

Puuraaka-aineen hyötykuorman optimointi autokuljetuksissa

Ari Isokangas

Oulun yliopisto, Sääätötekniikka, PL 4300, 90014 Oulun yliopisto
Puh: +358 50 350 3282, ari.isokangas@oulu.fi, <http://www.oulu.fi/pyosaaen/>

Antti Korpilahti

Metsäteho Oy, Vernissakatu 4, 01300 Vantaa
Puh. +358 40 582 1709, antti.korpilahti@metsateho.fi, <http://www.metsateho.fi>

AVAINSANAT hake, kuormatila, kuljetustehokkuus, tiiviys, tuoretiheys

TIIVISTELMÄ

Tutkimuksen tavoitteena on puuraaka-aineen ominaisuudet huomioiden optimoida autokuljetuksien hyötykuormaa kustannustehokkuuden parantamiseksi. Hyötykuormien optimoinnilla pyritään mahdollisimman korkeaan maksuperusteena olevaan kiintotilavuuteen, mihin yleensä päästään ajoneuvoyhdistelmän suurimman sallitun kokonaismassan ja kehystilavuuden hyödyntämisellä. Tutkimuksessa selvitetään erityisesti kuormien tiiviiden ja puuraaka-aineen tuoretiheyden vaikutusta hakkeen ja pyöreän puun autokuljetusten hyötykuormiin.

Tutkimuksen motivaationa on korkeampien hyötykuormien myötä alentaa kuljetuskustannuksia, jolla on yhdessä raaka-ainekustannuksien kanssa merkittävä vaikutus energialaitosten sekä sellu- ja paperiteollisuuden kannattavuuteen. Hyötykuormien optimoinnilla voidaan lisäksi pienentää teihin kohdistuvaa räsitusta ja kuljetuksista aiheutuvaa haittaa erityisesti kaupunkiympäristössä.

Tutkimus perustuu yleisimpien ajoneuvoyhdistelmien ja erityyppisten puuraaka-aineiden tietoihin kirjallisuuden perusteella. Tuloksia tarkastellaan ennen kaikkea sellu- ja paperiteollisuuden toimitettavan tuoreen ja energiaksi päätyvän kuivemman puuraaka-aineen näkökulmista.

Tulosten perusteella pyöreän puun autokuljetuksien hyötykuorman optimoinnin kannalta keskeinen asia on puunippujen mahdollisimman hyvä sovitaminen kuormatilaan. Hyötykuormaa voidaan lisäksi parantaa oman kuormaimen poisjättämisellä silloin, kun puuniput on sovitettu hyvin kuormatilaan ja puuraaka-aineen tuoretiheys on korkea. Erityisesti sellu- ja paperiteollisuuden toimitettavan tuoreen hakkeen hyötykuormaa rajoittaa hakeajoneuvoyhdistelmän suurin sallittu kokonaismassa, jolloin tiiviiden merkitys on vähäinen. Tulostarkastelun perusteella hyötykuormia voitaisiin tällöin parantaa merkittävästi ajoneuvoyhdistelmän kevyemmällä rakenteella. Tiiviiden ja hakeajoneuvoyhdistelmän suuren kehystilavuuden merkitys korostuvat kuitenkin alhaisilla tuoretiheyksillä. Tällöin hakkeena voidaan yleensä kuljettaa pyöreää puuta suurempi hyötykuorma, mutta tuoreen puun tapauksessa tilanne on päinvastoin. Tuloksia voidaan hyödyntää autokuljetusten suunnittelussa, jolloin voidaan valita sopivin ajoneuvoyhdistelmä raaka-aineen ominaisuuksien perusteella.

1 JOHDANTO

Sellu- ja paperiteollisuuden toimitettavan puuraaka-aineen tulisi olla mahdollisimman tuoretta ja maksuperusteena on yleensä kiintotilavuus. Tuoreen puun massasta on merkittävä osuus vettä, jonka kuljettaminen ei ole kannattavaa varsinkaan energialaitoksille, koska vesi alentaa lämpöarvoa /1/. Energiapuuta kuivatetaan tyypillisesti tienvarsivarastoissa, mutta tällöin veden haihtumisen lisäksi tapahtuu kuiva-ainetappioita. Niiden on raportoitu olevan huomattavan suuria, esimerkiksi 4,0 - 8,3 % kuiva-aineen massasta 13 kk varastointiajalla /2/. Lisäksi tienvarsivarastointi sitoo runsaasti pääomaa. Kuljetusten taloudellisuuden kannalta toinen merkittävä puuraaka-aineen ominaisuus on tiiviys, jolla tarkoitetaan kehystilavuuden ja kiintotilavuuden suhdetta.

