

Kokopuupaalien kaukokuljetus



Seinäjoen ammattikorkeakoulu

Kestävä metsäenergia -hanke

Ismo Makkonen

1	JOHDANTO	1
2	KIRJALLISUUSKATSAUS	2
2.1	Kokopuun hankintaketjut	2
2.2	Fixteri -paalain	4
2.3	Kokopuupaalit	6
2.4	Energiapuun varastointi ja kuivaus	7
2.5	Hakkeen käyttö.....	8
2.6	Ajankäyttö ja kustannukset	8
2.7	Kuljetusketjujen kustannukset	11
3	AINESTO JA MENETELMÄT	13
4	TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU	16
4.1	Työaika sekä työvaiheiden kestot ja kustannukset	16
4.2	Keskikuormausaste.....	19
4.3	Kilometrikohtaiset kustannukset	19
4.4	Aikatutkimuksen työvaiheet	20
4.4.1	Kuormaus	20
4.4.2	Purku	21
4.4.3	Tyhjänä ja kuormattuna ajo	21
4.4.4	Siivoaminen.....	22
4.4.5	Siirtymiset, punnitukset ja purkuvuoron odotus	22
4.4.6	Auton kääntäminen ja siirtyminen tielle.....	23
4.5	Kuljetuskustannukset	24
4.6	Kuljetuskustannusten vertailu.....	27
4.6.1	Kustannukset täydessä kuormassa	27
4.6.2	Kustannukset täydessä kuormassa	28
4.7	Kuljettajien ja kaluston tarve	30
4.8	Paalien ominaisuuksia	31

4.8.1	Paalien sitominen.....	31
4.8.2	Paalien hajoaminen.....	32
4.8.3	Paalien kosteus	34
4.9	Fixteri -paalauksen SWOT –analyysi.....	34
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	37
	LÄHDELUETTELO	42
	Liite 1.....	44

1 JOHDANTO

Suomi noudattaa EU:n joulukuussa 2008 hyväksymää ilmasto- ja energiapolitiikkaa, jonka tarkoituksena on vähentää kasvihuonekaasujen päästöjä vuoteen 2020 mennessä 20 % verrattuna vuoden 1990 tasoon. Uusi ilmastopaketti on poikkeuksellinen, koska Euroopan Unioni on ensimmäinen teollisuusmaa-alue Kioton sopimuksen jälkeen, joka on sopinut näin mittavista yhteisistä tavoitteista ilmastomuutoksen hillitsemiseksi. Paketin tavoitteena on myös lisätä uusiutuvien energialähteiden käyttöä 20 % EU:n energian loppukulutuksesta. Suomen mahdollisuus kasvihuonekaasupäästöjen hillitsemiseksi on erityisesti metsäenergia eli hakkuutähteet, kannot ja pieniläpimittainen energiapuu (EU:n ilmasto ja... 2011).

Suomessa on metsäntutkimuslaitoksen mukaan tehtävä ensiharvennuksia seuraavan 10 vuoden aikana noin 3 milj. ha eli 300 000 ha/v. Vajausta ensiharvennustavoitteista on kertynyt 2000-luvulla joka vuosi noin 70 000 ha, eli noin 3,1 milj. m³. Ainoastaan kerran viime vuosikymmenen aikana harvennustavoite on saavutettu (Kärhä ym. 2009).

Ensiharvennusten korkeat korjuukustannukset ovat merkittävin syy siihen, että nuorien metsien hoidot ovat jääneet monilta tekemättä. Eniten korkeisiin korjuukustannuksiin vaikuttaa kaadettavien puiden pieni koko, korjuuta vaikeuttava tiheä alikasvos, pieni hehtaari- ja leimikkokohtainen kertymä ja maaston huono kantavuus turvemailla (Kärhä & Keskinen 2011). Pienpuun hakkuu ja metsäkuljetukset muodostavat lähes puolet pienpuuhakkeen tuotantokustannuksista. Ensiharvennuspuun korjuukustannukset olivat 16,5 €/m³ vuonna 2008 ja kustannukset kasvavat joka vuosi (Kärhä ym. 2009).

Uudet innovatiiviset keksinnöt ovat avainasemassa, jotta ensiharvennusten tavoitetasot olisi mahdollista saavuttaa. Korjuukustannukset on saatava alemmalle tasolle ja toimintavarmuutta sekä laatua on parannettava, jotta ensiharvennustavoitteista saadaan pidettyä kiinni. Kokopuun paalauksessa ollaankin nyt yhdistämässä kuitu- ja energiapuun hankinta, koska silloin

nuoren metsän hoito olisi kannattavinta. Kokopuun paalaus on kustannustehokkainta, kun käytetään pienirunkoista ensiharvennuskuitupuuta, jonka rinnankorkeusläpimitta on 7 – 10 cm (Kärhä ym. 2009, Laitila ym. 2010).

Vuonna 2008 polttohakkeeksi korjattiin karsimatonta pienpuuta 822 000 m³ ja karsittua rankaa 125 000 m³. Samana vuonna metsähaketta käytettiin energiantuotannossa 4,6 milj. m³. Vuonna 2010 haketta käytettiin 6,2 milj. m³. Energiantuotannossa käytetystä polttohakkeesta 58 % oli päätehakkUILta kerättyä metsätähdettä, 14 % kantoja ja 5 % järeää lahovikaista puuta (Kärhä ym. 2009, Puun energiakäyttö... 2010).

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kokopuupaalien kaukokuljetuksen kustannustehokkuutta verrattuna yleisesti käytössä olevaan kokopuun hankintaketjuun. Työssä selvitettiin varastopaikan tilantarvetta ja varastojen ikää sekä kuinka paljon kuljettajia ja kalustoa tarvitaan kokopuupaalien kuljettamiseen. Kuormatilan tehokkaampi hyödyntäminen oli työn yksi keskeisimmistä kysymyksistä. Paalien tekniset tiedot kuten massa, lukumäärä, kosteus ja energiasisältö ovat merkittävässä roolissa kuljetuskustannusten kannalta. Työssä haluttiin myös selvittää edellä mainittujen asioiden vaikutukset ajokertoihin. Kuormausnopeuden selvittäminen oli työn tärkeimpiä selvitettäviä tietoja, koska kuljettamiseen kulunut aika vaikuttaa hyvin paljon kustannuksiin. Meno - paluu -kuljetusten hyödyntämismahdollisuudet kokopuupaalien kuljetusten yhteydessä haluttiin myös selvittää.

2 KIRJALLISUUSKATSAUS

2.1 Kokopuun hankintaketjut

Ei ole olemassa yhtä ainoaa oikeaa haketuksen tuotantoketjua. Monet tekijät vaikuttavat siihen, mitä ketjua on järkevä käyttää kullakin palstalla. Valintaan vaikuttaa mm. korjuuolot,

tienvarsivarastotilat, kuljetusmatkat, lämpö- ja voimalaitosten käyttömäärät ja varastotilat, saatavissa oleva tuotantokalusto, tuotettava metsähakejake ja tuotantoketjun kustannukset (Kärhä 2011).

Haketus voidaan suorittaa palstalla, tienvarressa, terminaalissa tai käyttöpaikalla. Tienvarsi- ja käyttöpaikkahaketus ovat kaksi yleisintä haketusmuotoa. Yli puolet haketuksista tapahtuu tienvarressa. Käyttöpaikalla haketetaan noin 25 %. Terminaalihaketus on kasvanut viimeisten vuosien aikana ja on tällä hetkellä 19 %. Palstahaketusta ei juuri enää käytetä. Tulevaisuudessa käyttöpaikka- ja terminaalihaketuksen merkityksen uskotaan kasvavan pienpuuhakkeen parissa (Kärhä 2011).

Hakeraaka-aineen korjuumenetelmät jaetaan haketuspaikan mukaan hajautettuun ja keskitettyyn menetelmään. Mikäli tavoitellaan halvempia haketuskustannuksia, koneiden korkeampia käyttöasteita ja suurempia vuosituotoksia, niin silloin haketus tulee keskittää terminaaliin tai käyttöpaikalle. Tällä tavalla saadaan paras mahdollinen hyöty tuotantoketjun työvaiheista ja päästään eroon turhista odotusajoista. Terminaali- ja käyttöpaikkahaketuksen heikkous on kaukokuljetuskustannukset. Kuormakoot jäävät monesti hyvin pieniksi kantoja, latvusmassaa ja kokopuuta kuljetettaessa. Tätä on pyritty korjaamaan paalaamalla latvusmassat, pilkkomalla kannot, karsimalla kokopuut sekä katkomalla ne määrämittaan (Laitila ym. 2010).

Keskitetty menetelmä soveltuu vain suurille voimalaitoksille sen korkeiden investointikustannusten vuoksi. Terminaalihaketus on toimintavarma ja laaduntarkkailu on siellä helppoa. Haketta voidaan jakaa helposti erikokoisille laitoksille, koska terminaalit sijaitsevat yleensä lähellä hakkeen käyttöpisteitä. Terminaalihaketus on kustannustehokasta, kun kuljetusmatkat ovat pitkiä ja, kun joudutaan yhdistelemään eri kaukokuljetusmuotoja (Laitila ym. 2010).

Hajautetussa menetelmässä haketus tapahtuu joko palstalla tai välivarastolla. Välivarastolla tapahtuvassa haketuksessa hakkuri hakettaa valmiin materiaalin suoraan hakeauton konttiin. Tässä korjuuketussa odotusaikoja kertyy sekä hakkuriautolle, että hakeautolle riippuen kaukokuljetusmatkoista. Hakeautojen määrän kasvaessa hakkurin toiminta on tehokkaampaa, mutta vaarana on, että tämä kasvattaa hakeautojen odotusaikoja. Välivarastolla tapahtuva ha-

ketus on yleisin käytössä olevista haketusjärjestelmistä ja hakkeen toimitus nojaa sen varaan, koska se soveltuu niin pienille kuin suurillekin käyttöpaikoille (Laitila ym. 2010).

Palstahaketus on pienimuotoista haketusta, jossa metsäkuljetuksen ja haketuksen ja joskus jopa hakkuun hoitaa sama kone kertakäynnillä. Tässä ketjussa metsätraktori kiertää palstalla hakettamassa kourakasalta toiselle ja kuljettaa valmiin materiaalin tienvarteen. Palstahaketuksessa metsäkuljetusmatkojen tulee olla lyhyitä ja maapohjan täytyy olla kantavaa johtuen koneen raskaasta painosta (Laitila ym. 2010).

Yhdistetty aines- ja energiapuun korjuu yleistyy kovalla vauhdilla. Tämä tarkoittaa sitä, että jatkossa pienpuuta voidaan korjata myös sellaisilta palstoilta, joilta ei aiemmin ole ollut järkevää korjata energiapuuta. Pienillä alle hakeautokuorman täyttävillä työmailla järkevin ratkaisu on kaukokuljettaa kokopuut ja rangat hakettavaksi terminaaliin (Laitila, J. & Väättäinen, K. 2011).

Kuljetuskalustoa oli kaukokuljetuskäytössä energiapuun ja hakkeen kuljetuksessa vajaa 200 ajoneuvoyksikköä vuonna 2007, joista kaksi kolmasosaa oli hakeautoja. Hakeautoista suurin osa on täysperävaunuyhdistelmiä ja kolmannes vaihtolava-autoyhdistelmiä. Kolmasosaa kaukokuljetuskalustosta hyödynnetään myös turpeen ja metsäteollisuuden puusivutuotteiden kuljettamiseen. Hakettamaton biomassa, kuljetetaan puutavara-autolla, jossa on pohja ja laidat. Paalien, eli risutukkien autokuljetukseen käytetään perinteisiä puutavara-autoja. Paaleja on myös mahdollista kuljettaa samalla kalustolla, millä latvusmassoja, kantoja ja kokopuuta kuljetetaan (Laitila ym. 2010).

2.2 Fixteri -paalain

Fixteri –paalain (kuva 1) on uusi innovaatio, jonka ajatuksena on parantaa nuoren metsän korjuun tuotantoketjun kustannustehokkuutta. Fixteri on erittäin tervetullut uutuus, koska juuri ensiharvennukset ja nuorten metsien kunnostuskohteet tarvitsevat kipeästi toimia. Tällä het-

kellä käytössä olevat hankintaketjut eivät pelkästään riitä. Fixteri -paalain eroaa perinteisestä hakkuutähdepaalaimesta siten, että sillä paalataan pystyleimikosta aines- ja kokopuuta. Paalauksen yhteydessä metsän kasvun kannalta tärkeät neulaset ja lehdet jäävät maastoon lannoitteeksi. Havu- ja lehtipuut paalataan omiin paaleihin. Energiapaaleiksi päätyvät ne risutukit, joissa on sekaisin havu- ja lehtipuuta sekä kuitupuuksi kelpaamattomia ja alamittaisia puulajeja (Kärhä ym. 2009). Tällä tavalla saadaan kohteelta kerättyä yhdellä käynnillä kaikki korjattavissa oleva biomassa. Tästä uudesta mahdollisuudesta hyötyvät metsä- ja energiateollisuus, korjuuyrittäjä, metsänomistaja ja luonto.



Kuva 1. Fixteri –paalain. Kuva: Jussi Laurila

Ensimmäinen fixteri –paalain valmistui vuonna 2004. Jatkokehittelyn jälkeen valmistui Fixteri proto-1 –malli, jota on käytetty urakointikäytössä. Fixteri Proto-2 –malli on huomattava edistysaskel ensimmäiseen prototyyppiin verrattuna, koska paalauksen tuottavuus on ottanut siinä ison askeleen eteenpäin. Uudessa konemallissa pystytään syöttämään materiaalit hakkuun ja taakan keruun jälkeen suoraan paalaimen ilman välikasauksia ja kuormauksia. Samanaikaisten työvaiheiden ja puiden joukkokäsittelyn paranemisen ansiosta työtehokkuus on

kasvanut. Paalain myös punnitsee jokaisen paalin ennen kuin se pudotetaan metsään. Näin paalien kokonaispaino saadaan selville ennen kuin ne on toimitettu tienvarsivarastoon. Kaupallisen 0-sarjan valmistuksen on tarkoitus alkaa vuoden 2012 puolella, jossa pitäisi olla paljon muutoksia proto -2 –malliin verrattuna.

Fixteri –tuotantoketjussa metsätraktori kuljettaa valmiit paalit tienvarsivarastolle. Kaukokuljetuksessa käytettävä perinteinen puutavara-auto kuljettaa kuitupuupaalit laitokselle, jossa paalit laitetaan kuorimarumpuun. Rummussa aines- ja energiapuun erotellaan toisistaan kuitu- ja poltojakeiksi. Paalauksen yhteydessä valmistuneet energiapuupaalit toimitetaan murskattavaksi ja poltettavaksi (Kärhä ym. 2009).

