiden korjuukertymän osuus oli 10 % ja 25 % kokonaiskertymästä (kuva 12). 25 %:n kertymän tapauksessa talvikorjuuajan oli oltava pitkä (3,5kk). Kesäkorjuuajan pituudesta ja kesäleimikkomäärästä riippuen korjuukoneelle tuli keskimäärin 107–661 työmaatunnin kesäseisokki. Kuvasta 13 havaitaan kesäseisokkijajan vaikutus palkkakustannuksiin, kun seisokkijajan työtunneilta maksetaan palkka. Turvemaakorjuutilanteissa ”10 % turvemaita” suurin vaikutus yksikkökustannusten muutokseen oli vuotuisella korjuumäärällä sekä korjuun seisokkijajalla (kuva 12).

Kun turvemaiden korjuuta koko korjuukertymästä oli noin 25 % ja talvikorjuu aika pitkä (3,5 kk), turvemaat voitiin korjata joko talvella tai ympärivuotisesti. Kesäkorjuukohteiden määrä vaihdellessa vähäisestä normaaliin ympärivuotinen puunkorjuu osoittautui keskimäärin 1,2 % ja 3,8 % edullisemmaksi toimintamalliksi kuin pelkkä talviaikainen turvemaiden korjuu (kuva 12). Varustelutasojen väliset erot olivat hyvin pieniä eikä niiden välistä paremmuutta voi esittää yksikkökustannusten perusteella. Pitkän talvikorjuuajan skenaarioissa turvekorjuukohteiden määrän kasvaessa 10 %:sta 25 %:iin, yksikkökustannukset kasvoivat vastaavasti noin 3–5 %. Toisaalta lyhyen talven skenaarioissa turvemaakohteiden kasvanut korjuumäärä pudotti yksikkökustannuksia 4–5 %. Yksikkökustannusten laskun selitti turvemaiden ympärivuotinen puunkorjuu ja korjuumäärien sekä koneiden käyttöasteiden kasvaminen. Kangasmaiden kesäkorjuukohteet ohjautuivat kahdelle korjuuketjulle ja varusteltu korjuuketju vastasi turvemaiden korjuusta kesäaikaan. Kuvasta 13 voidaan todeta myös kesän seisokkijajan palkkakustannusten merkittävä väheneminen, kun turvemaidella korjataan ympärivuotisesti.

Pitkän talvikorjuuajan vallitessa yrittäjä A kykeni turvemaavarustelun myötä korjaamaan 40 % kokonaiskertymästä turvemaiden. Yksikkökustannusten kasvuun turvemaakorjuumäärän kasvulla ei ollut suurta vaikutusta, sillä turvemaiden korjuumäärän kasvu lisäsi vuotuista korjuusuoritetta sekä takasi ympärivuotisen työskentelyn kaikille korjuukoneille. Turvemaiden talvikorjuuseen nähden vallalla ollut kesäkorjuukohteiden niukkuus poistui esimerkkiskenaarioissa turvemaiden kesäaikaisen puunkorjuun avautuessa yhdelle kolmesta korjuuketjusta, mikä loi korjuutoimintaan täystyöllisyyden (kuva 13).



Kuva 12. Korjuuyrittäjä A:n simulointiskenaarioiden tuottamat korjuun yksikkökustannukset. Varustelutasoista vakiovarustelulla turvemaat korjattiin vain talvella. Muilla kesäkorjuun varustelutasoilla turvemaiden korjuu jakautui koko vuodelle. Yksikkökustannukset sisältävät koneseisonta-ajan palkan.

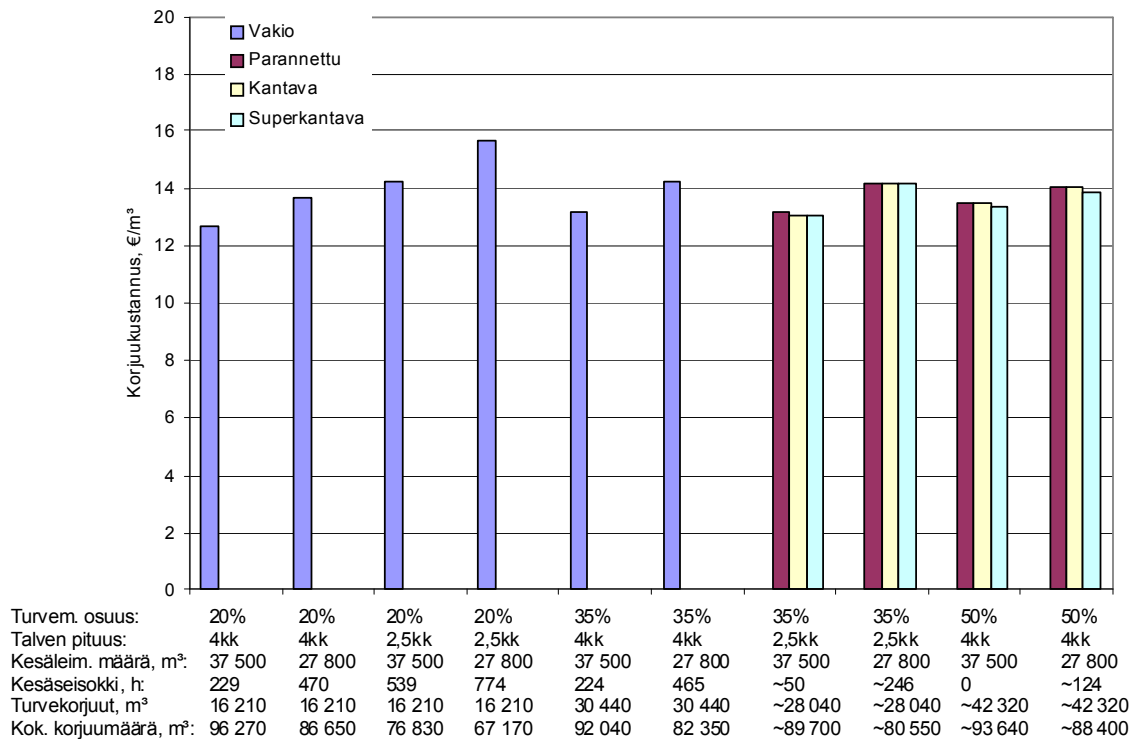


Kuva 13. Korjuuyrittäjä A:n simulointiskenaarioiden kesäajan koneseisokkien aiheuttamat palkkakustannukset, kun seisonta-ajalta maksettiin kuljettajille palkka. Kesäaikainen koneseisokki on käyttämättä jäänyt keskimääräinen työaika korjuukonetta kohden.

3.2.2 Korjuuyrittäjä B (kertymän ka. 86 m³/ha, runkokoon ka. 0,135 m³)

Myös yrittäjällä B korjuutoiminta oli kustannustehokkainta pitkän korjuutalven ja normaalin kesäleimikkokannan tilanteessa, jolloin vuotuinen korjuumäärä oli suurin. Korjuun kustannusero suhteessa lyhyeen talveen pienellä kesäleimikkomäärällä oli peräti 23 % (kuva 14). Normaalien kesäleimikkomäärän tilanteissa koneseisokkien vuoksi työaika jäi pitkän talven skenaariossa käyttämättä konetta kohden keskimäärin 229 tuntia ja lyhyen talven skenaariossa 539 tuntia.

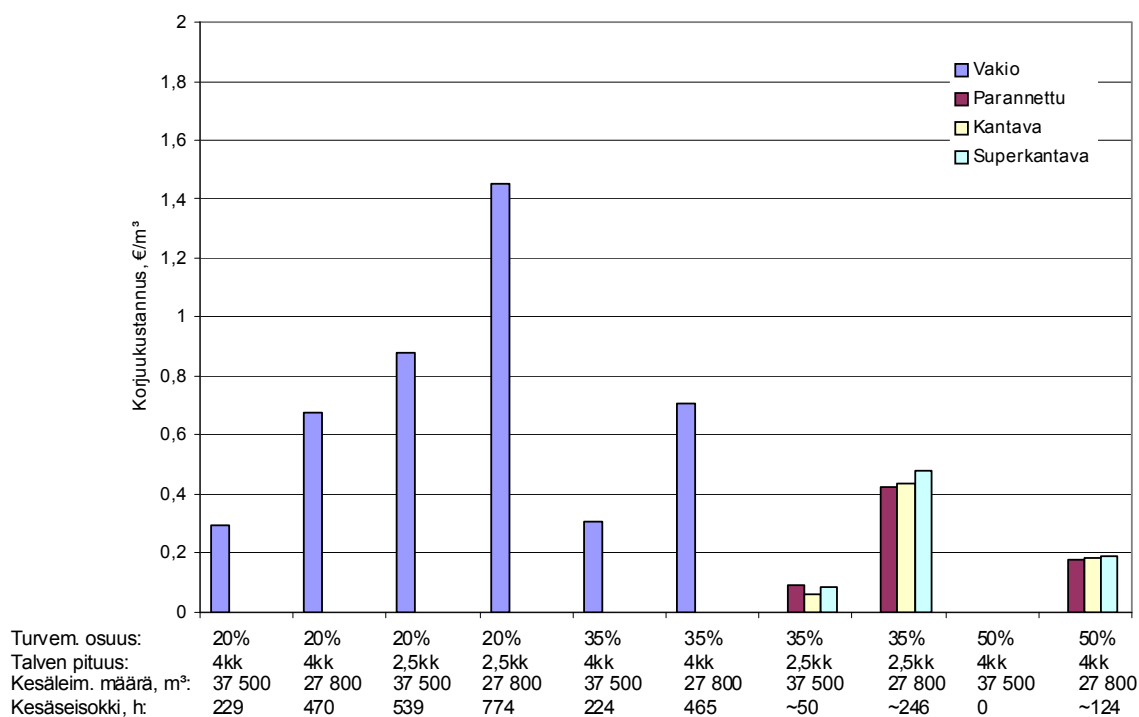
Pitkän talvikorjuuajan (4 kk) ja turvemaiden 35 %:n korjuukertymän tilanteessa kaikki turvemaakohteet voitiin korjata talvella. Talvikorjuukohteista muita kuin turvemaita korjattiin noin viidesosa. Vastaavasti talven ollessa lyhyt (2,5 kk) kolmas korjuuketju varusteltiin turvemaiden kesäaikaisen korjuuseen. Korjuukustannuksia tarkasteltaessa varustelutasojen välillä olevat erot ovat hyvin pieniä, ja ne jäivät simulointitoistojen välisen vaihtelun sisään.



Kuva 14. Korjuuyrittäjä B:n simulointiskenaarioiden tuottamat korjuun yksikkökustannukset. Varustelutasoista vakiovarustelulla turvemaat korjataan vain talvella. Muilla kesäkorjuun varustelutasoilla turvemaiden korjuu jakautui koko vuodelle. Yksikkökustannukset sisältävät koneseisonta-ajan palkan.

Pitkän talven skenaariossa 50 % kokonaiskorjuumäärästä voitiin korjata turvemailta, kun turvemaita hakattiin ympärivuotisesti varustelemalla yksi kolmesta korjuuketjusta kesäaikaisen turvemaiden korjuuseen (kuva 14). Korjuukustannukset nousivat hyvin maltillisesti 20 %:n ja 35 %:n turvemaasuusskenaarioihin verrattaessa. Vertailuissa tulee ottaa huomioon se, että skenaariot eivät ole täysin verrannollisia, sillä korjattavat leimikot ja siten keskimääräiset korjuuolosuhteet muuttuvat eri korjuumäärissä ja skenaarioissa. Tulosten perusteella myös yrittäjällä B olisi korjuukustannuksiltaan edullisempaa varustella turvemaiden kesäkorjuuseen ja korjata mahdollisimman paljon turvemaaleimikoita myös kesällä. Toiminnan edullisuuden ehtona oli kesäleimikoiden tarjonnan niukkuus.

Jos kesäiselle koneseisokkijalle otettiin palkkakustannukset huomioon, vakiovarustelutilanteissa koneseisokkijajan pakkakustannus korjattua kuutiometriä kohden vaihtelisi 0,3:sta 1,44:n euroon. Ympärivuotinen turvemaiden puunkorjuu työllisti yrittäjän B skenaarioissa suhteellisen hyvin kuljettajia ja koneita eikä seisokkiaikaa ilmennyt merkittävästi (kuva 15).

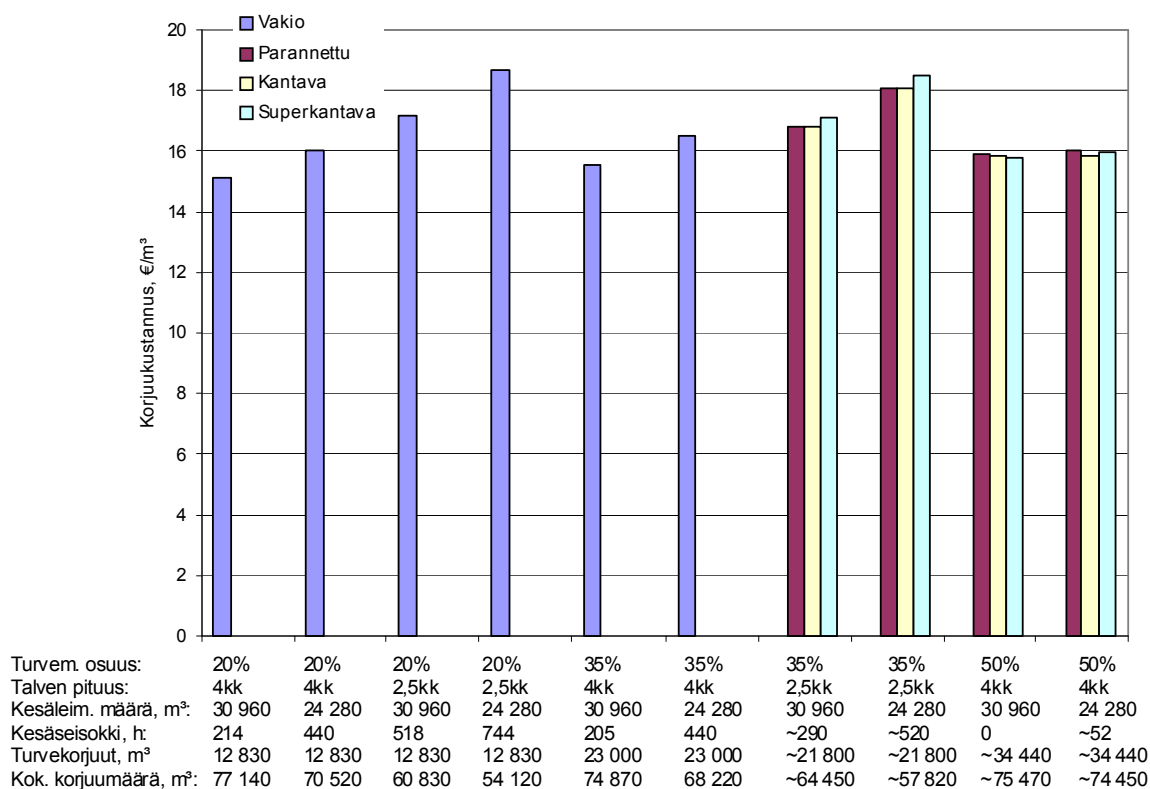


Kuva 15. Korjuuyrittäjä B:n simulointiskenaarioiden kesäajan koneseisokkien aiheuttamat palkkakustannukset, kun seisonta-ajalta maksetaan kuljettajille palkka. Kesäaikainen koneseisokkiaika on käyttämättä jäänyt keskimääräinen työaika korjuukonetta kohden.