Vuonna 2013 teollisuuden toimitettiin 59,6 Mm³ puuraaka-ainetta, joista autokuljetuksen osuus oli noin 75 %. Autokuljetuksen keskimääräinen matka suoraan tehtaalle oli 108 km ja kustannus 8€/m³. /3/ Ajoneuvoasetus muuttui Suomessa 1.10.2013 mahdollistaen aikaisempaa monipuolisemmat ajoneuvoyhdistelmät. Nykyään on mahdollista käyttää kokonaismassaltaan 68 ja 76 t yhdistelmiä, kun aiemmin rajoitus oli 60 t /4/.

Tutkimuksessa tarkastellaan puuraaka-aineen tiiviiden ja tuoretiheyden vaikutusta hyötykuormiin yleisesti käytetyillä ajoneuvoyhdistelmillä. Hyötykuormien optimointimahdollisuuksia tarkastellaan ennen kaikkea sellu-

ja paperiteollisuuteen toimitettavan tuoreen ja energiaksi päätyvän kuivemman puuraaka-aineen näkökulmista. Pyöreän puun ajoneuvoyhdistelmissä keskitytään erityisesti puunippujen mahdollisimman hyvään sovitamiseen kuormatilaan. Lisäksi vertaillaan pyöreän puun ja hakkeen autokuljetusten hyötykuormia.

2 METODIT JA MATERIAALIT

Taulukossa 1 on esitetty tyypillisiä ajoneuvoyhdistelmien ominaisuuksia pyöreän puun ja Taulukossa 2 hakkeen kuljetuksiin. Kantavuus saadaan vähentämällä ajoneuvon oma paino suurimmasta sallitusta kokonaismassasta. Kantavuus tarkoittaa siis suurinta mahdollista hyötykuorman massaa. Taulukoihin on lisäksi laskettu kantavuuden ja suurimman sallitun kokonaismassan suhde sekä kantavuuden suhde kuormatilan kehystilavuuteen. Taulukon 2 arvot on annettu ilman auton omaa irrotettavissa olevaa kuormainta, jonka massa on tyypillisesti 3,5 t. Pyöreän puun ajoneuvoyhdistelmien kuormatilan leveytenä on käytetty 2,3 m ja korkeutena 3 m, josta on saatu poikkileikkauspinta-alaksi 6,9 m² /5/.

Taulukko 1. Tyypillisiä pyöreän puun ajoneuvoyhdistelmien ominaisuuksia /5/. Tiedot on annettu ilman kuormainta, jonka massa on tyypillisesti 3,5 t. B tarkoittaa ajoneuvoyhdistelmän suurinta sallittua kokonaismassaa ja V kuormatilan kehystilavuutta, joka on saatu kertomalla kuormatilan pituus ja poikkileikkauspinta-ala 6,9 m².

Autotyyppi	Kantavuus N (t)	B (t)	Kuormatilan pituus L (m)	V (m ³)	100*N/B (%)	N/V (kg/i-m ³)
3+5 -akselinen	44,7	68	6,8+11	123	66	364
4+4 -akselinen	44,2	68	7+10,2	119	65	372
4+5 -akselinen	52	76	7+11	124	68	419

Taulukko 2. Tyypillisiä hakkeen ajoneuvoyhdistelmien ominaisuuksia /5/. B tarkoittaa ajoneuvoyhdistelmän suurinta sallittua kokonaismassaa.

Autotyyppi	Kantavuus N (t)	B (t)	Kehystilavuus V (m ³)	100*N/B (%)	N/V (kg/i-m ³)
3+4 -akselinen	35	62	120	56	292
3+5 -akselinen	40	68	145	59	276
4+5 -akselinen	46	76	155	61	297

Taulukossa 3 on esitetty karsitun puun tiiviyskäyrä puunipun pituuden funktiona. Tiiviys alenee puunipun pituuden kasvaessa puiden lenkouden vuoksi. Havupuu on tyypillisesti lehtipuuta suurempaa, minkä vuoksi sen tiiviyydet ovat suurempia kuin lehtipuilla. Pituuden lisäksi tiiviyyteen vaikuttaa hieman puun keskimääräinen halkaisija, oksankyhyt, mutkaisuus ja nipun ladonta /6/.