2.3 Kokopuupaalit

Fixteri proto-2 –paalain tekee aines- ja energiapuusta hyvin tiiviitä, kuljetuksessa ja varastoinnissa kestäviä paaleja. Paalien keskimääräinen halkaisija on ollut aiemmissa tutkimuksissa 65 cm ja keskipituus noin 268 cm. Paalien tuoremassa on ollut keskimäärin 476 kg ja kiintotilavuus noin 495 dm³ oksaprocentin ollessa noin 17. Kokopuupaali vastaa energiasisällöltään noin 100 litraa kevyttä polttoöljyä (Kärhä ym. 2009).

Paalit sidotaan loppukäyttöpaikan mukaan joko verkolla tai sisal-narulla. Mikko Hännisen opinnäytetyössä (2007) on selvitetty kokopuupaalien sidontavaatimuksia Alholman sellutehtaalla Pietarsaareissa. Aiemmin tehtaalle vietyjen paalien sidontaan käytettiin narua 20 – 40 kierrosta, jolloin kuorintarummusta pääsi ajoittain läpi hajoamattomia paaleja. Nykyään tehtaalle menevissä paaleissa saa olla korkeintaan 12 kierrosta narua ja yhdessä kohdassa korkeintaan 4 kierrosta. Ongelmana sellutehtaalla on, että paaleista irtoavat narut tukkivat pesupaikan rullia ja ne takertuvat taittorummun ympärille aiheuttaen keskeytyksiä. Ongelmien välttämiseksi jatkossa energiakäyttöön menevät kaikki ne paalit, joissa narua on käytetty enemmän kuin 12 kierrosta. Sidontakustannusten alentamiseksi myös energiakäyttöön menevien paalien sidonnassa käytetään ohjeistuksena pienennettyä narumäärää. Hännisen opinnäy-

tetyön mukaan uusi optimoitu narumäärä on riittävä pitämään paalit kasassa korjuun ja kuljetuksen ajan, jotta vältytään paalien liian aikaiselta hajoamiselta. Kokopuuta paalaamalla voidaan saavuttaa säästöjä kuljetuskustannuksissa. Säästöjä syntyy, koska kuormat ovat tiiviimpiä, kuormat sisältävät enemmän energiaa ja logistiikkaoptimointi on tehokkaampaa (Erkkilä ym. 2011).

2.4 Energiapuun varastointi ja kuivaus

Energiapuun pitkäaikaisella varastoinnilla on tutkittu olevan vaikutuksia puun kuivumiseen. Varastointiaika ei saa kuitenkaan olla liian pitkä, jotta vältytään kuiva-ainetappiolta, joka alentaa energiasisältöä. Kuivaaminen parantaa puun lämpöarvoa ja vähentää kuljetuskustannuksia. Pienemmissä aluelämpölaitoksissa polttoaineen tulee olla kuivaa, mutta suuremman luokan laitoksissa kosteus ei ole niin suuri ongelma. Vasta kaadetun puun kosteus on yleensä noin 50 - 60 %, mikä on alle 1 MW:n tehoiselle laitokselle liikaa. Suositus on, ettei kosteus saisi ylittää 40 %. Energiapuun kuivumista voidaan edistää vioittamalla puun kuorta tai poistamalla sitä osittaisesti paalauksen yhteydessä (Erkkilä ym. 2011).

Varastopaikan sijainnilla ja sen ympäristöllä on suuri merkitys energiapuun kuivumisen kannalta. Terminaalissa energiakasat kuivuvat nopeammin aukean tilan takia, mutta vuorostaan kasvavat herkemmin syksyn ja talven aikana. Metsätienvarressa kasat kuivuvat hitaammin, mutta ympäröivä metsä suojaa niitä sateilta. Myös kasojen peittämisestä on hyötyä. Erityisesti mänty hyötyy peittämisestä merkittävän paljon, koska männyn alkukosteus on huomattavasti korkeampi kuin esimerkiksi koivun (Erkkilä ym. 2011).

Metsätienvarressa energiapuu- ja paalikasat kuivuvat ensimmäisen vuoden aikana samaa tahtia. Terminaalissa paalikasat kuivuvat ensimmäisen vuoden aikana hieman nopeammin kuin kokopuukasat. Seuraavana vuonna kokopuukasat kuitenkin kuivuvat nopeammin kuin paalikasat. Kokopuu- ja paalikasat hyötyvät peittämisestä (Erkkilä ym. 2011).

Puulajilla on kuivumisen kannalta suuri merkitys. Koivu kuivuu nopeammin kuin esimerkiksi mänty, kun puut varastoidaan huonoon kuivumisympäristöön. Koivun kosteus oli ensimmäisenä kesänä 34 % ja toisena 20 %. Männyllä kosteusprosentti oli ensimmäisenä kesänä 48 % ja seuraavana 32 %. Ero selittyy puiden luontaisella kosteuserolla. Koivun tuorekosteus on huomattavasti mäntyä pienempi, mutta saman kuivumisjakson aikana männystä haihtuu 47 % enemmän kosteutta (Erkkilä ym. 2011).

2.5 Hakkeen käyttö

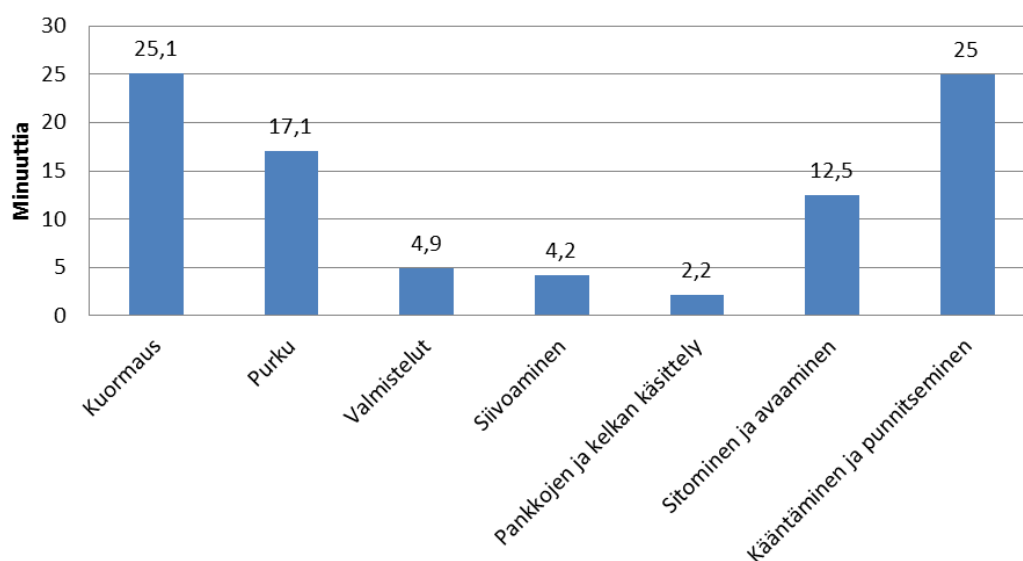
Viimeisen kymmenen vuoden aikana metsähakkeen käyttö on kasvanut merkittävästi Suomessa. Metsähaketta käytettiin vuonna 2000 vain noin 2 TWh, joka tarkoittaa puumääränä noin miljoonaa kiintokuutiota. Vuonna 2010 metsähaketta käytettiin energiantuotantoon yhdessä lämpö- ja voimalaitosten sekä pientalojen kanssa jopa 6,9 milj. m³ eli lähes 14 TWh. Käyttö vastaa noin 3,4 % Suomen energiankulutuksesta. Tuotetusta hakkeesta suurin osa poltettiin lämpö- ja voimalaitoksissa. Hakkeeseen käytetystä materiaalista 41 % oli koko-, ranka- ja kuitupuuta, 36 % hakkuutähdettä, 16 % kantoja ja 8 % järeää lahovikaista runkopuuta. Pienpuun käyttö hakkeen raaka-aineena on kasvanut voimakkaasti vuodesta 2007 lähtien. Hakkuutähdehakkeen määrä on pysynyt melko vakiona vuodesta 2004 lukien (Kärhä 2011).

2.6 Ajankäyttö ja kustannukset

Kärhän ym. vuoden 2009 tutkimuksessa suoritettiin fixteri –paalien kuormauksen aikatutkimus. Tutkimuksesta käy ilmi, että paalien kuormaaminen kesti 3,8 s/paali enemmän kuin purkaminen. Ero selittyy sillä, että paalit täytyy asetella autoon hyvin ja purkaminen on toimenpiteenä huolettomampaa. Keskimäärin yhden paalin kuormaamiseen kului aikaa 16,3 s/paali, kun yhden paalin purkamiseen meni aikaa 12,5 s/paali. Kuormataakka oli keskimäärin

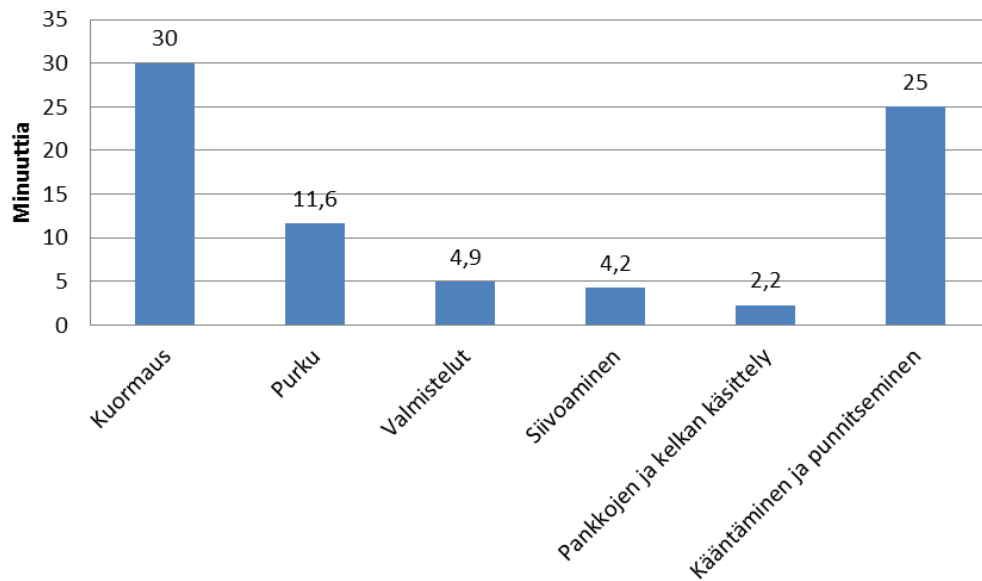
1,8 paalia ja purkutaakka 1,9 paalia. Kärhän ym. aikatutkimuksessa otettiin huomioon kuormaimen valmistelu, pankkojen käsittely, kuorman järjestely, siirrot, kuorman sitominen ja avaaminen sekä siivoaminen. Ajanmenekki laskettiin kuorma-autolle, jossa oli 90 paalia. Yhden paalin keskimääräiseksi kiintotilavuudeksi arvioitiin $0,39 \text{ m}^3$. Kuormauksen ja purkamisen ajanmenekki laskettiin suoraan aikatutkimustuloksista. Näiden tulosten pohjalta yhdistelmän purkamisen ja junan vaunuun purkamisen tehoajanmenekiksi saatiin 3985 sekuntia eli 66 minuuttia. Kuitupuun tehoajanmenekki oli 2724 sekuntia eli 45 minuuttia.

Laitilan ym. (2009) tutkimuksessa selvitettiin autokuljetuksen kuljetusaikoja. Tutkimuksessa otettiin kuluneesta ajosta selvää auton tyhjänä ja kuormattuna ajosta sekä terminaalissa. Kuljetusaikaan kuului ajo kuormattuna ja tyhjänä sekä terminaalissa kulunut aika. Terminaaliaikaan kuului auton kuormaus, kuorman purku sekä kaikki odotus- ja apuajat. Tutkimuksessa käytettiin Nurmisen ja Heinosen (2007) ajanmenekkimallia auton tyhjänä ja kuormattuna ajon ajanmenekin laskemiseen. Kokopuupaalien kuormaamiseen meni aikaa Laitilan ym. (2009) mukaan 25,1 minuuttia ja vastaavasti kuorman purkamiseen kului aikaa 17,1 minuuttia (kuva 2). Kokopuupaaleja oletettiin olevan sata kappaletta. Kuormaimen valmisteluun kului aikaa kuormapaikalla 2,6 minuuttia ja purkupaikalla 2,3 minuuttia. Kokopuupaalien varasto- ja purkupaikan siivoamiseen kului aikaa kuormaa kohti 4,2 minuuttia. Pankkojen ja kelkan käsittelyyn kului aikaa kokopuupaaleja käsitellessä noin 2,2 minuuttia. Kokopuupaalikuorman sitomiseen ja sen avaamiseen kului yhteensä aikaa 12,5 minuuttia. Kuormalle laskettiin lisäksi 25 minuutin lisäajanmenekki, joka sisälsi varastolla auton kääntämiseen kuluneen ajan sekä terminaalilla auton punnitukseen kuluneen ajan.



Kuva 2. Kokopuupaalien kuormaamiseen ja purkuun kulunut aika. (Laitila ym. 2009.)

Kokopuuvaraston (30 m^3) kuormaamiseen kului aikaa 30,0 minuuttia ja purkamiseen 11,6 minuuttia (kuva 3). Kuormaimen valmisteluun kului sama 2,6 minuuttia kuormapaikalla ja 2,3 minuuttia purkupaikalla sekä pankkojen käsittelyyn 2,2 minuuttia ja kuormapaikan siivoamiseen 4,2 minuuttia. Rangan haketuksen tuottavuuden laskettiin olevan 1,22 –kertainen verrattuna kokopuun haketustuottavuuteen. Rangan haketustuottavuus oli välivarastolla 41 m^3 ja terminaalissa 54 m^3 . Kokopuun haketustuottavuus oli välivarastolla 34 m^3 ja terminaalissa 44 m^3 (Laitila & Väättäinen 2011).



Kuva 3. Kokopuun kuormaamiseen ja purkuun kulunut aika. (Laitila & Väättäinen 2011.)

Tutkimuksessa mukana olleen hakeauton kuormakoko oli 44 m^3 . Metsävaraston kuormausaika tarkoitti tässä tutkimuksessa auton haketusaikaa. Hakeautolle laskettiin lisäksi 35 minuutin lisäajanmenekki, joka tarkoitti auton ja perävaunun siirtämiseen kulunutta aikaa sekä kuorman punnitukseen ja purkuun kulunutta aikaa. Kokopuun metsävaraston kuormausaika oli 52,9 minuuttia per kuorma, mikä piti sisällään kuormanteko- ja purkuajan sekä aputyöajat. Työpestesiirtoihin Laitilan ja Väättäisen (2011) mukaan kului aikaa 2,1 minuuttia (Laitila & Väättäinen 2011).