3.2.3 Korjuuyrittäjä C (kertymän ka. 53 m³/ha, runkokoon ka. 0,1 m³)

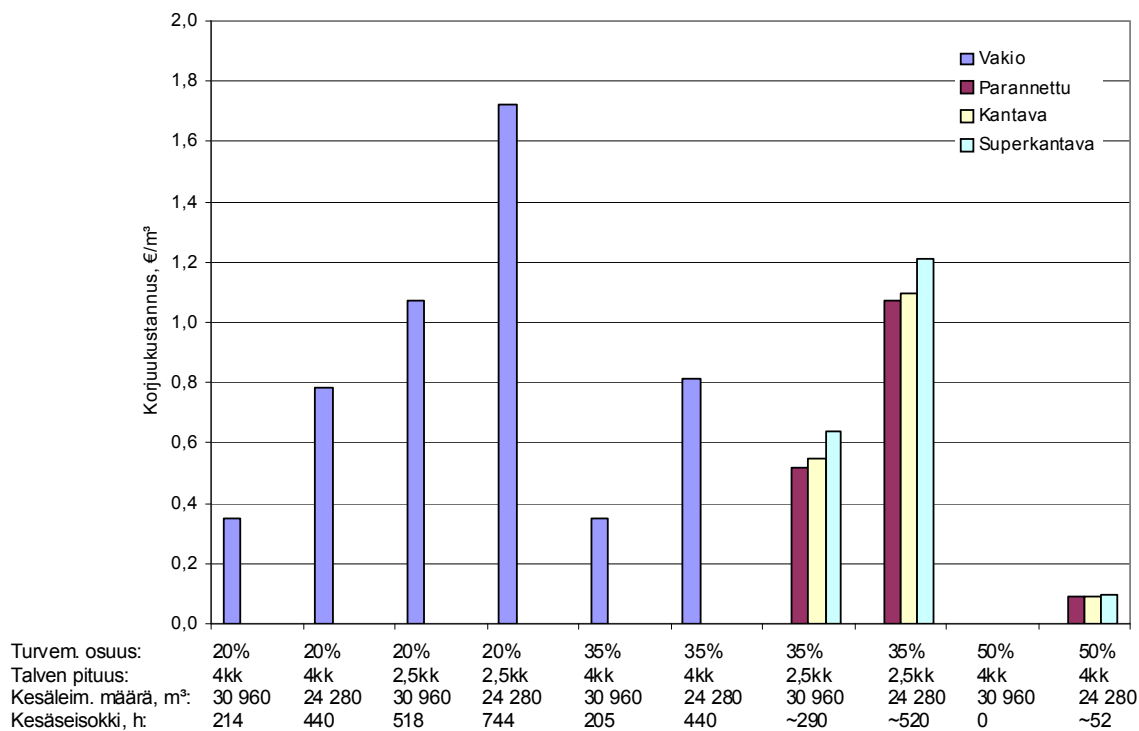
Korjuuyrittäjällä C talven pituus ja kesäleimikoiden määrä vaikuttivat korjuukustannuksiin enemmän kuin edellisillä yrittäjillä (kuva 16). Korjuuyrittäjällä C kustannustaso oli selkeästi muita tutkimusyrittäjiä korkeampi, pienen runkokoon ja alhaisten hehtaarikertymien vuoksi. Talven pituudella oli suuri merkitys toiminnan kannattavuuteen, kun kesäleimikoista oli niukkuutta. Vaikka kuvassa 16 ei ole esitetty skenaariota, jossa 35 %:n turvemaa korjuun ja pitkän talven tilanteessa turvemaita korjataan ympärivuotisesti, toiminta olisi ollut kustannustehokkaampaa kuin esitetystä tilanteesta (30 % turvemaita ja pitkä talvi). Ympärivuotisella turvemaa korjuulla koneseisokkiajajat olisivat pudonneet merkittävästi ja korjuumahdollisuuksia olisi tullut enemmän kaikille korjuuketjuille. Oletuksen tälle olisi edelleen ollut se, että muita talvi-korjuukohteita olisi ollut riittävästi tarjolla korjuuseen.

Lyhyen talven tilanteessa turvemaita oli hakattava myös kesäaikaan, jotta 35 %:n turvemaiden osuus kokonaiskertymästä täyttyi (kuva 16). Korjuuketjun varustelu turvemaaoloihin oli tällöin välttämätön. Korjuukustannusten perusteella superkantavan kuormatraktorin käyttö ei ollut järkevää silloin, kun turvemaiden kesäkorjuuvarustelun käyttö jäi vähäiseksi (koneseisokkia jäi 290–520 h/korjuukone). Toisaalta, kun kesäaikainen käyttö oli täysimääräistä, superkantava varustelutaso oli muihin varusteluvaihtoehtoihin nähden kilpailukykyinen (kuva 16).



Kuva 16. Korjuuyrittäjä C:n simulointiskenaarioiden tuottamat korjuun yksikkökustannukset. Varustelutasoista vakiovarustelulla turvemaita korjataan vain talvella. Muilla kesäkorjuun varustelutasoilla turvemaiden korjuu jakautui koko vuodelle. Yksikkökustannukset sisältävät koneseisonta-ajan palkan.

Korjuuyrittäjällä C yksikkökustannusten lisäksi vaikutti olennaisesti palkkakustannusten lisäys koneiden seisonta-ajalta (kuva 17). Tilanteessa, jossa koneet seisoivat keskimäärin 744 työtuntia/kone, kustannuslisä korjuuseen oli jo 1,74 €/m³. Kuten aiemmissakin yrittäjätapauksissa, myös yrittäjällä C turvemaiden ympärivuotinen puunkorjuu pienensi koneiden seisonta-aikaa sekä siitä aiheutunutta kustannuslisää merkittävästi.



Kuva 17. Korjuuyrittäjä C:n simulointiskenaarioiden kesäajan koneseisokkien aiheuttamat palkkakustannukset, kun seisonta-ajalta maksetaan kuljettajille palkka. Kesäaikainen koneseisokki on käyttämättä jäänyt keskimääräinen työaika korjuukonetta kohden.

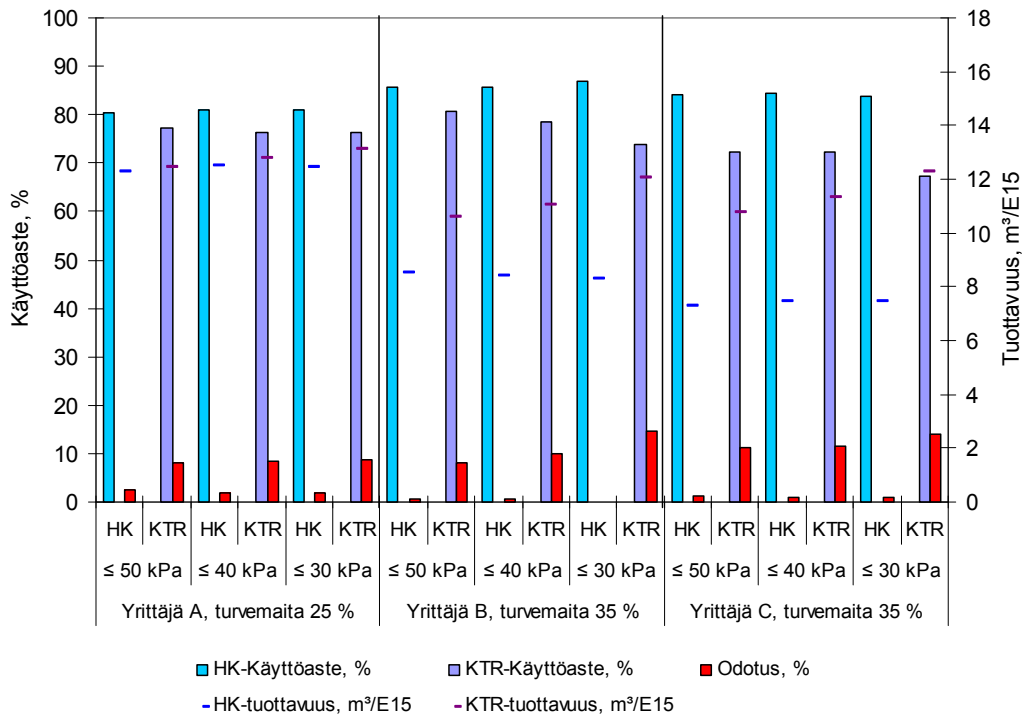
3.3 Turvemaiden kesäaikaisen korjuun varustelutasojen vertailua

Tutkimusyrittäjien puunkorjuukaluston varustelutasojen tuottamia simulointituloksia tarkasteltiin kahden valitun skenaarion perusteella. Turvemaiden kesäaikaisen korjuun varustelutasoja tarkasteltiin olosuhteissa, joista toinen (turvemaita 25–35 %, talvikorjuuaika lyhyt, kesäleimikoita vähän) käsiteltiin yleistilaksi ja toinen vastasi suuren turvemaiden korjuumäärän tilannetta, johon päästiin pääosin pitkän talvikorjuukauden turvin (turvemaita 40–50 %, talvikorjuuaika pitkä, kesäleimikoita vähän). Korjuukohteiden korjuuolosuhteet selittivät osaltaan tuloksia, joiden leimikoiden taustatiedot keskitunnuksina on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Korjuuyrittäjien leimikoiden keskitunnuksia kahden tarkastellun skenaarion osalta. S1: turvemaaosuus 25–35 %, talvi lyhyt (2–2,5 kk), kesäleimikoita vähän, S2: turvemaaosuus 40–50 %, talvi pitkä (3,5–4 kk), kesäleimikoita vähän.

	Yrittäjä A		Yrittäjä B		Yrittäjä C	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2
Leimikkokoko, m ³	334	322	515	502	250	263
Pinta-ala, m ²	3,0	3,1	6,6	7,2	4,9	5,0
Keskirunkokoko, m ³	0,24	0,22	0,16	0,14	0,14	0,13
Metsäkuljetusmatka, m	302	322	386	387	341	358
Kertymä, m ³ /ha	138	129	100	91	63	63
Lehtipuuosuus, %	0,23	0,24	0,35	0,36	0,13	0,14

Kuvassa 18 esitetty odotusaika kertoi ajan, jonka korjuukone joutui odottamaan korjuuketjun toisen koneen työsuoritusta turvemaakorjuun osuuden ollessa 25–35 %. Kuormatraktorin odotusajat kasvoivat hakkuukoneen ja kuormatraktorin tuottavuusepätasapainon myötä. Tämä näkyi pienentyvänä koneen käyttöasteena. Korjuuyrittäjän A tapauksessa hakkuukone ja kuormatraktori olivat tuottavuuden suhteen hyvin tasapainossa Korjuuyrittäjien B ja C osalta kesäisin varustellun korjuuketjun tuottavuusepätasapaino oli suuri kaikilla varustelutasoilla. Erityisesti superkantavalla varustelulla tuottavuuksissa oli suuri ero hakkuukoneen ja kuormatraktorin välillä (3,7–4,8 m³/käyttötunti, E₁₅). Osin tämän vuoksi superkantavaa varustelutasoa ei saatu hyödynnettyä kustannustehokkaasti yrittäjien B ja C osalta. Parantuva kantavuustaso ja suurempi koneluokka lisäsivät kuormakokoa ja tuottavuutta muihin varustelutasoihin nähden selvästi.



Kuva 18. Turvemaavarustellun korjuuketjun käyttöaste ja tuottavuus, kun turvemaakorjuun osuus on 25–35 %, talvi on lyhyt (2–2,5 kk) ja kesäleimikoita on vähän.

Korjuuyrittäjien korjuukaluston koneiden vuosisuoritteita ja toiminta-aikoja tarkasteltiin edellä esitetyistä skenaarioista vain yhden varustelutason osalta ("kantava", alle 40 kPa varustelutaso kolmannella korjuuketjulla). Koneiden vuotuiset tuntimäärät osoittivat selvästi sen, että yrittäjillä B ja C kuormatraktorien hakkuukoneita korkeampi tuottavuus pudotti niiden työtunteja suhteessa hakkuukoneiden työtunteihin (taulukko 10). Erityisesti yrittäjällä B turvemaille kohdistetulla hakkukoneella tehtiin pääosin kahta vuoroa, jotta kuormatraktorille saatiin kasvatettua työsuoritetta. Varustellulla korjuuketjulla oli enemmän konetyötunteja kuin muilla korjuuketjuilla, sillä turvemaakohteita riitti korjattavaksi pidemmälle kesäaikana kuin vastaavasti kivennäismaan kesäleimikoita. Korjattavien leimikoiden lukumäärä oli suurin yrittäjällä A, jonka siirtoajoneuvolla ajettiin 1 446 tuntia, kun vastaavasti yrittäjällä B ajoa oli 973 tuntia. Kuormatraktoreiden suoritteet korjuuketjun hakkuukoneisiin nähden olivat hieman pienempiä, sillä leimikolle jäi hieman kuljetettavaa simulointiajon päättyessä.

Korjuukaluston koneiden tunti- ja yksikkökustannukset on esitetty taulukossa 11, kun tarkastelussa oli edelleen sama skenaario (turvemaiden osuus 25–35 %, lyhyt talvi, kesäleimikoita vähän ja turvemaiden varustelutasona "kantava", alle 40 kPa). Kaikilla yrittäjillä ensimmäinen korjuuketju toimi lähes yksinomaan kivennäismailla, joissa korjuuolosuhteet olivat turvemaakohteita paremmat. Tämä näkyi muita ketjuja pienempinä yksikkökustannuksina. Korjuuketjun 2 koneet korjasivat talvella sekä kivennäismaakohteita että turvemaita. Kolmas korjuuketju operoi pelkästään turvemaakohteilla, talvella perusvarusteisena ja kesällä kantavan (alle 40 kPa) varustelun turvin. Koneseisokkiajan palkkakustannuksen huomioon ottaminen lisäsi yksikkökustannuksia konetta kohden 0,5–5,7 %.

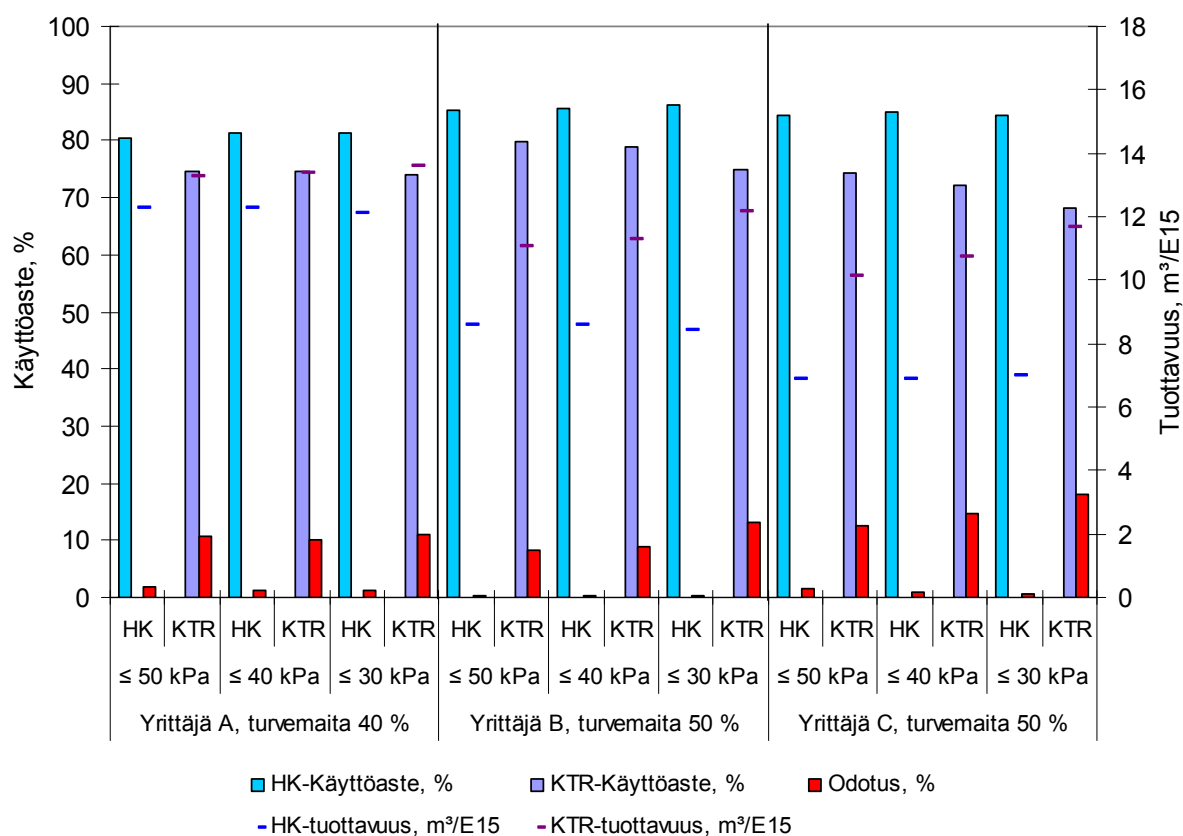
Tarkasteltaessa tutkimusskenaariota, joissa turvemaiden osuus oli 40–50 %, talvi pitkä ja kesäleimikoita oli vähän, turvemaille suunnatun korjuuketjun koneiden tuottavuuserot voimistuivat kuvan 18 skenaariotarkasteluun nähden (kuva 19). Tämä näkyi kuormatraktorin pienempänä käyttöasteena ja suurempana odotusaikana. Yrittäjällä C superkantavasti varustellun kuormatraktorin tuottavuus oli jo 75 % hakkuukoneen vastaavaa suurempi. Simuloinneissa käytössä ollut mukautuva työvuorojärjestely ei kyennyt poistamaan koneiden voimakkaasta tuottavuusepätasapainosta johtunutta kuormatraktorin vajaakäyttöä. Erityisesti Pohjois-Pohjanmaan korjuualueiden turvemaille puusto oli pientä ja hehtaarikertymät vähäisiä, jolloin hakkuukoneen käyttötuntituottavuus jäi alle 7 m³.