Taulukko 3. Karsitun puun tiiviyydet (f) puunipun pituuden funktiona /6/.

Nipun pituus (m)	f, havupuu	
	f, havupuu	f, lehtipuu
2,00 - 2,50	0,66	0,57
2,51 - 3,50	0,63	0,54
3,51 - 4,50	0,61	0,52
4,51 - 5,50	0,60	0,50
5,51 - 6,00	0,59	0,49

Karsimattoman puun tiiviys autokuljetuksien tyypillisellä 3 m pinokorkeudella riippuu keskimääräisestä halkaisijasta vaihdellen välillä 0,26 (d = 5 cm) - 0,34 (d = 15 cm). Teollisuushakkeen tiiviys on tyypillisesti lastauksen yhteydessä 0,375 ja kuljetuksen jälkeen noin 0,40. Metsähakkeelle ja -murskeelle tiiviys on kuljetuksen jälkeen normaalisti välillä 0,38 - 0,48. /6/ Edellä esitetyt tiiviyydet ovat Metsäntutkimuslaitoksen antamia keskimääräisiä arvoja, joista yksittäisten erien tiiviyydet voivat poiketa.

Tiiviyyden lisäksi puuraaka-aineen toinen keskeinen ominaisuus kuljetusten kannalta on tuoretiheys (δ), joka lasketaan puuraaka-aineen massan (kg) ja kiintolavuuden (m³) suhteesta

$$\delta = \frac{m}{V}. \quad (1)$$

Vasta kaadetun puun tuoretiheys on normaalisti välillä 800 - 1000 kg/m³ /7/. Kesällä 85 - 105 vuorokauden varastointiajan jälkeen harvennusenergiapuun tuoretiheys on havupuilla noin 600 kg/m³ /6/. Lisää tuoretiheyksiä ja niitä vastaavia kosteuspitoisuuksia löytyy esimerkiksi Metsäntutkimuslaitoksen julkaisusta /6/.

Kaavan 1 mukaisesti ajoneuvoyhdistelmän kiintotilavuutta voidaan kasvattaa suurella puuraaka-aineen massalla ja alhaisella tuoretiheydellä. Kiintotilavuutta saattaa rajoittaa ajoneuvoyhdistelmän kehystilavuus tai suurin sallittu kokonaisuudessa, joiden yhteys on esitetty Kaavassa 2.

$$m = \delta_{\text{tuore}} \cdot V_{\text{kehys}} \cdot f. \quad (2)$$

Tulokset on esitetty kiintotilavuuksina ja vastaavina tiiviiden ja tuoretiheyden raja-arvoina, joilla kantavuus ja kehystilavuus pystytään täysin hyödyntämään. Kaavan 2 kehystilavuus vastaa puuraaka-aineen irtotilavuutta, kun ajoneuvoyhdistelmän kehystilavuus on täysin hyödynnetty. Puuraaka-aineen hyvällä tiiviydellä on vasta tämän jälkeen vaikutusta kiintotilavuuteen, minkä vuoksi tulosten tiiviidet on ilmoitettu ajoneuvoyhdistelmien kehystilavuutta kohden. Perusteluna taloudellisuustarkastelulle on se, että kuljetuskustannukset ovat tiettyä matkaa kohden samaa suuruusluokkaa hyötykuorman suuruudesta riippumatta. Kuljetuskustannuksia voidaan luonnollisesti alentaa mahdollisimman suurilla hyötykuormilla.