2.7 Kuljetusketjujen kustannukset

Energiapuuketjujen kustannukset jakautuivat Laitilan ja Väättäisen (2011) tutkimuksessa heidän mielestä odotetulla tavalla. Laitilan ja Väättäisen tutkimuksessa ei tutkittu kokopuupaalien hakkuuta, joten esitetyt laskelmat kokopuupaalien osalta ovat arvioituja. Eri tuotantomenetelmillä kokopuu- ja rankahakkeen kokonaiskustannukset olivat käyttöpaikalla $42,0 - 51,0 \text{ €/m}^3$. Kokopuun hakkuukustannukset olivat $23,8 \text{ €/m}^3$, rangon $33,2 \text{ €/m}^3$ ja kokopuupaalien

36,3 €/m³, kun korjattavan puuston rinnankorkeusläpimitta oli 8 cm, metsäkuljetusmatka 300 m ja kaukokuljetusmatka 50 km. Kokopuun tilavuus oli 28 dm³, rangan 19 dm³ ja kokopuupaalien 0,49 m³. Metsäkuljetuskustannukset olivat kokopuulla 7,2 €/m³, rangalla 5,7 €/m³ ja kokopuupaaleilla 3,3 €/m³, kun hakkuukertymä oli kokopuulla ja kokopuupaaleilla 41 m³/ha ja rangalla 29 m³/ha.

Kaukokuljetuskustannuksilta kokopuupaalit olivat toiseksi edullisimpia kuljetettavia heti rangan jälkeen. Kokopuupaalien kuljettaminen terminaaliin maksoi 5,2 €/m³, rangan 4,9 €/m³ ja kokopuun 8,2 €/m³. Hakkeen kuormauskustannukset terminaalissa olivat 1,0 €/m³ ja kuljetuskustannukset käyttöpaikalle terminaalista 2,6 €/m³. Käyttöpaikkahaketuksen kustannukset ovat samat kaikille materiaaleille eli 2,5 €/m³ (Laitila & Väättäinen 2011, Laitila ym. 2010).

Kokopuuhakkeen ja rangan kuljetuskustannuksiin täytyy lisätä noin 5,0 €/m³/km haketus-kustannus ja kokopuupaalien kustannuksiin 1,6 €/m³/km murskauskustannus. Vasta tämän jälkeen lopputuote on samanlaista ja niiden vertailu mahdollista. Tienvarsihaketuksen hinnoissa on paljon vaihtelua. Esimerkiksi Kärhän ym. (2009) tutkimuksessa haketuksen hinta on 8 €/m³. Tienvarsi-haketus nostaa merkittävästi kustannuksia, mikäli ranka tai kokopuu haketaan tienvarressa. (Ihalainen & Niskanen 2010, Kärhä ym. 2009).

Alle 30 km kaukokuljetusmatkoilla kokopuun käyttöpaikkahaketus on edullisin kokopuuhakkeen tuotantoketjun menetelmistä. Väliavarastohaketus on edullisempi kaukokuljetusmatkoilla, jotka ylittävät 30 km (Laitila ym. 2010).

3 AINESTO JA MENETELMÄT

Tutkimuksen aineisto kerättiin 21.9.2011 – 27.9.2011 pääasiassa erään eteläpohjalaisen kuljetusyrittäjän energia-autoyhdistelmän kuljetusmatkoista. Kuvan 4 auto oli varustettu umpilaidoilla, kopillisella Epsilon kuormaimella sekä Ehm Energyboxx energiaperävaunulla, joiden yhteistilavuus on noin 140 m³. Yhdistelmä painoi noin 29 700 kg. Aineistoa kerättiin neljänä kertana. Kaksi kertaa aamuvuoron kyydissä sekä kaksi kertaa yövuoron aikana. Yksi aineiston keruu suoritettiin Karstulassa. Kuljetusmatkan aikana auton kuljettajaa haastateltiin. Haastattelussa tiedusteltiin yleisesti kuljettajan näkemyksiä kokopuupaaleista ja niiden kuljetamisesta. Tutkimukseen haastateltiin kaksi kuljettajaa. Lisäksi haastateltiin yksi kuljetusyrittäjä, joka ajoi paaleja perinteisellä puutavara-autolla. Käyttöpaikalta Alholmens Kraftilta Pietarsaaresta haastateltiin sähköpostitse yksi henkilö.



Kuva 4. Laidallinen energia-autoyhdistelmä.

Aineiston otos jäi suunniteltua pienemmäksi, koska paalien kuljetukset keskeytettiin varastojen välisten suurten kosteusvaihteluiden takia. Tutkimuksen tuloksia ei voida yleistää pienen otannon takia, vaan raporttia voidaan pitää esitutkimuksena.

Aikatutkimukseen tuli muutos ennen ensimmäisen mittauksen aloittamista. Kuorman sitominen täytyi jättää pois, koska kuljetusyrittäjä ajoikin paaleja umpilaidallisella vetoautolla ja energiaperävaunulla ennakkokäsityksistä poiketen. Umpinaisen vetoauton ja vaunun kuormia ei tarvitse sitoa. Sitomisen mittauksen poistumisen takia aikatutkimusta päätettiin tarkentaa. Työsuoritteisiin lisättiin tulo- ja lähtöaika vaa'alla, siirtyminen purkuun, siirtyminen vaa'alle, purkuvuoron odotus, auton kääntäminen ja siirtyminen varastolta tielle. Käytännössä kuljettajan kaikki päivän aikana työaikaan vaikuttavat tekijät merkattiin ja mitattiin.

Aikatutkimuksen kirjaamiseen käytettiin etukäteen laadittua lomaketta (ks. liite 1). Mittauksiin käytettiin rannekelloa ja lomakkeeseen merkittiin kellonajat kunkin työsuorituksen alkamis- ja loppumisajankohtana. Taulukossa 1 on esitetty kaukokuljetuksen aikana kirjatut työvaiheet ja niiden alkamis- ja loppumisajankohdat.

Taulukko 1. Aikatutkimuksen työvaiheet.

Työvaihe	Alku	Loppu
Kuormattuna ajo	Varasto	Käyttöpaikka
Vaaka-aika	Vaa'an etureuna	Lähtö vaa'alta
Siirtyminen	Lähtö vaa'alta	Purkuun pysähtyminen
Purku	Kuljettaja ulos autosta	Viimeinen paali purettuna
Siivous	Viimeinen paali purettu	Kuljettaja sisälle autoon
Siirtyminen	Auto liikkeelle	Vaa'an etureuna
Vaaka-aika	Vaa'an etureuna	Lähtö vaa'alta
Tyhjänä ajo	Lähtö käyttöpaikalta	Metsäautotien alku
Auton kääntäminen	Metsäautotie	Varasto
Purku	Kuljettaja ulos autosta	Viimeinen paali kuormassa
Siivous	Kuljettaja ulos kuormaa	Kuljettaja sisälle autoon
Siirtyminen kuljetukseen	Auto liikkeelle	Metsäautotien alku
Kuormattuna ajo	Metsäautotien alku	Käyttöpaikka

Aikatutkimuksessa mitattiin työajat päivän aikana tapahtuneille työsuoritteille. Mittaus alkoi, kun auto lähti liikkeelle varikolta täydessä kuormassa ja loppui, kun auto saapui päivän päätteeksi takaisin varikolle. Apuajoiksi merkattiin kaikki alle 15 minuutin keskeytykset, jotka

eivät liittyneet työsuoritteiden tekemiseen, esimerkiksi kahvitauot kuljetusten aikana. Aikatu-
tkimuksen teossa erityishuomio oli vetoauton ja perävanun kuormaus- ja purkuaikojen mit-
taamisessa sekä kuljetuksiin kuluneissa ajoissa.

Tutkimuksen tekoon saatiin Fixteri Oy:stä kuljetus- ja korjuuyrittäjien sekä metsäammattilais-
ten yhteystietoja. Paalien kosteustietoja saatiin Upm -Kymmene Oyj:ltä sekä JP Metsä-
koneurakointi Oy:stä. Tässä tutkimuksessa kustannuksiin vaikuttavat tekijät perustuvat osin
aikatutkimuksessa tehtyihin havaintoihin sekä aiemmista tutkimuksista kerättyyn jo olemassa
olevaan tietoon. Kustannuslaskenta on tehty Reijo Oksasen (2004) kuljetustuotannon toimin-
tolaskenta -kirjan esimerkkien mukaan. Apuna käytettiin myös Oksasen (2003) kuljetusten
toimintolaskennan sovellukset ja toteutus -verkkojulkaisua sekä Väätäisen, Asikaisen ja Sika-
sen (2006) metsäkoneiden siirtokustannusten laskenta ja merkitys puunkorjuun kustannuksis-
sa -tutkimusta.

Kokopuuhakkeen ja kokopuun kuljetuskustannusten laskemisen määrittämiseen käytettiin
Juha Laitilan (2004) suunnittelemaa kokopuuhakkeen kustannuslaskentaohjelmaa. Kokopuu-
paalien arvoina käytettiin omien aikatutkimus- ja kustannuslaskentatietojen tuloksia sekä Lai-
tilan ym. (2009) tutkimuksen tuloksia. Kokopuun ja kokopuuhakkeen osalta käytettiin kuor-
maus-, purku ja ajokustannuksina sekä purku-, kuormaus- ja apuaikoina Juha Laitilan ja Kari
Väätäisen (2011) kokopuun ja rangan autokuljetus ja haketustuottavuus tutkimuksen tuloksia.

Kokopuuhakkeen osalta kuormakokona käytettiin Laitilan ja Väätäisen (2011) tutkimuksessa
mainittua 44 m^3 hakeauton tilavuutta ja tuntikustannuksia. Kokopuun arvoina käytettiin tut-
kimuksessa esitettyä 30 m^3 kuormakokoa ja puutavara-auton tuntikustannuksia. Kokopuupa-
alien kuormakoko määritettiin aikatutkimuksen kuorma-autoyhdistelmien kuormien keskiar-
volla. Paalien keskiarvoinen lukumäärä määritettiin Kärhän ym. (2009) tutkimuksessa todetul-
la paalien keskiarvotilavuudella $0,50 \text{ m}^3$ ja kuormien keskiarvoisella koolla 38 t. Paaleja oli
auton kyydissä keskimäärin 76 kpl, joista hajonneita oli noin 10,4 kpl. Kuorman keskikoko oli
 38 m^3 . Tuntikustannukset kokopuupaalien kuljettamiseen selvitettiin omista laskelmista. Au-
tojen ajonopeuksien laskemiseen tarvittavat kaavat on esitettynä Asikaisen ja Nuujan (1999)

tutkimuksessa ”Palstahaketuksen ja hakkeen kaukokuljetuksen simulointi.” Kaavat ovat esitettyinä alla.

Ajonopeus kuormattuna lasketaan kaavalla:

$$\text{ajonopeus} = -0,44591 + 31,69 \times \log(\text{matka})$$

Ajonopeus tyhjänä lasketaan kaavalla:

$$\text{ajonopeus} = 5,7917 + 30,630 \times \log(\text{matka})$$

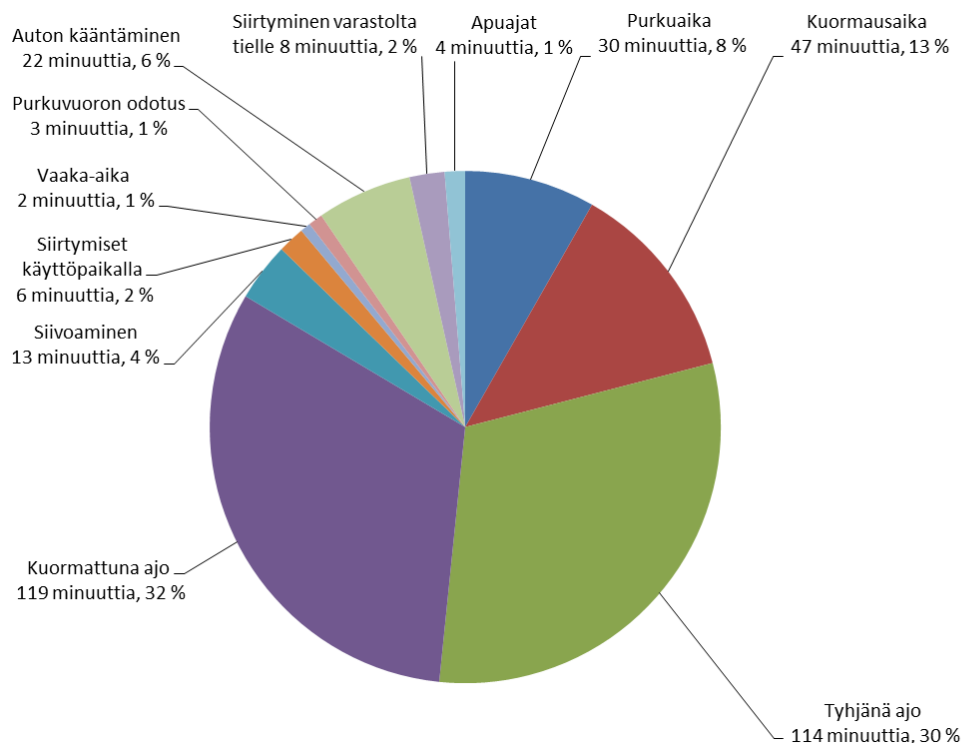
4 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

4.1 Työaika sekä työvaiheiden kestot ja kustannukset

Työajan tutkimisessa pääpaino oli tyhjänä ja kuormattuna ajossa, kuormaus ja purkuajoissa, varaston- ja purkupaikan siivoamisessa sekä apuajoissa. Työvaiheina selvästi eniten aikaa vaativia olivat tyhjänä sekä kuormattuna ajo (kuva 5), yhdistelmän purku ja kuormaus sekä auton kääntäminen. Kuormattuna ajo oli 32 % (119 minuuttia) osuudella eniten aikaa vievä työsuorite. Tyhjänä ajo vei hieman vähemmän aikaa ja sen osuus päivän työajasta oli 30 % (114 minuuttia). Kuormaaminen oli selvästi purkua hitaampaa ja se vei aikaa päivän työajasta 13 % (47 minuuttia). Purku vei aikaa vain 8 % (30 minuuttia) ajasta. Hieman yllättäen auton kääntäminen vei suhteellisen paljon aikaa ja sen osuus päivän työajasta oli melkein yhtä paljon kuin kuorman purun eli 6 % (22 minuuttia).