Taulukko 10. Korjuuyrittäjien kaluston suoritteita tutkimusskenaariossa: turvemaita 25–35 %, lyhyt talvi (2–2,5 kk), kesäleimikoita vähän ja turvemaiden varustelutasona kantava (alle 40 kPa). E₁₅ = käyttötunti.

	Yrittäjä A		Yrittäjä B		Yrittäjä C	
	E ₁₅ /vuosi	m ³ /vuosi	E ₁₅ /vuosi	m ³ /vuosi	E ₁₅ /vuosi	m ³ /vuosi
Hakkuukone 1	2 168	35 678	2 362	30 231	2 303	20 643
Hakkuukone 2	2 191	31 848	2 482	25 481	2 353	19 679
Hakkuukone 3	2 257	28 266	2 976	25 082	2 426	18 135
Kuormatraktori 1	2 142	35 537	2 250	30 198	1 696	20 631
Kuormatraktori 2	2 033	31 785	2 011	25 408	1 619	19 617
Kuormatraktori 3	2 197	28 105	2 268	25 038	1 599	18 078
Siirtoauto	1 446		973		1 247	
Yhteensä		95 610		80 719		58 391

Taulukko 11. Korjuuyrittäjien korjuukaluston tunti- ja yksikkökustannukset tutkimusskenaariosa: turvemaita 25–35 %, lyhyt talvi (2–2,5 kk), kesäleimikoita vähän ja turvemaiden varustelutasona kantava (alle 40 kPa). Kursiivilla esitetyt yksikkökustannukset sisältävät koneseisontajan palkkakustannukset.

	Yrittäjä A				Yrittäjä B				Yrittäjä C			
	€/h		€/m ³		€/h		€/m ³		€/h		€/m ³	
Hakkuukone 1	86,1	88,6	5,23	5,39	85,1	88,8	6,65	6,94	84,2	89,0	9,39	9,93
Hakkuukone 2	85,3	87,8	5,87	6,04	82,1	85,5	8,00	8,33	82,6	87,3	9,88	10,44
Hakkuukone 3	84,6	86,5	6,75	6,90	76,7	77,1	9,10	9,14	82,4	87,0	11,02	11,63
Kuormatraktori 1	62,7	65,0	3,78	3,92	61,8	65,3	4,60	4,87	67,3	73,3	5,54	6,03
Kuormatraktori 2	64,3	66,8	4,11	4,27	65,5	69,4	5,19	5,49	69,6	75,9	5,74	6,26
Kuormatraktori 3	65,3	67,1	5,10	5,24	65,1	65,5	5,89	5,93	72,1	78,5	6,38	6,94
Siirtoauto	48,3	48,3	0,73	0,73	57,6	57,6	0,69	0,69	50,1	50,1	1,07	1,07
Yhteensä	10,90 11,21				13,72 14,15				17,0 18,09			



Kuva 19. Turvemaavarustellun korjuuketjun käyttöaste ja tuottavuus, kun turvemaakorjuun osuus on 40–50 %, talvi on pitkä (3,5–4 kk) ja kesäleimikoita on vähän.

Koska talvileimikoista ei tutkimusskenaarioissa ollut niukkuutta, pitkän korjuutalven aikana korjattiin puuta edelliseen skenaariotapaukseen nähden selvästi suuremmat määrät (taulukko 12). Käyttötyötunnit olivat myös suuremmat pidemmän talviajan ja kahden työvuoron ansiosta. Hakkuukoneiden työtunnit olivat suhteellisen suuret yrittäjillä B ja C, kun taas kuormatraktoreiden työtunnit jäivät selvästi ketjun hakkuukonetta pienemmiksi. Koska leimikoiden määrä kas-

voi skenaariossa, myös siirtoauton ajotunnit lisääntyivät ja samalla kuutiometriä kohden lasketut ajokustannukset keskimäärin pienenevät (taulukko 13). Yrittäjällä B korjuukohteet olivat selvästi laajemmalla alueella kuin muilla yrittäjillä, joten leimikkovalinnoista ja pitkistä konesiirtymistä johtuen siirtojen yksikkökustannus ei muuttunut edelliseen skenaarioon nähden.

Turvemailla operoivien kolmannen korjuuketjun koneiden yksikkökustannukset olivat hakkuukoneilla noin 19–28 % ja kuormatraktoreilla noin 19–24 % suuremmat kuin kivennäismailla operoivilla koneilla (korjuuketjun 1 koneet) (taulukko 13). Suuri vuotuinen käyttötuntimäärä hakkuukoneilla pudotti käyttötuntikustannukset alle 80 euroon korjuuyrittäjillä B ja C. Vaikka korjuumäärä kasvoi yrittäjällä A noin 8 300 m³ ja yrittäjällä B noin 7 300 m³ edelliseen skenaarioon nähden, lisääntynyt korjuusuorite ei vaikuttanut vähentävästi yksikkökustannuksiin (vrt. taulukot 10 ja 11). Tämän selitti turvemaakohteiden määrän kasvu ja siten korjuukohteiden korjuutekijöiden keskimääräinen heikkeneminen. Vastaavasti yrittäjällä C korjuusuoritteen kasvu kompensoi tehokkaammin hieman heikentyneen korjuukohteiden yleistilan; yksikkökustannuksen putosivat edelliseen skenaarioon nähden 1,22 €/m³. Yrittäjällä C korjuumäärä kasvoi skenaarioiden välillä noin 16 400 m³.

Taulukko 12. Korjuuyrittäjien kaluston suoritteita tutkimusskenaariossa: turvemaita 40–50 %, pitkä talvi (3,5–4 kk), kesäleimikoita vähän ja turvemaiden varustelutasona kantava (alle 40 kPa). E₁₅ = käyttötunti.

	Yrittäjä A		Yrittäjä B		Yrittäjä C	
	E ₁₅ /vuosi	m ³ /vuosi	E ₁₅ /vuosi	m ³ /vuosi	E ₁₅ /vuosi	m ³ /vuosi
Hakkuukone 1	2 536	37 577	3 026	32 175	3 021	27 443
Hakkuukone 2	2 545	34 468	3 036	28 725	3 104	25 150
Hakkuukone 3	2 615	32 067	3 165	27 162	3 219	22 212
Kuormatraktori 1	2 448	37 454	2 506	32 145	2 224	27 419
Kuormatraktori 2	2 223	34 393	2 368	28 677	2 089	25 116
Kuormatraktori 3	2 390	31 958	2 402	27 120	2 062	22 171
Siirtoauto	1 619		1 115		1 504	
Yhteensä		103 959		88 002		74 756

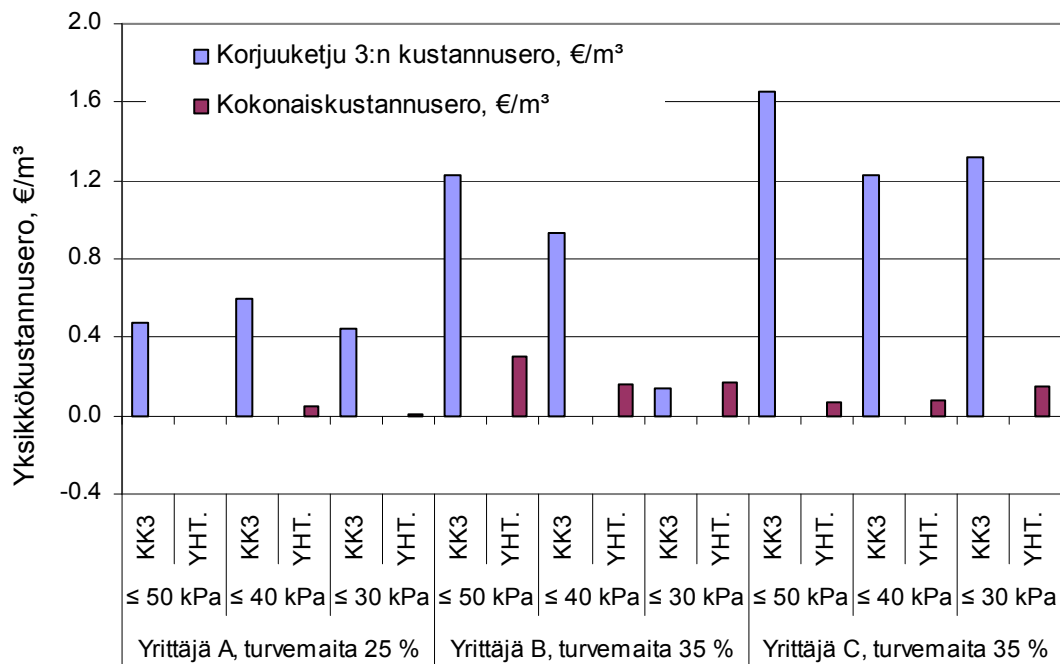
Taulukko 13. Korjuuyrittäjien korjuukaluston tunti- ja yksikkökustannukset tutkimusskenaariossa: turvemaita 40–50 %, pitkä talvi (3,5–4 kk), kesäleimikoita paljon ja turvemaiden varustelutasona kantava (alle 40 kPa). Kursiivilla esitetyt yksikkökustannukset sisältävät koneseisontajan palkkakustannukset.

	Yrittäjä A				Yrittäjä B				Yrittäjä C			
	€/h		€/m ³		€/h		€/m ³		€/h		€/m ³	
Hakkuukone 1	80,8	81,4	5,46	5,50	76,9	77,9	7,23	7,32	76,3	76,7	8,40	8,44
Hakkuukone 2	80,2	81,0	5,92	5,98	76,3	77,4	8,07	8,18	74,6	75,0	9,20	9,26
Hakkuukone 3	79,7	80,1	6,50	6,53	75,4	76,1	8,78	8,86	74,0	74,3	10,73	10,77
Kuormatraktori 1	60,7	61,3	3,97	4,00	61,0	62,1	4,76	4,84	61,7	62,2	5,00	5,04
Kuormatraktori 2	63,9	64,7	4,13	4,18	63,2	64,4	5,22	5,32	64,0	64,6	5,32	5,37
Kuormatraktori 3	64,4	64,8	4,82	4,84	64,0	64,8	5,67	5,74	66,4	66,8	6,18	6,21
Siirtoauto	47,1	47,1	0,73	0,73	55,2	55,2	0,70	0,70	47,7	47,7	0,96	0,96
Yhteensä			10,95	11,03			13,87	14,05			15,78	15,87

3.4 Turvemaakohteiden korjuujärjestyksen vaikutus kustannuksiin

Turvemaakohteiden maaperän kantavuuden mukaan muodostetun korjuujärjestyksen vaikutuksia korjuukustannuksiin tarkasteltiin skenaarioissa, joissa yrittäjätapauksesta riippuen turvemaakorjuuta oli 25–35 %, talvikorjuuaika oli lyhyt ja kesäleimikoita oli vähän. Vertailu toteutettiin turvemaiden kesäkorjuun varustelutasoilla (parannettu: alle 50 kPa, kantava: alle 40 kPa ja superkantava: alle 30 kPa).

Satunnainen turvemaakohteiden valinta ohjasi talviaikaiseen korjuuseen enemmän kertymältään suurempia kohteita ja vastaavasti kesälle kertymältään heikkoja kohteita verrattuna kantavuuden suhteen luokiteltuun turvemaiden leimikkoaineistoon. Satunnainen korjuujärjestys lisäsi erityisesti varustellun korjuuketjun kustannuksia (kuva 20). Kesällä heikosti kantavat turvemaakohteet hidastivat korjuuta merkittävästi ja kustannuslisää varustellulle korjuuketjulle tuli varustelutasosta ja yrittäjästä riippuen noin 0,2–1,6 €/m³. Kustannusmuutos oli sitä suurempi, mitä pohjoisemmassa toimittiin, sillä pohjoisempaan mentäessä korjuukertymä hehtaarilla pieneni ja siten heikosti kantavien leimikoiden määrä kasvoi. Mitä heikompi oli varustelutaso, sitä suurempi oli kustannusmuutos korjattaessa turvemaita satunnaisesti.



Kuva 20. Korjuun yksikkökustannusten muutos, kun turvemaat korjataan satunnaisesti kantavuusluokitteluun perustuvan järjestyksen asemesta. Tarkastelussa tutkimusyrittäjien kaikki turvemaakorjuun varustelutasot skenaariossa: turvemaakorjuun osuus 25–35 %, talvikorjuuaika lyhyt (2–2,5 kk) ja kesäleimikoita vähän.

Korjuuyrittäjien kokonaiskorjuukustannuksia tarkasteltaessa havaittiin vain vähäinen kustannuslisä, kun turvemaita korjattiin kantavuuden suhteen satunnaisesti (kuva 20). Selvästi pienempi muutosvaikutus perustui pääosin kustannuskasvun jakautumiseen koko kalustolle. Simulointien perusteella kantavuuden mukainen turvemaiden satunnainen korjuu lisäsi korjuun yksikkökustannuksia vain noin 0,1–0,2 €/m³. Toisaalta talvikorjuun aikana satunnaisessa järjestyksessä olleet turvemaakohteet olivat kertymältään hieman parempia ja siten talven kokonaiskorjuumäärät kasvoivat järjestettyyn turvema-aineiston skenaarioon nähden, jossa heikoimmin kantavat kohteet korjattiin talvella. Myös vuotuisen kokonaiskorjuumäärän muutos leimikkoaineistossa toi vaikutuksensa kokonaiskustannuksiin, eivätkä kustannukset olleet siksi suoraan verrattavissa luokitellun ja satunnaisen turvema-aineiston tulosten välillä.

3.5 Kuormakoot varustelutasoille ja korjuualueille

Kuormatraktoreiden laskennalliset kuormakoot turvemaiilla määräytyivät korjuukohteen runkoon, kokonaispuustomäärän ja täyttöasteen mukaisesti. Korjuukohteen kokonaispuustomäärä vaikutti kohteen kesäaikaiseen kantavuustasoon ja siten kunkin varustelutason kuormatraktorin kuormatilan täyttöasteeseen. Rungon koko vaikutti tukki- ja kuituosuuksiin, puutavaralajien keskipituuksiin sekä pinotiiviyteen. Pohjoisemmilla kohteilla myös puustomäärä hehtaarilla oli pienempi, joten kuormatilan täyttöasteet putosivat kesäaikana eteläisiin korjuukohteisiin verrattaessa. Kantavuuden suhteen järjestetyssä turvemaiden leimikkoaineistossa korjuuyrityksellä A kesäaikaiset kohteet olivat puustomäärältään suuria, jolloin voitiin käyttää suurempia kuormakokoja (taulukko 14). Turvemaakohteiden heikompi kantavuus pudotti kuormien täyttöasteita pohjoisemmaksi mentäessä. Tämä näkyi erityisesti kevyemmin varustettujen kuormatraktoreiden kuormien koossa. Korjuuyrityksillä B ja C ”superkantavaa” luokkaa lukuun ottamatta kuormatraktoreina korjuussa oli kevyempi kokoluokka (kantavuus 10 t).