3 TULOKSET

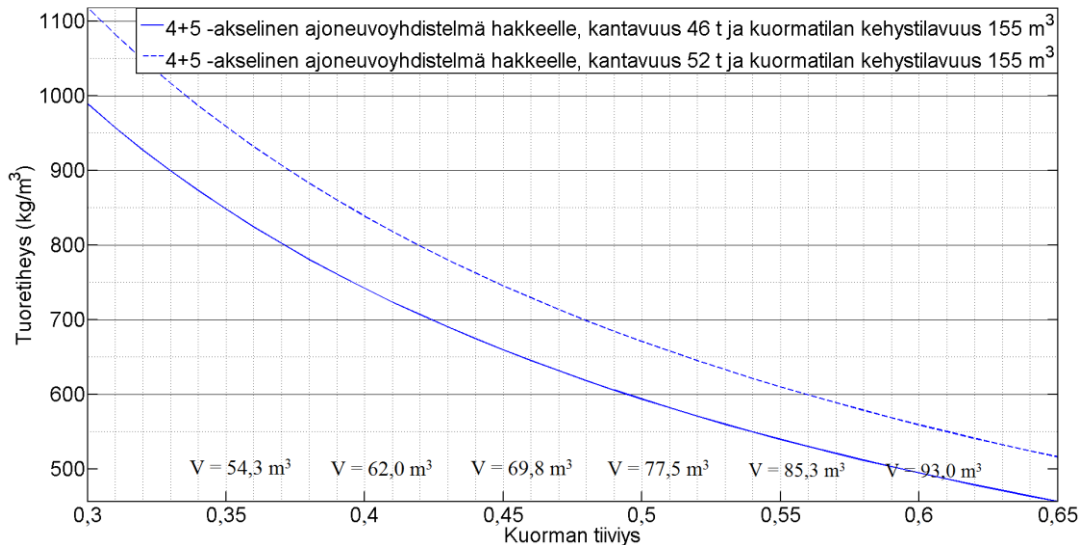
Taulukossa 4 on esitetty kiintotilavuus kolmen erimittaisen puunippuvaihtoehdon tapauksissa käytettäessä 4+5 – akselista ajoneuvoyhdistelmää, jonka tarkemmat tiedot löytyvät Taulukon 1 riviltä 3. Kiintotilavuus on laskettu puun pituuden mukaisilla tiiviiden arvoilla, jotka on esitetty Taulukossa 3. Taulukosta 4 nähdään, että 4 m puunippuvaihtoehto on käytetyllä ajoneuvoyhdistelmällä huonoin. Tällöin ajoneuvoyhdistelmän kuormatilan pituudesta jää hyödyntämättä 6 m eli noin 33 %. Paras vaihtoehto on 3,5 m puunippu, joita saadaan mahtumaan yhteensä 5 kpl ja lähes koko kuormatilan pituus voidaan hyödyntää. Taulukkoon 4 on otettu mukaan myös karsimattoman puun tapaus, jossa on käytetty suurinta Metsäntutkimuslaitoksen määrittelemään tiiviyyttä (0,34) ja puunippuvaihtoehdoista parasta 3,5 m pituutta. Silti kiintotilavuus jää selvästi alhaisimmaksi. Hyötykuormaa saattaa kuitenkin rajoittaa kantavuus. Taulukkoon 4 on tämän vuoksi laskettu tuoretiheydet ilman kuormainta ja kuormaimen ollessa mukana, joita alhaisimmilla arvoilla päästään Taulukossa 4 ilmoitettuihin kiintotilavuuksiin. Muussa tapauksessa kiintotilavuus saadaan jakamalla puuraaka-aineen massa sen tuoretiheydellä.

Taulukko 4. Erilaisia kuormausvaihtoehtoja 4+5 – akselille ajoneuvoyhdistelmälle, jonka kuormatilan pituus on 7 + 11 m. Taulukossa on esitetty tuoretiheyden raja-arvot ilman 3,5 t omaa kuormainta (δ_1) ja sen ollessa mukana (δ_2), joita alhaisimmilla arvoilla päästään ilmoitettuun kiintotilavuuteen.

Raaka-aine	Nippuja (kpl)	Nipun pituus (m)	Kiintotilavuus (m ³)	δ_1 (kg/m ³)	δ_2 (kg/m ³)	K (%)	f
Havupuu	3	4	48,5	1071	999	67	0,39
Havupuu	3	5	59,7	871	813	83	0,48
Havupuu	5	3,5	73,1	711	664	97	0,59
Lehtipuu	3	4	41,4	1257	1172	67	0,33
Lehtipuu	3	5	49,7	1046	975	83	0,40
Lehtipuu	5	3,5	62,7	830	774	97	0,50
Karsimaton	5	3,5	37,1	1401	1306	97	0,30

K=Kuormapituuden hyödyntäminen (nippujen lukumäärä*nipun pituus/kuormatilan pituus)*100

Kuvassa 1 on esitetty hakkeelle tiiviiden ja tuoretiheyden riippuvuus, jolla hyötykuorma voidaan optimoida. Kuvan 1 esimerkissä on käytetty 4+5 – akselista hakeajoneuvoyhdistelmää, jonka tarkemmat tiedot löytyvät Taulukon 2 riviltä 3. Lisäksi Kuvaan 1 on merkitty katkoviivalla hypoteettinen vaihtoehto, jonka kantavuus olisi 6 t suurempi. Tämä edellyttäisi 7,7 % pienentämistä 76 t kokonaisuudesta esimerkiksi kevyemmän hakekonttirakenteen avulla. Kuvan 1 perusteella hakkeen tiiviydellä on suuri vaikutus kiintotilavuuteen. Korkeat tiiviidet edellyttävät kuitenkin alhaisia tuoretiheyksiä.