Aikatutkimuksessa mukana olevien kokopuupaalien varastot sijaitsivat metsäautotien varressa, jossa kääntöpaikka oli poikkeuksellisesti todella kaukana noin 5 km päässä. Yövuorossa

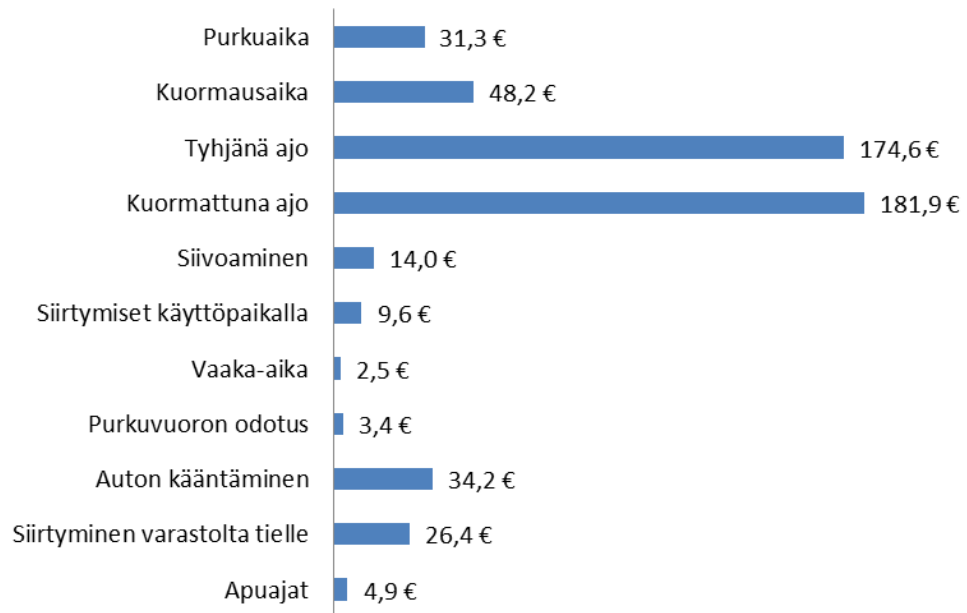
ajava kuljettaja käänsi auton tietokoneelle merkityssä paikassa, mutta aamuvuorolainen käänsi auton paljon aiemmin ahtaassa metsäautotien haaran alussa. Purkuvuoron odotus vei aikaa ainoastaan 1 % (3 minuuttia) päivän ajasta. Purkupaikalla joutui odottamaan kaksi kertaa. Ensimmäisellä kerralla 10 minuuttia toisen auton purkua ja toisella kertaa 17 minuuttia, kun paikalla purettiin kahta saman kuljetusyrittäjän autoa, jotka ajoivat aina parina varastolle ja purkupaikalle. Varastolla ja käyttöpaikalla siivoaminen veivät yhteensä työajasta 4 % (13 minuuttia). Siivoaminen vei molemmissa paikoissa suunnilleen saman verran aikaa. Purkupaikalla siivoamisessa käytettiin apuna kuormaajaa ja varastolla kuljettajan täytyi siivota käsin. Siirtyminen purkuun ja lähtöpunnitukseen veivät työajasta yhteensä 2 % (6 minuuttia) ja lähtö- ja tuloaika vaa'alla yhteensä prosentin (2minuuttia) tehokkaasta työajasta. Siirtyminen varastolta tielle vei työajasta noin 2 % (8 minuuttia). Apuajat veivät päivän ajasta vain noin 1 % (4 minuuttia).



Kuva 5. Työajan jakautuminen eri työvaiheisiin.

Työvaiheiden kustannukset jakautuivat niihin kuluneen ajan mukaan. Auton ollessa liikkeessä tuntikustannus oli 91,71 €/h ja auton ollessa paikalla kustannus oli 61 €/h. Alla oleva kuva 6

havainnollistaa eri työvaiheiden kustannuksia. Laskelmissa käytetty työaika on kunkin työvaiheen keskiarvoinen aika. Yhden kuorman haun siirtohinnaksi tulee 531 €/siirto, kun kaikkien työvaiheiden kustannukset lasketaan yhteen.



Kuva 6. Työvaiheiden kustannukset.

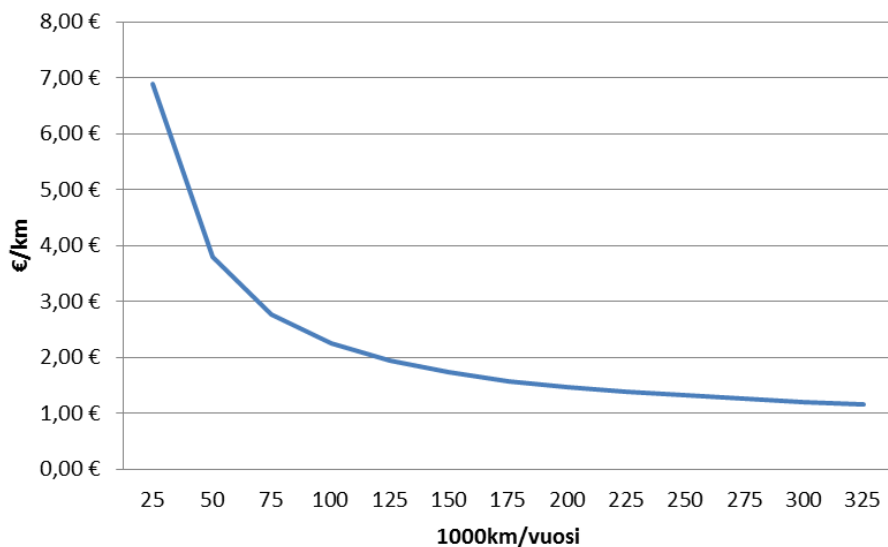
Kuormattuna ja tyhjänä ajot aiheuttavat suurimmat kustannukset. Auton kääntäminen ja kuormausaika olivat työvaiheista sellaisia, joissa oli eniten vaihtelua. Auton kääntämisen kustannuksiin vaikutti kääntöpaikan löytämiseen käytetty matka. Kuormauksessa eniten vaikutusta oli hajonneiden paalien lukumäärällä sekä kuormauksen ajankohdalla. Pimeydellä oli vaikutusta kuormauksen nopeuteen ja paalien hajoamiseen.

4.2 Keskikuormausaste

Keskikuormausaste oli aikatutkimuksen seurannan aikana korkea ja kuormatila hyödynnettiin täysimääräisesti. Paaleja oli kyydissä aina reilusti vaikka niitä olisi välillä mahtunut kuormaan enemmänkin. Tyhjänä ajoa tapahtui seurannan aikana puolet jokapäiväisestä kuljettajan ajamasta matkasta. Matka Pietarsaaresta varastolle ajettiin tyhjänä kuten myös paluu Pietarsaaresta Lapualle.

4.3 Kilometrikohtaiset kustannukset

Energia-autoyhdistelmällä täytyy ajaa sen käyttöaikana paljon, jotta kilometrikohtaiset kustannukset saadaan riittävän alhaiselle tasolle (kuva 7). Tutkimuksessa käytössä olleella energia-autolla ajetaan vuodessa keskimäärin 119 tkm, mikä tarkoittaa 460 km päivässä. Kuljettajan kanssa käydyn keskustelun perusteella auto vaihdetaan 500 tkm jälkeen. Energia-auton keskimääräinen käyttöaika on noin 4,2 vuotta.

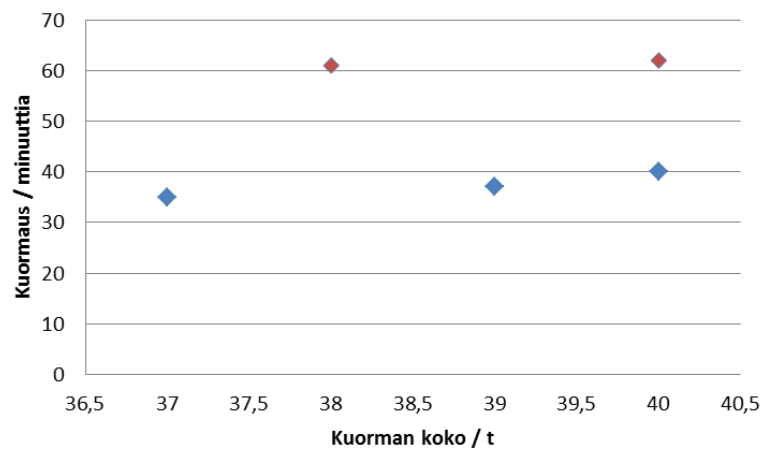


Kuva 7. Energia-autoyhdistelmän vuotuisen kokonaisajomatkan kilometrikustannukset.

4.4 Aikatutkimuksen työvaiheet

4.4.1 Kuormaus

Kuormaukseen kului aikaa keskimäärin 47,5 minuuttia. Kuormauksessa ongelmia aiheutti paalien hajoaminen. Joillakin varastoilla paalit pysyivät hyvin kasassa ja kuormaaminen sujui mallikkaasti, mutta suurimmalla osalla varastoista aiheutui ongelmia. Paalien hajoamisen takia kuljettaja joutui keräilemään tippuneita risuja. Eniten ajanmenekkiä aiheutui, kun paali hajosi aivan kuorman laidan kohdalla. Osa paaleista tippui sekaisin kuormaan ja osa auton viereen, mistä kuljettajan oli niitä vaikea uudelleen kerätä. Kuormausvaiheessa yhden paalin nostamiseen varastosta autoon kului aikaa keskimäärin 38 sekuntia.



Kuva 8. Kuormakoon vaikutus kuorman tekoon kuluneeseen aikaan. Punaiset havainnot ovat yöllä tehtyjä kuormia.

Edellä oleva kuva 8 havainnollistaa hyvin kuinka kuorman koolla ja sen kuormaamiseen kuluneella ajalla on merkitystä ajanmenekkiin. Myös työvuoron ajankohdalla on hyvin suuri merkitys kuormauksen ajanmenekkiin. Punaiset havainnot ovat yövuoron aikoja. Näin suurta eroa päivä- ja yövuoron ajanmenekeillä ei voi selittää ainoastaan kuljettajien välisillä eroilla, koska molemmilla kuljettajilla oli vuosien kokemus puutavaran ajosta. Yövuoron ensimmäi-

senä yönä ajama kokopuupaalivarasto oli osin kaatunut, mikä lisäsi ajanmenekkiä ja keräilyä. Paalit kuitenkin kestivät suhteellisen hyvin. Toisena yönä varasto oli normaalisti pystyssä, mutta paalit hajoilivat pahasti. Energia-autoyhdistelmän kuormaamiseen kului huomattavasti enemmän aikaa kuin perinteisen puutavara-auton kuormaamiseen. Laitilan ym. (2009) tutkimuksessa perinteisen puutavara-auton kuormaamiseen meni aikaa 25,1 minuuttia.

4.4.2 Purku

Purku tapahtui aikatutkimuksessa aina samalla varastolla Alholmens kraftin Pietarsaaren murskaamolla. Muutamana purkukertana käyttöpaikalla auton perävaunun purkamisessa avusti Terex Fuchs MHL 335 nosturi. Muina kertoina ajoneuvon kuljettaja purki ajoneuvoyhdistelmän kuorman auton omalla kuormaimella. Kuljettaja purki paalit varastokentälle ja nosturi nosti ne siitä murskaimen kuljettimelle. Purkamiseen kului aikaa keskimäärin 30,75 minuuttia. Auton purku hoitui sujuvasti eikä merkittäviä keskeytyksiä ilmennyt. Kuljettaja otti kuormaimella täyden taakan eikä paalien hajoamista ollut enää tarpeen varoa, koska kuormasta oli vaikea erottaa yksittäisiä paaleja ja paalit nostettiin purun jälkeen suoraan murskattavaksi. Yksittäisen paalin purkamiseen kului aikaa noin 25 sekuntia.

4.4.3 Tyhjänä ja kuormattuna ajo

Tyhjänä ajo oli toiseksi eniten aikaa vievä työvaihe päivän aikana. Keskimäärin aikaa kului tyhjänä ajamiseen käyttöpaikalta varastolle 114,25 minuuttia. Matkaa Alholmens kraftilta Pietarsaaresta Laihian varastolle kertyi noin 126 km. Varastoja oli Laihialla kolmessa eri paikassa joiden välillä oli matkaeroa noin 3 km. Tiet olivat koko matkan hyviä ja asfaltoituja. Varastot sijaitsivat hyväkuntoisten metsäautoteiden varrella. Yksi varasto sijaitsi metsäautotieltä lähtevän huonokuntoisen piston varrella. Tien päässä oli kuitenkin hyvä kääntöpaikka.

Kuormattuna ajo vei kaikista eniten aikaa kokopuupaalikuorman kaukokuljetuksessa. Aikaa kului keskimäärin 119 min, kun puutavarayhdistelmä kulki noin 126 km matkan takaisin Alholmens kraftille Pietarsaareen. Matkojen aikana ei tapahtunut merkittäviä keskeytyksiä.

4.4.4 Siivoaminen

Varaston siivoamiseen kului keskimäärin aikaa 6 minuuttia. Kuljettaja kiersi auton ympäri ja siivosi kuormauksen aikana tippuneet risut ja oksat. Mitä enemmän paaleja hajosi, sitä enemmän myös siivottavaa oli auton ympärillä. Käyttöpaikalla siivoamiseen kului aikaa noin 7,75 minuuttia. Kuljettaja otti rautapalkin pätkän kuormaimeen auton lavalta, kun kuorma oli purettu kyydistä. Rautapalkilla kuljettaja veti roskia vaunun ja nupin lavalta pois. Tämän jälkeen kuljettaja kiersi auton ympäri ja keräsi isoimmat kourasta tippuneet puut ja heitti ne varastoon. Vaunun siivousluukkuun jääneiden roskien putsaaminen ja luukun sulkeminen oli viimeinen työvaihe siivoamisessa.

4.4.5 Siirtymiset, punnitukset ja purkuvuoron odotus

Siirtymisiä tapahtui käyttöpaikalla kaksi kappaletta. Ensimmäinen tapahtui, kun siirryttiin vaa'alta purkuun. Tällä välillä ei juuri tapahtunut keskeytyksiä. Keskeytyksiä tapahtui siirtymisissä ainoastaan, jos purkupaikalla jo olevan rekan purkua täytyi odottaa. Tämä siirtyminen kesti keskimäärin 3 minuuttia. Siirtyminen purkupaikalta lähtöpunnitukseen kesti myös keskimäärin 3 minuuttia. Tällä välillä ei keskeytyksiä juuri tapahtunut. Purkuun tulevien autojen väistäminen oli yleisin aikaa vievä toimenpide.