Taulukko 14. Kuormatraktoreiden keskimääräiset kuormakoot eri kantavuusvarustelutasoilla korjuuyrityksittäin, kun turvemaaleimikot oli järjestetty korjuuseen kantavuusluokkien mukaan. Keskihajonta esitetty kursiivilla.

Varustelutaso	Korjuuyritys					
	Yritys A ¹		Yritys B		Yritys C	
< 50 kPa "parannettu"	10,90	<i>0,54</i>	8,20	<i>1,42</i>	7,39	<i>1,13</i>
< 40 kPa "kantava"	11,54	<i>0,58</i>	9,34	<i>0,70</i>	9,20	<i>0,59</i>
< 30 kPa "superkantava"	11,98	<i>0,57</i>	11,34	<i>0,58</i>	11,49	<i>0,58</i>

¹ Korjuuyrityksellä A kuormatraktorit yleiskoneluokkaa (kantavuus 12 t), muilla yritysillä (B ja C) harvennuskoneluokkaa (kantavuus 10 t), "superkantava"-varustelu (< 30 kPa) kuitenkin yleiskoneluokkaa

3.6 Herkkyystarkastelut pehmeiden maiden puunkorjuun ratkaisuille

Turvemaiden kesäkorjuun korjuuratkaisuja verrattiin turvemaiden talvikorjuuseen ja sen kustannuksiin (kuva 21). Samalla korjuukustannuksia voitiin verrata metsäkuljetusmatkan suhteen. Laskelmat perustuivat kesäkorjuun varusteluvaihtoehtoisissa tilanteeseen, jossa kaikilla korjuukoneilla vuotuinen käyttötuntimäärä oli 2 600 tuntia ja josta kesäaikainen turvemaiden korjuuaika oli 800 käyttötuntia. Yleiskorjuukaluston vaihtoehtoisissa, joissa turvemaidella toimittiin vain talvisin, vuotuisiksi käyttötuntimääräksi asetettiin 1 800 h, 2 200 h ja 2 600 h. Pienet vuotuiset käyttötuntimäärät olivat mahdollisia silloin, kun korjuu kohdistuu pääasiassa talviseen aikaan eikä kesällä korjattavia kohteita ilman turvemaavarustelua ollut riittävästi saatavilla. Yleiskorjuukoneiden kesäaikaisessa turvemaavarustelussa hakkuukoneissa oli normaali telavarustelu ja kuormatraktoreiden keskimääräinen pintapaine vaihteli varustelusta riippuen kohteen kantavuuden mukaan alle 30 kPa:sta alle 50 kPa:iin.

Laskelmassa talvi- ja kesäkorjuukohteiden oletettiin olevan samoja. Kesäaikainen turvemaiden puunkorjuu vei sekä hakkuussa että metsäkuljetuksessa enemmän aikaa kuin talvisessa korjuussa; hakkuun osalta lisäaika asetettiin 1,12 kertaiseksi ja vastaavasti metsäkuljetuksessa 1,07 kertaiseksi (Lamminen ym. 2010). Tarkasteluun otettiin mukaan pehmeille maille hyvin soveltuvat tela-alustaiset hakkuukone ja kuormatraktori. Tela-alustaisille koneille laskettiin käyttötuntikustannukset uusilla kustannustiedoilla. Tuottavuudet laskettiin kaikille koneille tutkimuksen ajanmenekki- ja kuormankoon laskennan funktioilla. Kaikille kalustoratkaisuille oli käytössä samat funktiot ja ne tasoitettiin vastaamaan käytännön tilaa seuranta- ja käyttötuntikertoimilla (ks. sivut 16 ja 17). Erot tuloksissa vaihtoehtojen välillä aiheutuivat käyttötuntimäärästä, tuntikustannuksista, korjuun ajanmenekin kasvusta sekä kuormatilan koosta (kuormatilan poikkipinta-ala ja täyttöaste (Lamminen ym. 2010)). Käyttötuntikustannusten erot eri vaihtoehtoisissa syntyivät vuotuisesta käyttömäärästä sekä kesäkorjuun varustelutason hankinta-, huolto- ja polttoainekustannuseroista. Nämä herkkyystarkastelun olennaisimmat kertoimet on esitetty taulukossa 15. Laskentatarkastelu esitetään korjuutilanteesta, jossa leimikon keskirunkoko oli 0,08 m³, hehtaarikertymä 60 m³, lehtipuuston osuus 20 % sekä metsäkuljetusmatka vaihteli 100–1500 metriin.

Taulukko 15. Ympärivuotisen turvemaiden puunkorjuun kalustoratkaisujen vertailun lähtötietoja. Laskentavertailua tehtiin kesäkorjuun ja talvikorjuun sekä eri varustelutasojen välillä. Mukana myös turvemaidelle hyvin soveltuva tela-alustainen korjuuketjuratkaisu.

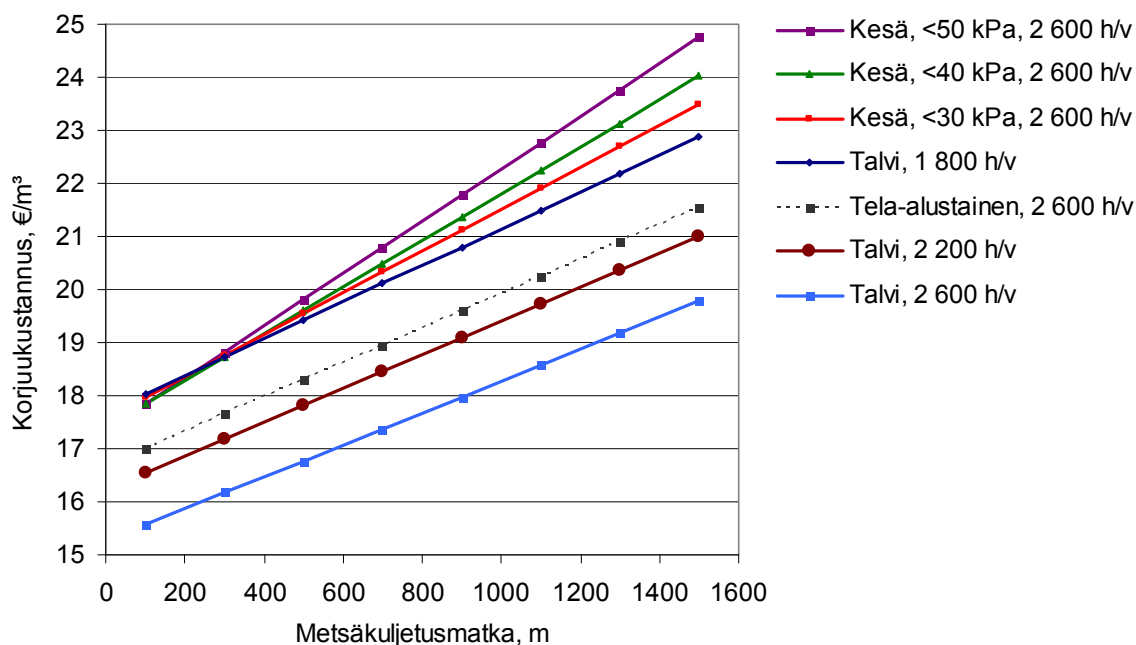
	Yleiskorjuukalusto*							Tela-alustainen korjuuketju
	Talvikorjuu vaihtoehdot			Kesäkorjuu			Kinteät telat	
	VE1	VE2	VE3	<30 kPa	<40 kPa	<50 kPa		
Vuotuinen korjuuaika, h	1800	2200	2600	2600	2600	2600	2600	
Kesäkorjuuaika turvemaidella, h	-	-	-	800	800	800	800	
Tuntikustannus**, €/h	93 66	85 61	80 58	80 66,6	80 62,2	80 60,3	77 62	
Kesälisä ajanmenekkiin								
hakkuu	-	-	-	1,12 1,06	1,12 1,06	1,12 1,06	1,12 1,06	
lähikuljetus	-	-	-	1,07 1,04	1,07 1,04	1,07 1,04	1,07 1,04	
Poikkipinta-ala, m ²	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,8	
Kuorman täyttöaste, %	95	95	95	90	75	65	93	

* Konekoluokat: Kuormatraktorina yleiskone (kantavuus 12 000 kg, kuormatilan poikkipinta-ala 4,4m²), Hakkuukoneena yleiskone (painoluokka 15 000–17 000 kg)

** tuntikustannukset hakkuukoneelle ja kuormatraktorille

Korjuutilannetapauksessa yleiskorjuuketjun kesäaikaisen hakkuun tuottavuus oli 10,7 % pienempi kuin talviaikaisessa hakkuussa. Vastaavasti metsäkuljetuksen tuottavuutta alensi kesäaikaisen maastokuljetuksen hakkuutähteiden järjestelystä, ojista ja alhaisemmasta ajonopeudesta johtuva suurempi ajanmenekki (+7 %) sekä kuormakoko, joka laskennallisesti kesäaikaisen korjuun varustelutasolle oli: 11,2 m³ (< 30 kPa), 9,4 m³ (< 40 kPa) ja 8,1 m³ (< 50 kPa). Talvikorjuussa laskennallinen kuormakoko oli 11,9 m³. Siten kesäaikaisen metsäkuljetuksen tuottavuus oli varustelutasosta riippuen 8,7–20,6 % talvista metsäkuljetusta pienempi.

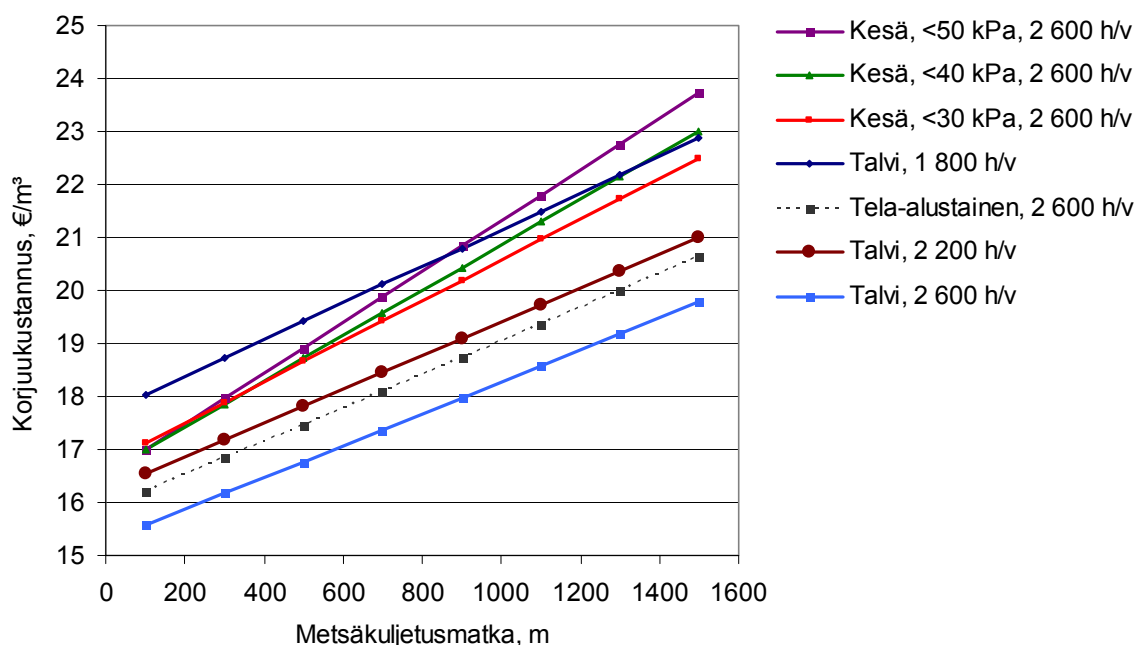
Kun kesäkorjuun suuremman ajanmenekin kertoimet (hakkuu 1,12 ja metsäkuljetus 1,07) otetaan huomioon, turvemaiden kesäaikainen puunkorjuu eri varustelutasoilla on kustannuksiltaan likimain samalla tasolla talvikorjuun kanssa, kun vuotuinen korjuumäärä talvikorjuuvaihtoehdossa oli 1 800 tuntia ja metsäkuljetusmatka noin 300 metriä (kuva 21). Jos korjuuketjun koneiden vuotuiset käyttötunnit kasvavat 2 200 ja 2 600 tuntiin, talvikorjuu oli keskimäärin 10–17 % halvempaa. Alle 350 metrin metsäkuljetusmatkoilla merkittäviä eroja korjuukustannuksissa turvemaiden kesäaikaisen varustelutasojen välillä ei ollut, mutta kuljetusetäisyyden kasvaessa kantavampi korjuuvarustelu osoittautui kustannustehokkaimmaksi. Kasvavaa eroa selittivät kuormakoon erot korjuun varustelutasojen välillä. Annettujen lähtöarvojen valossa tela-alustainen korjuuratkaisu kesäaikaisessa turvemaiden korjuussa oli kustannustehokkain. Yleiskorjuukaluston pehmeiden maiden korjuuvarusteluun nähden kustannusetua oli 5–7 % alle 800 metrin metsäkuljetusmatkalla. Esimerkiksi samalla hakkuukoneen tuntikustannuksella (80 €/E₁₅) ero olisi keskimäärin noin 4 % tela-alustaisen ratkaisun eduksi. Merkittävin hyöty tela-alustaisella kalustolla saatiin suuremmasta kuormakoosta johtuvan tehokkaamman metsäkuljetuksen ansiosta.



Kuva 21. Turvemaiden talvi- ja kesäkorjuuvaihtoehtojen kokonaiskustannukset metsäkuljetusmatkan suhteen yleiskalustolla sekä tela-alustaisella kalustolla. Lähtöarvot taulukosta 15. Hakkuun ajanmenekki 1,12 ja metsäkuljetuksen 1,07 kertainen talviaikaan verrattuna. Kustannuksissa ei ole mukana konesiirtojen kustannuksia (0,5–1,0 €/m³).

Alhaisemmilla kesäkorjuun ajanmenekkipitoisuuksilla (hakkuu 1,06 ja metsäkuljetus 1,04), kesäkorjuu turvemaidilla oli 200–400 metrin metsäkuljetusmatkalla 4–5 % edullisempaa kuin talvikorjuu, kun talvikorjuuvaihtoehdossa vuotuinen käyttöaika jäi 1 800 tuntiin (kuva 22). Korjuukaluston koneiden 2 200 ja 2 600 käyttötuntimäärillä talviaikainen korjuu olisi 4–10 % edullisempaa kuin kesäkorjuu alle 800 metrin metsäkuljetusmatkalla. Laskelman mukaan varustelluimmalla pehmeiden maiden puunkorjuun ratkaisulla kyettiin samalla korjuukustannuksella kuljetamaan puut 100–200 metriä kauempaa kuin heikoimmalla varustellulla konseptilla, kun metsäkuljetusmatka oli vähintään 600 metriä. Turvemaakohteiden tela-alustainen korjuuratkaisu osoittautui kustannustehokkaaksi kalustoratkaisuksi turvemaiden korjuussa pääasiassa suuremman kuormakoon ansiosta. On myös arvioitu (käyttäjähäastattelut 2010), että tela-alustaisella kalustolla havituksen yms. ajourien kantavuuden parantamisen lisäajanmenekki kesäkorjuussa olisi pienempi kuin yleiskalustolla, joten konseptin todellinen toiminta turvemaiden kesäkorjuussa voi olla lähempänä kuvan 21 tilaa.