Kuva 1. Tiivyyden ja tuoretiheyden riippuvuus, jolla hyötykuorma voidaan optimoida 4+5 -akselisen hakeajoneuvoyhdistelmän tapauksessa.

Taulukossa 5 esitetään ajoneuvoyhdistelmien kiintotilavuudet tuoretiheyden ja Taulukossa 6 tiivyyden funktiona. Taulukot 5 ja 6 on tarkoitettu lähinnä kuljetusten suunnitteluun, kun tienvarsivaraston puuraaka-aineen tuoretiheys tai hakkurityypin tuottaman hakkeen tiivys voidaan arvioida. Taulukon 5 mukaisesti saman tuoretiheyden puuraaka-aineella päästään korkeampaan kiintotilavuuteen pyöreänä puuna kuin hakkeena, kun tarkastelu tehdään vastaavilla suurimman sallitun kokonaismassan ajoneuvoyhdistelmillä. Pyöreän puun tiivyydet ovat Taulukon 3 mukaisesti yleensä haketta korkeampia /6/, mikä tulee huomioida Taulukon 6 tarkastelussa.

Taulukko 5. Ajoneuvoyhdistelmien kiintotilavuudet tuoretiheyden funktiona edellyttäen vähintään taulukossa ilmoitettua tiivyyttä f . Pyöreän puun ajoneuvoyhdistelmien tiedot on annettu ilman omaa kuormainta.

Tuoretiheys (kg/m ³)	Pyöreän puun ajoneuvoyhdistelmät						Hakkeen ajoneuvoyhdistelmät					
	3+5 -aks. 68 t		4+4 -aks. 68 t		4+5 -aks. 76 t		3+4 -aks. 62 t		3+5 -aks. 68 t		4+5 -aks. 76 t	
	V (m ³)	f	V (m ³)	f	V (m ³)	f	V (m ³)	f	V (m ³)	f	V (m ³)	f
500	89,4	0,73	88,4	0,74	104,0	0,84	70,0	0,58	80,0	0,55	92,0	0,59
600	74,5	0,61	73,7	0,62	86,7	0,70	58,3	0,49	66,7	0,46	76,7	0,49
700	63,9	0,52	63,1	0,53	74,3	0,60	50,0	0,42	57,1	0,39	65,7	0,42
800	55,9	0,45	55,3	0,46	65,0	0,52	43,8	0,36	50,0	0,34	57,5	0,37
900	49,7	0,40	49,1	0,41	57,8	0,47	38,9	0,32	44,4	0,31	51,1	0,33
1000	44,7	0,36	44,2	0,37	52,0	0,42	35,0	0,29	40,0	0,28	46,0	0,30

Taulukko 6. Ajoneuvoyhdistelmien kiintotilavuudet tiivyyden funktiona edellyttäen korkeintaan taulukossa ilmoitettua tuoretiheyttä (δ). Pyöreän puun ajoneuvoyhdistelmien tiedot on annettu ilman omaa kuormainta.

Tiivius	Pyöreän puun ajoneuvoyhdistelmät						Hakkeen ajoneuvoyhdistelmät					
	3+5 -aks. 68 t		4+4 -aks. 68 t		4+5 -aks. 76 t		3+4 -aks. 62 t		3+5 -aks. 68 t		4+5 -aks. 76 t	
	V (m ³)	δ (kg/m ³)	V (m ³)	δ (kg/m ³)	V (m ³)	δ (kg/m ³)	V (m ³)	δ (kg/m ³)	V (m ³)	δ (kg/m ³)	V (m ³)	δ (kg/m ³)
0,30	36,9	1211	35,7	1238	37,2	1398	36,0	972	43,5	920	46,5	989
0,35	43,1	1038	41,7	1061	43,4	1198	42,0	833	50,8	788	54,3	848
0,40	49,2	909	47,6	929	49,6	1048	48,0	729	58,0	690	62,0	742
0,45	55,4	808	53,6	825	55,8	932	54,0	648	65,3	613	69,8	659
0,50	61,5	727	59,5	743	62,0	839	60,0	583	72,5	552	77,5	594
0,55	67,7	661	65,5	675	68,2	762	66,0	530	79,8	502	85,3	540
0,60	73,8	606	71,4	619	74,4	699	72,0	486	87,0	460	93,0	495
0,65	80,0	559	77,4	571	80,6	645	78,0	449	94,3	424	100,8	457