Punnitus oli aikatutkimuksen seurannan nopein vaihe kuljettajan työpäivän aikana. Keskimäärin tuloaika vaa'alle kesti 1,5 minuuttia ja lähtöaika 54 sekuntia. Tulovaaka kesti kauemmin siksi, että yhdistelmän ajaminen kuormattuna on hitaampaa ja vaa'an punnitusautomaatin käyttämiseen meni enemmän aikaa kuin lähtövaiheessa. Purkuvuoroa ei tarvinnut odottaa kuin kahdella ajokerralla. Keskimäärin purkuun pääsyä joutui odottamaan 3,50 minuuttia. Purkuvuoron odottaminen on kallista aikaa kuljetusyrittäjälle, koska auto ei tuota silloin mitään.

4.4.6 Auton kääntäminen ja siirtyminen tielle

Auton kääntämiseen vaikuttavat monet eri tekijät. Suurin merkitys on varaston läheisyydessä olevien kääntöpaikkojen määrällä ja laadulla. Energia-autoyhdistelmä tarvitsee paljon tilaa kääntyäkseen, joten pieni tienpätkä ei riitä. Myös kuljettajalla on vaikutusta auton kääntämiseen. Toinen kuljettaja saa käännettyä yhdistelmän ahtaamassa paikassa kuin toinen. Aikatutkimuksen seurannassa aamuvuorossa oleva kuljettaja käänsi yhdistelmän samalle varastolle mentäessä 200 metriä varaston jälkeen hyvin ahtaassa paikassa. Yövuoroa ajava kuljettaja käänsi auton paikassa, mikä oli merkittynä karttaan 5 km kauempana. Auton kääntämiseen kului aikaa keskimäärin 22,5 minuuttia. Auton kääntämisen ajanmenekkiin kuului puunkuormaamisesta ilmoittavan varoituskolmion asettaminen metsäautotien alkuun.

Siirtyminen varastolta tielle vei keskimäärin aikaa 8,25 minuuttia. Eniten siirtymisen ajanmenekkiin vaikutti varaston sijainti. Matkanteko oli hidasta, jos yhdistelmällä piti ajaa kuormattuna pitkä matka pientä metsäautotietä. Tielle siirtymisen ajanmenekkiin kuului puunkuormauksesta varoittavan varoituskolmion pois ottaminen metsäautotien alusta

4.5 Kuljetuskustannukset

Taulukko 2. Taustatekijät energia-autoyhdistelmälle.

Tiedot energiayhdistelmästä ja ajomääristä				
Kuljetuslaji	Kokopuupaalit	Ajoneuvo	7-akselinen	
Kokonaispaino	60 t	Hyötykuorma	33 t	
Kuljetuskerrat	260 krt/vuosi	Kokonaisajoaika (työmaat)	10 h	
Kokonaisajomatka	460 km	Kokonaisajoaika (vuosi)	2600 h/vuosi	
Auton käyttömatka	502320 km	Kokonaisajosuorite	119600 km/vuosi	
		Palkkatunnit	2730 h/vuosi	
Investointikustannus ja jäännösarvo (alv 0%)				
Auton alusta	213000 €	Perävaunu	100000 €	
Hinta (ilman renkaita)	330000 €	Renkaat (500e) 26kpl	13000 €	
Arvonalenemisprosentti	25 %	Kuormain	30000	
		Auton pitoaika	4,2 Vuotta	
		Jäännösarvo	98576 €	
Muuttuvat kustannustekijät				
Polttoaineen kulutus	45 L/100km	Polttoaine	1,014 €/L	
Renkaiden kestomatka	150000 km	Korjaus ja huolto	0,1 €/km	
Voiteluaineet	1310 €/vuosi			

Energia-autoyhdistelmän vuotuiseksi kuljetusmääräksi arvioitiin 35 000 m³ (Alatalo ym. 1997). Seurannan aikana autokuljetuksia suoritettiin kahdessa vuorossa, mutta laskelmat on tehty yhden vuoron mukaan (taulukko 2), jotta tuloksia olisi helpompi verrata Laitilan ja Väättäisen (2011) tutkimuksen havaintojen kanssa. Siirtojen määräksi arvioitiin 260 krt/vuodessa. Yhden siirron keskimääräinen pituus oli seurannan aikana 460 km. Vuotuiseksi ajomääräksi kertyi 119 600 km.

Auton kokonaishinnaksi arvioitiin taulukossa 2 ilman renkaita 330 000 €. Hintalaskelmiin sisältyi auton lisäksi perävaunu (100 000 €), hytillinen kuormain (30 000 €) ja renkaat (13 000 €). Auton käyttöiäksi arvioitiin 4,2 vuotta kuljettajan mainitseman 500 000 km vaihtovälin mukaan. Tällä vaihtovälillä auto tulisi vaihtaa reilussa neljässä vuodessa. Pääoman poiston, vuosikoron ja jäännösarvon laskennassa käytettiin Väättäisen, Asikaisen ja Sikasen (2006) tutkimuksessa käytettyjä kaavoja. Pääoman poisto tehtiin tasapoistona sekä koron osuus las-

kettiin pitoajalle keskimäärin sidotusta pääomasta. Reijo Oksasen (2003) mukaan yleisimpien kuorma-autotyyppien arvo alenee keskimäärin 20 – 30 % vuodessa, joten tässä tutkimuksessa energia-autoyhdistelmän arvonalenemisprosentiksi määritettiin 25 %. Kuljettajan tuntipalkaksi määrytyi 13 €/h haastattelun perusteella. Kuljettajan lopullinen palkka määrytyi kokonaisajoajan mukaan, joka kerrottiin 5 % apuaikakertoimella. Apuaikakerroin saadaan, kun työvuoron valmistelu- ja apuajat jaetaan työvuoron kuljetustyön tehollisella ajalla (Oksanen 2004).

Taulukko 3. Kustannuslaskelmat yhdelle energia-autolle.

Muuttuvat kustannukset			
Polttoaine	54573 €/vuosi	23 %	
Voiteluaineet	655 €/vuosi	0 %	
Korjaus/huolto	13 916 €/vuosi	6 %	
Renkaat	10365 €/vuosi	4 %	
Yhteensä	79510 €/vuosi	33 %	
Kiinteät kustannukset			
Pääoman poisto	55101 €/vuosi	23 %	
Pääoman korko (4%)	14510 €/vuosi	6 %	
Vakuutusmaksut	6000 €/vuosi	3 %	
Liikennöimismaksut	2500 €/vuosi	1 %	
Hallintokustannukset	7000 €/vuosi	3 %	
Ylläpitokustannukset	1500 €/vuosi	1 %	
Yhteensä	86611 €/vuosi	36 %	
Kuljetustyökustannukset			
Kuljettajan palkka	35490 €/vuosi	15 %	
Välilliset palkkakustannukset 68%	24133 €/vuosi	10 %	
Muut miehistökustannukset	1343 €/vuosi	1 %	
Yhteensä	60967 €/vuosi	26 %	
Auton vuosikustannukset	166121 €/vuosi		
5 % ylijäämä	11922 €/vuosi		
Yhteensä + (5% ylijäämä)	238442 €/vuosi		

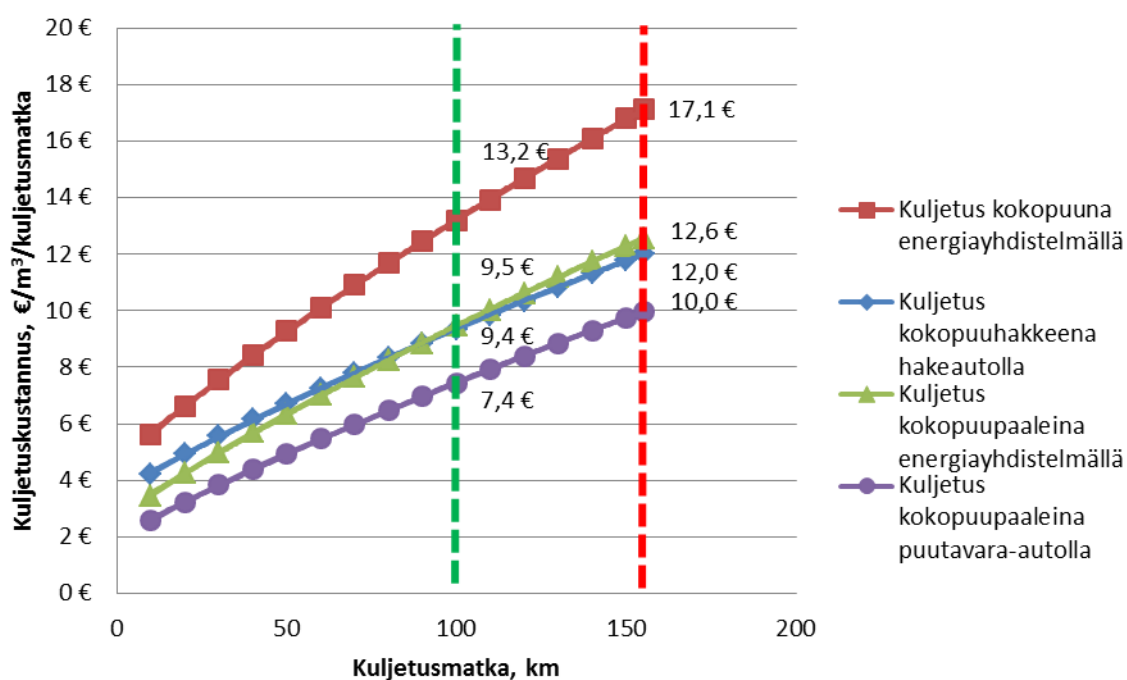
Kustannus siirtotunnille	91,71 €/h
Kilometrihinta	1,99 €/km
Yksikköhinta	6,81 €/m ³
Odotuskustannus	61 €/h

Kustannuslaskennan (taulukko 3) perusteella voidaan todeta, että polttoaineen osuus vuotuisista kuluista on kasvanut paljon polttoaineen hinnannousun takia, kun kustannuksia verrataan aiempiin tutkimuksiin. Aiemmissa tutkimuksissa (Laitila & Väättäinen 2011) polttoaineen osuus on ollut noin 20 % kustannuksista. Polttoainemenot ovat nousseet tässä tutkimuksessa suurimmaksi kulueräksi pääoman poiston kanssa molempien osuukseen ollessa 23 %. Kolmanneksi suurin kuluerä oli kuljettajan palkka 15 % osuudella. Pääoman poiston ja kuljettajan palkan osuus vuosittaisista kustannuksista on pysynyt likimain samana, kun niitä verrataan aiempiin tutkimuksiin.

Kilometrikohtaiset kustannukset olivat laskelmissa 1,99 €/km. Kuljetusyrittäjälle yksi tärkeimmistä tiedoista kuljetusten kannattavuuden kannalta on tietää kustannukset kuutiometriä kohden. Laskelmissa yhden kuution kuljettaminen maksoi 6,81 €/m³, kun vuodessa energia-autoyhdistelmän arvioidaan kuljettavan 35 000 m³ puuenergiaa. Ajotuntikustannuksia kertyi energia-autoyhdistelmälle 91,71 €/h, kun ajotunteja kertyi vuodessa 2600 h. Kuormaus-, purku- ja odotuskustannukseksi tuli 61 €/h. Mikäli autoa ajettaisiin kahdessa vuorossa, kustannukset laskisivat. Kilometrihinta olisi 1,70 €/km, ajotuntikustannus muuttuisi 78,08 €/h ja kuormaus-, purku ja odotuskustannukseksi tulisi 48 €/h. Pitoaika olisi näillä laskelmilla 2,1 vuotta ja ajotunteja kertyisi vuodessa 5200 h.

4.6 Kuljetuskustannusten vertailu

4.6.1 Kustannukset täydessä kuormassa



Kuva 9. Kokopuuhakkeen, kokopuun, kokopuupaalien kuljetuskustannukset energia-autoyhdistelmällä ja kokopuupaalien kuljetuskustannukset puutavara-autolla.

Kuvassa 9 on esitetty kokopuuhakkeen, kokopuun ja kokopuupaalien kuljetuskustannukset kuutiota kohti. Kuvasta 9 voidaan havaita, että kokopuupaalien kaukokuljetus on edullisinta puutavarayhdistelmällä ja kokopuun kuljettaminen on selvästi kalleinta. Kokopuupaalien kuljettaminen energia-autoyhdistelmällä sadan kilometrin kaukokuljetusmatkalla on noin 0,1 €/m³/km kalliimpaa kuin kokopuuhakkeen kaukokuljetus sekä 3,7 €/m³/km halvempaa kuin kokopuun kuljettaminen. Kuljetusmatkan ollessa 155 km kokopuupaalien kuljettaminen on 0,6 €/m³/km kalliimpaa kuin kokopuuhake ja 2,6 €/m³/km kalliimpaa kuin kokopuupaalien kuljettaminen puutavara-autolla. Tutkimukseen simuloitiin kuljetusyrittäjä x, joka kuormaa energia-autoyhdistelmän aivan täyteen, jolloin keskiakuormausaste oli 127 %, mikä on 10 paa-

lia enemmän kuin yhdistelmällä saisi kuljettaa. Osittain tästä syystä kokopuupaalien kuljetaminen oli niin paljon edullisempaa näillä laskelmilla. Laskelmilla haluttiin antaa kuvaa siitä, jos paaleja saisi kuormata energia-autoyhdistelmään enemmän.