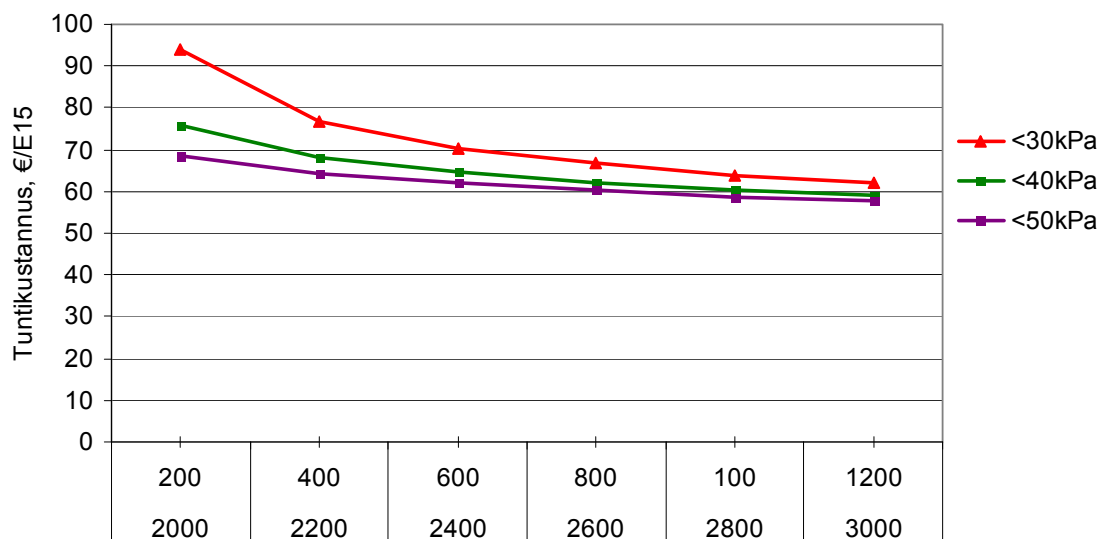
Pehmeiden maiden korjuuvarustelun vuotuisen käyttöajan vaikutusta metsäkuljetuksen kokonaistuntikustannukseen tarkasteltiin taulukon 16 esittämien varustelutasojen kustannustietojen avulla (kuva 23). Kuten myös simulointituloksista havaittiin, varustelluin ratkaisu vaati pidemmän kesäaikaisen käytön turvemaidilla kuin kevyemmin varustellut konseptit, jotta kalliimpi investointi olisi järkevää ja kustannustehokasta. Pelkän pehmeiden maiden korjuuvarustelun tuntikustannus oli < 30 kPa, < 40 kPa ja < 50 kPa varustelutasoilla 16,6 €/h, 7,7 €/h ja 4,0 €/h, kun varustelun vuotuinen käyttö oli 400 tuntia. Vastaavasti 800 tunnin vuotuisella käytöllä tuntikustannukset varusteluille olivat 9,3 €/h, 4,9 €/h ja 3,0 €/h. Kuormatraktorin tuntikustannukset (ilman pehmeiden maiden varustelua) alenivat 63 €/h:sta 55 €/h:iin, kun vuotuinen käyttö kasvoi 2 000 tunnista 3 000 tuntiin.



Kuva 22. Turvemaiden talvi- ja kesäkorjuuvaihtoehtojen kokonaiskustannukset metsäkuljetusmatkan suhteen puunkorjuun yleiskalustolla sekä tela-alustaisella kalustolla. Lähtöarvot taulukosta 15. Hakkuun ajanmenekki 1,06 ja metsäkuljetuksen 1,04 kertainen talviaikaan verrattuna. Kustannuksissa ei ole mukana konesiirtojen kustannuksia (0,5–1,0 €/m³).

Taulukko 16. Kuormatraktorin pehmeiden maiden korjuuvarusteluvaihtoehtojen kustannustekijät. Varustelussa "<30 kPa" varusteluun kuuluu lisäpyöräpari sekä kantavat telat eteen ja taakse. Varustelussa "<40 kPa" varustelu sisälsi kantavat telat eteen ja taakse. Alle 50 kPa varustelussa eteen tuli vakiotelat ja taakse kantavat telat. Tarkemmin varustelusta taulukossa 6 sivu 20.

	Varustelutaso		
	<30 kPa	<40 kPa	<50 kPa
Hankintahinta, € (aM-0)	45100	17600	6300
Jäännösarvo, €	9020	3520	1260
Polttoaine- ja huoltolisä, €/h	2	2	2
Poisto aika, v	7	7	7
Korko, %	2,5	2,5	2,5



Käyttötunnit: kesällä (yllä) ja koko vuonna (alla)

Kuva 23. Turvemaiden kesäkorjuun varustelutasojen vaikutus kuormatraktorin tuntikustannuksiin varustelun vuotuisen käyttömäärän funktiona.

4 Tulosten tarkastelu

4.1 Aineisto ja menetelmät

4.1.1 Leimikkoaineisto

Tutkimuksen korjuuyrittäjien leimikkoaineistot edustivat hyvin oman alueensa keskimääräistä leimikkorakennetta ja korjuuolosuhteita (vrt. VMI10, Bergroth ym. 2008). Korjuuyrittäjien välinen vaihtelu erityisesti turvemaakorjuukohteiden osuukien osalta vastasi maantieteellisen sijainnin eroista todellisuudessa aiheutuvaa. Tuloksia voidaan perustellusti yleistää korjuuolosuhteiden osalta Etelä- ja Pohjois-Pohjanmaan alueille, joissa turvemaiden merkitys puunkorjuussa on suurinta Suomessa.

Koska leimikkoaineistossa korjuukohteiden maalajia ei ollut tiedossa, turvemaakohteet jouduttiin tunnistamaan päättelyrutiinilla. Turvemaiden määrittäminen leimikkoaineistosta oli kuitenkin suhteellisen luotettavaa, sillä kyseisten yrittäjien talvihakkuusta noin 70–90 % oli turvemaakohteita kyseisinä vuosina. Osa turvemaakohteiksi määritellyistä leimikoista on voinut ollut todellisuudessa kivennäismaakohteita. Kuitenkin kokonaisuudessaan simuloinnin turvemaakohteet erottuivat muista kivennäismaan kohteista käytännössä havaitun mukaisesti erityisesti hehtaarikertymältään, metsäkuljetusmatkaltaan ja hakkuutaparakenteeltaan (ks. liite 1).

4.1.2 Simulointimalli

Tutkimusmenetelmänä diskreettiaikasimulointi antaa mahdollisuudet hyvin tarkkaan tutkittavan systeemin mallinnukseen (Asikainen 1995, Asikainen 1998, Asikainen ja Nuuja 1999, Väätäinen ym. 2000, Asikainen 2001, Väätäinen ym. 2005b, Väätäinen ym. 2007). Simulointimalli sisälsi korjuuyrittäjän korjuukaluston ja koneiden kuljetusauton, leimikkomatriisit, koneiden ohjauksen leimikoille konetyypin ja korjuukelpoisuuden mukaisesti, ajanmenekkimallit, keskeytysjakaumat sekä joustavan työvuorolistan korjuukoneittain. Simuloinnin edetessä malli otti huomioon muun muassa korjuukoneiden työsuorite- ja tuottavuuseroista johtuvat koneiden odotusajat, työvuorojärjestelyt ja -joustot sekä konesiirtoihin liittyvät interaktiot ja koneiden ohjauksen seuraavalle työmaalle leimikkoketjutuksella.

Simuloinneissa käytetyt koneellisen puunkorjuun koostetut ajanmenekkimallit olivat yhden funktion kokonaisuuksia. Koostettuja ajanmenekkimalleja käytettiin tutkimuksessa kaikissa korjuukelpoisuusluokissa (talvi-, kesä-, kelirikko- ja turvemaaleimikot). Kuitenkin turvemaiden kesäaikaisessa puunkorjuussa malleja korjattiin ajanmenekkilisäjakauhin, jotka saatiin Lammin ym. (2010) tutkimuksesta. Tutkimuksen haastatellut kuljettajat ja yrittäjät arvioivat turvemaiden kesäaikaisen puunkorjuun ajanmenekkilisän talviaikaiseen korjuuseen verrattuna. Vertailevaa työntutkimustietoa talvi- ja kesäkorjuun ajanmenekkeistä ja tuottavuuksista sekä niiden eroista ei ollut saatavilla.

Simulointiskenaarioiden toistoissa ilmeni vaihtelua satunnaisuuden vaikuttaessa koneiden tuottavuuteen, kuormakokoon, konekeskeytyksiin ja leimikoiden korjuujärjestykseen. Erityisesti leimikoiden korjuujärjestyksen vaihtelu kunkin skenaarion sisällä toi vaihtelua korjuuketjujen vuosisuoritteisiin. Yhdistettäessä korjuuketjujen suoritteet ja kustannukset erot korjuuyrityksen kokonaissuoritteissa olivat kuitenkin suhteellisen vähäiset. Tutkimustehtävän alussa malliin suunnitteilla ollut säätökijävaikutus jätettiin pois, sillä se olisi tehnyt mallista monimutkaisem-

man ja vaikeammin hallita. Nyt skenaarioiden väliset erot tuloksissa sekä erityisesti syyt eroihin voitiin osoittaa luotettavammin, sillä satunnaisuustekijöiden määrä oli riittävä ja tekijät oli tehokkaasti hallittavissa.

Turvemaaleimikoiden korjuussa ei otettu huomioon sitä, että metsäkuljetusmatka riippuu usein siitä korjataanko kohde talvella vai kesällä. Monissa talvikorjuuleimikoissa talvitie lyhentää metsäkuljetusmatkaa, kun taas kesäkorjuussa metsäkuljetusmatka on pidempi. Lisäksi joitakin kohteita ei ilman hyvää kantavaa talvitiestä voitaisi korjata muulloin kuin talvella. Tätä tekijää ei simuloinneissa otettu huomioon, joten kesäaikaisten turvemaakohteiden metsäkuljetuksen kustannukset ovat lieviä aliarvioita todellisesta.

Tutkimukseen valittiin kolme korjuuyrittäjää, joilla kaluston määrä oli kolme korjuuketjua ja yksi koneenkuljetusauto. Tuloksia voi hyvällä luotettavuudella yleistää ja laajentaa yrittäjätapauksiin, joilla on esim. 6 korjuuketjua ja 2 koneenkuljetusautoa ja siitä edelleen kertautumalla. Suomessa on ollut keskimäärin yksi koneenkuljetusauto noin neljälle metsäkoneelle (Väätäinen ym. 2006). Toisaalta kokonaisvastuullisilla alueyrittäjillä siirtoajoneuvo on keskimäärin 6–8 metsäkoneelle (Lappalainen 2008, Friman 2009). Korjuuyrittäjäkohtainen tutkimus ja sen tulokset voidaan muuntaa tai laajentaa aluetasolle, jossa vallitsevat samankaltaiset korjuuolosuhteet. Vastaavasti laaja, aluetason simulointimalli olisi ollut monilta osin yksinkertaistettu malli, jolloin tulosten luotettavuus ja yleistäminen olisi ollut epävarmempaa.

4.1.3 Turvemaiden varustelutasot ja tarkastelu

Tutkimuksessa pehmeän maan kesäaikaisessa puunkorjuussa keskityttiin tarkastelemaan pelkätään puunkorjuun yleiskonekalustoa ja sen varustelua. Tällä hetkellä tarjolla on kuitenkin pehmeiden maiden erikoiskalustoa (ProSilva, LightLogg), jotka ovat lupaavia ratkaisuja pehmeiden maiden puunkorjuuseen. Tela-alustaista turvemaiden korjuukalustoa ei otettu simulointimalliin mukaan, koska koneiden tuottavuuksista ei ollut saatavilla tutkimustietoa.

Tutkimuksessa käytetyt pehmeiden maiden varustelutasot oli määritetty merkittävilta osin Airavaaran ym. (2008) tutkimukseen perustuen. Kuitenkaan kaikille valituille varustelutasoille ja telaratkaisuille ei ole nykyisin vastaavia markkinoilla olevia telamalleja, joten osalle niitä hintataso määritettiin telavarustuksen painon, myynnissä olevien telamallien sekä niiden listahintojen perusteella (ks. sivut 19 ja 20, taulukot 5 ja 6). Lähtökohtana telavarustuksen määrittämisessä olivat selvästi toisistaan erottuvat pintapaine- ja kantavuusluokkatasot (pintapainetasot: <30 kPa, <40 kPa, <50 kPa ja >50 kPa). Siten tutkimukseen saatiin myös selkeämmät erot kuorman täyttöasteisiin varustelutasojen välille.

Turvemaiden kesäaikaisen korjuun uusinta kantavuusluokitusta (Högnäs ym. 2009), jonka perusteena on hehtaariohtaisen puuston määrä, käytettiin tutkimuksessa. Varustelutaso- ja kuormatraktorikokoluokittaiset kuorman täyttöasteet kohteiden kantavuusluokittain perustuivat pintapainelaskelmiin ja viimeisimpiin käytössä oleviin tutkimustietoihin (Terrängmaskinen 1981, Airavaara ym. 2008, Högnäs ym. 2009, Lamminen ym. 2010). Kesäaikaisilla turvemaakohteilla, joilla kantavuusluokka oli alhainen, vähiten varustelluilla koneilla laskennalliset pintapaineet ylittivät hieman kantavuusluokkarajan annetuilla kuorman täyttöasteilla. Pienenevä kuormakoko lisää myös ajokertojen määrää ja vaikuttaa raiteistumiseen (Sirén ym. 1987, Airavaara ym. 2008).

Kesäaikaisella turvemaan korjuukohteella kantavuus vaihtelee usein suuresti eri osissa kohdetta. Tätä ei otettu simuloinneissa huomioon, vaan korjuukohteen kantavuustila keskiarvoistettiin ja yleistettiin koko kohteelle. Lisäksi koneiden kiinnijäämistekijää ei käytetty simuloinneissa. Esimerkiksi Saarilahden (1981) mukaan vuonna 1978 silloisella korjuukalustolla ja korjuun toteutuksella kone upposi tai jäi kiinni keskimäärin 0,42 kertaa turvemailta korjattua tuhatta kuutiometriä kohden. Pohjoisimman korjuuyrittäjätapauksen ja heikoimmin kantavien kohteiden korjuussa pintapaineiltaan suuremman varustelutason kalustolla oli kesäaikaan tilanteita, jolloin osassa kohteista ei voitu noudattaa kohteiden maksimipintapainesuosituksia (Högnäs ym. 2009). Simulointimallissa ei laskettu tai ennustettu erikseen ajokertojen määrää tai raiteistumista. Pohjoisilla kohteilla oli oletettavaa, että heikoimmin varustelluilla ratkaisuilla ilmeni eteläisiä enemmän korjuuvaurioita turvemaiden kesäaikaisessa korjuussa.

4.1.4 Kustannuslaskenta

Korjuun kustannukset laskettiin vuoden 2009 kustannushintatiedoilla (Liitteet 5 ja 6) sekä simuloinneista saatujen ajanmenekkien ja korjuusuoritteiden pohjalta. Skenaarioiden vertailun luotettavuuden parantamiseksi kunkin yrittäjän korjuukalustolle määritettiin kiinteät koneen poistajat riippumatta siitä, kuinka paljon kyseisessä skenaariossa konetta käytettiin vuoden aikana. Tämä vertailutapa vastaa paremmin todellisuutta, sillä myös käytännössä pääoman/lainan poisto on useimmin määritetty kiinteälle ajalle. Kesäaikaisessa turvemaiden puunkorjuussa koneiden polttoaineen kulutus kasvaa erityisesti metsäkuljetuksessa. Polttoaineen kulutuksen lisäys otettiin simuloinneissa huomioon Lammisen ym. (2010) selvittämien tietojen mukaisesti. Pehmeällä maapohjalla tai turvepinnalla ajettaessa koneen kulkuvastus kasvaa oleellisesti (Ala-Ilomäki 1993, Asikainen ym. 2010).