4 TULOSTEN TARKASTELU

Taulukosta 4 nähdään, että pyöreän puun ajoneuvoyhdistelmän ja puunippujen pituuden yhteensovittamisella on suuri merkitys. Esimerkiksi 3,5 m puunipuilla päästään 4+5 –akselisella ajoneuvoyhdistelmällä yli 50 % suurempaan kiintotilavuuteen kuin 4 m nipuilla. Kantavuuden tullessa rajoitteeksi hyötykuormaa voidaan kasvattaa oman kuormaimen poisjättämisellä. Esimerkiksi viiden 3,5 m havupuunipun lastaaminen ylittäisi kantavuuden oman kuormaimen kanssa tuoretiheydellä 711 kg/m³. Tällöin 3,5 t kuormaimen poisjättäminen mahdollistaisi Taulukossa 4 esitetyn tilavuuden eli 4,92 m³ enemmän. Taulukoista 3 ja 4 nähdään, että lehtipuun puunippujen alhaisempien tiivyyksien vuoksi kiintotilavuudet ovat pienempiä kuin havupuulla.

Hakkeella jo alhainen 0,35 tiiviys edellyttää 848 kg/m³ tuoretiheyttä, jolloin päästäisiin 54,3 m³ kiintotilavuuteen Kuvassa 1 esitetyllä 4+5 –akselisella ajoneuvoyhdistelmällä. Tyypillisellä teollisuussahahakkeen tiivyydellä 0,40 ajoneuvoyhdistelmään saataisiin mahtumaan 62 m³ eli 14,2 % enemmän, mutta edellyttäisi 742 kg/m³ tuoretiheyttä. Hakkeen paremman tiivyyden merkitys korostuu vasta alhaisilla tuoretiheyksillä. Kuvassa 1 esitettiin hypoteettinen vaihtoehto, jossa hakeajoneuvoyhdistelmän kantavuutta voitaisiin lisätä kevyemmällä rakenteella. Tämä mahdollistaisi samalla tuoretiheydellä korkeamman tiivyyden ja täten suuremman kiintotilavuuden tai edellisten ollessa samoja korkeamman tuoretiheyden omaavan puuraaka-aineen kuljetuksen.

Sellu- ja paperiteollisuuteen toimitettavan tuoreen puuraaka-aineen tuoretiheys on yleensä 800 - 1000 kg/m³ /7/. Kuvan 1 perusteella teollisuushake mahdollistaa tällöin korkeintaan 0,37 tiivyyden, jonka jälkeen kantavuus ylittyisi. Taulukoiden 1 ja 2 perusteella pyöreän puun ajoneuvoyhdistelmän kantavuudet ovat suurempia kuin vastaavien suurimman sallitun kokonaisuuden hakeajoneuvoyhdistelmillä. Tämän vuoksi samalla tuoretiheydellä voidaan toimittaa suurempi kiintotilavuus pyöreänä puuna kuin hakkeena Taulukon 5 mukaisesti. Teollisuushakkeen hyötykuormaa voitaisiin parantaa ajoneuvoyhdistelmien kevyemmällä rakenteella tai kuivemmalla puuraaka-aineella. Jälkimmäisellä vaihtoehdolla joudutaan tosin uuden optimointiongelman eteen: onko kannattavampaa kuljettaa pienempi kiintotilavuus parempilaatuista tuoretta vai suurempi määrä kuivempaa haketta?