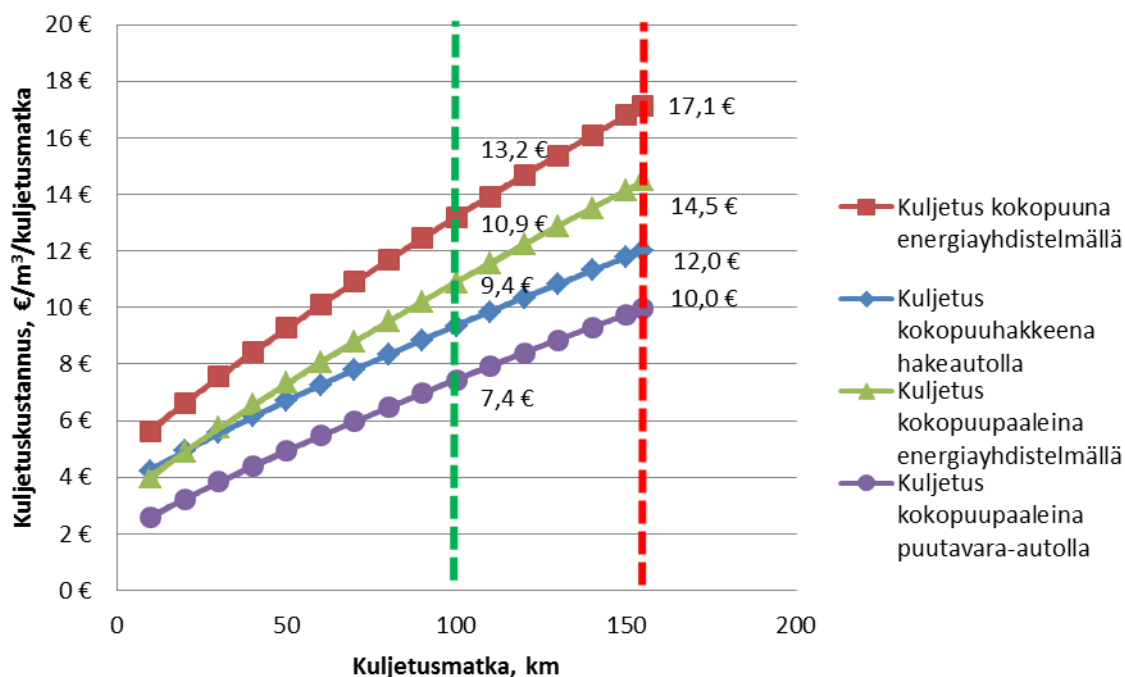
Energia-autoyhdistelmällä kuljetettujen paalien kustannukset olivat selvästi korkeammat kuin puutavara-autolla. Laskelmissa käytetyn puutavara-auton kuormatilavuudeksi määritettiin 45 m³. Puutavara-autolla kuljetettujen kokopuupaalien kustannukset sadan kilometrin kuljetusmatkalla ovat 7,4 €/m³/km ja 155 km matkalla 10 €/m³/km. Eroa energia-autoyhdistelmällä kuljetettuihin kokopuupaaleihin kertyy 100 km matkalla 2,1 €/m³/km ja 155 km kaukokuljetuksella 2,6 €/m³/km.

Laskelmissa käytettiin Laitilan ja Väätäisen (2011) tutkimuksessa käytettyä hake- ja kokopuuta auton kuormaus- ja purkutuntikustannuksia. Tutkimuksessa arvonlisäverottoman polttoaineen hinta oli 0,89 €/l, joten kohonneiden polttoainekustannusten takia ajotuntikustannukset määritettiin uudelleen käyttäen polttoaineen hintana arvoa 1,014 €/l. Kokopuuhakkeen ajotuntikustannus oli hakeautolla 90,60 €/h ja kuormaus- ja purkukustannus 63,3 €/h. Kokopuuta kuljetetaan energia-autoyhdistelmällä, jonka kustannukset ovat hakeautoa hieman korkeammat. Ajotuntikustannus oli 91,58 €/h ja kuormaus- ja purkukustannus 63,2 €/h. Kokopuupaalikuljetusten arvoina käytettiin oman aikatutkimuksen ja kustannuslaskelman arvoja. Puutavara-yhdistelmän arvoina käytettiin ajotuntikustannuksena 88,1 €/h ja kuormaus- ja purkukustannuksena 58,0 €/h.

4.6.2 Kustannukset täydessä kuormassa

Kokopuupaalien kuljetuskustannusten tulokset muuttuivat hyvin voimakkaasti, kun energia-autoyhdistelmään kuormataan täysi kuorma eli 33 t (kuva 10). Kokopuupaalien kuljetuskustannukset ovat vajaaseen 20 km asti edullisemmat kuin kokopuulla ja kokopuuhakkeella. Kokopuupaalien kustannukset ovat pidemmällä matkoilla kokopuuhaketta kalliimmat. Seuraava-

na oleva kuva 10 havainnollistaa kuljetuskustannusten kehitystä. Puutavara-autolla kokopuupaalien kuljettaminen on edelleen selvästi kaikkein kannattavinta.



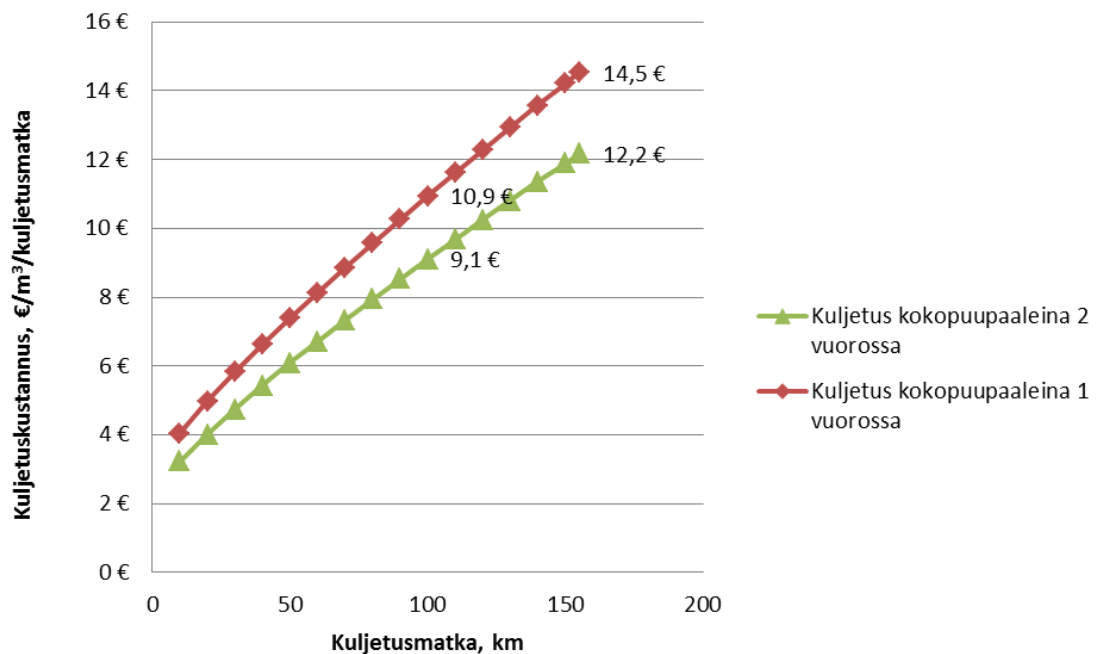
Kuva 10. Kokopuupaalikuljetukset energia-autoyhdistelmällä jossa on sallittu 5 % ylitys.

Kokopuupaalien kuljettaminen ei ole enää niin edullista energia-autoyhdistelmällä, mitä se on kuvan 9 laskelmissa. Energia-autoyhdistelmällä paalien kuljettaminen ei ole niin kannattavaa, kun se kuormataan normaalipainoon. Hyväksyttyyn kuormaan mahtuu noin 66 paalia, mikä tarkoittaa kymmenen paalin vähennystä kuvassa 9 esitettyihin kustannuksiin. Kokopuupaalit ovat tässä tapauksessa sadan kilometrin kaukokuljetusmatkalla 1,5 €/m³/km kalliimpia kuljettaa kuin kokopuuhake ja 2,3 €/m³/km halvempia kuin kokopuun kuljettaminen. Paalien kuljettaminen on selkeästi kalliimpaa, kun kuljetusmatka on 155 km. Paalit ovat 2,5 €/m³/km kalliimpia kuin kokopuuhake ja 2,6 €/m³/km halvempia kuin kokopuu. Puutavara-autolla kuljettettujen paalien kustannukset ovat näillä laskemilla paljon edullisemmat. Sadan kilometrin kaukokuljetusmatkalla puutavara-autolla kuljetetut paalit ovat 3,5 €/m³/km halvempia kuljettavia kuin laidallisella energia-autoyhdistelmällä kuljetetut paalit ja 155 km matkalla jopa

4,5 €/m³/km edullisempia. Tässä tapauksessa kokopuupaaleja on järkevää kuljettaa ainoastaan puutavara-autolla.

4.7 Kuljettajien ja kaluston tarve

Yhtä energia-autoyhdistelmää on kannattavinta ajaa kahdessa vuorossa. Mikäli autolla ajetaan 260 krt/vuodessa, niin kustannukset ovat 100 kilometrin kaukokuljetusmatkalla noin 10,9 €/m³/km. Kun autolla ajetaan kahdessa vuorossa 520 krt/vuodessa, niin kuljetuskustannukset laskevat samalla matkalla 9,1 €/m³/km. Kuva 11 havainnollistaa kuljetusmäärien vaikutusta 33m³ energia-autoyhdistelmän käyttökustannuksiin. Kuljetuskustannukset laskevat mitä enemmän autolla on ajoa.



Kuva 11. Vertailu, kun autoa ajetaan yhdessä tai kahdessa vuorossa.

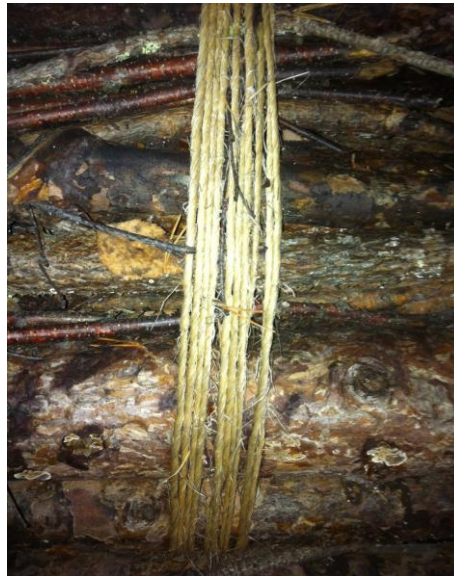
Tässä tutkimuksessa yhdistelmän kääntämiseen kulunut aika vaihteli 3 minuutista aina 43 minuuttiin asti. Auton kääntäminen maksoi 4,6 €, kun sen kääntämiseen kului aikaa vain 3 minuuttia. Yhdistelmä käännettiin tässä tapauksessa noin 200 m varaston jälkeen. Toinen kuljettaja ei kääntänyt autoa samassa paikassa, missä päivävuoroa ajanut kuljettaja auton käänsi, vaan ajoi 5 km päähän paikkaan, joka karttaan oli merkitty kääntöpaikaksi. Tässä tapauksessa auton kääntämiseen kului aikaa 43 minuuttia ja käännön hinnaksi tuli 65,7 €. Kääntöpaikoilla ja varastojen sijainnilla on todella paljon merkitystä kuljetuskustannusten kehittymisen kannalta.

4.8 Paalien ominaisuuksia

4.8.1 Paalien sitominen

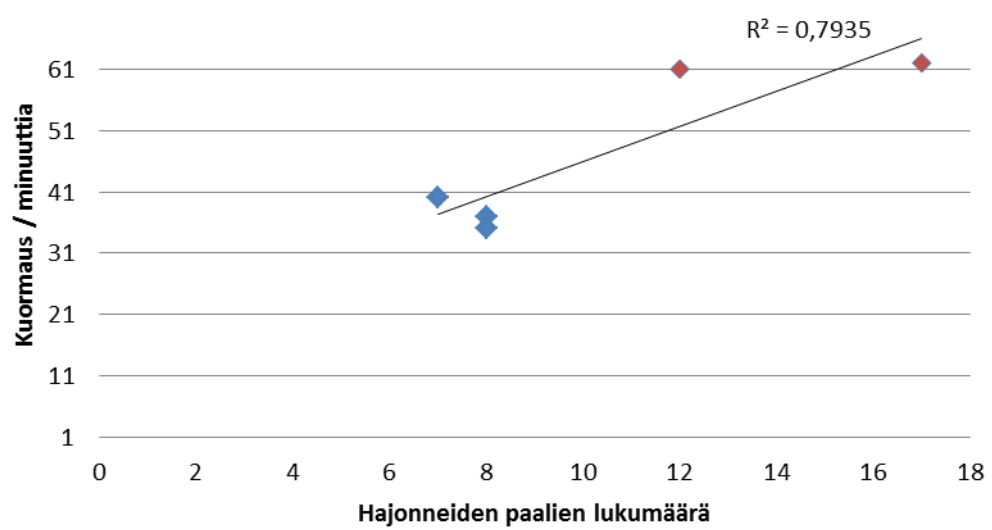
Kokopuupaaleja hajosi kuormauksissa keskimäärin 10,4 kpl, mikä on noin 14 % keskimääräisestä kuormakoosta. Hajoamisprosentti on erittäin huomattava. Hajonneiden paalien lukumäärä on suuntaa-antava, koska mittauksissa puoliksi ja osin hajonneita paaleja oli vaikea erottaa, jolloin moni todellisuudessa hajonnut paali saatettiin merkata ehjäksi. Luultavaa on, että hajonneita paaleja oli huomattavasti enemmän kuin niitä on tutkimuksessa huomioitu.

Tutkimuksen seurannassa oleviin paaleihin oli käytetty osin runsaastikin narua. Lapualla sijaitsevalla varastolla (kuva 12) yhteen paalin narunippuun oli saatettu käyttää jopa 10 kierrosta narua ja koko paaliin lähes 30 – 40 kierrosta. Tällaiset paalit pysyivät koossa kuormauksessa. Joukossa oli paaleja, joissa oli yhteen kohtaan käytetty paljon narua, mutta sitä oli hyvin heikosti muilla kohdin, jolloin paalit eivät pysyneet kasassa. Narun sitominen oli näissä paaleissa tehty erittäin epätasaisesti. Narut olivat hapertuneet rikki ja löysiksi monista sellaisista paaleista, joissa narua oli käytetty niukasti. Narun käytössä oli suuria eroja samalta palstalta tehtyjen paalien kesken. Seuraava kuva 12 on Lapuan varaston paalista, jossa oli käytetty riittävästi narua.



Kuva 12. Riittävä määrä narua koko paalissa on noin 30 – 40 kierrosta.

4.8.2 Paalien hajoaminen



Kuva 13. Hajonneiden paalien lukumäärä kuormauksen keston funktiona.

Paalien hajoamisella ja kuormaamiseen kuluneella ajalla on selvä yhteys. Mitä enemmän paaleja hajoaa kuormaamisen yhteydessä, sitä enemmän aikaa kuluu kuorman kokoamiseen ja pudonneiden puiden keräilemiseen. Kuvassa 13 punaiset havainnot ovat yövuoron aikana kelloitetuja kuormauksia. Yöaikaan paaleja hajoaa selvästi enemmän kuin päivällä. Huono näkyvyys on todennäköisesti syynä paalien hajoamiseen. Yksittäisiä paaleja oli vaikea erottaa hämärässä. Paaleja hajosi monesti, kun kuormain tarttui kahteen paaliin ja hajotti sen, jossa se oli vähiten kiinni. Osa paaleista oli kuitenkin hajonnut varastoinnin aikana itsestään, koska paalin sitomiseen käytetty naru oli hapertunut lähes poikki. Näissä tilanteissa kuljettajalla ei ollut merkitystä paalin hajoamiseen. Paalit olivat tässä tutkimuksessa keskimäärin 270 cm pitkiä ja halkaisijaltaan 69 cm leveitä. Mikäli paalit olisivat pienempiä, olisi kouralla mahdollista tarttua kahteen paaliin kerralla, jolloin hajonneita risutukkeja tulisi luultavasti vähemmän. Yöaikaan paalien hajoamista saattaisi rajoittaa jonkinlaisen heijastinnauhan käyttäminen paalien sidontaan käytettävässä narussa sekä verkossa. Ajoneuvon työvalaistuksen tehostaminen voisi olla yksi vaihtoehto.