4.2 Simulointiskenaariot

Tutkimuksen korjuuyrittäjien keskimääräiset vuotuiset korjuukustannukset kuutiometrille vaihtelivat skenaarioittain yrittäjän A noin 10 €/m³:stä yrittäjän C noin 18 €/m³:iin. Rungon keskikoon ja korjuukertymän pienenemisellä oli merkittävin vaikutus korjuun kustannusten kasvuun, mikä oli havaittavissa korjuuyrittäjien leimikkoaineistosta (taulukko 1, sivu 12) ja korjuukustannuksista. Suomessa koneellisen puunkorjuun keskimääräinen yksikkökustannus vuonna 2009 oli 10,44 €/m³ (Kariniemi 2010). Tämän tutkimuksen tuotavuus ja kustannuslaskentamalleilla saatiin keskimääräiselle ensiharvennuskohteelle yksikkökustannukseksi 16,2 €/m³ korjuuketjun koneiden käyttötuntien ollessa 2 600 h, keskirunkokoon 0,08 m³, kertymän 60 m³/ha ja metsäkuljetusmatkan 300 m (sivu 37, kuva 21). Vuonna 2009 ensiharvennusten keskimääräinen yksikkökustannus on ollut Kariniemen (2010) mukaan 16,47 €/m³. Vastaavasti Bergrothin ym. (2008) tutkimuksessa ojitettujen turvemaiden keskimääräiset korjuukustannukset ensiharvennuksilla olivat 18,2 €/m³, kun kustannukset laskettiin keskikokoisen yleiskoneluokan korjuuketjulle. Kustannuksia ei laskettu erikseen kesäaikaiselle turvemaiden puunkorjuulle.

Tutkimuksen korjuukaluston käyttötuntituotokset eri yrittäjätapauksissa vastasivat hyvin viimeaikaisten tutkimusten vastaavia erilaisilla leimikkokohteilla (Väkevä ym. 2001, Nurminen ym. 2006, Kärhä ym. 2007). Hakkuussa vuoden keskimääräiset käyttötuntituotokset vaihtelivat turvemaiden korjuuketjun hakkuukoneella 7,5 m³:stä 12,1 m³:iin yrittäjätapauksesta riippuen. Vastaavasti kuormatraktorin keskimääräiset käyttötuntituotokset vaihtelivat 10,5 m³:stä 13,0 m³:iin

yrittäjätapauksesta ja pehmeiden maiden korjuuvarustelusta riippuen. Korjuuyritysten kivennäismaille ohjattujen korjuuketjujen hakkuun käyttötuntituotos vaihteli 9,0 m³:stä 16,5 m³:iin. Vastaavasti kivennäismaiden korjuuketjun metsäkuljetuksessa tuotos vaihteli yrittäjittäin 12,2 m³:stä 16,6 m³:iin käyttötunnissa. Turvemaiden talvikorjuussa korjuuketjun keskituottavuus oli noin 12 m³/h, kun taas turvemaiden ympärivuotisessa korjuussa keskimääräinen laskettu tuottavuus oli ”parannetulla” (<50 kPa) varustelulla 10,3 m³/h, ”kantavalla” (<40 kPa) 10,7 m³/h ja ”superkantavalla” (<30 kPa) 10,9 m³/h.

Korjuuyrittäjillä korjuuketjujen vuosituotos vaihteli 18 000 m³:stä 37 000 m³:iin riippuen siitä, millä korjuualueella operoitiin, mikä oli vuotuinen ketjun käyttötuntimäärä ja toimiko ketju turvemaakohteilla vai puustoltaan paremmilla kivennäismaakohteilla. Vastaavasti vuotuiset käyttötuntimäärät vaihtelivat skenaarioittain ja koneittain aina 1 600 tunnista noin 3 000 tuntiin. Muutamissa tutkimuksissa metsäkoneiden keskimääräiset vuotuiset korjuuajat ovat olleet 2 400–2 700 käyttötuntia (Kärhä ym. 2007, Laitila 2008, Väättäinen ym. 2008). Käytännössä vaihtelu on suurempaa ja se on myös ollut voimakkaasti riippuvainen suhdannevaihteluista (Alanne 2001, Konealan suhdannenäkymät... 2005).

Hakkuukoneiden käyttöasteet vaihtelivat 80 ja 88 %:n välillä, kun taas kuormatraktoreiden käyttöasteiden vaihtelu oli suurempaa; 70–81 %. Alhaisemmat käyttöasteet kuormatraktoreilla aiheutuivat pääosin siitä, että simulointimalli rekisteröi kaikki työmaa-aikaiset odotustilanteet, kuten tuottavuuseroista aiheutuvat hakkuusuoritteiden odotukset keskeytyksiksi. Simuloinnin käyttöastetasot osoittavat hyvin koneiden tuottavuuseroista aiheutuvat korjuuketjujen epätasapainotilat; Alhaiset kuormatraktorin käyttöasteet kertovat kuormatraktorin korkeammasta tuottavuudesta hakkuukoneeseen nähden. Erityisesti korjuuyrittäjällä C kolmen hakkuukoneen vuosisuoritteiden olisi voinut kuljettaa kaksi kuormatraktoria ja silloin koneiden käyttöasteet olisivat kasvaneet merkittävästi. Todellisuudessa korjuuyrittäjillä B ja C oli käytössä kaksi kuormatraktoria. Käytännössä korjuukoneiden käyttöasteet ovat olleet 76–85 % (Konealan suhdannenäkymät... 2005, Jaakkola 2007).

Turvemaavarustelutasojen väliset korjuukustannusten erot korjuuyritystasolla olivat hyvin vähäiset ja ne riippuivat pääasiassa varustelun vuotuisesta käyttömäärästä. Pienillä kesäkorjuun käyttömäärillä hankintahinnaltaan kalliimpi turvemaavarustelu osoittautui kalliimmaksi myös korjuukustannuksissa, vaikka tuottavuus oli muita parempi. Jos varustelulle tuli käyttöä koko kesän, varustelluimmat ratkaisut osoittautuivat kustannustehokkaimmiksi. Erityisesti pitkillä metsäkuljetusmatkoilla (yli 400 m) varustelluimmat ja pintapaineiltaan pienimmät ratkaisut olivat kustannustehokkaampia suuremman kuormakoon tuoman kuljetusedun ansioista. Pohjoissemmassa, pienemmän runkokoon ja kertymän kohteilla turvemaille erikoistuneen korjuuketjun tuottavuustasapaino oli huono käytettäessä suurempaa kuormatraktoria ja alle 30 kPa:n varustelutasoa. Kuormatraktorin suoritepotentiaalia ei voitu hyödyntää tehokkaasti, sillä hakkuukoneen ja kuormatraktorin välillä oli keskimäärin 4,8 m³/h tuottavuusepätasapaino. Kyseisissä korjuuolosuhteissa kantavimman turvemaiden varustelutason kuormatraktorilla (<30 kPa) voisi kuljettaa kahden hakkuukoneen hakkuusuoritteiden.

On otettava huomioon, että käytännössä kantavampi varustelutaso suo paremman pelivaran heikoimmin kantavilla kohteilla. Ajokertojen määrät saadaan pienemmiksi ja korjuujälki on parempaa kantavammilla ratkaisuilla (Airavaara ym. 2008). Sen lisäksi yllättäviä uppoamisia ja kiinnijäämisiä voidaan vähentää, mikä osaltaan vaikuttaa korjuun kustannuksiin. Näitä tekijöitä ei mallinnettu erikseen tutkimuksen simulointimalliin, mutta käytännössä näillä tekijöillä on vaikutuksensa varusteluratkaisujen keskinäiseen edullisuuteen.

Korjuuskenaarioiden simulointitulosten tarkastelu toi esille turvemaiden kesäkorjuun positiivisen vaikutuksen korjuukustannuksiin tilanteissa, jolloin tavanomaisista kangasmaiden kesäleimikoista ilmeni selvää puutetta. Turvemaiden osuuden ollessa 10–20 % korjuukertymästä ja talvikorjuujan ollessa pitkä (3,5–4 kk) turvemaakohteiden korjuu tehokkaasti talviaikana oli selvästi kustannustehokkain toimintamuoto. Jo 25 %:n ja sitä suuremmilla turvemaakohteiden kertymäosuudella oli kannattavampaa varustella yksi korjuuketju turvemaiden kesäkorjuuseen ja korjata turvemaita ympärivuotisesti kuin korjata turvemaat pelkästään talviseen aikaan. Pohjois-Pohjanmaan yrittäjätapauksissa (yrittäjät B ja C) turvemaakorjuuosuuden kasvu aina 50 %:iin lisäsi koneiden käyttömääriä ja korjuusuoritteita verrattaessa pienempiin turvemaiden korjuuosuuksiin. Näillä kohteilla kangasmaiden kesäleimikoista on selkeä puute ja turvemaiden osuus metsämaasta voi olla yli 50 %. Kolmen korjuuketjun tutkimusskenaarioissa 40–50%:n turvemaosuudet kyettiin korjaamaan turvemaiden talvikorjuun ja yhden korjuuketjun turvemaiden kesäkorjuun panoksella. Lisäksi talvella kaikki korjuukoneet osallistuiivat turvemaiden korjuuseen siten, että muita kuin turvemaakohteita korjattiin keskimäärin 15–25 % talven korjuukohteista.

Lisätarkastelussa simuloitiin tutkimusyrittysten korjuukustannukset skenaariossa, jossa turvemaakohteet tulivat korjuuseen satunnaisesti ilman kantavuusluokitusta ja -järjestystä. Kantavuuden suhteen järjestämätön leimikkoaineisto aiheutti kustannuksia sitä enemmän mitä pohjoisemmassa toimittiin. Siten heikosti kantavien, kertymältään pienien turvemaaleimikoiden järjestäminen kantavuuden suhteen korjattavaksi olisi erityisen tärkeää.

Turvemaiden korjuukalustoratkaisujen kustannuserkkyystarkastelu käytetyillä lähtöarvoilla ja muuttujavaihteluilla osoitti turvemaiden keskimääräisen ensiharvennuskohteen talviaikaisen korjuun olevan 10–14 % kesäaikaista korjuuta edullisempaa. Ympärivuotinen puunkorjuu loi mahdollisuuden koneiden suurempiin käyttömääriin, jolloin korjuukustannuserot kausikorjuukaluston ja ympärivuotisen kaluston välillä pienenevät merkittävästi. Herkkyystarkastelu toi hyvin esille kuormakoon ja metsäkuljetusmatkan välisen vaikutuksen korjuukustannuksiin. Merkittävin kesäkorjuun kustannuksia lisäävä tekijä on turvemaiden korjuun suuremmasta ajanmenekistä aiheutuva kustannusvaikutus. Lammisen ym. (2010) toteuttaman korjuuyrittäjien haastattelututkimuksen mukaan ajanmenekki turvemaiden kesäkorjuussa talvikorjuuseen verrattuna kasvaa hakkuussa keskimäärin 12 % (5–20 %) ja vastaavasti metsäkuljetuksessa 7 % (5–15 %). Jos kesäkorjuuta voisi tehostaa siten, että ajanmenekin kasvu puolittuisi, korjuukustannus kesäaikaiselle korjuulle kesäkorjuuvarustelulla ketjulla pienenesi 4–6 %. Kustannusten vähentämisessä olennaisinta on, kuinka paljon turvemaiden kesäkorjuu tuo ympärivuotisuutta ja lisää käyttötunteja koneille. Vaihtoehtoisesti pyrkimys pitää kuljettajat yrityksellä kesäseisokkien aikaan aiheuttaa palkkakustannuksia ilman korjuusuoritteita.

Pehmeiden maiden erikoiskalustoa ei ollut simuloinneissa mukana, mutta kustannuserkkyystarkasteluissa tela-alustainen ratkaisu oli yhtenä tarkasteluvaihtoehtona. Kustannustarkastelujen perusteella tela-alustainen pehmeiden maiden korjuuketju osoittautui hyvin kustannustehokkaaksi vaihtoehdoksi turvemaavaltaisille alueille. Varusteltuun yleiskorjuuketjuun verrattuna se osoittautui samalla käyttötuntimäärällä 5–10 % kustannustehokkaammaksi ratkaisuksi turvemaiden ympärivuotisessa puunkorjuussa. Konseptin kustannusetu muodostui erityisesti metsäkuljetuksen suuremman kuormakoon sekä hakkuun edullisemmän tuntikustannuksen ansiosta. Etua voi myös olettaa tulevan vähäisemmästä tarpeesta havuttaa tai muuten parantaa ajourien kantavuutta, ja siten pienemmästä ajanmenekkilisästä korjuussa. Herkkyyslaskelmat oli tehty keskimääräiselle ensiharvennuskohteelle vaihtelevalla metsäkuljetusmatkalla eikä korjuuketjun koneiden tuottavuusepätasapainon vaikutuksia ole otettu huomioon.

Tela-alustaista pehmeiden maiden korjuukoneratkaisua edustavat Pro-Silvan konseptit hakkuu- ja ajokoneina. Käyttökokemuksta konsepteilla on jo tullut, ja kuljettajapalautteen mukaan kalusto toimii hyvin sekä kesä- että talviaikaisessa turvemaiden puunkorjuussa (Kuljettajahaastattelut 2010). Tela-alustaisen koneen hyviä puolia ovat muun muassa alhainen ja tasainen pintapaine, suuri vakaus ja nosturin täyden ulottuvuuden käyttömahdollisuus pehmeämmissäkin paikoissa (kuljettajahaastattelut 2010). Kevyempiä tela-alustaisia ratkaisuja on myös markkinoilla, mutta kokemus niiden käytöstä on osoittanut niiden rajoitteiden olevan entisellään, sillä erityisesti kuormakoko pudottaa systeemin tuottavuutta ja siten nostaa kustannuksia. Konsepti on erityisen herkkä metsäkuljetusmatkan muutoksille.

5 Päätelmät

Korjuuyrityksen tasolla tarkasteltuna ympärivuotinen puunkorjuu turvemaavaltaisilla alueilla on järkevää ja kustannustehokasta käytettäessä nykyisiä käytössä olevia kalusto- ja varusteluratkaisuja. Ympärivuotinen turvemaiden puunkorjuu paransi kuljettajien työllistymistä, koneiden käyttöstettä ja lisäsi vuotuista korjuumäärää. Näiden hyötyjen saamisen edellytyksenä oli, että talvikorjuukohteista ei ilmennyt niukkuutta ympärivuotisen puunkorjuun skenaarioissa. Turvemaiden kustannustehokkaalle kesäaikaiselle korjuulle vaihtoehtoisia korjuukonsepteja ovat pehmeille maille varusteltu yleis-/harvennuskonekorjuuketju tai tela-alustaiset korjuukoneet. Siihen, millainen varustelu on järkevää yleiskorjuukalustolle tai tuleeko erikoiskorjuukalusto kysymykseen, vaikuttaa erityisesti turvemaakohteiden määrä suhteessa kovien maiden korjuumäärään. Jos korjuuta pehmeillä mailloilla on vain täydentävänä työmuotona kesäaikaan, vähäisempi varustelu pehmeiden maiden korjuuseen voi olla kannattavinta. Kyseisellä toimintamallilla korjuun ajankohtaa voidaan ohjata esim. sateettomille kesäjaksoille, jolloin kohteen kantavuus ja korjuun kannattavuus paranee.

Tulosten perusteella voitiin osoittaa, että turvemaakorjuukertymän kasvaessa 20–30 prosenttiin, vähintään noin kolmannes korjuukalustosta tulisi varustella turvemaiden korjuukoneiksi tai tulisi olla turvemaille suoraan soveltuvia telakoneita. Myös talvikorjuuajan kestolla oli selvä vaikutus siihen, kuinka paljon turvemaita oli mahdollista korjata vuoden aikana. Yleiskorjuukoneiden lisävarustelun investointikustannus pehmeiden maiden korjuuseen on suhteellisen pieni. Lopulta korjuuvarustelun investoinnin kannattavuuteen vaikuttaa varustelun vuotuinen käyttömäärä, sopivien korjuukohteiden valinta ja niiden tehokas korjuu sekä turvemaakohteiden kesäkorjuun taksa. Pehmeiden maiden varustelutasoa ja tela-alustaisen kaluston hankintaa suunniteltaessa on syytä selvittää kyseisen korjuualueen turvemaiden osuus korjuusta, pehmeiden maiden osuudet eri kantavuustasoilla sekä muut vaikuttavat seikat, kuten routa- ja lumiajan kestot keskimääräisen korjuuvuoden aikana.