Energiälaitoksille toimitetaan myös karsittua kuitupuuta, joten autokuljetusmuotoja on syytä vertailla. Energiaksi toimitettavan puuraaka-aineen tuoretiheyden ollessa esimerkiksi 600 kg/m³ hyötykuormaa rajoittaa erityisesti pyöreän puun ajoneuvoyhdistelmien kehystilavuus, ks. Taulukko 4. Kehystilavuuden ollessa rajoitteena hyötykuormaa voidaan kasvattaa paremmalla tiivyydellä kantavuuksirajaan saakka. Taulukossa 4 pyöreän puun paras tiiviys havupuulla on 0,59 ja lehtipuulla 0,48, kun 97 % kuormatilan pituudesta voitiin hyödyntää. Kuvan 1 perusteella pyöreää puuta korkeampaan kiintotilavuuteen päästään, kun lehtipuuhakkeen tiiviys on suurempi kuin 0,40 ja havupuun vähintään 0,48. Lehtipuulla voidaan siis yleensä kuljettaa hakkeena pyöreää puuta suurempi hyötykuorma, mutta havupuuhakkeella se edellyttää selvästi korkeamman tiivyyden ja korkeintaan 620 kg/m³ tuoretiheyden. Taulukoiden 1 ja 2 mukaisesti hakeajoneuvoyhdistelmien kuormatilan kehystilavuudet ovat suurempia, mutta kantavuuden suhteet kehystilavuuteen ovat alhaisempia kuin pyöreän puun autoilla. Tämän vuoksi hakeajoneuvoyhdistelmien hyötykuormat saadaan parhaiten optimoitua hyvin kuivatulla puuraaka-aineella ja kuorman erityisellä tiivistämisellä. Esimerkiksi Kuvan 1 perusteella 540 kg/m³ tuoretiheydellä ja 0,55 tiivyydellä olisi mahdollista päästä jopa 85,3 m³ kiintotilavuuteen.

Taulukoita 4, 5 ja 6 voidaan hyödyntää kuljetusten suunnittelussa, kun tienvarsivaraston puunippujen pituus tiedetään ja puuraaka-aineen tuoretiheys tai hakkurityypin tuottaman hakkeen tiiviys voidaan arvioida. Kustannustehokkuutta voidaan parantaa valitsemalla sopivin ajoneuvoyhdistelmä raaka-aineen ominaisuuksien perusteella. Pyöreän puun kuljetuksissa voidaan hyödyntää Taulukon 4 tietoja ajoneuvoyhdistelmän valintaan, jonka kuormatilaan puuniput saadaan parhaiten sovitettua. Taulukoiden 5 ja 6 avulla voidaan arvioida kantavuutta ja oman kuormaimen poisjättämisestä saatavaa hyötyä. Lisäksi voidaan valita kustannustehokkaampi vaihtoehto hakkeen ja pyöreän puun kuljetuksista erityisesti karsitun energiapuun tapauksessa. Ääritapauksessa raaka-aineen ominaisuuksiin parhaiten soveltuvimman ajoneuvoyhdistelmän valinnalla ja hyötykuorman optimoinnilla voidaan selvittää yhdellä kuljetuksella kahden sijaan. Tällöin kuljetuskustannukset hyötykuormaa kohden olisivat vain noin puolet verrattuna jälkimmäisen vaihtoehtoon. Taulukon 5 ja 6 tietoja voidaan myös hyödyntää suunniteltaessa minä ajankohtana raaka-aine kannattaisi noutaa, kun lisäksi huomioidaan puuraaka-aineen laadun heikkeneminen ja siihen sitoutunut pääoma.

5 YHTEENVETO

Tutkimuksessa selvitetään kuormien tiiviiden ja puuraaka-aineen tuoretiheyden vaikutusta hakkeen ja pyöreän puun autokuljetuksissa. Tutkimus perustuu yleisimpien ajoneuvoyhdistelmien ja erityyppisten puuraaka-aineiden tietoihin kirjallisuuden perusteella. Hyötykuormien optimoinnilla pyritään mahdollisimman korkeaan kiintotilavuuteen ja ajoneuvoyhdistelmän suurimman sallitun kokonaismassan ja kehystilavuuden hyödyntämisellä. Optimointimahdollisuuksia tarkastellaan ennen kaikkea sellu- ja paperiteollisuuteen toimitettavan tuoreen ja energiaksi päätyvän kuivemman puuraaka-aineen näkökulmista.