Vähäisten havaintojen vuoksi tulosta ei voida pitää täysin luotettavana. Paalien hajoamisen selvittäminen vaatisi lisätutkimuksen tekoa. Erityisesti olisi mielenkiintoista saada vertailua narulla ja verkolla valmistettujen paalien välille. Tutkimuksen energia-autoyhdistelmän kuljettajat olivat kokeneita, joilla oli vuosien tuntemus puutavara-auton kuljettamisesta. Kokopuupaaleja kuljettajat ajoivat kuitenkin tutkimuksen seurannan aikana ensimmäistä kertaa. Kuljettajien vähäisellä kokemuksella on voinut olla myös vaikutusta paalien hajoamiseen.

Paalien kuormaamisen hinta oli keskimääräisellä kuormausajalla 47,8 €/kuorma. Kuormaamisen hinnaksi muodostui valoisaan aikaan 36 – 43 €, kun kuormauksen yhteydessä hajosi 7 – 8 paalia. Kuormauksen hinta nousi todella voimakkaasi, kun kuorma tehtiin pimeässä. Kuorman teon hinnaksi määräytyi 62 – 63 €, kun paaleja hajosi 12 - 17 kpl, eli kuormauksen kustannukset lähes kaksinkertaistuivat hajonneiden paalien aiheuttaman ajanmenekin takia.

4.8.3 Paalien kosteus

Paalien kosteusarvoissa oli suuria eroja. Syyskuun aikana paaleja ajettiin Alholmens kraftin Pietarsaaren laitokselle yhteensä kolmentoista päivän ajan. Ajettujen kuormien korkein kosteusprosentti oli 49,2 %, matalin 26,6 % ja paalien keskiarvoinen kosteus oli 39,3 %. Paalit olivat olleet kuivamassa tienvarsivarastoilla 180 – 287 päivää. Suurin osa paaleista ajettiin varastoilta, jotka olivat 264 – 287 päivää vanhoja.

Seurannan aikana ajettujen Laihian varastojen kosteusprosentit olivat melko korkeita. Ensimmäinen kuorma ajettiin 20.9.2011, jolloin kuorman kosteus oli kuivumisaikaan nähden hyvä 37,1 %. Samalta varastolta ajettiin myös kuormat 27.9.2011 ja 28.9.2011 kosteusprosenttien ollessa hyvin korkeat 49,2 % ja 45,3 %. Syyskuun aikana ajetuista kuormista kuusi oli kosteudeltaan alle 40 % tavoitetason. Varasto, jolta paaleja pääasiassa ajettiin, sijaitsi hyväkulkuisen metsäautotien varressa tien oikealla puolella. Varasto oli itä – länsi suunnassa. Molemmiin puolin tietä oli ensiharvennusikäistä metsää ja paikka oli hyvä paalien kuivumisen kannalta. Varasto oli yhdestä kohdasta hieman vino ilmeisesti alta sulaneen lumen takia. Tästä ei kuitenkaan ollut luultavasti aiheutunut haittaa kuivumisen kannalta. Yksi kuorma ajettiin eri varastolta 21.9 kosteuden ollessa 43,2 %. Varasto sijaitsi vaikeakulkuisen metsäautotien päässä varaston sijaitessa myös itä – länsi suunnassa. Varaston ympärillä oli nuorta metsää, mutta kuivumisolot olivat kuitenkin lähes yhtä hyvät kuin toisella paikalla. Tutkimuksessa ajettujen kuormien keskiarvoinen paino oli 38 t ja kosteus 39,3 %. Näin ollen kuormissa oli vettä keskimäärin 14,93 t ja kuivaa puuta 23,07 t.

4.9 Fixteri -paalauksen SWOT –analyysi

SWOT –analyysin määrittämiseen käytettiin apuna tutkimuksessa suoritettuja haastatteluja, omia havaintoja sekä aiemmissa tutkimuksissa saavutettuja tuloksia.

Vahvuudet:

- Paaleja voidaan kuljettaa puutavara-autolla.
- Paalit on helppo varastoida tienvarteen.
- Varastot ovat siistejä ja vievät vähän tilaa.
- Harvennus ja energiapuuhakkuu hoituu kertakäynnillä. Vähentää ajoa ja vaurioita metsässä.
- Vähentää ajoa, kun aines- ja energiapuu viedään samalla kertaa käyttöpaikalle. Hake- tus vasta terminaalissa tai käyttöpaikalla, joten hakkuria ei tarvita tienvarsivarastolla.
- Kaukokuljetuskuormat ovat tiiviimpiä kuin hakkeella, joten ”ilmaa kuljetetaan vähemmän”.
- Kuormaus ja purku on nopeaa ja sujuvaa, mikäli paalit kestävät.
- Fixteri -paalit on helpompi murskata kuin hakkuutähdepaalit.
- Paaleja on edullisempi murskata kuin kokopuuta.
- Naruista ja verkoista ei aiheudu ongelmia murskauksessa.
- Neulasista ei aiheudu ongelmia poltossa.
- Kokopuupaalien varastoalueet jäävät paalien ajon jälkeen tienvarsihakettamista siistimmiksi.

Heikkoudet:

- Kuormaus- ja purkupaikan siivoamiseen kuluu aikaa.
- Kuormausta ja purkua hidastaa kuormaimen pieni taakkakoko.
- Energia-autoyhdistelmää ei voi lastata täyteen, koska se on puutavara-autoa painavampi. Hyötykuorma maksimissaan 33 t.
- Soveltuu teollisuuden suurimittakaavaiseen puunhankintaan ja kilpailukyky perustuu pääasiassa lähi- ja kaukokuljetuksessa saavutettaviin kustannussäästöihin.

- Paalien sitomiseen menee aikaa puutavara-autolla ajettaessa.
- Puutavara-autolla ajettaessa turvallisuuskysymykset ovat oleellisia. Vaarana on risujen ja puiden lentäminen kyydistä. Kuorman siistiminen ajokuntoon vie paljon aikaa.
- Paaleista ei saa tehdä liian tiiviitä, koska kuivuminen voi kärsiä. Tiiviissä paaleissa on kuitenkin enemmän puutavaraa. Kompromissin löytäminen olisi oleellista.
- Narulla paalatut paalit kestävät huonosti.
- Muoviverkolla paalattujen paalien varastointi- ja murskausongelmat sellutehtaiden yhteydessä.
- Hitaampaa ja tarkempaa lastata.

Mahdollisuudet:

- Aines ja energiapuun samanaikaisella korjuulla voidaan lisätä ensiharvennushakkuita ja saavuttaa vuotuinen harvennustavoite.
- Energiapoliittisten tavoitteiden saavuttaminen on mahdollista.
- Uusien työpaikkojen syntyminen.
- Voidaan saavuttaa kustannussäästöjä ja tehokkuutta.

Uhat:

- Korjuukustannuksia ei saada alenemaan. Menetelmän käyttö ja kehitys loppuu.
- Kuljetuskustannuksien kasvaminen.
- Paaleja ei saada kestämaan.
- Laitteen hinta.
- Kilpailevat uudet korjuumenetelmät.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kuljetuskustannuksien osalta tutkimuksessa saavutettiin samansuuntaisia tuloksia aiempien tutkimuksien kanssa. Kustannuksissa on Laitilan ja Väätäisen (2011) tutkimukseen verrattuna jonkin verran eroa, mikä johtunee siitä, että tässä tutkimuksessa on käytetty kuljetusauton kustannusten määrittämiseen lyhyempää pitoaikaa sekä pienempää kuljettajan palkkaa. Samoilla arvoilla tulokset olivat hyvin lähellä toisiaan, kun Laitilan ja Väätäisen tutkimuksen polttoaineen hinta muutettiin samaksi. Hakeauton ja energia-autoyhdistelmän kuljetuskustannuksiin vaikuttaa olennaisesti ajonopeudet kuormattuna ja tyhjänä sekä kuormaus- ja purkuajat.

Tämän tutkimuksen merkittävin havainto oli hajonneiden paalien vaikutus ajanmenekkiin päivä- ja yöaikaan sekä paalien hajoamisen vaikutus kuormauksen kustannuksiin. Paalien hajoaminen on selkeä ongelma kuljetusyrittäjälle sekä ajallisesti että rahallisesti. Myös auton kääntämiseen kuluneen ajan kustannukset oli mielenkiintoinen havainto. Kääntöpaikoilla ja varastojen sijainneilla on suuri merkitys kuljetuskustannusten kannalta. Keskisuomalaisen kuljetusyrittäjän mielestä paalit kestävät kuormaamista ja kuljetusta hyvin. Fixteri –paalaimen kuljettajalla ja käytössä olevalla konetyypillä on merkitystä paalien laatuun ja kestävyYTEEN. Huomioitavaa on, että otoksen koko oli pieni, joten paalien hajoaminen vaatii lisää tutkimista.

Kuljetuskustannuksissa yllättävän suurta hajontaa aiheutti kuorma-autoyhdistelmän kääntäminen. Varaston ja kääntöpaikan sijainnilla sekä niiden merkitsemisellä kuljettajan karttaan on erittäin suuri merkitys kuljetusten onnistumisen kannalta. Varastojen tulisi olla sellaisissa paikoissa, että kuljettajan olisi helppo kuormata puutavarat kyytiin. Kuljettajien mielestä energiapuuvarastot ovat valitettavan usein erittäin vaikeissa paikoissa, kun ne olisi ollut mahdollista varastoida hyvään paikkaan ainespuuvaraston viereen.

Paaleissa käytettävän narun määrä oli ongelmallinen. Sellutehtaalle menevissä paaleissa ei saa olla paljoa narua, jotta syöttörullat eivät tukkeudu, mutta liian vähäinen narumäärä ei riitä pitämään paaleja kasassa. Energiakäyttöön menevissä paaleissa tulisi käyttää huomattavasti

enemmän narua kuin mitä muissa tutkimuksissa on optimimääräksi todettu. Tässä tutkimuksessa ei päästy seuraamaan verkolla paalattujen paalien käyttäytymistä, joten havainnot perustuvat ainoastaan narulla paalattuihin paaleihin.

Mikko Hännisen (2007) opinnäytetyössä oli selvitetty paalien sitomiseen käytettävän narun optimimäärää. Selvityksen mukaan 12 kierrosta narua koko paaliin on riittävä määrä pitämään paalit kasassa korjuun ja kuljetuksen ajan. Tässä tutkimuksessa tehtyjen havaintojen pohjalta edellä mainittu narumäärä energiakäyttöön päätyvien paalien kaukokuljetuksen osalta on aivan liian vähäinen. Paalien hajoaminen kuormausvaiheessa on selkeä ongelma kaukokuljetuksen kustannuksien kannalta. Aikaa kuluu hyvin paljon, kun kuljettajan täytyy keräillä hajonneita paaleja. Laitilan ym. (2009) oletetun sadan paalin kuormaamisen meni aikaa 25, 1 minuuttia. Tässä tutkimuksessa kuormaamiseen kului aikaa keskimäärin 47,5 minuuttia. Paalien kuormaan asettelu, hajoaminen ja siitä aiheutunut keräily, siivoaminen ja kuorman korjailu on osasyynä kuormausajan selvään kasvuun. Tutkimuksessa kuormattiin paaleja myös yöllä, jolloin kuorman tekeminen on hitaampaa. Tässä tutkimuksessa oli käytössä energia-autoyhdistelmä perinteisen puutavara-auton sijaan, jonka kuormaaminen on hitaampaa. Kuormaan mahtui keskimäärin 76 paalia sisältäen hajonneet paalit.

Paalien kosteusarvot ovat samaa luokkaa kuin Erkkilä ym. (2011) tekemässä tutkimuksessa. Tutkimuksessa ensimmäisen kesän jälkeisenä syksynä paalikasojen kosteus oli noin 40 % eli havainnot ovat samalla tasolla kuin tässä tutkimuksessa todetut kosteudet. Paalien kuivumista on todennäköisesti hidastanut erittäin runsasluminen talvi sekä sateinen kesä. Kesä on paalien kuivumisen kannalta merkittävää aikaa eikä kulunut kesä ollut kovin suotuisa poutapäivien suhteen. Varastot olivat vajaan vuoden vanhoja, joten kuivuminen on ollut siihen nähden normaalia. Merkittävä kosteuden aleneminen saavutetaan vasta toisen kesän jälkeen, jolloin kosteusprosentin pitäisi tippua lähelle 30 %.

Kokopuupaalien varastoalueet jäävät paalien ajon jälkeen siisteiksi. Varastoalueelle jäi ainoastaan vähän oksia ja puujätettä. Kokopuupaalien varasto-alueet ovat huomattavasti siistimpiä

kuin esimerkiksi kokopuun ja rangan varastoalueet tienvarsihaketuksen jälkeen. Tienvarsihaketuksesta varastoalueelle jää hyvin paljon haketta varastoalueen lähiympäristöön.

Käyttöpaikalla fixteri –paalien murskaus todettiin helpommaksi kuin perinteisten risutukkien murskaaminen. Paalit murskataan Saalasti Oy:n valmistamalla kiinteällä risutukkimurskaimella, jonka sähköteho on 1 MW. Paalien polttolaatu oli samanlaista verrattaessa muuhun puuenergiaan. Fixteri –paalit ovat puhtaita. Paaleissa on harvoin vieraita esineitä tai hiekkaa seassa. Paalien osuus Alholmens Kraftin Pietarsaaren tehtaan poltosta on noin 1 – 2 %. Paalimurskan kanssa poltetaan samanaikaisesti muuta metsäenergiaa, turvetta, kierrätyspolttoainetta sekä tarvittaessa hiiltä. Fixteri -paalien käyttö ei eroa merkittävästi hakkuutähdepaalien käytöstä. Neulasista ei aiheudu ongelmia poltossa, mutta viimeisimmät paalierät ovat olleet kosteudeltaan huonompia kuin muu metsäenergia. Paalit poltetaan käyttöpaikalla Metso Oyj:n valmistamassa kiertopetikattilassa, jossa polttoaineteho on 600 MW. Logistisesti käyttöpaikalle olisi parempi, että paalikuormat tulisivat tasaiseen tahtiin, koska varastoalue on rajallinen (150 m²).