Kantavimpien korjuuratkaisujen hankinta on erityisen perusteltua silloin, jos heikosti kantavia kohteita on tarjolla koko kesäajalle ja pyrkimyksenä on minimoida kiinnijäämistä sekä korjuuvaurioita. Hehtaarikohtaisen puustomäärän pienessä pohjoiseen mentäessä myös kohteen kantavuus keskimäärin heikkenee ja siksi varustellumpi korjuukalusto olisi perustellumpaa. Kevyet kuormatraktorit kantavalla korjuuvarustelulla ja pienellä kuormakoolla lisäävät ajokertojen määrää ajouraverkoston eri paikoissa suuremman kuormakoon kantavimpiin varusteluratkaisuihin nähden. Ajokertojen määrällä sekä uralla ajettulla kokonaispainomäärällä on todettu olevan selvä yhteys ajourien kantavuuteen ja raiteenmuodostukseen (Sirén ym. 1987, Karlsson ja Myhrman 1990, Airavaara ym. 2008). Korjuun tehokkuuteen ja lopulliseen korjuujälkeen voidaan vaikut-

taa erityisesti hakkuun aikana. Metsäkuljetusta huomioon ottava työtapana, jossa huomiota kiinnitetään ajourien sijoitukseen ja suoruuteen, riittävään ajouraleveyteen, kantojen mataluuteen sekä riittävään havutukseen uralla, on tärkeä (Lamminen ym. 2010, Kärhä ym. 2010).

Yleisesti ottaen turvemaavaltaisilla korjuualueilla talvileimikoiden runsaus ja kesäleimikoiden vähäisyys puoltaa korjaamaan turvemaakohteita myös kesäaikaan. Tutkimuksen tulosten mukaan ympärivuotinen turvemaiden puunkorjuu lisäsi vuotuista korjuumäärää, lisäsi koneiden käyttömääriä ja vähensi koneiden seisokkiaikaa. Vaikka korjuu kesäaikaisilla turvemailla vie enemmän aikaa ja on kalliimpaa talviseen korjuuseen verrattuna, pääosin edellä mainitut kolme tekijää parantavat korjuuryityksen toimintaedellytyksiä ja jopa vähentävät korjuun yksikkökustannuksia. Ympärivuotinen korjuu parantaa koneenkuljettajien työsuhteen laatua, mikä parantaa mm. työssä pysymistä ja asenteita puunkorjuussa. Laajempina korjuu- tai hankinta-alueina tarkasteltaessa alueen korjuukaluston määrää voitaisiin säätää myös paremmin siten, ettei kaluston mitoitus perustuisi enää kausittaisen korjuuhuippujen mukaiseen laskentaan. Tämä aiemmin vallalla ollut toimintamalli on tuonut merkittävää vajaakäyttöä metsäkoneille juuri niille korjuukausille, jolloin hakkuuseen sopivista korjuukohteista on ollut niukkuutta.

Pehmeiden korjuukohteiden kantavuuden ja raiteistumisen ennustamisessa tapahtuu kaiken aikaa tutkimus- ja kehitystyötä, joten uusia ja tarkempia ennustemenetelmiä on luvassa (Asikainen ym. 2010). Ennakkotieto korjuukohteen kantavuudesta ennen hakkuuta ja varsinaisen hakkuun jälkeen ajouraverkoston eri kohdissa on erittäin tärkeää kustannustehokkaan metsäkuljetuksen toteutumiseksi. Tietämys kohteen ominaisuuksista kantavuuden suhteen on tärkeää jo leimikon suunnittelussa, jolloin korjuuohjeisiin voidaan liittää korjuun sujuvuuteen suoraan vaikuttavaa tietoa. Toimiva ja tehokas puunkorjuu edellyttää myös riittävän kattavan leimikkoreservin hyödyntämistä korjuukelpoisuustietoineen, jotta korjuun ja kuljetusten ohjaus tehokkaasti ohjaisi koneet niille parhaiten soveltuville leimikoille (Lappalainen 2008, Lamminen ym. 2010).

Jotta turvemaavaltaiten alueiden korjuupotentiaali saadaan tehokkaammin hyödynnettyä, tehokas kesäaikainen ja siten ympärivuotinen turvemaiden puunkorjuu tulee saada entistä laajemmin käytäntöön. Sekä turvemaiden kantavalla telavarustuksella yleiskoneille että pehmeiden maiden tela-alustaisella kalustolla on selkeä sijansa turvemaiden ympärivuotisessa puunkorjuussa. Maastoystävällisempien korjuuratkaisujen tutkiminen voi luoda uusia ratkaisuja myös herkkien maapohjien ja puustojen kesäaikaisiin harvennuskäytäntöihin. Pehmeän maan tela- ja pyörävarusteluja sekä uusia harvennus- ja puustonkäsittelytekniikoita tutkitaan parhaillaan Metsäntutkimuslaitoksessa. Simulointitutkimuksen tulokset tukevat jo käytännön puunkorjuun suuntautumista ympärivuotisempaan korjuuseen pehmeillä mailla. Jotta turvemaiden kesäkorjuuta saadaan tehokkaammaksi, paremmin hallittavaksi ja vähemmän korjuuvaurioita tuottavaksi, tutkimusta kesäkorjuun tehokkaista ratkaisuista jatketaan uudessa Metsäklusteri Oy:n koordinoimassa EffFibre-ohjelman ”Operational efficiency of intensified wood production and supply” hankkeessa. Olennaisia tutkimuksen kohteita on muun muassa hakkuukoneen keräämien maastotun- ja kulkuvastustietojen hyödyntäminen lähikuljetuksessa (Asikainen ym. 2010).

Kirjallisuus

- Airavaara, H., Ala-Ilomäki, J., Högnäs, T. ja Sirén, M. 2008. Nykykalustolla turvemaiden puunkorjuuseen. Metlan työraportteja 80. 46 s. Saatavilla: <http://www.metla.fi/workingpapers/2008/mwp080.htm>
- Ala-Ilomäki, J. 1993. A terramechanical approach for evaluating mobility and ground disturbance during skidding and forwarding: preliminary trials (Les relations véhicule-sol dans l'évaluation de la mobilité et des perturbations du sol lors du débardage: essais préliminaires). FERIC Special Reports 86. 14 s.
- Ala-Ilomäki, J. 2005. Metsäisten turvemaiden kulkukelpoisuus. Julkaisussa: Ahti, E., Kaunisto, S., Moilanen, M. & Murtovaara, I. (toim.). Suosta metsäksi. Suometsien ekologisesti ja taloudellisesti kestävä käyttö. Tutkimusohjelman loppuraportti. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 947: 98–111.
- Ala-Ilomäki, J. 2006. The effect of weather conditions on the trafficability of unfrozen peatlands. *Metsanduslikud Uurimused - Forestry Studies* 45: 57–66.
- Alanne, H. 2001. Metsäkone- ja puutavara-autokalusto ja sen työmäärät vuonna 1999. Metsätehon raportti 102. 19 s.
- Asikainen, A. 1995. Discrete-event simulation of mechanized wood-harvesting systems. University of Joensuu, Faculty of Forestry, Research Notes 28. 86 s.
- Asikainen, A. 1998. Chipping terminal logistics. *Scan. J. For. Res.* V13(3):386–391.
- Asikainen, A. 2001. Simulation of logging and barge transport of wood from forests on islands. *International Journal of Forest Engineering*. Vol. 12.(2): 43–50.
- Asikainen, A. & Nuuja, J. 1999. Palstahaketuksen ja hakkeen kaukokuljetuksen simulointi. [The simulation of forest stand chipping and long-distance transporting of forest chips.] *Metsätieteen aikakauskirja* 3/1999: 479–490.
- Asikainen, A., Hynynen, J., Teeri, T., Vuorinen, T., Määttä, M., Ritala, R., Kälviäinen, H., Lensu, L., Hellén, E., Lipponen, J., Poranen, J., Tukiainen, P. 2010. "Intelligent and Resource-Efficient Production Technologies" (EffTech) – program. Confidential program report. 1.6.2008-30.06.2010. Forest Cluster Ltd. 187 s.
- Bergroth, J., Ihalainen, A. ja Heikkilä, J. 2008. Ojitettujen turvemaiden taloudellinen ensiharvennuspotentiaali. *Metsätehon katsaus* nro 32. 4 s.
- Eronheimo, O. 1991. Suometsien puunkorjuu. *Folia Forestalia* 779: 1–29.
- Eliasson, L. 2005. Effects of forwarder tyre pressure on rut formation and soil compaction. *Silva Fennica* 39(4): 549–557.
- Friman, J-M. 2009. Metsäkoneiden siirtojen toteutustavat ja kustannukset – Otos Keski-Suomen ja Savon korjuuyrittäjistä. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta, kandidaatin tutkielma. 24 s.
- Hallongren, H. 2010. Kaivukoneen ympärivuotinen metsätyökäyttö – simulointitutkimus koneellisesta metsänistutuksesta ja turvemaiden puunkorjuusta. Metsä- ja puuteknologian Pro Gradu. Itä-Suomen yliopisto. Luonnontieteiden ja metsätieteiden tiedekunta. 61 s.
- Heikkilä, J. 2007. Turvemaiden puun kasvatus ja korjuu – nykytila ja kehittämistarpeet. Metlan työraportteja 43. 29 s. Saatavilla: <http://www.metla.fi/workingpapers/2007/mwp043.htm>

- Hyvän metsänhoidon suositukset turvemaille 2007. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. Metsäkustannus Oy, Helsinki. 50 s.
- Högnäs, T. 1986. Harvennuspuutavaran kuljetus Jermu-telamaasturilla. Metsähallituksen kehittämisjaosto. Koeselostus 230. 11 s.
- Högnäs, T. 1997. Puunkorjuu turvemaalla. Metsähallituksen aikaisemman kokeilutoiminnan tuloksia. Metsähallitus. Metsätalouden kehittämissyksikön tiedote 2. 12 s.
- Högnäs, T., Kärhä, K., Lindeman, H. ja Palander, T. 2009. Turvemaaharvennusten kantavuusluokitus. Metsätehon tulosalvosarja 17/2009. Saatavilla: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tulosalvosarja/Tulosalvosarja_2009_17_Turvemaaharvennusten_kantavuusluokitus_kk.pdf.
- Jaakkola, S. 2007. Koneyrittäjien tulevaisuusnäkömät: Myönteistä kehitystä työmäärissä, hinnoissa ja kannattavuudessa. Koneyrittäjä. Nro 9: 14–16.
- Karlsson, L. ja Myhrman, D. 1990. Spårdjupsprov, skotare. Skogsarbeten, Resultat 22. 4 s.
- Kariniemi, A. 2010. Puunkorjuu ja kaukokuljetus vuonna 2009. Metsätehon katsaus nro 43. 4 s.
- Konealan suhdannenäkömät. 2005. Konealan suhdannenäkömät ovat yhä kehnonlaiset. Metsä-Trans 6/2005. 10–13 s.
- Kuitto, P.J., Keskinen, S., Lindroos, J., Oijala, T., Rajamäki, J., Räsänen, T. & Terävä, J. 1994. Puutavaran koneellinen hakku ja metsäkuljetus. Metsätehon tiedotus 410. 38 s. + 13 liites.
- Kärhä, K. ja Peltola, J. 2004. Metsäkoneiden monikäyttöisyys. Metsätehon raportti 181. 17 s.
- Kärhä, K., Poikela, A., Rieppo, K., Imponen, V., Keskinen, S. ja Vartiamäki, T. 2007. Korjurit ainespuun korjuussa. Metsätehon raportti 200. 50 s.
- Kärhä, K., Poikela, A. & Keskinen, S. 2010. Korpikuusikon harvennus sulan maan aikaan. Metsätehon tulosalvosarja 5/2010. 47 s. Saatavilla: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tulosalvosarja/Tulosalvosarja_2010_05_Korpikuusikon_harvennus_kk.pdf
- Laitila, J. 2008. Harvesting technology and the cost of fuel chips from early thinnings. Silva Fennica 42(2): 267–283.
- Lamminen, S. 2008. Raiteistumista selittävät tekijät turvemaiden puunkorjuussa. Pro gradu -työ. Joensuun yliopisto. Käsikirjoitus. 54 s.
- Lamminen, S., Jantunen, J. & Väätäinen, K. 2010. Puunkorjuu ojitetuilla turvemaille kesäaikaan – erityispiirteet ja toimintamallit. Haastattelututkimus. Käsikirjoitus.
- Lappalainen, M. 2008. Kotimaisen puunhankinnan tulevaisuuden liiketoimintamallit – tutkimushankkeen tulokset ajalta 2006–2008. N:o 248/2008. Jyväskylän yliopisto. 115 s.
- Lappalainen, M. 2009. Kotimaisen puunhankinnan tulevaisuuden liiketoimintamallit – tutkimushanke. Loppuraportti 7.1.2009. Jyväskylän yliopisto. 27 s.
- Metsätalastollinen vuosikirja. 2009. Metsätalastollinen vuosikirja 2009, Metsäntutkimuslaitos. 452 s.
- Mäkelä, M. 1986. Metsäkoneiden kustannuslaskenta. Moniste. Metsäteho. 21 s.
- Mäkelä, M. 1990. Turvemaiden koneellinen puunkorjuu kesäaikaisissa harvennuksissa. Metsätehon katsaus 4. 6 s.

- Mäkinen, P., Rummukainen, A. & Aarnio, J. 1997. Puunhankinnan organisointitavat. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja - The Finnish Forest Research Institute, Research Papers 647. 102 s.
- Nurminen, T., Korpunen, H. & Uusitalo, J. 2006. Time consumption analysis of the mechanized cut-to-length harvesting system. *Silva Fennica* 40(2):335–363.
- Nuutinen, T., Hirvelä, H., Salminen, O. & Härkönen, K. 2007. Alueelliset hakkuumahdollisuudet valtakunnan metsien 10. inventoinnin perusteella, maastotyöt 2004–2006. *Metsätieteen aikakauskirja* 2B/2007: 215–248.
- Ojitusalueiden puunkorjuu. 1998. Metsätehon opas. 28 s.
- Pennanen, O. ja Mäkelä, O. 2003. Raakapuukuljetusten kelirikkohaittojen vähentäminen. *Metsätehon raportti* 153. 53 s.
- Piennartieopas. 2009. Piennartieopas – Kulkuyhteyksien parantaminen osana turvemaiden puun hankintaa ja metsien hoitoa. Seinäjoen ammattikorkeakoulu. 15 s.
- Rummukainen, A. 1984. Peatland properties and their evaluation for wood harvesting. Final report for "harvesting on peatlands", a research project of the Nordic Research Council on Forest Operations (NSR), 1977–1983, Helsingin yliopiston metsäteknologian laitoksen tiedonantoja n:o 45. 119 s.
- Ryynänen, S. & Rönkkö, E. 2001. Harvennusharvestereiden tuottavuus ja kustannukset. Helsinki. Työtehoseuran julkaisuja 381. 67 s.
- Saarilahti, M. 1997. Suotyypien raiteistumisherkyys. *Suo* 48(2):51–54.
- Saarilahti, M. 1981. Koneiden uppoaminen suometsien puunkorjuussa. *Silva Fennica* 15(3): 323–331.
- Sirén, M., Ala-Ilomäki, J. & Högnäs, T. 1987. Harvennuksiin soveltuvan metsäkuljetuskaluston maastokelpoisuus. Summary: Mobility of forwarding vehicles used in thinnings. *Folia Forestalia* 692. 62 s.
- Sirén, M. 1998. Hakkuukonetyö, sen korjuujälki ja puustovaurioiden ennustaminen. Väitöskirja. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 694. 179 s.
- Sirén, M. 2000. Turvemaiden puunkorjuun kehittäminen. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2000:301–307.
- Sirén, M. & Tantt, V. 2001. Pienet hakkuukoneet ja korjuu rämemännikön talvikorjuussa. *Metsätieteen aikakauskirja* 4: 599–614.
- Sirén, M. & Tantt, V. 2001. Pienet hakkuukoneet ja korjuu rämemännikön talvikorjuussa. *Metsätieteen aikakauskirja* 4: 599–614.
- Sirén, M. 2005. Korjuuolot ja puunkorjuu. Teoksessa: Suosta metsäksi – Suometsien ekologisesti ja taloudellisesti kestävä käyttö. (toim.) Ahti, E., Kaunisto, S., Moilanen, M. ja Murtovaara, I. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 947. 204–238.

- Suutari, V., Kariniemi, A., Keränen, J., Punttila, T., Siponen, K., Teittinen, A. ja Valtonen, J. 2008. Heikosti kantavan maan puunkorjuu – sulan maan aikana. Metsätehon tulosalvosarja 11/2008. Saatavilla: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tulosalvosarja/Tulosalvosarja_2008_11_Heikosti_kantavan_maan_puunkorjuu_aka.pdf
- Terrängmaskinen 1981. Del 2. 2. painos. Forskningstiftelsen Skogsarbeten. 461 s.
- Väkevä, J., Kariniemi, A., Lindroos, J., Poikela, A., Rajamäki, J. & Uusi-Pantti, K. 2001. Puutavaran metsäkuljetuksen ajanmenekki. Metsätehon raportti 123. 41 s.
- Väätäinen, K., L.Sikanen, and A.Asikainen, 2000. Rakeistetun puutuhkan metsäänpalautuksen logistiikka. [Logistics of returning granulated wood ash back to the forest.] Joensuun yliopiston metsätieteellisen tiedekunnan tiedonantoja 116. 99 s.
- Väätäinen, K., Ovaskainen, H., Ranta, P. & Ala-Fossi, A. 2005a. Hakkuukoneenkuljettajan hiljaisen tiedon merkitys hakkuutulokseen työpistetasolla. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 937, 90 s. + 10 liites.
- Väätäinen, K., Asikainen, A. & Eronen, J. 2005b. Improving the logistics of biofuel reception at the power plant of Kuopio city. *International Journal of Forest Engineering* 16(1): 51–64.
- Väätäinen, K., Asikainen, A. & Sikanen L. 2006. Metsäkoneiden siirtokustannusten laskenta ja merkitys puunkorjuun kustannuksissa. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2006: 391–397.
- Väätäinen, K., Liiri, H., Asikainen, A., Sikanen, L., Jylhä, P., Rieppo, K., Nuutinen, Y. ja Ala-Fossi, A. 2007. Korjureiden ja korjuuketjun simulointi ainespuun korjuussa. Metlan työraportteja 48. Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2007/mwp048.htm>. 78 s.
- Väätäinen, K., Lappalainen, M., Asikainen, A. ja Anttila, P. 2008. Kohti kustannustehokkaampaa puunkorjuuta – puunkorjuuyrittäjän uusien toimintamallien simulointi. Metlan työraportteja 73. 52 s. Saatavilla: http://www.metla.fi/working_papers/2008/mwp073.htm
- WITNESS. 1998. WITNESS. Version 9 User manual. Lanner Group. 352 s.

Muut lähteet:

- Kuljettajahaastattelut 2010. Tela-alustaisten korjuukoneiden kuljettajien haastattelut 5.9.2010.
- VMI9 tietokannat. Metsäntutkimuslaitos.
- VMI10 tietokannat. Metsäntutkimuslaitos.

LIITE 1. Tutkimuksen korjuuyrittäjien leimikkotunnuksia korjuukelpoisuusluokittain.

Taulukko 17. Korjuuyrittäjän A leimikkotunnuksia kivennäismaan eri korjuukelpoisuusluokille sekä turvemaakohteille.

	Talvi	Kesä	Kelirikko	Turvemaa
Leimikkokokoko, m ³	334	336	397	288
Keskirunkokokoko, m ³	0,216	0,158	0,215	0,143
Pinta-ala, ha	2,3	3,2	2,3	3,4
Metsäkuljetusmatka, m	248	235	172	436
kertymä, m ³ /ha	145	104	175	84
lehtipuuosuus, %	0,25	0,23	0,14	0,29
Hakkuutapojen suhteet				
harvennuksia, %	24	26	0	64
uudistushakkuita, %	76	74	100	36

Taulukko 18. Korjuuyrittäjän B leimikkotunnuksia kivennäismaan eri korjuukelpoisuusluokille sekä turvemaakohteille.

	Talvi	Kesä	Kelirikko	Turvemaa
Leimikkokokoko, m ³	422	533	583	496
Keskirunkokokoko, m ³	0,153	0,152	0,207	0,091
Pinta-ala, ha	4,4	5,4	3,6	8,8
Metsäkuljetusmatka, m	323	305	240	462
kertymä, m ³ /ha	96	98	161	56
lehtipuuosuus, %	0,34	0,28	0,32	0,42
Hakkuutapojen suhteet				
harvennuksia, %	29	12	2	71
uudistushakkuita, %	71	88	98	29

Taulukko 19. Korjuuyrittäjän C leimikkotunnuksia kivennäismaan eri korjuukelpoisuusluokille sekä turvemaakohteille.

	Talvi	Kesä	Kelirikko	Turvemaa
Leimikkokokoko, m ³	285	262	270	265
Keskirunkokokoko, m ³	0,119	0,117	0,103	0,080
Pinta-ala, ha	4,5	5,1	5,7	5,4
Metsäkuljetusmatka, m	400	317	203	404
kertymä, m ³ /ha	63	51	47	49
lehtipuuosuus, %	0,06	0,10	0,11	0,20
Hakkuutapojen suhteet				
harvennuksia, %	26	41	20	71
uudistushakkuita, %	74	59	80	29

LIITE 2. Koneenkuljetusajoneuvon nopeusmallit korjuukoneiden siirroille.

Kuormattuna ajon nopeus (km/h) = $(Sku*60)/(10,7573+0,834*Sku - (0,5 / (Sku+2)))$

Tyhjänä ajon nopeus (km/h) = $(Sty*60)/(9,3133+0,77548*Sty - (0,5 / (Sty+2)))$

missä

Sku = kuormattuna ajomatka, km

Sty = tyhjänä ajomatka, km

LIITE 3. Kuormatilavuuden laskenta kuormatraktorille

Tukkiosuuden laskentamalli:

$$T = (26,328 \cdot \text{LN}(v) + 85,709) / 100$$

missä,

T = tukkiosuuskerroin

v = korjuulohkon rungon keskikoko, m^3

Kuormakoon laskentamalli lehti- ja havupuille:

Lehtipuille:

$$K_{\text{tilaL}} = T \cdot (P_{\text{ala}} \cdot T_{\text{tL}} \cdot L_{\text{tL}}) + (1-T) \cdot (P_{\text{ala}} \cdot T_{\text{kL}} \cdot L_{\text{kL}})$$

Havupuille:

$$K_{\text{tilaH}} = T \cdot (P_{\text{ala}} \cdot T_{\text{tH}} \cdot L_{\text{tH}}) + (1-T) \cdot (P_{\text{ala}} \cdot T_{\text{kH}} \cdot L_{\text{kH}})$$

missä,

K_{tilaL} = kuormatilan koko lehtipuille, m^3

K_{tilaH} = kuormatilan koko havupuille, m^3

T = tukkiosuuskerroin

P_{ala} = kuormatilan poikkipinta-ala, m^2

T_{tL} = 0,63 (tukkipölkkyjen pinotiiviyskerroin, lehtipuut)

L_{tL} = 5,0 (lehtipuutukkipölkkyjen keskipituus, m)

T_{kL} = 0,55 (kuitupölkkyjen pinotiiviyskerroin, lehtipuut)

L_{kL} = 4,3 (lehtipuukuitupölkkyjen keskipituus, m)

T_{tH} = 0,71 (tukkipölkkyjen pinotiiviyskerroin, havupuut)

L_{tH} = 4,7 (havupuutukkipölkkyjen keskipituus, m)

T_{kH} = 0,64 (kuitupölkkyjen pinotiiviyskerroin, havupuut)

L_{kH} = 4,4 (havupuukuitupölkkyjen keskipituus, m)

Keskimääräisen kuormakoon laskentamalli korjuulohkolle:

$$K_{\text{tila}} = L \cdot K_{\text{tilaL}} + H \cdot K_{\text{tilaH}}$$

missä,

K_{tila} = keskimääräinen kuormakoko, m^3

K_{tilaL} = kuormatilan koko lehtipuille, m^3

L = lehtipuukerroin korjuulohkolle (lehtipuuston osuus kertymästä)

K_{tilaH} = kuormatilan koko havupuille, m^3

H = havupuukerroin korjuulohkolle (havupuuston osuus kertymästä)

LIITE 4. Metsätraktorin etu- ja takaosan massojen ja pintapaineiden laskentamallit

Metsätraktorin etu- ja takaosien massojen laskentamallit:

$$W_{\text{taka}} = S_{\text{taka}} * T_w + V_{\text{wt}} + L_w$$

$$W_{\text{etu}} = (1 - S_{\text{taka}}) * E_w + V_{\text{we}}$$

missä,

W_{taka} = takarungon kokonaismassa kuormattuna, kg

S_{taka} = massasuhdekerroin takarungolle

T_w = takarungon massa, kg

V_{wt} = telavarustelun massa rungon takaosalle, kg

W_{etu} = eturungon kokonaismassa kuormattuna, kg

E_w = eturungon massa, kg

V_{we} = telavarustelun massa rungon etuosalle, kg

Pintapaineiden laskentamalli etu-/takatelille telan kanssa:

$$P_p = (W_m / 2 * 9,81 / 1000) / ((1,25 * W_r + N_l) * T_l)$$

missä,

P_p = telavarustelun pintapaine rungon etu-/takaosalle, kPa

W_m = etu-/takarungon kokonaismassa kuormattuna, kg

W_r = renkaan säde, m

N_l = telin napojen väli, m

T_l = telan leveys, m

LIITE 5. Kustannuslaskennan arvot korjuukoneille

Taulukko 20. Kustannuslaskennan arvot pääomatekijöille (hankintahinnat ilman arvonlisäveroä).

	Peruskone	Hakkuulaite
Hankintahinta ¹		
Hakkuukone (painoluokka 15 000–17 000 kg)	298 500 €	52 500 €
Kuormatraktori		
Harvennuskone (kantokyky 10 000 kg)	229 000 €	
Yleiskone (kantokyky 12 000 kg)	245 000 €	
Käyttöikä		
Hakkuukone	5 vuotta (ksm. 13 000 h)	2,5 vuotta (ksm. 7 000 h)
Kuormatraktori	6-7 vuotta (ksm. 15 000 h)	
Vuotuinen arvon aleneminen		
Hakkuukone	23 %	35 %
Kuormatraktori	20 %	

¹Hankintahintoihin on lisätty keskimääräisen varustetason (telat, GPS ym.) kustannukset, jotka ovat hakkuukoneelle 12 000 € ja kuormatraktorille 8 000 € (alv 0 %).

Taulukko 21. Kustannuslaskennan arvot kulutustekijöille (H=hakkuukone, K=kuormatraktori).

Kulutuskulut	
Polttoaine (Hakkuukone, Kuormatraktori)	H: 12 litraa/tunti K: 10-11,5 l/h
Moottoriöljy (H, K)	0,1 litraa/tunti
Vaihteistoöljy (H, K)	0,1 litraa/tunti
Hydrauliöljy (H, K)	0,2 litraa/tunti
Teräketjuöljy (H)	0,57 litraa/tunti
Värimerkkausaine (H)	0,3 litraa/tunti
Teräketju (H)	0,055 kpl/tunti
Terälaippa (H)	0,02 kpl/tunti

Taulukko 22. Kustannuslaskennan käyttökustannusarvot (hinnat ilman arvonlisäveroä).

Käyttökustannusarvot	
Polttoaine	0,63 €/litra
Moottoriöljy	0,97 €/litra
Vaihteistoöljy	1,25 €/litra
Hydrauliöljy	1,3 €/litra
Teräketjuöljy	1,3 €/litra
Värimerkkausaine	1,25 €/litra
Teräketju	16 €/teräketju
Terälaippa	58 €/terälaippa
Korjaus- ja huoltokustannus (Hakkuukone, Kuormatraktori)	H 11,0 €/E ₁₅ , K 8,3 €/E ₁₅

Taulukko 23. Kustannuslaskennan työkustannustekijät.

Työkustannustekijöitä	
Tuntipalkka konetyöajalle (E ₁₅) (Hakkuukone, Kuormatraktori)	H 12,5 €/h, K 11,5 €/h
Tuntipalkka muulle työajalle	H 12,5 €/h, K 11,5 €/h
Iltavuorolisä	0,8 €/h
Väilliset palkkakustannukset	66 % peruspalkasta
Työmatka-ajo	ksm. 52–86 km/kuljettaja/työvuoro (tapauksen ja yrittäjän mukaan)
Työmatkakorvaus	0,45 €/km
Ateriakorvauspäivät	100 pv/vuosi
Ateriakorvaus	8,75 €/päivä

Taulukko 24. Kustannuslaskennan kiinteät kustannustekijät.

Kiinteät kustannustekijät	
Pääoman poisto	(*) €/vuosi
Laskentakorko	2,5 %
Vakuutukset (liikenne, palo jne.) (Hakkuukone, Kuormatraktori)	H 2 700 €/vuosi, K 1 850 €/vuosi
Hallinto- sekä ylläpitokustannukset (ATK, puhelin, koulutus, laskenta jne. sekä konepesu, varastointi, varaosa säilytys)	H 7 400 €/vuosi, K 4 800 €/vuosi
Riskivaraus	5 %

(*) Pääoman poiston laskenta kaavalla: $(\text{Hankintahinta} - \text{Jäännösarvo}) / \text{Käyttöikä}$

LIITE 6. Kustannuslaskennan arvot koneenkuljetusajoneuvolle

Taulukko 25. Kustannuslaskennan arvot pääomatekijöille (hankintahinnat ilman arvonlisäveroä).

Hankintahinta ¹	
Auton alusta (4-akselinen)	110 000 €
Lavarakenne	25 000 €
Renkaat (12 kpl, à 550 €)	6 960 €
Auton pitoaika	12 vuotta
Vuotuinen arvon aleneminen	18 %

Taulukko 26. Kustannuslaskennan arvot kulutustekijöille sekä käyttökustannusarvot (arvot ilman arvonlisäveroä).

Kulutuskustannukset ja käyttökustannusarvot	
Polttoaine	40 litraa/100 km
Renkaat (pinnoitusväli)	70 000 km
Polttoaine	0,80 €/litra
Voiteluaine	600 l/vuosi
Korjaus ja huolto	0,07 €/km
Renkaat (pinnoitus 185 €/rengas)	0,054 €/km

Taulukko 27. Kustannuslaskennan työkustannustekijät.

Työkustannustekijöitä	
Tuntipalkka ajoajalle	11,5 €/km
Välilliset palkkakustannukset	67 % peruspalkasta

Taulukko 28. Kustannuslaskennan kiinteät kustannustekijät.

Kiinteät kustannustekijät	
Pääoman poisto	(*) €/vuosi
Laskentakorko	2,5 %
Vakuutukset (liikenne, palo jne.)	1 000 €/vuosi
Erikoiskuljetuslupa	200 €/vuosi
Liikennöimismaksut	1 650 €/vuosi
Hallinto- sekä ylläpitokustannukset (ATK, puhelin, koulutus, laskenta jne. sekä konepesu, varastointi, varaosa säilytys)	3 200 €/vuosi
Riskillisä	5 %

(*) Pääoman poiston laskenta kaavalla: (Hankintahinta - Jäännösarvo)/Käyttöikä