Tulosten perusteella pyöreän puun autokuljetuksissa keskeinen asia on puunippujen mahdollisimman hyvä sovittaminen kuormatilaan, mikä korostuu erityisesti alhaisilla tuoretiheyksillä. Tällöin havupuulla päästään yleensä korkeampiin hyötykuormiin kuin lehtipuulla parempien nipputiivyyksien takia. Havupuulla voidaan päästä hakkeena pyöreää puuta suurempaan hyötykuormaan vasta alhaisilla tuoretiheyksillä ja hyvällä tiiviydellä. Lehtipuulla ja karsimattoman puun tapauksissa päästään yleensä hakkeena suurempiin hyötykuormiin. Tämän vuoksi erityisesti energiaksi päätyvä lehtipuu ja karsimaton puu kannattaa yleensä hakettaa. Hakeajoneuvoyhdistelmien kantavuudet ovat alhaisempia kuin pyöreän puun autoilla, mikä rajoittaa hyötykuormaa varsinkin sellu- ja paperiteollisuuteen toimitettavalla tuoreella hakkeella. Hakeajoneuvoyhdistelmien kevyemmällä rakenteella tai kuivemmalla puuraaka-aineella voitaisiin parantaa hyötykuormaa. Jälkimmäisessä vaihtoehdossa jouduttaisiin suuremman hyötykuorman lisäksi arvioimaan puuraaka-aineen heikomman laadun merkitystä kokonaiskantavuuteen.

Tuloksia voidaan hyödyntää autokuljetusten suunnittelussa valitsemaan sopivin ajoneuvoyhdistelmä raaka-aineen ominaisuuksien perusteella. Työssä esitettyjen taulukoiden avulla on mahdollista vertailla hakkeen ja pyöreän puun kuljetuksen kannattavuutta erityisesti karsitun energiapuun tapauksessa. Energiapuun kuljetusajankohtaa voidaan optimoida arvioimalla puuraaka-aineen kuivumista suhteessa sen laadun heikkenemiseen ja siihen sitoutuneeseen pääomaan. Korkeampien hyötykuormien myötä voidaan alentaa kuljetuskustannuksia, jolla on yhdessä raaka-ainekustannuksien kanssa merkittävä vaikutus energialaitosten sekä sellu- ja paperiteollisuuden kannattavuuteen. Hyötykuormien optimoinnilla voidaan lisäksi pienentää teihin kohdistuvaa rasiitusta ja kuljetuksista aiheutuvaa haittaa erityisesti kaupunkiympäristössä.

Työ perustuu kirjallisuuden pohjalta tehtyyn selvitykseen ja tuloksia on käsitelty ainoastaan yleisimpien ajoneuvoyhdistelmien tapauksissa. Tämän vuoksi esitettyjen tulosten absoluuttiset arvot voivat olla erilaisia muilla ajoneuvoyhdistelmillä. Tutkimuksessa ei ole huomioitu kuinka ajoneuvoyhdistelmien suurinta sallittua kokonaismassaa ja kehystilavuutta käytännössä noudatetaan. Tulevaisuudessa tutkimusta on tarkoitus laajentaa myös kuormien kosteuspitoisuuden ja energiasisällön suhteen erilaisilla puuraaka-aineilla.

6 KIRJALLISUUSLUETTELO

1. Alakangas E.: Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Otamedia Oy, Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 2000, 158 s.
2. Anerud E. & Jirjis R.: Fuel quality of Norway spruce stumps – influence of harvesting technique and storage method. *Scandinavian Journal of Forest Research* 26(2011) 3, 257 - 266.
3. Anon: Hakkuut ja puun kuljetus. Metsätalastollinen vuosikirja, 2014. http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/julkaisut/vsk/2014/vsk14_05.pdf. Viitattu 16.2.2014.
4. Anon: Valtioneuvoston asetus ajoneuvojen käytöstä tiellä annetun asetuksen muuttamisesta, 2013. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130407>. Viitattu 16.2.2014.
5. Korpilahti A.: Puutavara-autot mitta- ja massamuutoksen jälkeen. Metsätehon tulosalvosarja 11/2013. http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja_2013_11_Puutavara-autot_mitta_ja_massamuutoksen_jalkeen_ak.pdf. Viitattu 17.2.2014.
6. Anon: Metsäntutkimuslaitoksen määräys puutavaran mittaukseen liittyvistä yleisistä muuntoluvuista annetun Metsäntutkimuslaitoksen määräyksen liitteen muuttamisesta, 2013. <http://www.finlex.fi/fi/viranomaiset/normi/404001/41503>. Viitattu 21.2.2014.
7. Hakki P. & Verkasalo E.: Structure and properties of wood and woody biomass. Kellomäki S. (toim.), Papermaking Science and Technology, Book 2, Forest resources and sustainable management, Fapet Oy, Helsinki, 2009, 133-215.