Paalien kuljettaminen on tämän tutkimuksen pohjalta kannattavaa laidallisella energia-autoyhdistelmällä, mutta erityisesti puutavara-autolla. Autojen välinen ero on kuitenkin huomattava, joten jatkossa on hyvin tärkeää miettiä, kumpaa yhdistelmäratkaisua olisi järkevä kehittää sopivammaksi paalien kuljettamiseen. Energia-autoyhdistelmällä paalien kuljettaminen olisi järkevää, jos yhdistelmän saisi kuormata aivan täyteen ylipainorajoista välittämättä. Laidallisen energia-autoyhdistelmän kannattavuus heikkenee huomattavasti, mikäli auto kuormataan sallitun painoiseksi. Puutavara-autolla paalien kuljettaminen on kaikista kannattavinta.

Laitilan ja Väättäisen tutkimuksessa (2011) umpilaidallinen vetoauto ja perävaunu painoivat lähes 8000 – 10 000 kg enemmän kuin perinteinen puutavara-auto, mikä tarkoittaa noin 16 – 21 paalia. Paalien kuljettamiseen tarvittava ajoneuvoyhdistelmä painaa noin 30 000 kg. Paalien kuljettamisen kannalta kuormatilaa voitaisiin hyödyntää tehokkaammin, jos yhdistelmän kokonaispainoa saataisiin kevyemmäksi. Paaleja mahtuisi tällä hetkellä enemmän kyytiin,

mutta painorajat estävät täyden kuorman lastaamisen. Energia-autoyhdistelmien ylipainorajoja voisi myös nostaa, jolloin auton kuormatila saataisiin hyödynnettyä täysimääräisesti. Puutavara-autolla paaleja on järkevintä kuljettaa sen keveyden ansiosta, koska siihen mahtuu paljon enemmän paaleja kuin energiayhdistelmään.

Tämän tutkimuksen pohjalta voidaan päätellä, että kokopuupaalien ajossa kuormatila tulee hyödynnettyä hyvin ja painorajat tulevat helposti vastaan. Ylipainorajojen kanssa tulee poikkeuksetta ongelmia, kun yhdistelmä kuormataan täyteen. Kuljetusyrittäjän mielestä kaukokuljetus ei ole paalien ajossa ongelma vaan paalien kosteus. Yrittäjän mielestä paalit tulisi tehdä sellaisilta kohteilta, joissa on riittävästi lehtipuuta, jotta paaleista tulisi ilmavampia.

Kärhän ym. (2009) tutkimuksessa ja Mikko Hännisen opinnäytetyössä (2007) todetaan, että kokopuupaaleja voidaan hyvin kuljettaa perinteisillä puutavara-autoyhdistelmillä. Tässä tutkimuksessa suoritettujen kuljettajien ja kuljetusyrittäjien haastattelujen perusteella voidaan todeta, että kokopuupaalien kuljettaminen avonaisella puutavara-autolla ei ole niin yksinkertaista kuin mitä muissa tutkimuksissa on todettu. Etelä-Pohjanmaalla tutkimuksessa mukana ollut kuljetusyrittäjä ajoi paaleja energia-autoyhdistelmällä, koska hänen mielestä paalit haajoavat helposti ja tämän takia kuormasta voi tippua oksia ja roskia tielle. Keski-Suomen puolella kuljetusyrittäjät ajavat kokopuupaaleja perinteisillä puutavara-autoilla, mutta keskisuomalaisen kuljetusyrittäjän kanssa käydyn keskustelun perusteella energia-autoyhdistelmään siirtymistä harkitaan. Puutavara-autoilla paalien ajossa yrittäjien mielestä ongelmana on kuormasta lentävät ja yli roikkuvat oksat ja puut. Kuljettajien mielestä kokopuupaalien kuljettamiseen sisältyy riskejä perinteisillä puutavara-autoilla. Umpilaidallinen energia-autoyhdistelmä koetaan kuljettajien parissa turvallisemmaksi vaihtoehdoksi.

Kuljetusyrittäjien parissa on ilmeisesti liikkunut virheellistä tietoa, että kokopuupaaleja ei saisi kuljettaa puutavara-autoilla. Yrittäjät ovat luultavasti sekoittaneet kokopuupaalit hakkuutähdepaaleihin, joita ei saa kuljettaa puutavara-autoilla. Kuljetusyrittäjille suunnattu info- ja koulutustilaisuus koskien kokopuupaalien kuljettamista olisi erittäin suotavaa järjestää. Fixteri Oy on selvittänyt kokopuupaalien kuljettamista Keski-Suomen liikkuvan poliisin kanssa. Ko-

kopuupaalien kuljettaminen perinteisellä puutavara-autolla on näin ollen hyväksyttyä poliisin puolesta.

Paalien kuljettamisessa riittää edelleen kehitettävää. Tutkimuksen pohjalta voidaan todeta, että paalien hajoamisen estäminen tulisi ratkaista. Narun määrää ei missään nimessä tule vähentää varsinkaan energiapaaleissa. Paalien naruihin voisi olla järkevää kehittää jonkinlaista heijastinnauhaa, joka auttaisi kuljettajaa yöllä paalien kuormaamisessa. Toinen vaihtoehto saattaisi olla yhdistelmän valaistuksen parantaminen. Paaleista ei saisi tehdä liian suuria, jotta kuljettajan on niitä helpompi käsitellä. Varastoja voisi yrittää tehdä lautataapelin tapaan eli varaston keskivaiheille laitettaisiin paalivaraston leveydeltä kahteen riviin paaleja, jotta ilma pääsisi kiertämään paremmin. Paaleissa voisi olla myös yhtenä vaihtoehtona jonkinlainen kuminauha, jolloin se pitäisi paalin napakkana sen kuivuessa ja kutistuessa. Energiayhdistelmien laitoja voitaisiin saada kevyemmäksi tekemällä niihin reikiä.

LÄHDELUETTELO

Alatalo, K., Heikkilä, S., Hirvonen, V., Kärki, E., Lahtela, V., Niemelä, H., Olli, H., Parkkonen, H., Rumpunen, H., Saarentaus, T., Terävä, S., Oijala, T., Hänninen, E., Pennanen, O., Rajamäki, J. & Väkevä, J. 1997. Puutavaran autokuljetus. Metsäteho Oy. [Verkkojulkaisu]. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Opas/Puutavaran_autokuljetus_opas.pdf. [Viitattu 20.10.2011].

Asikainen, A. & Nuuja, J. 1999. Palstahaketuksen ja hakkeen kaukokuljetuksen simulointi. Metsäntutkimuslaitos. [Verkkojulkaisu]. Saatavissa: <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff99/ff993479.pdf>. [Viitattu 19.10.2011].

Erkkilä, A., Hillebrand, K., Raitila, J., Virkkunen, M., Heikkinen, A., Tiihonen, I. & Kaipainen, H. 2011. Kokopuun ja mäntykantojen korjuuketjujen sekä varastoinnin kehittäminen. Metsäkeskus. [Verkkojulkaisu]. Saatavissa: http://www.metsakeskus.fi/NR/rdonlyres/F5043B9C-C1C5-49A1-B8F8-34A27DF316F1/15796/Mets%C3%A4energia_Tutkimusraportti_VTTR1015110_Final_B.pdf. [Viitattu 8.9.2011].

EU:n ilmasto- ja energiapaketti. 2011. [Verkkodokumentti]. Valtion ympäristöhallinto. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=22013&lan=fi#a0>. [Viitattu 8.9.2011].

Hänninen, M. 2007. Karsimattoman aines- ja metsäenergiapuun kuljetuslogistiikan kehittäminen. Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Ihalainen, T. & Niskanen, A. 2010. Kustannustekijöiden vaikutukset bioenergian tuotannon arvoketjuissa. Metsäntutkimuslaitos. [Verkkojulkaisu]. Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2010/mwp166.pdf>. [Viitattu 28.11.2011].

Kärhä, K. & Keskinen, S. 2011. Ensiharvennukset metsäteollisuuden raaka-ainelähteenä 2000-luvulla. Metsäteho Oy. [Verkkojulkaisu]. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja_2011_02_Ensiharvennukset_metsateollisuuden_raaka-ainelahteenä_kk_slk.pdf. [Viitattu 1.9.2011].

Kärhä, K., Laitila, J., Jylhä, P., Nuutinen, Y. & Keskinen, S. 2009. Kokopuun paalaus – tuotantoketjun tuottavuus ja kustannukset. Metsäteho Oy. [Verkkojulkaisu]. Saatavissa:

http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_211_Kokopuun_paalaus_tuotantoketjun_tuottavuus_ja_kustannukset_kk.pdf. [Viitattu 1.9.2011].

- 2011. Metsähakkeen tuotantoketjut Suomessa 2010. Metsäteho Oy. [Verkkojulkaisu]. Saatavissa:

http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja_2011_06_Metsahakkeen_tuotantoketjut_2010_kk.pdf. [Viitattu 5.9.2011].

Laitila, J. & Väättäin, K. 2011. Kokopuun ja rangan autokuljetus ja haketustuottavuus. Metsäntutkimuslaitos. [Verkkojulkaisu]. Saatavissa:

<http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff11/ff112107.pdf>. [Viitattu 8.9.2011].

- 2004. Kokopuuhakkeen kustannuslaskentaohjelma. Pohjois-Karjalan Ammattikorkeakoulu. [Verkkojulkaisu]. Saatavissa:

<http://www.ncp.fi/bioenergia/pienpuuntuotanto/4/Kokopuuhakkeen%20kustannuslaskentaohjelma%20korjurilla.xls> [Viitattu 16.11.2011].

- , Kärhä, K., & Jylhä, P. 2009. Time consumption models and parameters for off- and on-road transportation of whole-tree bundles. *Baltic Forestry* 15(1(28): 105–114.

- , Leinonen, A., Flyktman, M., Virkkunen, M. & Asikainen, A. 2010. Metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan haasteet ja kehittämistarpeet. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. [Verkkojulkaisu]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2010/T2564.pdf>. [Viitattu 2.9.2011].

Nurminen, T. & Heinonen, J. 2007. Characteristics and time consumption of timber trucking in Finland. *Silva Fennica* 41(3): 471-487.

Oksanen, R. 2003. Kuljetusten toimintolaskennan sovellukset ja toteutus. Liikenne- ja viestintäministeriö. [Verkkojulkaisu]. Saatavissa: http://www.lvm.fi/files/17_2003.pdf. [Viitattu 21.10.2011].

- 2004. Kuljetustuotannon toimintolaskenta. Kymenlaakson ammattikorkeakoulun julkaisuja. [Viitattu 21.10.2011].

Puun energiakäyttö. 2010. [Verkkodokumentti]. Metsäntutkimuslaitos. Saatavissa: <http://www.metla.fi/tiedotteet/metsatilastotiedotteet/2011/puupolttoaine2010.htm>. [Viitattu 14.11.2011].

Liite 1

Haastattelurunko

Puutavara-auton kuljettaja:

Kuljettaja nro: _____

- Paalien kuljettaminen verrattuna perinteiseen puutavaran kuljettamiseen?
- Paalien edut/haitat?
- Kuljettajan kokemus? Kokemus paalien ajosta?
- Kuinka paalit kestävät kuljettamista, lastaamista ja purkamista?
- Kuinka vaikeaa on sitoa paaleja? Tarvitseeko kiristää kesken matkan?
- Kumpaa kuljettaja ajaa mieluummin, paaleja vai ainespuuta/rankaa?
- Kuinka paljon paalien ajo kustantaa? Kumpaa yrittäjän on kannattavampaa ajaa?
- Kuinka hyvin paalit pysyvät kyydissä? Onko paaleja koskaan pudonnut kuormasta?
- Varitseeko paaleista paljon roskaa lastatessa, purkaessa tai kuljetettaessa?
- Mitä vaikeustekijöitä on paalien lastauksessa ja kuljetuksessa?
- Onko paalien lastaaminen/purkaminen nopeampaa kuin ainespuu?
- Tuleeko painorajat nopeasti vastaan paaleja lastatessa? Mahtuisiko kyytiin enemmänkin paaleja?
- Onko kuljettajalla kokemusta hakeauton ajosta tai hakeketjusta?
- Onko mepa –kuljetuksia ollut ja ovatko ne käytännössä mahdollisia?
- Kuinka paalivarasto eroaa ainespuun varastosta? Onko vaikeampi käsitellä?
- Eroaako paalien purkaminen käyttöpaikalla ainespuusta?
- Mikä on kuljetusyrittäjän maksuperuste? MWh, kg, m³?
- Onko lumi, pakkanen tai jää ongelma paalien ajossa?

- Onko kuorma-auto helpompi/vaikeampi ajettava, kun kuorma on kyydissä? Nopeampi?

Kuljettajan mielipide:

- Miten parantaisit paalien kaukokuljetusta?
- Kehitysideoita?

Auton tiedot: Merkki, mitat, tekniset tiedot, kuormatilavuus, kuormain.

Käyttöpaikka:

- Minkälaisista paalien hakettaminen on verrattuna muuhun hakettamiseen?
- Onko paalien kosteus ja energiasisältö parempaa/huonompaa kuin muiden energiapuiden?
- Paalien varastoinnin ongelmat/hyödyt?
- Aiheutuuko neulasista ongelmia poltossa?
- Kumpaa on taloudellisesti kannattavampaa polttaa paaleja vai kokopuuhaketta?
- Onko paalien laatu minkälaisista verrattuna muuhun puuenergiaan?
- Kuinka puhtaita Fixterin tekemät paalit ovat? Onko vieraita esineitä tai hiekkaa seassa?
- Fixteri –paalien osuus tehtaan kokonaispoltosta?
- Murskaimen malli? Tekniset tiedot, minkä kokoisia paaleja pystyy murskaamaan?
- Kattilan tekniset tiedot? MWh?
- Poltetaanko paalit sellaisenaan vai laitetaanko sekaan turvetta tms?

- Mitä parannettavaa paaleissa on?

- Kehitysideoita?

Murskaimen tiedot: Tekniset tiedot, Max.paalien koko, kuormain, teho/h.

AIKATUTKIMUS:

Kuormaus:

	Aika	Paalien lukumäärä	Huomioita
Tyhjänä ajo			
Nuppi			
Perävaunu			
Sidonta			
Siivoaminen			
Kuormattuna ajo			
Apuaika (Alle 15min)			

Huomioita:

Purku:

	Aika	Huomioita
Sidosten purku		
Nuppi		
Perävaunu		
Siivoaminen		
Apu aika(15min)		

Huomioita:
